บทที่ 2 ทฤษฎี งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ตัวชี้วัดแก๊ส

2.1.1 ความหมายของตัวชี้วัดแก๊ส

ตัวชีวัดแก๊ส เป็นตัวชี้วัดที่อาศัยแก๊สข้อมูลในการบ่งบอกองค์ประกอบในบรรจุภัณฑ์แบบปรับสภาพบรรยากาศ หรือการติดตามการแพร่ผ่านของแก๊สในบรรจุภัณฑ์แบบสุญญากาศ บรรจุภัณฑ์แบบกำจัดออกซิเจน บรรจุภัณฑ์แบบพ่นแก๊สไนโตรเจน การบ่งบอกของการปิดผนึกที่มีรอยรั่ว ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวชีวัดกับแก๊สที่อยู่ภายในบรรจุภัณฑ์ ตัวชีวัดจะแสดงการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ที่อยู่ภายในบ่งบอกถึงความสดใหม่

2.1.2 สารอินทรีย์สำหรับการบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงของแก๊ส

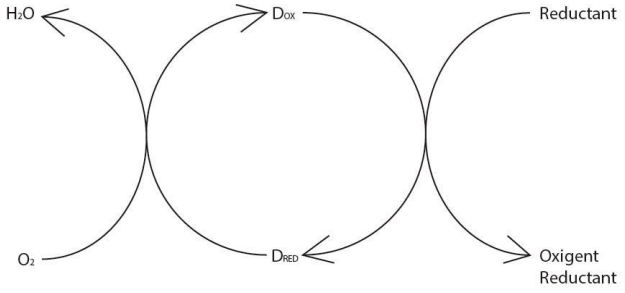
2.1.2.1 สีย้อมรีดอกซ์ร่วมกับสารให้ไฮโดรเจนอะตอม

สีย้อมรีดอกซ์ ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ สีย้อมรีดอกซ์ในรูปออกซิไดซ์ จะทำปฏิกิริยากับสารให้ไฮโดรเจนอะตอม เช่น กลูโคส สารละลายเบส กลายเป็นสีย้อมรีดอกซ์ในรูปรีดิวซ์ และสารให้ไฮโดรเจนอะตอมที่ถูกออกซิไดซ์ ดังสมการ โดยการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวจะแสดงการเปลี่ยนแปลงสีของสีย้อมรีดอกซ์

$$D_{ox} + \text{reductant} \longrightarrow D_{RED} + \text{oxidized reductant}$$

เมื่ออยู่ในสภาวะปราศจากออกซิเจน จะมีการเกิดปฏิกิริยา bleaching reaction จะทำให้สีย้อมรีดอกซ์ในรูปรีดิวซ์ที่ไม่มีสี แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อมีออกซิเจน สีย้อมรีดอกซ์จะถูกขับเคลื่อนโดยออกซิเจน ซึ่งสีย้อมรีดอกซ์จะถูกออกซิไดซ์ทำให้โดยส่วนใหญ่แล้วจะมีสี ดังรูปที่ 2.1

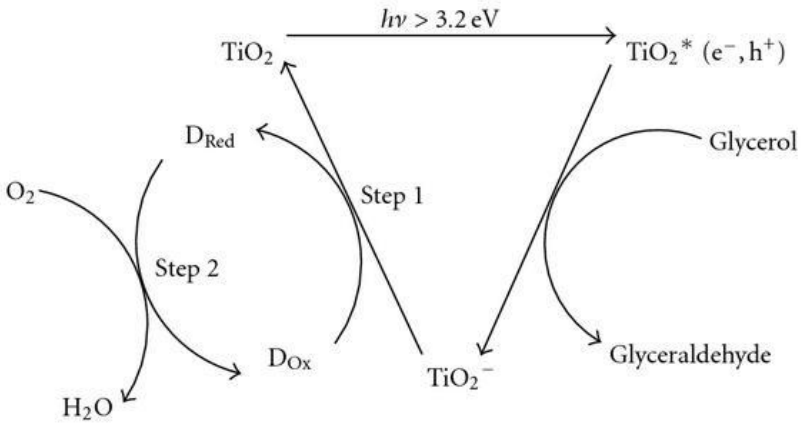
$$D_{RED} + O_2 \longrightarrow D_{OX} + H_2O$$



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาสีย้อมรีดอกซ์ร่วมกับสารให้ไฮโดรเจนอะตอม [4]

2.1.2.2 สีย้อมรีดอกซ์ร่วมกับสารกึ่งตัวนำและตัวให้อิเล็กตรอน

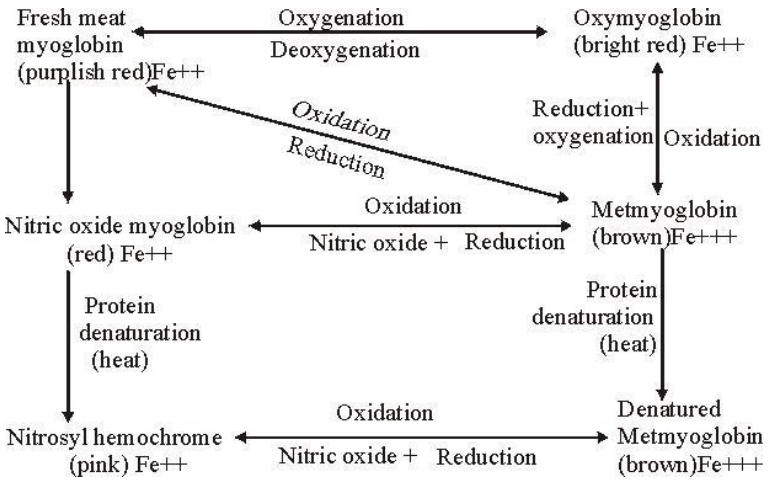
เมื่อมีการกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเลต ของผลึกนาโน ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีอนุภาคละเอียดมาก ถูกกักเก็บอยู่ในพอลิเมอร์ฟิล์ม พบว่า จะเกิดคู่ของอิเล็กตรอนโฮล์ โดยรูที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสง สามารถถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายและไม่ผันกลับ เมื่อมีตัวให้อิเล็กตรอน ส่งอิเล็กตรอนที่กระตุ้นด้วยแสง เพื่อสะสมในอนุภาคของสารกึ่งตัวนำ โดยอิเล็กตรอนดังกล่าวจะรีดิวซ์สีย้อมรีดอกซ์ในรูปออกซิไดซ์ ซึ่งมีสี กลายเป็นสีย้อมรีดอกซ์ในรูปรีดิวซ์ ซึ่งสีจางลงจนหายไป สีย้อมรีดอกซ์ในรูปรีดิวซ์ดังกล่าว พร้อมที่จะถูกออกซิไดซ์กลับมาเป็นสีย้อมรีดอกซ์ในรูปออกซิไดซ์โดยออกซิเจน ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาสีย้อมรีดอกซ์ร่วมกับสารกึ่งตัวนำและตัวให้อิเล็กตรอน [4]

