

การผลิตซ้ำสี่สำหรับภาพชั้นชั้นที่แสดงบนพื้นหลังที่มีสี

นายชัยรัตน์ จงเจริญสุข

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีทางภาพ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2554  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

COLOUR REPRODUCTION FOR COMPLEX IMAGES PRESENTED  
ON COLOUR BACKGROUND

MR CHAIRAT JONGJARRERNSOOK

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

Department of Imaging and Printing Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การผลิตซ้ำสีสำหรับภาพซ้ำซ้อนที่แสดงบนพื้นหลังที่มีสี

โดย

นายชัยรัตน์ จงเจริญสุข

สาขาวิชา

เทคโนโลยีทางภาพ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุจิตรา สือประสาร

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. อรัญ หาญสืบสาย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุจิตรา สือประสาร)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวาล คูร์พิพัฒน์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(นายธีระ ปิยคุณากร)

ชัยรัตน์ จงเจริญสุข : การผลิตซ้ำสีสำหรับภาพซับซ้อนที่แสดงบนพื้นหลังที่มีสี.  
(COLOUR REPRODUCTION FOR COMPLEX IMAGES PRESENTED ON  
COLOUR BACKGROUND) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร. สุจิตรา สือประสาร,  
91 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของความถี่เชิงระยะทางของภาพที่มีต่อระดับการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลัง และนำ  
ข้อมูลมาประยุกต์ใช้กับ CIECAM02 เพื่อใช้ทำนายค่าสีปรากฏของภาพ ทำการทดลองโดยใช้ตารางหมากรุก  
แทนความถี่เชิงระยะทางจำนวน 9 ค่าคือ 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12 และ 24 CPD ให้ผู้สังเกตปรับสีทดสอบให้มีสี  
ปรากฏตรงกับสีอ้างอิงที่มีตารางหมากรุกล้อมรอบ โดยทั้งสองสีแสดงไว้พร้อมกันบนพื้นหลังที่มีสีบนจอภาพ  
ซีอาร์ที บันทึกค่าสีทดสอบที่ทำให้สีปรากฏตรงกัน ทำซ้ำโดยเปลี่ยนความถี่ของตารางหมากรุกจนครบ 9 ค่า  
และสีต้นของพื้นหลัง 4 สีคือ สีแดง, สีเขียว, สีเหลือง และสีน้ำเงิน นำผลที่ได้มาสร้างสมการเพื่อปรับปรุง  
แบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏที่คำนึงถึงสีพื้นหลังคือ CIECAM02-m1 และ CIECAM02+Induction model  
ให้คำนึงถึงความถี่เชิงระยะทางด้วยเรียกแบบจำลองที่ปรับปรุงใหม่ว่า CIECAM02M1F และ CIECAM02TTF  
ตามลำดับ ทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ปรับปรุงใหม่เปรียบเทียบกับ CIECAM02,  
CIECAM02+Induction model, CIECAM02-m1 และภาพที่ไม่ผ่านกระบวนการใด ๆ โดยให้ผู้สังเกตดูสี  
ปรากฏของภาพผลิตซ้ำจากแบบจำลองต่าง ๆ ซ้ำกัน และภาพที่ไม่ผ่านกระบวนการใด ๆ บนพื้นหลังสีเทา  
เปรียบเทียบกับสีปรากฏของภาพต้นฉบับบนพื้นหลังที่มีสี แล้วให้คะแนนความเหมือน โดยใช้ภาพที่แตกต่างกัน  
4 ภาพ และพื้นหลัง 3 สี จากการทดสอบผลของความถี่เชิงระยะทางต่อระดับการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลังพบว่า  
เมื่อเพิ่มความถี่เชิงระยะทางสูงขึ้นระดับการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลังมีแนวโน้มลดลง โดยมีค่าต่ำสุดที่ความถี่  
เชิงระยะทางเท่ากับ 8 CPD แล้วกลับมีค่าสูงขึ้นเมื่อความถี่เชิงระยะทางเท่า 12 และ 24 CPD และจากผลการ  
ทดสอบประสิทธิภาพพบว่า แบบจำลองที่ปรับปรุงใหม่คือ CIECAM02TTF มีประสิทธิภาพดีกว่า CIECAM02  
และภาพที่ไม่ผ่านกระบวนการใด ๆ ประสิทธิภาพโดยรวมอยู่ลำดับที่ 2 โดยมีประสิทธิภาพดีบนพื้นหลังสี  
ม่วงแดง และภาพที่มีความถี่เชิงระยะทางสูง

ภาควิชา...วิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา...เทคโนโลยีทางภาพ.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
ปีการศึกษา 2554.....

## 5172261823 : MAJOR IMAGING TECHNOLOGY

KEYWORDS : CIECAM02/SPATIAL FREQUENCY/ CHROMATIC BACKGROUND/IMAGES

CHAIRAT JONGJARRERNSOOK : COLOUR REPRODUCTION FOR COMPLEX IMAGES PRESENTED ON COLOUR BACKGROUND. ADVISOR : ASST. PROF. SUCHITRA SUEEPRASAN, Ph.D., 91 pp.

The aim of this research was to study effects of spatial frequency of an image on levels of chromatic induction of color background on which the image is presented. In the experiment, observers were asked to adjust the color of a sole test patch (without chequer board surrounding) to match in color with a reference patch surrounded by chequer board, where both patches were presented on the same background. The same procedures were repeated for 9 different spatial frequencies of chequer board (0, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12 and 24 CPD) and 4 different colors of background (red, green, yellow and blue). The result was used to modify CIECAM02+Induction model and CAM02-m1 to include the effect of changing of chromatic induction of background color due to spatial frequency of image. The new models were named CIECAM02TTF and CIECAM02M1F, respectively. The performance of the new models were tested by asking observers to rate them and another models such as CIECAM02, CIECAM02+Induction model, CAM02-m1 and non processed images in similarity of their reproduction images on a gray background comparing to the original images on the color background. The 4 images which were different in their structure were selected and 3 selected color background were blue, magenta and cyan. The result of the first experiment showed that the levels of chromatic induction of color background decreased when spatial frequency increased from 0–8 CPD, and then increased from the lowest point (8 CPD) when spatial frequencies were 12 and 24 CPD. The performance of one of new models, CIECAM02TTF was good. Its performance was better than CIECAM02. It took the second place in overall performance and worked well in magenta background and high spatial frequency image.

Department : Imaging and Printing Technology

Student's Signature .....

Field of Study : Imaging Technology

Advisor's Signature .....

Academic Year : 2011

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุจิตรา สือประสาร อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้  
ความรู้ตลอดจนแนะนำแนวทางในการแก้ปัญหาต่าง ๆ และผลักดันข้าพเจ้าจนสำเร็จการศึกษา

ขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ ที่สนับสนุนในทุกด้าน ขอขอบคุณพี่น้องและเพื่อน ๆ  
สวณกุลลาบนนท์ และพี่น้องชาวเกษตรศาสตร์ ที่คอยสนใจไต่ถามถึงความก้าวหน้าทางการศึกษา  
ขอขอบคุณที่ให้กำลังใจมาโดยตลอด ขอขอบคุณพี่ ๆ และคุณป้าที่ฝ่ายธุรการภาควิชาที่ช่วยเหลือเรื่อง  
เอกสารต่าง ๆ และที่ขาดไม่ได้คือ ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ชาวจุฬา ฯ และเกษตร ฯ ที่มา  
ช่วยทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
สารบัญแผนภูมิ.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	4
2.1.1 Viewing field.....	4
2.1.2 Simultaneous contrast.....	5
2.1.3 แบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏ.....	7
2.1.3.1 CIECAM02.....	7
2.1.3.1.1 การปรับปรุง CIECAM02 เพื่อคำนวณค่าสีพื้นหลัง.....	13
2.1.3.1.1.1 CIECAM02 with Induction Model.....	13
2.1.3.1.1.2 CIECAM02-m1 และ CIECAM02-m2.....	15
2.1.4 ความถี่เชิงระยะทาง.....	17
2.1.4.1 ความถี่เชิงระยะทางภายนอกของภาพ.....	17
2.1.4.2 การกรองความถี่ในโดเมนความถี่ด้วยฟิลเตอร์.....	19
2.1.4.3 ฟิลเตอร์.....	19
2.1.5 วิธีการมองเปรียบเทียบภาพ.....	22

	หน้า
2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	25
3.1 อุปกรณ์.....	25
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	25
3.2.1 การทดสอบผลของความถี่เชิงระยะทางต่อระดับการเหนี่ยวนำสีของ สีพื้นหลัง.....	26
3.2.1.1 การเตรียมอุปกรณ์.....	26
3.2.1.2 การเตรียมการทดลอง.....	28
3.2.1.2.1 สีอ้างอิงและสีทดสอบ.....	29
3.2.1.2.2 ตารางหมากรุก.....	30
3.2.1.2.3 พื้นหลัง.....	30
3.2.1.2.4 แท่งปรับค่าสี RGB.....	30
3.2.1.2.5 สภาวะการมองเห็น.....	31
3.2.1.3 การทดลอง.....	31
3.2.1.4 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	32
3.2.2 การปรับปรุงแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏด้วยสมการความถี่เชิง ระยะทาง.....	32
3.2.2.1 การสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เชิงระยะทางกับ ระดับการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลัง.....	32
3.2.2.1.1 CIECAM02TTF.....	33
3.2.2.1.2 CIECAM02M1F.....	35
3.2.2.2 การหาค่าความถี่เชิงระยะทางของแต่ละพิกเซลในภาพ.....	37
3.2.3 การทดสอบประสิทธิภาพ.....	40
3.2.3.1 การเตรียมการทดลอง.....	40
3.2.3.1.1 ภาพต้นฉบับ.....	40
3.2.3.1.2 ภาพผลิตซ้ำ.....	43
3.2.3.1.3 พื้นหลัง.....	46
3.2.3.1.4 สภาวะการมองเห็น.....	47
3.2.3.2 การทดลอง.....	47



3.2.3.3	สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	48
บทที่ 4	ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	49
4.1	ผลการทดสอบผลของความถี่เชิงระยะทางต่อระดับการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลัง.....	49
4.1.1	ความแม่นยำของผู้สังเกต.....	49
4.1.2	ผลของความถี่เชิงระยะทางต่อระดับการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลัง.....	51
4.2	ผลการปรับปรุงแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏด้วยสมการความถี่เชิงระยะทาง.....	54
4.2.1	CIECAM02TTF.....	54
4.2.2	CIECAM02M1F.....	57
4.3	ผลการทดสอบประสิทธิภาพ.....	58
4.3.1	อิทธิพลของพื้นหลังและอิทธิพลของภาพ.....	58
4.3.2	ประสิทธิภาพของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำเมื่อประเมินตามสีของพื้นหลัง.....	61
4.3.3	ประสิทธิภาพของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำเมื่อประเมินตามภาพ.....	67
4.3.4	ประสิทธิภาพโดยรวม.....	75
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	82
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	82
5.1.1	ผลการทดสอบผลของความถี่เชิงระยะทางต่อระดับการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลัง.....	83
5.1.2	ผลการปรับปรุงแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏด้วยสมการความถี่เชิงระยะทาง.....	83
5.1.2.1	CAM02TTF.....	83
5.1.2.2	CAM02M1F.....	85
5.1.3	ผลการทดสอบประสิทธิภาพ.....	86
5.1.3.1	ประสิทธิภาพของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำเมื่อประเมินตามสีของพื้นหลัง.....	86
5.1.3.2	ประสิทธิภาพของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำเมื่อประเมินตามภาพ.....	86
5.1.3.3	ประสิทธิภาพโดยรวม.....	87
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	87

รายการอ้างอิง.....	89
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	91

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่สภาวะการมองเห็นสำหรับ CIECAM02.....	8
ตารางที่ 3.1 ข้อมูลนำเข้าสภาวะการมองเห็นในการทดสอบผลของความถี่เชิง ระยะทางต่อระดับการเหนียวนำสีของสีพื้นหลังสำหรับ CIECAM02TT และ CIECAM02M1.....	36
ตารางที่ 3.2 ข้อมูลนำเข้าสำหรับ CIECAM02 ในสภาวะการมองเห็นที่ 1.....	44
ตารางที่ 3.3 ข้อมูลนำเข้าสภาวะการมองเห็นที่ 2.....	44
ตารางที่ 4.1 ค่าความแตกต่างสีเฉลี่ยในการทำซ้ำของผู้สังเกต.....	49
ตารางที่ 4.2 ค่าความแตกต่างสีเฉลี่ยของกลุ่มผู้สังเกต.....	50
ตารางที่ 4.3 ระยะห่างระหว่างค่าสี $a^*b^*$ ของสีทดสอบกับสีอ้างอิงบนปริภูมิสี CIELAB ที่ ความถี่เชิงระยะทางต่าง ๆ บนพื้นหลัง 4 สี.....	54
ตารางที่ 4.4 ค่า TT1 ของพื้นหลัง 4 สีคือ แดง, เขียว, เหลือง และน้ำเงิน.....	56
ตารางที่ 4.5 ค่า pc และ ph.....	57
ตารางที่ 4.6 Coefficient of Variation (CV%) ของผู้สังเกต.....	59
ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ บนพื้นหลังสีน้ำเงิน.....	62
ตารางที่ 4.8 ประสิทธิภาพของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ บนพื้นหลังสีม่วงแดง.....	64
ตารางที่ 4.9 ประสิทธิภาพของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ บนพื้นหลังสีเขียวฟ้า.....	66
ตารางที่ 4.10 ประสิทธิภาพของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ ของภาพร้านค้า.....	68
ตารางที่ 4.11 ประสิทธิภาพของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ ของภาพภูเขา.....	70
ตารางที่ 4.12 ประสิทธิภาพของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ ของภาพขวด.....	71
ตารางที่ 4.13 ประสิทธิภาพของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ ของภาพวงล้อ.....	73
ตารางที่ 4.14 ประสิทธิภาพโดยรวมของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำ.....	75
ตารางที่ 4.15 Background dependency ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำ.....	77
ตารางที่ 4.16 Image dependency ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำ.....	79

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 Viewing field ประกอบด้วย Test stimulus, Induction field, Background และ Surround.....	4
ภาพที่ 2.2 ภาพตัวอย่างปรากฏการณ์ Simultaneous contrast (1) แผ่นสีสี่เทาเหมือนกัน 2 แผ่นบนพื้นหลังสีเทา (2,3) แผ่นสีสี่เทาเหมือนกัน 2 แผ่น แผ่นหนึ่งวางบนพื้นหลังสีดำ และอีกแผ่นหนึ่งวางบนพื้นหลังสีขาว ตามลำดับ.....	5
ภาพที่ 2.3 ภาพตัวอย่างปรากฏการณ์ Simultaneous contrast (1) แผ่นสีสี่เทาเหมือนกัน 2 แผ่นบนพื้นหลังสีเทา (2,3) แผ่นสีสี่เทาเหมือนกัน 2 แผ่น แผ่นหนึ่งวางบนพื้นหลังสีน้ำเงินเข้ม และอีกแผ่นหนึ่งวางไว้บนพื้นหลังสีเขียวอ่อน ตามลำดับ...	6
ภาพที่ 2.4 (ก) แผ่นสีสี่เหลี่ยมสีแดงวางบนแถบสีสี่เหลี่ยมและสีน้ำเงิน (ข) แผ่นสีสี่เหลี่ยมสีเขียวฟ้าวางบนแถบสีสี่เหลี่ยมและสีน้ำเงิน.....	6
ภาพที่ 2.5 (ก) ความถี่ 1 CPD (ข) ความถี่ 2 CPD.....	17
ภาพที่ 2.6 (ก) กราฟระหว่างตำแหน่งพิกเซลกับระดับความสว่าง ซึ่งสามารถแยกองค์ประกอบออกเป็นคลื่นไซน์และโคไซน์ที่มีความถี่แตกต่างกัน 4 ค่า (ข) ความถี่เชิงระยะทางที่ได้จากการแปลงฟูเรียร์ภาพต้นฉบับทางซ้าย ภาพขวาล่างแสดงกราฟ 3 มิติของความถี่เชิงระยะทาง ภาพขวาบนแสดงภาพมูบมูนของกราฟ 3 มิติ.....	18
ภาพที่ 2.7 (ก) ภาพต้นฉบับ (ข) ฟิลเตอร์ lowpass และภาพผลลัพธ์ (ค) ฟิลเตอร์ highpass และภาพผลลัพธ์.....	20
ภาพที่ 2.8 (ก) ภาพสามมิติของฟิลเตอร์ Ideal (ข) ฟิลเตอร์ Ideal เมื่อแสดงเป็นภาพ (ค) ภาพตัดขวางของฟิลเตอร์ Ideal.....	20
ภาพที่ 2.9 (ก) ภาพสามมิติของฟิลเตอร์ Butterworth (ข) ฟิลเตอร์ Butterworth เมื่อแสดงเป็นภาพ (ค) ภาพตัดขวางของฟิลเตอร์ Butterworth .....	21
ภาพที่ 2.10 (ก) ภาพสามมิติของฟิลเตอร์ Gaussian (ข) ฟิลเตอร์ Gaussian เมื่อแสดงเป็นภาพ (ค) ภาพตัดขวางของฟิลเตอร์ Gaussian.....	22
ภาพที่ 3.1 ค่าสี XYZ ของสีขาวจอกภาพในช่วงเวลา 2 ชั่วโมง.....	26
ภาพที่ 3.2 ตำแหน่งสีทดสอบบนจอภาพซีอาร์ที.....	27

ภาพที่ 3.3 ตำแหน่งเครื่องสเปกโทรเรดิโอมิเตอร์ขณะวัดค่าสีที่แสดงบนจอภาพซีอาร์ที	
(ก) ภาพด้านหน้า (ข) ภาพด้านข้าง.....	28
ภาพที่ 3.4 จอภาพขณะทำการทดลองประกอบด้วย (1.1) สีอ้างอิง, (1.2) สีทดสอบที่ สามารถปรับสีได้, (2) ตารางหมากรุก, (3) พื้นหลัง และ (4) แท่งปรับค่าสี RGB.....	28
ภาพที่ 3.5 สีอ้างอิงและสีทดสอบที่มีขนาดต่างกันขึ้นกับความถี่เชิงระยะทาง.....	29
ภาพที่ 3.6 (ก) ขนาดสีทดสอบที่เล็กที่สุดแสดงบนตารางหมากรุกความถี่เท่ากับ 24 CPD (ข) ขนาดสีทดสอบที่ใหญ่ที่สุดแสดงบนตารางหมากรุกความถี่เท่ากับ 1 CPD..	29
ภาพที่ 3.7 ตารางหมากรุกความถี่ต่าง ๆ.....	30
ภาพที่ 3.8 แท่งปรับค่า RGB และตัวอย่างสีทดสอบที่ได้จากการผสมค่า RGB.....	31
ภาพที่ 3.9 ตำแหน่งจอภาพและผู้สังเกต (ก) ภาพด้านบน (ข) ภาพด้านข้าง.....	31
ภาพที่ 3.10 (ก) ภาพตารางหมากรุก และ (ข,ค) ภาพฟูเรียร์ของตารางหมากรุกที่ถูกแบ่ง ความถี่เชิงระยะทางโดยฟิลเตอร์ Butterworth และฟิลเตอร์ Gaussian ตามลำดับ.....	38
ภาพที่ 3.11 ขั้นตอนการหา Threshold (ก) แสดงการแบ่งความถี่เชิงระยะทางและภาพ ผลลัพธ์ (ก1) ภาพต้นฉบับ (ก2) ภาพฟูเรียร์การแบ่งความถี่เชิง ระยะทาง (ก3) ภาพผลลัพธ์ (ข) แสดงการหา Threshold ด้วยการนำ ภาพต้นฉบับลบภาพผลลัพธ์จากการแบ่งความถี่ (ข1) ภาพต้นฉบับ (ข2) ภาพผลลัพธ์จากการแบ่งความถี่ (ข3) ภาพ absolute ผลต่าง เพื่อ หาค่า Threshold .....	38
ภาพที่ 3.12 จอภาพขณะทำการทดลองประกอบด้วย (1) ภาพต้นฉบับ, (2) ภาพผลิตซ้ำ (3.1) พื้นหลังที่มีสี และ (3.2) พื้นหลังสีเทา.....	40
ภาพที่ 3.13 ภาพต้นฉบับจำนวน 4 ภาพ (1) ขวด, (2) ภูเขา, (3) ร้านค้า และ (4) วงล้อ....	41
ภาพที่ 3.14 พิกเซลที่อยู่ในช่วงความถี่เชิงระยะทาง (1) 0-2 CPD, (2) 2-8 CPD และ (3) 8-24 CPD ของภาพร้านค้า แสดงโดยใช้สีดำ.....	41
ภาพที่ 3.15 พิกเซลที่อยู่ในช่วงความถี่เชิงระยะทาง (1) 0-2 CPD, (2) 2-8 CPD และ (3) 8-24 CPD ของภาพภูเขา แสดงโดยใช้สีดำ.....	42
ภาพที่ 3.16 พิกเซลที่อยู่ในช่วงความถี่เชิงระยะทาง (1) 0-2 CPD, (2) 2-8 CPD และ (3) 8-24 CPD ของภาพขวด แสดงโดยใช้สีดำ.....	42

ภาพที่ 3.17 พิกเซลที่อยู่ในช่วงความถี่เชิงระยะทาง (1) 0-2 CPD, (2) 2-8 CPD และ (3) 8-24 CPD ของภาพวงล้อ แสดงโดยใช้สีดำ.....	43
ภาพที่ 3.18 ตำแหน่งจอภาพและผู้สังเกต 1) ภาพด้านบน 2) ภาพด้านข้าง.....	48
ภาพที่ 4.1 กราฟค่าสีเฉลี่ยของแผ่นสีทดสอบที่ทำให้มีสีปรากฏเหมือนกับสีอ้างอิงที่มีความถี่เชิงระยะทางต่างกันบนพื้นหลังสีแดงบนปริภูมิสี CIELAB (n) แสดงทิศทางการปรับค่าสีเมื่อความถี่เชิงระยะทางสูงขึ้น (ข) แสดงตำแหน่งค่าสี.....	52
ภาพที่ 4.2 กราฟค่าสีเฉลี่ยของแผ่นสีทดสอบที่ทำให้มีสีปรากฏเหมือนกับสีอ้างอิงที่มีความถี่เชิงระยะทางต่างกันบนพื้นหลังสีเขียวบนปริภูมิสี CIELAB (n) แสดงทิศทางการปรับค่าสีเมื่อความถี่เชิงระยะทางสูงขึ้น (ข) แสดงตำแหน่งค่าสี.....	52
ภาพที่ 4.3 กราฟค่าสีเฉลี่ยของแผ่นสีทดสอบที่ทำให้มีสีปรากฏเหมือนกับสีอ้างอิงที่มีความถี่เชิงระยะทางต่างกันบนพื้นหลังสีเหลืองบนปริภูมิสี CIELAB (n) แสดงทิศทางการปรับค่าสีเมื่อความถี่เชิงระยะทางสูงขึ้น (ข) แสดงตำแหน่งค่าสี.....	53
ภาพที่ 4.4 กราฟค่าสีเฉลี่ยของแผ่นสีทดสอบที่ทำให้มีสีปรากฏเหมือนกับสีอ้างอิงที่มีความถี่เชิงระยะทางต่างกันบนพื้นหลังสีน้ำเงินบนปริภูมิสี CIELAB (n) แสดงทิศทางการปรับค่าสีเมื่อความถี่เชิงระยะทางสูงขึ้น (ข) แสดงตำแหน่งค่าสี.....	53
ภาพที่ 4.5 ระยะห่างระหว่างค่า $a^*b^*$ ของสีทดสอบกับสีอ้างอิงที่ความถี่ต่าง ๆ บนพื้นหลัง 4 สี.....	55
ภาพที่ 4.6 กราฟค่าความแตกต่างสีระหว่างสีทดสอบกับสีอ้างอิงที่ความถี่ต่าง ๆ บนพื้นหลัง 4 สี และเส้นสมการที่ได้จากข้อมูลดังกล่าว.....	55
ภาพที่ 4.7 การหาสมการค่า pc และ ph.....	57
ภาพที่ 4.8 ค่า z-scores ของภาพผลิตซ้ำที่ไม่ผ่านกระบวนการใด ๆ แยกตามชนิดของภาพ.....	59
ภาพที่ 4.9 ค่า z-scores ของภาพผลิตซ้ำที่ไม่ผ่านกระบวนการใด ๆ แยกตามสีพื้นหลัง....	59
ภาพที่ 4.10 ค่า z-scores ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ บนพื้นหลังสีน้ำเงิน.....	61
ภาพที่ 4.11 ค่า z-scores ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ ของแต่ละภาพบนพื้นหลังสีน้ำเงิน.....	62
ภาพที่ 4.12 ค่า z-scores ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ บนพื้นหลังสีม่วงแดง.....	63
ภาพที่ 4.13 ค่า z-scores ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ ของแต่ละภาพบนพื้นหลังสีม่วงแดง.....	64

ภาพที่ 4.14 ค่า z-scores ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ บนพื้นหลังสี่เหลี่ยมฟ้า.....	65
ภาพที่ 4.15 ค่า z-scores ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ ของแต่ละภาพบนพื้นหลัง สี่เหลี่ยมฟ้า.....	65
ภาพที่ 4.16 ค่า z-scores ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ ของภาพร้านค้า.....	67
ภาพที่ 4.17 ค่า z-scores ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ ของภาพร้านค้าบนแต่ละ สี่พื้นหลัง.....	68
ภาพที่ 4.18 ค่า z-scores ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบของภาพภูเขา.....	69
ภาพที่ 4.19 ค่า z-scores ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ ของภาพภูเขาบนแต่ละ สี่พื้นหลัง.....	69
ภาพที่ 4.20 ค่า z-scores ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ ของภาพขวิด.....	71
ภาพที่ 4.21 ค่า z-scores ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ ของภาพขวิดบนแต่ละสี่ พื้นหลัง.....	71
ภาพที่ 4.22 ค่า z-scores ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ ของภาพวงล้อ.....	72
ภาพที่ 4.23 ค่า z-scores ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ ของภาพวงล้อบนแต่ละสี่ พื้นหลัง.....	73
ภาพที่ 4.24 ค่า z-scores รวมทุกภาพบนทุกสี่พื้นหลังของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 วิธี....	75
ภาพที่ 4.25 ค่า z-scores ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำในแต่ละพื้นหลัง.....	77
ภาพที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า z-scores กับ Background dependency.....	78
ภาพที่ 4.27 z-scores ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำของแต่ละภาพ.....	79
ภาพที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า z-scores กับ Image dependency.....	80

## สารบัญแผนภูมิ

	หน้า
แผนภูมิที่ 2.1 ขั้นตอนการทำงานของ CIECAM02.....	13
แผนภูมิที่ 2.2 ขั้นตอนการเตรียมข้อมูลนำเข้าไปกับ CIECAM02 โดยใช้ Induction model.....	14
แผนภูมิที่ 2.3 การทำงานของ CIECAM02-m1.....	16
แผนภูมิที่ 2.4 ขั้นตอนการกรองความถี่ด้วยฟิลเตอร์.....	19
แผนภูมิที่ 3.1 การหาระยะห่างระหว่างสีทดสอบและสีอ้างอิง.....	34
แผนภูมิที่ 3.2 ขั้นตอนการคำนวณค่าสีปรากฏด้วย CIECAM02TTF.....	35
แผนภูมิที่ 3.3 ขั้นตอนการหาค่า p เพื่อสร้างสมการหาค่า pc และ ph.....	37
แผนภูมิที่ 3.4 การคำนวณค่าสีของภาพผลิตซ้ำด้วยแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏ.....	45



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีการใช้สื่อหลากหลายประเภท เช่น โทรทัศน์, คอมพิวเตอร์ และ สิ่งพิมพ์ ในการนำเสนอข้อมูลข่าวสาร การโฆษณาสินค้าต่าง ๆ ซึ่งมีการออกแบบตัวอักษร รูปภาพประกอบ มีการใช้พื้นหลังด้วยสีที่หลากหลายนานัปการ เพื่อความสวยงามดึงดูดสายตา ซึ่งผู้ที่จัดทำข้อมูลเหล่านี้ย่อมมีความต้องการให้ผู้รับข้อมูลเหล่านี้ได้รับข้อมูลที่ต้องการ ดังนั้นแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏ (colour appearance model) จึงเป็นส่วนสำคัญที่ใช้คำนวณหาค่าสีปรากฏเพื่อการผลิตสีข้ามสื่อให้มีสีปรากฏคงที่ โดยคำนึงถึงความถูกต้องแม่นยำของค่าสีปรากฏนั้น แบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณค่าสีปรากฏต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อสีที่ปรากฏ ซึ่งปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่งคือ พื้นหลัง

อิทธิพลของพื้นหลังที่มีต่อสีปรากฏของแผ่นสีที่อยู่บนพื้นหลัง มี 2 ลักษณะ คือ พื้นหลังเหนี่ยวนำให้เกิดสีที่เป็นคู่ตรงข้ามกับสีของพื้นหลังบนสีทดสอบที่อยู่บนพื้นหลังนั้น อีกกรณีหนึ่งคือ พื้นหลังเหนี่ยวนำให้เกิดสีที่ใกล้เคียงหรือกลมกลืนกับสีของพื้นหลังบนสีทดสอบที่อยู่บนพื้นหลังนั้น เรียกปรากฏการณ์ทั้งสองนี้ว่า Simultaneous contrast และ Assimilation ตามลำดับ [1] แต่แบบจำลองการปรากฏสีที่พัฒนาโดย CIE ที่เรียกว่า CIECAM02 [1] ซึ่งเป็นแบบจำลองการปรากฏสีที่เป็นมาตรฐานในขณะนี้กลับไม่สามารถคำนวณค่าสีที่เปลี่ยนไปเนื่องจากปรากฏการณ์เหล่านี้ได้สมบูรณ์ เนื่องจาก CIECAM02 คำนึงถึงเพียงระดับความสว่างของพื้นหลังเท่านั้น โดยไม่คำนึงถึงสีของพื้นหลัง จึงมีความพยายามในการพัฒนา CIECAM02 ให้สามารถคำนวณค่าสีปรากฏที่ได้รับอิทธิพลจากพื้นหลังที่มีสี โดยงานวิจัยของ Wu และ Wardman [2] ได้นำเสนอการใช้ CIECAM02 ร่วมกับสมการปรับค่าสีขาวอ้างอิง ซึ่งนำมาจากแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏ Hunt94 ซึ่งเป็นแบบจำลองการปรากฏสีที่ซับซ้อน สมการนี้จะนำค่าสีของพื้นหลังมาใช้คำนวณค่าสีปรากฏด้วย จากผลการทดลองพบว่าสามารถนำสมการนี้ปรับใช้กับ CIECAM02 เพื่อทำนายค่าสีปรากฏของสีทดสอบบนพื้นหลังที่มีสีได้เป็นอย่างดี และ Binghua และคณะ [3] ได้สร้างขั้นตอนเพื่อเตรียมข้อมูลนำเข้าค่าสี XYZ สำหรับ CIECAM02 เพื่อคำนวณระดับการเหนี่ยวนำสีและทิศทางการเหนี่ยวนำสีจากพื้นหลังบนปริภูมิสี CIELAB ได้ โดยเรียกขั้นตอนนี้ว่า Induction model ซึ่งจากการทดลองพบว่าให้ผลดีเช่นกัน

ในชีวิตประจำวัน สื่อสิ่งพิมพ์ และอินเทอร์เน็ต นิยมใช้รูปภาพหรือภาพถ่ายแสดงบนพื้นหลังที่มีสี ซึ่งแตกต่างไปจากสภาวะในการทดลองที่ใช้สีทดสอบที่เป็นเพียงแผ่นสีบนพื้นหลัง ทั้งนี้ระดับ

การเหนี่ยวนำของพื้นหลังที่มีต่อภาพขึ้นอยู่กับโครงสร้างของข้อมูลภายในภาพ ซึ่งความถี่เชิงระยะทาง (spatial frequency) เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้อธิบายโครงสร้างของภาพที่ส่งผลต่อระดับการเปลี่ยนแปลงค่าสีปรากฏของสีทดสอบเนื่องจากการเหนี่ยวนำของพื้นหลังที่มีสีอื่น [4-6]

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเพื่อประยุกต์ใช้ CIECAM02 ในการคำนวณค่าสีปรากฏของภาพบนพื้นหลังที่มีสีโดยใช้ CIECAM02 ร่วมกับสมการความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เชิงระยะทางกับระดับการเหนี่ยวนำสีจากสีพื้นหลัง โดยตั้งสมมติฐานว่าภาพประกอบด้วยแผ่นสีจำนวนมาก ดังนั้นระดับการเปลี่ยนแปลงค่าสีปรากฏของภาพเนื่องจากการเหนี่ยวนำของพื้นหลังที่มีสีจึงหมายถึงระดับการเปลี่ยนแปลงค่าสีปรากฏของแผ่นสีแต่ละแผ่นที่ประกอบเป็นภาพเนื่องจากการเหนี่ยวนำสีของพื้นหลัง ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีปรากฏของสีทดสอบที่เปลี่ยนแปลงกับความถี่เชิงระยะทาง โดยให้ผู้สังเกตดูสีทดสอบที่แสดงบนจอภาพคอมพิวเตอร์ ปรับสีทดสอบที่ไม่มีตารางหมากรุกล้อมรอบให้มีสีปรากฏตรงกับสีอ้างอิงที่มีตารางหมากรุกล้อมรอบ โดยสีทั้งสองแสดงไว้พร้อมกันบนพื้นหลังที่มีสี บันทึกค่าสีและความถี่ของตารางหมากรุก นำข้อมูลที่ได้มาสร้างสมการเพื่อนำมาใช้ร่วมกับ CIECAM02 ในการคำนวณค่าสีปรากฏของภาพบนพื้นหลังที่มีสี และทดสอบผลการผลิตภาพสีเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่น ๆ ด้วยผู้สังเกต

ผลของงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในการผลิตภาพซ้ำให้มีสีปรากฏตรงกับภาพต้นฉบับที่อยู่บนพื้นหลังที่มีสีแตกต่างกันได้ เช่น ภาพสินค้า, ภาพโฆษณา และภาพศิลปะที่แสดงบนเว็บไซต์ที่มีการตกแต่งสีของเว็บไซต์ที่แตกต่างกัน รวมถึงการออกแบบฉลาก, สติกเกอร์ และลวดลายของเสื้อผ้า เป็นต้น

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาผลของความถี่เชิงระยะทางของภาพต่อระดับการเหนี่ยวนำสีของพื้นหลังที่มีสีอื่น
2. ประยุกต์การใช้ CIECAM02 สำหรับผลิตภาพสีบนพื้นหลังที่มีสีอื่น

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของความถี่เชิงระยะทางของภาพต่อระดับการเหนี่ยวนำสีของพื้นหลังที่มีสีแล้วนำผลที่ได้มาประยุกต์ใช้กับ CIECAM02 เพื่อทำนายค่าสีปรากฏของภาพ และทดสอบประสิทธิภาพ โดยมีขอบเขตการวิจัยดังนี้

### 1. การทดสอบผลของความถี่เชิงระยะทางต่อระดับการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลัง

ทำการทดสอบโดยใช้สีอ้างอิงที่ล้อมรอบด้วยตารางหมากรุกที่มีความถี่แตกต่างกันประมาณ 10 ค่าเพื่อแทนความถี่เชิงระยะทางของภาพ คลอบคลุมความถี่เชิงระยะทางต่ำจนถึงความถี่เชิงระยะทางสูง ให้ผู้สังเกตปรับสีทดสอบให้สีตรงกันบนพื้นหลังที่มีสีสันแตกต่างกัน 4 สีหลักตามทฤษฎีคู่สีตรงข้าม คือ สีแดง, สีเขียว, สีเหลือง และสีน้ำเงิน

### 2. การปรับปรุงแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏด้วยสมการความถี่เชิงระยะทาง

นำผลที่ได้จากการทดสอบผลของความถี่เชิงระยะทางต่อระดับการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลัง มาสร้างสมการความถี่เชิงระยะทางประยุกต์ใช้กับ CIECAM02 งานวิจัยนี้สร้างแบบจำลอง 2 แบบที่ปรับปรุงจาก CIECAM02-m1 [2] และ CIECAM02+Induction model [3] เพื่อการทำนายค่าสีปรากฏที่เปลี่ยนไปเนื่องจากอิทธิพลของสีพื้นหลังและความถี่เชิงระยะทางของภาพ

### 3. การทดสอบประสิทธิภาพ

ทดสอบประสิทธิภาพของสมการด้วยการใช้สมการที่ได้จากการทดลองร่วมกับ CIECAM02 ในการทำนายค่าสีปรากฏของภาพต้นฉบับที่อยู่บนพื้นหลังที่มีสี เพื่อผลิตภาพบนพื้นหลังสีเทาให้มีสีปรากฏตรงกัน โดยให้ผู้สังเกตเปรียบเทียบสีปรากฏของภาพต้นฉบับบนพื้นหลังที่มีสีกับภาพผลิตซ้ำบนพื้นหลังสีเทา และให้ผู้สังเกตให้คะแนนระดับความเหมือนของสี เปรียบเทียบกับผลการผลิตภาพด้วย CIECAM02 ที่ไม่ผ่านวิธีการที่เสนอในงานวิจัยนี้

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เชิงระยะทางของภาพกับค่าสีปรากฏของสีทดสอบที่เปลี่ยนไปเนื่องจากการเหนี่ยวนำของพื้นหลังที่มีสีสัน
2. วิธีการประยุกต์ CIECAM02 สำหรับผลิตภาพสีบนพื้นหลังที่มีสี

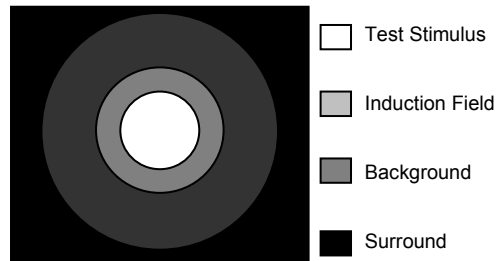
## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แนวคิดและทฤษฎี

##### 2.1.1 Viewing field

เนื่องจากขณะมองวัตถุขึ้นหนึ่งบริเวณอื่น ๆ โดยรอบที่อยู่ในสายตาของเราส่งผลต่อสีปรากฏของวัตถุ Hunt [7] ได้ให้นิยามบริเวณที่อยู่ในสายตาของเราที่ส่งผลต่อสีปรากฏ แบ่งเป็น 4 ส่วนสำคัญ ซึ่งต่อถูกนำมาใช้ในแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏเกือบทุกแบบ รายละเอียดมีดังนี้



ภาพที่ 2.1 Viewing field ประกอบด้วย Test stimulus, Induction field, Background และ Surround

1. Stimulus คือบริเวณที่ต้องการทราบค่าสี ซึ่งมีขนาดได้หลากหลายแต่โดยปกติในการทดลองมักจะเป็นแผ่นสีขนาดประมาณมุมมอง 2 องศา แสดงด้วยสีขาวในภาพที่ 2.1

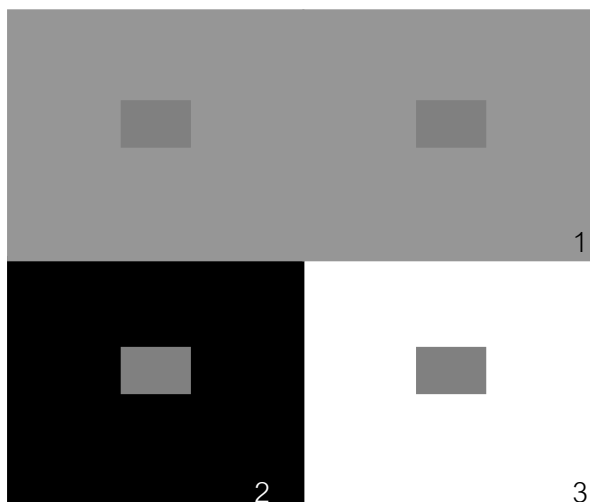
2. Proximal field หรือ induction field คือ บริเวณรอบสีทดสอบซึ่งครอบคลุมมุมมองประมาณ 2 องศาออกไปจากขอบของ stimulus แสดงด้วยสีเทาอ่อนดังภาพที่ 2.1 ซึ่งบริเวณนี้ส่วนมากจะถูกรวมเข้ากับพื้นหลัง

