พิพิธภัณฑ์กลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงแนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการผลิตภาพสีซ้ำจากต้นฉบับภาพสีน้ำจากข้อมูลสเปกตรัมบนจอภาพซีอาร์ที

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 สีน้ำ (Water Color)

สีน้ำเป็นสีที่มีคุณสมบัติเด่นในเรื่องของความโปร่งใส และการแห้งตัวเร็ว ทำให้สามารถใช้สีน้ำเป็นตัวแทนในการแสดงพฤติกรรมการตอบสนองการรับรู้สีของมนุษย์และก่อเกิดรูปแบบงานศิลปะประเภทหนึ่งได้ ซึ่งในงานวิจัย ภาพที่ใช้ในการทดลองก็เป็นภาพวาดจากสีน้ำด้วยเช่นกัน

สีน้ำมีส่วนประกอบที่สำคัญ [1] คือ เนื้อที่บดแล้วอย่างละเอียด (Pigment) ผสมกับกาวอารบิค ซึ่งสกัดมาจากต้นอะคาเซีย (Acacia Tree) กาวชนิดนี้มีคุณสมบัติพิเศษ คือ ละลายน้ำง่าย และเกาะติดกระดาษแน่น ทั้งยังมีลักษณะโปร่งใสอีกด้วย ดังนั้น จึงนิยมผสมเนื้อสีกับกาวอารบิคนี้ ในกรณีที่ต้องการใช้กาวอื่นแทน ก็สามารถใช้น้ำผึ้งหรือกลีเซอรีน ซึ่งละลายน้ำได้ดี ดังนั้น สีน้ำจึงประกอบด้วย เนื้อสี กาว และกลีเซอรีน ตามปริมาณที่เหมาะสมในการวาดภาพ

2.1.1.1 ลักษณะและคุณสมบัติของสีน้ำ

สีน้ำเป็นสื่อวัสดุที่มีคุณสมบัติสำคัญ 4 ประการ คือ

2.1.1.1.1 ลักษณะโปร่งใส (Transparent Quality)

เนื่องจากสีน้ำมีส่วนผสมของกาวและสีที่บดอย่างละเอียด นิยมระบายบนกระดาษขาวซึ่งมีลักษณะผิวของกระดาษต่าง ๆ กัน ดังนั้นเมื่อระบายบนกระดาษสีขาวจึงมีเนื้อสีไม่หนาทึบจนเกินไปทำให้เกิดลักษณะโปร่งใส และการระบายสีน้ำจะต้องระบายไปทีเดียวไม่ระบายซ้ำกัน เพราะจะทำให้สีซ้ำหรือหม่นได้และควรระบายจากสีอ่อนไปหาสีแก่ ในบางกรณีอาจจะระบายจากสีแก่ไปหาสีอ่อนก็ได้ ทั้งนี้ต้องคอยระวังอย่าให้น้ำที่ใช้ผสมสีขุ่นหรือคล้ำ เพราะจะทำให้สีหม่นหรือทึบได้

2.1.1.1.2 ลักษณะเปียกชุ่ม (Soft Quality)

เนื่องจากในการระบายสีน้ำจะต้องผสมกับน้ำ และระบายให้ซึมเข้าหากันเมื่อต้องการให้สีกลมกลืนกัน ดังนั้นเมื่อระบายไปแล้วลักษณะของสีที่แห้งบนกระดาษจะคง

ความเปียกชุ่มของสีปรากฏให้เห็นอยู่เสมอ และในบางกรณีที่ใช้สีน้ำระบายมากเกินไปแล้วปล่อยให้สีแห้งไปเองก็จะเกิดคราบของสีปรากฏให้เห็น ซึ่งถือเป็นลักษณะพิเศษที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก ยิ่งศิลปินสีน้ำท่านใดสามารถสร้างสรรค์ให้คราบนั้นน่าดูและมีความหมายขึ้น ถือว่าเป็นลักษณะพิเศษของสีน้ำที่มีค่าควรชื่นชมเป็นอย่างยิ่ง

2.1.1.1.3 สีน้ำมีคุณสมบัติแห้งเร็ว

สีน้ำมีคุณสมบัติแห้งเร็วเมื่อเทียบกับสีน้ำมัน ดังนั้นจึงทำให้เกิดความเชื่อต่อผู้สนใจทั้งหลายว่าเป็นสื่อที่ระบายยาก และเหมาะสำหรับผู้ที่สามารถตัดสินใจรวดเร็วในการถ่ายทอดเท่านั้น อย่างไรก็ดีความเชื่อดังกล่าวอาจแก้ไขได้ด้วยการลงมือทำจริง เพราะเหตุว่าการระบายสีน้ำมีวิธีระบายหลายวิธี และเราสามารถควบคุมคุณสมบัติแห้งเร็วนี้ได้ ด้วยการผสมกลีเซอรีนลงในน้ำผสมสีก็จะช่วยให้แห้งช้าได้

2.1.1.1.4 สีน้ำมีคุณสมบัติรุกรานและยอมรับ (Advance, Recede)

ทั้งนี้เกี่ยวข้องกับสีและสารเคมีที่ผสม ซึ่งผู้สนใจจะต้องตรวจสอบด้วยตนเองว่าสีใดที่มีคุณสมบัติรุกรานสีอื่นหรือสีใดยอมให้สีอื่นรุกราน และสีใดที่ติดกระดาษล้างน้ำไม่ออก

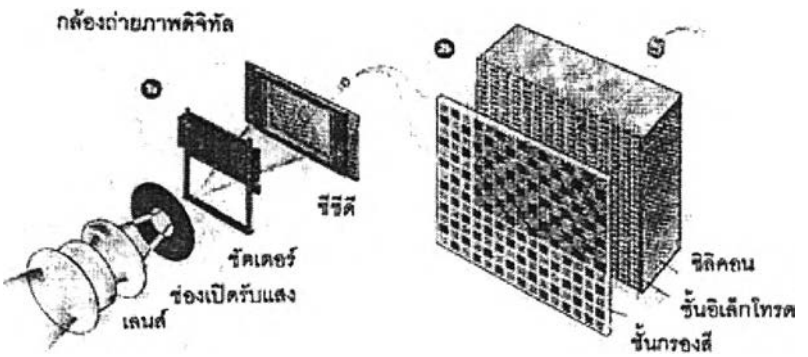
2.1.2 **กล้องดิจิทัล** (Digital Camera) **และกล้องวิดิทัศน์** (Digital VDO Camera)

2.1.2.1 กล้องดิจิทัล

ในปัจจุบันนี้กล้องดิจิทัลนิยมนำมาใช้ถ่ายภาพกันเป็นจำนวนมาก และสามารถใช้ทำงานแทนสแกนเนอร์ได้ เนื่องจากความสะดวกสบายในการพกพา น้ำหนักเบา และการใช้งานง่าย รวมทั้งยังใช้เป็นอุปกรณ์เสริมในมือถืออีกด้วย และด้วยเหตุนี้เองทำให้กล้องดิจิทัลได้มีการพัฒนากันอย่างต่อเนื่องมาโดยตลอด โดยถ้าจะกล่าวถึงการใช้งาน และส่วนประกอบที่สำคัญในกล้องดิจิทัลนั้น กล่าวได้ว่ากล้องดิจิทัลเป็นกล้องที่ใช้ถ่ายภาพนิ่งเหมือนกับกล้องที่ใช้ฟิล์ม มีหลักการทำงานเหมือนกัน แต่เปลี่ยนจากส่วนรับภาพที่เป็นฟิล์มมาเป็นเซลล์รับแสงแบบ CCD แทน ซึ่งจะทำหน้าที่แปลงแสงที่ผ่านเลนส์เข้ามาให้เป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อนำไปประมวลผล โดยที่เราเรียกสัญญาณดิจิทัลนี้ว่า ข้อมูลภาพ ซึ่งในปัจจุบัน CCD มีความละเอียดและความไวแสงสูงขึ้น ทำให้สามารถควบคุมรายละเอียดและน้ำหนักสีของวัตถุต้นฉบับได้กว้างขึ้น การออกแบบแผง CCD ซึ่งมี 2 แบบ คือ Monochrome CCD กับ Color CCD ซึ่งจะใช้เทคโนโลยี Mosaic Dye Masking คือใช้แผ่นกรองแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินขนาดเล็กเท่ากับจุดภาพ (Pixel) วางเรียงสลับกัน [2]

2.1.2.1.1 หลักการนำเข้าข้อมูลภาพของกล้องถ่ายภาพดิจิทัล

เมื่อสัญญาณภาพทางแสงสะท้อนจากวัตถุส่องทะลุผ่านเลนส์ถ่ายภาพของกล้องดิจิทัล โดยมีการจำกัดควบคุมปริมาณแสงด้วยช่องเปิดรับแสงและชัตเตอร์ เพื่อให้ได้ปริมาณแสงที่สมดุลกับความไวแสงของ CCD สัญญาณภาพทางแสงที่ตกกระทบบน CCD จะถูกแปลงเป็นสัญญาณภาพทางไฟฟ้า [3]



ภาพที่ 2.1 ส่วนประกอบหลักและการเดินทางของแสงในกล้องดิจิทัล [3]

2.1.2.2 กล้องวิดิทัศน์

กล้องวิดิทัศน์เกิดจากแนวคิดที่ต้องการจัดเก็บภาพจากกล้องวิดิทัศน์ทั่วไปเพื่อแสดงผลภาพที่เครื่องคอมพิวเตอร์ และนำมาใช้งานในงานพิมพ์ได้ ดังนั้นจึงเกิดการพัฒนาดัดแปลงกล้องวิดิทัศน์ทั่วไปให้เป็นกล้องวิดิทัศน์ ซึ่งสามารถนำสัญญาณไฟฟ้าแอนาล็อกจากแผ่น CCD ผ่าน A/D Converters เพื่อแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลเสียก่อน แล้วจึงส่งต่อไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยทั่วไปแล้วกล้องวิดิทัศน์จะมีส่วนประกอบคล้ายกับกล้องถ่ายภาพดิจิทัลทั่วไปแตกต่างกันตรงที่โครงสร้างภายนอก เลนส์ที่ใช้ถ่ายภาพ ไม่มีช่องมองภาพแต่จะสามารถพิจารณาภาพได้จากเครื่องคอมพิวเตอร์

2.1.2.2.1 หลักการนำเข้าข้อมูลภาพของกล้องวิดิทัศน์

กล้องวิดิทัศน์เป็นอุปกรณ์ที่สามารถนำเข้าข้อมูลภาพเป็นแบบ 3 มิติได้เช่นเดียวกับกล้องถ่ายภาพดิจิทัล ซึ่ง CCD ที่ใช้ในกล้องทั้ง 2 ประเภทนั้นเหมือนกัน แต่จะแตกต่างกันอยู่ที่ กล้องวิดิทัศน์มีความไวต่อสัญญาณแสงต่ำกว่า CCD ที่ใช้ในกล้องถ่ายภาพดิจิทัล ดังนั้นกล้องวิดิทัศน์จะแบ่งการจับสัญญาณภาพออกเป็น 2 ระยะ คือ ระยะแรกใช้แถบ CCD ในแถวคู่ในการรับสัญญาณภาพก่อน จากนั้น CCD ในแถวคี่จึงจะรับสัญญาณภาพอีกครั้ง ซึ่งแตกต่างจากกล้องถ่าย

ภาพดิจิทัลที่รับสัญญาณภาพเต็มพื้นที่ของแถบ CCD พร้อมๆกันทีเดียวทั้งภาพ อย่างไรก็ตามข้อมูลภาพที่ได้จากกล้องวิดิทัศน์และกล้องถ่ายภาพดิจิทัลไม่แตกต่างกัน ส่วนใหญ่แล้วกล้องวิดิทัศน์จะถูกออกแบบให้สามารถถ่ายวัตถุจริงได้ ไม่ว่าวัตถุนั้นจะเป็นแบบ 2 มิติ หรือ 3 มิติได้ และปัจจุบันกล้องวิดิทัศน์ยังได้รับการออกแบบให้มีหลอดไฟแฟลซติดไว้ที่ตัวกล้องสำหรับการถ่ายภาพ เพื่อเพิ่มความเข้มแสงที่จะตกกระทบลงบนตัวรับสัญญาณภาพ ทำให้สามารถจับภาพได้ไวขึ้น

2.1.2.3 Charge-Coupled Devices (CCDs)

เครื่องกราดแบบราบ หรือ สแกนเนอร์ และกล้องดิจิทัลใช้ CCDs เป็นตัวรับแสง CCD เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ประกอบด้วยชิ้นเล็กๆ ของตัวรับสัญญาณ ซึ่งจะเปลี่ยนความเข้มแสงที่ได้รับเป็นสัญญาณอนาลอก ลักษณะหรือชนิดของ CCD จะขึ้นอยู่กับการแซมเปิลภาพต้นฉบับของอุปกรณ์ เช่น สแกนเนอร์แบบราบ CCD จะเป็นแบบ 1 แถว (สำหรับการสแกน 3 ครั้ง) หรือแบบ 3 แถว (สำหรับการสแกน 1 ครั้ง) ดังแสดงในภาพที่ 2.1 และกล้องดิจิทัล CCD จะเป็นแผงสี่เหลี่ยมซึ่งจะทำการเก็บข้อมูลทีเดียวทั้งแผง CCD ซึ่งต่างจากสแกนเนอร์ที่จะเก็บข้อมูลทีละแถวเมื่อ CCD ได้รับสัญญาณอนาลอกแล้วส่งต่อไปยังตัวแปลงสัญญาณ (A/D Converters) ซึ่งจะแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นข้อมูลดิจิทัล [4]

ในงานวิจัยนี้ได้นำกล้องดิจิทัลมาใช้แต่มีข้อจำกัด คือ ต้องเป็นกล้องที่มี CCD ชนิด Monochrome และเนื่องจากกล้องชนิดนี้ต้องสั่งทำ งานวิจัยนี้จึงใช้กล้องวิดิทัศน์แทน เพราะส่วนประกอบหลักของกล้องใช้ CCD เป็นชนิด Monochrome ซึ่งกล้องวิดิทัศน์นี้แตกต่างกับกล้องดิจิทัลทั่วไปตรงที่สัญญาณภาพที่เข้ามาที่กล้องนั้น เป็นสัญญาณภาพต่อเนื่องผ่านมายังเลนส์ แล้วถูกบันทึกสัญญาณภาพออกเป็น 2 ระยะบน CCD ซึ่งจะแยกภาพออกเป็นแฟรมตามองค์ประกอบของช่วงเวลาที่ได้กำหนดไว้