2.1.2.3 สารประกอบเชิงซ้อนโลหะ

ไมโอโกลบิน จะมีโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ของโปรตีนซึ่งจะจับกับแม่เหล็กมีสีแดงอมม่วงสามารถ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นในสภาวะที่มีออกซิเจนได้กลายเป็นเมทไมโอโกลบิน มีสีน้ำตาล ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของไมโอโกลบิน [1]

2.1.2.4 สีย้อมพีเอช

สีย้อมพีเอชจะเป็นสารอินทรียคุณสมบัติที่เป็นกรดอ่อน เป็นสารที่มีโครงสร้างซับซ้อนเป็นสารที่มีสีและสามารถเปลี่ยนสีได้เมื่อพีเอชเปลี่ยนไป เป็นสารที่ใช้วัดบอกความเป็นกรดเบสของสารละลายได้อย่างหนึ่งตามทฤษฎีของ Ostwald กล่าวว่า เมื่อสีย้อมพีเอชอยู่ในรูปโมเลกุลและเมื่ออยู่ในรูปไอออนจะมีสีต่างกัน

สีย้อมพีเอชมีอยู่ 2 รูป คือ รูปกรด มีสัญลักษณ์เป็น HIn และรูปเบส มีสัญลักษณ์เป็น In^- ซึ่งทั้งสองรูปนี้มีภาวะสมดุล สามารถเขียนแสดงได้ด้วยสมการ

$$HIn\ (aq) + H_2O\ (l) \rightleftharpoons H_3O^+\ (aq) + In^-\ (aq)$$

HIn และ In^- มีสีต่างกันและปริมาณต่างกัน จึงทำให้สีของสารละลายเปลี่ยนแปลงได้ ถ้าปริมาณ HIn มากก็จะมีสีของรูปกรด ถ้ามีปริมาณ In^- มากก็จะมีสีของรูปเบส การที่จะมีปริมาณ HIn และ In^- มากกว่าหรือน้อยกว่านั้นขึ้นอยู่กับปริมาณ H_3O^+ ในสารละลายถ้ามี H_3O^+ มากก็จะรวมกับ In^- ได้เป็น HIn ได้มาก แต่ถ้าอยู่ในสารละลายที่มี OH^- มาก OH^- จะทำปฏิกิริยากับ H_3O^+ ลดลง ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าได้ In^- มากขึ้น

ช่วง pH ของอินดิเคเตอร์ เป็นช่วง pH ของสารละลายที่อินดิเคเตอร์ค่อยๆเปลี่ยนสีจากสีหนึ่งไปยังอีกสีหนึ่ง หรือเป็นส่วน pH ที่อินดิเคเตอร์ มีทั้งสีของ HIn และสีของ In^- ผสมกันในการบอกช่วง pH ของอินดิเคเตอร์ เช่น บรอโมไทมอลบลู สามารถเปลี่ยนรูปกรดไปเป็นรูปเบสได้ เมื่อทำปฏิกิริยากับกรดอินทรีย์ ทำให้ค่า λ_{max} ของการดูดกลืนแสงเกิดการเปลี่ยนแปลงจาก 507 นาโนเมตร (สีเหลือง) เป็น 445 นาโนเมตร (สีน้ำเงิน) มีช่วง pH 6.0-7.6 หมายความว่า ถ้าสารละลายมี pH น้อยกว่า 6.0 อินดิเคเตอร์จะให้สีเหลือง ถ้าสารละลายมี pH มกกว่า 7.6 อินดิเคเตอร์จะให้สีน้ำเงิน และถ้าสารละลายมี pH อยู่ระหว่าง 6.0 – 7.6 อินดิเคเตอร์จะให้สีเขียว ซึ่งเป็นสีผสมของ HIn และ In^- ตัวอย่างสีของอินดิเคเตอร์แต่ละชนิดจะเปลี่ยนในช่วง pH ที่ต่างกัน ดังตารางที่ 2.1

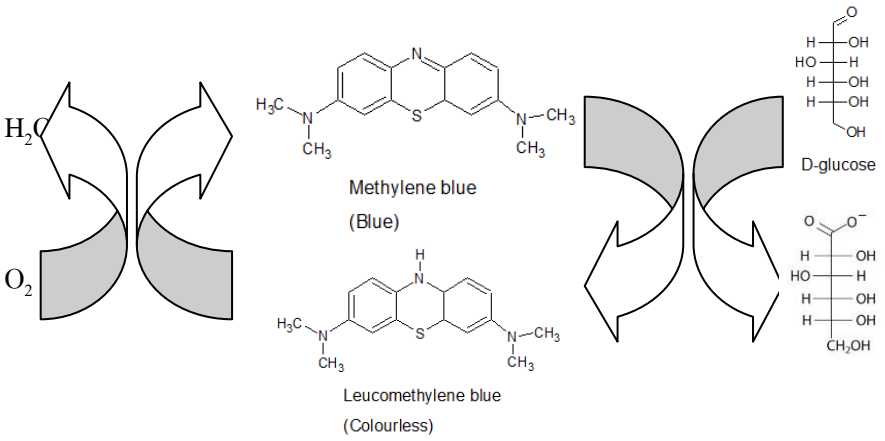
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างสีย้อมพีเอชสำหรับการพัฒนาตัวชี้วัดการสุก

Bromocresol purple	yellow	5.2 – 6.8	purple
Bromothymol blue	yellow	6.0 – 7.6	blue
Phenol red	yellow	6.8 – 8.4	

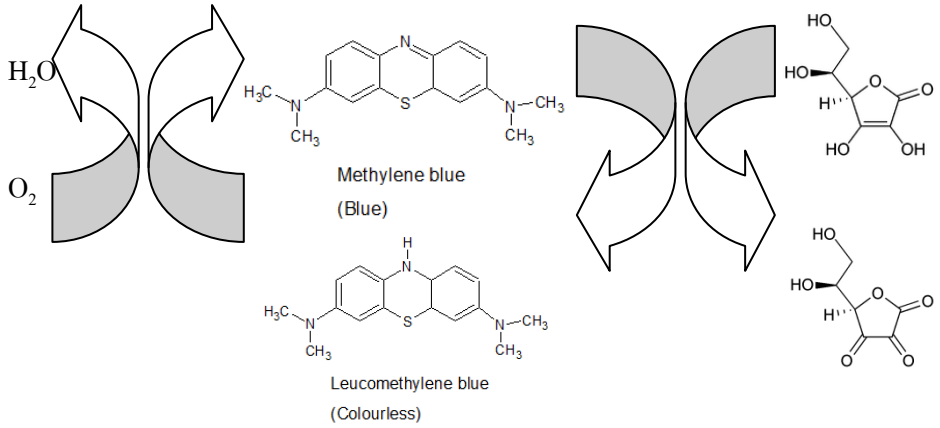
2.1.3 รูปแบบของตัวชี้วัดแก๊สและกลไกการเปลี่ยนแปลงสี