3. Background หรือพื้นหลัง คือ บริเวณที่อยู่โดยรอบ stimulus หรือ induction field ออกไปเป็นมุมมองประมาณ 10 องศา แสดงด้วยสีเทาเข้มดังภาพที่ 2.1

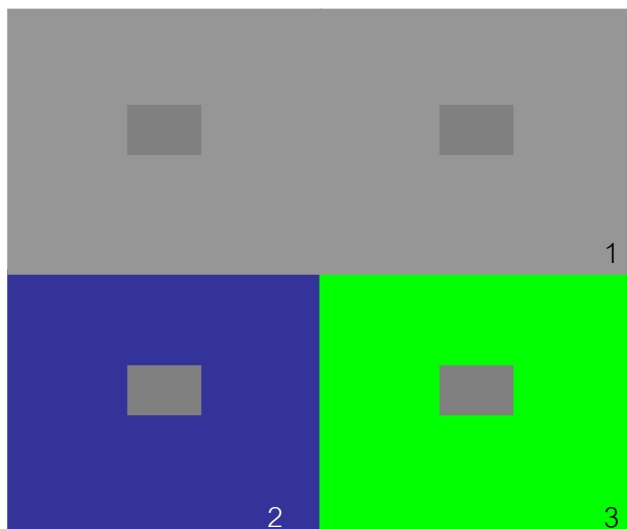
4. surround หรือกำหนดเป็นบริเวณที่อยู่โดยรอบพื้นหลังออกไป แสดงด้วยสีดำดังภาพที่ 2.1 โดยปกติหมายถึงบริเวณทั้งหมดของห้องทดสอบ สามารถแบ่ง surround 3 ประเภทตามลักษณะการดูสี ดูสีงานพิมพ์ ด้วยแสงไฟภายในห้อง (average), ดูจอภาพคอมพิวเตอร์ในห้องมืด (dim) และการฉายสไลด์ในห้องมืด (dark)

### 2.1.2 Simultaneous contrast

Simultaneous contrast [1] เป็นปรากฏการณ์ที่สีปรากฏของแผ่นสีเปลี่ยนไปเนื่องจากอิทธิพลของสีของพื้นหลัง โดยสีพื้นหลังจะเหนี่ยวนำให้เราเห็นสีคู่ตรงข้ามตามทฤษฎีสีคู่ตรงข้าม (opponent-colours theory) ของสีพื้นหลังบนแผ่นสีที่อยู่บนพื้นหลังนั้น โดยพื้นหลังที่มีมืดจะเหนี่ยวนำให้แผ่นสีที่วางอยู่บนพื้นหลังนั้นดูสว่าง, พื้นหลังที่สว่างจะเหนี่ยวนำให้เห็นแผ่นสีมีมืดลง, พื้นหลังสีแดงจะเหนี่ยวนำให้แผ่นสีติดสีเขียว, พื้นหลังสีเขียวจะเหนี่ยวนำให้แผ่นสีติดสีแดง, พื้นหลังสีเหลืองจะเหนี่ยวนำให้แผ่นสีติดน้ำเงิน และพื้นหลังสีน้ำเงินจะเหนี่ยวนำให้แผ่นสีติดสีเหลือง ยกตัวอย่างเช่น แผ่นสีสีเทาเหมือนกัน 2 แผ่น แผ่นหนึ่งวางไว้บนพื้นหลังสีดำ อีกแผ่นหนึ่งวางไว้บนพื้นหลังสีขาว เราจะเห็นว่าแผ่นสีสีเทาที่วางบนพื้นหลังสีดำสว่างกว่าแผ่นสีสีเทาที่วางบนพื้นหลังสีขาว ดังภาพที่ 2.2 และถ้านำแผ่นสีสีเทาเหมือนกัน 2 แผ่น แผ่นหนึ่งวางไว้บนพื้นหลังสีน้ำเงินเข้ม อีกแผ่นหนึ่งวางไว้บนพื้นหลังสีเขียวอ่อน เราจะเห็นว่าแผ่นสีสีเทาที่วางบนพื้นหลังสีน้ำเงินเข้มมีสีอมเหลืองและดูสว่างกว่าแผ่นสีสีเทาที่วางบนพื้นหลังสีเขียวอ่อนซึ่งเราจะเห็นแผ่นสีดูอมแดงและดูมืดกว่า ดังภาพที่ 2.3 เป็นต้น

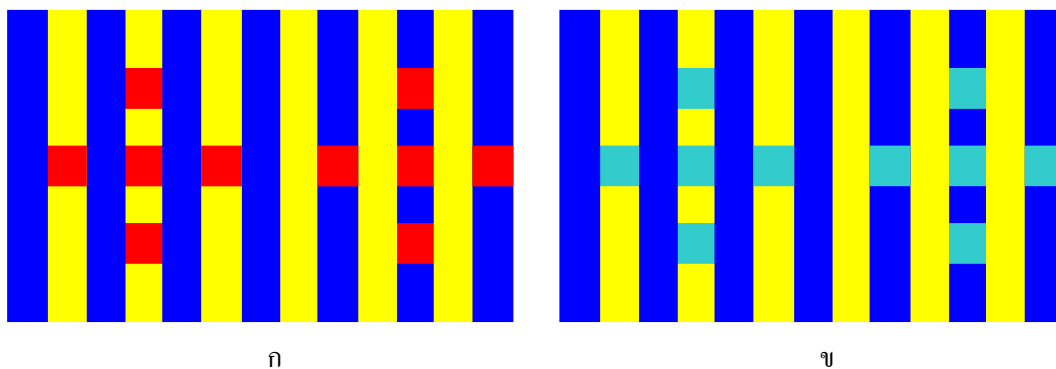


ภาพที่ 2.2 ภาพตัวอย่างปรากฏการณ์ Simultaneous contrast (1) แผ่นสีสีเทาเหมือนกัน 2 แผ่น บนพื้นหลังสีเทา (2,3) แผ่นสีสีเทาเหมือนกัน 2 แผ่นบน แผ่นหนึ่งวางบนพื้นหลังสีดำ และอีกแผ่นหนึ่งวางบนพื้นหลังสีขาว ตามลำดับ



ภาพที่ 2.3 ภาพตัวอย่างปรากฏการณ์ Simultaneous contrast (1) แผ่นสีเทาเหมือนกัน 2 แผ่นบนพื้นหลังสีเทา (2) แผ่นสีสีเทาเหมือนกัน 2 แผ่นหนึ่งวางบนพื้นหลังสีน้ำเงินเข้ม และอีกแผ่นหนึ่งวางบนพื้นหลังสีเขียวย่อมน ตามลำดับ

Robertson แสดงให้เห็นว่า Simultaneous contrast เป็นปรากฏการณ์ที่ขึ้นกับโครงสร้างของพื้นที่ด้วย โดยเมื่อให้แผ่นสีเหลืองเข้มสีแดงวางบนแถบสีเหลืองและสีน้ำเงินดังภาพที่ 2.4 (ก) ถ้า Simultaneous contrast ขึ้นกับสีเพียงอย่างเดียวแผ่นสีแดงที่วางบนแถบสีเหลืองและสีน้ำเงินต้องมีสีปรากฏเหมือนกันเนื่องจากถูกล้อมรอบด้วยพื้นหลังสีเหลืองและสีน้ำเงินสีละ 2 ด้านเท่ากัน แต่ผลปรากฏว่าแผ่นสีแดงที่วางบนแถบสีเหลืองถูกเหนี่ยวนำโดยสีเหลือง ในขณะที่แผ่นสีแดงที่วางบนแถบสีน้ำเงินก็ถูกเหนี่ยวนำโดยสีน้ำเงิน ซึ่งเมื่อทดลองกับสีเขียวฟ้าก็ให้ผลเช่นเดียวกันดังภาพที่ 2.4(ข) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปรากฏการณ์นี้ขึ้นกับโครงสร้างของพื้นที่



ภาพที่ 2.4 (ก) แผ่นสีเหลืองเข้มสีแดงวางบนแถบสีเหลืองและสีน้ำเงิน (ข) แผ่นสีเหลืองเข้มสีเขียวฟ้าวางบนแถบสีเหลืองและสีน้ำเงิน

### 2.1.3 แบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏ

แบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏ (colour appearance model) [1] เป็นแบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อทำนายค่าสีปรากฏหรือสีที่มนุษย์รับรู้ โดยจำลองกระบวนการรับรู้สีของมนุษย์ โดยอย่างน้อยต้องมีขั้นตอน Chromatic adaptation ที่ใช้ข้อมูลนำเข้าค่าสีของวัตถุและค่าสีขาวอ้างอิง เพื่อจำลองการปรับสายตาเข้ากับสีขาวอ้างอิงของมนุษย์ และสามารถทำนายค่าสีแบบสัมพัทธ์ ความสว่าง (lightness), โครมา (chroma) และ สีสัน (hue) ได้ โดยโครงสร้างของแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏประกอบด้วย

1. ค่าสีและข้อมูลนำเข้าสภาวะแวดล้อม (Input stimulus viewing configuration) ค่าสี ได้แก่ ค่าสี XYZ ของสิ่งที่เราต้องการทราบค่าสีปรากฏ, ค่าสี XYZ ของสีขาวอ้างอิง และข้อมูลนำเข้าสภาวะแวดล้อม เช่น ค่าความสว่างของพื้นหลัง, ค่าคงที่สำหรับสภาพแสง เป็นต้น เพื่อใช้ในการคำนวณค่าสีปรากฏ

2. Chromatic adaptation เป็นกระบวนการที่จำลองการปรับสายตาของมนุษย์ โดยคำนวณค่าสีเมื่อปรับเข้ากับสีขาวอ้างอิง

3. ค่าสีปรากฏ (Appearance correlates) เป็นขั้นตอนคำนวณค่าสีแบบสัมพัทธ์ Lightness, Chroma และ Hue

#### 2.1.3.1 CIECAM02

CIECAM02 [1] เป็นแบบจำลองการปรากฏสีที่พัฒนามาจาก CIECAM97s โดย CIE ในปี ค.ศ. 2002 พัฒนาต่อจาก CIECAM97s ซึ่งเป็นแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏที่สร้างโดย CIE เป็นแบบจำลองแรก พัฒนาขึ้นต้องการสร้างให้เป็นแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏมาตรฐาน โดย CIECAM02 เกิดจากการปรับปรุง CIECAM97s ให้ง่ายต่อการคำนวณและมีประสิทธิภาพมากขึ้น โครงสร้างของ CIECAM02 มีรายละเอียดดังนี้

##### 1. ข้อมูลนำเข้าค่าสีและตัวแปรสภาวะแวดล้อม

ข้อมูลนำเข้าเพื่อใช้ในการคำนวณของ CIECAM02 แบ่ง 5 ส่วนดังนี้

##### 1. Testing stimulus (XYZ)

คือ ค่าสี X Y Z ของสีที่ต้องการทำนายค่าสีปรากฏ

##### 2. White point ( $X_w, Y_w, Z_w$ )

คือ ค่าสี X Y Z ที่กำหนดให้เป็นสีขาวอ้างอิง

### 3. Adapting luminance ( $L_A$ )

คือ ค่าความสว่างที่เกิดการปรับสภาพการมองเห็น มีหน่วยเป็น  $\text{cd/m}^2$  โดยทั่วไป คำนวณค่า  $L_A$  ได้จาก 20% ของความสว่างของสีขาวอ้างอิง

### 4. Background luminance ( $Y_b$ )

คือ ค่าความสว่างของพื้นหลัง มีหน่วยเป็น  $\text{cd/m}^2$

### 5. Surround conditions

คือ สภาวะแวดล้อมในการมองซึ่งกำหนดไว้ 3 ประเภทคือ average, dim และ dark มีค่าคงที่ที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่สภาวะการมองเห็นสำหรับ CIECAM02

viewing condition	C	$N_C$	F
Average surround	0.69	1	1
Dim surround	0.59	0.9	0.9
Dark surround	0.525	0.8	0.8

## 2. Adaptation model

เป็นขั้นตอนที่นำข้อมูลเกี่ยวกับความสว่าง Adapting luminance ( $L_A$ ) ค่าสภาวะการมอง (F) และค่าสี XYZ ของสีขาวอ้างอิงมาคำนวณ ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก คือ 1. Chromatic adaptation 2. Post adaptation

### 1. Chromatic adaptation

ขั้นตอนแรกเริ่มจากการแปลงค่าสี XYZ ของสีทดสอบเป็นค่า RGB responses ซึ่งอยู่ในปริภูมิการตอบสนองของโคนเซลล์ cone responses โดยใช้เมตริก  $M_{CAT02}$  ดังสมการที่ 2.1 ค่าของ  $M_{CAT02}$  แสดงดังสมการที่ 2.2

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = M_{CAT02} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

$$M_{CAT02} = \begin{bmatrix} 0.7328 & 0.4296 & -0.1624 \\ -0.7036 & 1.6975 & 0.0061 \\ 0.0030 & 0.0136 & 0.9834 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(2.2)$$



คำนวณค่า D factor ซึ่งแสดงถึงระดับการ adaptation ซึ่งสัมพันธ์กับ adapting luminance ( $L_A$ ) และ surround (F) โดย  $D = 1$  หมายถึงปรับสายตาเข้ากับแสงขาวอ้างอิงได้ สมบูรณ์ (full adaptation)  $D = 0$  หมายถึงไม่เกิดปรับสายตาเข้ากับแสงขาวอ้างอิงเลยหาค่า D factor ได้ดังสมการที่ 2.3

$$D = F \left[ 1 - \left( \frac{1}{3.6} \right) e^{\left( \frac{-(L_A + 42)}{92} \right)} \right] \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

คำนวณค่าสี adapted tristimulus responses ( $R_C G_C B_C$ ) จากสมการ Chromatic adaptation ของ Von Kries ดังสมการที่ 2.4-2.6

$$R_C = [(100D / R_W) + (1 - D)]R \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

$$G_C = [(100D / G_W) + (1 - D)]G \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

$$B_C = [(100D / B_W) + (1 - D)]B \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

## 2. post adaptation

เป็นขั้นตอนที่นำข้อมูลเกี่ยวกับสภาวะแวดล้อม เช่น luminance-level adaptation ( $F_L$ ) และ induction factors ประกอบด้วย  $N_{bb}$  และ  $N_{cb}$  และ the base exponential nonlinearity (z) ซึ่งขึ้นกับความสว่างของพื้นหลัง ( $Y_b$ ) มาใช้ในคำนวณ โดยตัวแปรดังกล่าวมีวิธีคำนวณดังสมการที่ 2.7-2.11

$$k = 1 / (5L_A + 1) \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

$$F_L = 0.2k^4(5L_A) + 0.1(1 - k^4)^2(5L_A)^{1/3} \quad \dots\dots\dots(2.8)$$

$$n = \frac{Y_b}{Y_W} \quad \dots\dots\dots(2.9)$$

$$N_{bb} = N_{cb} = 0.725(1/n)^{0.2} \quad \dots\dots\dots(2.10)$$

$$z = 1.48 + \sqrt{n} \quad \dots\dots\dots(2.11)$$

แปลงค่า  $R_C G_C B_C$  จาก RGB responses กลับมาเป็นค่าสี XYZ โดยใช้  $M_{CAT02}$  แล้ว  
แปลงไปยัง Hunt-Pointer-Estevéz โดยใช้  $M_{HPE}$  ดังสมการที่ 2.12-2.14

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = M_{HPE} M_{CAT02}^{-1} \begin{bmatrix} R_C \\ G_C \\ B_C \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(2.12)$$

$$M_{HPE} = \begin{bmatrix} 0.38971 & 0.68898 & -0.07868 \\ -0.22981 & 1.18340 & 0.04641 \\ 0.00000 & 0.00000 & 1.00000 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(2.13)$$

$$M_{CAT02}^{-1} = \begin{bmatrix} 1.096124 & -0.278869 & 0.182745 \\ 0.454369 & 0.473533 & 0.072098 \\ -0.009628 & -0.005698 & 1.015326 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(2.14)$$

ขั้นตอน Post adaptation nonlinearities แสดงดังสมการที่ 2.15-2.17

$$R'_a = \frac{400(F_L R' / 100)^{0.42}}{27.13 + (F_L R' / 100)^{0.42}} + 0.1 \quad \dots\dots\dots(2.15)$$

$$G'_a = \frac{400(F_L G' / 100)^{0.42}}{27.13 + (F_L G' / 100)^{0.42}} + 0.1 \quad \dots\dots\dots(2.16)$$

$$B'_a = \frac{400(F_L B' / 100)^{0.42}}{27.13 + (F_L B' / 100)^{0.42}} + 0.1 \quad \dots\dots\dots(2.17)$$

### 3. Appearance correlates

เป็นขั้นตอนคำนวณค่าสีแบบสมบูรณและแบบสัมพัทธ์ lightness chroma และ hue โดยคำนวณค่าให้อยู่ใน opponent colour responses ดังสมการที่ 2.18-2.19

$$a = R'_a - 12G'_a / 11 + B'_a / 11 \quad \dots\dots\dots(2.18)$$

$$b = (1/9)(R'_a + G'_a - 2B'_a) \quad \dots\dots\dots(2.19)$$

#### 1. Hue

คำนวณค่าสีสันจากสมการที่ 2.20 มีค่าระหว่าง 0-360 องศา และคำนวณค่า eccentricity factor ( $e_t$ ) เพื่อใช้ในการคำนวณค่าโครมาต่อไป ดังสมการที่ 2.21

$$h = \tan^{-1}(b/a) \quad \dots\dots\dots(2.20)$$

$$e_t = 1/4 \left[ \cos\left(h \frac{\pi}{180} + 2\right) + 3.8 \right] \quad \dots\dots\dots(2.21)$$

#### 2. Lightness

คำนวณค่า Lightness (J) จาก achromatic response (A) กับ achromatic response สำหรับสีขาวอ้างอิง ( $A_w$ ) การคำนวณแสดงดังสมการที่ 2.22-2.24

$$A = [2R'_a + G'_a + (1/20)B'_a - 0.305]N_{bb} \quad \dots\dots\dots(2.22)$$

$$J = 100(A/A_w)^{cz} \quad \dots\dots\dots(2.23)$$

#### 3. Brightness

$$Q = (4/c)\sqrt{J/100}(A_w + 4)F_L^{0.25} \quad \dots\dots\dots(2.24)$$

## 4. Chroma

$$t = \frac{(50000/13)N_c N_{cb} e_t \sqrt{a^2 + b^2}}{R'_a + G'_a + (21/20)B'_a} \dots\dots\dots(2.25)$$

$$C = t^{0.9} \sqrt{J/100} (1.64 - 0.29^n)^{0.73} \dots\dots\dots(2.26)$$

## 5. Colourfulness

$$M = CF_L^{0.25} \dots\dots\dots(2.27)$$

## 6. saturation

$$s = 100 \sqrt{M/Q} \dots\dots\dots(2.28)$$

## 7. Cartesian coordinates

$$a_c = C \cos(h) \dots\dots\dots(2.29)$$

$$b_c = C \sin(h) \dots\dots\dots(2.30)$$

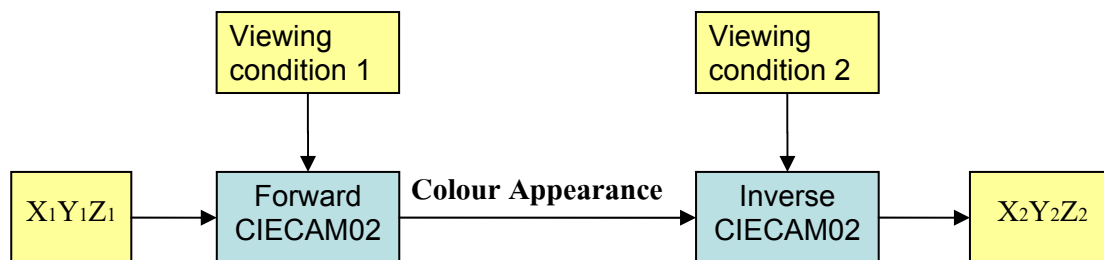
$$a_M = M \cos(h) \dots\dots\dots(2.31)$$

$$b_M = M \sin(h) \dots\dots\dots(2.32)$$

$$a_s = s \cos(h) \dots\dots\dots(2.33)$$

$$b_s = s \sin(h) \dots\dots\dots(2.34)$$

ขั้นตอนการผลิตสีข้ามสื่อโดยใช้ CIECAM02 แสดงดังแผนภูมิที่ 2.1 โดย CIECAM02 จะนำค่าสี XYZ ของตัวอย่างสีในสภาวะการมองเห็นที่ 1 ซึ่งคือ  $X_1Y_1Z_1$  คำนวณร่วมกับข้อมูลนำเข้าสภาวะในการมองเห็นที่ 1 ได้ค่าสีปรากฏซึ่งจะเป็นค่าอ้างอิงเพื่อใช้คำนวณร่วมกับข้อมูลนำเข้าจากสภาวะในการมองเห็นที่ 2 เพื่อทำนายค่าสี  $X_2Y_2Z_2$  ที่ทำให้ค่าสีปรากฏของสีในสภาวะการมองเห็นทั้ง 2 เท่ากัน



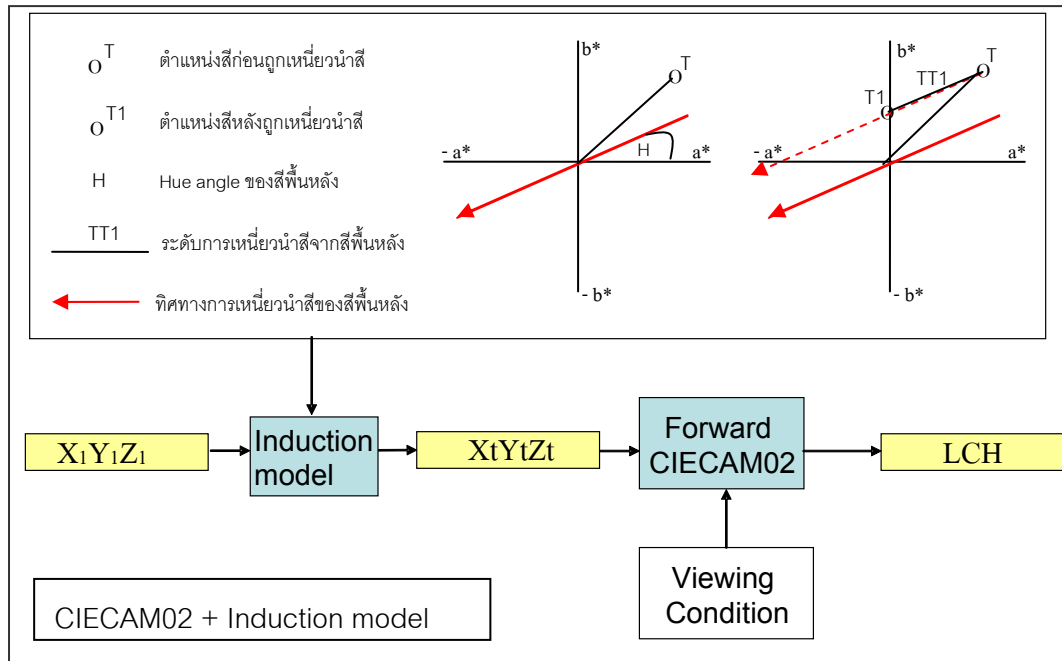
แผนภูมิที่ 2.1 ขั้นตอนการทำงานของ CIECAM02

#### 2.1.3.1.1 การปรับปรุง CIECAM02 เพื่อคำนวณค่าสีพื้นหลัง

เนื่องจาก CIECAM02 ไม่ได้นำข้อมูลสีของพื้นหลังไปใช้ในการคำนวณ มีเพียงค่าความสว่างของพื้นหลังเท่านั้น ทำให้ไม่สามารถทำนายค่าสีปรากฏครอบคลุมปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับสีพื้นหลัง เช่น Simultaneous contrast ได้สมบูรณ์ จึงได้มีความพยายามในการปรับปรุง CIECAM02 หรือสร้างส่วนช่วยในการคำนวณค่าสีพื้นหลังให้กับ CIECAM02 โดยที่นำสนใจมี 2 วิธีดังนี้

##### 2.1.3.1.1.1 CIECAM02 with Induction Model

Binghua และคณะ [3] ได้คิดกระบวนการที่ช่วยให้ CIECAM02 สามารถทำนายค่าสีที่เปลี่ยนไปเนื่องจากสีของพื้นหลัง โดยการสร้างขั้นตอนเตรียมค่าสี XYZ ของสิ่งที่ต้องการทำนายค่าสีปรากฏก่อนการใช้ CIECAM02 ในการคำนวณ ซึ่งเรียกส่วนนี้ว่า Induction model โดยมีหลักการการทำงานคือ กำหนดให้ระดับการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลังขึ้นกับค่าโครมาของสีพื้นหลังและใช้ทฤษฎีคู่สีตรงข้ามเป็นตัวกำหนดทิศทางของการเปลี่ยนแปลงของสี แผนผังการทำงานแสดงดังแผนภูมิที่ 2.1



แผนภูมิที่ 2.2 ขั้นตอนการเตรียมข้อมูลนำเข้าให้กับ CIECAM02 โดยใช้ Induction model

ขั้นตอนการทำงานของ Induction model มีดังนี้

1. แปลงค่าสี XYZ ของสีที่ต้องการหาค่าสีปรากฏ ( $X_i Y_i Z_i$ ) และค่าสี XYZ ของพื้นหลังเป็น  $L^* a^* b^*$  ( $L^*_1 a^*_1 b^*_1$  และ  $L^*_b a^*_b b^*_b$  ตามลำดับ)
2. หาค่า hue angle (H) ของสีพื้นหลังบนปริภูมิสี CIELAB เพื่อใช้กำหนดทิศทางการเหนี่ยวนำซึ่งจะมีทิศตรงกันข้าม
3. คำนวณค่าระดับการเปลี่ยนแปลงสีเนื่องจากสีพื้นหลัง (TT1) จากค่า NCS chromaticness (c) ของสีพื้นหลังโดยใช้สมการที่ 2.35

$$TT1 = 0.0009c^{2.1145} \dots\dots(2.35)$$

4. คำนวณค่าสี  $L^* a^* b^*$  ของสีที่ต้องการหาค่าสีปรากฏหลังจากถูกเหนี่ยวนำสีจากพื้นหลัง ( $L^*_t a^*_t b^*_t$ ) จากทิศทางการเหนี่ยวนำและระดับการเหนี่ยวนำที่คำนวณไว้ในข้อ 2 และ 3 ดังสมการที่ 2.36-2.40 กำหนดให้ TT1a คือค่า  $a^*$  ที่เปลี่ยนแปลงไป และ TT1b คือค่า  $b^*$  ที่เปลี่ยนแปลงไป

$$TT1a = TT1 \cos(H + 180) \dots\dots(2.36)$$

$$TT1b = TT1\sin(H + 180) \quad \dots\dots\dots(2.37)$$

$$a_t^* = a_1^* + TT1a \quad \dots\dots\dots(2.38)$$

$$b_t^* = b_1^* + TT1b \quad \dots\dots\dots(2.39)$$

$$L_t^* = L_1^* \quad \dots\dots\dots(2.40)$$

5. แปลงค่าสี่  $L^*a^*b^*$  ของสี่ที่ต้องการหาค่าสี่ปรากฏหลังจากถูกเหนี่ยวนำสี่จากพื้นหลัง ( $L^*_t, a^*_t, b^*_t$ ) เป็นค่าสี่ XYZ ( $X_tY_tZ_t$ ) เพื่อใช้เป็นข้อมูลนำเข้าของ CIECAM02 ต่อไป

#### 2.1.3.1.1.2 CIECAM02-m1 และ CIECAM02-m2

CIECAM02-m1 และ CIECAM02-m2 เกิดจากการปรับปรุง CIECAM02 ให้มีการคำนวณค่าสี่ขาวอ้างอิงใหม่ โดย Ray-chin Wu และ Roger H. Wardman [2] ได้นำสมการคำนวณค่าสี่ขาวของแบบจำลองทำนายค่าสี่ปรากฏ Hunt [1] มาใช้คำนวณค่าสี่ขาวอ้างอิงให้กับ CIECAM02 ซึ่งสมการคำนวณค่าสี่ขาวอ้างอิงของ Hunt แสดงดังสมการที่ 2.41-2.46

$$R'_W = \frac{R_W [(1-p)P_R + (1+p)/P_R]^{1/2}}{[(1+p)P_R + (1-p)/P_R]^{1/2}} \quad \dots\dots\dots(2.41)$$

$$G'_W = \frac{G_W [(1-p)P_G + (1+p)/P_G]^{1/2}}{[(1+p)P_G + (1-p)/P_G]^{1/2}} \quad \dots\dots\dots(2.42)$$

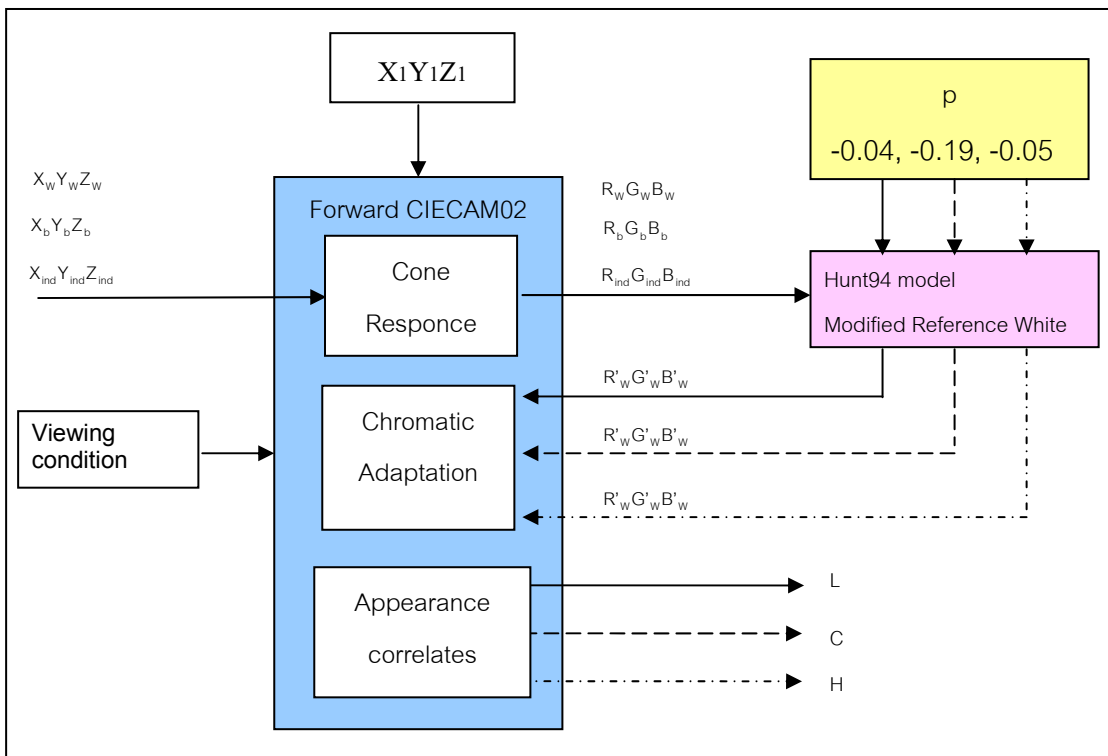
$$B'_W = \frac{B_W [(1-p)P_B + (1+p)/P_B]^{1/2}}{[(1+p)P_B + (1-p)/P_B]^{1/2}} \quad \dots\dots\dots(2.43)$$

$$P_R = \frac{R_{ind}}{R_b} \quad \dots\dots\dots(2.44)$$

$$P_G = \frac{G_{ind}}{G_b} \dots\dots\dots(2.45)$$

$$P_B = \frac{B_{ind}}{B_b} \dots\dots\dots(2.46)$$

จากสมการที่ 2.41-2.43 จะเห็นว่าค่า RGB Cone response ของสีขาวอ้างอิง ( $R_w G_w B_w$ ) จะถูกนำมาคำนวณรวมกับค่า  $P_R, P_G, P_B$  และ  $p$  ได้ค่า RGB Cone response ของสีขาวอ้างอิงใหม่ ( $R'_w G'_w B'_w$ ) ซึ่ง  $P_R, P_G, P_B$  คำนวณจากค่าสี RGB Cone response ของสีพื้นหลัง ( $R_b G_b B_b$ ) และสีบริเวณ induction field ( $R_{ind} G_{ind} B_{ind}$ ) ดังสมการที่ 2.44-2.46 ส่วนค่า  $p$  เป็นค่าคงที่ที่ที่ออกแบบไว้ให้เปลี่ยนแปลงค่าได้ตามความเหมาะสม ซึ่งในส่วนนี้เองที่ถูกปรับค่าให้เหมาะสมกับการทำนายการเปลี่ยนแปลงสีเนื่องจากสีพื้นหลัง จากการทดลองพบว่าไม่มีค่า  $p$  ที่ทำให้ค่าสี ความสว่าง, โครมา และสีสัน มีค่าที่ถูกต้องได้ทั้ง 3 ค่าพร้อมกัน โดยพบว่าต้องใช้ค่า  $p$  ที่แตกต่างกัน 3 ค่าคือ  $p = -0.41$   $p = -0.19$  และ  $p = -0.05$  เพื่อคำนวณค่า ความสว่าง, โครมา และสีสัน ตามลำดับ ซึ่งทำให้ต้องคำนวณถึง 3 ครั้งจึงจะได้ค่าสีทั้ง 3 ค่า โดยเรียก CIECAM02 ที่ปรับปรุงใหม่นี้ว่า CIECAM02-m1 โดยมีขั้นตอนการคำนวณดังแผนภูมิที่ 2.3



แผนภูมิที่ 2.3 การทำงานของ CIECAM02-m1

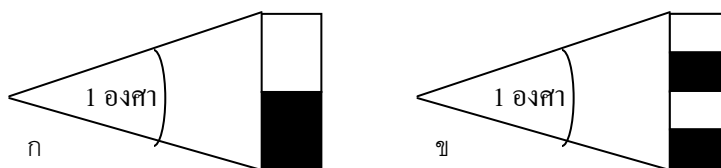


จากแผนภูมิที่ 2. ขั้นตอนการทำงานของ CIECAM02-m1 เริ่มจากการแปลงค่าสี XYZ ของสีที่ต้องการทราบค่าสีปรากฏ ( $X_1Y_1Z_1$ ), ค่าสี XYZ ของสีขาวอ้างอิง ( $X_wY_wZ_w$ ), ค่าสี XYZ ของพื้นหลัง ( $X_bY_bZ_b$ ) และค่าสี XYZ ของ induction field ( $X_{ind}Y_{ind}Z_{ind}$ ) ให้เป็น RGB cone response ค่าสี RGB ของสีขาวอ้างอิง ( $R_wG_wB_w$ ), พื้นหลัง ( $R_bG_bB_b$ ) และ induction field ( $R_{ind}G_{ind}B_{ind}$ ) ค่าทั้ง 3 ถูกคำนวณร่วมกับ  $p$  โดยกำหนดให้  $p$  เท่ากับ  $-0.41$  ได้ค่าสีขาวอ้างอิงใหม่ไปใช้ในการคำนวณในขั้นตอน chromatic adaptation ของ CIECAM02 เพื่อให้ได้ค่า ความสว่าง ทำซ้ำโดยเปลี่ยนค่า  $p$  เป็นเท่ากับ  $-0.19$  และ  $p$  เท่ากับ  $-0.05$  เพื่อทำนายค่าสี โครมา และสีสั่นตามลำดับ จะเห็นได้ว่า CIECAM02-m1 ต้องคำนวณซ้ำ 3 ครั้ง ซึ่งไม่สะดวกและใช้เวลานาน จึงปรับปรุงโดยการเลือกค่า  $p$  เหลือเพียง 2 ค่าคือ  $p$  เท่ากับ  $-0.40$  เพื่อทำนายค่าความสว่าง และ  $p$  เท่ากับ  $-0.05$  เพื่อทำนายค่าโครมา และสีสั่น โดยเรียกแบบจำลองนี้ว่า CIECAM02-m2

#### 2.1.4 ความถี่เชิงระยะทาง

ความถี่เชิงระยะทาง (spatial frequency) [8]

ความถี่เชิงระยะทางเป็นค่าการปรากฏซ้ำของสิ่งต่าง ๆ ในบริเวณที่กำหนด ยกตัวอย่าง ดังภาพที่ 2.5 กำหนดในระยะ 1 องศาการมองเห็นภาพ 2.5 (ก) ตารางสี่เหลี่ยมและสี่เหลี่ยม 1 คู่ในมุมมอง 1 องศาการมองเห็น เรียกว่ามีความถี่เท่ากับ 1 CPD (cycle per degree) ส่วนภาพที่ 2.5 (ข) ตารางสี่เหลี่ยมและสี่เหลี่ยม 2 คู่ในมุมมอง 1 องศาการมองเห็น เรียกว่ามีความถี่เท่ากับ 2 CPD

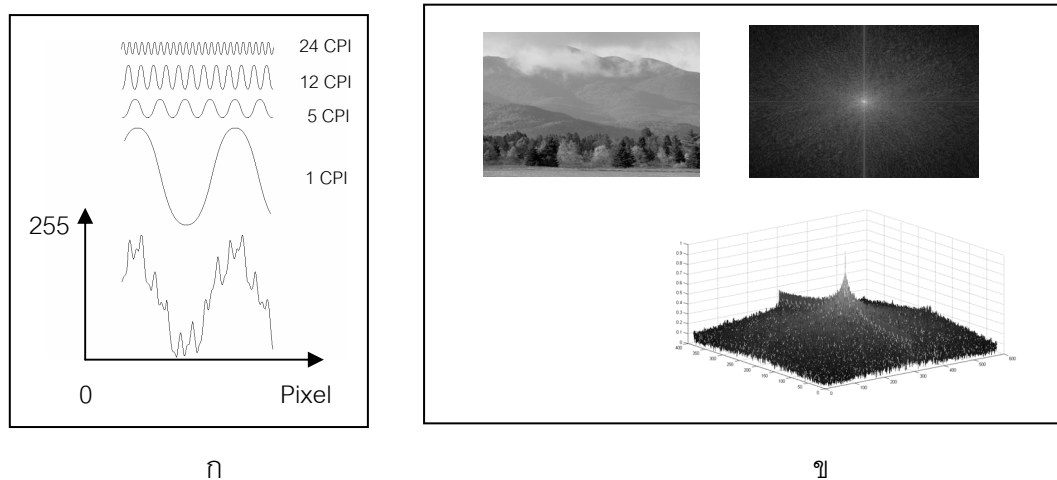


ภาพที่ 2.5 (ก) ความถี่ 1 CPD (ข) ความถี่ 2 CPD

##### 2.1.4.1 ความถี่เชิงระยะทางของภาพ

ความถี่เชิงระยะทางของภาพสามารถหาได้จากการแปลงฟูเรียร์ภาพให้อยู่ในโดเมนความถี่ โดยฟูเรียร์สามารถที่จะหาความถี่เชิงระยะทางของภาพจากระดับความมืดสว่างของภาพ โดยระดับมืดสว่างนี้เกิดจากคลื่นไซน์หรือโคไซน์ที่มีความถี่เชิงระยะทางแตกต่างกันรวมเข้าด้วยกัน

โดยความถี่เชิงระยะทางของภาพจะมีหน่วยเป็น CPI (cycle per image) คือ จำนวนของลูกคลื่น คลื่นไซน์หรือโคไซน์ใน 1 ภาพ หรือจำนวนคู่ของพิกเซลมืดสลับสว่างในภาพ ดังภาพที่ 2.6 (ก) แสดงให้เห็นว่าพิกเซล จำนวน 1 แถวที่มีระดับความสว่างที่แตกต่างกัน สามารถแยกองค์ประกอบ ออกเป็นคลื่นไซน์และโคไซน์ที่มีความถี่แตกต่างกัน 4 ค่าจากน้อยไปมากคือ 1, 5, 12, 24 CPI ตามลำดับ ซึ่งสามารถแปลงความถี่เชิงระยะทางในหน่วย CPD เป็น CPI โดยการหาค่าขนาดของ ภาพว่าครอบคลุมมุมมองการมองเห็นกี่องศาแล้วคูณกับค่าความถี่เชิงระยะทางในหน่วย CPD จะ ได้ค่าความถี่เชิงระยะทางในหน่วย CPI [8]