2.1.3 **แผ่นกรองแสง** (Filter)

แผ่นกรองแสงทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวกลางในการยอมให้แสงสีเดียวกับตัวเองผ่านแต่จะดูดกลืนแสงสีอื่นไว้ โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้แผ่นกรองแสงชนิด Tri Acetyl Cellulose ซึ่งเป็นแผ่นเจลาตินใสที่มีการเคลือบสีไว้ทั้ง 2 ด้าน โดยการใช้งานนั้น จะนำไปวางบังหน้าเลนส์ของกล้องถ่ายภาพดิจิทัล เพื่อช่วยในการดูดกลืนและส่องผ่านแสงสีต่าง ๆ ตามชนิดของแผ่นกรองแสงนั้น ๆ

2.1.3.1 คุณสมบัติของแผ่นกรองแสง

แสงที่เรามองเห็นเป็นสีขาวนั้นเกิดจากการรวมตัวของสีต่าง ๆ ซึ่งมีความถี่ของคลื่นระหว่าง 400 – 700 นาโนเมตร คือ สีน้ำเงิน เขียว และแดง แต่การที่เรามองเห็นวัตถุในแสงสี

ขาวเป็นสีต่างๆมากมายนั้น เป็นเพราะวัตถุนั้นสะท้อนแสงหรือส่องผ่านแสงนั้นมายังตาเราและกั้นหรือดูดกลืนแสงบางสีไว้ เช่น เราเห็นเสื้อเป็นสีแดงในแสงสีขาว เพราะเสื้อสะท้อนแสงสีแดงซึ่งเป็นส่วนประกอบของแสงสีขาวเป็นส่วนใหญ่ และดูดกลืนแสงสีอื่น ๆ ไว้ ส่วนวัตถุโปร่งแสง เช่น แก้วสีน้ำเงินวางภายใต้แสงสีขาว เราจะเห็นเป็นสีน้ำเงินเพราะแก้วยอมให้แสงสีน้ำเงินส่องผ่านและดูดกลืนแสงสีอื่นไว้ [5]

2.1.3.2 หลักการผสมสี

แผ่นกรองแสงใช้หลักการการผสมสีแบบลบ (subtractive color) ที่เป็นการผสมสารให้สีต่าง ๆ เข้าด้วยกัน โดยทั่วไปสารให้สีมีสมบัติการเลือกดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 1 ใน 3 ของสเปกตรัมของแสงขาว และสะท้อนหรือส่องผ่านแสงที่เหลือประมาณ 2 ใน 3 ของช่วงความยาวคลื่นสเปกตรัมของแสงขาวให้เขาตา ทั้งนี้แม่สีปฐมภูมิแบบลบ คือ สีน้ำเงินเขียว สีม่วงแดงและสีเหลือง มีสีสันเหมือนกับสีเติมเต็มทั้ง 3 สี ของแสงแม่สีปฐมภูมิแบบบวก ได้แก่ แสงสีน้ำเงิน แสงสีเขียวและแสงสีแดง โดยการผสมสีแบบบวกนั้น หากนำแสงสีอื่นมาผสมกับแสงแม่สีปฐมภูมิแล้วทำให้เกิดสีขาวขึ้น จะเรียกแสงสีนั้นว่า "แสงสีเติมเต็ม" ของแสงแม่สีปฐมภูมินั้น ซึ่งแสงสีเติมเต็มของแสงแม่สีปฐมภูมิมีดังนี้

แสงสีแดง (R) + แสงสีน้ำเงินเขียว (B+G,C) ⟶ แสงสีขาว (W)

แสงสีเขียว (G) + แสงสีม่วงแดง (R+B,M) ⟶ แสงสีขาว (W)

แสงสีน้ำเงิน (B) + แสงสีเหลือง (R+G,Y) ⟶ แสงสีขาว (W)

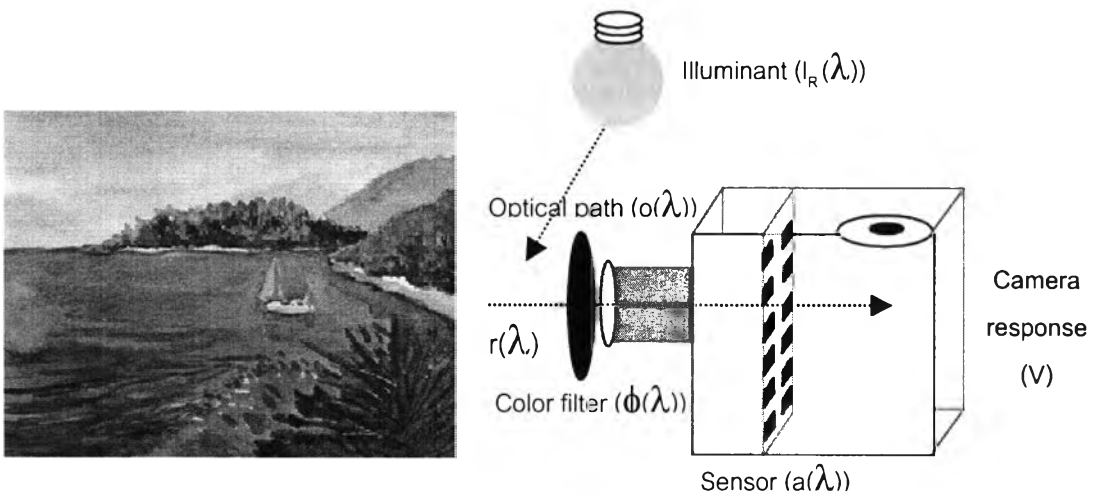
ดังนั้นแสงสีน้ำเงินเขียนจึงเป็นแสงสีเติมเต็มของแสงสีแดง แสงสีม่วงแดงจึงเป็นแสงสีเติมเต็มของแสงสีเขียน และแสงสีเหลืองจึงเป็นแสงสีเติมเต็มของแสงสีน้ำเงิน แสงสีน้ำเงินเขียว, แสงสีม่วงแดงและแสงสีเหลือง เรียกว่า แม่สีแบบลบ

ถ้าให้แสงสีขาวส่องผ่านแผ่นกรองแสงสีน้ำเงินเขียว แสงสีแดงจะถูกดูดกลืนไว้ส่วนแสงสีน้ำเงินและแสงสีเขียวจะถูกส่องผ่าน แผ่นกรองแสงสีม่วงแดงจะดูดกลืนแสงสีเขียวไว้และจะส่องผ่านแสงสีน้ำเงินกับแสงสีแดง ส่วนแผ่นกรองแสงสีเหลืองจะดูดกลืนแสงสีน้ำเงินไว้และยอมให้แสงสีแดงกับแสงสีเขียวส่องผ่าน

จากคุณสมบัติดังกล่าวสรุปได้ว่าแผ่นกรองแสงสีใดก็ตามจะปล่อยให้แสงสีของตัวเองหรือแสงบางสีที่มีส่วนผสมของสีตัวเองผ่านไป ส่วนแสงสีอื่น ๆ จะถูกกั้นไว้ไม่ให้ผ่าน

2.1.4 แบบจำลององค์ประกอบในการบันทึกภาพของกล้องดิจิทัล

การบันทึกภาพของกล้องดิจิทัลสามารถอธิบายค่าการตอบสนองของกล้องดิจิทัล (Camera Response / Pixel Value,V) ได้ด้วยองค์ประกอบในการบันทึกภาพของกล้องดิจิทัลดังภาพ 2.2 ซึ่งเป็นการบันทึกภาพด้วยกล้องดิจิทัลภายใต้แหล่งกำเนิดแสงหนึ่ง ผ่านมายังแผ่นกรองแสงที่บังหน้าเลนส์ของกล้องดิจิทัลไว้ โดยที่ค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของภาพที่ได้จะถูกบันทึกไว้ที่ตัวรับแสงของกล้องดิจิทัล



ภาพที่ 2.2 : องค์ประกอบในการบันทึกภาพของกล้องดิจิทัล

ดังนั้นจากภาพ 2.2 องค์ประกอบในการบันทึกภาพของกล้องดิจิทัล [6] ประกอบไปด้วย

$I_R(\lambda)$ คือ ค่าการส่องสว่างของแหล่งกำเนิดแสง (The spectral radiance of the illuminant)

$r(\lambda)$ คือ คุณลักษณะเฉพาะต่อการสะท้อนแสงของวัตถุ (The spectral reflectance characterisation of the object surface imaged in a pixel)

$o(\lambda)$ คือ ค่าการส่องผ่านของเลนส์ (The spectral transmittance of the optical system in front of the detector array)

$\phi(\lambda)$ คือ ค่าการส่องผ่านของแผ่นกรองแสง (The spectral transmittance of an optical color filter)

$a(\lambda)$ คือ ค่าความไวแสงของซีซีดี (The spectral sensitivity of the CCD array)

โดยสามารถคำนวณหาค่าการตอบสนองของกล้อง ซึ่งเป็นค่าที่ใช้บอกระดับความสว่างของภาพที่ได้จากการบันทึกภาพด้วยกล้องดิจิทัล และมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 255 ได้จากสมการที่ 2.1

$$V = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} l_R(\lambda)\, r(\lambda)\, o(\lambda)\, \phi(\lambda)\, a(\lambda)\, d\lambda \qquad (2.1)$$

2.1.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการมองเห็นสี

ปัจจัยที่มีผลต่อการมองเห็นสีของมนุษย์ [7] หรือตัวแปรที่จำเป็นต่อการรับรู้สีของมนุษย์จะประกอบด้วย 3 ส่วนหลักดังนี้

- แหล่งกำเนิดแสงที่ทำหน้าที่ให้กำเนิดแสง
- วัตถุมีสีที่ทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนลักษณะทางฟิสิกส์ และทิศทางเดินทางของแสงของแหล่งกำเนิดแสง
- ตามนุษย์ที่ทำหน้าที่รับรู้และสัมผัสแสงที่สะท้อนมาจากวัตถุ โดยมีสมองทำหน้าที่ในการสั่งแปลความแสงที่ผ่านตามาเป็นสีต่าง ๆ กัน

2.1.5.1 แหล่งกำเนิดแสง

แหล่งกำเนิดแสงแต่ละประเภทมีสมบัติของแสงแตกต่างกัน สมบัติเหล่านี้นอกจากจะมีผลทำให้สีของแสงที่มนุษย์เรามองเห็นและรับรู้ได้แตกต่างกันแล้ว ยังมีผลทำให้สีของวัตถุที่แสงนั้นตกกระทบมีการเปลี่ยนแปลงและแตกต่างกันด้วยสมบัติของแสงมีดังนี้

2.1.5.1.1 การกระจายพลังงานแสงของสเปกตรัม (Spectral Power Distribution : SPD)

แหล่งกำเนิดแสงมีการกระจายพลังงานในแต่ละความยาวคลื่นแตกต่างกัน เช่น แหล่งกำเนิดแสง A D_{50} และ D_{65} โดยแหล่งกำเนิดแสง A เป็นแสงที่มีค่าพลังงานแสงเพิ่มขึ้นตามความยาวคลื่นแสงที่มากขึ้น และมีค่าพลังงานแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร จึงมีสีออกไปทางสีแดงอมเหลือง ส่วนแหล่งกำเนิดแสง D_{50} และ D_{65} เป็นแสงที่มีค่าพลังงานในความยาวคลื่นสั้นสูงกว่าแสงจากแหล่งกำเนิดแสง A ดังนั้นจึงมีแสงสีน้ำเงินมากกว่า โดย D_{65} มีค่าพลังงานในช่วงความยาวคลื่นของแสงสีน้ำเงินสูงกว่า D_{50} แต่มีค่าพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่นของแสงสีแดงต่ำกว่าแสง D_{50} จึงทำให้แสง D_{65} มีสีอมสีน้ำเงินมากกว่าแสง D_{50} โดยปกติค่าพลังงานแสงที่ใช้เป็นค่าสัมพัทธ์ซึ่งได้จากการเปรียบเทียบกับค่าพลังงานต่างๆกับค่าพลังงานที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร เพราะเป็นแสงที่ตามนุษย์มีความไวแสงมากที่สุด

2.1.5.1.2 อุณหภูมิสี (Color Temperature)

อุณหภูมิสี หมายถึง อุณหภูมิในหน่วยเคลวินที่เมื่อวัตถุดำ (Black Body) ได้รับความร้อนที่อุณหภูมินั้นแล้วเปล่งแสงที่มีสีแตกต่างกันออกมา อุณหภูมิสีของแสงเป็นตัวเลขเพียงค่าเดียว ในขณะที่ค่า SPD เป็นตัวเลขที่แตกต่างกันตามความยาวคลื่น

2.1.5.1.3 การแปลสี (Color Rendering)

การแปลสีเป็นสมบัติของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงใด ๆ ที่ทำให้สีของวัตถุมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมองดูภายใต้แสงจากแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน หรือแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิงใดๆ ในการระบุสมบัติการแปลสีของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงใด ๆ สามารถทำได้โดยใช้ค่าดัชนีการแปลสี (Color Rendering Index) ซึ่งเป็นค่าตัวเลขที่คำนวณโดยใช้ค่าสี CIE ของแผ่นสีมันเซลล์ภายใต้แสงจากแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐานและแหล่งกำเนิดแสงต่าง ๆ ทั้งนี้ค่าดัชนีการแปลสีมีค่าสูงสุดได้เท่ากับ 100 แสงจากแหล่งกำเนิดใด ๆ ก็ตามที่มีค่าดัชนีการแปลสีเท่ากับ 100 หมายความว่าแสงนั้นไม่ทำให้สีของวัตถุเปลี่ยนแปลงไปจากสีของวัตถุเดียวกันที่มองภายใต้แสงจากแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน แต่ถ้าแสงจากแหล่งกำเนิดใดก็ตามมีค่าดัชนีการแปลสีต่ำกว่า 100 มาก ๆ ก็ยิ่งทำให้สีที่ปรากฏของวัตถุมีความแตกต่างไปจากสีของวัตถุที่มองภายใต้แหล่งกำเนิดแสงมาตรฐานมากขึ้นเท่านั้น