2.1.3.1 ตัวชี้วัดแก๊สฐานสีย้อมรีดอกซ์ร่วมกับสารให้ไฮโดรเจนอะตอม

โดยทั่วไปในสภาวะที่ปราศจากออกซิเจน สีย้อมรีดอกซ์จะอยู่ในรูปรีดิวซ์ที่โดยส่วนใหญ่จะไม่มีสี (colorless form) เช่น เมทิลีนบลู ซึ่งอยู่นรูปออกซิไดซ์ (สีน้ำเงิน) จะทำปฏิกิริยากับสารให้ไฮโดรเจนอะตอมคือ กลูโคส ในสารละลายเบส กลายเป็นลูโค เมทิลีน บลู ซึ่งอยู่ในรูปรีดิวซ์ (ไม่มีสี) และสารให้ไฮโดรเจนอะตอมที่ถูกออกซิไดซ์ คือ กรดกลูโคลิก (gluconic acid) เมื่อตัวชี้วัดแก๊สดังกล่าวอยู่ในสภาวะที่มีออกซิเจนจะเกิดปฏิกิริยาการขับเคลื่อนโดยออกซิเจน ซึ่งลูโค เมทิลีน บลู จะถูกออกซิไดซ์กลายเป็นเมทิลีน บลู ซึ่งมีสีน้ำเงินปรากฏขึ้นมา ปฏิกิริยาสีย้อมรีดอกซ์ดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 2.4 นอกจากนี้กรดแอสโคบิคสามารถใช้เป็นสารให้ไฮโดรเจนอะตอมได้เช่นกันรูปที่ 2.5 รูปแบบของตัวชีวัดแก๊สฐานสีย้อมรีดอกซ์ร่วมกับสารให้ไฮโดรเจนอะตอม (Reductant-redox dye –base gas indicator) สามารถเตรียมในรูปการตอกเม็ด (pill) สารละลาย (solution) หรือเจล (gel)



รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยารีดอกซ์ระหว่างลูโค เมทิลีน บลู และออกซิเจน
โดยมีกลูโคสเป็นสารให้ไฮโดรเจนอะตอม [1]

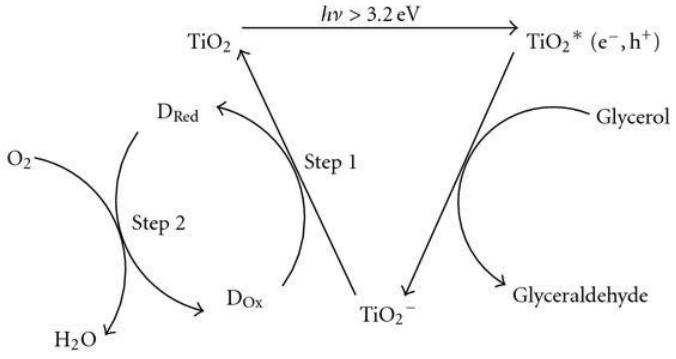


รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยารีดอกซ์ระหว่างลูโค เมทิลีน บลู และออกซิเจน โดยมีกรดแอสโคบิคเป็นสารให้ไฮโดรเจนอะตอม [1]

2.1.3.2 ตัวชี้วัดแก๊สฐานสีย้อมรีดอกซ์ร่วมกับสารกึ่งตัวนำและตัวให้อิเล็กตรอน

1. ลูโค เมทิลีนบลู/ไทเทเนี่ยม ไดออกไซด์-เซอีนฟิล์ม/กลีเซอรอล

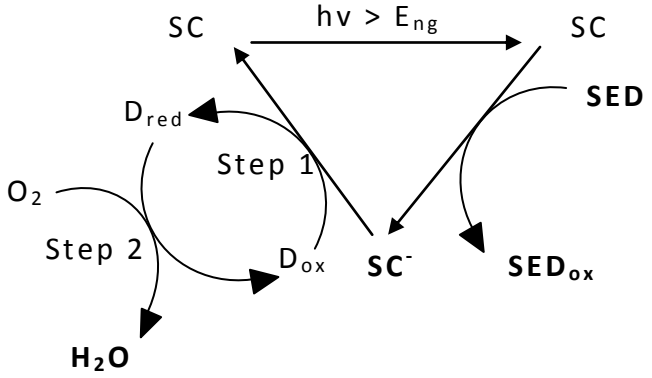
เมื่อกระตุ้นด้วยแสงอัลตร้าไวโอเลตของไทเทเนี่ยมไดออกไซด์-เซอีนฟิล์ม พบว่าจะทำให้เกิดคู่ของอิเล็กตรอนโฮล์ ซึ่งเป็นรู สามารถถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย และไม่ผันกลับ เมื่อมีตัวให้อิเล็กตรอนแก่กลีเซอรอล จะส่งอิเล็กตรอนที่กระตุ้นด้วยแสงเพื่อสะสมในอนุภาคของสารกึ่งตัวนำ (TiO_2) โดยอิเล็กตรอนดังกล่าวจะรีดิวซ์เมทิลีน บลู (MB) ซึ่งมีสีน้ำเงินกลายเป็นลูโค-เมทิลีน บลู (LMB) ซึ่งสีจางลงจนหายไป สีย้อมรีดอกซ์ในรูปรีดิวซ์ดังกล่าวพร้อมที่จะถูกออกซิไดซ์กลับมาเป็นเมทิลีน บลูโดยออกซิเจ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาสีย้อมรีดอกซ์ระหว่างลูโค เมทิลีน บลู และออกซิเจนโดยมีไทเทเนี่ยมออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำและกลีเซอรอลเป็นตัวให้อิเล็กตรอน [1]