ภาพที่ 2.6 (ก) กราฟระหว่างตำแหน่งพิกเซลกับระดับความสว่าง ซึ่งสามารถแยกองค์ประกอบ ออกเป็นคลื่นไซน์และโคไซน์ที่มีความถี่แตกต่างกัน 4 ค่า (ข) ความถี่เชิงระยะทางที่ได้จากการ แปลงฟูเรียร์ภาพต้นฉบับทางซ้าย ภาพขวาล่างแสดงกราฟ 3 มิติของความถี่เชิงระยะทาง ภาพ ขวาบนแสดงภาพมูบมบนของกราฟ 3 มิติ

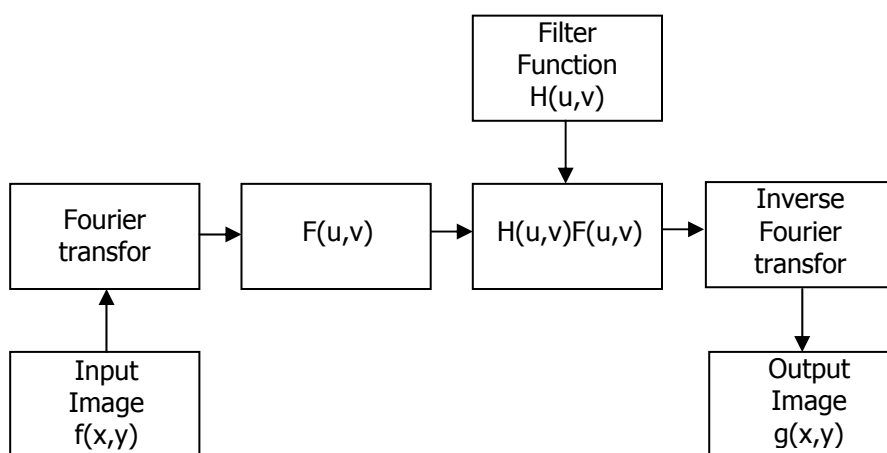
ภาพมีลักษณะเป็น 2 มิติ ประกอบด้วยความกว้างและความสูง ซึ่งสามารถแปลงเป็น ความถี่เชิงระยะทางโดยใช้การแปลงฟูเรียร์ได้ดังภาพที่ 2.6 (ข) บริเวณกึ่งกลางมีความถี่เชิง ระยะทางเท่ากับ 0 ยิ่งห่างจากจุดกึ่งกลางความถี่เชิงระยะทาง (หน่วย CPI) จะยิ่งสูงขึ้น ความถี่ เชิงระยะทางในโดเมนความถี่ของฟูเรียร์ของภาพสัมพันธ์กับระดับการเปลี่ยนแปลงความเข้มหรือ ความสว่างของภาพ ส่วนที่มีความถี่ต่ำในโดเมนความถี่ของฟูเรียร์คือ บริเวณที่มีความราบเรียบมี การเปลี่ยนแปลงระดับความสว่างหรือความเข้มอย่างช้า ๆ เช่น กำแพง และพื้น ส่วนที่มีความถี่สูง ในโดเมนความถี่ของฟูเรียร์ของภาพคือ บริเวณของรายละเอียดที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับความ เข้มหรือความสว่างอย่างรวดเร็ว เช่น สิ่งของขนาดเล็ก, ลูกกรง และลวดลายต่าง ๆ เป็นต้น

### 2.1.4.2 การกรองความถี่ในโดเมนความถี่ด้วยฟิลเตอร์

กระบวนการในการกรองความถี่ด้วยฟิลเตอร์ในโดเมนความถี่มีขั้นตอนดังนี้

1. แปลงฟูรีเยร์ภาพ  $f(x,y)$  ให้อยู่ในโดเมนความถี่  $F(u,v)$
2. สร้างฟิลเตอร์  $H(u,v)$
3. นำภาพที่อยู่ในโดเมนความถี่  $F(u,v)$  คูณกับฟิลเตอร์  $H(u,v)$
4. แปลงฟูรีเยร์ผลคูณระหว่างภาพโดเมนความถี่  $F(u,v)$  กับฟิลเตอร์  $H(u,v)$  กลับมาเป็นภาพ  $g(x,y)$

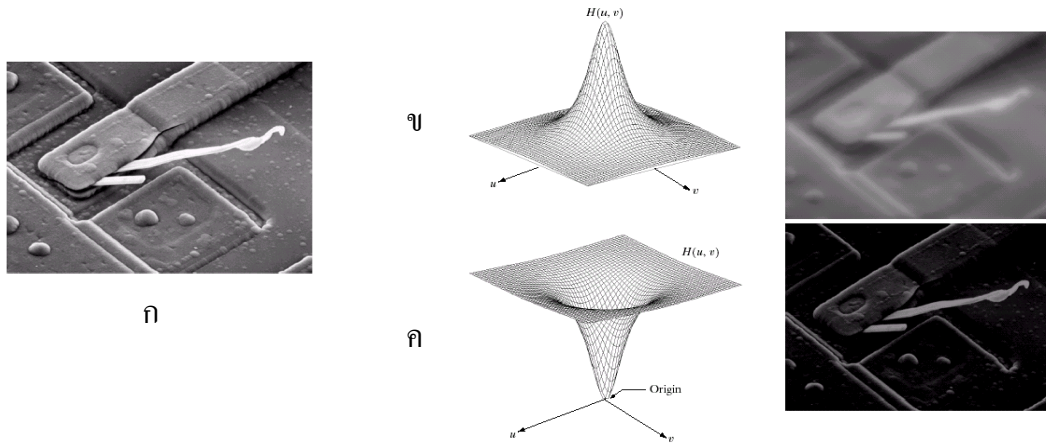
ขั้นตอนแสดงดังแผนภูมิที่ 2.4



แผนภูมิที่ 2.4 ขั้นตอนการกรองความถี่ด้วยฟิลเตอร์

### 2.1.4.3 ฟิลเตอร์

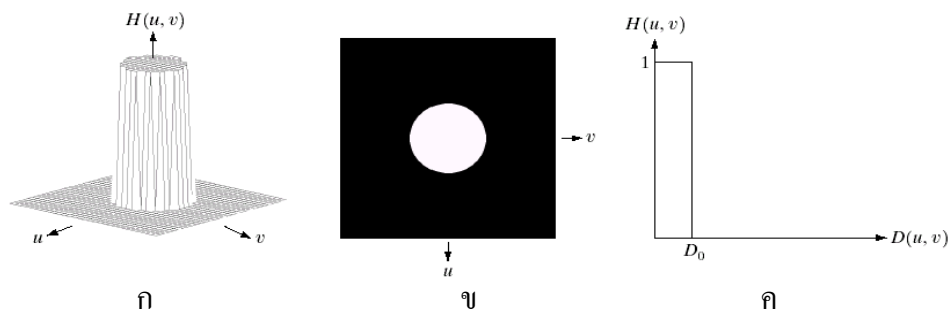
ฟิลเตอร์ที่ใช้ในโดเมนความถี่แบ่งตามลักษณะการทำงานได้ 2 ประเภทคือ ฟิลเตอร์ Low pass และ ฟิลเตอร์ High pass ซึ่งฟิลเตอร์ Low pass คือ ฟิลเตอร์ที่กั้นความถี่สูงไว้ไม่ให้ผ่าน แต่ยอมให้ความถี่ต่ำผ่านได้ ผลของฟิลเตอร์ทำให้ได้ภาพของบริเวณที่ราบเรียบมีการเปลี่ยนแปลงระดับความสว่างช้า ๆ ดังภาพที่ 2.7 (ข) ส่วน ฟิลเตอร์ High pass คือ ฟิลเตอร์ที่ให้ผลตรงกันข้ามกับฟิลเตอร์ Low pass ที่กั้นความถี่ต่ำไว้ไม่ให้ผ่าน แต่ยอมให้ความถี่สูงผ่านได้ ทำให้ได้บริเวณรายละเอียดของภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับความสว่างอย่างรวดเร็วคือ วัตถุขนาดเล็กและขอบของภาพ ดังภาพที่ 2.7 (ค) [8]



ภาพที่ 2.7 (ก) ภาพต้นฉบับ (ข) ฟิวเตอร์ lowpass และภาพผลลัพธ์ (ค) ฟิวเตอร์ highpass และภาพผลลัพธ์ [8]

ฟิวเตอร์พื้นฐานที่ใช้ทำหน้าที่เป็น ฟิวเตอร์ lowpass และ ฟิวเตอร์ highpass มี 3 ชนิด ดังนี้

### 1. ฟิวเตอร์ Ideal



ภาพที่ 2.8 (ก) ภาพสามมิติของฟิวเตอร์ Ideal (ข) ฟิวเตอร์ Ideal เมื่อแสดงเป็นภาพ (ค) ภาพตัดขวางของฟิวเตอร์ Ideal [8]

ฟิวเตอร์ Ideal เป็นฟิวเตอร์ที่มีขอบของฟิวเตอร์ที่ใช้แบ่งระหว่างค่าความถี่ที่ยอมให้ผ่านกับความถี่ที่ตัดทิ้งเป็นเส้นตรง ดังภาพที่ 2.8 เป็นภาพของฟิวเตอร์ Ideal lowpass ค่าความถี่ที่กำหนดเป็นจุดแบ่งความถี่ที่ผ่านกับไม่ผ่านนี้เรียกว่า Cutoff frequency โดยตำแหน่งของค่า Cutoff frequency กำหนดเป็นระยะห่างจากจุดกึ่งกลาง ( $D_0$ ) ดังภาพที่ 2.8 (ค) ซึ่งฟิวเตอร์ Ideal มีขอบเป็นเส้นตรงตรงตำแหน่ง Cutoff frequency ความถี่ที่สูงกว่า Cutoff frequency คือมีระยะห่างจากจุดกึ่งกลางเกิน  $D_0$  จะถูกตัดออกเหลือแต่ความถี่ที่มีค่าต่ำกว่าหรือเท่ากับ Cutoff frequency ฟิวเตอร์ Ideal สร้างโดยสมการที่ 2.47-2.48 กำหนด  $H(u, v)$  คือฟังก์ชันฟิวเตอร์ 2

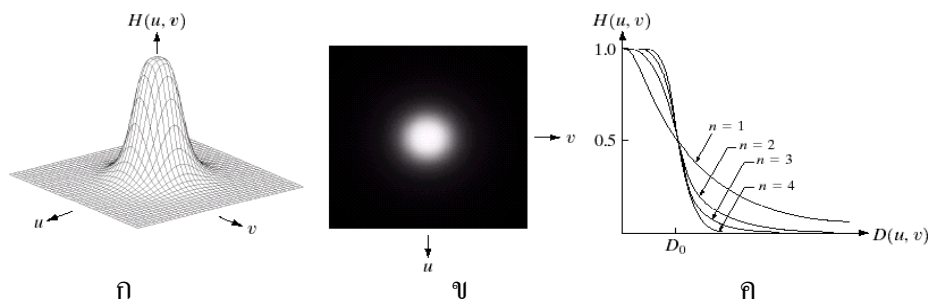
มิติในโดเมนความถี่  $u$  และ  $v$  เป็นแกนความถี่ โดย  $D(u,v)$  คือระยะห่างจากจุดใด ๆ ไปยังจุดกึ่งกลางของฟิลเตอร์ สามารถหาค่าได้ดังสมการที่ 2.48 โดยฟิลเตอร์จะมีขนาดเท่ากับภาพ

$$H(u,v) = \begin{cases} 1 & \text{if } D(u,v) \leq D_0 \\ 0 & \text{if } D(u,v) > D_0 \end{cases} \dots\dots\dots(2.47)$$

$$D(u,v) = [(u - M/2)^2 + (v - N/2)^2]^{1/2} \dots\dots\dots(2.48)$$

เนื่องจากมีขอบที่เป็นเส้นตรงผลลัพธ์ที่ได้จากฟิลเตอร์ Ideal เมื่อแปลงฟูเรียร์กลับเป็นภาพจะเกิด Ringing

2. ฟิลเตอร์ Butterworth

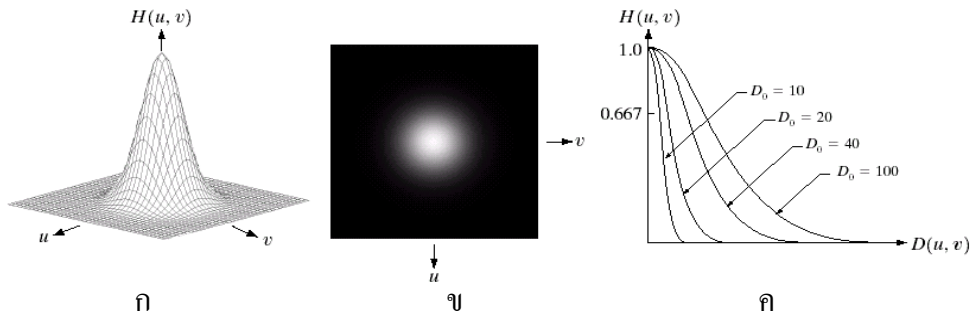


ภาพที่ 2.9 (ก) ภาพสามมิติของฟิลเตอร์ Butterworth (ข) ฟิลเตอร์ Butterworth เมื่อแสดงเป็นภาพ (ค) ภาพตัดขวางของฟิลเตอร์ Butterworth [8]

ฟิลเตอร์ Butterworth เป็นฟิลเตอร์ที่มีขอบของฟิลเตอร์ไม่เป็นเส้นตรง จากภาพที่ 2.9 เป็นภาพของฟิลเตอร์ Butterworth lowpass โดยความโค้งขึ้นกับค่า  $n$  ดังภาพที่ 2.9 (ค) จะเห็นว่าเมื่อค่า  $n$  ลดลงขอบของฟิลเตอร์จะมีความชันลดลง โดยตำแหน่งของค่า Cutoff frequency จะตรงกับขอบของฟิลเตอร์ที่  $H(u,v)$  เท่ากับ 0.5 ความถี่ที่สูงกว่า Cutoff frequency จะไม่ถูกตัดออกทั้งหมดแต่จะค่อย ๆ ถูกลดทอนลง เพื่อลดปัญหาการเกิด Ringing โดยทั่วไปฟิลเตอร์ Butterworth ที่มีค่า  $n$  เท่ากับ 2 เป็นค่าที่เหมาะสมที่ยังคงมีประสิทธิภาพในการตัดความถี่ตามค่า Cutoff frequency และโดยมี Ringing น้อยมาก สมการของฟิลเตอร์ Butterworth lowpass แสดงดังสมการที่ 2.49

$$H(u, v) = \frac{1}{1 + [D(u, v) / D_0]^{2n}} \dots\dots\dots(2.49)$$

3.ฟิลเตอร์ Gaussian



ภาพที่ 2.10 (ก) ภาพสามมิติของฟิลเตอร์ Gaussian (ข) ฟิลเตอร์ Gaussian เมื่อแสดงเป็นภาพ (ค) ภาพตัดขวางของฟิลเตอร์ Gaussian [8]

ฟิลเตอร์ Gaussian เป็นฟิลเตอร์ที่มีขอบของฟิลเตอร์ไม่เป็นเส้นตรง จากภาพที่ 2.10 เป็นภาพของฟิลเตอร์ Gaussian lowpass จากภาพที่ 2.10 (ค) จะเห็นว่าเมื่อค่า Cutoff frequency เพิ่มขึ้นขอบของฟิลเตอร์จะมีความชันลดลง โดยตำแหน่งของค่า Cutoff frequency จะตรงกับขอบของฟิลเตอร์ที่  $H(u, v)$  เท่ากับ 0.667 ความถี่ที่สูงกว่า Cutoff frequency จะไม่ถูกตัดออกทั้งหมดแต่จะค่อย ๆ ถูกลดทอนลง โดยผลลัพธ์ที่ได้จากฟิลเตอร์ Gaussian ไม่เกิด Ringing เลย สมการของฟิลเตอร์ Gaussian lowpass แสดงดังสมการที่ 2.50

$$H(u, v) = e^{-D^2(u, v) / 2D_0^2} \dots\dots\dots(2.50)$$

โดยทั่วไปฟิลเตอร์ Gaussian เหมาะกับงานที่ไม่ต้องการให้เกิด Ringing หรือ artifact ต่าง ๆ เช่นภาพทางการแพทย์ ส่วน Butterworth ที่มีค่า n เท่ากับ 2 เหมาะกับงานที่ต้องการควบคุมช่วง Cutoff frequency

2.1.5 วิธีการมองเปรียบเทียบภาพ

วิธีที่ใช้ในการเปรียบเทียบภาพมีอยู่ 5 วิธี ซึ่งสามารถใช้เปรียบเทียบภาพได้ทั้ง hardcopy และ softcopy [9] ได้แก่

### 1. Memory viewing

เป็นการมองภาพต้นฉบับและภาพผลิตซ้ำที่ละภาพแยกจากกัน โดยผู้สังเกตจะมองและจดจำภาพต้นฉบับไว้ แล้วจึงเปลี่ยนไปมองภาพผลิตซ้ำ แล้วเปรียบเทียบกัน โดยไม่สามารถย้อนกลับไปดูภาพต้นฉบับได้ วิธีการนี้มีข้อดีคือผู้สังเกตจะได้ปรับสายตาเข้ากับสภาวะการมองเห็นของแต่ละภาพได้ แต่เป็นวิธีที่ใช้เวลาในการทดลองค่อนข้างนาน

### 2. Successive-binocular viewing (SCB)

วิธีการเหมือนกับ Memory viewing ต่างกันตรงที่ผู้สังเกตสามารถย้อนกลับไปดูภาพต้นฉบับได้

### 3. Simultaneous-binocular viewing (SMB)

เป็นวิธีที่ให้ผู้สังเกตมองภาพต้นฉบับและภาพผลิตซ้ำพร้อมกัน โดยผู้สังเกตจะปรับสายตาเข้ากับสภาวะการมองเห็นของภาพต้นฉบับและภาพผลิตซ้ำไปพร้อมกัน เป็นวิธีที่ง่ายและเป็นธรรมชาติ

### 4. Simultaneous-haploscopic viewing (SMH)

เป็นวิธีที่ให้ผู้สังเกตมองภาพต้นฉบับและภาพผลิตซ้ำพร้อมกัน โดยมีที่กั้นให้ตาข้างหนึ่งเห็นเฉพาะภาพต้นฉบับ ส่วนตาอีกข้างหนึ่งเห็นเฉพาะภาพผลิตซ้ำ โดยตั้งสมมติฐานว่าตาแต่ละข้างจะปรับเข้ากับสภาวะการมองเห็นของแต่ละภาพได้สมบูรณ์ วิธีนี้ใช้เวลาในการทดลองสั้น แต่เป็นวิธีที่ไม่เป็นไปตามธรรมชาติ

### 5. Successive-ganzfeld-haploscopic viewing (SCH)

เป็นวิธีที่ให้ผู้สังเกตมองภาพต้นฉบับและภาพผลิตซ้ำที่ละภาพ โดยมีที่กั้นให้ตาข้างหนึ่งเห็นเฉพาะภาพต้นฉบับ ส่วนตาอีกข้างหนึ่งเห็นเฉพาะภาพผลิตซ้ำ โดยในขณะที่ใช้ตาข้างหนึ่งดูภาพตาอีกข้างจะถูกปิดด้วยแผ่นกรองแสงกระเจิงแสง สามารถดูภาพต้นฉบับและภาพผลิตซ้ำสลับไปมาได้โดยตั้งสมมติฐานว่าตาแต่ละข้างจะปรับเข้ากับสภาวะการมองเห็นของแต่ละภาพ วิธีนี้ใช้เวลาในการทดลองสั้น แต่เป็นวิธีที่ไม่เป็นไปตามธรรมชาติ

## 2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ray-chin Wu และ Roger H. Wardman [2] ปรับปรุง CIECAM02 ให้มีการคำนวณค่าสีขาอ้างอิงใหม่ โดย ได้นำสมการคำนวณค่าสีอ้างอิงของแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏ Hunt ซึ่งสามารถคำนวณค่าสีมาใช้คำนวณค่าสีขาอ้างอิงให้กับ CIECAM02 โดยเรียกแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏนี้ว่า CIECAM02-m1 และ CIECAM02-m2

Binghua และคณะ [3] ได้คิดกระบวนการที่ช่วยให้ CIECAM02 สามารถทำนายค่าสีที่เปลี่ยนไปเนื่องจากสีของพื้นหลังโดยการสร้างขั้นตอนเตรียมค่าสี XYZ ของสิ่งที่ต้องการทำนายค่าสีปรากฏก่อนการใช้ CIECAM02 ในการคำนวณ ซึ่งเรียกส่วนนี้ว่า Induction model โดยกำหนดให้ระดับการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลังขึ้นกับค่า NCS chromaticness ของสีพื้นหลังและใช้ทฤษฎีคู่สีตรงข้ามเป็นตัวกำหนดทิศทางของการเปลี่ยนแปลงของสี

Barnes และคณะ [4] ศึกษาว่าระดับการเหนี่ยวนำสีจาก surround (บริเวณที่อยู่รอบสีทดสอบ) ลดลงเนื่องจากคุณสมบัติใดของ remote region (บริเวณที่อยู่รอบนอก surround) โดยใช้ตารางหมากruk เป็น remote region กำหนดสีต้น, ความเปรียบต่างความสว่าง และความถี่เชิงระยะทาง ที่แตกต่างกัน จากการทดลองพบว่า ทั้งสีต้น, ความเปรียบต่างความสว่าง และความถี่เชิงระยะทาง ส่งผลลดทอนระดับการเหนี่ยวนำสีจาก surround และพบว่าขนาดของ remote region elements (ขนาดของช่องตารางหมากruk) กับขนาดของสีทดสอบ ส่งผลต่อระดับการเหนี่ยวนำสีคือ ถ้าขนาดของสีทดสอบและ remote region elements ใกล้เคียงกันมากขึ้นจะยิ่งทำให้ระดับการเหนี่ยวนำสีจาก remote region ลดลงเท่ากัน โดยลดลงต่ำสุดเมื่อขนาดของสีทดสอบและ remote region elements เท่ากัน

Harrar และ Vienot [5] ศึกษาผลของคุณสมบัติของ neighboring surround (บริเวณที่อยู่ล้อมรอบสีทดสอบ) ต่อระดับการเหนี่ยวนำสีจาก peripheral field (บริเวณที่อยู่ล้อมรอบ neighboring surround) โดยกำหนด neighboring surround 5 แบบคือ ภาพธรรมชาติ ภาพที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของพิกเซลภายในภาพธรรมชาติ 2 แบบ และภาพที่เกิดจากการเฉลี่ยค่าสีของภาพธรรมชาติ 2 แบบ ซึ่งทั้งหมดมีค่าสีเฉลี่ยเท่ากัน จากผลการทดลองพบว่าสีทดสอบมีสีปรากฏแตกต่างกันในแต่ละ neighboring surround ซึ่งแสดงให้เห็นว่า spatio-chromatic organization (โครงสร้างเชิงระยะทางหรือตำแหน่งของสีภายในภาพ) โดยเฉพาะบริเวณใกล้กับสีทดสอบ ส่งผลต่อระดับการเหนี่ยวนำสีจาก peripheral field



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์

##### 1. จอภาพซีอาร์ที

- รุ่น: LaCIE Blue Electr22B4
- ขนาด: 22 นิ้ว
- ความละเอียดสูงสุด: 2048 x 1536 พิกเซล
- Dot pitch: 0.24 มม.

##### 2. เครื่องสเปกโทรเรดิโอมิเตอร์

- รุ่น: Konica Minolta CS-1000A
- Wavelength range: 380-780 นาโนเมตร
- Spectral bandwidth: 5 นาโนเมตร
- Wavelength precision:  $\pm 0.3$  nm (median wavelength: 546.1 nm)
- Luminance accuracy:  $\pm 2\%$ ,  $\pm 1$  digit
- Chromaticity accuracy:  $\pm 0.0015x$ ,  $\pm 0.001y$
- Luminance repeatability:  $\pm 0.1\%$ ,  $\pm 1$  digit
- Chromaticity xy repeatability:  $\pm 0.0002$

##### 3. เครื่องคอมพิวเตอร์ Fujitsu รุ่น A3110

- โพรเซสเซอร์ AMD Turion(tm) 64x2 Mobile Technology TL – 56
- 1.79 GHz, RAM 3 GB

##### 4. โปรแกรม ACDSSee 9 Photo Manager

##### 5. โปรแกรม Adobe Photoshop Version CS2

##### 6. โปรแกรม MATLAB version R2008a

#### 3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ

1. การทดสอบผลของความถี่เชิงระยะทางต่อระดับการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลัง
2. การปรับปรุงแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏด้วยสมการความถี่เชิงระยะทาง
3. การทดสอบประสิทธิภาพ

### 3.2.1 การทดสอบผลของความถี่เชิงระยะทางต่อระดับการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลัง

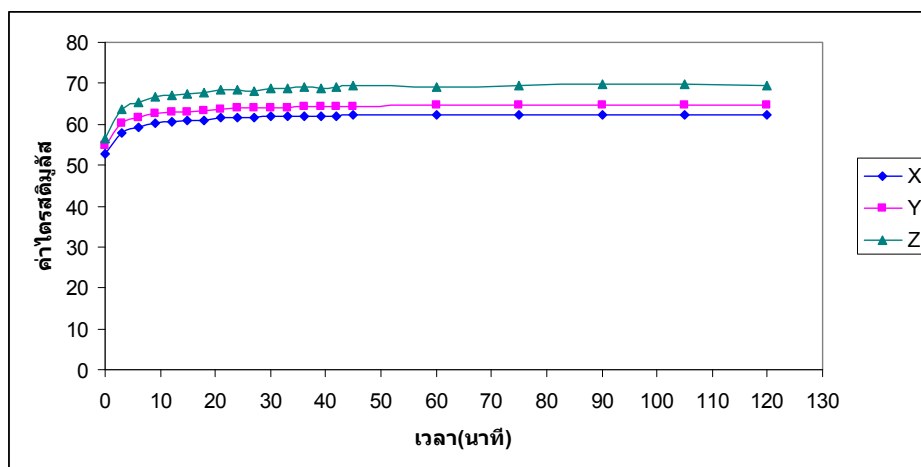
การทดสอบผลของความถี่เชิงระยะทางต่อระดับการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลัง ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนคือ 1. การเตรียมอุปกรณ์ 2. การเตรียมการทดลอง 3. การทดลอง 4. การสรุปและวิเคราะห์ผล ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.2.1.1 การเตรียมอุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองคือ จอภาพซีอาร์ซึ่งใช้ในการแสดงภาพสีให้ผู้สังเกตเปรียบเทียบสีรับรู้ อันเนื่องมาจากผลของความถี่เชิงระยะทางของภาพและการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลัง ดังนั้น ก่อนการทดลองต้องมีการเตรียมจอภาพ โดยการทดสอบความเสถียรในการแสดงสีเมื่อเวลาผ่านไป (temporal stability) และการหาลักษณะเฉพาะ (characterization) เพื่อแปลงค่าสี RGB ไปเป็นค่าสี XYZ ที่ผู้สังเกตรับรู้ได้อย่างถูกต้อง ขั้นตอนการทดสอบความเสถียรของจอภาพและการหาลักษณะเฉพาะมีรายละเอียดดังนี้

#### 1. Temporal stability test

Temporal stability เป็นการทดสอบเพื่อหาเวลาที่ทำให้จอภาพแสดงสีคงที่ ทดสอบโดยการวัดค่าสีของสีขาวที่มีค่า RGB เท่ากับ 255, 255, 255 ที่แสดงเต็มจอภาพซีอาร์ที่ทำการวัดค่าสีทุก ๆ 3 นาทีในช่วง 60 นาทีแรก และทุก ๆ 15 นาที จนครบ 2 ชั่วโมง ผลค่าสี XYZ ที่วัดได้ ณ เวลาต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ค่าสี XYZ ของสีขาวจอภาพในช่วงเวลา 2 ชั่วโมง

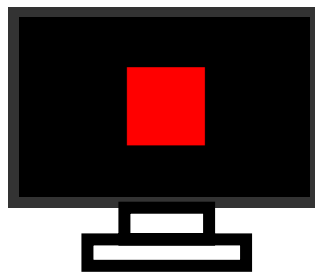
จากภาพที่ 3.1 จะเห็นได้ว่า เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 55 นาที ค่าสี XYZ เริ่มคงที่ ดังนั้นก่อนทำการทดลองหรือวัดค่าสีต้องเปิดจอภาพทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อให้จอภาพแสดงสีได้คงที่ก่อน

## 2. การสร้างแบบจำลองลักษณะเฉพาะของจอภาพซีอาร์ที

การหาลักษณะเฉพาะของจอภาพซีอาร์ทีคือการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า RGB ของอุปกรณ์กับค่าสี XYZ ซึ่งสัมพันธ์กับการรับรู้สีของมนุษย์ นำความสัมพันธ์นั้นมาสร้างแบบจำลองลักษณะเฉพาะ แบบจำลองที่ได้นำมาใช้แปลงค่าสีระหว่าง RGB และ XYZ เพื่อให้จอภาพแสดงสีได้ตรงตามต้องการ (แปลงจาก XYZ เป็น RGB) หรือเพื่อให้ทราบว่ารับรู้สีได้จากจอภาพ (แปลงจาก RGB เป็น XYZ) ซึ่งการสร้างแบบจำลองลักษณะเฉพาะมีขั้นตอนดังนี้

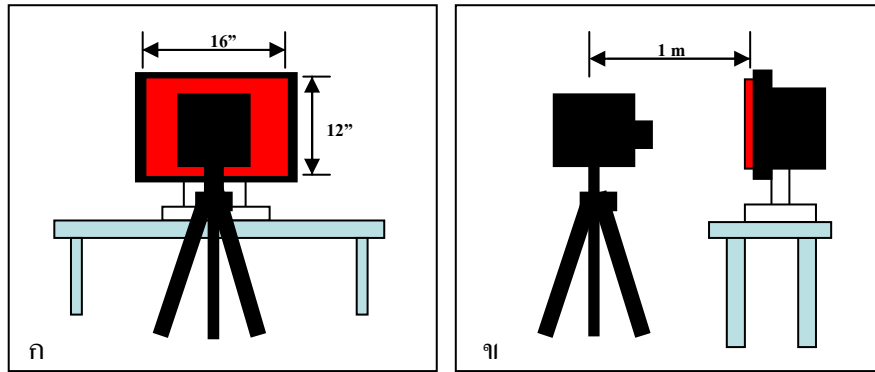
1. สร้างสีทดสอบ Training set ขนาด 6x6 ตารางนี้ ประกอบด้วย สีแดง, สีเขียว และสีน้ำเงิน ที่มีค่าสี RGB เท่ากับ (255, 0, 0), (0, 255, 0) และ (0, 0, 255) ตามลำดับ และสีเทาที่มีความสว่างแตกต่างกัน ซึ่งในที่นี้ใช้สีเทา (RGB มีค่าเท่ากัน) ที่มีค่า RGB เริ่มจาก 0 เพิ่มทีละ 16 จนถึง 255 รวมจำนวน 17 สี

2. สร้างสีทดสอบ Test set ขนาด 6x6 ตารางนี้ เพื่อใช้ทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองลักษณะเฉพาะของจอภาพซีอาร์ทีที่สร้างขึ้น สร้างสีทดสอบ 27 สีจากความเป็นไปได้ทั้งหมดในการกำหนดค่าสี RGB ด้วยค่า 0, 128 และ 255



ภาพที่ 3.2 ตำแหน่งสีทดสอบบนจอภาพซีอาร์ที

3. วัดสีทดสอบ Training set และ Test set ที่แสดงบนจอภาพซีอาร์ทีบนพื้นหลังสีดำดังภาพที่ 3.2 ด้วยเครื่องสเปกโตรเรดิโอมิเตอร์ในห้องมืด โดยให้เซ็นเซอร์ของเครื่องห่างจากจอภาพประมาณ 1 เมตร ตำแหน่งอุปกรณ์แสดงดังภาพที่ 3.3



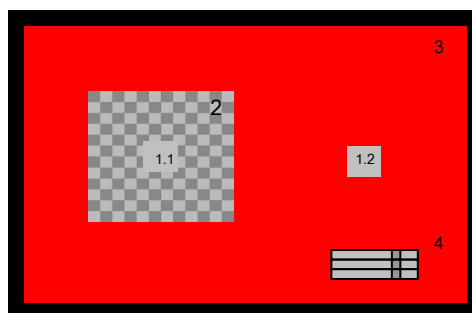
ภาพที่ 3.3 ตำแหน่งเครื่องสเปกโทรเมตรีโอมิเตอร์ขณะวัดค่าสีที่แสดงบนจอภาพซีอาร์ที  
ก) ภาพด้านหน้า ข) ภาพด้านข้าง

4. สร้างแบบจำลองลักษณะเฉพาะของจอภาพซีอาร์ทีจากค่าสีที่วัดจาก Training set โดยใช้แบบจำลอง GOG [10]

5. ทดสอบประสิทธิภาพความถูกต้องของการแปลงค่าสีของแบบจำลองที่สร้างขึ้น โดยคำนวณค่าความแตกต่างสีระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลอง GOG (การแปลงค่าสี RGB ที่กำหนดไว้ไปเป็นค่า XYZ) และค่าที่ได้จากการวัดสี Test set พบว่า ได้ค่าความแตกต่างสี ( $\Delta E_{ab}^*$ ) เท่ากับ 1.64

### 3.2.1.2 การเตรียมการทดลอง

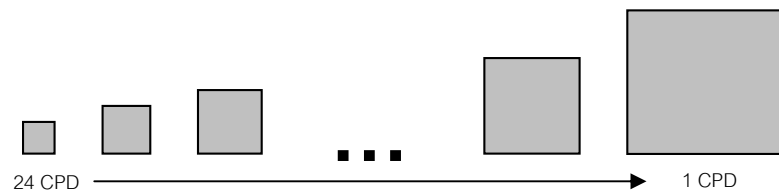
จอภาพขณะทำการทดลองแสดงดังภาพที่ 3.4 ซึ่งมีส่วนประกอบ 4 ส่วนคือ 1. สีทดสอบและสีอ้างอิง 2. ตารางหมากรุก 3. พื้นหลัง 4. แท่งปรับค่า RGB ซึ่งรายละเอียดของการเตรียมจอภาพและสภาวะการมองเห็นมีดังนี้



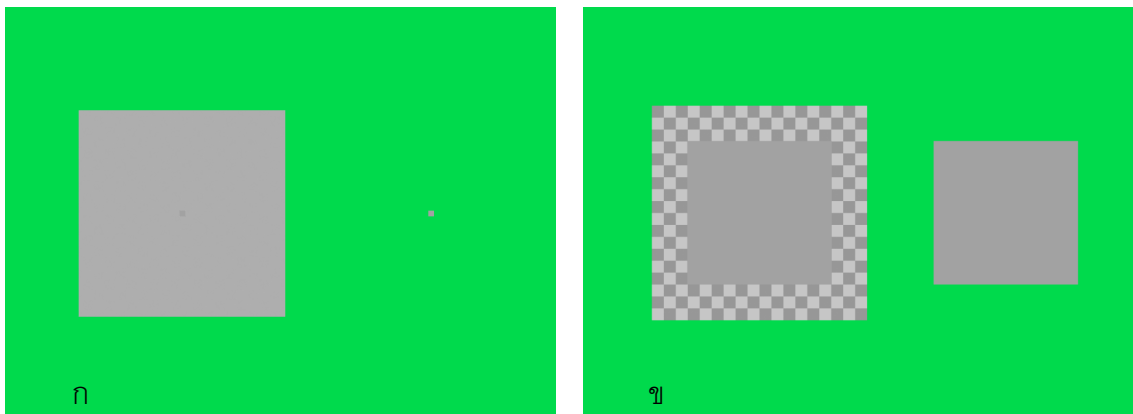
ภาพที่ 3.4 จอภาพขณะทำการทดลองประกอบด้วย (1.1) สีอ้างอิง, (1.2) สีทดสอบที่สามารถปรับสีได้, (2) ตารางหมากรุก, (3) พื้นหลัง และ (4) แท่งปรับค่าสี RGB

### 3.2.1.2.1 สีอ้างอิงและสีทดสอบ

สีอ้างอิงคือสีเทาที่มีตารางหมากรุกล้อมรอบทางซ้ายดังภาพที่ 3.4 (1.1) มีค่าสี XYZ เท่ากับ 34.52, 36.24, 37.92 ตามลำดับ สีทดสอบที่ปรับค่าสีได้อยู่บนพื้นหลังเดียวกันทางขวาดังแสดงในภาพที่ 3.4 (1,2) ขนาดของสีทดสอบและสีอ้างอิงเปลี่ยนแปลงขึ้นกับความถี่เชิงระยะทางของตารางหมากรุก โดยมีอัตราส่วนคงที่เท่ากับ 12 เท่าของขนาดตารางหมากรุก 1 ช่องเพื่อไม่ให้อัตราส่วนระหว่างขนาดของช่องตารางหมากรุกกับขนาดของแผ่นสีที่เปลี่ยนไปมีผลต่อสีปรากฏ [4] ดังภาพที่ 3.5 ขนาดสีทดสอบและสีอ้างอิงมีขนาดเล็กที่สุดเมื่อตารางหมากรุกมีความถี่เชิงระยะทางเท่ากับ 24 CPD และขนาดใหญ่ที่สุดเมื่อความถี่เชิงระยะทางเท่ากับ 1 CPD แสดงดังภาพที่ 3.6 (ก) และภาพที่ 3.6 (ข) ตามลำดับ



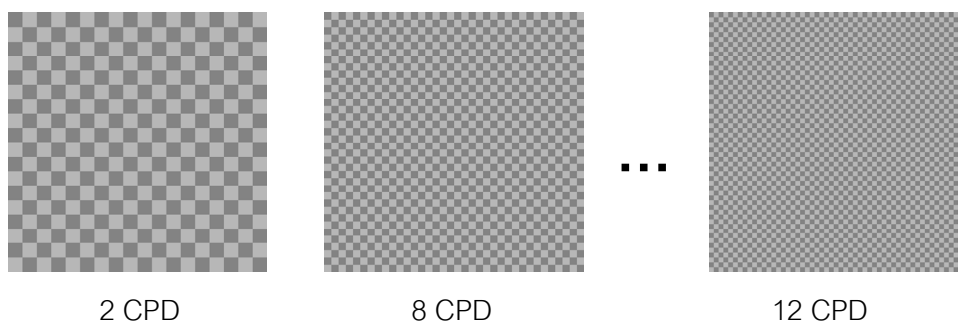
ภาพที่ 3.5 สีอ้างอิงและสีทดสอบที่มีขนาดต่างกันขึ้นกับความถี่เชิงระยะทาง



ภาพที่ 3.6 (ก) ขนาดสีทดสอบที่เล็กที่สุดแสดงบนตารางหมากรุกความถี่เท่ากับ 24 CPD

(ข) ขนาดสีทดสอบที่ใหญ่ที่สุดแสดงบนตารางหมากรุกความถี่เท่ากับ 1 CPD

### 3.2.1.2.2 ตารางหมากรุก



ภาพที่ 3.7 ตารางหมากรุกความถี่ต่าง ๆ

ตารางหมากรุกใช้จำลองความถี่เชิงระยะทางในภาพล้อมรอบสีอ้างอิงดังภาพที่ 3.4 (2) ตารางหมากรุกที่ใช้ในการทดลองแสดงดังภาพที่ 3.7 กำหนดให้มีขนาด 6x6 ตารางนี้ เพื่อให้สอดคล้องกับขนาดภาพถ่ายที่ได้รับความนิยมคือ 4x6 ตารางนี้ กำหนดความถี่เชิงระยะทาง 8 ค่าคือ 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12 และ 24 CPD ครอบคลุมความถี่เชิงระยะทางต่ำจนถึงสูง