2.1.5.1.4 แหล่งกำเนิดแสงมาตรฐานซีไออี (CIE Standard Illuminants)

ซีไออีได้กำหนดแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน [8] ออกเป็นประเภทต่าง ๆ ดังนี้

2.1.5.1.4.1 แหล่งกำเนิดแสง A เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีอุณหภูมิสีเทียบเคียง 2,856 เคลวิน

2.1.5.1.4.2 แหล่งกำเนิดแสง B เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีอุณหภูมิสีเทียบเคียง 4,874 เคลวิน

2.1.5.1.4.3 แหล่งกำเนิดแสง C เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีอุณหภูมิสีเทียบเคียง 6,774 เคลวิน

2.1.5.1.4.4 แหล่งกำเนิดแสงกลางวัน หรือแหล่งกำเนิดแสง D ประเภทต่างๆแบ่งออกได้เป็นอีก 4 ประเภท คือ

- แหล่งกำเนิดแสง D_{50} เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีอุณหภูมิสีเทียบเคียง 5,000 เคลวิน

- แหล่งกำเนิดแสง D_{55} เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีอุณหภูมิสีเทียบเคียง 5,500 เคลวิน

- แหล่งกำเนิดแสง D_{65} เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีอุณหภูมิสีเทียบเคียง 6,500 เคลวิน

- แหล่งกำเนิดแสง D_{75} เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีอุณหภูมิสีเทียบเคียง 7,500 เคลวิน

2.1.5.1.4.5 แหล่งกำเนิดแสงฟลูออเรสเซนซ์ หรือแหล่งกำเนิดแสง F ประเภทต่าง ๆ ตั้งแต่ F1-F12 ซึ่งมีอุณหภูมิสีต่ำสุดอยู่ที่ 2,940 เคลวิน สำหรับแหล่งกำเนิดแสง F4 และมีอุณหภูมิสีสูงที่สุดอยู่ที่ 6,500 เคลวิน สำหรับแหล่งกำเนิดแสง F7

โดยในทางการพิมพ์นั้น แหล่งกำเนิดแสงมาตรฐานที่ใช้มองเปรียบเทียบสิ่งพิมพ์ คือ แหล่งกำเนิดแสง D_{50}

2.1.5.2 วัตถุมีสี

วัตถุมีสีได้เนื่องจากมีองค์ประกอบ คือ สารให้สี (Colorants) ที่มีสมบัติในการเลือกดูดกลืนแสงในบางช่วงความยาวคลื่นของแสงที่ตกกระทบ แล้วเลือกส่องผ่านหรือสะท้อนแสงในช่วงความยาวคลื่นอื่น ๆ ที่เหลือของแสงตกกระทบออกมา

2.1.5.3 ตา

ลูกตาทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ตัวรับแสง (Sensor) และสมองทำหน้าที่ประมวลผลสัญญาณที่ส่งมาจากลูกตาทำให้เกิดการรับรู้สี โดยเมื่อแสงจากวัตถุตกกระทบบนจอตา เซลล์รับแสงรูปแท่งและรูปกรวยจะเกิดการตอบสนองต่อแสงและทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า จากนั้นจะเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณประสาทก่อนที่จะส่งต่อไปยังสมองเพื่อแปลสัญญาณให้เกิดการมองเห็นและรับรู้สีต่าง ๆ ของวัตถุ

2.1.6 **การวิเคราะห์ส่วนประกอบหลัก** (Principal Component Analysis : PCA)

การวิเคราะห์ส่วนประกอบหลักเป็นวิธีการที่จะอธิบายข้อมูลให้ง่ายขึ้นด้วยการลดจำนวนตัวแปรให้น้อยลง โดยการพยายามหาโครงสร้างตัวประกอบน้อย ๆ ที่จะแทนตัวแปรจำนวนมาก ๆ ในการวิเคราะห์ตัวประกอบนั้นยึดหลักการที่ว่าการที่ตัวแปรหรือข้อมูลต่างๆมีความสัมพันธ์กันก็เพราะตัวแปรต่างๆเหล่านั้นมีตัวประกอบร่วมกัน สังเกตได้จากการจับกลุ่มของตัวแปรหรือค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรซึ่งจะมีความสัมพันธ์กันสูงเป็นกลุ่ม ๆ ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าตัว

แปรเหล่านี้มีตัวประกอบร่วมกัน ถ้าพบว่าตัวประกอบร่วมเหล่านี้มีความสัมพันธ์กันสูงแทนที่จะใช้ตัวแปรมาก ๆ เราอาจใช้ตัวประกอบร่วมแทนตัวแปรเหล่านี้ได้ ซึ่งเป็นการลดจำนวนข้อมูลให้น้อยลง [9]

2.1.6.1 คำจำกัดความและการคำนวณ

2.1.6.1.1 ไอเกนเวกเตอร์ หรือ คาแรคเทอริสติกเวกเตอร์ (Eigen Vector หรือ Characteristic Vector) คือ คอลัมน์ของน้ำหนัก (Weight) ของเมทริกซ์ตัวแปร ถ้ามีตัวแปร 6 ตัว จะมีค่าน้ำหนักอย่าง 6 ค่า ในเวกเตอร์นั้น [10]

2.1.6.1.2 ค่าไอเกน หรือ คาแรคเทอริสติกรูท (Eigenvalues หรือ Characteristic Roots) คือ ปริมาณของความแปรปรวนรวมที่สามารถอธิบายได้ด้วยเวกเตอร์ ถ้าค่าไอเกนยิ่งสูง เวกเตอร์ของส่วนประกอบนั้นก็จะยิ่งอธิบายความแปรปรวนได้มาก

2.1.6.1.3 ค่าเฉลี่ย ความแปรปรวน และความแปรปรวนร่วมระหว่างคู่ใด ๆ ของตัวแปร เป็นข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ตัวประกอบหลัก

โดยที่ ค่าเฉลี่ยของตัวแปร ($\bar{X}$) คำนวณได้จากผลรวมของข้อมูลในแต่ละตัวแปรหารด้วยจำนวนข้อมูลทั้งหมดในแต่ละตัวแปร ดังสมการที่ 2.2

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \tag{2.2}$$

เมื่อ x_i คือ ข้อมูลในแต่ละตัวแปร

n คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมดในแต่ละตัวแปร

ความแปรปรวน (Variance), S^2 คือ กำลังสองของค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ย ซึ่งคำนวณได้จากสมการ 2.3

$$S^2 = \frac{n\sum x_i^{\,2} - \left(\sum x_i\right)^2}{n(n-1)} \tag{2.3}$$

ความแปรปรวนร่วมของข้อมูลระหว่างคู่ใด ๆ, S_{xy} ของตัวแปร เช่น x_i และy_i คำนวณได้จากสมการ 2.4

$$S_{xy} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n-1} \tag{2.4}$$

และเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วม (Covariance Matrix), S เขียนได้เป็นดังสมการที่ 2.5

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_1^2 & s_{12} & \cdots & s_{1p} \\ s_{12} & s_2^2 & \cdots & s_{2p} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ s_{1p} & s_{2p} & \cdots & s_p^2 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

โดยที่ s_i^2 คือ ความแปรปรวนของตัวแปรที่ ith (i=1, 2, 3, ..., p)

s_{ij} คือ ความแปรปรวนร่วมระหว่างตัวแปรที่ ith และ jth

จากนั้นค่าไอเกนของเมทริกซ์ S ซึ่งได้แก่ l_1, l_2, l_3,..., l_p ซึ่งประกอบเป็นเมทริกซ์ L สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.6

$$|\mathbf{S} - \boldsymbol{\Pi}| = 0 \quad (2.6)$$

โดยที่ I คือ เมทริกซ์เอกลักษณ์

ส่วนไอเกนเวกเตอร์ u_i สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.7 และ2.8

$$[\mathbf{S} - \boldsymbol{\Pi}]\mathbf{t_i} = 0 \quad (2.7)$$

$$\mathbf{u}_i = \frac{\mathbf{t}_i}{\sqrt{\mathbf{t}_i'\mathbf{t}_i}} \quad (2.8)$$

โดยที่ i =1, 2, 3, ..., p

ไอเกนเวกเตอร์นี้จะประกอบเป็นเมทริกซ์ U ได้ดังนี้

$$\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1 \vdots \mathbf{u}_2 \vdots \cdots \vdots \mathbf{u}_p]$$

ตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์ตัวประกอบหลักสำหรับข้อมูลที่มี 2 ตัวแปร จะมี weight หรือ ตัวถ่วงน้ำหนักอยู่ 2 ค่า ในเวกเตอร์แรก (u_1) และในเวกเตอร์ที่ 2 (u_2) นั้นคือใน

ไอเกนเวกเตอร์แรก (u_1) ประกอบด้วย $\begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{21} \end{bmatrix}$ และในไอเกนเวกเตอร์ที่ (u_2) ประกอบด้วย $\begin{bmatrix} a_{12} \\ a_{22} \end{bmatrix}$ ส่วน Z-Scores คำนวณได้จากสมการที่ 2.9

$$\mathbf{Z}_i = \mathbf{u}_i'[\mathbf{x}_i - \bar{\mathbf{x}}] \qquad (2.9)$$

โดยตัวประกอบตัวแรก PC1 จะอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้มากที่สุด ส่วนตัวอย่างของรูปแบบทั่วไปของตัวประกอบหลัก PC_j เมื่อ j = 1, 2, ..., p และมีตัวแปรเป็น x_i ที่ i = 1, 2, 3, ..., n คือ $PC_j = a_{j1}x_1 + a_{j2}x_2 + ... + a_{jn}x_n$ โดยที่ a_{j1}, a_{j2}, ..., a_{jp} หมายถึง ค่าถ่วงน้ำหนัก (PC Weight)

ตัวอย่างการคำนวณ เมื่อมีค่าเฉลี่ยของ 2 ตัวแปรที่มีเมทริกซ์ $\bar{x}$ และเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วม S ดังนี้ (ข้อมูลดิบของค่าเฉลี่ย แสดงในภาคผนวก ข)

$$\bar{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10.00 \\ 10.00 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_1^{\,2} & s_{12} \\ s_{12} & s_2^{\,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.7986 & 0.6793 \\ 0.6793 & 0.7343 \end{bmatrix}$$

$$|\mathbf{S} - l\mathbf{I}| = \begin{vmatrix} 0.7986 - l & 0.6793 \\ 0.6793 & 0.7343 - l \end{vmatrix} = 0.124963 - 1.5329l + l^2 = 0$$

ดังนั้นเมื่อแก้สมการแล้วจะได้ l_1 = 1.4465 และ l_2 =0.0864 โดยที่ค่าไอเกนเวกเตอร์คำนวณได้จาก

$$[\mathbf{S} - l_1\mathbf{I}]\mathbf{t}_1 = \begin{bmatrix} 0.7986 - 1.4465 & 0.6793 \\ 0.6793 & 0.7343 - 1.4465 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{11} \\ t_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

ซึ่งจะต้องทำการตัดตัวแปรที่ไม่ทราบค่า 2 ตัว (t_{11} และ t_{21}) เพื่อแก้สมการนี้ โดยกำหนดให้ t_{11} = 1 และใช้สมการแรกหาตัวแปรที่เหลือจะได้

$$t_{21} = 0.9538 - 0.6478 + 0.6793t_{21} = 0$$

ดังนั้น $t_{21} = 0.9538$ (ที่ l_1 = 1.4465) โดยที่ค่าไอเกนเวกเตอร์ชุดที่หนึ่งจะได้

$$\mathbf{U}_1 = \frac{\mathbf{t}_1}{\sqrt{\mathbf{t}_1'\mathbf{t}_1}} = \frac{1}{\sqrt{1.9097}}\begin{bmatrix} 1.0 \\ 0.9538 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.7236 \\ 0.6902 \end{bmatrix}$$

จากนั้นทำการคำนวณเช่นเดียวกันแต่ใช้ค่า l_2 =0.0864 และให้ t_{22} = 1 แล้วคำนวณหาค่า t_{12} ก็จะได้ไอเกนเวกเตอร์ชุดที่สองเป็น

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} -0.6902 \\ 0.7230 \end{bmatrix}$$

ดังนั้นไอเกนเวกเตอร์หรือค่าถ่วงน้ำหนัก (PC Weight) สามารถเขียนเป็นเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\mathbf{U} = [u_1 : u_2] = \begin{bmatrix} 0.7236 & -0.6902 \\ 0.6902 & 0.7236 \end{bmatrix}$$

และสามารถคำนวณหา Z-Score ได้ดังนี้ ถ้าสมมติให้ข้อมูลชุดแรก $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} 10.00 \\ 10.7 \end{bmatrix}$ แล้ว

$$\mathbf{Z}_i = \mathbf{u}_1'[\mathbf{x}_i - \bar{\mathbf{x}}] = \begin{bmatrix} 0.7236 & 0.6902 \\ -0.6902 & 0.7236 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 10.00 - 10 \\ 10.7 - 10 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.48 \\ 0.51 \end{bmatrix}$$

ดังนั้นค่า Z-Score ของตัวแปรแรกคือ Z_1 = 0.48 และ Z_2 = 0.51 และค่าความแปรปรวนของ $Z_1 = l_1$ = 1.4465 ส่วนค่าความแปรปรวนของ $Z_2 = l_2$ = 0.0864

2.1.6.2 ประเภทของเมทริกซ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ส่วนประกอบหลัก

2.1.6.2.1 เมทริกซ์แบบใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วม (Covariance Method)

เป็นเทคนิคที่ใช้ในการควบคุมหรือขจัดผลของตัวแปรเกินตั้งแต่ 1 ตัวขึ้นไป โดยการเลือกคำนวณจำนวนส่วนประกอบหลักโดยใช้เมทริกซ์ Covariance เมื่อไม่ต้องการเปลี่ยนแปลงค่ามาตรฐาน ซึ่งข้อมูลที่จะทำการวิเคราะห์นั้นจะต้องมีค่าไม่แตกต่างกันมาก