2. ลูโค-เมทิลีน บลู/ทิน (IV) ไดออกไซด์-ไฮดอกซิเอทิล เซลลูโลสฟิล์ม/กลีเซอรอล

จากกระตุ้นด้วยแสงอัลตร้าไวโอเลตของ (IV) ไดออกไซด์ (SnO_2)-ไฮดรอกซีเอทิล เซลลูโลสฟิล์ม พบว่าจะเกิดคู่ของอิเล็กตรอนโฮล์ [SnO_2*(e^-,h^+) โดยรูที่เกิดจากกระตุ้นด้วยแสง สามารถถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย และไม่ผันกลับเมื่อมีตัวให้อิเล็กตรอนได้แก่ กลีเซอรอล จะส่งอิเล็กตรอนที่กระตุ้นด้วยแสงเพื่อสะสมในอนุภาคของสารกึ่งตัวนำ (SnO_2) โดยอิเล็กตรอนดังกล่าวจะรีดิวซ์เมทิลีน บลู ซึ่งมีสีน้ำเงินกลายเป็นลูโค-เมทิลีน บลู ซึ่งสีจางลงจนหายไป สีย้อมรีดอกซ์ในรูปรีดิวซ์ดังกล่าวพร้อมที่จะถูกออกซิไดซ์กลับมาเป็นเมทิลีน บลูโดยออกซิเจน ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาสีย้อมรีดอกซ์ระหว่างลูโค เมทิลีน บลู และออกซิเจน โดยมีทิน ไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำและกลีเซอรอลเป็นตัวให้อิเล็กตรอน [1]

กลไกการทำงานของตัวชีวัดแก๊สฐานสีย้อมรีดอกซ์ร่วมกับสารกึ่งตัวนำและตัวให้อิเล็กตรอน กับการบรรจุแบบปรับสภาพบรรยากาศ

2.1.3.3 ตัวชีวัดแก๊สฐานสารประกอบเชิงซ้อนโลหะ

รูปแบบของตัวชี้วัดแก๊สฐานสารประกอบเชิงซ้อนโลหะ(metal complex-base gas indicatoe) สามารถเตรียมในถุงเพ้าช์พีอีไมโอโกลบินดูดซับอะกาโรส (myoglobin-adsorbed agarose PE pouch)

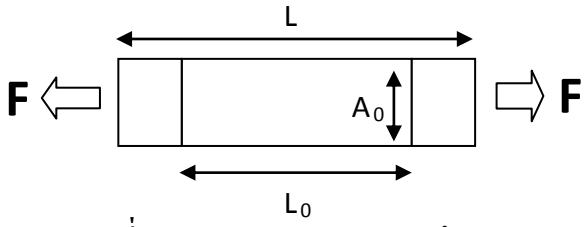
2.1.3.4 ตัวชีวัดแก๊สฐานสีย้อมพีเอช

เนื่องจากคาร์บอนไดออกซ์เมื่อแพร่ผ่าน ซึมผ่าน หรือรั่วผ่านจากภายในบรรจุภัณฑ์ปรับสภาพบรรยากาศออกสู่ภายนอก ส่งผลให้กรดคาร์บอนิคภายในช่องว่างเหนือผลิตภัณฑ์ลดลง ตัวชี้วัดแก๊สฐานสีย้อมพีเอช (pH dye base gas indicator) ซึ่งใช้บรอโมไทมอลบลูเป็นสีย้อมพีเอช พบว่าตัวชี้วัดดังกล่าวจะเปลี่ยนสีจากเหลืองเป็นเขียวและน้ำเงินในที่สุด

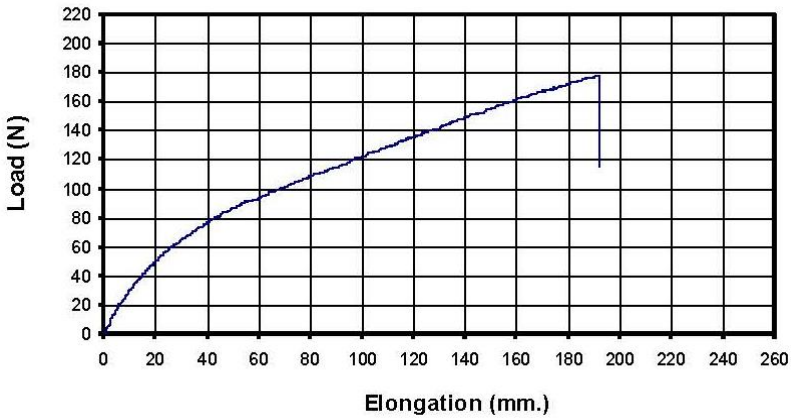
2.2 การทดสอบสมบัติทางกล

2.2.1 การทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile test)

การทดสอบแรงดึงถือว่าเป็นที่นิยมสำหรับหารทดสอบสมบัติทางกลพื้นฐานของวัสดุ ในการทดสอบเป็นการให้แรงในทิศทางตรงกันข้ามกันเพื่อสร้างแรงดึงให้กับชิ้นงานทดสอบ ถึงแม้การทดสอบประเภทนี้จะใช้ทดสอบวัสดุได้หลากหลายประเภท แต่ที่จริงแล้วการทดสอบแรงดึงจะใช้ในการทดสอบโลหะและพอลิเมอร์เป็นส่วนใหญ่ ผลที่ได้เบื้องต้นจากการทดสอบคือ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับระยะทาง ซึ่งอาจจะมีรูปร่างแตกต่างกันไปแล้วแต่ชนิดของวัสดุในการทดสอบและสภาวะ (ความเร็ว, อุณหภูมิ) ที่ทำการดึง



รูปที่ 2.8 หลักการทดสอบแรงดึง [8]



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับระยะยืดตัว [7]

จากแรงและระยะทางที่ได้ สามารถนามาคำนวณค่า tensile parameters ต่าง ๆ ได้ดังนี้

Tensile stress = แรง (N) / พื้นที่หน้าตัดบริเวณตรงกลาง (m^2)

(ความเค้น) $= F / A_{\perp}$ } (N/m^2)

(MPa)

Tensile strain = ระยะยืด / ระยะความยาว gauge เริ่มต้น

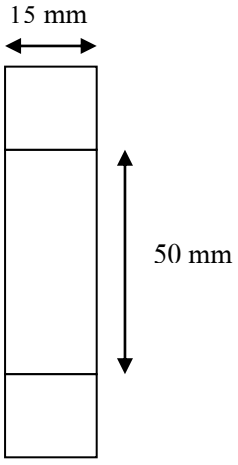
(ความเครียด) $= \Delta L / L_0$ (limensionless)

Elongation (การยืดตัว) = ระยะยืด (ΔL), mm

Tensile Modulus (ความแกร่ง) = Stress / Strain (MPa)

ความเครียด (strain) จะใช้ค่า ΔL ต่อ L_0 ซึ่งต้องระวังด้วยว่าค่าที่ใช้ต้องเป็นค่าที่มาตรฐาน กล่าวคือ ΔL ควรวัดโดยใช้ extensometer จะแม่นยำ กว่าโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่วัสดุทดสอบเป็นยางที่จะยืดตัวได้มากจนเข้าสู่บริเวณรอยคอดของชิ้นงาน อย่างไรก็ตามกรณีที่เป็นพลาสติกแข็งอาจจะอนุโลมให้ ใช้ระยะเดินทางของมือจับ (grip) เป็น ΔL แทนได้ เนื่องจากพลาสติกแข็งมักจะยืดตัวได้น้อยและฉีกขาดก่อน จะเกิดการยืด