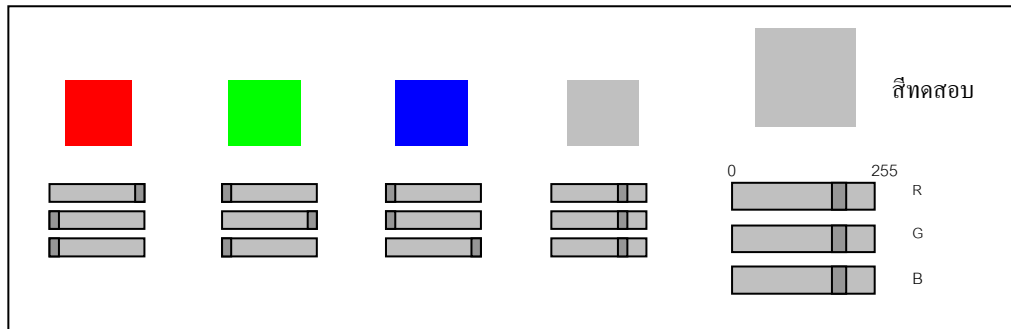
กำหนดค่าสี XYZ เฉลี่ยของตารางหมากรุกเท่ากับ 34.52, 36.24, 37.92 โดยตารางสีเข้มมีค่าสี XYZ เท่ากับ 22.20, 23.26, 24.20 และตารางสีอ่อนมีค่าสี XYZ เท่ากับ 46.29, 48.66, 50.97 ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากค่าความถี่และความเปรียบต่างความสว่างเฉลี่ยในภาพธรรมชาติ [12]

### 3.2.1.2.3 พื้นหลัง

พื้นหลังกำหนดให้เป็นบริเวณที่เหลือนบนจอภาพสีอาร์ที ในการทดลองนี้กำหนดสีไว้ 4 สีหลักตามทฤษฎีคู่สีตรงข้าม [1] คือ สีแดงที่มีค่าสี XYZ เท่ากับ 45.56, 24.60, 2.64 สีเขียวที่มีค่าสี XYZ เท่ากับ 32.26, 67.23, 11.59 สีเหลืองที่มีค่าสี XYZ เท่ากับ 74.20, 88.23, 13.53 และสีน้ำเงินที่มีค่าสี XYZ เท่ากับ 17.19, 7.85, 90.76

### 3.2.1.2.4 แ่งปรับค่าสี RGB

แ่งปรับค่าสี RGB อยู่บริเวณด้านล่างของสีทดสอบ สร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อใช้ในการปรับสีทดสอบ กำหนดค่า RGB เพิ่มขึ้นจากซ้ายไปขวาจาก 0-255 ตัวเลื่อนปรับค่า R, G และ B เรียงลำดับจากบนลงล่าง ดังภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 แท่งปรับค่า RGB และตัวอย่างสีทดสอบที่ได้จากการผสมค่า RGB

### 3.2.1.2.5 สภาวะการมองเห็น

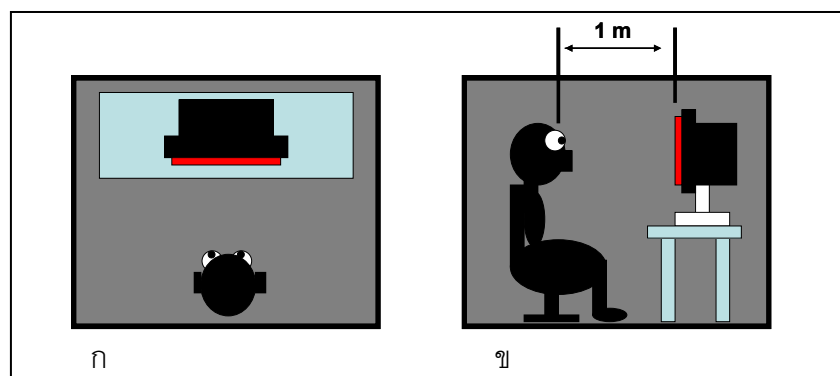
ขณะทำการทดลองผู้สังเกตอยู่ห่างจากจอภาพคอมพิวเตอร์เป็นระยะ 1 เมตร ทำการทดลองในห้องมืด โดยผู้สังเกตดูสีอ้างอิงและสีทดสอบด้วยวิธี Simultaneous binocular คือ ผู้สังเกตมองเห็นสีทดสอบและสีอ้างอิงพร้อมกันระหว่างทำการเปรียบเทียบสี

### 3.2.1.3 การทดลอง

การทดลองทำโดยให้ผู้สังเกตจำนวน 10 คนปรับสีทดสอบให้มีสีปรากฏตรงกับสีอ้างอิง โดยเปลี่ยนค่าความถี่ 9 ค่าคือ 0, 1, 2, 4, 6, 8, 12 และ 24 CPD ซึ่ง 0 CPD คือไม่มีตารางหมากรุกและสีพื้นหลัง 4 สี ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง โดยก่อนการทดลองต้องเปิดจอภาพแสดงสีขาวเต็มจอภาพไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อให้จอภาพแสดงสีได้คงที่

การทดลองมีขั้นตอนดังนี้

1. ผู้สังเกตนั่งห่างจากจอภาพเป็นระยะ 1 เมตร ในห้องมืด ดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 ตำแหน่งจอภาพและผู้สังเกต ก) ภาพด้านบน ข) ภาพด้านข้าง

2. ผู้สังเกตปรับสายตาเข้ากับจอภาพที่แสดงสีพื้นหลังที่ต้องการทดสอบก่อนทำการทดลองเป็นเวลา 1 นาที
3. ผู้สังเกตปรับสีทดสอบให้มีสีปรากฏตรงกับสีอ้างอิง
4. ผู้ทดลองบันทึกค่า RGB ของสีทดสอบ
5. ทำซ้ำข้อ 3-4 โดยเปลี่ยนความถี่ตารางหมากรุกจนครบ 9 ค่า
6. ทำซ้ำข้อ 2-4 โดยเปลี่ยนสีพื้นหลังจนครบ 4 สี

#### 3.2.1.4 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

คำนวณค่าสี XYZ จากค่า RGB ที่ได้จากการทดลองด้วยแบบจำลอง GOG และคำนวณค่าสี CIELAB เขียนกราฟระหว่างค่าสีเฉลี่ยจากผู้สังเกตทั้งหมด 10 คนกับความถี่เชิงระยะทางเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์

### 3.2.2 การปรับปรุงแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏด้วยสมการความถี่เชิงระยะทาง

การปรับปรุงแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏด้วยสมการความถี่เชิงระยะทางประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือ 1. การสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เชิงระยะทางกับระดับการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลัง และ 2. การหาค่าความถี่เชิงระยะทางของแต่ละพิกเซลในภาพ

3.2.2.1 การสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เชิงระยะทางกับระดับการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลัง

ขั้นตอนนี้เป็นการนำผลที่ได้จากการทดสอบผลของความถี่เชิงระยะทางต่อระดับการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลังมาสร้างแบบจำลองทำนายค่าสีเพื่อผลิตภาพสีที่ปรากฏเมื่อสีของพื้นหลังเปลี่ยนไป โดยแบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้ เน้นการทำงานร่วมกับ CIECAM02 ซึ่งเป็นแบบจำลองปรากฏสีที่ได้รับการแนะนำจาก CIE ว่าทำนายค่าสีปรากฏได้แม่นยำและเหมาะสมกับการใช้ผลิตภาพสี งานวิจัยนี้สร้างแบบจำลองขึ้นมา 2 แบบ แบบจำลองแรกปรับปรุงจากแบบจำลองของ Binghua และคณะ (ซึ่งในงานวิจัยนี้เรียกว่า CIECAM02TT1) แบบจำลองที่ 2 ปรับปรุงจาก CIECAM02-m1 ทั้งแบบจำลอง CIECAM02TT1 และ CIECAM02-m1 สามารถทำนายค่าสีปรากฏที่เปลี่ยนไปเนื่องจากสีของพื้นหลังได้อยู่แล้ว แต่งานวิจัยนี้ปรับปรุงให้สามารถทำนายค่าสี



ปรากฏที่เปลี่ยนไปเนื่องจากความถี่เชิงระยะทางด้วย เรียกแบบจำลองที่ได้ปรับปรุงใหม่ว่า CIECAM02TTF และ CIECAM02M1F ตามลำดับ ซึ่งรายละเอียดมีดังนี้

### 3.2.2.1.1 CIECAM02TTF

CIECAM02TTF คือ แบบจำลองเพื่อทำนายค่าสีปรากฏที่เกิดจากการปรับปรุงให้ CIECAM02TT1 สามารถทำนายค่าสีปรากฏที่เปลี่ยนไปเนื่องจากความถี่เชิงระยะทาง โดยกำหนดให้ระดับการเปลี่ยนแปลงสีเนื่องจากการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลังมีระดับเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากความถี่เชิงระยะทาง และระดับที่เปลี่ยนไปนี้เพิ่มขึ้นหรือลดลงสัมพันธ์กับระดับการเปลี่ยนแปลงสีเนื่องจากการเหนี่ยวนำจากสีพื้นหลังด้วย จากหลักการดังกล่าวกำหนดให้

TT1ref หมายถึง ระดับการเปลี่ยนแปลงสีเนื่องจากการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลังที่ใช้เป็นระดับอ้างอิง

TTFref หมายถึง ระดับการเปลี่ยนแปลงสีเนื่องจากการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลังที่ใช้เป็นระดับอ้างอิง (TT1ref) แปรลงสีเนื่องจากการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลังที่ใช้เป็นระดับอ้างอิง (TT1ref)

TT1 หมายถึง ระดับการเปลี่ยนแปลงสีเนื่องจากการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลังใด ๆ

TTF หมายถึง ระดับการเปลี่ยนแปลงสีเนื่องจากการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลังใด ๆ (TT1) แปรลงสีเนื่องจากการเหนี่ยวนำของสีพื้นหลังใด ๆ (TT1)

TTtotal หมายถึง ระดับการเปลี่ยนแปลงสีเนื่องจากการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลัง (TT1) และระดับการเปลี่ยนแปลงสีเนื่องจากการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลัง (TTF) รวมกัน

จากหลักการข้างต้นสามารถหาค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้

TT1ref เป็นค่าคงที่ที่คำนวณจากค่าเฉลี่ยระดับการเปลี่ยนแปลงสีเนื่องจากการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลังทั้ง 4 สี จากการทดสอบผลของความถี่เชิงระยะทางต่อระดับการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลัง

TTFref คำนวณจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เชิงระยะทางกับระดับการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลัง

กำหนดให้  $c$  คือค่า  $C_{ab}^*$  ของสีพื้นหลัง

$$TT1 = 0.0009c^{2.1145} \dots\dots\dots(3.1)$$

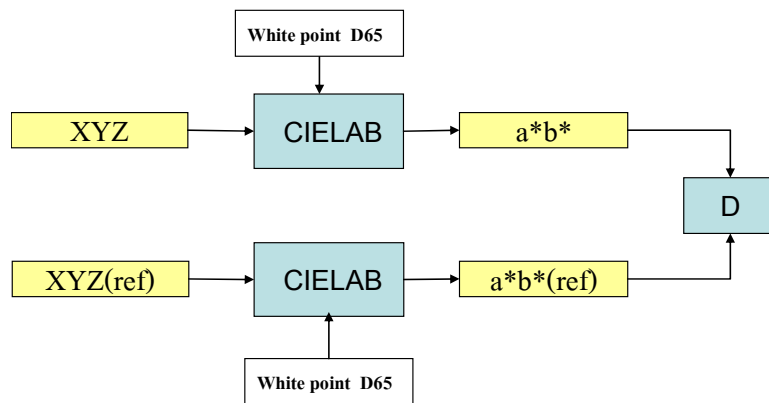
$$TTF = (TT1/TT1ref)TTFref \dots\dots\dots(3.2)$$

$$TTtotal = TT1 \pm TTF \dots\dots\dots(3.3)$$

ขั้นตอนในการสร้างสมการเพื่อหาค่า TT1ref และ TTFref มีดังนี้

1. หาค่าเฉลี่ยค่าสี XYZ จากการทดสอบผลของความถี่เชิงระยะทางต่อระดับการเหนียวนำสีของสีพื้นหลังในแต่ละความถี่เชิงระยะทางทั้ง 9 ค่าบนพื้นหลัง 4 สี
2. แปลงค่าสี XYZ เฉลี่ยจากข้อที่ 1 และค่าสี XYZ ของสีอ้างอิงเป็นค่าสี L\*a\*b\* กำหนดสีขาวอ้างอิง (white point) D65 ได้ค่า L\*a\*b\* และ L\*a\*b\* (ref) ตามลำดับ
- 3 . คำนวณค่าระยะห่างระหว่างค่า a\*b\* ของสีทดสอบกับค่า a\*b\*(ref) ของสีอ้างอิงบนปริภูมิสี CIELAB ดังสมการที่ (3.4) ได้ค่าระยะห่างที่ความถี่เชิงระยะทางทั้ง 9 ค่า บนพื้นหลัง 4 สี กำหนดให้ D หมายถึงระยะห่างระหว่าง a\*b\* กับค่า a\*b\*(ref) ขั้นตอนการคำนวณแสดงดังแผนภูมิที่ 3.1

$$D = \sqrt{(a^* - a^*(ref))^2 + (b^* - b^*(ref))^2} \dots\dots\dots(3.4)$$

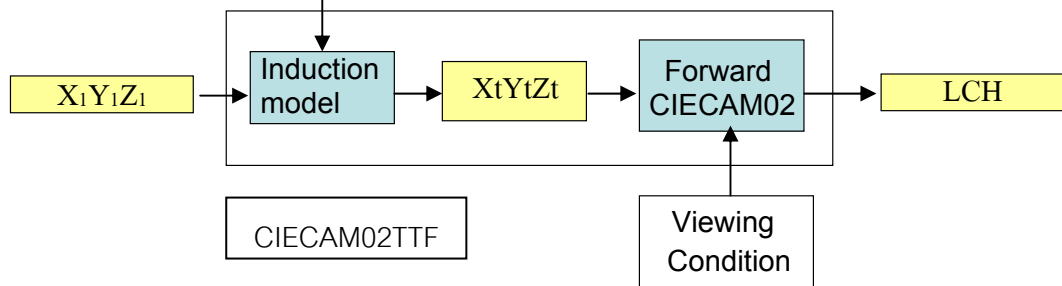
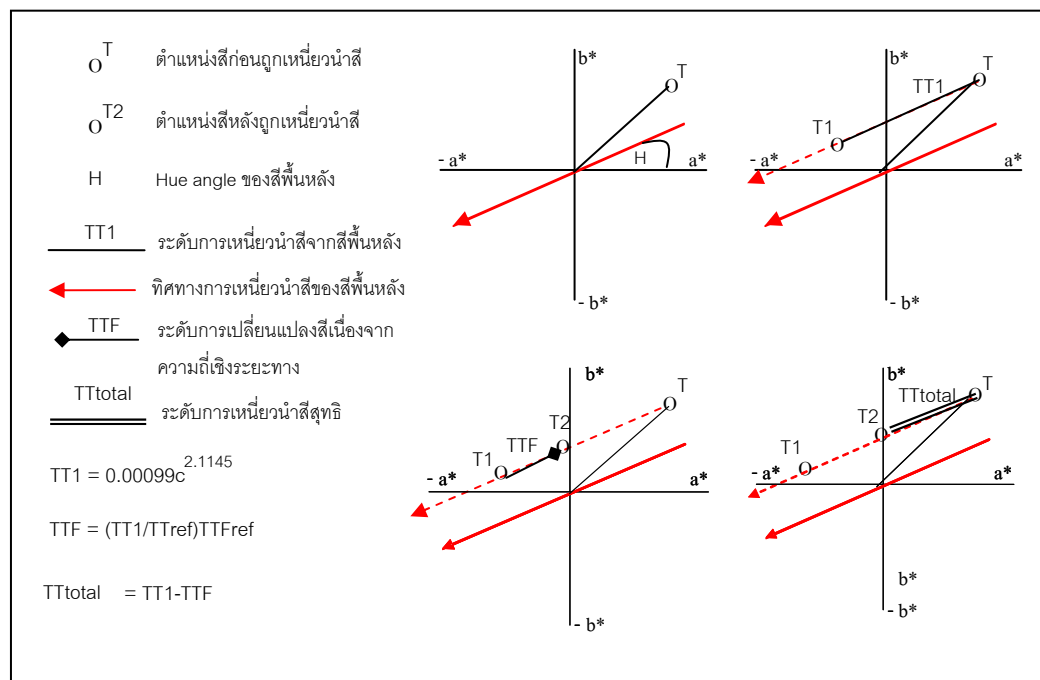


แผนภูมิที่ 3.1 การหาระยะห่างระหว่างสีทดสอบและสีอ้างอิง

4. สร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างที่ได้จากข้อ 3 กับความถี่เชิงระยะทาง เพื่อใช้ในการหาค่า TTF

5. คำนวณ  $TT1_{ref}$  จากการเฉลี่ยค่า  $TT1$  ของแต่ละพื้นหลังที่ใช้ในการทดลองหาค่า  $TT_{ref}$

ขั้นตอนการทำงานของ CIECAM02TTF ไม่แตกต่างจาก CIECAM02TT1 โดยเพิ่มเพียงการคำนวณค่า  $TTF$  มาคำนวณร่วมกับค่า  $TT1$  เพื่อให้ได้ค่า  $TT_{total}$  มาใช้แทน  $TT1$  ดังแสดงในแผนภูมิที่ 3.2



แผนภูมิที่ 3.2 ขั้นตอนการคำนวณค่าสีปรากฏด้วย CIECAM02TTF

3.2.2.1.2 CIECAM02M1F

CIECAM02M1F คือ แบบจำลองเพื่อทำนายค่าสีปรากฏที่เกิดจากการปรับปรุงให้ CIECAM02-m1 สามารถทำนายค่าสีปรากฏที่เปลี่ยนไปเนื่องจากความถี่เชิงระยะทาง โดยการ

สร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $p$  กับความถี่เชิงระยะทางจำนวน 2 สมการเพื่อคำนวณค่าโครมา และค่าสีสัน โดยเรียกค่า  $p$  ที่ได้ว่า  $p_c$  และ  $p_h$  ตามลำดับ ส่วน  $p$  สำหรับคำนวณความสว่าง ( $p_l$ ) ให้เท่ากับ 0 คือ ใช้ CIECAM02 ในการคำนวณ เนื่องจาก CIECAM02 สามารถคำนวณความสว่างที่เปลี่ยนไปเนื่องจากความสว่างของพื้นหลังได้ ขั้นตอนในการหาสมการเพื่อหาค่า  $p_c$  และ  $p_h$  มีดังนี้

1. หาค่าสี XYZ เฉลี่ยในแต่ละความถี่เชิงระยะทางบนพื้นหลังต่าง ๆ จากการทดสอบผลของความถี่เชิงระยะทางต่อระดับการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลัง
2. คำนวณค่าโครมา (C) และสีสัน (H) ด้วย CIECAM02TT1 ข้อมูลนำเข้าสภาวะการมองเห็น (viewing condition) ที่ใช้ในการคำนวณดังตารางที่ 3.1

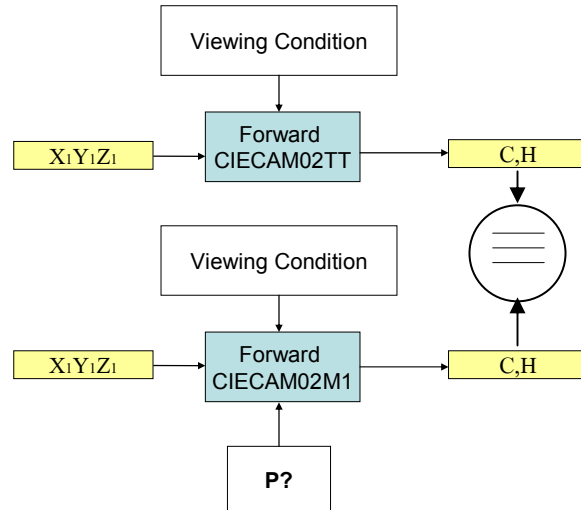
ตารางที่ 3.1 ข้อมูลนำเข้าสภาวะการมองเห็นในการทดสอบผลของความถี่เชิงระยะทางต่อระดับการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลังสำหรับ CIECAM02TT1 และ CIECAM02-m1

Viewing condition	
White point ( $X_w, Y_w, Z_w$ )	$X = 94.71, Y = 100, Z = 104.34$
Adapting luminance ( $L_A$ )	$L_A = 20(88.64)/100$
Background luminance ( $Y_b$ )	สีแดง $Y_b = 21.81$ , สีเขียว $Y_b = 59.60$ , สีเหลือง $Y_b = 78.21$ , สีนํ้าเงิน $Y_b = 6.96$
Surround conditions	$\text{dim } c = 0.59, F = 0.9, N_c = 0.9$
Colour background ( $X_b, Y_b, Z_b$ )	สีแดง $X = 45.57, Y = 24.61, Z = 2.64$ สีเขียว $X = 32.26, Y = 67.23, Z = 11.60$ สีเหลือง $X = 74.21, Y = 88.23, Z = 13.53$ สีนํ้าเงิน $X = 17.20, Y = 7.85, Z = 90.76$

3. คำนวณค่าโครมา ด้วย CIECAM02-m1 มีข้อมูลนำเข้ดังตารางที่ 3.1 โดยสุ่มค่า  $p$  เพื่อให้ได้ค่าโครมาที่ใกล้เคียงกับค่าโครมาที่คำนวณด้วย CIECAM02TT1 ในข้อ 2 โดยในแต่ละความถี่เชิงระยะทางจะได้ค่า  $p$  เพียง 1 ค่าที่ทำให้มีค่าโครมาใกล้เคียงกับโครมาในข้อ 2 มากที่สุดในทุกสีพื้นหลังเรียกว่า  $p_c$  การหาค่า  $p$  แสดงดังแผนภูมิที่ 3.3

4. หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $p$  กับความถี่เชิงระยะทาง จากการนำข้อมูลที่ได้จากข้อที่ 3 มาเขียนกราฟระหว่างค่า  $p$  กับความถี่เชิงระยะทางของทั้ง 4 สีพื้นหลังแล้วหาสมการคำนวณค่า  $p_c$  จากกราฟ

5. ทำซ้ำข้อ 3-4 โดยเปลี่ยนจากการหาค่าโครมาเป็นการหาค่าสีสัน เพื่อหาสมการคำนวณค่า  $ph$



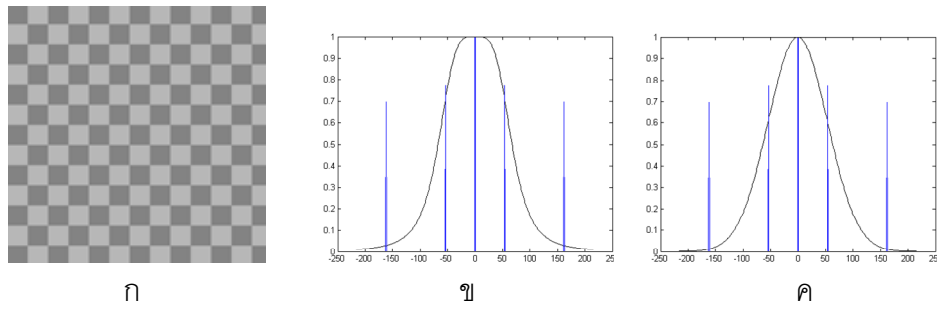
แผนภูมิที่ 3.3 ขั้นตอนการหาค่า  $p$  เพื่อสร้างสมการหาค่า  $pc$  และ  $ph$

ขั้นตอนการทำงานของ CIECAM02M1F ไม่แตกต่างจาก CIECAM02-m1 มีเพียงการเปลี่ยนจากค่า  $pc$  และ  $ph$  ที่เป็นค่าคงที่ มาเป็นการใช้สมการคำนวณค่า  $pc$  และ  $ph$  เท่านั้น

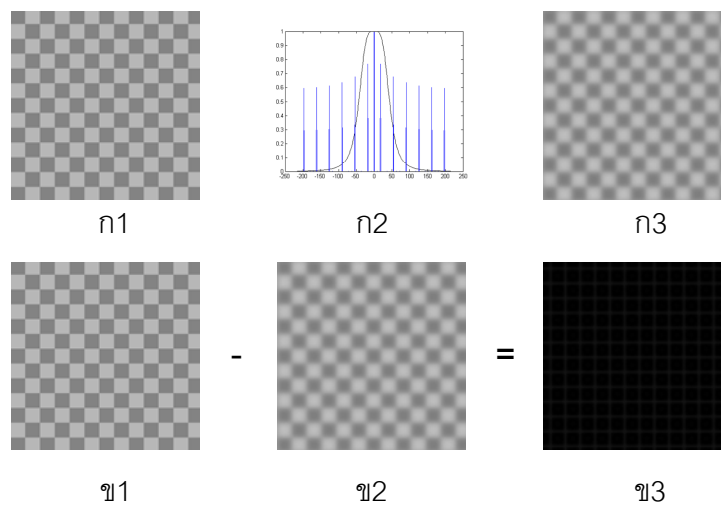
### 3.2.2.2 การหาค่าความถี่เชิงระยะทางของแต่ละพิกเซลในภาพ

การหาค่าความถี่เชิงระยะทางของแต่ละพิกเซลในภาพทำโดยการแปลงฟูเรียร์ภาพให้อยู่ในโดเมนความถี่แล้วใช้ฟิลเตอร์แบ่งความถี่เชิงระยะทางของภาพแล้วแปลงฟูเรียร์กลับเป็นภาพ ถ้าความถี่เชิงระยะทางใดทำให้พิกเซลใดมีค่าสีเท่ากันหรือเข้าใกล้ต้นฉบับเกินกว่าค่าคงที่ที่กำหนดซึ่งในงานวิจัยนี้จะเรียกค่าคงที่นี้ว่าค่า Threshold ถือว่าความถี่เชิงระยะทางนั้นคือความถี่ของพิกเซลนั้น ๆ

ฟิลเตอร์ที่เลือกใช้คือฟิลเตอร์ Butterworth ( $n = 2$ ) เนื่องจากมีค่า cutoff frequency ที่แม่นยำกว่า ฟิลเตอร์ Gaussian ทำให้ได้ภาพหลังการแบ่งความถี่ที่คมชัดกว่าและได้รับอิทธิพลจากความถี่ข้างเคียงน้อยกว่า ภาพฟูเรียร์ของตารางหมากรุกที่ใช้ฟิลเตอร์ Butterworth และ Gaussian แบ่งความถี่เชิงระยะทางแสดงดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 (ก) ภาพตารางหมากรุก และ (ข, ค) ภาพฟูรีเยร์ของตารางหมากรุกที่ถูกแบ่งความถี่เชิงระยะทางโดยฟิลเตอร์ Butterworth และฟิลเตอร์ Gaussian ตามลำดับ



ภาพที่ 3.11 ขั้นตอนการหา Threshold (ก) แสดงการแบ่งความถี่เชิงระยะทางและภาพผลลัพธ์ (ก1) ภาพต้นฉบับ (ก2) ภาพฟูรีเยร์การแบ่งความถี่เชิงระยะทาง (ก3) ภาพผลลัพธ์ (ข) แสดงการหา Threshold ด้วยการนำภาพต้นฉบับลบภาพผลลัพธ์จากการแบ่งความถี่ (ข1) ภาพต้นฉบับ (ข2) ภาพผลลัพธ์จากการแบ่งความถี่ (ข3) ภาพ absolute ผลต่างเพื่อหาค่า Threshold

การหาค่า Threshold มีขั้นตอนการหา ดังนี้

1. นำตารางหมากรุกที่ใช้ในการทดสอบผลของความถี่เชิงระยะทางต่อระดับการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลังทั้ง 8 ค่าคือ 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12 และ 24 CPD มาแปลงฟูรีเยร์ให้อยู่ในโดเมนความถี่ ดังภาพที่ 3.11 (ก1, ก2)

2. แบ่งความถี่เชิงระยะทางของตารางหมากรุกด้วยฟิลเตอร์ Butterworth กำหนดค่า cutoff frequency เท่ากับความถี่เชิงระยะทางตารางหมากรุก (CPI) ดังภาพที่ 3.11 (ก2)

3. แปลงฟูรีเยร์กลับเป็นภาพ ดังภาพที่ 3.11 (ก3)

4. นำภาพต้นฉบับลบภาพที่ผ่านการแบ่งความถี่จากข้อ 3 ดังภาพที่ 3.11 (ข1, ข2)

5. นำผลต่างที่ได้จากข้อที่ 4 ดังภาพที่ 3.11(ข3) ทำเป็นค่า absolute แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย
6. ทำซ้ำข้อที่ 1-5 โดยเปลี่ยนความถี่เชิงระยะทางจนครบ 8 ค่า
7. นำค่าเฉลี่ยที่ได้ทั้ง 8 ค่า มาหาค่าเฉลี่ยซึ่งจะใช้เป็นค่า Threshold

ขั้นตอนการหาความถี่เชิงระยะทางของแต่ละพิกเซลภายในภาพมีขั้นตอนดังนี้

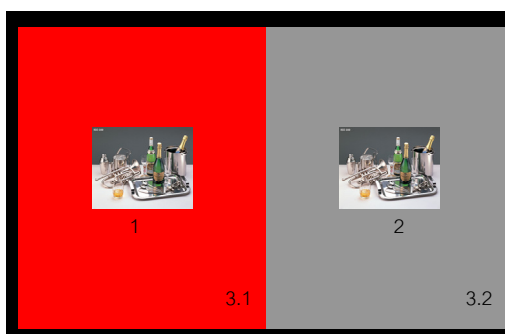
1. กำหนดช่วงความถี่โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0-24 CPD 9 ค่า เช่น 0.12, 0.25, 0.5, 1, 2, 3, 4, 6, 8 CPD แปลงค่าความถี่เชิงระยะทางจากหน่วย CPD เป็น CPI
2. ทำภาพเป็นขาวดำโดยการแปลงค่า RGB ของภาพเป็น CIELAB และกำหนดให้ค่า  $a^*b^*$  เท่ากับ 0 คงไว้แต่ค่า  $L^*$  แล้วแปลงกลับมาเป็นค่า RGB
3. นำภาพขาวดำที่ได้จากข้อ 2 มาแปลงฟูเรียร์ให้อยู่ในโดเมนความถี่
4. แบ่งความถี่เชิงระยะทางด้วยฟิลเตอร์ Butterworth ( $n = 2$ ) ตามค่าความถี่เชิงระยะทาง (CPI) ที่กำหนดไว้ในข้อ 1
5. แปลงฟูเรียร์กลับมาเป็นภาพ ซึ่งจะได้ภาพจำนวน 10 ภาพที่มีความถี่เชิงระยะทางอยู่ในช่วงต่าง ๆ ดังนี้ 0-0.12, 0-0.25, 0-0.5, 0-1, 0-2, 0-3, 0-4, 0-6, 0-8 และ 0-24 CPD
6. นำภาพขาวดำที่ได้จากข้อ 2 ลบภาพผลลัพธ์จากการแบ่งความถี่เชิงระยะทางในข้อ 5 แล้ว absolute ผลต่างที่ได้
7. พิกเซลใดในภาพผลต่างที่ทำเป็นค่า absolute แล้วจากข้อ 6 มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ Threshold กำหนดให้เป็นสีดำ ส่วนพิกเซลที่เหลือให้เป็นสีขาว
8. สร้างภาพอินเวอร์สของภาพที่ได้จากข้อ 7
9. หาค่าความถี่เชิงระยะทางของแต่ละพิกเซลโดยกำหนดให้พิกเซลสีดำของภาพที่ 9 (0-8 CPD) ที่ได้จากการอินเวอร์สในข้อ 8 ให้อยู่ในช่วงความถี่สูงสุดคือช่วง 8-24 CPD พิกเซลสีดำของภาพที่ 1 ที่ได้จากข้อ 7 กำหนดให้อยู่ในช่วงความถี่ต่ำสุดคือช่วง 0-0.12 CPD พิกเซลในช่วงความถี่อื่น ๆ หาได้จากพิกเซลสีดำที่เกิดจากการนำภาพที่ได้จากข้อ 7 ที่มีความถี่สูงกว่าบวกกับอินเวอร์สของภาพที่มีความถี่ต่ำกว่าที่ได้จากข้อ 8 เช่น พิกเซลที่อยู่ในช่วงความถี่เชิงระยะทางเท่ากับ 4-6 CPD ได้จากการนำภาพ 0-6 CPD ที่ได้จากข้อ 7 บวกด้วยภาพอินเวอร์สของภาพ 0-4 CPD ที่ได้จากข้อ 8 และกำหนดค่าความถี่เชิงระยะทางของแต่ละพิกเซลเท่ากับค่าเฉลี่ยของช่วงความถี่เชิงระยะทางที่พิกเซลนั้นอยู่ เช่น พิกเซลที่อยู่ในช่วงความถี่เชิงระยะทางเท่ากับ 4-6 CPD จะถูกกำหนดให้มีความถี่เชิงระยะทางเท่ากับ 5 CPD
10. ถ้าพิกเซลหนึ่งมีมากกว่า 1 ความถี่เชิงระยะทางที่ทำให้ผ่าน Threshold จะถือความถี่ต่ำสุดเป็นหลัก

### 3.2.3 การทดสอบประสิทธิภาพ

การทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏสีทำโดยให้ผู้สังเกตเปรียบเทียบภาพสีต้นฉบับที่แสดงบนพื้นหลังที่มีสี ภาพผลิตซ้ำบนพื้นหลังสีเทา โดยภาพผลิตซ้ำนี้ผลิตผ่านแบบจำลองต่าง ๆ ดังนี้ CIECAM02, CIECAM02TT1, CIECAM02-m1, CIECAM02TTF, CIECAM02M1F และภาพที่ไม่ผ่านกระบวนการใด ๆ ผู้สังเกตให้คะแนนความเหมือนของสี ขั้นตอนการดำเนินงานมี 3 ขั้นตอน คือ 1.การเตรียมการทดลอง 2. การทดลอง 3. การสรุปและวิเคราะห์ผล ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.2.3.1 การเตรียมการทดลอง

จอภาพขณะทำการทดลองแสดงดังภาพที่ 3.12 โดยมีส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วนคือ ภาพต้นฉบับ, ภาพผลิตซ้ำและพื้นหลัง



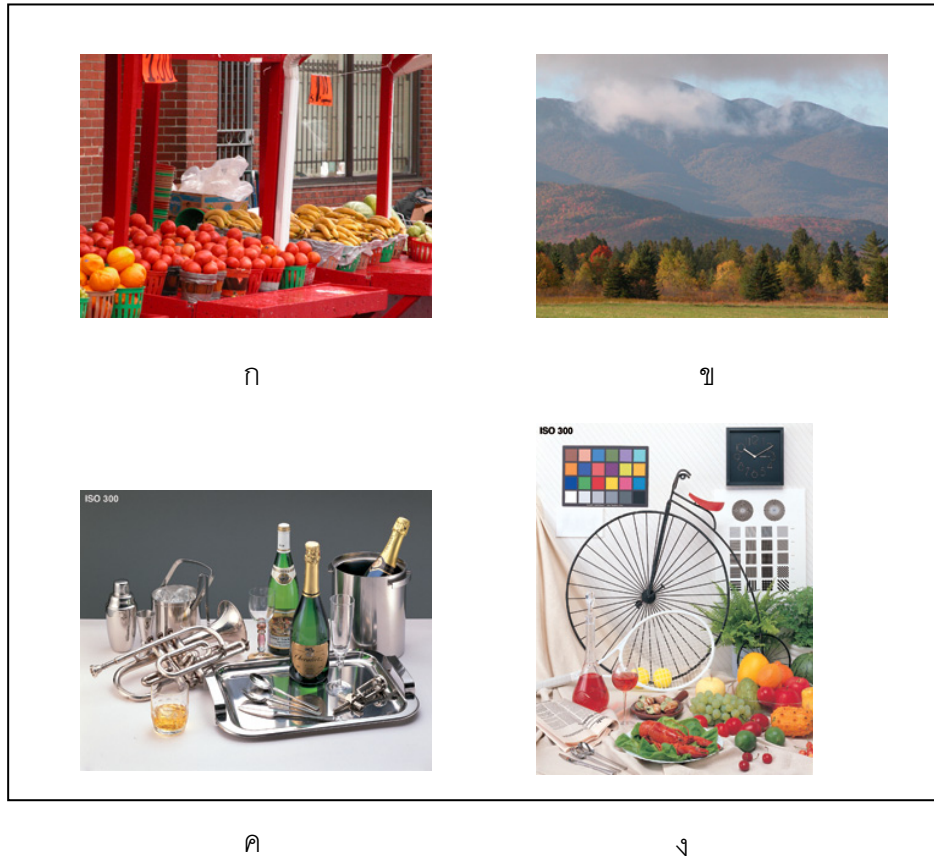
ภาพที่ 3.12 จอภาพขณะทำการทดลองประกอบด้วย (1) ภาพต้นฉบับ, (2) ภาพผลิตซ้ำ (3.1) พื้นหลังที่มีสี และ (3.2) พื้นหลังสีเทา

#### 3.2.3.1.1 ภาพต้นฉบับ

ภาพต้นฉบับคือภาพบนพื้นหลังที่มีสีต้นทางซ้ายดังภาพที่ 3.12 ภาพต้นฉบับมีทั้งหมด 4 ภาพ คือ ภาพขวด ภูเขา ร้านค้า และภาพวงล้อ ดังภาพที่ 3.13

ภาพร้านค้าและภูเขามีแหล่งที่มาจาก McGill Calibrated Color Images Database ส่วนภาพขวดและวงล้อ เป็นภาพมาตรฐานของ ISO (ISO Standard Images)





ภาพที่ 3.13 ภาพต้นฉบับจำนวน 4 ภาพ (ก) ขวด , (ข) ภูเขา , (ค) ร้านค้า และ (ง) วงล้อ

### 1. ร้านค้า

ร้านค้าเป็นภาพที่มีสีสดและพิกเซลมีความถี่เชิงระยะทางต่ำและสูงปะปนกัน ดังภาพที่ 3.14 ภาพร้านค้าขนาด 288x216 พิกเซล ดูที่ระยะห่าง 1 เมตรมีพื้นที่ที่มีความถี่เชิงระยะทางในช่วง 0-2 CPD, 2-8 CPD และ 8-24 CPD เท่ากับ 48%, 47% และ 5% ตามลำดับ ภาพประกอบด้วยกำแพงอิฐ, ลูกกรง และผลไม้ที่มีรายละเอียดค่อนข้างมากจึงทำให้พิกเซลบริเวณดังกล่าวมีความถี่เชิงระยะทางค่อนข้างสูง



ภาพที่ 3.14 พิกเซลที่อยู่ในช่วงความถี่เชิงระยะทาง (1) 0-2 CPD, (2) 2-8 CPD และ (3) 8-24 CPD ของภาพร้านค้า แสดงโดยใช้สีดำ

## 2. ภูเขา

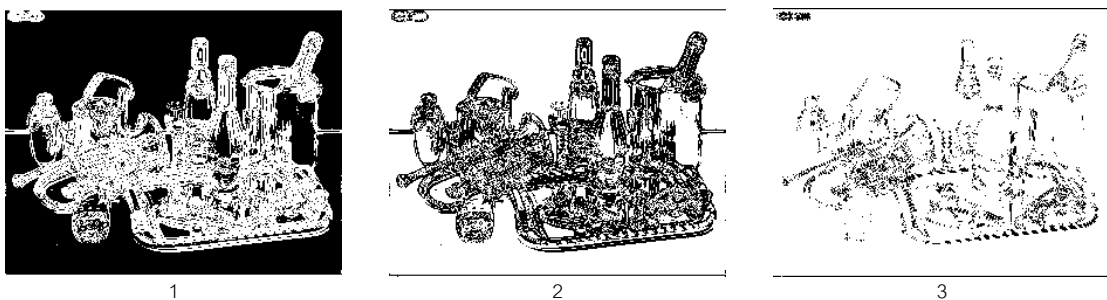
ภูเขาเป็นภาพที่มีสีตามธรรมชาติและพิกเซลส่วนใหญ่มีความถี่เชิงระยะทางต่ำ ดังภาพที่ 3.15 ภาพภูเขารายละเอียด 288x216 พิกเซล ที่ดูที่ระยะห่าง 1 เมตรมีพื้นที่ที่มีความถี่เชิงระยะทางในช่วง 0-2 CPD, 2-8 CPD และ 8-24 CPD เท่ากับ 85%, 14.5% และ 0.5% ตามลำดับ โดยมีองค์ประกอบสำคัญคือ ภูเขาบริเวณกลางภาพ, ท้องฟ้า และก้อนเมฆ ที่ไม่มีรายละเอียดมากนักจึงทำให้พิกเซลบริเวณนี้มีความถี่ต่ำ โดยมีฉากหน้าเป็นป่าสนที่มีความถี่เชิงระยะทางสูง