2.1.6.2.2 เมทริกซ์แบบใช้การวิเคราะห์หาสหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร (Correlation Method)

เป็นการศึกษาหาความสัมพันธ์ของตัวแปร และทิศทางของความสัมพันธ์ของตัวแปรนั้น ซึ่งหาได้โดยการคำนวณค่าสัมประสิทธ์สหสัมพันธ์โดยการเลือกคำนวณจำนวนส่วนประกอบหลักโดยใช้เมทริกซ์ Correlation เมื่อต้องการเปลี่ยนแปลงค่ามาตรฐาน และถ้าเลือกวิธีการคำนวณด้วยวิธีนี้ ข้อมูลที่ถูกวัดจะมีค่าความแปรปรวนโดยค่าความแตกต่างของสเกล

2.1.6.3 ตัวอย่างการคำนวณด้วยวิธี PCA

หลังจากวิเคราะห์ส่วนประกอบหลักด้วยวิธี PCA โดยใช้โปรแกรม Minitab จะสามารถหาค่า Scores ของแถบสีตัวอย่างในแต่ละส่วนประกอบหลัก และค่าน้ำหนักของแต่ละส่วนประกอบหลัก (PC Weight / Coefficients) โดยที่ค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของชุดข้อมูลสี Training Set นั้นเกิดจากผลคูณของตัวแปรทั้งสอง [11] ดังแสดงในสมการที่ 2.10

$$[R_r]_{O\times V} = [S_r]_{O\times C} \cdot [PC_Weight]_{C\times V} \qquad (2.10)$$

โดยที่ $[R_r]_{O\times V}$ คือ ค่าการะสะท้อนแสงของชุดข้อมูลสี Training Set

$[S_r]_{O\times C}$ คือ ค่าคะแนนของแต่ละส่วนประกอบหลัก ซึ่งเป็นการเก็บรวบรวมข้อมูลในแนว Column สำหรับคะแนนที่ใช้ในแต่ละส่วนประกอบหลัก และเป็นการจัดกลุ่มข้อมูลแบบสมการเชิงเส้นโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้ โดยที่จำนวนของ Column จะถูกกำหนดให้มีจำนวนน้อยกว่าหรือเท่ากับจำนวนของส่วนประกอบหลักที่ถูกคำนวณ

$[PC_Weight]_{C\times V}$ คือ ค่านำหนักของแต่ละส่วนประกอบหลัก ซึ่งเป็นการเก็บรวบรวมข้อมูลในแนว Column สำหรับค่าสัมประสิทธ์ในแต่ละส่วนประกอบหลัก โดยที่จำนวนของ Column จะถูกกำหนดให้มีจำนวนน้อยกว่าหรือเท่ากับจำนวนของส่วนประกอบหลักที่ถูกคำนวณ

O (Observation) คือ จำนวนสีของชุดข้อมูลสี Training Set ทั้งหมด 176 สี

V (Variable) คือ จำนวนค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของแต่ละสี (ในการทดลองนี้ จำนวนค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมเท่ากับ 31 ค่า ของช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 400-700 นาโนเมตร ที่ทุก 10 นาโนเมตร

C (Component) คือ จำนวนส่วนประกอบหลัก (ในตัวอย่างการคำนวณนี้ คือ 6 ส่วนประกอบ)

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธี PCA แบบวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วม (Covariance) ในการวิเคราะห์ส่วนประกอบหลักของค่าการสะท้อนแสงที่ได้จากการวัดของชุดข้อมูลสี Training Set เพื่อใช้หาจำนวนแผ่นกรองแสงที่เหมาะสมในการนำไปใช้ประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัม ดังตัวอย่างที่แสดงในตารางที่ 2.1 และ 2.2

ตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างค่า Score ที่ได้จากการทำ PCA

	Example of Scores					
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
1	-3.642092	-0.323088	0.9867447	0.4277757	0.0558526	0.0614677
2	-3.529628	-0.721717	0.85508	-0.02038	0.2494886	0.051381
3	-2.818031	-1.236692	0.1243723	-0.077403	-0.07618	0.1677764
4	-2.20347	-1.185575	-0.195236	0.0564828	-0.150035	0.1996601
5	-2.105646	-1.333783	-0.47857	0.4968026	-0.058438	-0.00378
6	-1.99895	-1.218461	-0.53587	0.5980487	0.0686414	-0.00492
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
171	-0.931925	0.9063556	0.2444106	0.5065943	-0.088596	0.0011187
172	-0.859611	1.0519448	-0.25058	0.3239769	-0.20433	0.1340133
173	-1.553914	1.532117	-0.43537	0.3933787	-0.196951	0.1765111
174	-1.13097	1.2635391	-0.406906	0.3405726	-0.219106	0.17986
175	-0.760269	0.90754	-0.39747	0.2133638	-0.194372	0.1644415
176	-4.672017	1.3803948	-0.570873	0.0092275	-0.02881	-0.078904

ตารางที่ 2.2 แสดงตัวอย่างค่า PC_Weight ที่ได้จากการทำ PCA

	PC Weight / Eigen Vector / Coefficients					
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
400	-0.103835	0.134621	-0.20598	-0.177112	0.1355984	-0.296387
410	-0.104433	0.1460604	-0.225921	-0.170304	0.146819	-0.273652
420	-0.102971	0.1583796	-0.242353	-0.156004	0.1556233	-0.199916
430	-0.101525	0.1719878	-0.250606	-0.139485	0.1321163	-0.11391
440	-0.100135	0.1857468	-0.248608	-0.119217	0.0734063	-0.016137
450	-0.099588	0.1974433	-0.237667	-0.097477	0.0057808	0.0615059
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
650	-0.236051	-0.196487	-0.065727	0.1101762	-0.09463	-0.212356
660	-0.236337	-0.195736	-0.090783	0.1228282	-0.006918	-0.129437
670	-0.236065	-0.191468	-0.112602	0.1342038	0.094608	-0.013307
680	-0.235333	-0.185846	-0.128776	0.1454683	0.1910766	0.1209218
690	-0.233114	-0.178685	-0.140791	0.1577444	0.2734896	0.2717066
700	-0.229746	-0.168858	-0.149381	0.1753335	0.3166456	0.430402

2.1.7 Wiener Estimation

ในขั้นตอนของการทำงานวิจัยนั้น ได้มีการนำหลักการ Wiener Estimation มาใช้เป็นวิธีหนึ่งในการประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของวัตถุ (O_{est}) ซึ่งสามารถประมาณได้จากสมการที่ 2.11 [12]

$$O_{est} = GV \tag{2.11}$$

โดยที่ V คือ เวกเตอร์ของการตอบสนองของกล้อง (การหาค่า V แสดงในหัวข้อที่ 2.1.4)

G คือ เมทริกซ์ที่ทำให้ค่ากำลังสองของความแตกต่าง (square error (ε)) ระหว่างค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของต้นฉบับ (O_{real}) กับค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมที่ได้จากการประมาณ (O_{est}) มีค่าน้อยที่สุดดังสมการที่ 2.12

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\varepsilon = \langle (O_{real} - O_{est})^t (O_{real} - O_{est}) \rangle \quad (2.12)$$

โดยที่ $\langle\ \rangle$ คือ ค่าเฉลี่ยทั้งหมด

ดังนั้น G ได้จากสมการที่ 2.13

$$G = R_{ov} \cdot R_{vv}^{-1} \quad (2.13)$$

โดยที่ R_{ov} และ R_{vv} คือ เมทริกซ์สัมพันธ์ ดังสมการที่ 2.14 และ 2.15

$$R_{ov} = (O_{real} V^t) \quad (2.14)$$

$$R_{vv} = (V V^t) \quad (2.15)$$

โดยที่ V คำนวณได้จากสมการที่ 2.1

2.1.8 **ค่าสีไตรสติมูลัส** (Tristimulus values)

ในการวัดค่าสีทั่วไปโดยการใช้อุปกรณ์วัดค่าสีนั้น เราต้องใช้มาตรฐานสากลที่นิยมใช้กันทั่วโลก คือ ระบบวัดค่าสีมาตรฐาน CIE ซึ่งเป็นระบบที่ใช้อ้างอิงถึงปัจจัยในการมองเห็นสี ซึ่งได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว

ค่าสีไตรสติมูลัส หรือ ค่าตัวกระตุ้นทั้งสาม ซึ่งเป็นค่าสีในระบบการวัดสีซีไออี ซึ่งเป็นการหาตัวเลขแทนองค์ประกอบสำคัญทั้งสามองค์ประกอบในกระบวนการรับรู้สีของมนุษย์ โดยเราสามารถคำนวณได้จากสมการหาความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้ [7]

$$\begin{aligned} X &= k \int_{400}^{700} S(\lambda).R(\lambda).\bar{x}_{10}(\lambda)d\lambda \\ Y &= k \int_{400}^{700} S(\lambda).R(\lambda).\bar{y}_{10}(\lambda)d\lambda \\ Z &= k \int_{400}^{700} S(\lambda).R(\lambda).\bar{z}_{10}(\lambda)d\lambda \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$k = \frac{100}{\int_{400}^{700} S(\lambda).\bar{y}_{10}(\lambda)d\lambda} \qquad (2.17)$$

โดยที่ X Y Z คือ ค่าไตรสติมูลัสของสีใด ๆ

$S(\lambda)$ คือ ค่าการกระจายพลังงานในทุก ๆ ความยาวคลื่นใด ๆ

$R(\lambda)$ คือ ค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมสัมพัทธ์ในทุก ๆ ความยาวคลื่นใด ๆ

$\bar{x}_{10}(\lambda)\bar{y}_{10}(\lambda)\bar{z}_{10}(\lambda)$ คือ ฟังก์ชันการเทียบปรับสีของผู้สังเกตการณ์มาตรฐานซีไออี 10

k คือ ค่าคงที่ เพื่อปรับให้ค่าไตรสติมูลัส Y ของสีของวัตถุใด ๆ มีค่าเท่ากับค่าไตรสติมูลัส Y ของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงให้มีค่าสูงสุดเท่ากับ 100

$d\lambda$ คือ ช่วงความยาวคลื่น

ถ้าสี 2 สีใด ๆ มีค่าไตรสติมูลัส X1 = X2, Y1 = Y2 และ Z1 = Z2 แล้วสี 2 สีนั้นจะเหมือนกันเมื่อมองดูภายใต้แหล่งกำเนิดแสงมาตรฐานที่กำหนด แม้ว่ากราฟการสะท้อนแสงของ 2 สีนั้นจะแตกต่างกันก็ตาม

2.1.9 การแปลงค่าสีไตรสติมูลัส XYZ เป็นค่าสี $(RGB)_{sRGB}$ / $(RGB)_{8bit}$

เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสี $(RGB)_{8bit}$ กับค่าสีมาตรฐาน CIEXYZ หรือค่าสีไตรสติมูลัส [13] ซึ่งสามารถทำได้ดังนี้

2.1.9.1 การหาค่าสัญญาณแสงสี $(RGB)_{sRGB}$ สามารถคำนวณได้จากการนำค่าสัมประสิทธิ์ของ XYZ และค่าสี XYZ ในสมการเชิงเส้น (linear Equation) มาทำการคำนวณในแบบเมทริกซ์ (Matrix Transform) ดังสมการที่ 2.18 โดยที่ค่าสี XYZ ที่ใช้ในสมการจะต้องเป็นค่าสีที่มีการ Normalize ค่าแล้วด้วยการหาร 100 แล้ว

$$\begin{bmatrix} R_{sRGB} \\ G_{sRGB} \\ B_{sRGB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.2410 & -1.5374 & -0.4986 \\ -0.9692 & 1.8760 & 0.0416 \\ 0.0556 & -0.2040 & 1.0570 \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \qquad (2.18)$$

ดังนั้นในกระบวนการแปลงค่าสัญญาณแสงสี $(RGB)_{sRGB}$ ที่ได้ถ้ามีค่าเป็นลบหรือมากกว่า 1 ก็จะถูกจำกัดค่าให้อยู่ในรูปของจำนวนเต็มและทศนิยม ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งเป็นค่าตัวเลขที่มีการ Normalize ค่าเรียบร้อยแล้ว

2.1.9.2 จากนั้นทำการเปลี่ยนรูปสัญญาณแสงสี $(RGB)_{sRGB}$ เป็นค่าสัญญาณแสงสี $(R'G'B')_{sRGB}$ ด้วย Nonlinear Equation ดังสมการที่ 2.19 และ 2.20 ตามลำดับ ซึ่งเป็นการแปลงค่าสีมาตรฐานไม่ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ (Device Independence, $(RGB)_{sRGB}$) ให้เป็นค่าสีที่ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ (Device Dependence, $(R'G'B')_{sRGB}$) ด้วยค่าโพรไฟล์และค่าแกมม่าของจอภาพ

$$
\begin{aligned}
&R_{sRGB}, G_{sRGB}, B_{sRGB} \le 0.00304 \\
&R'_{sRGB} = 12.92 \times R_{sRGB} \\
&G'_{sRGB} = 12.92 \times G_{sRGB} \\
&B'_{sRGB} = 12.92 \times B_{sRGB}
\end{aligned}
\qquad (2.19)
$$

$$
\begin{aligned}
&R_{sRGB}, G_{sRGB}, B_{sRGB} \rangle 0.00304 \\
&R'_{sRGB} = 1.055 \times R_{sRGB}^{(1.0/2.4)} - 0.055 \\
&G'_{sRGB} = 1.055 \times G_{sRGB}^{(1.0/2.4)} - 0.055 \\
&B'_{sRGB} = 1.055 \times B_{sRGB}^{(1.0/2.4)} - 0.055
\end{aligned}
\qquad (2.20)
$$

2.1.9.3 ทำการแปลงค่าสี $(R'G'B')_{sRGB}$ ที่ได้ไปเป็นค่าสี $(RGB)_{8bit}$ ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 255 เพื่อใช้ในการแสดงค่าสีของภาพในแต่ละสีที่ 8 บิต (หรือมีค่าเท่ากับ 24 บิตที่ใช้แสดงแสดงระดับเฉดสีของภาพในแต่ละพิกเซลบนจอภาพ) ซึ่งเป็นค่าตัวเลขในทางดิจิทัลดังสมการที่ 2.21