ส่วนค่า L_0 นั้นต้องดูตามมาตรฐานของ standard method ที่ใช้ทดสอบ (ASTM D638, ASTM D882, JIS 2000 ISO, DIN) ซึ่งแต่ละมาตรฐานจะมีขนาดชิ้นงานไม่เท่ากัน และมีระยะ gauge ไม่เท่ากัน และที่สำคัญต้องไม่เข้าใจผิดว่า L_0 คือระยะระหว่าง grip หรือ ระยะระหว่างรอยคอด ซึ่งถ้าใช้ค่า L_0 ในการคำนวณ strain ไม่ถูกต้อง จะทำให้ค่า strain และ modulus ที่ได้คลาดเคลื่อน และอาจมีปัญหาในการนำไปใช้อ้างอิงกับตัวอย่างข้างนอก



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างขนาดและรูปทรงชิ้นงานสาหรับทดสอบแรงดึงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า [7]

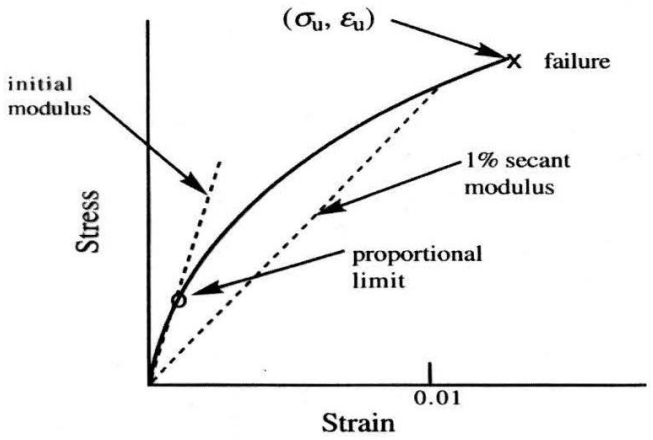
2.2.1.1 ค่าการทนแรงดึง

การรายงานผลของการทดสอบค่าการทนแรงดึงซึ่งจะแสดงเป็นค่าของ tensile strength ซึ่งหมายถึงค่า maximum tensile stress หรือจะรายงานผลค่า tensile strength ที่จุดใด ๆ ก็ได้ เช่นที่จุดคราก (yield

point) จะได้ tensile strength at yield หรือที่จุดขาดจะได้ tensile strength break ส่วนค่าว่า ultimate tensile stress (หรือ strength) จะหมายถึงค่า strength หรือ stress ที่จุดสูงสุดของกราฟ ซึ่งอาจจะเป็นที่ break point หรือ yield point ก็ได้

2.2.1.2 ค่ามอดูลัส

ค่ามอดูลัสของวัสดุเป็นค่าที่แสดงถึงการต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเมื่อได้รับแรงกระทำ สามารถคำนวณได้จากความเค้นและความเครียด คำนวณได้หลายวิธี ได้แก่ มอดูลัสแบบแทนแจนต์ (Tangent modulus) ซึ่งคำนวณได้จากค่าความชันของกราฟระหว่างความเค้นและความเครียดของพลาสติกที่จุดต่างๆ มอดูลัสของความหยุ่น (Elastic modulus) หรือมอดูลัสของยัง (Young modulus) วิธีนี้เหมาะสำหรับพลาสติกที่แข็งที่แสดงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงในช่วงแรก ในบางครั้งการคำนวณแบบอิลาสติกอาจไม่สามารถคำนวณได้ถ้าค่าความเครียดต่ำ เช่นพลาสติกประเภทยาง จึงใช้ค่ามอดูลัสแบบซีแคนต์ (Secant modulus) เข้ามาใช้แทน ซึ่งได้จากอัตราส่วนความเค้นต่อความเครียดที่วัดจากช่วงต่างๆ ในเส้นกราฟ รูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การหาค่ามอดูลัสในแบบต่างๆ [10]

2.2.1.3 จุดคราก (Yield point)

จุดครากเป็นค่าการประมาณการจุดที่วัสดุเปลี่ยนรูปร่างแบบหยุ่นตัวเปลี่ยนแปลงเป็นรูปร่างแบบถาวร จุดครากสามารถหาได้จากจุดที่กราฟความสัมพันธ์มีค่าความชันเท่ากับศูนย์หรือจุดที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของความเค้นแต่มีการเปลี่ยนแปลงความเครียด ซึ่งเมื่อทราบถึงจุดครากแล้วค่าความเค้นและความเครียด ณ จุดคราก จะหาได้จาการลากเส้นตรงไปตัดแกนนอนและแกนตั้ง

2.2.1.4 ค่าความต้านทานแรงสูงสุด (Strength) หรือความแข็งแรงของวัสดุ

เป็นค่าความต้านทานแรงสูงสุดของวัสดุ ซึ่งอาจจะเป็นจุดครากหรือจุดที่เกิดการแตกหักก็ได้ สามารถหาได้จากค่าความเค้น ณ จุดสูงสุดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในรายงานควรระบุว่าเป็นความแข็งแรงสูงสุด ณ จุดใด

2.2.1.5 ความเค้นและความเครียด ณ จุดแตกหัก (Stress and Strain at Break)

ค่าความเค้นและความเครียดคือค่าของจุดที่ชิ้นงานเกิดการแตกหักเสียหายในการทดสอบ ซึ่งในบางกรณีถือว่าเป็นค่ากำลังวัสดุหรือค่าความต้านทานแรงสูงสุด

สำหรับพฤติกรรมของกราฟ แรง กับ ระยะทาง (หรือ stress – strain) ที่เกิดขึ้นในแต่ละวัสดุ แต่ละประเภทนั้น จะแตกต่างกันออกไป

ก. วัสดุบางตัวจะนิ่ม และ ไม่แข็งแรง (soft and weak) พลาสติกประเภทนี้จะมีค่ามอดูลัสแคว้าม เค้น ณ จุดครากที่ต่ำ ค่าความเครียด ณ จุดขาดมีค่าปานกลาง เช่น เทียนไข พาราฟินส์ หรือ Wax

ข. วัสดุบางตัวจะนิ่มแต่เหนียว (soft and tough) พลาสติกประเภทนี้จะมีค่ามอดูลัสและค่าความเค้น ณ จุดครากที่ต่ำ ค่าความเค้นและความเครียด ณ จุดขาดที่สูง เช่น ยางธรรมชาติ NR