ภาพที่ 3.15 พิกเซลที่อยู่ในช่วงความถี่เชิงระยะทาง (1) 0-2 CPD, (2) 2-8 CPD และ (3) 8-24 CPD ของภาพภูเขา แสดงโดยใช้สีดำ

## 3. ขวด

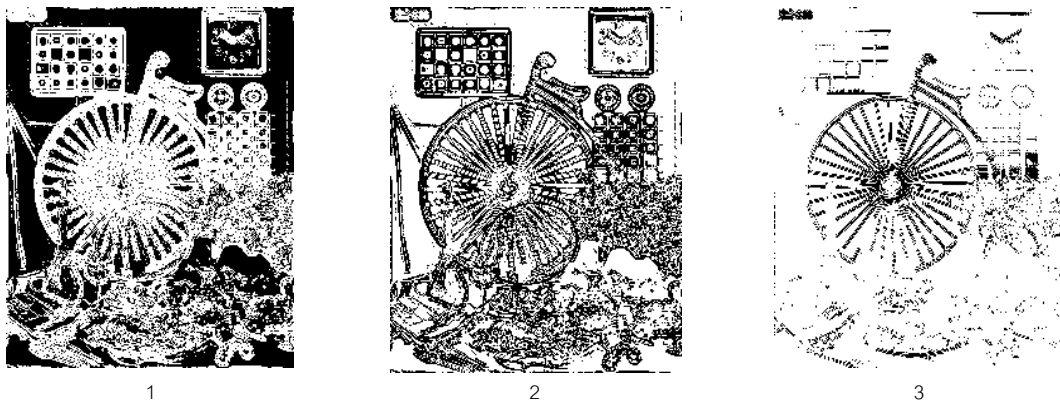
ขวดเป็นภาพที่มีสีน้อยและพิกเซลส่วนใหญ่มีความถี่เชิงระยะทางต่ำ ดังภาพที่ 3.16 ภาพขวดขนาด 288x230 พิกเซล ดูที่ระยะห่าง 1 เมตรมีพื้นที่ที่มีความถี่เชิงระยะทางในช่วง 0-2 CPD, 2-8 CPD และ 8-24 CPD เท่ากับ 64%, 28% และ 8% ตามลำดับ ภาพประกอบด้วย กำแพงสีเทาเข้มและโต๊ะสีขาวครอบคลุมบริเวณส่วนใหญ่ของภาพ และสิ่งของที่ไม่มีรายละเอียดมากนักจึงทำให้พิกเซลส่วนใหญ่มีความถี่เชิงระยะทางต่ำ



ภาพที่ 3.16 พิกเซลที่อยู่ในช่วงความถี่เชิงระยะทาง (1) 0-2 CPD, (2) 2-8 CPD และ (3) 8-24 CPD ของภาพขวด แสดงโดยใช้สีดำ

#### 4. วงล้อ

วงล้อเป็นภาพที่มีทั้งบริเวณที่มีสีน้อยและบริเวณที่มีสีสันปะปนกัน และมีความถี่เชิงระยะทางที่หลากหลาย ดังภาพที่ 3.17 ภาพวงล้อขนาด 230x288 พิกเซล ดูที่ระยะห่าง 1 เมตร มีพื้นที่ที่มีความถี่เชิงระยะทางในช่วง 0-2 CPD, 0-8CPD และ 8-24 CPD เท่ากับ 49%, 39% และ 12% ตามลำดับ โดยบริเวณกำแพงและผ้าปูโต๊ะมีสีสันน้อยและมีความถี่เชิงระยะทางต่ำ ส่วนเทศกาลตีสีเทา และวงล้อเป็นบริเวณที่มีสีสันน้อยมีความถี่เชิงระยะทางสูง นอกจากนั้นยังมีส่วนที่เป็นใบไม้ และผลไม้ที่มีสีสันสดใสและมีความถี่เชิงระยะทางสูง



ภาพที่ 3.17 พิกเซลที่อยู่ในช่วงความถี่เชิงระยะทาง (1) 0-2 CPD, (2) 2-8 CPD และ (3) 8-24 CPD ของภาพวงล้อ แสดงโดยใช้สีดำ

#### 3.2.3.1.2 ภาพผลิตซ้ำ

ภาพผลิตซ้ำคือภาพที่อยู่บนพื้นหลังสีเทาดังภาพที่ 3.11 ประกอบด้วยภาพที่ไม่ผ่านกระบวนการใด ๆ และภาพที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏเพื่อให้ได้สีปรากฏตรงกับสีปรากฏของต้นฉบับ โดยแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏที่ใช้ในการทดสอบมี 5 แบบคือ CIECAM02, CIECAM02TT1, CIECAM02-m1, CIECAM02TTF และ CIECAM02M1F

กำหนดให้สภาวะการมองเห็นที่ 1 คือ สภาวะการมองเห็นของภาพต้นฉบับที่อยู่บนพื้นหลังที่มีสี สภาวะการมองเห็นที่ 2 คือ สภาวะการมองเห็นภาพผลิตซ้ำที่อยู่บนพื้นหลังสีเทาแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏทั้ง 5 จะถูกใช้คำนวณค่าสีปรากฏของภาพต้นฉบับบนพื้นหลังที่มีสีจากค่าสี  $X_1Y_1Z_1$  ของภาพต้นฉบับ โดยใช้ข้อมูลนำเข้าสภาวะการมองเห็นที่ 1 ดังตารางที่ 3.2 แล้วจึงใช้ CIECAM02 คำนวณค่าสี  $X_2Y_2Z_2$  ที่ทำให้สีปรากฏของภาพผลิตซ้ำบนพื้นหลังสีเทาเหมือนกับสีปรากฏของภาพต้นฉบับบนพื้นหลังที่มีสีจากค่าสีปรากฏของภาพต้นฉบับและข้อมูลนำเข้าสภาวะการมองเห็นที่ 2 แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลนำเข้าสำหรับ CIECAM02 ในสภาวะการมองเห็นที่ 1

ข้อมูลนำเข้าสำหรับ CIECAM02 ในสภาวะการมองเห็นที่ 1	
White point ( $X_W Y_W Z_W$ )	$X_W = 94.71, Y_W = 100, Z_W = 104.34$
Adapting luminance ( $L_A$ )	$L_A = 20 * 88.64 / 100$
Background luminance ( $Y_b$ )	สีน้ำเงิน $Y_b = 4.11$ , สีม่วงแดง $Y_b = 9.09$ , เขียวฟ้า $Y_b = 20.96$
Surround conditions	$dim c = 0.59, F = 0.9, N_C = 0.9$

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลนำเข้าสภาวะการมองเห็นที่ 2

ข้อมูลนำเข้าสภาวะการมองเห็นที่ 2	
White point ( $X_W Y_W Z_W$ )	$X_W = 94.71, Y_W = 100, Z_W = 104.34$
Adapting luminance ( $L_A$ )	$L_A = 20 * 88.64 / 100$
Background luminance ( $Y_b$ )	สีเทา $Y_b = 32.12$
Surround conditions	$Dim c = 0.59, F = 0.9, N_C = 0.9$

ภาพผลิตซ้ำมี 6 แบบ มีรายละเอียดดังนี้

### 1. NON

NON คือภาพผลิตซ้ำที่นำภาพต้นฉบับที่ไม่ผ่านกระบวนการใด ๆ มาใช้

### 2. CAM02

ภาพผลิตซ้ำที่ได้จากการนำภาพต้นฉบับมาคำนวณค่าสีปรากฏด้วย CIECAM02 โดยข้อมูลนำเข้าสภาวะการมองเห็นที่ 1 สำหรับ CIECAM02 แสดงดังตารางที่ 3.2

### 3. CAM02TT

ภาพผลิตซ้ำที่ได้จากการนำภาพต้นฉบับมาคำนวณค่าสีปรากฏด้วย CIECAM02TT โดยข้อมูลนำเข้าสภาวะการมองเห็นที่ 1 สำหรับ CIECAM02TT ประกอบด้วยข้อมูลนำเข้าสำหรับ CIECAM02 ในสภาวะการมองเห็นที่ 1 และค่าสี XYZ ของพื้นหลัง

## 4. CAM02M1

ภาพผลิตซ้ำที่ได้จากการนำภาพต้นฉบับมาคำนวณค่าสีปรากฏด้วย CIECAM02M1 โดยข้อมูลนำเข้าสภาวะการมองเห็นที่ 1 สำหรับ CIECAM02M1 ประกอบด้วยข้อมูลนำเข้าสำหรับ CIECAM02 ในสภาวะการมองเห็นที่ 1 และค่าสี XYZ ของพื้นหลัง

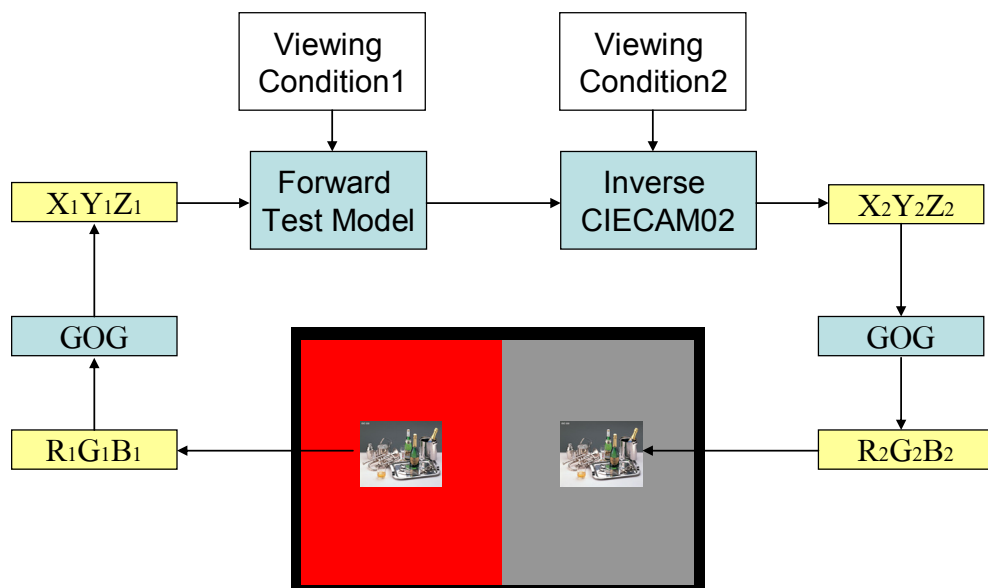
## 5. CAM02TTF

ภาพผลิตซ้ำที่ได้จากการนำภาพต้นฉบับมาคำนวณค่าสีปรากฏด้วย CIECAM02TTF โดยข้อมูลนำเข้าสภาวะการมองเห็นที่ 1 สำหรับ CIECAM02TTF ประกอบด้วยข้อมูลนำเข้าสำหรับ CIECAM02 ในสภาวะการมองเห็นที่ 1, ค่าสี XYZ ของพื้นหลัง และความถี่เชิงระยะทางของแต่ละพิกเซลในภาพ

## 6. CAM02M1F

ภาพผลิตซ้ำที่ได้จากการนำภาพต้นฉบับมาคำนวณค่าสีปรากฏด้วย CIECAM02M1F โดยข้อมูลนำเข้าสภาวะการมองเห็นที่ 1 สำหรับ CIECAM02TTF ประกอบด้วยข้อมูลนำเข้าสำหรับ CIECAM02 ในสภาวะการมองเห็นที่ 1, ค่าสี XYZ ของพื้นหลัง, ความถี่เชิงระยะทางของแต่ละพิกเซลในภาพ และค่าสี XYZ เฉลี่ยของภาพ

ขั้นตอนการผลิตภาพผลิตซ้ำแสดงดังแผนภูมิที่ 3.4 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



แผนภูมิที่ 3.4 การคำนวณค่าสีของภาพผลิตซ้ำด้วยแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏ

1. แปลงค่า RGB ของภาพต้นฉบับ ( $R_1G_1B_1$ ) ของภาพต้นฉบับเป็นค่าสี XYZ ( $X_1Y_1Z_1$ ) โดยใช้ GOG
2. ใช้ส่วน forward ของแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏที่นำมาทดสอบ (test model) คำนวณหาค่าสีปรากฏ โดยใช้ข้อมูลนำเข้าสำหรับสภาวะการมองเห็นที่ 1 คำนวณรวมกับค่าสี XYZ ของแต่ละพิกเซลของภาพต้นฉบับ
3. ใช้ Inverse CIECAM02 คำนวณหาค่าสี XYZ ของภาพผลิตซ้ำ ( $X_2Y_2Z_2$ ) โดยใช้ข้อมูลนำเข้าสำหรับสภาวะการมองเห็นที่ 2 ดังแสดงในตารางที่ 3.2
4. แปลงค่าสี XYZ ของภาพผลิตซ้ำ ( $X_2Y_2Z_2$ ) เป็นค่าสี RGB ( $R_2G_2B_2$ ) โดยใช้ GOG
5. ทำซ้ำข้อ 1-4 โดยเปลี่ยนแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏจนครบ 5 แบบ แล้วจึงเปลี่ยนภาพต้นฉบับ 4 ภาพ และเปลี่ยนพื้นหลัง 3 พื้นหลังตามลำดับ

### 3.2.3.1.3 พื้นหลัง

ในการทดลองนี้พื้นหลังแบ่งเป็น 2 ส่วนแต่ละส่วนมีขนาดแบ่งครึ่งหนึ่งของจอภาพเท่ากัน คือ ส่วนพื้นหลังที่มีสี และส่วนพื้นหลังสีเทา

พื้นหลังที่มีสีทางด้านซ้ายบนจอภาพสีอาร์ที ดังภาพที่ 3.12 (3.1) กำหนดสีพื้นหลัง 3 สี คือ สีน้ำเงินที่มีค่าสี XYZ เท่ากับ 10.13, 4.63, 53.43 สีม่วงแดงที่มีค่าสี XYZ เท่ากับ 19.80, 10.24, 29.19 และสีเขียวฟ้าที่มีค่าสี XYZ เท่ากับ 15.55, 23.64, 32.01 ซึ่งสีม่วงแดง และ สีเขียวฟ้า เป็นสีที่ไม่ได้ใช้ในการทดสอบผลของความถี่เชิงระยะทางต่อระดับการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลัง ส่วนสีน้ำเงินเนื่องจากการมองเห็นของมนุษย์ในช่วงสีน้ำเงินซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นไม่เหมือนช่วงความยาวคลื่นอื่น อย่างไรก็ตามสีน้ำเงินที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองเป็นสีน้ำเงินที่ต่างไปจากที่ใช้ในขั้นตอนการทดสอบผลของความถี่เชิงระยะทาง

พื้นหลังสีเทาทางด้านขวาของจอภาพ ดังภาพที่ 3.11(3.2) มีค่าสี XYZ เท่ากับ 34.53, 36.24, 37.92 ตามลำดับ

### 3.2.3.1.4 สภาวะการมองเห็น

ภาพต้นฉบับและภาพผลิตซ้ำแสดงบนจอภาพซีอาร์ทีดังภาพที่ 3.12 ผู้สังเกตอยู่ห่างจากจอภาพซีอาร์ทีเป็นระยะ 1 เมตร และทำการทดลองในห้องมืด ในการทดลองผู้สังเกตจะดูภาพด้วยวิธี Simultaneous-haploscopic คือ ตาแต่ละข้างมองเห็นภาพไม่เหมือนกันแต่ตาทั้ง 2 ข้างดูภาพต้นฉบับและภาพผลิตซ้ำพร้อมกัน โดยมีที่กั้นให้ตาซ้ายมองเห็นเฉพาะภาพต้นฉบับบนพื้นหลังที่มีสีทางด้านซ้ายของจอภาพซีอาร์ที ส่วนตาขวามองเห็นเฉพาะภาพผลิตซ้ำบนพื้นหลังสีเทาทางด้านขวาของจอภาพซีอาร์ที ดังภาพที่ 3.18

### 3.2.3.2 การทดลอง

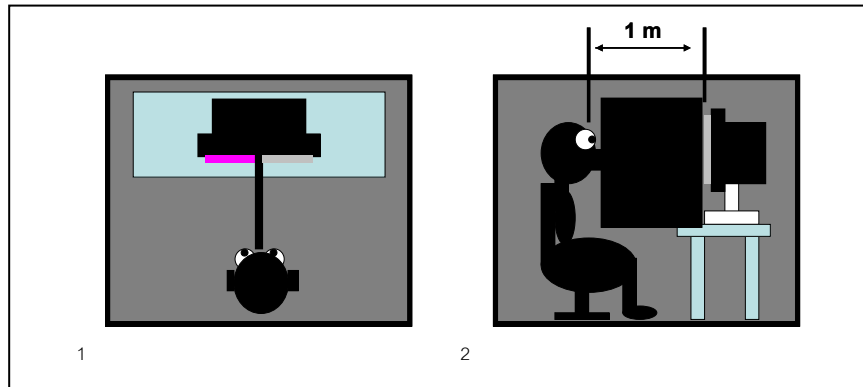
การทดลองทำโดยให้ผู้สังเกตจำนวน 30 คนเปรียบเทียบภาพผลิตซ้ำกับภาพต้นฉบับ แล้วให้คะแนนความเหมือน ซึ่งภาพต้นฉบับทั้งหมดมี 4 ภาพ โดยภาพต้นฉบับ 1 ภาพ จะมีภาพผลิตซ้ำ 6 ภาพ ดังนั้นต้องให้คะแนนภาพผลิตซ้ำทั้งหมด 24 ภาพ ใน 1 สัปดาห์หลัง ทำซ้ำจนครบ 3 สัปดาห์ หลัง โดยก่อนการทดลองต้องเปิดจอภาพแสดงสีขาวเต็มจอภาพไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อให้จอภาพแสดงสีได้คงที่

คะแนนมี 7 ระดับ มีรายละเอียดดังนี้

- 1 คะแนน หมายถึง เหมือนกันน้อยที่สุด
- 2 คะแนน หมายถึง เหมือนกันน้อยมาก
- 3 คะแนน หมายถึง เหมือนกันน้อย
- 4 คะแนน หมายถึง เหมือนกันปานกลาง
- 5 คะแนน หมายถึง ค่อนข้างเหมือน
- 6 คะแนน หมายถึง เหมือนกันมาก
- 7 คะแนน หมายถึง เหมือนกันมากที่สุด

การทดลองมีขั้นตอนดังนี้

1. ผู้สังเกตนั่งห่างจากจอภาพเป็นระยะ 1 เมตร โดยมีที่กั้นระหว่างตาทั้งสองข้างในห้องมืด ดังภาพที่ 3.18



ภาพที่ 3.18 ตำแหน่งจอภาพและผู้สังเกต 1) ภาพด้านบน 2) ภาพด้านข้าง

2. ผู้สังเกตปรับสายตาเข้ากับจอภาพก่อนทำการทดลองเป็นเวลา 1 นาที ซึ่งจะต้องทำการปรับสายตาทุกครั้งที่เปลี่ยนสีพื้นหลัง
3. เปรียบเทียบสีของภาพผลิตซ้ำกับสีของภาพต้นฉบับและให้คะแนนความเหมือน
4. ผู้ทดลองบันทึกคะแนน
5. ทำซ้ำข้อ 3-4 โดยเปลี่ยนภาพผลิตซ้ำจนครบ 6 ภาพ
6. ทำซ้ำข้อ 3-5 โดยเปลี่ยนภาพต้นฉบับจนครบ 4 ภาพ
7. ทำซ้ำข้อ 2-6 โดยเปลี่ยนสีพื้นหลังจนครบ 3 สี

### 3.2.3.3 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

นำค่าคะแนนที่ได้จากผู้สังเกตทั้งหมดมาวิเคราะห์ด้วยวิธี Category Judgement [12] ซึ่งจะแปลงค่าคะแนนดิบเป็นค่าทางสถิติ z-scores นำค่า z-scores มาเขียนกราฟเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดลสีต่าง ๆ และปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพ



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### 4.1 ผลของความถี่เชิงระยะทางต่อระดับการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลัง

ในการทดสอบผลของความถี่เชิงระยะทาง ผู้สังเกตปรับค่า RGB ของสีทดสอบให้มีสีปรากฏเหมือนกับสีอ้างอิงที่ล้อมรอบด้วยตารางหมากรุกที่มีความถี่เชิงระยะทางต่าง ๆ ผู้สังเกตแต่ละคนทำการทดลองซ้ำสองครั้งสำหรับสีอ้างอิงที่ล้อมรอบด้วยความถี่เชิงระยะทางค่าหนึ่ง บนพื้นหลังสีหนึ่ง ทำการทดลองกับตารางหมากรุกที่มีความถี่เชิงระยะทางแตกต่างกัน 9 ค่า และสีพื้นหลังที่แตกต่างกัน 4 สี นำผลค่า RGB ของผู้สังเกตแต่ละคนมาแปลงเป็นค่าสี XYZ และ  $L^*a^*b^*$  ด้วย white point ของจอภาพ นำค่าสี  $L^*a^*b^*$  ที่เฉลี่ยจากผู้สังเกตทั้งหมดมาหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เชิงระยะทางกับค่าสีที่เปลี่ยนแปลงไปบนแต่ละพื้นหลัง

##### 4.1.1 ความแม่นยำของผู้สังเกต

###### 1. Intra-observer agreement

ความแปรปรวนของผลการทดลองสามารถวิเคราะห์ได้จากความแม่นยำในการทำซ้ำของผู้สังเกตแต่ละคนหากผู้สังเกตคนเดิมทำการทดลองซ้ำแล้วมีค่าแตกต่างกันมาก ผลการทดลองนั้นจะไม่น่าเชื่อถือ ซึ่งอาจเกิดจากวิธีการทดลองที่ยากเกินไปหรือผู้สังเกตไม่เข้าใจวิธีการทดลอง ในงานวิจัยนี้ วิเคราะห์ความแม่นยำของผู้สังเกตแต่ละคนจากค่าความแตกต่างสี ( $\Delta E^*_{ab}$ ) ระหว่างค่าสีที่ได้จากการทดลองซ้ำของผู้สังเกตแต่ละคนด้วยวิธี MCDM [13] ผลค่าความแตกต่างสีเฉลี่ยจากผู้สังเกตทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความแตกต่างสีเฉลี่ยในการทำซ้ำของผู้สังเกต

พื้นหลัง	Intra-observer								
	ความถี่เชิงระยะทาง (CPD)								
	0	1	2	3	4	6	8	12	24
แดง	0.83	1.59	1.22	2.31	2.06	5.39	5.30	13.72	4.65
เขียว	1.16	2.84	2.60	8.72	3.82	5.02	7.22	8.28	21.28
น้ำเงิน	1.41	1.83	3.78	3.52	5.37	9.80	6.70	10.73	19.95
เหลือง	0.41	3.26	7.88	5.14	8.12	6.94	8.98	9.28	4.52

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าที่ความถี่เชิงระยะทางเท่ากับ 0 CPD หรือไม่มีตารางหมากรุก ค่าความแตกต่างสีมีค่าน้อยแสดงว่าผู้สังเกตทำซ้ำได้ค่าสีใกล้เคียงกัน แต่เมื่อความถี่เชิงระยะทางสูงขึ้นหรือตารางหมากรุกมีความถี่ของตารางมากขึ้นจะเห็นว่าค่าความแตกต่างสีในการทำซ้ำของผู้สังเกตเริ่มสูงขึ้น ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากขนาดสีอ้างอิงและสีทดสอบที่มีขนาดเล็กลงเมื่อความถี่เชิงระยะทางสูงขึ้น โดยจากการทดลองพบว่าที่ความถี่ 24 CPD เริ่มไม่สามารถมองเห็นความถี่ของตารางหมากรุก และขนาดของสีอ้างอิงและสีทดสอบก็มีขนาดเล็กมาก และผลของ after image ที่เกิดขึ้นระหว่างการทำการทดลอง ซึ่งอาจมีสาเหตุเนื่องมาจากสีพื้นหลังที่ใช้ในการทดลอง มีสีสดเกินไป

## 2. Inter-observer agreement

ค่าสีที่ใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เชิงระยะทางกับค่าสีที่เปลี่ยนแปลงได้จากผลการเฉลี่ยผลของผู้สังเกตทุกคน ดังนั้นความแปรปรวนของผลการทดลองสามารถวิเคราะห์ได้จากความแม่นยำของผู้สังเกตแต่ละคนเมื่อเทียบกับผลเฉลี่ยจากกลุ่มผู้สังเกต โดยการหาความแตกต่างสี ( $\Delta E^*_{ab}$ ) ระหว่างค่าสีของผู้สังเกตแต่ละคนกับค่าเฉลี่ยของกลุ่มผู้สังเกตด้วยวิธี MCDM ผลแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าความแตกต่างสีเฉลี่ยของกลุ่มผู้สังเกต

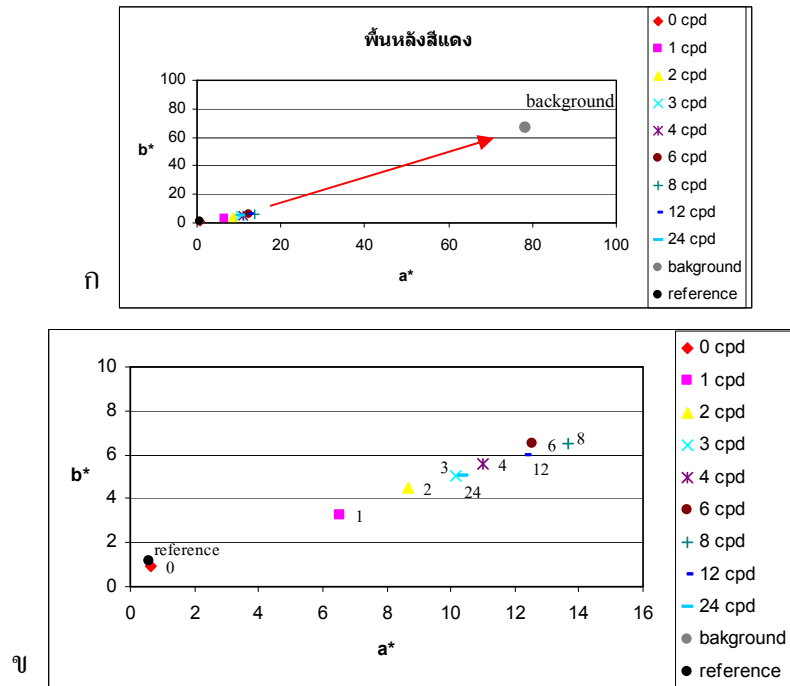
พื้นหลัง	Inter-observer								
	ความถี่เชิงระยะทาง (CPD)								
	0	1	2	3	4	6	8	12	24
แดง	1.02	3.90	6.73	10.34	16.91	14.71	17.82	9.15	16.90
เขียว	2.18	7.07	7.79	11.49	11.63	12.25	13.19	47.17	49.94
น้ำเงิน	1.63	3.16	8.55	9.60	11.33	13.37	31.19	17.05	22.68
เหลือง	0.59	5.10	7.87	11.03	12.57	18.28	28.40	26.31	19.76

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าเมื่อความถี่เชิงระยะทางสูงขึ้นค่าความแตกต่างสีของกลุ่มผู้สังเกตเริ่มสูงขึ้น โดยค่าความแตกต่างสีเฉลี่ยของกลุ่มผู้สังเกตมีค่าสูงกว่าค่าความแตกต่างสีเฉลี่ยในการทำซ้ำของผู้สังเกต หมายความว่าผู้สังเกตแต่ละคนเห็นสีต่างกัน นอกจากนี้ยังพบว่า ผลการทดลองบนพื้นหลังสีเขียวมีแนวโน้มให้ค่าความแตกต่างระหว่างผู้สังเกตในกลุ่มสูงกว่าบนพื้นหลังสีอื่น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากระบบการมองเห็นของมนุษย์มีความไวต่อแสงสีเขียวมากที่สุด ความเปรียบต่างระหว่างสีพื้นหลังกับสีตัวอย่างจึงมีค่ามาก เกิด after image จากตารางหมากรุกและ

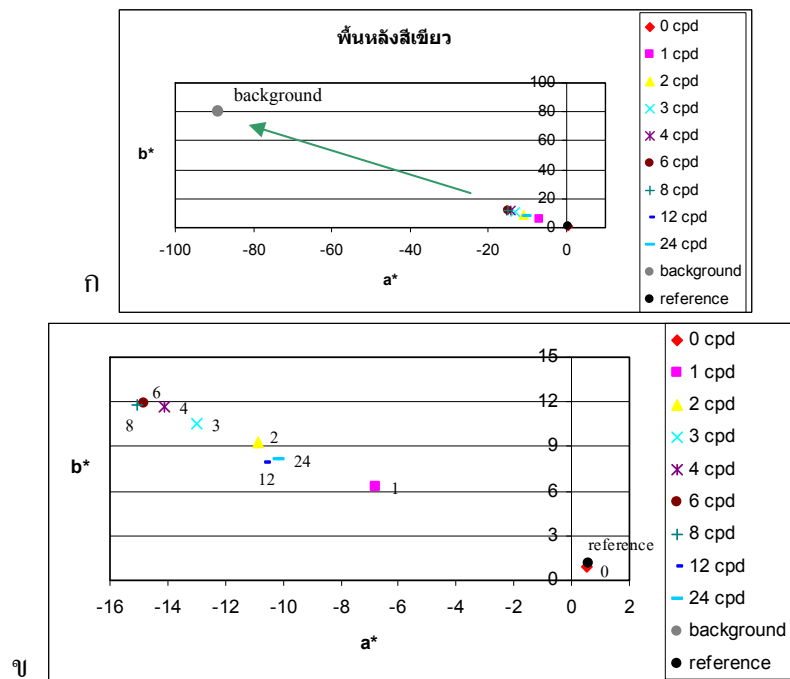
สีพื้นหลังที่มีสีสตรอบกวนการมองเห็น และถ้าผู้สังเกตแต่ละคนใช้เวลาปรับสีไม่เท่ากัน ผลกระทบจาก after image ย่อมไม่เท่ากัน ค่าความแตกต่างสีระหว่างผู้สังเกตยิ่งมีค่ามากขึ้น

#### 4.1.2 ผลของความถี่เชิงระยะทางต่อระดับการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลัง

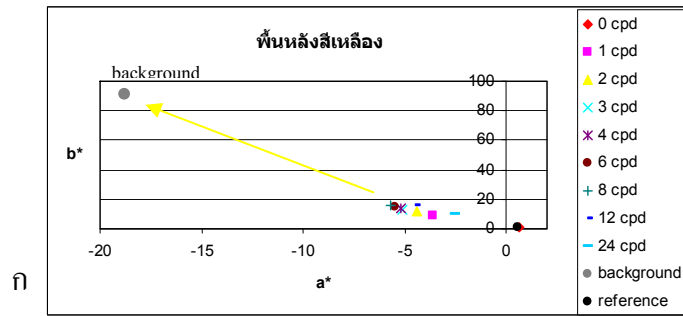
จากภาพที่ 4.1-4.4 แสดงผลค่าสีทดสอบที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากระดับการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลังเปลี่ยนไป เป็นผลมาจากความถี่เชิงระยะทางที่ล้อมรอบสีอ้างอิง จะเห็นว่าเมื่อความถี่เชิงระยะทางเท่ากับ 0 CPD หรือไม่มีความถี่นั้น ค่าสีที่ผู้สังเกตปรับมีค่าใกล้เคียงกับค่าสีของสีอ้างอิง เนื่องจากแผ่นสีทั้งสองถูกเหนี่ยวนำสีจากสีพื้นหลังเท่า ๆ กัน สาเหตุที่ผู้สังเกตไม่สามารถปรับค่าสีได้เท่ากันพอดีกับสีอ้างอิงทั้งที่สภาวะการมองทุกอย่างเหมือนกันนั้น เนื่องจากระบบการมองเห็นมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีอยู่ระดับหนึ่ง หากสีสองสีอยู่ภายในเกณฑ์นี้ จะไม่สามารถมองแยกความแตกต่างได้เมื่อมีตารางหมากรุกล้อมรอบแผ่นสีอ้างอิง ผู้สังเกตต้องปรับค่าสีของสีทดสอบให้ไปในทิศทางเดียวกับสีพื้นหลังเพื่อให้สีคู่ตรงข้ามกับพื้นหลังที่ติดอยู่บนแผ่นสีทดสอบมีค่าลดลงจึงจะเห็นสีปรากฏตรงกันกับสีอ้างอิง แสดงว่าเมื่อมีความถี่เชิงระยะทางล้อมรอบแผ่นสีอ้างอิง ระดับการเหนี่ยวนำสีจากสีพื้นหลังที่มีต่อแผ่นสีอ้างอิงลดลง จะเห็นว่าที่ความถี่เชิงระยะทางเท่ากับ 1 CPD ระดับการเหนี่ยวนำสีจากสีพื้นหลังลดลงจากระดับปกติมาก และระดับการเหนี่ยวนำสีจะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อความถี่เชิงระยะทางสูงขึ้นจนลดลงต่ำสุดที่ความถี่เชิงระยะทางเท่ากับ 8 CPD และระดับการเหนี่ยวนำสีจากพื้นหลังกลับเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เชิงระยะทางเท่ากับ 12 และ 24 CPD ซึ่งแสดงแนวโน้มเดียวกันนี้เกิดขึ้นกับทุกสีพื้นหลัง ทั้งนี้เนื่องจากที่ความถี่ของตารางหมากรุกเท่ากับ 12 CPD ตารางหมากรุกมีความถี่สูงขึ้นมาทำให้แยกแยะตารางสีเข้มและสีอ่อนได้ยาก โดยที่ความถี่เชิงระยะทางเท่ากับ 24 CPD นั้นแทบไม่สามารถแยกแยะตารางหมากรุกได้ทำให้เห็นเป็นสีเทาไม่มีความถี่สีกลิ้นกับสีของแผ่นสีอ้างอิงจึงทำให้ติดสีคู่ตรงข้ามกับสีพื้นหลัง



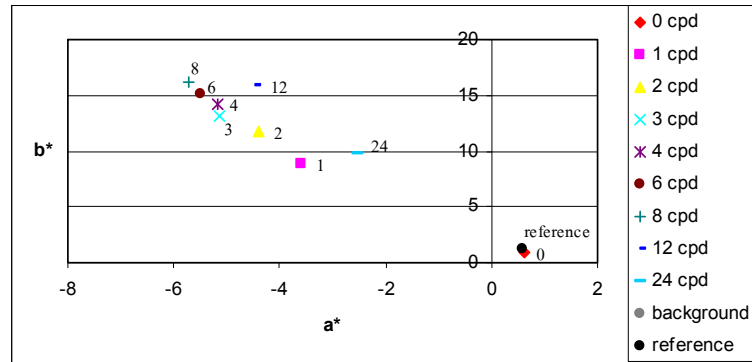
ภาพที่ 4.1 กราฟค่าสีเฉลี่ยของแผ่นสีทดสอบที่ทำให้มีสีปรากฏเหมือนกับสีอ้างอิงที่มีความถี่เชิงระยะทางต่างกันบนพื้นหลังสีแดงบนปริภูมิสี CIELAB (ก) แสดงทิศทางการปรับค่าสีเมื่อความถี่เชิงระยะทางสูงขึ้น (ข) แสดงตำแหน่งค่าสี



ภาพที่ 4.2 กราฟค่าสีเฉลี่ยของแผ่นสีทดสอบที่ทำให้มีสีปรากฏเหมือนกับสีอ้างอิงที่มีความถี่เชิงระยะทางต่างกันบนพื้นหลังสีเขียวบนปริภูมิสี CIELAB (ก) แสดงทิศทางการปรับค่าสีเมื่อความถี่เชิงระยะทางสูงขึ้น (ข) แสดงตำแหน่งค่าสี

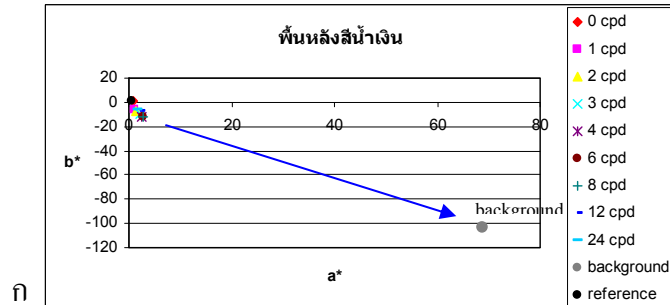


ก)

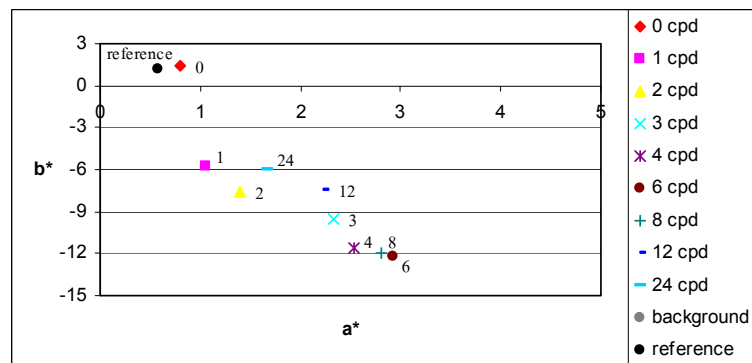


ข)

ภาพที่ 4.3 กราฟค่าสีเฉลี่ยของแผ่นสีทดสอบที่ทำให้มีสีปรากฏเหมือนกับสีอ้างอิงที่มีความถี่เชิงระยะทางต่างกันบนพื้นหลังสีเหลืองบนปริภูมิสี CIELAB (ก) แสดงทิศทางการปรับค่าสีเมื่อความถี่เชิงระยะทางสูงขึ้น (ข) แสดงตำแหน่งค่าสี



ก)



ข)

ภาพที่ 4.4 กราฟค่าสีเฉลี่ยของแผ่นสีทดสอบที่ทำให้มีสีปรากฏเหมือนกับสีอ้างอิงที่มีความถี่เชิงระยะทางต่างกันบนพื้นหลังสีน้ำเงินบนปริภูมิสี CIELAB (ก) แสดงทิศทางการปรับค่าสีเมื่อความถี่เชิงระยะทางสูงขึ้น (ข) แสดงตำแหน่งค่าสี

## 4.2 ผลการปรับปรุงแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏด้วยสมการความถี่เชิงระยะทาง

ผลที่ได้จากการทดสอบผลของความถี่เชิงระยะทางต่อระดับการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลังถูกนำมาสร้างสมการปรับปรุง CIECAM02TT1 และ CIECAM02-m1 ให้สามารถทำนายค่าสีปรากฏที่เปลี่ยนไปเนื่องจากความถี่เชิงระยะทาง เรียกแบบจำลองที่ได้ปรับปรุงใหม่ว่า CIECAM02TTF และ CIECAM02M1F ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้มีรายละเอียดมีดังนี้

### 4.2.1 CIECAM02TTF

ผลการปรับปรุงแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การหาสมการคำนวณค่า TTFref และการหาค่า TT1ref