โดยที่กำหนดให้ ค่า WDC หมายถึง จำนวนนับตัวเลขดิจิทัลที่จุดขาวสุด

ค่า KDC หมายถึง จำนวนนับตัวเลขดิจิทัลที่จุดดำสุด

$$
\begin{aligned}
R_{8bit} &= ((WDC - KDC) \times R'_{sRGB}) + KDC \\
G_{8bit} &= ((WDC - KDC) \times G'_{sRGB}) + KDC \\
B_{8bit} &= ((WDC - KDC) \times B'_{sRGB}) + KDC
\end{aligned}
\qquad (2.21)
$$

ในปัจจุบันนิยมเจาะจงใช้ค่า WDC มีค่าเท่ากับ 255 และ KDC มีค่าเท่ากับ 0 เพื่อใช้ในการเปลี่ยนค่าสี $(R'G'B')_{sRGB}$ ให้สามารถแสดงค่าสีของแต่ละสีที่ 8 บิตได้เป็นผลให้ค่าสี $(RGB)_{8bit}$ ที่ได้สามารถแสดงได้ในสมการที่ 2.22

$$\begin{aligned} R_{8bit} &= ((255.0 - 0.0) \times R'_{sRGB}) + 0.0 \\ G_{8bit} &= ((255.0 - 0.0) \times G'_{sRGB}) + 0.0 \\ B_{8bit} &= ((255.0 - 0.0) \times B'_{sRGB}) + 0.0 \end{aligned} \tag{2.22}$$

ซึ่งสามารถแสดงให้เข้าใจได้ง่ายดังสมการที่ 2.23

$$\begin{aligned} R_{8bit} &= 255.0 \times R'_{sRGB} \\ G_{8bit} &= 255.0 \times G'_{sRGB} \\ B_{8bit} &= 255.0 \times B'_{sRGB} \end{aligned} \tag{2.23}$$

และสุดท้ายทำการปัดเศษค่าสี $(RGB)_{8bit}$ ที่ได้เป็นเลขจำนวนนับตั้งแต่ 0 ถึง 255 เพื่อใช้แสดงสีของภาพบนจอภาพในแต่ละพิกเซลของแต่ละสี RGB

2.1.10 **จอภาพซีอาร์ที** (CRT Displays)

เป็นอุปกรณ์ทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (Opto-Electronics) ชนิดหนึ่งที่ทำหน้าที่แสดงข้อมูลที่เป็นภาพนิ่ง ภาพเคลื่อนไหว ตัวอักษร สัญลักษณ์ กล่าวคือเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณข้อมูลชนิดไฟฟ้า (Electrical Signal) ให้เป็นสัญญาณข้อมูลชนิดแสง (Light Signal) ที่มนุษย์สามารถมองเห็นได้ด้วยตา โดยทั่วไปจอภาพจะแสดงผลสัญญาณข้อมูลชนิดแสงให้เห็นเป็นรูปร่างแบบ 2 มิติ ซึ่งอาจแสดงผลแบบดิจิทัล กราฟิก หรือตัวอักษร และชนิดพิเศษบางชนิด เช่น ฮอโลกราฟี สามารถแสดงข้อมูลให้เห็นเป็นรูปร่างแบบ 3 มิติ

จอภาพเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแสดงข้อมูลที่มนุษย์จับต้องไม่ได้ (Softcopy Output Device) ในลักษณะของข้อความและรูปภาพ โดยเป็นการแสดงผลให้ผู้ใช้ทราบในขณะนั้น แต่เมื่อเลิกทำงานหรือเลิกใช้แล้วผลนั้นก็จะหายไป แต่ถ้าต้องการเก็บผลลัพธ์นั้น ก็สามารถส่งถ่ายไปเก็บในรูปของข้อมูลสำรองในหน่วยเก็บข้อมูลสำรอง (Secondary Storage) ได้ [14]

จอภาพแบ่งออกได้ 2 ชนิดตามลักษณะความสามารถในการเปล่งแสง คือ

- จอภาพชนิดแอกทิฟ หรือจอภาพชนิดเปล่งแสงได้ด้วยตัวเอง (Active หรือ Emissive Display) เช่น หลอดแคโทด (Cathode Ray Tube: CRT) ไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode: LED) อิเล็กโทรลูมิเนสเซนซ์ (Electroluminescence: EL) เป็นต้น

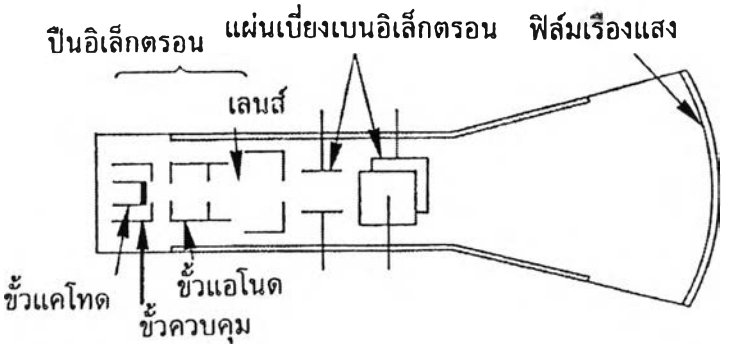
- จอภาพชนิดแพสซิฟ หรือจอภาพชนิดเปล่งแสงด้วยตัวเองไม่ได้ (Passive หรือ Non-Emissive Display) เช่น จอภาพชนิดผลึกเหลว (Liquid Crystal Display: LCD) จอภาพชนิดอิเล็กโทรเคมีคัล (Electro-Chemical Display: ECD) เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้จอภาพชนิดแอกทีฟ หรือที่เราเรียกกันโดยทั่วไปว่า จอภาพชนิดซีอาร์ที มาเป็นอุปกรณ์ตัวกลางในการทดสอบการเปรียบเทียบสีระหว่างภาพต้นฉบับกับภาพที่ถูกแสดงผลออก ดังนั้นถ้าจะกล่าวถึงจอภาพชนิดซีอาร์ที หรือ หลอดรังสีแคโทด (Cathode Ray Tube นิยมย่อว่า CRT) ถูกประดิษฐ์เป็นครั้งแรกใน ค.ศ. 1897 โดย F.Braun (บางครั้งจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Braun Tube) จอภาพชนิดซีอาร์ทีเป็นจอภาพที่เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณข้อมูลแสง ในอดีตถูกนำไปใช้เป็นจอภาพแสดงข้อมูลผลการวัดต่างๆ ต่อมาใช้ในจอเรดาร์และเป็นหลอดภาพรับสัญญาณโทรทัศน์ และในปัจจุบันก็ใช้กันอย่างกว้างขวางเป็นจอแสดงผลของคอมพิวเตอร์ ปัจจุบันจอภาพชนิดซีอาร์ทีถือได้ว่าเป็นจอภาพที่ใช้กันมากที่สุดและมียอดจำหน่ายสูงสุด สามารถให้ภาพที่สว่าง มีหลายสี มีความเปรียบต่าง ให้ภาพคมชัด มีความทนทาน จอภาพชนิดซีอาร์ทีแบบมีสีในยุคแรกๆมีความสว่างเพียง 2 fL แต่หลังจากที่มีการปรับปรุงคุณภาพทั้งด้านวัสดุเปล่งแสง ด้านวิธีการผลิตและโครงสร้างภายในต่างๆแล้ว ปัจจุบัน CRT มีความสว่างที่ดีมากเฉลี่ยเกินกว่า 100 fL

2.1.10.1 หลักการทำงานของ CRT

ในภาพที่ 2.3 แสดงโครงสร้างโดยทั่วไปของจอภาพซีอาร์ที ซึ่งเป็นหลอดสุญญากาศ มีขั้วแคโทดเป็นตัวให้กำเนิดลำอิเล็กตรอน (Electron Beam) ลำอิเล็กตรอนนี้จะวิ่งผ่านเลนส์ซึ่งจะเบนบังคับให้ลำอิเล็กตรอนกลายเป็นเส้นคมและวิ่งผ่านขั้วไฟฟ้าไปตกกระทบจอเรืองแสง ทำให้จอเรืองแสงสว่างขึ้นมา

อุปกรณ์ขั้วแคโทดและเลนส์มีชื่อเรียกรวมว่า ปืนอิเล็กตรอน (Electron Gun) ขั้วไฟฟ้าที่ใช้บังคับทิศทางการวิ่งของอิเล็กตรอนเรียกว่า แผ่นเบี่ยงแบน (Deflection Plate) หรือ ขั้วไฟฟ้าเบี่ยงแบน (Deflection Electrode) มีลักษณะเป็นขั้วไฟฟ้าแบบขนาน 2 คู่ โดยแต่ละคู่ถูกจัดให้วางตั้งฉากซึ่งกันและกัน เราสามารถบังคับให้อิเล็กตรอนวิ่งไปตกกระทบจอเรืองแสง ณ ตำแหน่งที่ต้องการได้ โดยการป้อนสนามไฟฟ้าที่เหมาะสมให้กับแผ่นเบี่ยงแบนเหล่านี้



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างโดยทั่วไปของจอภาพซีอาร์ที [14]

ลักษณะโครงสร้างของปืนอิเล็กตรอนที่แสดงในภาพ 2.5 จะมีอยู่ 2 ชนิด คือ แบบเบนลำอิเล็กตรอนด้วยสนามไฟฟ้า (Electrostatic Deflection) เป็นการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าของขั้วต่างๆ ทำให้สามารถควบคุมตำแหน่งของจุดโฟกัส และความหนาแน่นของลำอิเล็กตรอนได้ และแบบเบนลำอิเล็กตรอนด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Deflection) โดยที่รอบๆหลอดสุญญากาศจะมีขดลวดไฟฟ้าพันอยู่ การเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดจะทำให้สามารถควบคุมสนามแม่เหล็กและควบคุมลำอิเล็กตรอนได้

อย่างไรก็ตาม สิ่งที่ต้องระวังคือ อนุภาคที่ถูกยิงออกมาจากขั้วแคโทดนั้นไม่ได้มีแต่อิเล็กตรอนชนิดเดียว แต่จะมีไอออนประจุลบรวมอยู่ด้วย แต่เนื่องจากไอออนลบเหล่านั้นมีมวลมาก จึงมักจะวิ่งตรงโดยไม่มีการเบี่ยงเบน ทำให้ไอออนลบวิ่งไปชนใจกลางจอเรืองแสงตลอดเวลา ทำให้จอเรืองแสงเสียหาย เราเรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า การเกิดการไหม้ด้วยไอออน (Ion Burn) วิธีการป้องกันไม่ให้เกิดการไหม้ด้วยไอออน คือ จะต้องมีอุปกรณ์จับไอออนลบ (Ion Trap) ไม่ให้หลุดออกไปจากปืนอิเล็กตรอน วิธีการจับไอออนลบมี 2 วิธีคือ การออกแบบปืนอิเล็กตรอนให้เป็นแบบเอียง (Tilted) และแบบโค้ง (Bent) ในการใช้งานซีอาร์ทีที่ความถี่สูง ขั้วไฟฟ้าเบี่ยงเบนชนิดสนามไฟฟ้าสามารถทำงานที่ความถี่สูงได้ดีกว่าขั้วไฟฟ้าชนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งทำงานได้ที่ความถี่เพียงระดับ 10 กิโลเฮิรตซ์

2.1.10.2 ส่วนประกอบของหลอดภาพซีอาร์ที

โดยทั่วไปการเบี่ยงเบนของลำอิเล็กตรอนจะใช้วิธีสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะใช้ปืนอิเล็กตรอนชนิดเบนลำอิเล็กตรอนด้วยสนามแม่เหล็กด้วยเช่นกัน ในการทำให้ภาพบนจอภาพสว่างมากขึ้น จะต้องเพิ่มความเร่งของลำอิเล็กตรอนให้สูงขึ้น แต่ถ้าความเร่งของอิเล็กตรอนสูงมากเกินไปจะทำให้มีประจุอิเล็กตรอนตกค้างอยู่บนผิววัสดุเรืองแสงและในที่สุดประจุค้างเหล่านี้จะคอยผลัก

ดันกีดขวางไม่ให้อิเล็กตรอนมาตกกระทบผิวจอเรืองแสงอีกต่อไป ส่งผลทำให้ความสว่างของจอภาพเกิดการอิ่มตัวไม่สว่างตามต้องการ

ในทางปฏิบัติจริง ปืนยิงลำอิเล็กตรอนของจอภาพสีมักจะมี 3 ชุด โดยแต่ละชุดจะยิงไปสู่วัสดุเรืองแสงที่เปล่งแสงสีต่างกัน 3 สี ซึ่งได้แก่ สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ให้เปล่งแสงออกมา โดยวัสดุเรืองแสงที่เคลือบอยู่บนจอซีอาร์ทีจะมีจำนวนนับล้านจุด ลำอิเล็กตรอนจะถูกสแกนให้วิ่งไปที่จอจากมุมซ้ายด้านบนไปทางขวา และลดระดับต่ำลงตามลำดับ จนสุดขอบล่างของจอซีอาร์ทีด้วยความเร็วประมาณ 60 รอบต่อวินาที

ขนาดของจอซีอาร์ทีในปัจจุบันมีตั้งแต่ 1 นิ้ว ไปจนถึงประมาณ 40 นิ้ว และถ้าเป็นระบบโปรเจกเตอร์ (projector) ก็มีขนาดถึงกว่า 200 นิ้ว ในปัจจุบันจอภาพซีอาร์ทีได้มีการผลิตและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยพิจารณาจากความต้องการของการใช้งานเป็นหลัก ซึ่งอาจแบ่งชนิดของจอภาพชนิดซีอาร์ทีได้อีกตามลักษณะของปืนอิเล็กตรอนและชาโดว์มาสก์ ซึ่งขณะนี้ได้มีการพัฒนาซีอาร์ทีแบบรุ่นแบน (Flat CRT) ด้วย และยังมีการพัฒนาซีอาร์ทีชนิดอินเดกซ์ (Index CRT) ซึ่งไม่ใช้ชาโดว์มาสก์ ต่อไปจะอธิบายรายละเอียดของส่วนต่างๆของซีอาร์ทีที่ใช้งานในปัจจุบัน