ค. วัสดุบางตัวจะแข็งแต่เปราะ (hard and brittle) พลาสติกประเภทนี้จะมีค่ามอดูลัสสูงและค่าความเครียด ณ จุดขาดต่ำ วัสดุจะเกิดการครากได้หรือไม่ก็ได้ เช่น PS, PMMA

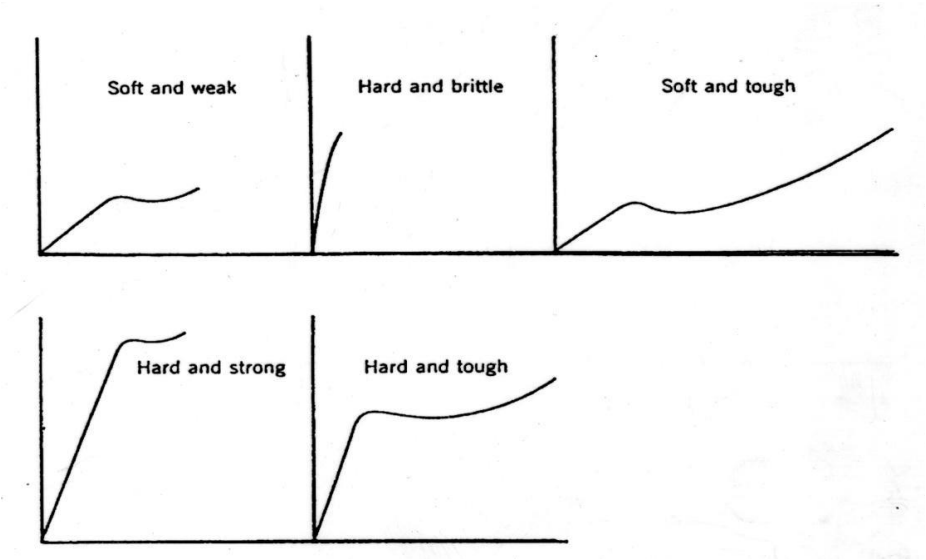
ง. วัสดุบางตัวจะแข็งและแข็งแรง (hard and strong) พลาสติกประเภทนี้จะมีค่ามอดูลัสค่าความเค้น ณ จุดครากและค่าความเค้น ณ จุดขาดสูง แต่มักจะมีค่าความเครียด ณ จุดขาดปานกลาง เช่น thermo sets

จ. วัสดุบางตัวจะแข็งและเหนียว (hard and tough) พลาสติกประเภทนี้จะมีค่ามอดูลัส ค่าความเค้น ณ จุดคราก ค่าความเค้น ณ จุดขาดและค่าความเครียด ณ จุดขาดสูง เช่น Nylon, PC, Kevlar

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางด้านความเค้นและความเครียดของพลาสติกประเภทต่างๆ [8]

ประเภทของพลาสติก	มอดูลัส	ความเค้น ณ จุดคราก	ความเค้นสูงสุด	ระยะยืดตัว ณ จุดขาด
นิ่มและไม่แข็งแรง	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ	ปานกลาง
นิ่มและเหนียว	ต่ำ	ต่ำ	ปานกลาง	สูง
แข็งและเปราะ	สูง	ไม่ชัดเจน	ปานกลาง	ต่ำ
แข็งแรง	สูง	สูง	สูง	ปานกลาง
แข็งและเหนียว	สูง	สูง	สูง	สูง

ซึ่งแต่ละชนิดจะมีกราฟทั่วไปเป็นลักษณะดังนี้



รูปที่ 2.12 ลักษณะกราฟแรงดึง ระยะทาง ของวัสดุพอลิเมอร์กลุ่มต่างๆ [7]

2.3 สี (Color)

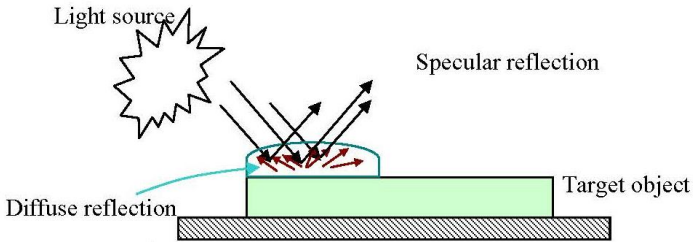
สีเป็นสมบัติอย่างหนึ่งของแสง ในการพูดถึงสีหรือการอธิบายสี การบรรยายอาจจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้พูดหรือผู้บรรยาย ดังนั้นการวัดและบรรยายสีในเชิงวิชาการจึงต้องมีการจัดมาตรฐานเพื่อเป็นการลดความไม่เป็นกลาง (bias) ของผู้บรรยายสีของวัสดุนั้น ๆ ปัจจัยที่ทำให้เกิดสีมีอยู่ 3 ประเภท คือ

2.3.1 แหล่งกำเนิดแสง (light source)

แหล่งกำเนิดแสงมีผลอย่างมากในการบรรยายสีของวัตถุ แหล่งกำเนิดแสงถ้ามีแสงแตกต่างจากแสงขาว เมื่อตกกระทบกับวัตถุจะทำให้แสงที่สะท้อนกลับมาเกิดสีที่แตกต่างไป เช่น แสงจากหลอด incandescent จะให้แสงสีส้ม ในขณะที่ Fluorescent จะให้แสงขาวเย็น

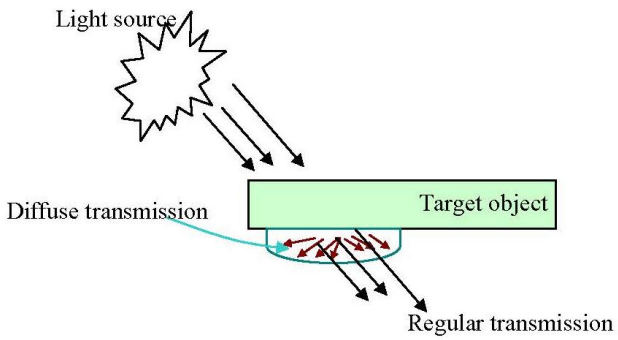
2.3.2 วัตถุที่มอง (specimen) วัตถุที่ทึบแสง (opaque)

จะให้การสะท้อนของแสงเพื่อเกิดสีแตกต่างจากวัตถุที่โปร่งแสง (translucent) และโปร่งใส (transparent) ลักษณะของการตกกระทบของแสงบนวัตถุ



รูปที่ 2.13 ลักษณะการสะท้อนแสงของวัตถุทึบแสง [11]