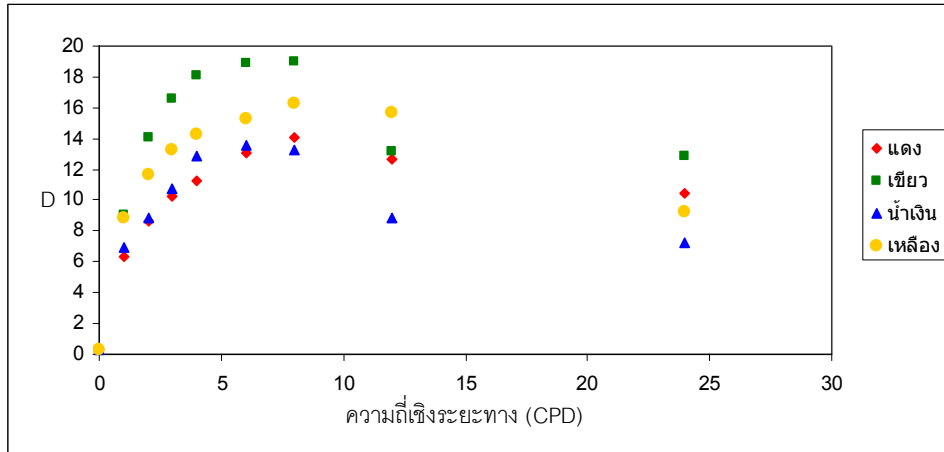
#### 1. การหาสมการคำนวณค่า TTFref

กำหนด TTFref เท่ากับค่าระยะห่างระหว่างค่า  $a^*b^*$  ของสีทดสอบกับค่า  $a^*b^*$ (ref) ของสีอ้างอิงบนปริภูมิสี CIELAB โดยค่าระยะห่างที่ความถี่เชิงระยะทางทั้ง 9 ค่า บนพื้นหลัง 4 สี ค่าที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ระยะห่างระหว่างค่าสี  $a^*b^*$  ของสีทดสอบกับสีอ้างอิงบนปริภูมิสี CIELAB ที่ความถี่เชิงระยะทางต่าง ๆ บนพื้นหลัง 4 สี

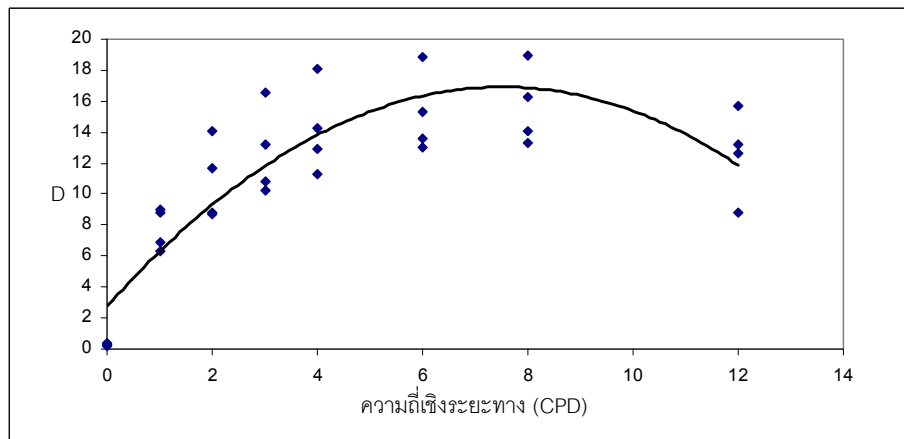
พื้นหลัง	ระยะห่างระหว่างค่าสี $a^*b^*$ ของสีทดสอบกับสีอ้างอิง								
	ความถี่เชิงระยะทาง (CPD)								
	0	1	2	3	4	6	8	12	24
แดง	0.27	6.29	8.68	10.27	11.26	13.05	14.06	12.65	10.50
เขียว	0.24	9.00	14.02	16.55	18.12	18.86	18.96	13.16	12.85
น้ำเงิน	0.34	6.90	8.80	10.78	12.88	13.58	13.31	8.79	7.25
เหลือง	0.26	8.84	11.70	13.22	14.26	15.31	16.25	15.66	9.22

เมื่อนำค่าระยะห่างระหว่างค่า  $a^*b^*$  ของสีทดสอบกับสีอ้างอิงบนปริภูมิสี CIELAB (D) มาเขียนกราฟ (ภาพที่ 4.5) จะเห็นได้ว่า ระดับการเปลี่ยนแปลงสีในแต่ละสีพื้นหลังมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน



ภาพที่ 4.5 ระยะห่างระหว่างค่า  $a^*b^*$  ของสีทดสอบกับสีอ้างอิงที่ความถี่ต่าง ๆ บนพื้นหลัง 4 สี

สร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีที่เปลี่ยนไปกับความถี่เชิงระยะทางโดยหาสมการจากค่าระยะห่างระหว่างค่า  $a^*b^*$  ของสีทดสอบกับสีอ้างอิงของทั้ง 4 สีพื้นหลังกับความถี่เชิงระยะทาง โดยตัดข้อมูลที่ความถี่เชิงระยะทางเท่ากับ 24 CPD ออก เนื่องจากค่าความแตกต่างสีเฉลี่ยในกลุ่มผู้สังเกตค่อนข้างสูงและทำให้ค่า  $R^2$  ของสมการลดลง เส้นแสดงค่าที่ได้จากการคำนวณของสมการแสดงดังภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 กราฟค่าความแตกต่างสีระหว่างสีทดสอบกับสีอ้างอิงที่ความถี่ต่าง ๆ บนพื้นหลัง 4 สี และเส้นสมการที่ได้จากข้อมูลดังกล่าว

สมการที่ได้มีค่า  $R^2 = 0.7684$  สมการและเงื่อนไขการใช้งานแสดงดังสมการที่ 4.1 และสมการที่ 4.2

เมื่อความถี่เชิงระยะทางมีค่าระหว่าง 0-12 CPD ( $F = 0-12$  CPD)

$$TTF_{ref} = -0.2505F^2 + 3.7654F + 2.7717 \quad \dots\dots\dots(4.1)$$

เมื่อความถี่เชิงระยะทางมีค่ามากกว่า 12 CPD ( $F > 12$  CPD)

$$TTF_{ref} = -0.2505(12^2) + 3.7654(12) + 2.7717 \quad \dots\dots\dots(4.2)$$

## 2. การหาค่า TT1ref

หาค่า TTref จากค่าเฉลี่ย TT1 ของพื้นหลังทั้ง 4 สีที่คำนวณโดย CIECAM02TT1 ค่า TT1 ของพื้นหลังทั้ง 4 สีและค่าเฉลี่ยแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่า TT1 ของพื้นหลัง 4 สีคือ แดง, เขียว, เหลือง และน้ำเงิน

	สีพื้นหลัง				MEAN
	แดง	เขียว	เหลือง	น้ำเงิน	
TT1	18.01	24.87	14.80	26.35	21.01

กำหนดให้ TT1ref เท่ากับค่า TT1 เฉลี่ย คือ 21.01 ดังนั้นค่า TTF หาได้จากสมการที่ 4.3

$$TTF = (TT1/21.01)TTF_{ref} \quad \dots\dots\dots(4.3)$$

เนื่องจากผลของความถี่เชิงระยะทางทำให้ระดับการเหนี่ยวนำสีจากพื้นหลังลดลงดังนั้น TTtotal จึงหาได้จากการนำ TTF มาหักลบออกจาก TT1 ดังสมการที่ 4.4

$$TT_{total} = TT1 - TTF \quad \dots\dots\dots(4.4)$$



#### 4.2.2 CIECAM02M1F

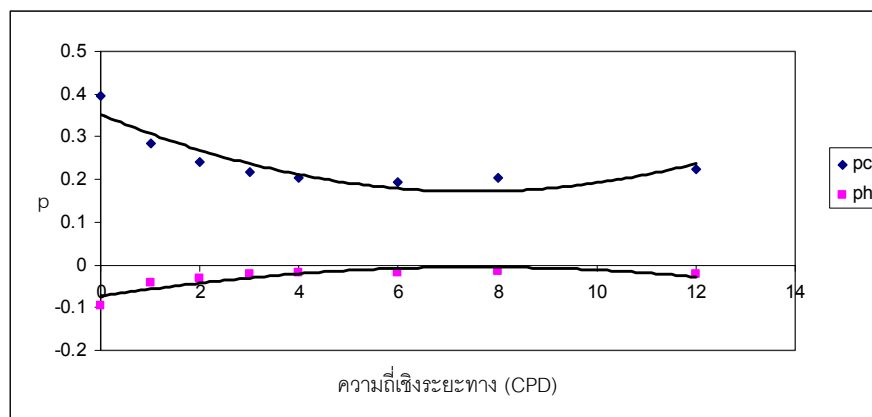
การปรับปรุง CIECAM02-m1 ด้วยการสร้างสมการค่า p กับความถี่เชิงระยะทางจำนวน 2 สมการคือสมการหาค่า pc สำหรับคำนวณค่าโครมา และ ph เพื่อคำนวณค่าสีสัน

หาค่า pc และ ph โดยการสุ่มค่า p เพื่อหาค่า p ที่ทำให้ค่าโครมาและค่าสีสันจากการคำนวณด้วย CIECAM02-m1 ใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณจาก CIECAM02TT1 มากที่สุด โดยค่า pc และ ph ที่ได้จากการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่า pc และ ph

	ความถี่เชิงระยะทาง (CPD)								
	0	1	2	3	4	6	8	12	24
pc	0.397	0.285	0.2412	0.2179	0.2052	0.1947	0.2022	0.2232	0.2538
ph	-0.0951	-0.0422	-0.0307	-0.0232	-0.0187	-0.0168	-0.0152	-0.0225	-0.0278

นำค่า pc และ ph ที่ได้มาสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า pc และ ph กับความถี่เชิงระยะทาง โดยตัดข้อมูลที่ความถี่เชิงระยะทางเท่ากับ 24 CPD ออก เนื่องจากค่าความแตกต่างสีเฉลี่ยในกลุ่มผู้สังเกตค่อนข้างสูงและทำให้ค่า  $R^2$  ของสมการลดลง เส้นแสดงค่าที่ได้จากการคำนวณของสมการแสดงดังภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 การหาสมการค่า pc และ ph

สมการคำนวณค่า pc มีค่า  $R^2 = 0.7646$  และสมการคำนวณค่า ph มีค่า  $R^2 = 0.9494$  สมการและเงื่อนไขการใช้งานแสดงดังสมการที่ 4.5-4.10

เมื่อความถี่เชิงระยะทางมีค่าระหว่าง 0-12 CPD ( $F = 0 - 12$  CPD)

$$pl = 0 \quad \dots\dots\dots(4.5)$$

$$pc = 0.0032F^2 - 0.0483F + 0.3526 \quad \dots\dots\dots(4.6)$$

$$ph = -0.0012F^2 + 0.018F - 0.0735 \quad \dots\dots\dots(4.7)$$

เมื่อความถี่เชิงระยะทางมีค่ามากกว่า 12 CPD ( $F > 12$  CPD)

$$pl = 0 \quad \dots\dots\dots(4.8)$$

$$pc = 0.0032(12^2) - 0.0483(12) + 0.3526 \quad \dots\dots\dots(4.9)$$

$$ph = -0.0012(12^2) + 0.018(12) - 0.0735 \quad \dots\dots\dots(4.10)$$

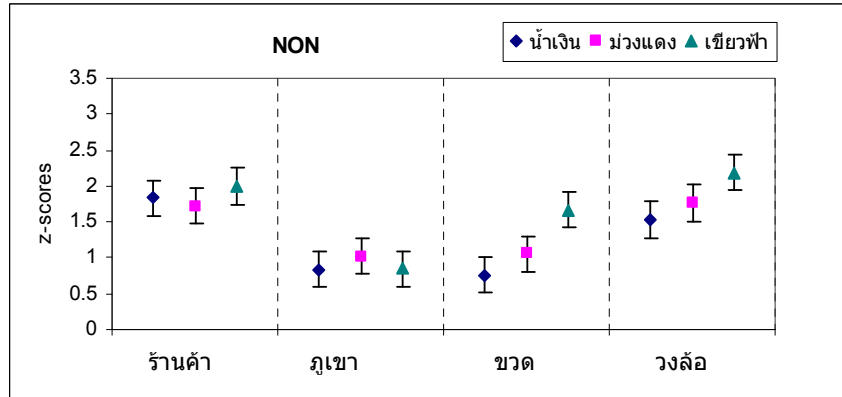
#### 4.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพ

การทดสอบประสิทธิภาพแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏที่ปรับปรุงใหม่ทำโดยให้ผู้สังเกตเปรียบเทียบภาพผลิตซ้ำบนพื้นหลังสีเทาที่ผลิตโดยแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏ CIECAM02, CIECAM02TT1, CIECAM02M1, CIECAM02TTF, CIECAM02M1F และภาพที่ไม่ผ่านกระบวนการใด ๆ เทียบกับภาพต้นฉบับบนพื้นหลังที่มีสี แล้วให้คะแนนความเหมือน นำผลคะแนนความเหมือนจากผู้สังเกตทั้งหมดมาแปลงเป็นค่าทางสถิติ (z-scores) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละแบบจำลอง ผลการทดสอบประสิทธิภาพมีรายละเอียดดังนี้

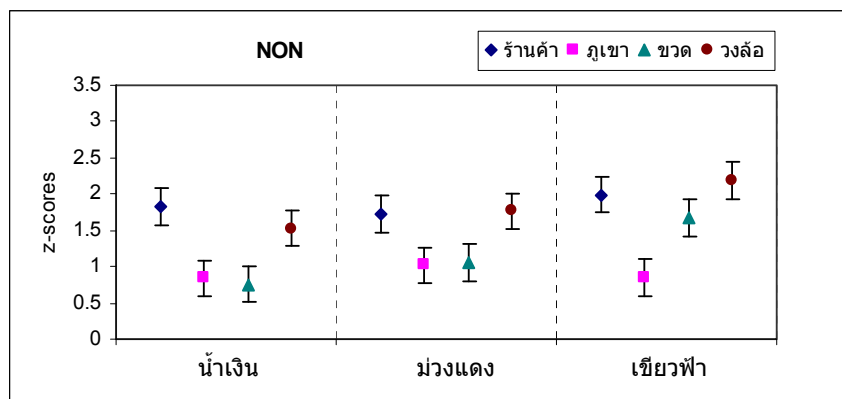
##### 4.3.1 อิทธิพลของพื้นหลังและอิทธิพลของภาพ

อิทธิพลของพื้นหลังและอิทธิพลของภาพต่อระดับการเปลี่ยนแปลงสีวิเคราะห์ได้จากผลคะแนนของ NON ซึ่งเป็นวิธีผลิตซ้ำภาพที่นำภาพต้นฉบับมาใช้โดยไม่ผ่านกระบวนการใด ๆ สีพื้น

หลังที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพมี 3 สี คือ น้ำเงิน ม่วงแดง เขียวฟ้า ภาพจำนวน 4 ภาพ คือ รันคำ, ภูเขา, ขวด และวงล้อ ผลเป็นดังนี้



ภาพที่ 4.8 ค่า z-scores ของภาพผลิตซ้ำที่ไม่ผ่านกระบวนการใด ๆ แยกตามชนิดของภาพ



ภาพที่ 4.9 ค่า z-scores ของภาพผลิตซ้ำที่ไม่ผ่านกระบวนการใด ๆ แยกตามสีพื้นหลัง

ตารางที่ 4.6 Coefficient of Variation (CV%) ของผู้สังเกต

	NON			
	พื้นหลัง			
	น้ำเงิน	ม่วงแดง	เขียวฟ้า	MEAN
รันคำ	40.79	40.03	31.94	37.59
ภูเขา	49.11	51.68	44.69	48.49
ขวด	37.47	43.98	44.72	42.06
วงล้อ	34.99	40.79	32.83	36.20
MEAN	40.59	44.12	38.54	41.08

## 1. พื้นหลัง

จากภาพที่ 4.8 จะเห็นว่าค่า z-scores ของภาพร้านค้าและภูเขามีลักษณะเหมือนกันคือ ค่า z-scores ในพื้นหลังทั้ง 3 สีมี่ค่าไม่ต่างกัน ซึ่งต่างจากภาพขวดและภาพวงล้อที่มีค่า z-scores บนพื้นหลังทั้ง 3 สีไม่เท่ากันโดยมีค่า z-scores เรียงลำดับจากมากไปน้อยคือ สีเขียวฟ้า, สีม่วงแดง และสีน้ำเงิน ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาค่าโครมาของพื้นหลังซึ่งเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้คือ สีน้ำเงิน สีม่วงแดง และสีเขียวฟ้า มีค่าโครมาเท่ากับ 103.42, 71.77 และ 36.88 ตามลำดับ อาจบ่งบอกถึงระดับการเหนี่ยวนำของสีพื้นหลังได้ว่าสีน้ำเงินมีค่าการเหนี่ยวนำที่สูงสุดรองลงมาคือสีม่วงแดงและสีเขียวฟ้าตามลำดับ โดยสีพื้นหลังที่มีระดับการเหนี่ยวนำสูงจะทำให้ภาพต่างออกไปจากต้นฉบับมากทำให้ได้ค่า z-scores ต่ำ ซึ่งจะสอดคล้องกับลำดับค่า z-scores ของภาพขวดและวงล้อที่มีค่าสูงในพื้นหลังสีเขียวฟ้า, สีม่วงแดง และสีน้ำเงิน เรียงลำดับจากมากไปน้อย ส่วนในภาพร้านค้าและภาพภูเขานั้นอาจมีคุณสมบัติบางอย่างในภาพที่ทำให้ระดับการเหนี่ยวนำจากสีพื้นหลังทั้ง 3 สีไม่แตกต่างกัน และจากตารางที่ 4.6 ซึ่งแสดงร้อยละความแตกต่างของคะแนนที่ได้จากผู้สังเกตแต่ละคนเทียบกับค่าเฉลี่ย พบว่าค่า CV มีค่าค่อนข้างสูงในสีม่วงแดง รองลงมาในสีน้ำเงิน และมีค่าน้อยสุดในสีเขียวฟ้า ซึ่งอาจเป็นเพราะระดับการเหนี่ยวนำสีจากสีพื้นหลังที่ไม่เท่ากัน โดยสีม่วงแดงและสีน้ำเงินมีการระดับเหนี่ยวนำที่สูงทำให้สีแต่ละบริเวณในภาพดูต่างจากต้นฉบับมากน้อยแตกต่างกันไป การให้คะแนนของผู้สังเกตซึ่งอาจดูภาพต่างบริเวณกันในกรณีให้คะแนนความเหมือนจึงให้คะแนนต่างกันมากขึ้นค่า CV จึงสูง

## 2. รูปภาพ

ภาพที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบผลของภาพที่แตกต่างกันพบว่า ภาพแต่ละภาพมีค่า z-scores ที่แตกต่างกันโดยมีรูปแบบเดียวกันในทุกพื้นหลังคือ ภาพร้านค้าได้คะแนนสูงสุด รองลงมาคือภาพวงล้อซึ่งทั้งสองมีคะแนนไม่ต่างกันมากนัก และสุดท้ายคือภาพภูเขาและภาพขวดที่มีคะแนนใกล้เคียงกัน

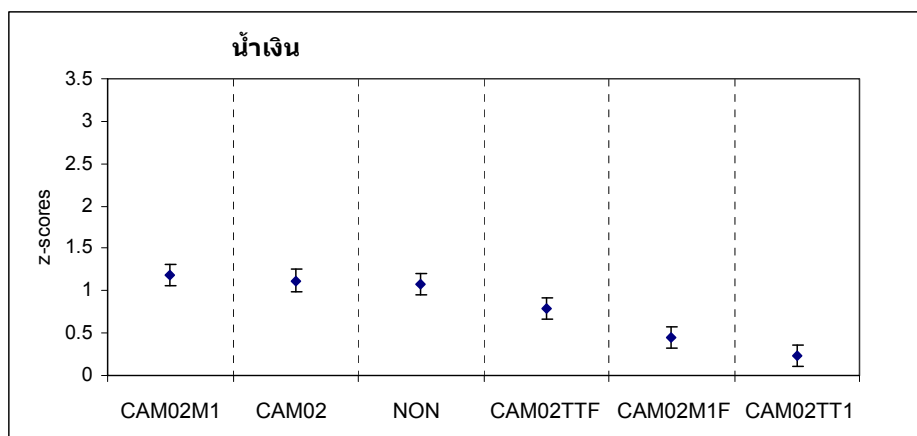
จากลักษณะของภาพที่ได้ค่า z-scores สูง 2 ภาพคือ ร้านค้าและภาพวงล้อ นั้นเป็นภาพที่มีความถี่เชิงระยะทางสูง ต่างจากภาพที่ได้ค่า z-scores ต่ำ 2 ภาพคือ ภูเขาและขวด ซึ่งเป็นภาพที่มีความถี่เชิงระยะทางต่ำ และจากภาพที่ 4.8 ค่า z-scores ของภาพร้านค้าและภูเขามีลักษณะเหมือนกันคือ ค่า z-scores บนพื้นหลังทั้ง 3 สีมี่ค่าไม่ต่างกัน ซึ่งอาจเป็นเพราะว่าภาพร้านค้าเป็นภาพที่มีสีสดและความถี่เชิงระยะทางสูง ซึ่งทำให้ระดับการเหนี่ยวนำจากพื้นหลังทุกสีลดลงจนไม่แตกต่างกันมากทำให้ภาพผลิตซ้ำไม่แตกต่างจากภาพต้นฉบับมากนัก ค่า z-scores จึงมีค่าสูง ส่วนภาพภูเขาเป็นภาพความถี่ต่ำทำให้ถูกเหนี่ยวนำสีจากสีพื้นหลังได้ง่ายและมีบริเวณ

ที่มีสีแตกต่างกันเป็นจุดสังเกต เช่น ท้องฟ้า, เมฆ และภูเขา ดังแสดงในตารางที่ 4.6 จะเห็นว่าค่า CV มีค่าสูงกว่าภาพอื่น ๆ ในทุกสีพื้นหลัง เนื่องจากมีจุดสังเกตหลายจุดซึ่งอาจได้รับอิทธิพลจากสีพื้นหลังในแต่ละบริเวณแตกต่างกัน เมื่อผู้สังเกตเลือกจุดสังเกตต่างกัน จึงทำให้ไม่เห็นอิทธิพลจากการเหนี่ยวนำสีจากพื้นหลังชัดเจน z-scores ที่ได้จึงต่ำและคะแนนไม่แตกต่างกันในทุกสีพื้นหลัง ส่วนภาพขวดและภาพวงล้อ เป็นภาพที่มีส่วนที่มีความถี่ค่าขนาดใหญ่และมีสีส้นน้อยคือ กำแพงและโต๊ะเป็นจุดสังเกต เมื่อระดับการเหนี่ยวนำจากพื้นหลังไม่เท่ากันจึงทำให้สังเกตสีที่เปลี่ยนไปได้ง่าย z-scores จึงแตกต่างกันในแต่ละพื้นหลัง

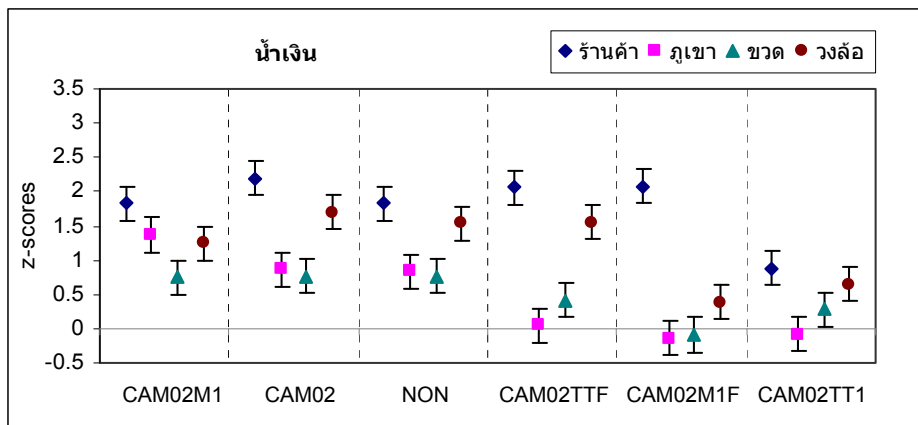
#### 4.3.2 ประสิทธิภาพของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำเมื่อประเมินตามสีของพื้นหลัง

ประสิทธิภาพของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำ (ประสิทธิภาพของแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏ) ในแต่ละสีพื้นหลังประเมินจากคะแนนเฉลี่ยและค่า z-scores ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำที่คำนวณจากคะแนนความเหมือนของภาพทุกภาพในแต่ละพื้นหลัง เขียนกราฟค่า z-scores ในแต่ละพื้นหลังของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ เรียงลำดับจากมากไปหาน้อย ตารางคะแนนเฉลี่ย, ค่า z-scores, ลำดับ (Rank) และ ระดับความเหมือน (Category) ของแต่ละวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำในแต่ละสีพื้นหลังมีรายละเอียดดังนี้

##### 1. พื้นหลังสีน้ำเงิน



ภาพที่ 4.10 ค่า z-scores ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ บนพื้นหลังสีน้ำเงิน



ภาพที่ 4.11 ค่า z-scores ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ ของแต่ละภาพบนพื้นหลังสีน้ำเงิน

ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ บนพื้นหลังสีน้ำเงิน

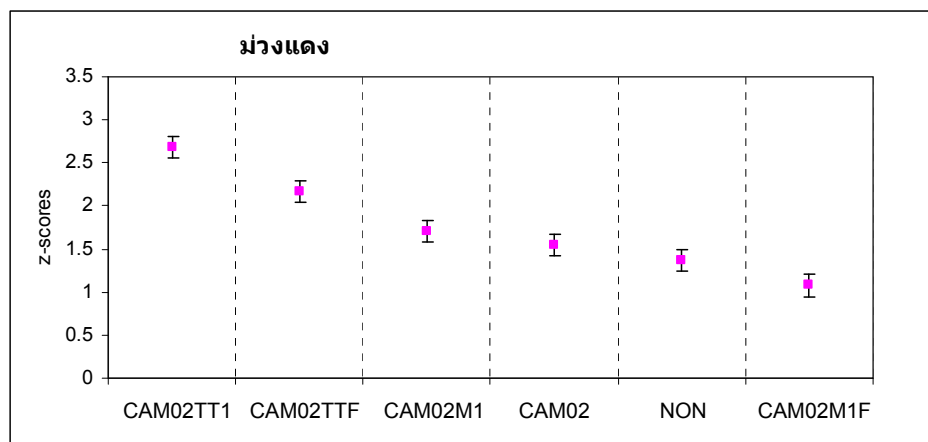
พื้นหลัง	วิธีผลิตภาพผลิตซ้ำ							
	NON	CAM02	CAM02TT1	CAM02M1	CAM02TTF	CAM02M1F	CL	
							95%	
	Mean	3.20	3.42	1.90	3.24	2.93	2.18	
น้ำเงิน	z-scores	1.07	1.12	0.23	1.18	0.79	0.46	0.13
	Rank	1	1	4	1	2	3	
	Category	3	3	2	3	3	2	

จากภาพที่ 4.10 และตารางที่ 4.7 วิธีผลิตภาพผลิตซ้ำที่ได้ค่าเฉลี่ยและ z-scores สูงสุด 3 อันดับ คือ CAM02, CAM02M1 และ NON โดยมีคะแนนเฉลี่ยเท่ากับ 3.42, 3.24 และ 3.20 ค่า z-scores เท่ากับ 1.18, 1.12 และ 1.07 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ความเชื่อมั่น 95% ทั้ง 3 วิธี อยู่ลำดับ 1 เท่ากัน โดยอยู่ใน Category ที่ 3 ซึ่งหมายถึงมีความเหมือนกับต้นฉบับน้อย โดย CAM02TT1 มีค่า z-scores ต่ำสุดเท่ากับ 0.23 อยู่ใน Category ที่ 2 หมายถึงมีความเหมือนกับต้นฉบับน้อยมาก

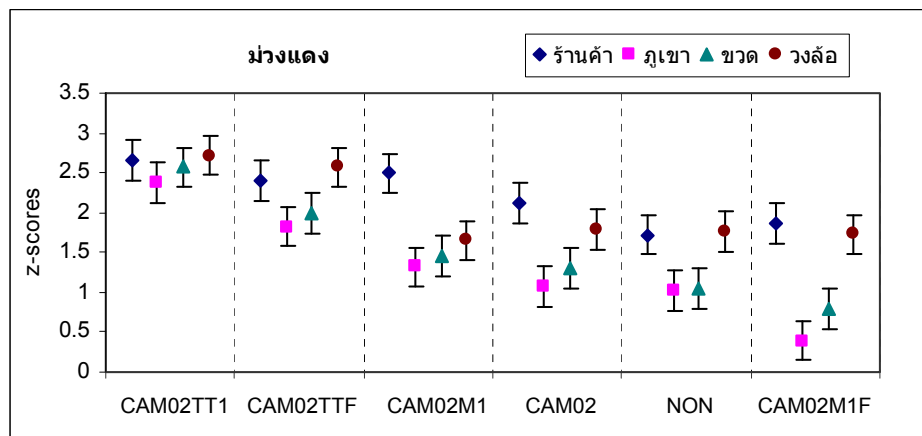
จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นว่าไม่มีวิธีการผลิตภาพผลิตซ้ำใดมี z-scores สูงกว่า NON อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งหมายความว่าไม่มีวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำใดผลิตภาพผลิตซ้ำที่เหมือนกับต้นฉบับมากกว่าภาพที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการใด ๆ ซึ่งอยู่ในระดับเหมือนกับต้นฉบับน้อย จากภาพที่ 4.10 จะเห็นว่า วิธีผลิตภาพผลิตซ้ำที่คำนึงถึงสีพื้นหลังคือ CAM02TT1 และวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำที่คำนึงถึงทั้งสีพื้นหลังและความถี่เชิงระยะทางคือ CAM02TTF และ CAM02M1F มีค่า z-scores อยู่ใน 3 อันดับสุดท้าย จากภาพที่ 4.11 จะเห็นว่า CAM02TT1 มีค่า z-scores ต่ำในทุกภาพ จากการทดลองพบว่าวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำ CAM02TT1 ทำนายค่าสีผิดพลาดบนพื้นหลังสีน้ำเงิน โดย

CAM02TTF ซึ่งปรับปรุงมาจาก CIECAM02TT1 นั้นก็มีความผิดพลาดบนพื้นหลังสีน้ำเงิน เช่นเดียวกัน สังเกตได้จากค่า z-scores ของ CAM02TTF ในภาพที่มีความถี่เชิงระยะทางต่ำคือ ภูเขาและขวด มีค่าไม่ต่างจาก CAM02TT1 แต่จะเห็นว่าภาพที่มีความถี่เชิงระยะทางสูงคือร้านค้า และวงล้อมีค่า z-scores สูงกว่า ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ CAM02TTF ใช้ความถี่เชิงระยะทางในการคำนวณด้วยโดยเมื่อความถี่เชิงระยะทางที่สูงขึ้น ค่าการเปลี่ยนแปลงสีเนื่องจากความถี่เชิงระยะทาง (TTF) จะสูงขึ้นเมื่อหักลบกับค่าการเปลี่ยนแปลงสีเนื่องจากพื้นหลัง (TT1) ทำให้ระดับการเหนี่ยวนำสีจากพื้นหลังสุทธิ (TTtotal) ลดลง CAM02TTF จึงแก้สีน้อยลงทำให้ภาพร้านค้าและวงล้อ ซึ่งเป็นภาพที่มีความถี่เชิงระยะทางสูงติดสีที่ผิดพลาดลดลง จึงมีค่า z-scores สูงกว่าภาพร้านค้าและวงล้อที่ผลิตซ้ำโดย CAM02TT1 ส่วน CAM02M1F พบว่ามีปัญหาความต่อเนื่องของสีสันภายในภาพในบริเวณต่าง ๆ ซึ่งเป็นผลจากการนำความถี่เชิงระยะทางมาใช้ในการคำนวณ จึงเห็นได้ว่าภาพภูเขาและภาพขวดหรือแม้แต่ภาพวงล้อที่มีความถี่สูงกว่า 2 ภาพแรก แต่มีส่วนของกำแพงที่มีความถี่ต่ำสีสันน้อยเป็นจุดสังเกตจึงมีค่า z-scores ต่ำ

## 2. พื้นสีม่วงแดง



ภาพที่ 4.12 ค่า z-scores ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ บนพื้นหลังสีม่วงแดง



ภาพที่ 4.13 ค่า z-scores ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ ของแต่ละภาพบนพื้นหลังสีม่วงแดง

ตารางที่ 4.8 ประสิทธิภาพของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ บนพื้นหลังสีม่วงแดง

		วิธีผลิตภาพผลิตซ้ำ						95%
พื้นหลัง		NON	CAM02	CAM02TT1	CAM02M1	CAM02TTF	CAM02M1F	CL
	Mean	3.36	3.54	4.90	3.86	4.38	3.07	
ม่วงแดง	z-scores	1.36	1.55	2.69	1.71	2.17	1.08	0.13
	Rank	5	4	1	3	2	6	
	Category	3	4	5	4	5	3	

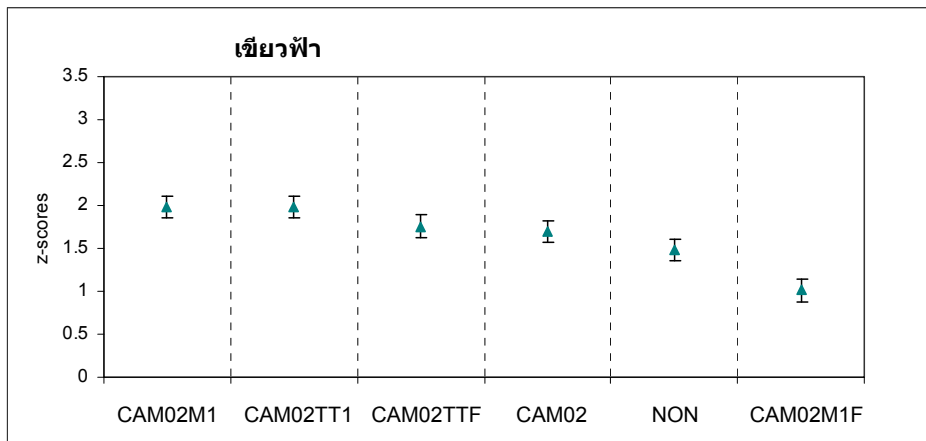
จากภาพที่ 4.12 และตารางที่ 4.8 วิธีผลิตภาพผลิตซ้ำที่ได้คะแนนเฉลี่ยและ z-scores สูงที่สุดคือ 3 อันดับคือ CAM02TT1, CAM02TTF และ CAM02M1 โดยมีค่า z-scores เท่ากับ 2.69, 2.17 และ 1.71 และคะแนนเฉลี่ยเท่ากับ 4.90, 4.38 และ 3.86 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ความเชื่อมั่น 95% จัดอยู่ในลำดับที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ โดย CAM02TT1 และ CAM02TTF อยู่ใน Category ที่ 5 ซึ่งหมายถึงค่อนข้างเหมือนกับต้นฉบับ ทุกโมเดลมีคะแนนสูงกว่า NON ยกเว้น CAM02M1F ที่มีค่า z-scores ต่ำสุด อยู่ใน Category ที่ 3 หมายถึงมีความเหมือนกับต้นฉบับน้อย

จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ว่า วิธีผลิตภาพผลิตซ้ำที่คำนึงถึงสีพื้นหลังคือ CAM02TT1 และ CAM02M1 และวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำที่คำนึงถึงสีพื้นหลังและความถี่เชิงระยะทางคือ CAM02TTF ให้ผลดีกว่าแบบที่ไม่คำนึงถึงพื้นหลังคือ CAM02 อย่างชัดเจนยกเว้น CAM02M1F ที่ยังคงได้คะแนนต่ำสุด โดย CAM02 มีประสิทธิภาพดีกว่า NON เล็กน้อย จากภาพที่ 4.13 CAM02TT1 ที่มีค่า z-scores สูงสุด มีประสิทธิภาพดีในทุกภาพใกล้เคียงกัน ส่วน CAM02TTF มีค่า z-scores ต่ำกว่าเล็กน้อย ซึ่งจากการทดลองพบว่า CAM02TT1 ทำนายค่าสีไปในทิศทางที่

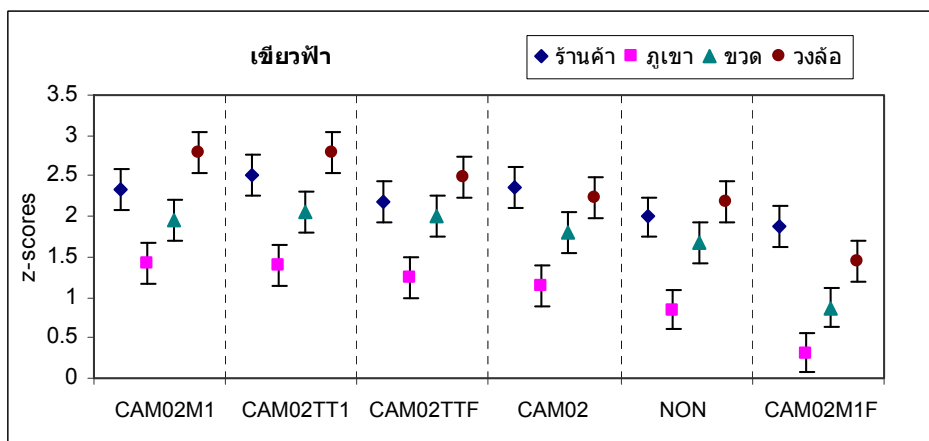


ถูกต้องแต่สีที่แก้งยังไม่มากเท่ากับสีที่เกิดจากการเหนียวนำสีจากสีพื้นหลังที่ปรากฏบนภาพ ต้นฉบับที่อยู่บนพื้นหลังที่มีสี ทั้งนี้อาจเป็นเพราะขนาดของพื้นหลังของการทดลองนี้ที่ใหญ่กว่าขนาดของพื้นหลังในการทดลองเพื่อสร้างฐานข้อมูลให้กับ CIECAM02TT1 และเมื่อ CAM02TTF นำความถี่เชิงระยะทางมาใช้ในการคำนวณทำให้ระดับการแก้สีลดลงจาก CAM02TT1 ดังนั้นค่า z-scores ของ CAM02TTF จึงต่ำลงจาก CAM02TT1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถ้าระดับการแก้สีให้กับภาพสูงขึ้นอาจทำให้ z-scores ของ CAM02TT1 และ CAM02TTF สูงขึ้นได้อีก ซึ่งแสดงว่า CAM02TT1 และ CAM02TTF ประเมินระดับการเหนียวนำสีจากพื้นหลังในการทดลองนี้ต่ำกว่าความเป็นจริง

### 3. พื้นหลังสีเขียวฟ้า



ภาพที่ 4.14 ค่า z-scores ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ บนพื้นหลังสีเขียวฟ้า



ภาพที่ 4.15 ค่า z-scores ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ ของแต่ละภาพบนพื้นหลังสีเขียวฟ้า

ตารางที่ 4.9 ประสิทธิภาพของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ บนพื้นหลังสีเขียวฟ้า

		วิธีผลิตภาพผลิตซ้ำ						95%
พื้นหลัง		NON	CAM02	CAM02TT1	CAM02M1	CAM02TTF	CAM02M1F	CL
	Mean	3.60	3.90	4.29	4.21	4.06	2.82	
เขียวฟ้า	z-scores	1.48	1.69	1.98	1.99	1.76	1.01	0.13
	Rank	3	2	1	1	2	4	
	Category	4	4	4	4	4	3	

จากภาพที่ 4.14 และตารางที่ 4.9 วิธีผลิตภาพผลิตซ้ำที่ได้ค่าเฉลี่ยและ z-scores สูงกว่าวิธีการผลิตภาพผลิตซ้ำวิธีอื่นอย่างเห็นได้ชัดจากภาพที่ 4.15 คือ CAM02TT1 และ CAM02M1 โดยมีคะแนนเฉลี่ยเท่ากับ 4.29 และ 4.21 และมีค่า z-scores เท่ากับ 1.98 และ 1.99 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ความเชื่อมั่น 95% ทั้ง 2 วิธี อยู่ลำดับ 1 เท่ากัน โดยอยู่ใน Category ที่ 4 ซึ่งหมายถึงเหมือนกับต้นฉบับปานกลาง ทุกวิธีมีคะแนนสูงกว่า NON ยกเว้น CAM02TTF

จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ว่า วิธีผลิตภาพผลิตซ้ำที่คำนึงถึงสีพื้นหลังคือ CAM02TT1 และ CAM02M1 และวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำที่คำนึงถึงสีพื้นหลังและความถี่เชิงระยะทางคือ CAM02TTF ให้ผลดีกว่าแบบที่ไม่คำนึงถึงพื้นหลังอย่าง CAM02 เล็กน้อย โดยที่ CAM02TTF ยกเว้น CAM02M1F ที่ยังคงได้คะแนนต่ำสุด จากภาพที่ 4.15 ซึ่งจะเห็นว่าลำดับค่า z-scores ของภาพในแต่ละวิธีการผลิตภาพผลิตซ้ำไม่แตกต่างจาก NON เรียงลำดับจากมากไปน้อยคือ วงล้อ, ร้านค้า, ขวด และ ภูเขา ตามลำดับ ซึ่งอาจเนื่องมาจากสีเขียวฟ้ามีระดับการเหนี่ยวนำสีไม่สูงนัก โดย CAM02M1 มีประสิทธิภาพดี ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากขนาดของพื้นหลังในการทดลองเพื่อสร้างฐานข้อมูลมีขนาดเล็ก ทำให้คำนวณระดับการเหนี่ยวนำสีต่ำจึงมีประสิทธิภาพดีบนพื้นหลังที่เหนี่ยวนำสีน้อย

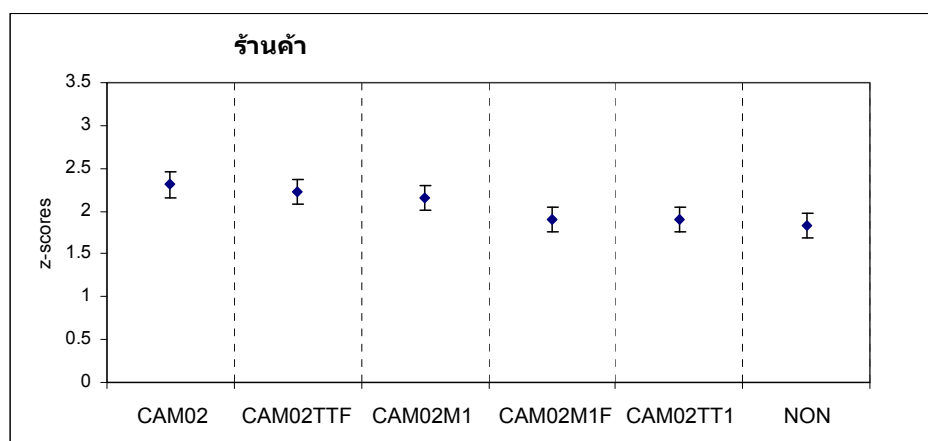
จากการทดลองพบว่าสีพื้นหลังมีอิทธิพลต่อสีของภาพโดยเฉพาะในภาพที่มีความถี่ต่ำแบบจำลองที่คำนึงสีพื้นหลังคือ CIECAM02TT1 และ CIECAM02-m1 มีประสิทธิภาพดีกว่าแบบจำลองที่ไม่ได้คำนึงสีพื้นหลังคือ CIECAM02 แต่ประสิทธิภาพขึ้นกับสีพื้นหลัง โดยมีปัญหาในการทำนายค่าสีที่เปลี่ยนไปเนื่องจากพื้นหลังสีน้ำเงิน ซึ่งแบบจำลองที่คำนึงสีพื้นหลังและความถี่เชิงระยะทาง CIECAM02TTF และ CIECAM02M1F ที่ปรับปรุงใหม่ก็เช่นเดียวกัน โดย CIECAM02TTF ที่ปรับปรุงจาก CIECAM02TT1 มีประสิทธิภาพไม่แตกต่างจาก CIECAM02TT1 โดยทำได้ดีกว่าบนพื้นหลังสีน้ำเงิน ทั้งนี้เนื่องจาก CIECAM02TT1 ทำนายสีผิด ทำให้ค่า z-scores ต่ำลงมาก ส่วน CIECAM02TTF จากโครงสร้างการทำงานพบว่าจะทำนายค่าการเหนี่ยวนำสีจาก

สีพื้นหลังน้อยกว่า CIECAM02TT1 เสมอเนื่องจากใช้ค่าการเหนี่ยวนำสีจากสีพื้นหลังเป็นค่าตั้งต้น แล้วหักลบค่าระดับการเหนี่ยวนำที่เปลี่ยนไปเนื่องจากความถี่เชิงระยะทางของภาพ ทำให้การทำนายสีผิดพลาดบนพื้นหลังสีน้ำเงินลดลง ส่วน CIECAM02M1F พบว่ามีปัญหาความต่อเนื่องของสีสันภายในภาพในบริเวณต่าง ๆ ซึ่งเป็นผลจากการนำความถี่เชิงระยะทางมาใช้ในการคำนวณ ทำให้มีประสิทธิภาพไม่ดีในทุกสีพื้นหลัง นอกจากนี้ยังพบว่า CIECAM02TT1 CIECAM02-m1 สร้างจากฐานข้อมูลที่ได้จากการทดลองกับพื้นหลังมีขนาดเล็กกว่าในการทดลองนี้ ทำให้ทำนายระดับการเหนี่ยวนำสีจากสีพื้นหลังต่ำกว่าความเป็นจริง

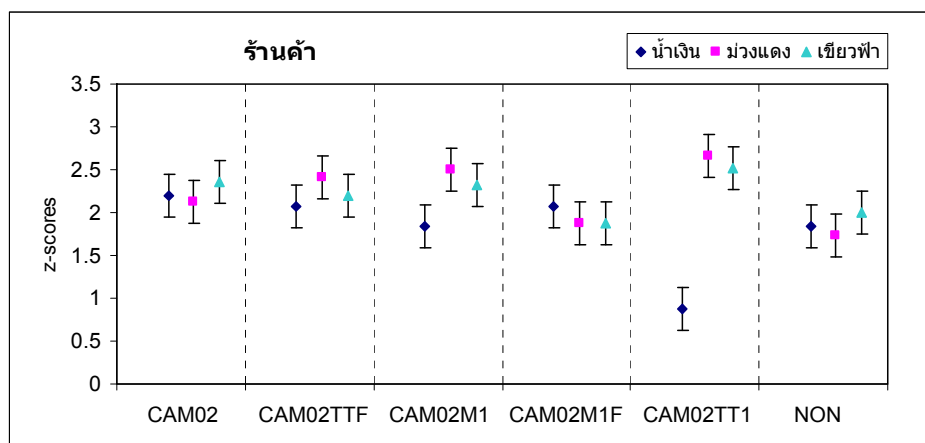
#### 4.3.3 ประสิทธิภาพของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำเมื่อประเมินตามภาพ

ประสิทธิภาพของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำในแต่ละภาพประเมินจากคะแนนเฉลี่ยและค่า z-scores ของแต่ละวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำที่คำนวณจากคะแนนความเหมือนของภาพแต่ละภาพในทุกสีพื้นหลัง เขียนกราฟค่า z-scores ในแต่ละภาพของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ เรียงลำดับจากมากไปหาน้อย ตารางคะแนนเฉลี่ย, ค่า z-scores, ลำดับ (Rank) และ ระดับความเหมือน (Category) ของแต่ละวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำในแต่ละภาพมีรายละเอียดดังนี้

##### 1. ภาพร้านค้า



ภาพที่ 4.16 ค่า z-scores ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ ของภาพร้านค้า



ภาพที่ 4.17 ค่า z-scores ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ ของภาพร้านค้าบนแต่ละสีพื้นหลัง

ตารางที่ 4.10 ประสิทธิภาพของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ ของภาพร้านค้า

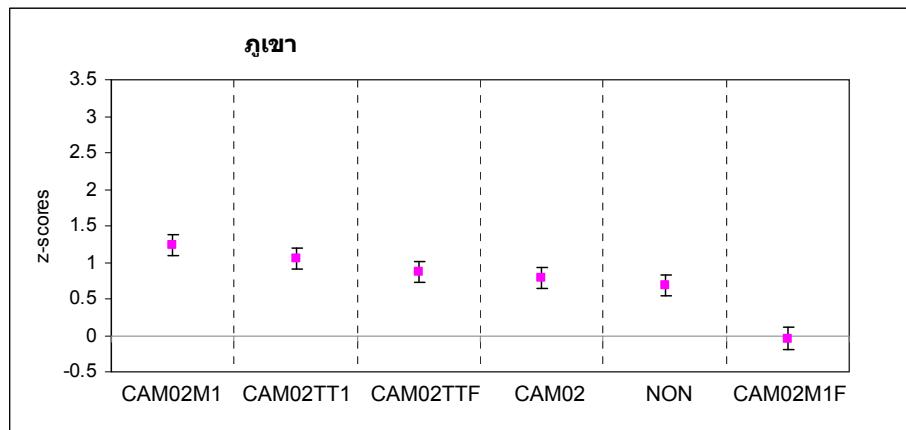
วิธีผลิตภาพผลิตซ้ำ							
							95%
ภาพ	NON	CAM02	CAM02TT1	CAM02M1	CAM02TTF	CAM02M1F	CL
Mean	3.90	4.34	4.06	4.42	4.48	4.13	
ร้านค้า z-scores	1.83	2.31	1.90	2.16	2.23	1.91	0.15
Rank	2	1	2	1	1	2	
Category	4	5	4	4	5	4	

จากภาพที่ 4.16 และตารางที่ 4.10 วิธีการผลิตภาพผลิตซ้ำที่ได้ค่าเฉลี่ยและ z-scores สูงสุด 3 อันดับแรกคือ CAM02, CAM02TTF และ CAM02M1 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.34, 4.48 และ 4.42 และมีค่า z-scores เท่ากับ 2.31, 2.23 และ 2.16 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่ความเชื่อมั่น 95% ทั้ง 3 วิธีอยู่ลำดับเดียวกันคือลำดับที่ 1 จัดอยู่ใน Category ที่ 5 ซึ่งหมายถึงค่อนข้างเหมือนกับต้นฉบับ ส่วนวิธีที่ได้ค่า z-scores น้อยที่สุดคือ NON เท่ากับ 1.83 อยู่ใน Category ที่ 4 ซึ่งหมายถึงเหมือนกับต้นฉบับปานกลาง

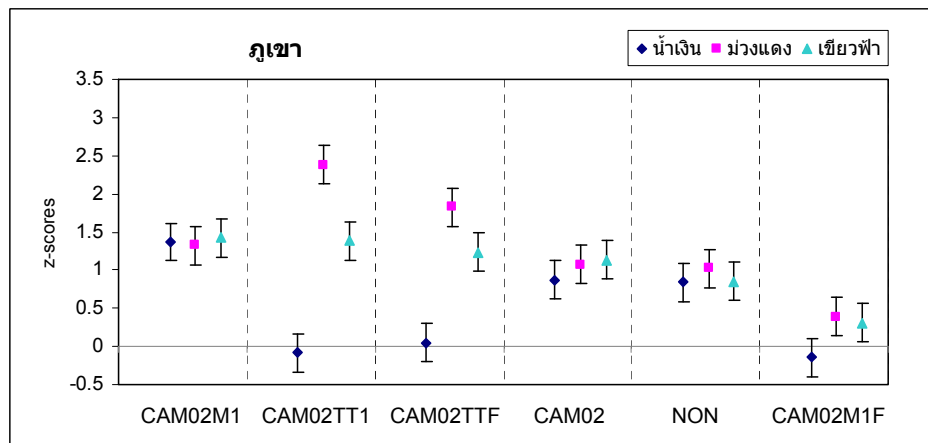
จากผลการทดลองพบว่าทุกวิธีมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจเป็นเพราะภาพร้านค้ามีความถี่เชิงระยะทางสูงและมีสีสด ทำให้ระดับการเหนี่ยวนำจากพื้นหลังลดลงจึงสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงของภาพเมื่อถูกเหนี่ยวนำได้น้อย ซึ่งจะสังเกตได้ว่า CAM02 ซึ่งคำนึงถึงเฉพาะระดับความสว่างของพื้นหลังมีค่า z-scores สูงกว่า NON อย่างเห็นได้ชัด จึงทำให้ทุกวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำได้คะแนนค่อนข้างสูงไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.17 จะเห็นได้ว่า CAM02M1 CAM02TT1 มีค่า z-scores สูงมากในพื้นที่สีม่วงแดงและเขียวฟ้า แต่มีค่า z-scores ต่ำลงในพื้นหลังสีน้ำเงิน โดยเฉพาะ CAM02TT1 ซึ่งเกิดจากการทำนายค่าสีผิดพลาดบน

พื้นหลังสีน้ำเงินดังกล่าวในหัวข้อพื้นหลังสีน้ำเงิน ทำให้โดยรวมทำคะแนนได้น้อยกว่า CAM02 และ CAM02TTF โดย CAM02TTF ซึ่งปรับปรุงมาจาก CAM02TT1 มีค่า z-scores สูงกว่า CAM02TT1 อย่างเห็นได้ชัดบนพื้นหลังสีน้ำเงินนั้น เนื่องจากภาพร้านค้ามีความถี่เชิงระยะทางสูง ทำให้ CAM02TTF คำนวณค่าสีที่เหนี่ยวนำลดลงจาก CAM02TT1 มาก จึงทำให้ติดสีที่ผิดน้อยลงในสีน้ำเงินจึงได้ค่า z-scores สูงกว่า CAM02TT1

## 2. ภาพภูเขา



ภาพที่ 4.18 ค่า z-scores ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ ของภาพภูเขา



ภาพที่ 4.19 ค่า z-scores ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ ของภาพภูเขา บนแต่ละสีพื้นหลัง

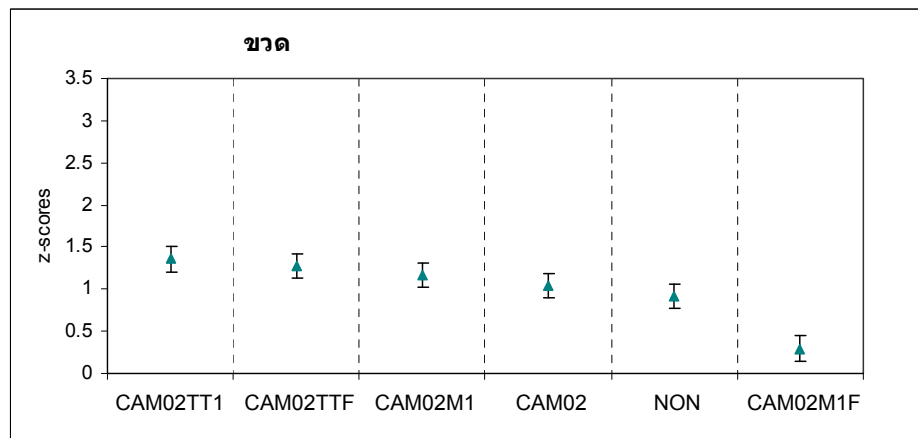
ตารางที่ 4.11 ประสิทธิภาพของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ ของภาพภูเขา

		วิธีผลิตภาพผลิตซ้ำ						
ภาพ		NON	CAM02	CAM02TT1	CAM02M1	CAM02TTF	CAM02M1F	95%CL
	Mean	2.86	3.01	3.29	3.47	3.01	1.71	
ภูเขา	z-scores	0.68	0.79	1.05	1.23	0.87	-0.04	0.15
	Rank	4	3	2	1	3	5	
	Category	3	3	3	3	3	1	

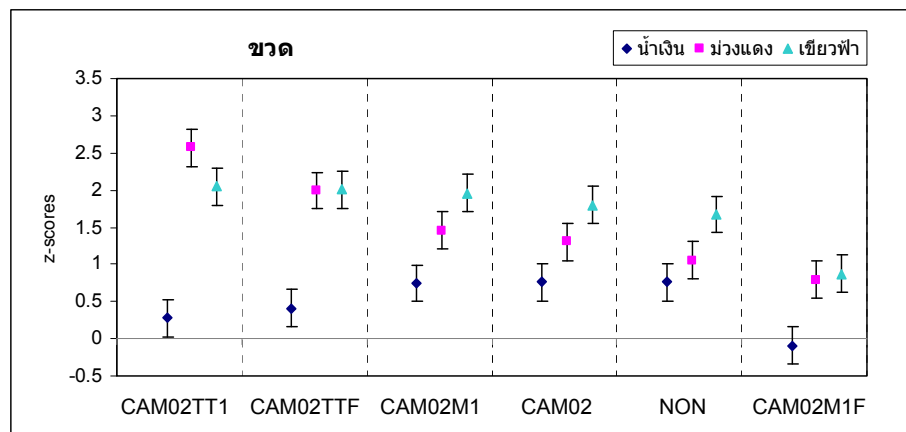
จากภาพที่ 4.18 และตารางที่ 4.11 วิธีผลิตภาพผลิตซ้ำที่ได้ค่าเฉลี่ยและ z-scores สูงสุด 3 อันดับแรกคือ CAM02M1, CAM02TT1 และ CAM02TTF มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.47, 3.29 และ 3.01 ค่า z-scores เท่ากับ 1.23, 1.05 และ 0.87 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่ความเชื่อมั่น 95% ทั้งจัดอยู่ในลำดับ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ โดยทั้ง 3 วิธีอยู่ใน Category ที่ 3 ซึ่งหมายถึงเหมือนกับต้นฉบับน้อย ส่วนวิธีการผลิตภาพผลิตซ้ำที่ได้ค่า z-scores น้อยที่สุดคือ CAM02M1F เท่ากับ -0.04 อยู่ใน Category ที่ 1 ซึ่งหมายถึงเหมือนกับต้นฉบับน้อยมากที่สุด

จากผลการทดลองพบว่าวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำที่คำนึงถึงสีของพื้นหลังคือ CAM02M1 และ CAM02TT1 และวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำที่คำนึงถึงสีของพื้นหลังและความถี่เชิงระยะทางคือ CAM02TTF มีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีการผลิตภาพผลิตซ้ำที่ไม่คำนึงถึงสีของพื้นหลังคือ CAM02 เล็กน้อย โดย CAM02 ประสิทธิภาพไม่ต่างจาก NON และโดยรวมจะเห็นว่าทุกวิธีมีประสิทธิภาพต่ำไม่แตกต่างกันซึ่งอาจเป็นเพราะภาพภูเขามียุคสังเกตุหลายจุด เมื่อพิจารณาแบ่งตามสีพื้นหลังดังภาพที่ 4.19 พบว่า CAM02TT1 ทำได้ดีบนพื้นหลังสีม่วงแดงแต่มีค่า z-scores ต่ำมากบนพื้นหลังสีน้ำเงินโดยรวมจึงได้ค่า z-scores ต่ำ ทั้งนี้เนื่องมาจากภาพภูเขาเป็นภาพที่มีความถี่เชิงระยะทางต่ำเมื่อถูกเหนี่ยวนำสีจากพื้นหลังจึงสังเกตเห็นได้ง่าย ค่า z-scores ระหว่างสีม่วงแดงและสีน้ำเงินของ CAM02TT1 จึงต่างกันมาก ส่วน CAM02TTF จะเห็นได้ว่าค่า z-scores ต่ำกว่า CAM02TT1 เล็กน้อยบนพื้นหลังสีม่วงแดงซึ่งเป็นสีที่ CAM02TT1 และ CAM02TF ทำนายสีได้ถูกต้อง และสูงกว่าบนพื้นหลังสีน้ำเงินที่ CAM02TT1 และ CAM02TF ทำนายสีผิด เนื่องจากภาพภูเขามียุคสังเกตุเชิงระยะทางต่ำทำให้ CAM02TTF คำนวณการเหนี่ยวนำสีที่ผิดในพื้นหลังสีน้ำเงินลดลงเพียงเล็กน้อยจึงมีค่า z-scores ต่ำไม่แตกต่างจาก CAM02TT1

## 3. ภาพขวด



ภาพที่ 4.20 ค่า z-scores ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ ของภาพขวด



ภาพที่ 4.21 ค่า z-scores ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ ของภาพขวดบนแต่ละสีพื้นหลัง

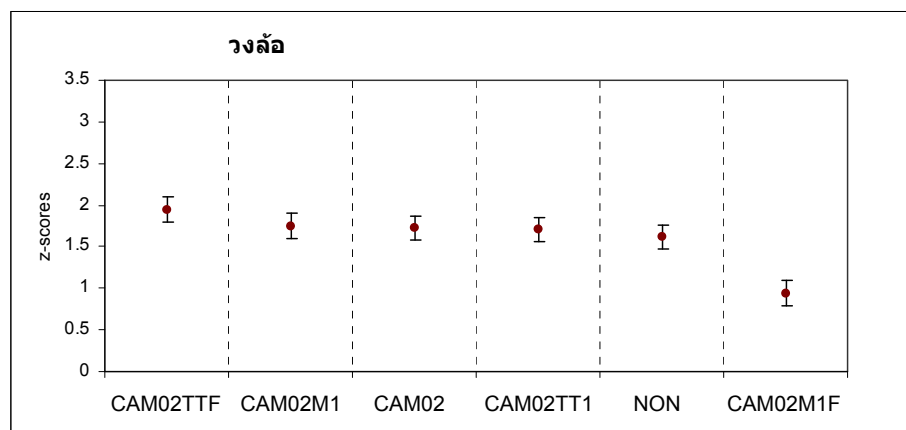
ตารางที่ 4.12 ประสิทธิภาพของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ ของภาพขวด

ภาพ	วิธีผลิตภาพผลิตซ้ำ						95%CL
	NON	CAM02	CAM02TT1	CAM02M1	CAM02TTF	CAM02M1F	
Mean	3.10	3.33	3.54	3.34	3.48	2.07	
ขวด z-scores	0.92	1.05	1.36	1.17	1.28	0.30	0.15
Rank	3	2	1	2	1	4	
Category	3	3	4	3	3	2	

จากภาพที่ 4.20 และตารางที่ 4.12 วิธีผลิตภาพผลิตซ้ำที่ได้ค่าเฉลี่ยและ z-scores สูงสุด 3 อันดับแรกคือ CAM02TT, CAM02TTF และ CAM02M1 มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 3.54, 3.48 และ 3.34 ค่า z-scores เท่ากับ 1.36, 1.28 และ 1.17 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่ความเชื่อมั่น 95% CAM02TT1 และ CAM02TTF อยู่ลำดับ 1 เท่ากัน CAM02M1 อยู่ลำดับที่ 2 โดย CAM02TT1 อยู่ใน Category ที่ 4 ซึ่งหมายถึงเหมือนกับต้นฉบับปานกลาง ส่วนวิธีการผลิตภาพผลิตซ้ำที่ได้ค่า z-scores น้อยที่สุดคือ CAM02M1F เท่ากับ 0.30 อยู่ใน Category ที่ 2 ซึ่งหมายถึงเหมือนกับต้นฉบับน้อยมาก

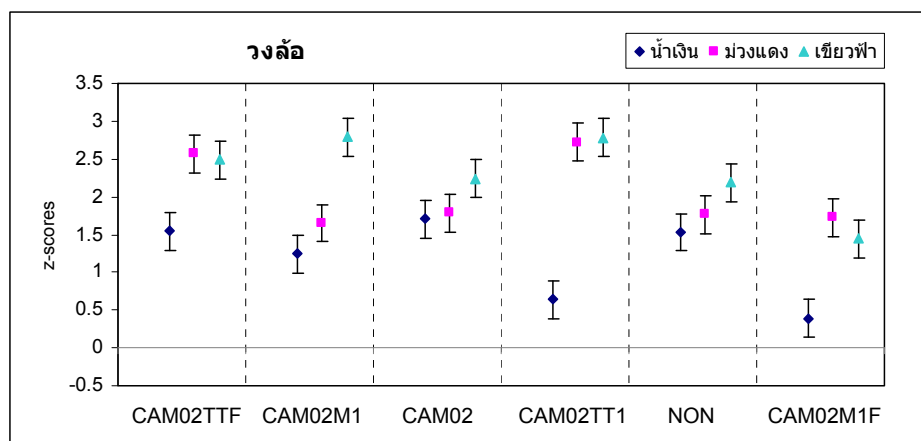
จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ว่า โดยรวมวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำที่ค่านิ่งถึงสีพื้นหลังคือ CAM02TT1 และ CAM02M1 และวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำที่ค่านิ่งถึงสีพื้นหลังและความถี่เชิงระยะทาง CAM02TTF ให้ผลดีกว่าแบบที่ไม่ค่านิ่งถึงพื้นหลังอย่าง CAM02 เล็กน้อย โดย CAM02 ประสิทธิภาพไม่ต่างจาก NON มากนัก โดยรวมทุกวิธีมีค่า z-scores น้อย แต่เมื่อพิจารณาแบ่งตามพื้นหลังดังภาพที่ 4.21 จะเห็นว่าค่า z-scores เปลี่ยนไปตามสีพื้นหลังโดยมีค่ามากเมื่อพื้นหลังสีม่วงแดงและเขียวฟ้า มีค่าน้อยเมื่อพื้นหลังสีน้ำเงิน เนื่องจากเป็นภาพที่มีความถี่เชิงระยะทางต่ำและมีสีน้อยมีจุดสังเกตบริเวณโต๊ะและกำแพง จึงสังเกตเห็นสีที่เหนี่ยวนำจากสีพื้นหลังได้ง่าย ซึ่งจะเห็นได้ว่า CAM02TTF มีค่า z-scores ต่ำกว่า CAM02TT1 เล็กน้อยบนพื้นหลังสีม่วงแดงซึ่งเป็นสีที่ CAM02TT1 และ CAM02TF ทำนายสีได้ถูกต้อง และสูงกว่าเล็กน้อยบนพื้นหลังสีน้ำเงินที่ CAM02TT1 และ CAM02TF ทำนายสีผิด เนื่องจากภาพภูเขามีสภาพความถี่เชิงระยะทางต่ำทำให้ CAM02TTF คำนวณการเหนี่ยวนำสีที่ผิดในพื้นหลังสีน้ำเงินลดลงเพียงเล็กน้อย จึงมีค่า z-scores ไม่แตกต่างจาก CAM02TT1 เช่นเดียวกับภาพภูเขา

#### 4. ภาพวงล้อ



ภาพที่ 4.22 ค่า z-scores ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ ของภาพวงล้อ





ภาพที่ 4.23 ค่า z-scores ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ ของภาพวงล้อบนแต่ละสีพื้นหลัง

ตารางที่ 4.13 ประสิทธิภาพของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบ ของภาพวงล้อ

ภาพ	วิธีผลิตภาพผลิตซ้ำ						95%CL
	NON	CAM02	CAM02TT1	CAM02M1	CAM02TTF	CAM02M1F	
Mean	3.69	3.79	3.90	3.84	4.18	2.84	
วงล้อ z-scores	1.61	1.73	1.70	1.75	1.95	0.94	0.15
Rank	2	2	2	2	1	3	
Category	4	4	4	4	4	3	

จากภาพที่ 4.22 ตารางที่ 4.13 วิธีการผลิตภาพผลิตซ้ำที่ได้ค่าเฉลี่ยและ z-scores สูงสุด 3 อันดับแรกคือ CAM02TTF, CAM02M1 และ CAM02 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.18, 3.84 และ 3.79 ค่า z-scores เท่ากับ 1.95, 1.75 และ 1.73 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่ความเชื่อมั่น 95% จัดอยู่ในลำดับที่ 1, 2 และ 2 ตามลำดับ อยู่ใน Category ที่ 4 ซึ่งหมายถึงเหมือนกับต้นฉบับปานกลาง ส่วนวิธีที่ได้ค่า z-scores น้อยที่สุดคือ CAM02M1F เท่ากับ 0.94 อยู่ใน Category ที่ 3 ซึ่งหมายถึงเหมือนกับต้นฉบับน้อย

จากข้อมูลข้างต้นพบว่า ทุกวิธีมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาแบ่งตามพื้นหลัง ดังภาพที่ 4.23 จะเห็นว่า ค่า z-scores เปลี่ยนไปตามสีพื้นหลังโดยมีค่ามากเมื่อพื้นหลังสีม่วงแดง และเขียวฟ้า มีค่าน้อยเมื่อพื้นหลังสีน้ำเงิน เนื่องจากเป็นภาพที่มีจุดสังเกตคือกำแพงที่ความถี่เชิงระยะทางต่ำเช่นเดียวกับภาพขวด จึงสังเกตเห็นสีที่เหนี่ยวนำจากสีพื้นหลังได้ง่ายค่า z-scores จึงแตกต่างกันระหว่างสีพื้นหลังแต่ละสีแต่น้อยกว่าภาพขวดและมีค่า z-scores สูงกว่าเนื่องจากมีความถี่เชิงระยะทางสูง จะเห็นว่า CAM02TT1 และ CAM02TTF มีประสิทธิภาพดีบนพื้นหลังสีม่วงแดงและสีเขียวฟ้า แต่มีประสิทธิภาพไม่ดีบนพื้นหลังสีน้ำเงินแต่ CAM02TTF มีค่า z-scores

สูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากการนำความถี่เชิงระยะทางมาคำนวณทำให้ลดการเหนี่ยวนำสีที่ผิดบนพื้นหลังสีน้ำเงินและเนื่องจากภาพวงล้อเป็นภาพที่มีความถี่เชิงระยะทางสูงจึงทำให้ CAM02TTF คำนวณสีที่ผิดลดลงมากจึงได้ค่า z-scores สูงกว่า CAM02TT1 อย่างเห็นได้ชัดเช่นเดียวกับภาพร้านค้า และยังคงมีประสิทธิภาพดีบนพื้นหลังสีม่วงแดงและเขียวฟ้าจึงได้ลำดับที่ 1

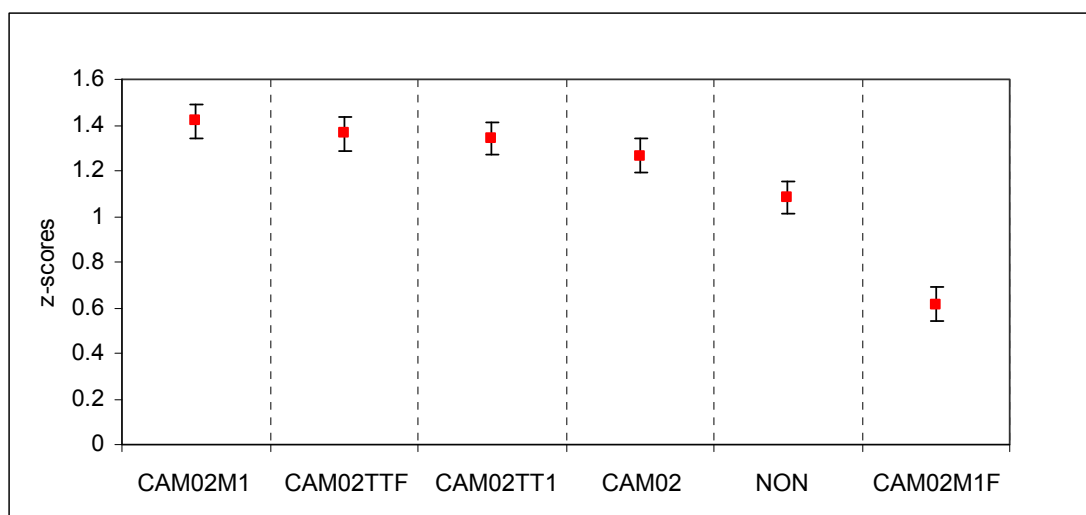
จากการทดลองพบว่าความถี่เชิงระยะทางของภาพส่งผลให้ภาพถูกเหนี่ยวนำจากพื้นหลังไม่เท่ากันทำให้ภาพทั้ง 4 ภาพมี z-scores แตกต่างกัน ซึ่งแบบจำลองที่คำนึงถึงโครงสร้างของภาพน่าจะมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบจำลองที่คำนึงถึงพื้นหลังเพียงอย่างเดียว แต่จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพไม่แตกต่างกัน โดยวิธีการผลิตภาพผลิตซ้ำที่คำนึงถึงสีของพื้นหลังคือ CIECAM02TT1 มีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำวิธีอื่นอย่างเห็นได้ชัดในภาพที่มีความถี่เชิงระยะทางต่ำ ยกเว้นบนพื้นหลังสีน้ำเงินและมีประสิทธิภาพดีในทุกภาพบนพื้นหลังสีม่วงแดง ส่วนวิธีการผลิตภาพผลิตซ้ำที่คำนึงถึงสีของพื้นหลังและความถี่เชิงระยะทางคือ CIECAM02TTF มีประสิทธิภาพดีในภาพที่มีความถี่เชิงระยะทางสูง โดย CIECAM02TTF มีประสิทธิภาพต่ำกว่า CIECAM02TT1 เล็กน้อยบนพื้นหลังสีม่วงแดงและพื้นหลังสีเขียวฟ้าในทุกภาพ แต่มีประสิทธิภาพสูงกว่า CIECAM02TT1 บนพื้นหลังสีน้ำเงินในทุกภาพ โดยเฉพาะภาพที่มีความถี่เชิงระยะทางสูงบนพื้นหลังสีน้ำเงิน ทั้งนี้เนื่องจาก CIECAM02TTF ใช้ความถี่เชิงระยะทางในการคำนวณ โดยเมื่อความถี่เชิงระยะทางที่สูงขึ้น ค่าการเปลี่ยนแปลงสีเนื่องจากความถี่เชิงระยะทางจะสูงขึ้น เมื่อหักลบกับค่าการเปลี่ยนแปลงสีเนื่องจากพื้นหลังทำให้ระดับการเหนี่ยวนำสีลดลง CIECAM02TTF จึงแก้สีน้อยลงจึงทำให้ภาพที่มีความถี่เชิงระยะทางสูงที่ผลิตซ้ำโดย CIECAM02TTF มีค่า z-scores สูงขึ้นกว่าภาพที่ผลิตซ้ำโดย CIECAM02TT1 บนพื้นหลังสีน้ำเงิน ส่วน CIECAM02M1F จะเห็นมีประสิทธิภาพปานกลางในภาพที่มีความถี่เชิงระยะทางสูง แต่มีประสิทธิภาพต่ำมากในภาพที่มีความถี่เชิงระยะทางต่ำ เนื่องจากความบกพร่องของสมการทำให้คำนวณค่าสีในช่วงความถี่เชิงระยะทางต่ำไม่ต่อเนื่อง

แต่ทั้งนี้แม้ว่า CIECAM02TT1 มีประสิทธิภาพดีในทุกภาพบนพื้นหลังสีม่วงแดง แต่ยังคงอยู่ใน category ที่ 5 จาก 7 category ซึ่งจากการทดลองพบว่า CIECAM02TT1 ยังคงเหนี่ยวนำสีน้อยกว่าภาพต้นฉบับที่อยู่บนพื้นหลังที่มีสี ทั้งนี้อาจเนื่องจาก CIECAM02TT1 สร้างขึ้นจากข้อมูลที่ทดลองบนพื้นหลังที่เล็กกว่าจึงคำนวณระดับการเหนี่ยวนำต่ำกว่าความเป็นจริงของการทดลองนี้ แต่ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าถ้าเพิ่มระดับการแก้สีมากขึ้นจะทำให้ CIECAM02TT1 ทำนายค่าสีได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น แต่ก็แสดงให้เห็นว่า ขนาดของพื้นหลังส่งผลต่อระดับการเหนี่ยวนำมากและเห็นได้เด่นชัด และมีนัยสำคัญมากกว่าความถี่เชิงระยะทาง

#### 4.3.4 ประสิทธิภาพโดยรวม

ประสิทธิภาพโดยรวมประเมินจากคะแนนเฉลี่ยและค่า z-scores ของแต่ละวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำที่คำนวณจากคะแนนความเหมือนของภาพทุกภาพในทุกสี่พื้นหลัง, พิจารณาผลต่างของค่า z-scores ระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของสี่พื้นหลัง (background dependency) และผลต่างของค่า z-scores ระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของภาพ (Image dependency)

วิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 แบบมีค่า z-scores รวมทุกภาพและทุกพื้นหลังเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยแสดงดังภาพที่ 4.24 คะแนนเฉลี่ย, ค่า z-scores, ลำดับ (Rank) และ ระดับความเหมือน (Category) ของแต่ละวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำแสดงดังตารางที่ 4.14



ภาพที่ 4.24 ค่า z-scores รวมทุกภาพบนทุกสี่พื้นหลังของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำทั้ง 6 วิธี

ตารางที่ 4.14 ประสิทธิภาพโดยรวมของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำ

	วิธีผลิตภาพผลิตซ้ำ						95%CL
	NON	CAM02	CAM02TT1	CAM02M1	CAM02TTF	CAM02M1F	
Mean	3.39	3.62	3.70	3.77	3.79	2.69	
z-scores	1.08	1.27	1.34	1.42	1.36	0.61	0.07
Rank	3	2	2	1	1	4	
Category	3	4	4	4	4	2	

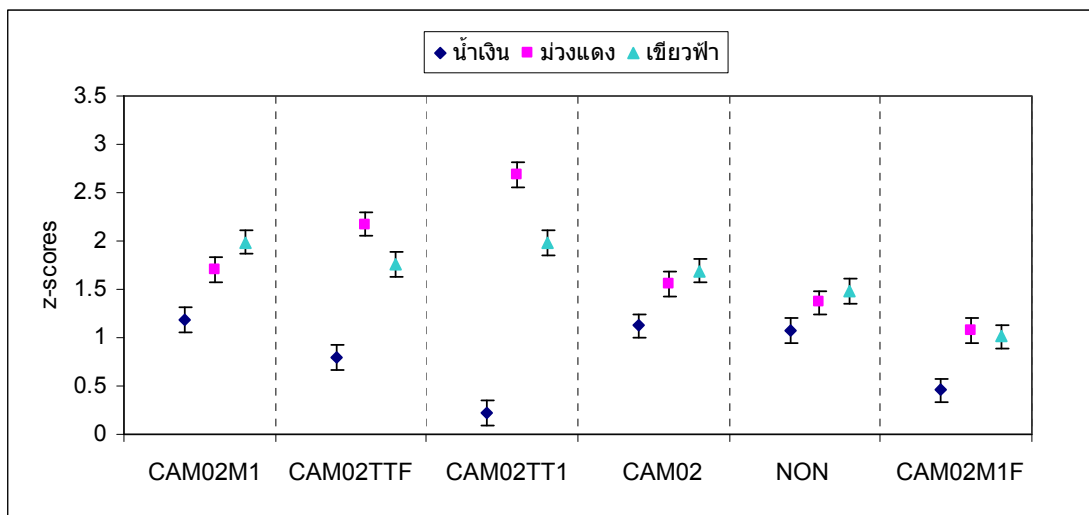
จากภาพที่ 4.24 วิธีผลิตภาพผลิตซ้ำที่ได้ z-scores สูงสุด 3 อันดับคือ CAM02M1, CAM02TTF และ CAM02TT1 มีค่า z-scores เท่ากับ 1.42, 1.36 และ 1.34 ตามลำดับ จากตารางที่ 4.14 จะเห็นว่าสอดคล้องกับคะแนนเฉลี่ยที่ทั้ง 3 แบบได้คะแนนสูงสุด 3 อันดับแรก โดยมีค่า

เท่ากับ 3.77, 3.79 และ 3.70 ตามลำดับ โดยเมื่อพิจารณาที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า Rank ของ CAM02M1 และ CAM02TTF ได้ลำดับ 1 เท่ากัน รองลงมาคือ CAM02TT1 และ CAM02 ซึ่งจัดอยู่ในลำดับที่ 2 เท่ากัน ส่วนลำดับสุดท้ายคือ CAM02M1F และเมื่อพิจารณา Category จะเห็นว่า วิธีการผลิตภาพผลิตซ้ำที่ได้ z-scores สูงสุด 4 อันดับทำได้แค่เพียงอยู่ใน Category ที่ 4 คือมีความเหมือนระดับปานกลางเท่านั้น