2.1.10.2.1 ขั้วแคโทด (Cathode)

ขั้วแคโทดเป็นส่วนหนึ่งของปืนอิเล็กตรอนและทำหน้าที่เป็นต้นกำเนิดยิงอิเล็กตรอน จากความต้องการให้ซีอาร์ทีมีความสว่างสูงและมีความคมชัดสูง จึงจำเป็นต้องพัฒนาให้ขั้วแคโทดสามารถกำเนิดอิเล็กตรอนได้ความเข้มสูงและสามารถยิงเป็นลำเล็กได้ดี โดยขั้วแคโทดจะประกอบด้วยส่วนที่เป็นแผ่นฐาน ซึ่งผลิตจาก Ni ผสมด้วย Mg หรือ Si และมีชั้นยิงอิเล็กตรอนเคลือบอยู่ ที่ผลิตจากออกไซด์ ของ Ba, Sr, Ca เมื่อขั้วแคโทดถูกทำให้ร้อนจนมีอุณหภูมิสูงประมาณ 800 องศาเซลเซียล จะทำให้ Ba ถูกทำปฏิกิริยารีดักชัน และ Ba จะลอยขึ้นมาที่ผิวของแคโทดและทำให้เกิดการยิงอิเล็กตรอนออกมา อย่างไรก็ตามข้อเสียของขั้วแคโทดชนิดนี้คือ จะมีการสูญเสียวัสดุ Ba ซึ่งระเหิดเป็นก๊าซไปและมีการเสื่อมคุณภาพของขั้วแคโทด

2.1.10.2.2 การเบนลำอิเล็กตรอน

เมื่อกำเนิดอิเล็กตรอนได้แล้ว ในขั้นต่อไปต้องเร่งและบังคับให้อิเล็กตรอนวิ่งแบบสแกนไปบนจอเรืองแสง

2.1.10.2.3 ชาโดว์มาสก์ (Shadow Mask)

ในจอภาพชนิดซีอาร์ทีชนิดสีจะมีลักษณะพิเศษอย่างหนึ่งที่แตกต่างไปจากจอภาพซีที่มีรูเพียงรูเดียว ต่อจากนั้นอิเล็กตรอนแต่ละเส้นจะวิ่งไปชนวัสดุเรืองแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินที่ฉาบบนจอ ลักษณะรูของชาโดว์มาสก์ มี 2 ชนิดคือ ชนิดรูกลมและชนิดรูยาวในการที่จะ

ได้ภาพคมชัดและจอภาพใหญ่นั้น ชาโดว์มาสก์จะต้องมีขนาดของรูและระยะห่างของรู (Pitch) ที่เที่ยงตรงและมีความเรียบสม่ำเสมอ โดยทั่วไประยะห่างของรูมีค่าประมาณ 1.0-0.2 มิลลิเมตร แผ่นชาโดว์มาสก์ทำด้วยแผ่นโลหะเหล็ก (Fe) หนาประมาณ 1.5 มิลลิเมตร มีการออกแบบให้ทนต่อความร้อนและไม่บิดเบี้ยว มีการเคลือบด้วยวัสดุที่ระบายความร้อนได้ดี เช่น Bi_2O_3

2.1.10.2.4 วัสดุเรืองแสง (Phosphor)

ผิวด้านในของจอภาพซนิดซีอาร์ทีมีวัสดุเรืองแสง (Phosphor) เคลือบอยู่เป็นจุดๆ และระหว่างจุดแต่ละจุดนั้นมีวัสดุฟิล์มบางสีดำเคลือบไว้เพื่อดูดกลืนแสงจากภายนอก โดยจุดเปล่งแสงมีลักษณะวงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 80 μm หนา 10 μm ระยะห่างของแต่ละจุด (Pitch) ประมาณ 210 μm ผลิตจากผงของวัสดุเรืองแสงที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 4-10 μm เมื่อยิงอิเล็กตรอนด้วยแรงดันไฟฟ้าประมาณ 30 μm เข้าที่ผิวของวัสดุเรืองแสง จะทำให้วัสดุเรืองแสงถูกกระตุ้นและเปล่งแสงออกมา ตามปกติวัสดุเรืองแสงมีสมบัติเป็นฉนวน ดังนั้นเพื่อป้องกันมิให้อิเล็กตรอนค้างอยู่บนผิว จึงมีการใช้อะลูมิเนียม (Al) ที่ฉาบไว้บนผิววัสดุเรืองแสงอีกชั้นหนึ่ง นอกจากนี้ฟิล์มบาง Al นี้ยังช่วยสะท้อนแสงที่ออกมาจากวัสดุเรืองแสงด้วยจึงทำให้ความสว่างของจอภาพซนิดซีอาร์ทีดีขึ้นด้วย

2.1.10.2.5 จอกระจก (Face Plat)

การยิงอิเล็กตรอนเข้าสู่จอเรืองแสงนอกจากจะทำให้วัสดุเรืองแสงเปล่งแสงแล้ว ยังทำให้มีการเปล่งรังสีเอกซ์ออกมาได้ด้วยเล็กน้อย ตัวอย่างวิธีป้องกันได้แก่ วิธีการผสมตะกั่ว (Pb) หรือสตรอนเซียม (Sr) เข้าไปในจอกระจก (Face Plat) ด้วยเพื่อให้ดูดกลืนรังสีเอกซ์ นอกจากนี้ยังมีการออกแบบให้มีความเปรียบต่างดีและป้องกันการสะท้อนแสงจากด้านหน้าด้วยการเคลือบวัสดุกันการสะท้อนแสงไว้ที่ผิวของจอกระจกอีกหลายๆชั้น หรือมีการเติมวัสดุสีดำเข้าสู่กระจกเพื่อลดการสะท้อนแสง

2.1.10.2.6 จอภาพซนิดซีอาร์ทีแบบขาวดำ

ในจอภาพซนิดซีอาร์ทีแบบขาวดำจะไม่มีชาโดว์มาสก์ เพราะฉะนั้นความคมชัดของภาพจึงขึ้นอยู่กับคุณภาพของการโฟกัสของลำอิเล็กตรอนเป็นหลัก เช่น ในกรณีจอภาพมีขนาด15 นิ้ว จะมีขนาดจุดโฟกัส 0.25 มิลลิเมตร ขนาดจอ 270x 200 ตารางมิลลิเมตร จำนวนจุดภาพ (Pixels) ประมาณ 135 จุด x 1,000 จุด สำหรับในสำนักงานมักใช้จอภาพซีอาร์ทีแบบซนิดสีเขียวและสีขาวนั้น เพื่อลดความเหนื่อยล้าของสายตาและมักจะออกแบบให้ซีอาร์ทีเปล่งแสงสีขาวอมเหลืองแทนสีขาวสด

2.1.10.2.7 จอภาพชนิดซีอาร์ทีแบบสี

ในปัจจุบันมีจอภาพชนิดซีอาร์ทีตั้งแต่ขนาด 14 นิ้ว ไปจนถึง 40 นิ้ว ซีอาร์ทีชนิดที่ใช้ในสำนักงานรุ่นที่มีความคมชัดสูงมีระยะห่างจากจุดกำเนิดอิเล็กตรอนถึงจุดภาพสั้นถึง 0.3-0.15 มิลลิเมตร มีการออกแบบให้ประหยัดไฟฟ้า ราคาถูก และคมชัด

2.1.10.2.8 จอภาพชนิดซีอาร์ทีแบบไทรนิทรอน (Trinitron CRT)

เป็นระบบที่มีลักษณะพิเศษน่าสนใจชนิดหนึ่ง กล่าวคือ ชาโดว์มาสก์มีลักษณะเป็นช่องยาวในแนวตั้ง (Slit) และวัสดุเรืองแสงที่เคลือบด้านในของจอก็มีรูปเป็นแบบเส้นยาวในแนวตั้งด้วย ลักษณะเด่นของระบบนี้คือ มีโฟกัสของลำอิเล็กตรอนที่ดีมาก ถูกรบกวนด้วยสนามแม่เหล็กโลกน้อย ทำให้ได้ภาพคมชัดดี

2.1.10.2.9 จอภาพชนิดซีอาร์ทีแบบโปรเจกเตอร์ (Projector CRT)

เป็นจอภาพขนาดใหญ่กว่า 40 นิ้ว โดยสัญญาณภาพที่ถูกเปล่งออกมานั้นจะถูกขยายด้วยเลนส์ให้ไปตกกระทบบนจอภาพคล้ายกับการฉายภาพยนตร์ ซึ่งจะต้องใช้ซีอาร์ทีทั้งหมด 3 ชุดในแต่ละสี และสัญญาณสี RGB จะไปรวมผสมสีกันเองบนจอภาพ ถ้าพิจารณาจากทิศทางการให้แสงจะสามารถแบ่งโปรเจกเตอร์ออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ชนิดให้แสงด้านหลัง และชนิดให้แสงทางด้านหน้าของจอภาพ

2.1.10.2.10 จอภาพชนิดซีอาร์ทีแบบบีมอินเดกซ์ (Beam Index CRT)

โดยปกติจอภาพจะมีชาโดว์มาสก์ ทำหน้าที่เป็นช่องให้อิเล็กตรอนวิ่งไปกระตุ้นจุดเปล่งแสงได้ถูกต้อง แต่สำหรับจอภาพชนิดนี้จะมีอุปกรณ์ที่อาศัยอิเล็กตรอนชุดที่สอง หรือแสงอัลตราไวโอเลตที่ถูกเปล่งออกมาทางด้านหลังของจอเรืองแสงเป็นสัญญาณป้อนกลับให้ไปควบคุมวงจรอิเล็กตรอนให้ยิงไปสู่ตำแหน่งที่ถูกต้องแทนแผ่นชาโดว์มาสก์ ข้อเสียของจอภาพชนิดนี้ คือ ต้องควบคุมให้ลำอิเล็กตรอนคมมากๆมิฉะนั้นจะทำให้ภาพไม่คมชัด

2.1.10.2.11 จอภาพชนิดซีอาร์ทีแบบแบน (Flat CRT)

เป็นจอภาพที่มีรูปร่างแบน ใช้แรงดันไฟฟ้าไม่มาก แต่ให้ความสว่างของภาพดี

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้จอภาพซีอาร์ทีแบบสี ในการเปรียบเทียบภาพด้นฉบับกับภาพที่ผลิตได้

2.1.11 **การปรับตั้งมาตรฐานอุปกรณ์** (Calibration) **และการหาลักษณะเฉพาะ** (Characterisation)

ในกระบวนการจัดการสีนั้น จำเป็นต้องมีการปรับตั้งและควบคุมมาตรฐานของอุปกรณ์ก่อนนำมาใช้งาน เนื่องจากอุปกรณ์แต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับการนำมาใช้งาน ในงานวิจัยนี้ได้มีการปรับตั้งมาตรฐาน และการหาลักษณะเฉพาะของจอภาพชนิดซีอาร์ที โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Profile Maker Pro 5.0.1

2.1.11.1 การปรับตั้งมาตรฐานอุปกรณ์

การปรับตั้งมาตรฐานอุปกรณ์ (Calibration) หมายถึง กระบวนการจัดการอุปกรณ์เพื่อให้แสดงข้อมูลได้อย่างเที่ยงตรงเหมือนกันทุกครั้ง โดยการปรับตั้งค่ามาตรฐานสามารถใช้การปรับตั้งอย่างง่ายด้วยโปรแกรมที่เรียกว่าแกมมา (Gamma) ซึ่งมากับโปรแกรม Adobe Photoshop หรือ โปรแกรมอื่น ซึ่งจะทำหน้าที่ในการปรับค่าสีขาว สีดำ และสีเทาของจอภาพให้เป็นสีที่ถูกต้อง ไม่มีการปนเปื้อนของสีอื่น โดยการปรับตั้งนั้นจะต้องทำการปรับส่วนสว่างของจอภาพให้มีความใกล้เคียงกับสีขาวของกระดาษมากที่สุด และปรับค่าแกมมาของจอให้ถูกต้องโดยปรับให้ช่วงสีเทาที่อยู่ติดกันมีความใกล้เคียงมากที่สุด [15]

2.1.11.2 การหาลักษณะเฉพาะ (Characterisation) หมายถึง การหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณดิจิทัลของอุปกรณ์ที่เป็นจำนวนนับของแต่ละช่องสัญญาณสี RGB ไปเป็นสัญญาณอะนาล็อคของสีที่ผลิตขึ้นในระบบ CIEXYZ โดยสันนิษฐานว่าเป็นความสัมพันธ์กันในแบบเส้นตรงรหว่างค่าไตรสติมูลัส ค่าสัมประสิทธิ์สี xyz และค่าความสว่างของทั้ง 3 ช่วงสัญญาณ ดังนั้น การหาลักษณะเฉพาะของซีอาร์ที หมายถึง การหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณของอุปกรณ์ซึ่งเป็นข้อมูลนำเข้ากับสีที่แสดงบนจอภาพ โดยสามารถหาได้จากการใช้แบบจำลองเพื่อใช้ในการประเมินค่าสีที่ผลิตบนจอภาพ [16,17]

2.1.12 **การจัดการสี** (Color Management)

ระบบการจัดการสีเป็นระบบที่ใช้ในการควบคุมคุณภาพของการผลิตสีของภาพในทางการพิมพ์ ที่มีการใช้การแสดงผลในแต่ละอุปกรณ์ที่แตกต่างกันออกไป ในปัจจุบันบริษัทที่ผลิตสื่อสิ่งพิมพ์หรือสื่อโฆษณาต่างๆที่ต้องการให้ผู้บริโภครับรู้ และสามารถตอบสนองผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ได้ต้องอาศัยระบบการจัดการสี [18,19] มาเป็นเครื่องมือในการผลิตสีซ้ำ ซึ่งในกระบวนการที่จะช่วยการผลิตสื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการเทียบเคียงสีได้ (Color Matching) หรือการทำให้สีของสื่อที่ผลิตใกล้เคียงกับต้นฉบับได้นั้นมี 3 ลักษณะ คือ