เมื่อวัตถุทึบแสง ได้รับแสงกระทบจากภายนอก การสะท้อนแสงจะมีอยู่ 2 ส่วนคือ การสะท้อนแสงเสมือนจริง (specular reflection) และการสะท้อนแสงกระจาย (diffuse reflection) การสะท้อนแสงเสมือนจริงคือการสะท้อนแสงกลับจากวัตถุที่เหมือนและมีขนาดใกล้เคียงกับแสงตกกระทบแต่ทิศทางตรงข้าม การสะท้อนแสงเสมือนจริงจะแสดงออกมามากที่สุดเพียง 4% ของการสะท้อนแสงทั้งหมด (total reflection) ซึ่งจะเกิดในกรณีที่วัตถุมีผิวมันเงา 100% ดังนั้นการสะท้อนแสงเสมือนจริงในวัตถุที่มีผิวมันเงาจะมากกว่าวัตถุผิวด้านและผิวขรุขระตามลำดับ ส่วนการสะท้อนแสงกระจายเป็นการสะท้อนแสงที่บริเวณผิวจากวัตถุไปทุกทิศทางและมีขนาดเล็กกว่าแสงที่ตกกระทบมาก ซึ่งการสะท้อนแสงกระจายนี้เองเป็นส่วนของการสะท้อนที่ใช้ในการวัดเฉดสี

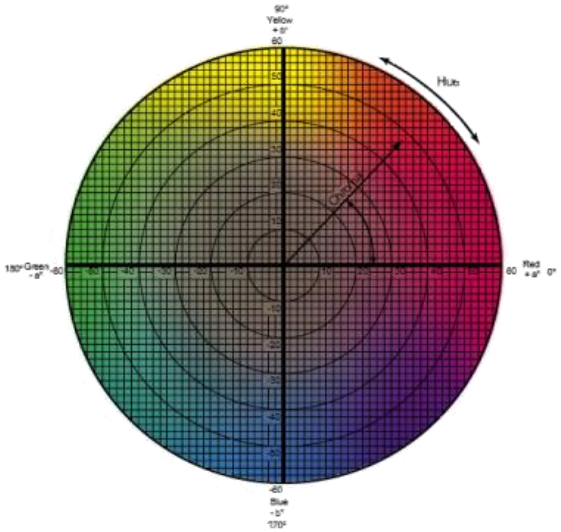


รูปที่ 2.14 ลักษณะการทะลุผ่านแสงของวัตถุโปร่งแสงและโปร่งใส [11]

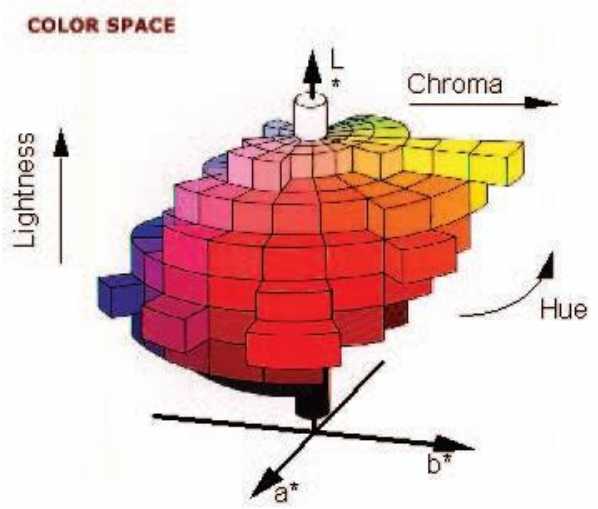
2.3.3 ผู้สังเกตการณ์ (observer)

ผู้สังเกตการณ์นั้นมีผลอย่างยิ่งต่อการบรรยายสีที่มองเห็น ผู้สังเกตการณ์ต่างคนจะบรรยายลักษณะสีต่างกันขึ้นอยู่กับสรีระทางกายภาพของตาแต่ละคน ในร่างกายคนจะมีเซลล์อยู่ 2 ชนิดที่เกี่ยวข้องกับการรับสี คือ เซลล์รูปแท่งและเซลล์รูปโคน เซลล์รูปแท่งจะตอบสนองได้ดีกับการมองเห็นในที่เกี่ยวกับความมืดสว่าง ส่วนเซลล์รูปโคนจะตอบสนองต่อสีที่มองเห็น

จากหลักการพื้นฐานเรื่องสีข้างต้น จึงได้มีการพัฒนาอุปกรณ์เพื่อใช้วัดสีที่มีมาตรฐานและลดความไม่เป็นกลางเนื่องจากปัจจัยของแหล่งกำเนิดแสงและผู้สังเกตการณ์ องค์กรที่มีบทบาทสำคัญในการกำหนดมาตรฐานด้านสี คือ Commission International de l'Eclairage (CIE) หรือในชื่ออังกฤษว่า International Commission on Illumination มีสำนักงานใหญ่อยู่ในประเทศฝรั่งเศส องค์กรนี้ได้กำหนดมาตรฐานการวัดสีซึ่งเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างในวงการวิชาการและการวิจัย คือระบบ CIE Lab scale ในระยะเริ่มแรก CIE ได้กำหนดสเกลการวัดสีเป็น X-Y-Z ซึ่งใช้บรรยายสีแดง (Red) เขียว (Green) และ น้ำเงิน (Blue) แต่เนื่องจากระบบสีดังกล่าวไม่สามารถบรรยายถึงลักษณะความมืด สว่างของสีได้ CIEได้พัฒนาต่อมาเป็นระบบ X-Y-L ซึ่งบรรยายถึงค่าสีแดง เขียว และความสว่าง (lightness) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามระบบดังกล่าวก็ยังขาดส่วนที่บรรยายถึงค่าสีน้ำเงิน CIE จึงได้พัฒนาระบบสีต่อมาจนเป็นระบบที่ยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน คือระบบ L*-a*-b* ซึ่งเป็นระบบการบรรยายสีแบบ 3 มิติ โดยที่แกน L* จะบรรยายถึงความสว่าง (lightness) จากค่า +L* แสดงถึงสีขาว จนไปถึง –L* แสดงถึงสีดำ แกน a* จะบรรยายถึงแกนสีจากเขียว (-a*) ไปจนถึงแดง (+a*) ส่วนแกน b* จะบรรยายถึงแกนสีจากน้ำเงิน (-b*) ไปเหลือง (+b*) ลักษณะการบรรยายสีของ CIE นอกจากนี้ บริษัท Hunter lab ในอเมริกาก็เป็นอีกองค์กรหนึ่งซึ่งทำการวิจัยและพัฒนาระบบการวัดสี จนในที่สุดได้ระบบของ Hunter lab เอง ซึ่งเรียกว่า การวัดสีระบบ Hunter lab scale ซึ่งบรรยายแกนใน 3 มิติเช่นเดียวกับระบบ CIE โดยที่ Hunter lab จะใช้สเกล L-a-b บรรยายลักษณะสีเช่นเดียวกับ L*-a*-b* ของ CIE ข้อแตกต่างระหว่างระบบสีของ CIE และ Hunter lab คือสูตรการคำนวณค่าสี ซึ่งทั้ง L-a-b และ L*-a*-b* ล้วนมีพื้นฐานการคำนวณมาจากค่าจากระบบ X-Y-Z ทั้งสิ้น