จากผลข้างต้นแสดงให้เห็นว่า โดยรวมการใช้แบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏในการผลิตภาพผลิตซ้ำแม้ไม่ได้คำนึงสีพื้นหลังก็ให้ผลดีกว่าภาพที่ไม่ผ่านกระบวนการใด ๆ เลย โดยวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำที่คำนึงถึงสีพื้นหลังคือ CAM02M1 และ CAM02TT1 และวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำที่คำนึงสีพื้นหลังและความถี่เชิงระยะทางคือ CAM02TTF ให้ผลดีกว่าวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำที่ไม่คำนึงถึงสีพื้นหลังอย่าง CAM02 โดย CAM02TTF เมื่อพิจารณาจากค่า z-scores พบว่า CAM02TTF อยู่อันดับที่สองรองจาก CAM02M1 พิจารณาที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า Rank ของ CAM02M1 และ CAM02TTF ได้ลำดับ 1 เท่ากัน โดยมีประสิทธิภาพดีกว่า CAM02TT1 ทั้งนี้เนื่องจาก CAM02TTF ลดทอนความผิดพลาดในการแก้สีบนพื้นหลังสีน้ำเงินได้มากโดยเฉพาะในภาพที่มีความถี่เชิงระยะทางสูง โดย CAM02TT1 ถึงแม้มีประสิทธิภาพบนพื้นหลังสีม่วงแดงและเขียวฟ้าแต่ก็มีประสิทธิภาพต่ำมากบนพื้นหลังสีน้ำเงินจึงทำให้โดยรวมแล้วจึงมี z-scores ไม่สูงนัก ส่วน CAM02M1F มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด โดยมีประสิทธิภาพต่ำกว่าภาพผลิตซ้ำที่ไม่ผ่านกระบวนการใด ๆ ซึ่งเป็นเพราะความไม่แม่นยำของการปรับปรุงสมการค่า p ทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของโทนสีในบริเวณที่มีความถี่เชิงระยะทางต่ำ

#### 1. Background dependency

Background dependency เป็นการประเมินประสิทธิภาพของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำว่ามีประสิทธิภาพคงที่หรือเปลี่ยนแปลงไปตามสีพื้นหลัง โดยพิจารณาจากค่าความแตกต่างระหว่างค่า z-scores ของสีพื้นหลังที่มีค่า z-scores สูงสุดกับต่ำสุด



ภาพที่ 4.25 ค่า z-scores ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำในแต่ละพื้นหลัง

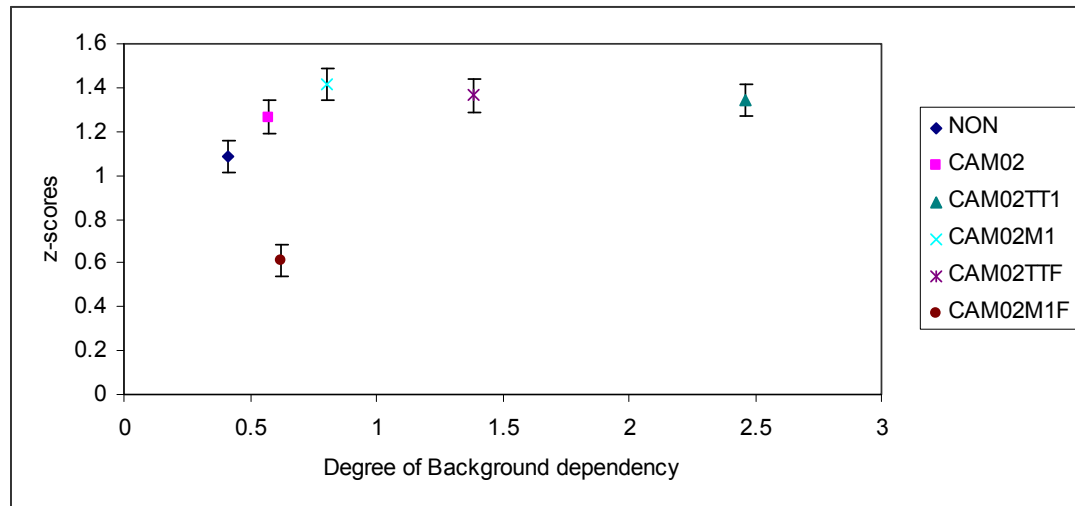
จากภาพที่ 4.25 จะเห็นว่า วิธีผลิตภาพผลิตซ้ำที่คำนึงถึงสีพื้นหลังและวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำที่คำนึงถึงสีพื้นหลังและความถี่เชิงระยะทางมีค่า z-scores เปลี่ยนแปลงไปตามแต่ละพื้นหลัง โดยเฉพาะ CAM02TT1 และ CAM02TTF ที่ z-score มีค่าสูงในพื้นที่สีม่วงแดง แต่มี z-scores ต่ำลงมากบนพื้นหลังสีน้ำเงิน วิธีผลิตภาพผลิตซ้ำที่คำนึงถึงพื้นหลังคือ CAM02TT และ CAM02M1 และวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำที่คำนึงถึงพื้นหลังและความถี่เชิงระยะทางคือ CAM02TTF มี Background dependency เท่ากับ 2.46, 0.80 และ 1.38 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.15) ซึ่งเป็นค่าที่สูง แสดงถึงวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำเหล่านี้มีประสิทธิภาพขึ้นกับสีพื้นหลัง ในขณะที่ CAM02 มี Background dependency สูงกว่า NON เล็กน้อย โดยมีค่า z-scores เท่ากับ 0.57 และ 0.41 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.15 Background dependency ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำ

	วิธีผลิตภาพผลิตซ้ำ					
	NON	CAM02	CAM02TT1	CAM02M1	CAM02TTF	CAM02M1F
Background dependency	0.41	0.57	2.46	0.80	1.38	0.62

ภาพที่ 4.26 แสดงประสิทธิภาพโดยรวมของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำเทียบกับความคงที่ของประสิทธิภาพที่เมื่อเปลี่ยนสีพื้นหลัง โดยค่า z-scores รวมทุกภาพและทุกพื้นหลัง บ่งบอกถึงความถูกต้องแม่นยำในการผลิตภาพผลิตซ้ำโดยรวม ส่วนค่า Background dependency บ่งบอกถึง

ระดับการเปลี่ยนแปลงตามสีพื้นหลังของประสิทธิภาพ ซึ่งวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำที่ดีควรมีค่าความถูกต้องแม่นยำไม่ขึ้นกับพื้นหลังคือ มี z-scores สูง Background dependency ต่ำ

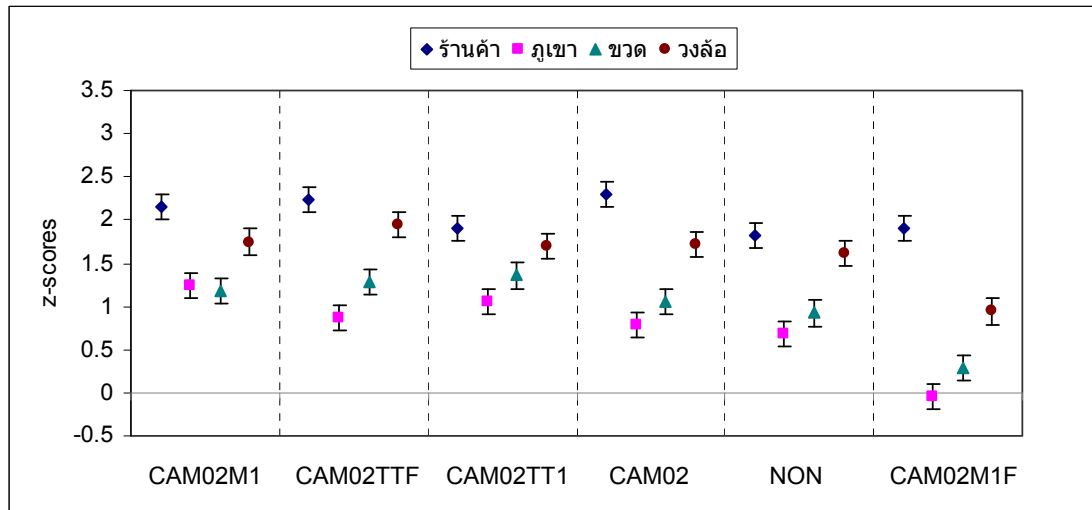


ภาพที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า z-scores กับ Background dependency

จากภาพที่ 4.26 จะเห็นได้ว่า วิธีผลิตภาพผลิตซ้ำที่ไม่ดีคือ CAM02M1F เนื่องจากค่า z-scores ต่ำ และค่า Background dependency ต่ำ ซึ่งหมายความว่าประสิทธิภาพต่ำในทุก ๆ พื้นหลัง ส่วน CAM02M1T1 มีประสิทธิภาพดีในบางสีของพื้นหลัง คือมีประสิทธิภาพดีบนพื้นหลังสีม่วงแดงและสีเขียวฟ้า แต่ประสิทธิภาพต่ำในพื้นหลังสีน้ำเงิน วิธีผลิตภาพผลิตซ้ำที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในเงื่อนไขนี้คือ CAM02M1 ที่มีค่า z-scores สูงสุดในกลุ่ม ในขณะที่ Background dependency ไม่สูงมากเมื่อเทียบกับกลุ่ม แสดงว่า CAM02M1 มีประสิทธิภาพโดยรวมดีที่สุด และให้ผลค่อนข้างคงที่เมื่อมีการเปลี่ยนสีพื้นหลัง เปรียบเทียบกับ CAM02TTF มีค่า z-scores ไม่แตกต่างจาก CAM02M1 แต่มีค่า Background dependency สูงกว่า เนื่องจากมีประสิทธิภาพดีบนพื้นหลังสีม่วงแดง แต่มีประสิทธิภาพไม่ดีบนพื้นหลังสีน้ำเงินจึงมีประสิทธิภาพเป็นรอง CAM02M1

## 2. Image dependency

Image dependency เป็นการประเมินประสิทธิภาพของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำว่ามีประสิทธิภาพคงที่หรือเปลี่ยนไปตามลักษณะของภาพ โดยพิจารณาจากค่าความแตกต่างระหว่างค่า z-scores ของภาพที่มีค่า z-scores สูงสุดกับต่ำสุด



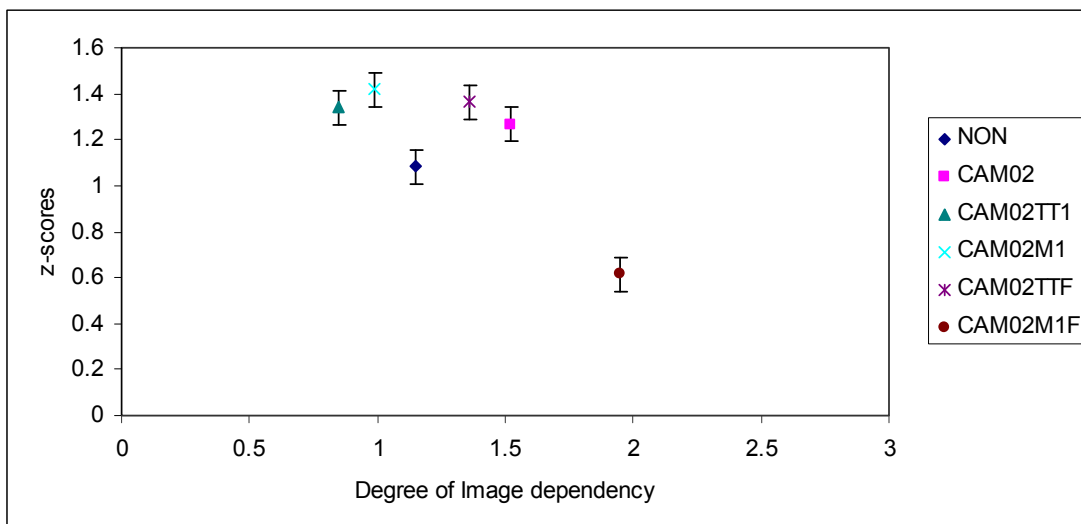
ภาพที่ 4.27 z-scores ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำของแต่ละภาพ

จากภาพที่ 4.27 และตารางที่ 4.16 พบว่า ประสิทธิภาพของทุกวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำมีแนวโน้มขึ้นกับภาพ โดยวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำที่มีประสิทธิภาพขึ้นกับภาพน้อยที่สุด 2 อันดับคือ CAM02TT1 และ CAM02M1 โดยมีค่า Image dependency เท่ากับ 0.85 และ 0.99 ซึ่งต่ำกว่า NON โดย CAM02M1F มี Image dependency สูงสุดเท่ากับ 1.95

ตารางที่ 4.16 Image dependency ของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำ

	วิธีผลิตภาพผลิตซ้ำ					
	NON	CAM02	CAM02TT1	CAM02M1	CAM02TTF	CAM02M1F
Images						
dependency	1.15	1.52	0.85	0.99	1.36	1.95

ภาพที่ 4.28 แสดงประสิทธิภาพโดยรวมเทียบกับความคงที่ของประสิทธิภาพเมื่อลักษณะของภาพเปลี่ยนไป โดยค่า z-scores รวมทุกภาพและทุกพื้นหลัง บ่งบอกถึงความถูกต้องแม่นยำหรือประสิทธิภาพโดยรวมในการผลิตภาพ ส่วนค่า Image dependency บ่งบอกถึงระดับการเปลี่ยนแปลงตามภาพของประสิทธิภาพ ซึ่งวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำที่ดีควรมีค่าความถูกต้องแม่นยำไม่ขึ้นกับภาพคือ มี z-scores สูง Image dependency ต่ำ



ภาพที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า z-scores กับ Image dependency

จากภาพที่ 4.28 จะเห็นได้ว่า วิธีผลิตภาพผลิตซ้ำที่ไม่ดีคือ CAM02M1F เนื่องจากค่า z-scores ต่ำ แต่ค่า Image dependency สูง ซึ่งหมายความว่าประสิทธิภาพต่ำและให้ผลไม่คงที่ขึ้นกับลักษณะภาพ ส่วน CAM02TTF และ CAM02 มีประสิทธิภาพดีแต่ขึ้นกับภาพ วิธีผลิตภาพผลิตซ้ำที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดคือ CAM02TT1 และ CAM02M1 เพราะให้ผลค่อนข้างคงที่ ซึ่งทั้ง 2 วิธี ใช้แบบจำลองที่คำนึงถึงเฉพาะสีพื้นหลัง ไม่ได้คำนึงถึงความถี่เชิงระยะทางภายในภาพ แสดงให้เห็นว่าวิธีการผลิตภาพผลิตซ้ำด้วยแบบจำลองที่คำนึงถึงสีพื้นหลังและความถี่เชิงระยะทางมีประสิทธิภาพขึ้นกับลักษณะของภาพ

แบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏที่คำนึงถึงสีพื้นหลังคือ CIECAM02-m1 และ CIECAM02TT1 และแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏที่คำนึงถึงสีพื้นหลังและความถี่เชิงระยะทางคือ CIECAM02TTF มีประสิทธิภาพดีกว่าแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏที่ไม่ได้คำนึงถึงสีพื้นหลังคือ CIECAM02 เล็กน้อย โดยแบบจำลองที่ดีที่สุดคือ CIECAM02-m1 เนื่องจากประสิทธิภาพขึ้นกับพื้นหลังและลักษณะภาพน้อยกว่าแบบจำลองอื่น ส่วน CIECAM02TTF มีประสิทธิภาพดีแต่ขึ้นกับพื้นหลังและภาพคือ มีประสิทธิภาพดีบนพื้นหลังสีม่วงแดง แต่มีประสิทธิภาพไม่ดีบนพื้นหลังสีน้ำเงิน และมีประสิทธิภาพดีในภาพที่มีความถี่เชิงระยะทางสูง แต่มีประสิทธิภาพต่ำลงในภาพที่มีความถี่เชิงระยะทางต่ำ ส่วน CIECAM02M1F มีประสิทธิภาพต่ำที่สุดในแทบทุกภาพ โดยเฉพาะในภาพที่มีความถี่เชิงระยะทางต่ำ เนื่องจากปัญหาเกี่ยวกับสมการ



จากการทดลองจะสังเกตได้ว่ามีปัจจัยหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อสีของภาพ ได้แก่ สีต้นและขนาดของพื้นที่หลังที่มีสี, ความถี่เชิงระยะทาง, สีต้น และโครมาของภาพ ล้วนส่งผลต่อสีของภาพทำให้การแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อน ไม่มีแบบจำลองใดที่สามารถจัดการกับปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ได้ทั้งหมด ทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏที่คำนึงถึงสีพื้นหลังมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏที่ไม่ได้คำนึงถึงสีพื้นหลังคือ CIECAM02 เพียงเล็กน้อย โดย CIECAM02TT1 แม้ว่าประสิทธิภาพดีมากบนพื้นหลังสีม่วงแดงแต่ก็มีประสิทธิภาพต่ำมากบนพื้นหลังสีน้ำเงิน ส่วน CIECAM02TTF ที่ปรับปรุงมาจาก CIECAM02TT1 ก็เช่นเดียวกัน มีประสิทธิภาพดีแต่ขึ้นกับพื้นหลังคือ มีประสิทธิภาพดีบนพื้นหลังสีม่วงแดง แต่มีประสิทธิภาพไม่ดีบนพื้นหลังสีน้ำเงิน และมีประสิทธิภาพขึ้นกับภาพคือ มีประสิทธิภาพดีในภาพที่มีความถี่เชิงระยะทางสูง แต่มีประสิทธิภาพต่ำลงในภาพที่มีความถี่เชิงระยะทางต่ำ ถึงแม้จะคำนึงถึงความถี่เชิงระยะทางของภาพ ทั้งนี้เนื่องจากการคำนวณค่าการเหนี่ยวนำสีจากพื้นหลังต่ำกว่าความเป็นจริงทำให้เมื่อคำนวณผลของความถี่เชิงระยะทางซึ่งส่งผลให้ระดับการเหนี่ยวนำสีจากสีพื้นหลังลดลงเมื่อความถี่เชิงระยะทางสูงขึ้น ทำให้ระดับการเหนี่ยวนำสีจากพื้นหลังจึงต่ำลงยิ่งขึ้นอีก ส่วน CIECAM02M1F มีประสิทธิภาพต่ำบนทุกพื้นหลังโดยมีประสิทธิภาพดีขึ้นเล็กน้อยในภาพที่มีความถี่เชิงระยะทางสูง ทั้งนี้เนื่องจากปัญหาเกี่ยวกับสมการในการคำนวณค่าสีในช่วงความถี่เชิงระยะทางต่ำทำให้สีในภาพในบริเวณที่มีความถี่ต่ำไม่ต่อเนื่อง โดยแบบจำลองที่ดีที่สุดจากการทดลองคือ CIECAM02-m1 เนื่องจากประสิทธิภาพปานกลางและขึ้นกับพื้นหลังและลักษณะภาพน้อยกว่าแบบจำลองอื่นกล่าวคือ ทำนายสีได้ค่อนข้างดีคงที่ในทุกสีพื้นหลังและภาพทุกประเภท

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของผลของความถี่เชิงระยะทางต่อระดับการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลัง และปรับปรุงแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏด้วยสมการความถี่เชิงระยะทางของภาพเพื่อคำนวณค่าสีปรากฏของภาพบนพื้นหลังที่มีสี ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

##### 1. การทดสอบผลของความถี่เชิงระยะทางต่อระดับการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลัง

ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีปรากฏของสีทดสอบที่เปลี่ยนแปลงกับความถี่เชิงระยะทาง โดยให้ผู้สังเกตดูสีทดสอบที่แสดงบนจอภาพคอมพิวเตอร์ ปรับสีทดสอบที่ไม่มีตารางหมากรูกล้อมรอบให้มีสีปรากฏตรงกับสีอ้างอิงที่มีตารางหมากรูกล้อมรอบและแสดงไว้พร้อมกันบนพื้นหลังที่มีสีสีน บันทึกค่าความถี่ของตารางหมากรูกและค่าสีทดสอบ ทำซ้ำโดยเปลี่ยนความถี่เชิงระยะทาง 9 ค่า และพื้นหลัง 4 สี

##### 2. การปรับปรุงแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏด้วยสมการความถี่เชิงระยะทาง

ขั้นตอนนี้เป็นการนำผลที่ได้จากการทดสอบผลของความถี่เชิงระยะทางต่อระดับการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลังมาสร้างสมการปรับปรุง CIECAM02TT1 และ CIECAM02-m1 ให้สามารถทำนายค่าสีปรากฏที่เปลี่ยนไปเนื่องจากความถี่เชิงระยะทางได้ เรียกแบบจำลองที่ปรับปรุงใหม่ว่า CIECAM02TTF และ CIECAM02M1F

##### 3. การทดสอบประสิทธิภาพ

ทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองโดยใช้ CIECAM02, CIECAM02TT1, CIECAM02M1, CIECAM02TTF และ CIECAM02M1F ในการคำนวณค่าสีปรากฏของภาพต้นฉบับที่อยู่บนพื้นหลังที่มีสีสีน เพื่อผลิตภาพผลิตซ้ำบนพื้นหลังสีเทาให้มีสีปรากฏตรงกัน และภาพที่ไม่ผ่านกระบวนการใด ๆ ให้ผู้สังเกตดูสีปรากฏของภาพผลิตซ้ำบนพื้นหลังสีเทาทางขวาของจอภาพซีอาร์ทีเปรียบเทียบกับสีปรากฏของภาพต้นฉบับบนพื้นหลังที่มีสีสีนที่แสดงทางด้านซ้ายของจอภาพซีอาร์ที แล้วให้คะแนนความเหมือน

ซึ่งผลการวิจัยสรุปได้ดังนี้

### 5.1.1. ผลการทดสอบผลของความถี่เชิงระยะทางต่อระดับการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลัง

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อความถี่เชิงระยะทางสูงขึ้นระดับการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลังจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนมีระดับต่ำสุดที่ความถี่เชิงระยะทางเท่ากับ 8 CPD แต่เมื่อความถี่เชิงระยะทางเพิ่มขึ้นเป็น 12 และ 24 CPD ระดับการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลังเริ่มเพิ่มขึ้นจากจุดต่ำสุด

### 5.1.2. ผลการปรับปรุงแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏด้วยสมการความถี่เชิงระยะทาง

#### 5.1.2.1 CAM02TTF

CAM02TTF เกิดจากการปรับปรุง Induction model ของ CIECAM02TT1 ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ในการคำนวณระดับการเหนี่ยวนำสีจากสีพื้นหลัง โดยเพิ่มการคำนวณค่าระดับการเหนี่ยวนำที่เปลี่ยนไปเนื่องจากความถี่เชิงระยะทาง

ขั้นตอนการคำนวณมีดังนี้

1. แปลงค่าสี XYZ ของสีที่ต้องการทราบค่าสีปรากฏและค่าสี XYZ ของพื้นหลังเป็น  $L^*a^*b^*$
2. หาค่า hue angle (H) ของสีพื้นหลังบนปริภูมิสี CIELAB เพื่อใช้กำหนดทิศทางการเหนี่ยวนำซึ่งจะมีทิศตรงกันข้ามกับ hue angle ของพื้นหลัง
3. คำนวณการเปลี่ยนแปลงสีเนื่องจากการเหนี่ยวนำสีจากสีพื้นหลัง (TT1) จากค่า  $C^*_{ab}$  ของสีพื้นหลัง (c) โดยใช้สมการที่ 5.1

$$TT1 = 0.0009c^{2.1145} \quad \dots\dots\dots(5.1)$$

4. คำนวณระดับการเปลี่ยนแปลงสีเนื่องจากความถี่เชิงระยะทางที่ระดับการเหนี่ยวนำสีจากสีพื้นหลังอ้างอิง (TTFref) จากสมการที่ 5.2-5.3 โดยมีเงื่อนไขดังนี้

เมื่อความถี่เชิงระยะทางมีค่าเท่ากับ 12 CPD ( $F = 0-12$  CPD)

$$TTFref = -0.2505F^2 + 3.7654F + 2.7717 \quad \dots\dots\dots(5.2)$$

เมื่อความถี่เชิงระยะทางมีค่ามากกว่า 12 CPD ( $F > 12$  CPD)

$$TTF_{ref} = -0.2505(12^2) + 3.7654(12) + 2.7717 \quad \dots\dots\dots(5.3)$$

4. คำนวณค่าระดับการเปลี่ยนแปลงสีเนื่องจากความถี่เชิงระยะทางที่ระดับการเปลี่ยนแปลงสีเนื่องจากการเหนี่ยวนำของสีพื้นหลังใด ๆ (TTF) ด้วยสมการที่ 5.4

$$TTF = (TT1 / 21.01) TTF_{ref} \quad \dots\dots\dots(5.4)$$

5. คำนวณผลการเปลี่ยนแปลงสีสุทธิที่เกิดจากการเหนี่ยวนำสีของสีพื้นหลัง (TT1) และการเปลี่ยนแปลงสีเนื่องจากความถี่เชิงระยะทาง (TTF) รวมกัน (TTtotal) ดังสมการที่ 5.5

$$TT_{total} = TT1 - TTF \quad \dots\dots\dots(5.5)$$

6. คำนวณค่าสี  $L^*a^*b^*$  ของสีที่ต้องการทราบค่าสีปรากฏหลังจากถูกเหนี่ยวนำสีจากพื้นหลัง จากทิศทางการเหนี่ยวนำที่ได้จากข้อ 2 และระดับการเหนี่ยวนำสุทธิ (TTtotal) ที่คำนวณไว้ในข้อ 2 และ ข้อ 5 ด้วยสมการที่ 5.6-5.10 กำหนดให้ TT1a คือค่า  $a^*$  ที่เปลี่ยนแปลงไป และ TT1b คือค่า  $b^*$  ที่เปลี่ยนแปลงไป

$$TT1a = TT1 \cos(H + 180) \quad \dots\dots\dots(5.6)$$

$$TT1b = TT1 \sin(H + 180) \quad \dots\dots\dots(5.7)$$

$$a_t^* = a_1^* + TT1a \quad \dots\dots\dots(5.8)$$

$$b_t^* = b_1^* + TT1b \quad \dots\dots\dots(5.9)$$

$$L_t^* = L_1^* \quad \dots\dots\dots(5.10)$$

7. แปลงค่าสี  $L^*a^*b^*$  ของสีที่ต้องการหาค่าสีปรากฏหลังจากถูกเหนี่ยวนำสีจากพื้นหลังเป็นค่าสี XYZ (XtYtZt) เพื่อใช้เป็นข้อมูลนำเข้าของ CIECAM02 ต่อไป

#### 5.1.2.2 CAM02M1F

CAM02M1F เกิดจากการปรับปรุง CIECAM02-m1 ซึ่งมีการนำสมการการคำนวณค่าสีขาวอ้างอิงของ Hunt มาใช้กับ CIECAM02 โดยคำนวณการเหนี่ยวนำสีจากสีพื้นหลังโดยใช้ค่า  $p$  3 ค่าในการคำนวณค่าความสว่าง โครมาและสีส้ม ทั้งนี้ CAM02M1F ปรับการคำนวณค่า  $p$  โดยใช้สมการ 2 สมการคำนวณค่า  $p$  ที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่เชิงระยะทาง ( $F$ ) สมการหนึ่งใช้สำหรับคำนวณค่า  $p$  สำหรับคำนวณค่าโครมา ( $pc$ ) และอีกสมการหนึ่งใช้ในการคำนวณค่าสีส้ม ( $ph$ ) และกำหนดค่า  $p$  สำหรับคำนวณความสว่าง ( $pl$ ) ให้เท่ากับ 0 คือให้ CIECAM02 คำนวณค่าความสว่างโดยตรง เนื่องจาก CIECAM02 สามารถคำนวณความสว่างที่เปลี่ยนไปเนื่องจากความสว่างของพื้นหลังได้ สมการที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังสมการที่ 5.11-5.16

สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $pl$ ,  $pc$  และ  $ph$  กับความถี่เชิงระยะทาง

เมื่อความถี่เชิงระยะทางมีค่าระหว่าง 0-12 CPD ( $F = 0-12$  CPD)

$$pl = 0 \quad \dots\dots\dots(5.11)$$

$$pc = 0.0032F^2 - 0.0483F + 0.3526 \quad \dots\dots\dots(5.12)$$

$$ph = -0.0012F^2 + 0.018F - 0.0735 \quad \dots\dots\dots(5.13)$$

ความถี่เชิงระยะทางมีค่ามากกว่า 12 CPD ( $F > 12$  cpd)

$$pl = 0 \quad \dots\dots\dots(5.14)$$

$$pc = 0.0032(12^2) - 0.0483(12) + 0.3526 \quad \dots\dots\dots(5.15)$$

$$ph = -0.0012(12^2) + 0.018(12) - 0.0735 \quad \dots\dots\dots(5.16)$$

### 5.1.3. ผลการทดสอบประสิทธิภาพ

#### 5.1.3.1 ประสิทธิภาพของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำเมื่อประเมินตามสีของพื้นหลัง

จากการทดลองพบว่าการเหนี่ยวนำสีจากสีพื้นหลังส่งผลต่อภาพอย่างมาก เห็นได้จากภาพเดียวกันมีค่า z-scores ต่างกันเมื่อเปลี่ยนสีพื้นหลัง แสดงให้เห็นถึงความจำเป็นที่จะต้องใช้แบบจำลองที่คำนึงถึงสีพื้นหลัง ซึ่งจะเห็นได้ว่าแบบจำลองที่คำนึงถึงสีพื้นหลังคือ CIECAM02TT1 และ CIECAM02-m1 มีประสิทธิภาพดีกว่าแบบจำลองที่ไม่ได้คำนึงถึงสีพื้นหลังคือ CIECAM02 ในพื้นหลังสีม่วงแดง และสีเขียวฟ้า แต่แบบจำลองที่คำนึงถึงสีพื้นหลังมีข้อด้อยคือ มีประสิทธิภาพต่ำในพื้นหลังสีน้ำเงิน โดยเฉพาะ CIECAM02TT1 ทำได้ดีในสีม่วงแดง แต่ต่ำมากในสีน้ำเงิน ส่วนแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏที่คำนึงถึงสีพื้นหลังและความถี่เชิงระยะทางคือ CIECAM02TTF ให้ผลไม่แตกต่างจากแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏที่คำนึงถึงสีพื้นหลังอย่างเดียว (CIECAM02TT1) โดยทำได้ดีกว่าบนพื้นหลังสีน้ำเงิน ทั้งนี้เนื่องจาก CIECAM02TT1 ทำนายสีผิดทำให้ค่า z-scores ต่ำลงมาก ส่วน CIECAM02TTF จากโครงสร้างการทำงานพบว่า จะทำนายค่าการเหนี่ยวนำสีจากสีพื้นหลังน้อยกว่า CIECAM02TT1 เสมอ เนื่องจากใช้ค่าการเหนี่ยวนำสีจากสีพื้นหลังเป็นค่าตั้งต้นแล้วหาค่าระดับการเหนี่ยวนำที่เปลี่ยนไปเนื่องจากความถี่เชิงระยะทางของภาพ ทำให้ลดการทำนายสีผิดพลาดบนพื้นหลังสีน้ำเงิน CIECAM02M1F มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด โดยพบว่ามีปัญหาความต่อเนื่องของสีสั่นภายในภาพในบริเวณต่าง ๆ โดยเฉพาะในบริเวณที่มีความถี่เชิงระยะทางต่ำ ซึ่งเป็นผลจากการนำความถี่เชิงระยะทางมาใช้ในการคำนวณ

#### 5.1.3.2 ประสิทธิภาพของวิธีผลิตภาพผลิตซ้ำเมื่อประเมินตามภาพ

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า โครงสร้างภายในภาพส่งผลต่อระดับการเหนี่ยวนำสีจากสีพื้นหลังอย่างชัดเจนทำให้ภาพทั้ง 4 ภาพมี z-scores แตกต่างกัน ในภาพผลิตซ้ำที่นำภาพต้นฉบับของทั้ง 4 ภาพมาใช้โดยไม่ผ่านกระบวนการใด ๆ พบว่าภาพที่มีความถี่เชิงระยะทางสูงจะมีค่า z-scores สูงกว่าภาพความถี่เชิงระยะทางต่ำ

แบบจำลองที่คำนึงถึงโครงสร้างของภาพน่าจะมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบจำลองที่คำนึงถึงพื้นหลังเพียงอย่างเดียว แต่จากการทดลองพบว่ามีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกัน แต่กลับเป็น CIECAM02TT1 ที่มีประสิทธิภาพดีในทุกภาพบนพื้นหลังสีม่วงแดง แต่ยังคงอยู่ใน category ที่ 5 จาก 7 category ซึ่งจากการทดลองพบว่า CIECAM02TT1 ยังคงเหนี่ยวนำสีน้อยกว่าภาพต้นฉบับที่อยู่บนพื้นหลังที่มีสี ทั้งนี้อาจเนื่องจาก CIECAM02TT1 สร้างขึ้นจากข้อมูลที่ทดลองบนพื้นหลังที่

เล็กกว่าจึงคำนวณระดับการเหนี่ยวนำต่ำกว่าความเป็นจริงของการทดลองนี้ แต่ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าถ้าเพิ่มระดับการแก๊สมากขึ้นจะทำให้ CIECAM02TT1 ทำนายค่าสีได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น แต่ก็แสดงให้เห็นว่า ขนาดของพื้นหลังส่งผลต่อระดับการเหนี่ยวนำมากและเห็นได้เด่นชัด และมีนัยสำคัญมากกว่าความถี่เชิงระยะทาง

### 5.1.3.3 ประสิทธิภาพโดยรวม

แบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏที่ค่านิ่งถึงสีพื้นหลังมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏที่ไม่ได้ค่านิ่งถึงสีพื้นหลังคือ CIECAM02 เล็กน้อย โดยแบบจำลองที่ดีที่สุดคือ CIECAM02-m1 เนื่องจากประสิทธิภาพขึ้นกับพื้นหลังและลักษณะภาพน้อยกว่าแบบจำลองอื่น ส่วนแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏที่ค่านิ่งถึงสีพื้นหลังและความถี่เชิงระยะทางคือ CIECAM02TTF ให้ผลไม่แตกต่างจากแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏที่ค่านิ่งสีพื้นหลังอย่างเดียว ส่วน CIECAM02M1F มีประสิทธิภาพต่ำที่สุดเนื่องจากปัญหาเกี่ยวกับสมการ

โดยรวมจากปัจจัยดังกล่าวข้างต้น ได้แก่ สีต้นและขนาดของพื้นหลังที่มีสี, ความถี่เชิงระยะทาง, สีต้น และโครมาของภาพ ล้วนส่งผลต่อสีของภาพทำให้การแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนไม่มีแบบจำลองใดที่สามารถจัดการกับปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ได้ทั้งหมด ทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏที่ค่านิ่งถึงสีพื้นหลังมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบจำลองทำนายค่าสีปรากฏที่ไม่ได้ค่านิ่งถึงสีพื้นหลังคือ CIECAM02 เพียงเล็กน้อย โดย CIECAM02TT1 มีประสิทธิภาพดีมากบนพื้นหลังสีม่วงแดงแต่ก็มีประสิทธิภาพต่ำมากบนพื้นหลังสีน้ำเงิน ส่วน CIECAM02TTF ถึงแม้จะค่านิ่งถึงความถี่เชิงระยะทางของภาพ แต่เมื่อการคำนวณค่าการเหนี่ยวนำสีจากพื้นหลังต่ำกว่าความเป็นจริงทำให้เมื่อคำนวณผลของความถี่เชิงระยะทางเพิ่มเข้ามาทำให้ระดับการเหนี่ยวนำสีจากพื้นหลังจึงต่ำลงยิ่งขึ้นอีก โดยแบบจำลองที่ดีที่สุดจากการทดลองคือ CIECAM02-m1 เนื่องจากประสิทธิภาพปานกลางและขึ้นกับพื้นหลังและลักษณะภาพน้อยกว่าแบบจำลองอื่นกล่าวคือ ทำนายสีได้ค่อนข้างดีคงที่ในทุกสีพื้นหลังและภาพทุกประเภท

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทดสอบหาผลของโครมาและสีต้นของสีทดสอบที่ส่งผลต่อระดับการเหนี่ยวนำสีจากสีพื้นหลัง ซึ่งจากการทดลองนี้จะเห็นว่าสีต้นและโครมาของภาพส่งผลต่อระดับการเหนี่ยวนำสี

2. ควรทดสอบผลของความถี่เชิงระยะทางของภาพต่อระดับการเหนี่ยวนำสี่ขงสี่พื้นหลัง โดยใช้ภาพแทนการใช้แผ่นสี่
3. ทดสอบหาผลของโครมาและสีต้นของ induction field ที่ส่งผลต่อระดับการเหนี่ยวนำสี่จากสี่พื้นหลัง
4. เปรียบเทียบระดับการเหนี่ยวนำสี่จากสี่พื้นหลังที่มีขนาดต่างกัน เพื่อปรับปรุง CIECAM02-m1 ซึ่งจากการทดลองพบว่า มีประสิทธิภาพขึ้นกับสี่พื้นหลังและลักษณะภาพน้อยกว่าแบบจำลองอื่น และเนื่องจากแบบจำลองนี้สร้างจากฐานข้อมูลที่ใช้กับสี่พื้นหลังที่มีขนาดเล็กกว่าการทดลองนี้ จึงอาจเป็นสาเหตุให้ CIECAM02-m1 ได้คะแนนสูงกว่า CIECAM02 เล็กน้อย ดังนั้นถ้านำค่า p มาสร้างสมการสัมพันธ์ระหว่างระดับการเหนี่ยวนำสี่จากสี่พื้นหลังกับขนาดของสี่พื้นหลังน่าจะมีประสิทธิภาพสูงขึ้น



## รายการอ้างอิง

- [1] Fairchild, M.D. Color Appearance Models. 2<sup>nd</sup> Ed. England: John Wiley & Sons, 2005.
- [2] Wu, R.C., and Wardman, R.H. Proposed Modification to the CIECAM02 Colour Appearance Model to Include the Simultaneous Contrast Effects. Color Research and Application 32 (April 2007): 121-129.
- [3] Binghua, C., Dazun, Z., Ningfang, L., and Yubo, Sh. Preprocessing to CIECAM02 Input Color with Chromatic Background. Color Research and Application 32 (February 2007): 40-46.
- [4] Barnes, E., Claire, S., Wei, J., and Shevell, S.K. Chromatic Induction with Remote Chromatic Contrast Varied in Magnitude, Spatial Frequency, and Chromaticity. Vision Research 39 (October 1999): 3561-3574.
- [5] Harrar, M., and Vienot, F. Regulation of Chromatic Induction by Neighboring Images. Journal of Optic Society of America 22 (October 2005): 2197-2206
- [6] Smith, C.V., Jin, P.Q., and Pokorny, J. The Role of Spatial Frequency in Colour Induction. Vision Research. 41 (April 2001): 1007-1021.
- [7] Hunt, R.W.G. Revised color-appearance model for related and unrelated color. Color Research and Application 16 (June 1991): 146-165
- [8] Gonzalez, R.C., and Wood, R.E. Digital Image Processing. 2<sup>nd</sup> Ed. Singapore: Pearson Education, 2002.
- [9] Braun, K., Firchild, M., and Alessi, P. Viewing techniques for cross-media image comparisons. Color Research and Application 21 (February 1996): 6-17

[10] Stephen, W., and Ripamonti, C. Computational Colour Science Using MATLAB.

Chichester: John Wiley & Sons, 2004.

[11] Mante, V., Frazor, A.R., Bonin, V., Geisler, W.S., and Carandini, M. Independence of Luminance and Contrast in Natural Scenes and in the Early Visual

System. Nature Neuroscience 8 (December 2005): 1690-1697.

[12] Torgerson, W.S. Theory and methods of scaling. New York: Wiley & Sons, 1958.

[13] Billmeyer, F.W., Alessi, Jr., and Alessi, P.J. Assessment of color-measuring

instrument. Color Research and Application 6 (Winter 1981): 195-202

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชัยรัตน์ จงเจริญสุข เกิดเมื่อวันที่ 20 ตุลาคม พ.ศ. 2528 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากภาควิชาไฟฟ้าเครื่องกลการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน ในปีการศึกษา 2550 หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อระดับวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีทางภาพ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2551