- การรักษาสีสัน (Hue Preservation)
- การรักษาการไล่น้ำหนักสี (Gradation Preservation)
- การควบคุมความแตกต่างของสีให้น้อยที่สุด (Minimum Color Difference)

2.1.12.1 หลักการของการจัดการสีแบ่งออกเป็น 2 แนวทาง ดังนี้

2.1.12.1.1 การแปลงข้อมูลสีนำเข้า RGB หรือ CMYK ของภาพต้นฉบับให้เป็นข้อมูลใหม่ R'G'B' หรือ C'M'Y'K' เพื่อให้อุปกรณ์ส่งออกที่เป็นเป้าหมายนั้นผลิตสีของภาพพิมพ์ใกล้เคียงกับต้นฉบับมากที่สุดโดยจะนำวิธีการทางคณิตศาสตร์เข้ามาช่วย เช่น เทคนิคถดถอยพหุนาม (Polynomial Regression) เมทริกซ์ (Matrix) และ LUT (Look – Up Table) เป็นต้น

2.1.12.1.2 การสร้างโพรไฟล์ (Profiles) ของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในระบบเพื่อทำหน้าที่เป็นฟังก์ชั่นแปลงข้อมูลระหว่างข้อมูลสีของอุปกรณ์เหล่านั้นซึ่งเป็นสีที่ขึ้นกับอุปกรณ์ (Device Dependent Colors) ให้เป็นค่าสีในระบบมาตรฐานที่ไม่ขึ้นกับอุปกรณ์ (Device Independent Colors) ซึ่งในที่นี้หมายถึง ค่าสีในระบบ CIE เช่น CIELAB หรือ CIEXYZ เป็นต้น ซึ่งมีข้อดีคือการแก้สีในระบบ CIE สามารถทำได้โดยไม่มีข้อจำกัด อนึ่งการสร้างโพรไฟล์จำเป็นต้องใช้หลักการทางคณิตศาสตร์เช่นเดียวกับการแปลงข้อมูลสี [20]

โดยวิธีการจัดการสีวิธีแรกนั้น มักจะเกิดปัญหาที่ระบบการทำงานที่ช้า เพราะมีฟังก์ชันในการแปลงข้อมูลสีจำนวนมาก ดังนั้นวิธีการสร้างโพรไฟล์จึงน่าจะเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากจะทำให้ความซับซ้อนของฟังก์ชันในการแปลงข้อมูลลดลงแล้ว ยังทำให้มีความคล่องตัวในการทำงานมากขึ้นอีกด้วย ซึ่งในงานวิจัยนี้ก็ได้ทำการสร้างโพรไฟล์ด้วย โดยอาศัยโปรแกรมสำเร็จรูป คือ Profile Maker Version 5 มาใช้เพื่อสร้างโพรไฟล์ในการเชื่อมโยงข้อมูลสีของอุปกรณ์นำเข้ากับอุปกรณ์แสดงผลออก

2.1.12.2 ขั้นตอนการจัดการสี

2.1.12.2.1 การสร้างโพรไฟล์สีของอุปกรณ์นำเข้าและส่งออก (Device Profiles) ในฟอร์แมทมาตรฐาน ICC (International Color Consortium) เช่น โพรไฟล์ของสแกนเนอร์ จอภาพ และเครื่องพิมพ์ เป็นต้น

2.1.12.2.2 การแปลงข้อมูล (Color Transformation) หมายถึงการแปลงข้อมูลสีจากปริภูมิสีหนึ่งไปยังอีกปริภูมิสีหนึ่งผ่านโพรไฟล์ ICC เรียกวิธีการนี้ว่า Color Matching Method (CMM) ซึ่งมีซอฟแวร์พิเศษช่วยเชื่อมข้อมูลและทำการคำนวณการแปลงข้อมูล ดังกล่าว เช่น Color Sync ของบริษัท Adobe ที่ใช้กันทั่วไปในระบบปฏิบัติการแมคอินทอช หรือซอฟต์แวร์อิสระ เช่น Profile Maker ตัวอย่างการแปลงข้อมูล ได้แก่

RGB (แสกนเนอร์หรือกล้องดิจิทัล) ⟷ CIE L*a*b* / XYZ

RGB (บนจอภาพ) ⟷ CIE L*a*b* / XYZ

CMYK (จากเครื่องพิมพ์) ⟷ CIE L*a*b* / XYZ

CIE L*a*b* / XYZ นี้มีความสำคัญในระบบการจัดการสี เนื่องจากเป็นค่าอิสระที่ไม่ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ จึงเหมาะที่จะทำการแก้ไขข้อมูลดังกล่าวในการแก้สี เรียกสถานะข้อมูลสี CIE L*a*b* / XYZ นี้ว่า Profile Connection Space (PCS)

2.1.12.2.3 การปรับแก้สี (Gamut Mapping หรือ Rendering Intent) เป็นขั้นตอนที่ต่อจากการแปลงข้อมูลไปเป็น PCS โดยทำการแก้ไขแปลงข้อมูลสีที่ได้ให้เป็นข้อมูลใหม่ตามความต้องการผ่าน LUT หรือแมทริกซ์ โดยจะพิจารณาแยกเป็นส่วน ๆ ดังนี้ ความสว่าง (L*) โครมา (C^*_{ab}) และสีสัน (h) ซึ่งค่า L*a*b* จะถูกแปลงไปเป็นค่า L*C*h ก่อน แล้วจึงทำการเทียบสี L*C*h ของภาพต้นฉบับกับค่า $L^{*\prime}C^{*\prime}h'$ ที่ต้องการเป็นผลลัพธ์ออกมา

ในทางปฏิบัติของการปรับแก้สีนั้น [15] ได้กำหนดวิธีการแก้สีออกเป็นหลายแบบขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์สีของต้นฉบับกับสีของอุปกรณ์ส่งออกที่สามารถผลิตได้ โดยแบ่ง 3 ประเภท คือ

1) Absolute Colorimetric เป็นวิธีการรักษาน้ำหนักสีของภาพ โดยจะเปลี่ยนเฉพาะสีที่อยู่นอกขอบเขต ให้เข้ามาอยู่ในขอบเขตสีของอุปกรณ์ส่งออกข้อมูล

2) Perceptual Matching เป็นวิธีการรักษาน้ำหนักสีของภาพ โดยทำการเปลี่ยนสีทั้งหมดในขอบเขตของสีแหล่งต้นทางในสัดส่วนที่เท่า ๆ กันไปยังขอบเขตสีของอุปกรณ์ที่จะส่งออกข้อมูล

3) Relative Colorimetric เป็นวิธีการรักษาน้ำหนักสีของภาพ โดยจะเปลี่ยนเฉพาะสีที่อยู่นอกขอบเขตด้วยการปรับ White Point และพยายามที่จะแสดงสีในขอบเขตเท่าที่ทำได้ให้ตรงกับอุปกรณ์ส่งออก

4) Saturation Preservation เป็นวิธีการผลิตสีสดที่สุดเท่าที่จะทำได้ของอุปกรณ์ที่จะส่งออกข้อมูลสี โดยส่วนที่อยู่นอกขอบเขตสีนั้น จะถูกปรับให้มาอยู่ในขอบเขตสี

2.1.12.2.4 ส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์ส่งออก (Output Data) หลังจากทำการปรับแก้สีได้ข้อมูลสีใหม่ (L*a*b* เป็น L'a'b') แล้ว ข้อมูลสีดังกล่าวจะต้องถูกแปลงไปเป็น CMYK หรือ RGB ผ่านโพรไฟล์ของอุปกรณ์ส่งออกนั้น ๆ ก่อนส่งข้อมูลออก โดยคาดว่าผลลัพธ์ของสีที่ปรากฏออกมาจะตรงตามความต้องการที่ได้กำหนดไว้ในขั้นตอนปรับแก้สี

2.1.13 การวิเคราะห์สี

การวิเคราะห์สี [8] โดยทั่วไปแล้วนั้น มีรูปแบบพื้นฐานที่สำคัญอยู่ 2 ส่วนคือ

2.1.13.1 การตรวจสอบ (Examination) คือขั้นตอนที่ตรวจสอบปัจจัย 3 อย่างที่มีผลในการรับรู้สี

2.1.13.2 การประเมิน (Assessment) ใช้ในการตัดสินใจว่าตัวอย่างนั้นจะเหมือนกับสีมาตรฐานหรือไม่ แบ่งการทำงานได้ 3 ส่วน คือ

2.1.13.2.1 การพิจารณาว่าตัวอย่างกับมาตรฐานแตกต่างกันหรือไม่ ซึ่งอาจจะอยู่ในลักษณะที่เป็นค่าที่ได้จากการอ่านเครื่องมือวัด หรือการแสดงความคิดต่อสีที่เห็น

2.1.13.2.2 การอธิบายความแตกต่างของสี โดยหลังจากที่ประเมินแล้วว่าค่าสีมีความแตกต่างกัน จะต้องมีการวิเคราะห์อธิบายความแตกต่างของสีตามมาตรฐานสากล วิธีหนึ่งที่ใช้ในการอธิบายความแตกต่างของสีในระบบการวัดสีของซีไออี คือ การคำนวณความแตกต่างของสี 2 สีใด ๆ ในแผนภูมิ CIELAB ดังสมการที่ 2.24

$$\Delta E^*_{ab} = \left[(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 \right]^{1/2} \qquad (2.24)$$

โดยที่ $\Delta L^* = L^*_t - L^*_{std}$

$\Delta a^* = a^*_t - a^*_{std}$

$\Delta b^* = b^*_t - b^*_{std}$

t และ std คือ สีตัวอย่างและสีมาตรฐาน

โดยนำค่า ΔE^*_{ab} ที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานจากตารางที่ 2.3 ตัวอย่างเช่น ถ้าคำนวณค่า ΔE^*_{ab} ได้ 1.2 แสดงว่ามีค่าความแตกต่างของสีต่ำ

ตารางที่ 2.3 แสดงค่า ΔE^*_{ab} ตามมาตรฐานระบบ CIELAB [8]

ΔE^*_{ab}	ความแตกต่าง
<0.2	มองไม่เห็นความแตกต่างของสายตา
0.2-0.5	น้อยมาก
0.5-1.5	น้อย
1.5-3.0	ปานกลาง
3.0-6.0	ให้ความแตกต่างชัดเจน
6.0-12.0	ต่างกันมาก
>12.0	ต่างกันโดยสิ้นเชิง

และอีกวิธีหนึ่งในการอธิบายความแตกต่างของสีได้ โดยการใช้ราก กำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square : RMS) ดังสมการที่ 2.25 ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าความแตกต่าง ระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่ได้จากวัดกับค่าการสะท้อนแสงที่ได้จากการประมาณ [21]

$$RMS = \sqrt{\frac{\left(R_{400} - \hat{R}_{400}\right)^2 + \left(R_{410} - \hat{R}_{410}\right)^2 + \ldots + \left(R_{700} - \hat{R}_{700}\right)^2}{\text{จำนวนข้อมูลทั้งหมด}}} \qquad (2.25)$$

โดยที่ R_λ = ค่าการสะท้อนแสงที่ได้จากการวัด ณ ความยาวคลื่น λ จากต้นฉบับ

$\hat{R}_\lambda$ = ค่าการสะท้อนแสงที่ได้จากการประมาณ ณ ความยาวคลื่น λ จากการประมาณ

2.1.13.2.3 การพิจารณาว่าจะยอมรับความแตกต่างของสีนั้น ๆ หรือไม่ ในทางปฏิบัติคือการกำหนดค่า ΔE^*_{ab} นั้นเอง ซึ่งในการกำหนดค่าความแตกต่างนี้ก็ขึ้นกับลักษณะหรือจุดประสงค์ของการนำสีนั้นไปใช้งานและความต้องการของลูกค้าเป็นสำคัญ

ในงานวิจัยนี้ค่าความแตกต่างของสีที่ใช้ค่า ΔE^*_{ab} เป็นเกณฑ์วัดนั้นคำนวณได้จากการแปลงค่าการสะท้อนแสงที่ได้จากการวัด และค่าการสะท้อนแสงที่ได้จากการประมาณไปเป็นค่าสี

XYZ และค่าสี L*a*b* ตามลำดับ แล้วนำค่าสี L*a*b* ที่ได้มาหาค่าความแตกต่างสี ส่วนค่าความแตกต่างของสีที่ใช้ค่า RMS เป็นเกณฑ์วัดจะสามารถคำนวณได้จากค่าการสะท้อนแสงที่ได้จากการวัดและค่าการสะท้อนแสงที่ได้จากการประมาณมาหาค่าความแตกต่างของสี

2.1.14 **วิธีการเทียบสี** (Color Matching) **และการมองเปรียบเทียบภาพ** (Comparison Viewing)

2.1.14.1 วิธีการเทียบสี

สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ การเทียบสีเชิงปริมาณ เป็นการเป็นการเทียบสีโดยใช้ตัวเลขเป็นตัวตัดสินความเหมือนกันของสี และการเทียบสีเชิงคุณภาพ (Subjective Method) โดยใช้สายตาเป็นตัวตัดสินว่าสี 2 สีมีความเหมือนกันมากน้อยเพียงใด โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้การเทียบสีเชิงคุณภาพ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 วิธี ได้แก่ [22]

2.1.14.1.1 Pair Comparison : ผู้สังเกตการณ์เทียบสีตัวอย่าง 2 สี เป็นคู่ ๆ โดยสีตัวอย่างแต่ละสีจะถูกเทียบกันเป็นคู่จนครบทุกสี ซึ่งต้องทำการเลือกสีตัวอย่างที่เหมือนกับสีต้นฉบับมากที่สุด

2.1.14.1.2 Category Judgment : ผู้สังเกตการณ์เทียบสีระหว่างสีต้นฉบับกับสีตัวอย่างเป็นคู่ ๆ โดยใช้ตัวเลขแบ่งระดับขั้นความเหมือน เช่น 3 ระดับ โดยที่ 1 หมายถึง เหมือนมาก 2 หมายถึง เหมือน และ 3 หมายถึง ไม่เหมือน เป็นต้น