รูปที่ 2.15 การบรรยายสีในระบบ CIE Lab มองในระนาบ 2 มิติ: Hue บรรยายถึงเฉดสี และ Chromaบรรยายถึงความมันวาวหรือความเข้มของโทนสี [11]



รูปที่ 2.16 การบรรยายสีพื้นในระบบ CIE Lab ในรูป 3 มิติ [11]

อุปกรณ์วัดสีที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ spectrophotometer อุปกรณ์ดังกล่าวจะใช้แสงจากแหล่งประดิษฐ์ (illuminant) คือแสงที่แต่งค่าความเข้มแสง (intensity) หรืออุณหภูมิของสี (color temperature) แล้ว ตัวอย่างของแหล่งแสงประดิษฐ์ได้แก่ D65 – แสงเที่ยงวัน (noon daylight) A- แสงส้มจากหลอดทังสเตน C – แสงกลางวันเฉลี่ย (average daylight) CWF – แสงขาวเย็นจากหลอดฟลูออเรสเซ็น (cooled white fluorescent) อุปกรณ์วัดสี spectrophotometer ในท้องตลาดมีหลายรุ่นและหลายยี่ห้อ ที่นิยมใช้ได้แก่ ของ Hunter lab, Nikon และ Minolta (รูปที่ 2.20) ซึ่ง spectrophotometer บางรุ่นสามารถ

บอกค่าสีได้หลายสเกลในเครื่องเดียว เช่น X-Y-Z L-a-b L*-a*-b* รวมไปถึง CMYK (CrayonMagenta-Yellow-Black)ซึ่งเป็นระบบสีนิยมใช้ในเกี่ยวกับสิ่งพิมพ์

รูปที่ 2.17 Spectrophotometer แบบพกพา [13]

นอกจากการวัดสีโดยใช้ Spectrophotometer แล้ว ยังมีเทคนิคอีกอย่างหนึ่งในการวัดสีซึ่งต้นทุนต่ำกว่าการใช้ Spectrophotometer คือ การใช้สแกนเนอร์ร่วมกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปเพื่อตรวจสอบค่าสี โปรแกรมสำเร็จรูปบางโปรแกรมเช่น Photoshop สามารถบอกถึงค่าสีในระบบต่าง ๆ ของภาพที่ได้จากสแกนเนอร์ได้ด้วย ตัวอย่างการใช้งานโปรแกรม Photoshop เพื่อหาค่าสีในระบบต่าง ๆ

อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้จะต้องมีการสอบเทียบ (calibrate) ค่าสีที่อ่านได้ก่อนเทียบกับอุปกรณ์วัดสีที่มีความเที่ยงตรง เนื่องจากการอ่านค่าสีโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปนั้นมีปัจจัยหลายอย่างที่อาจส่งผลต่อการคำนวณสี เช่น คุณภาพของอุปกรณ์สแกนภาพ หรือ การ์ดจอประมวลภาพในคอมพิวเตอร์ เป็นต้น

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Galagan et al. [14] ได้ทำการศึกษาคุณลักษณ์ของเมทิลีนบลูในฟิล์ม polyacrylate สำหรับการนำไปใช้งานในการตรวจสอบเวลาและอุณหภูมิ ที่มีความสามารถในการตรวจสอบโดยการเปลี่ยนสีจากไม่มีสีไปเป็นสีน้ำเงินเมื่อสัมผัสกับอากาศ โดยใช้การควบคุมการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นโดยการแพร่ของอากาศไปมีผลกับโครงสร้างทางเคมีของพอลิอะคลีเลท โดยการกระตุ้นจากพลังงานของการแพร่คำนวณจากสมการของอาเรเนียสกับการเพิ่มขึ้นทางของโครงสร้างพอลิอะคลีเลท ผลเทียบเคียงกับก๊าซเฉื่อยของ polyacrylate ที่แตกต่าง เมทิลีนบลูจะมีลักษณะที่เป็นเอกลักษณ์คือ จะเปลี่ยนแปลงสีภายใต้ปฏิกิริยาออกซิเดชั่น จึงสามารถนำไปใช้ในการสร้างเซ็นเซอร์ที่ราคาต้นทุนต่ำสำหรับการ

ตรวจสอบเวลาและอุณหภูมิ Yulia Galagan และ Wei-Fang Su [15] ได้ทำการศึกษา การผันกลับได้ของเมทิลีนบลูใน acrylate เมทิลีนบลูสามารถเปลี่ยนรูปได้เมื่อ benzyl dimelthyl ketal (BDK) ได้รับการฉายแสงยูวีที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร การเกิดปฏิกิริยาของเมทิลีนบลูกับอนุมูลของเมทิลซึ่งได้จากกระบวนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นกับอากาศ และขั้นตอนการฉายแสงในสภาวะที่มีไนโตรเจน ซึ่งผลการทดลองที่ได้สามารถนำไปใช้งานที่มีประโยชน์ได้หลากหลาย ในเรื่องของเป็นตัวเซ็นเซอร์ ข้อมูลการเก็บ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิค และอื่นๆ Khankaew, et al. [17] ได้ทำการศึกษาสารกึ่งตัวนำชนิดนาโนและตัวให้อิเล็กตรอนกับการเปลี่ยนแปลงสีที่ได้รับการกระตุ้นด้วยแสงยูวี สำหรับตัวชี้วัดออกซิเจนชีวภาพ โดยใช้ไทเทเนี่ยมออกไซด์กับซิงออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำ มีตัวให้อิเล็กตรอนคือกลีเซอรอลและซอบิทอล ในสารละลายเมทิลเซลลูโลส ใช้เทคนิคการขึ้นรูปเป็นฟิล์มฉลากในการศึกษาผลกระทบของตัวชี้วัดออกซิเจนชีวภาพที่มีสารกึ่งตัวนำชนิดนาโนและตัวให้อิเล็กตรอนสำหรับการกระตุ้นด้วยแสงยูวี หลังจากเมื่อกระตุ้นด้วยแสงยูวีฉลากจะเปลี่ยนจากไม่มีสีเป็นสีส้มซึ่งจะพร้อมสำหรับการใช้ในการตรวจวัดออกซิเจน เมื่อฉลากได้สัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ (20.9%) จะเปลี่ยนสีกลับไปเป็นสีเริ่มต้นอีกครั้งหนึ่ง