2.1.14.1.3 Method of Adjustment : ผู้สังเกตการณ์ทำการปรับสีตัวอย่างให้ได้สีเหมือนกับสีต้นฉบับ

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการเทียบสีเชิงคุณภาพแบบ Category Judgment โดยผู้สังเกตการณ์สามารถมองเทียบสีของภาพต้นฉบับกับสีของภาพที่ผลิตได้จากข้อมูลสเปกตรัม และสีของภาพต้นฉบับกับสีของภาพที่ได้จากการบันทึกภาพจากกล้องดิจิทัลทั่วไป ด้วยการใช้ตัวเลขเป็นเกณฑ์ในการแบ่งระดับความเหมือนของภาพ ซึ่งแบ่งออกเป็น 5 ระดับ ดังนี้คือ

1 = ระดับความเหมือนน้อยที่สุด

2 = ระดับความเหมือนน้อย

3 = ระดับความเหมือนปานกลาง

4 = ระดับความเหมือนมาก

5 = ระดับความเหมือนมากที่สุด

2.1.14.2 วิธีการมองเปรียบเทียบภาพ

I22207347

วิธีที่ใช้ในการมองเปรียบเทียบภาพมีอยู่ทั้งหมด 5 วิธี ซึ่งสามารถใช้มองเปรียบเทียบภาพได้ทั้งภาพที่เป็น Hardcopy และ Softcopy โดยมีหลักการดังนี้ [23]

2.1.14.2.1 Memory Viewing : เป็นการมองภาพต้นฉบับและภาพที่ผลิตได้แยกจากกัน โดยผู้สังเกตการณ์จะมองและจำภาพต้นฉบับไว้ก่อน แล้วจึงค่อยมองภาพที่ผลิตได้ ซึ่งในระหว่างการเปรียบเทียบภาพนั้นผู้สังเกตการณ์จะตัดสินภาพที่ผลิตได้โดยไม่สามารถกลับไปมองภาพต้นฉบับได้อีก เทคนิคนี้เป็นวิธีที่เป็นธรรมชาติและใช้กับลักษณะงานภาพถ่ายและภาพกราฟฟิกเวลาที่ใช้ในการทดลองค่อนข้างนาน

2.1.14.2.2 Successive-Binocular Viewing (SCB) :

ลักษณะการมองเหมือนกับ Memory Viewing แต่ต่างกันตรงที่ผู้สังเกตการณ์สามารถกลับไปมองภาพต้นฉบับได้อีกไม่จำกัดครั้ง

2.1.14.2.3 Simultaneous-Binocular Viewing (SMB) :

ผู้สังเกตการณ์มองภาพต้นฉบับและภาพที่ผลิตได้ในเวลาเดียวกัน เทคนิคนี้เป็นวิธีที่เป็นธรรมชาติและใช้กับลักษณะงานพิมพ์แบบตั้งโต๊ะเวลาที่ใช้ในการทดลองสั้น

2.1.14.2.4 Simultaneous-Haploscopic Viewing (SMH) :

ผู้สังเกตการณ์มองภาพต้นฉบับด้วยตาข้างหนึ่งและมองภาพที่ผลิตได้ด้วยตาอีกข้างหนึ่งในเวลาเดียวกัน ผู้สังเกตการณ์มองภาพต้นฉบับด้วยตาข้างหนึ่งและมองภาพที่ผลิตได้ด้วยตาอีกข้างหนึ่งในเวลาเดียวกัน เทคนิคนี้เป็นวิธีที่ไม่เป็นธรรมชาติเวลาที่ใช้ในการทดลองสั้น

2.1.14.2.5 Successive-Ganzfeld-Haploscopic Viewing (SCH) :

ลักษณะการมองเหมือนกับ Simultaneous-Haploscopic Viewing แต่ต่างกันตรงที่ผู้สังเกตการณ์ไม่ได้มองภาพต้นฉบับและภาพที่ผลิตได้ในเวลาเดียวกัน โดยในขณะที่ตาข้างหนึ่งมองภาพ ตาอีกข้างจะใช้แผ่นกรองแสงแบบกระเจิงแสงปิดไว้

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธี Successive-Binocular Viewing (SCB) เนื่องจากผู้สังเกตการณ์สามารถมองภาพเปรียบเทียบระหว่างภาพต้นฉบับกับภาพที่ผลิตได้สลับไปมาได้

2.1.15 **เมแทเมอริซึม** (Metamerism)

ถ้าทำการเปรียบสีของภาพต้นฉบับกับสีของภาพที่ผลิตได้ ภายใต้สภาวะที่แตกต่างกันของแหล่งกำเนิดแสง ผู้สังเกตการณ์ ระยะทางและมุมมองนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องอาศัยหลักการของกระบวนการเกิดเมแทเมอริซึมมาใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาภาพ โดยกระบวนการเมแทเมอริซึมหมายถึง ปรากฏการณ์การมองเห็นและรับรู้สีของวัตถุ 2 ชิ้น หรือบริเวณใด ๆ 2 บริเวณว่ามีสีเหมือนกัน

ภายใต้สภาวการณ์หรือเงื่อนไขหนึ่งหรือมากกว่า โดยเมื่อสภาวการณ์หรือเงื่อนไขนั้นเปลี่ยนแปลงไปก็มีผลทำให้สีของวัตถุหรือบริเวณนั้นมีสีแตกต่างกัน [7] สามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ

2.1.15.1 เมแทเมอริซึมเนื่องด้วยแหล่งกำเนิดแสง

การมองเห็นสีของวัตถุ 2 ชิ้น เหมือนกันเมื่อมองภายใต้แหล่งกำเนิดแสงหนึ่ง แต่เมื่อเปลี่ยนชนิดของแหล่งกำเนิดแสงมีผลทำให้การมองเห็นสีของวัตถุ 2 ชิ้นแตกต่างกัน

2.1.15.2 เมแทเมอริซึมเนื่องด้วยผู้สังเกตการณ์

การที่ผู้สังเกตการณ์คนหนึ่งมองเห็นสีของวัตถุ 2 ชิ้นเหมือนกัน แต่ผู้สังเกตการณ์อีกคนหนึ่งมองเห็นสีของวัตถุ 2 ชิ้นนั้นแตกต่างกัน ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง ระยะทาง และมุมมองเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากตาแต่ละคนมีความไวแสงต่อการมองเห็นสีแตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น ผู้สังเกตการณ์คนใดคนหนึ่งอาจมีการมองเห็นสีผิดปกติ โดยอาจมีการตาบอดสีหรือมองเห็นสีใดสีหนึ่งได้น้อยกว่าคนที่มีการมองเห็นปกติ หรือคนสูงอายุมักมีระบบการมองเห็นที่ไม่ดีเท่ากับคนที่อยู่ในวัยหนุ่มสาว เป็นต้น

2.1.15.3 เมแทเมอริซึมเนื่องด้วยระยะทาง

การที่ผู้สังเกตการณ์คนหนึ่งมองเห็นสีของวัตถุ 2 ชิ้นเหมือนกันเมื่อมองดูที่ระยะไกล ซึ่งทำให้มองเห็นวัตถุนั้นมีขนาดเล็กลง แต่เมื่อมองที่ระยะใกล้ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงและมุมมองเดียวกันกลับมองเห็นสีของวัตถุ 2 ชิ้นนั้นแตกต่างกัน

2.1.15.4 เมแทเมอริซึมเนื่องด้วยการมุมมอง

การที่ผู้สังเกตการณ์คนหนึ่งมองเห็นสีของวัตถุ 2 ชิ้นเหมือนกันที่มุมมองหนึ่ง แต่เมื่อเปลี่ยนมุมในการมอง ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงและระยะทางเดียวกัน ทำให้มองเห็นสีของวัตถุ 2 ชิ้นนั้นแตกต่างกัน เมแทเมอริซึมประเภทนี้นอกจากจะเกิดจากตัวของสารให้สีเองแล้ว ยังเกิดขึ้นจากลักษณะผิวของวัตถุด้วย เช่น วัตถุมีความมันวาวที่แตกต่างกัน ทำให้เมื่อเปลี่ยนมุมมองส่งผลให้การสะท้อนแสงที่ผิวของวัตถุแตกต่างกัน ทำให้การสะท้อนแสงรวมที่ได้จากการสะท้อนแสงของสารให้สีและการสะท้อนแสงที่ผิวมีความแตกต่างกัน ผู้สังเกตการณ์จึงมองเห็นสีต่างกัน

2.1.16 โปรแกรม MATLAB

เป็นภาษาคอมพิวเตอร์ชั้นสูง (High-Level Language) ใช้สำหรับการคำนวณทางเทคนิคที่ประกอบไปด้วยการคำนวณค่าเชิงตัวเลข กราฟิกที่ซับซ้อน และการจำลองแบบเพื่อให้สามารถมองเห็นภาพพจน์ได้ง่ายและชัดเจน เดิมโปรแกรม MATLAB เขียนขึ้นเพื่อใช้คำนวณค่าตัวเลขทางเมทริกซ์ แต่ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องทำให้โปรแกรม MATLAB มีฟังก์ชั่นต่าง ๆ ให้เลือกมาก

มายเพื่อใช้สำหรับคำนวณทางเทคนิค ทำให้ง่ายต่อการนำไปใช้งาน และง่ายต่อการทำความเข้าใจด้วย จึงทำให้โปรแกรม MATLAB ถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในสาขาต่าง ๆ [24]

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Yokoyama และคณะ [25] ได้ทำการพัฒนาระบบการผลิตซ้ำของภาพสีน้ำมัน ให้มีความถูกต้องและแม่นยำสูงโดยใช้กล้องดิจิทัลบันทึกภาพสีน้ำมันจำนวน 147 สีผ่านแผ่นกรองแสง 5 แผ่น และเซลล์รับแสง (CCD) ที่มีความละเอียด 2048 x 2048 พิกเซล และใช้การวิเคราะห์ส่วนประกอบหลัก (PCA) กับวิธี Wiener Estimation ในการวิเคราะห์เลือกจำนวน และชนิดของแผ่นกรองแสงที่เหมาะสม ตามลำดับ เพื่อนำแผ่นกรองแสงนั้นมาใช้ในการประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของภาพสีน้ำมันในแต่ละพิกเซล จากนั้นนำค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมที่ได้ มาผ่านระบบการจัดการสีที่มีการชดเชยในกระบวนการมองเห็นเมื่อแหล่งกำเนิดแสงเปลี่ยนไป ผลการทดลองพบว่าให้ค่าความแตกต่างสี (ΔE^*_{ab}) ระหว่างค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของภาพต้นฉบับที่ได้กับภาพที่ผลิตขึ้นใหม่เท่ากับ 1.16 ซึ่งนับว่าให้ค่าความถูกต้องที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นสรุปได้ว่าการใช้แผ่นกรองแสงจำนวน 5 แผ่น เหมาะสมเพียงพอต่อการบันทึกค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของภาพศิลป์ที่ผลิตได้ และให้ค่าสีที่มีความใกล้เคียงกับภาพต้นฉบับได้ดี

Konig และคณะ [26] ได้ทำการศึกษาปัญหาของผลิตภาพโดยใช้ค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมบนจอภาพซีอาร์ทีภายใต้สภาวะการมองเห็นภาพ ที่แหล่งกำเนิดแสงแตกต่างกันของแต่ละภาพ ระหว่างภาพต้นฉบับกับภาพที่ใช้แสดงบนจอภาพซีอาร์ที โดยใช้อุปกรณ์ Multispectral Scanner ในการบันทึกค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของภาพต้นฉบับผ่านแผ่นกรองแสงจำนวน 16 แผ่น ลงบน CCD โดยที่เครื่องจะถูกควบคุมด้วยชุดเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีการป้อนโปรแกรมสำเร็จรูป ที่ใช้สำหรับการสร้างกระบวนการจัดการภาพเชิงสเปกตรัม ซึ่งสามารถคำนวณค่าสี CIEXYZ ได้ หลังจากนั้นทำการวัดค่าสี CIEXYZ ด้วยอุปกรณ์วัดค่าสีบนจอภาพ เพื่อใช้สำหรับสร้างโพรไฟล์ของจอภาพซีอาร์ที รวมทั้งทำการกำหนดขอบเขตสี ที่ใช้สำหรับควบคุมสีที่ไม่สามารถแสดงบนจอภาพได้ ให้สามารถแสดงบนจอภาพได้ จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบภาพที่ผลิตได้กับภาพต้นฉบับ ภายใต้สภาวะการมองเห็นที่แตกต่างกันของแหล่งกำเนิดแสง ได้แก่ แหล่งกำเนิดแสง Daylight แหล่งกำเนิดแสง A และแหล่งกำเนิดแสง F11 จากผลการทดลองพบว่า ภาพที่ผลิตได้ และระบบที่ใช้นั้น สามารถแสดงค่าสีที่มีความแม่นยำออกมาได้

Schmitt และคณะ [6] ทำการศึกษาการหาจำนวนแผ่นกรองแสงที่เหมาะสม พร้อมทั้งทดสอบประสิทธิภาพการตอบสนองของกล้องถ่ายภาพดิจิทัล ในการใช้บันทึกค่าการสะท้อนแสงเชิง

สเปกตรัมของภาพต้นฉบับ ที่มีผลต่อคุณภาพของการผลิตภาพ โดยได้ทำการเลือกใช้แผ่นกรองแสงของ Wratten, Hoffman และ Schott จำนวนตั้งแต่ 3-12 แผ่น ที่เหมาะสมจากจำนวนทั้งหมด 37 แผ่น ที่สามารถครอบคลุมช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 400-750 นาโนเมตร เพื่อใช้สำหรับทดสอบแผ่นตัวอย่างสีน้ำมันทั้งหมด 1,269 สี จากนั้นทำการบันทึกภาพด้วยกล้องดิจิทัล ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65 แล้วทำการประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมที่ได้ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ พร้อมทั้งคำนวณหาค่าความแตกต่างสีระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่ได้จากการวัด กับค่าการสะท้อนแสงที่ได้จาการประมาณด้วยวิธี RMS Error ผลการศึกษาพบว่า เมื่อใช้จำนวนแผ่นกรองแสงมากขึ้น ก็ยิ่งทำให้ค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของ RMS Error ลดลง ส่งผลให้ภาพที่ผลิตได้นั้นมีค่าสีที่ใกล้เคียงกับภาพต้นฉบับมากขึ้น