

บทที่ 2

ทบทวนเอกสาร

2.1 สีย้อมและการย้อมสี

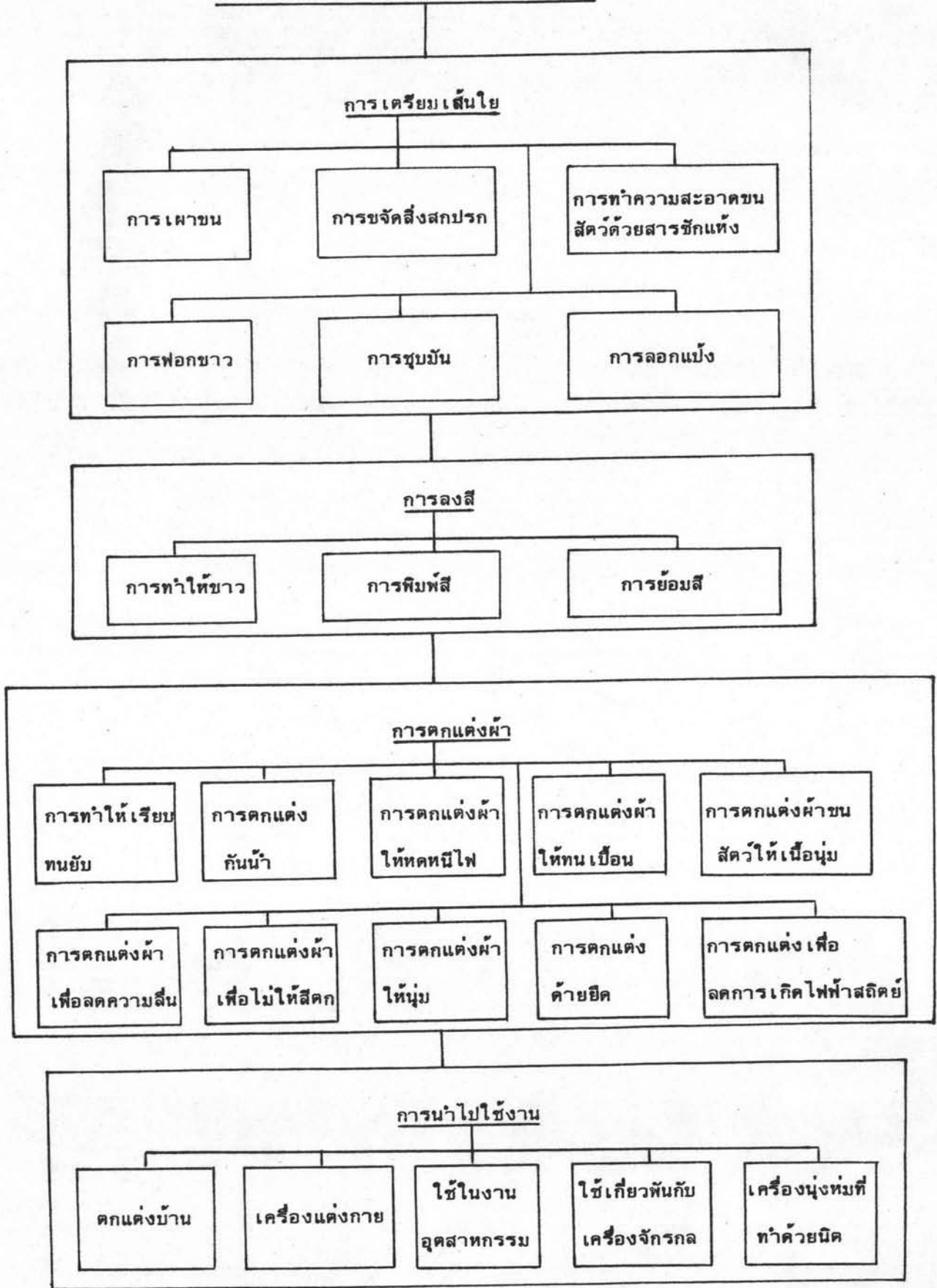
อุตสาหกรรมประเภทสิ่งทออาจจะแบ่งอย่างกว้าง ๆ ได้เป็น 2 ประเภท คือ โรงทอหรือโรงปั่นและโรงย้อม โรงทอหรือโรงปั่นจะทำการผลิตเส้นด้ายและเส้นผ้าตามกรรมวิธีต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใยและความต้องการของท้องตลาด ด้ายหรือผ้าที่ผ่านการปั่นหรือการทอ เสร็จแล้วจะถูกนำเข้าสู่โรงย้อม เพื่อจัดเตรียมทำการย้อมและตกแต่งต่อไป

ผ้าหรือด้ายที่ออกจากโรงทอหรือโรงปั่น จะต้องถูกนำมาจัดเตรียมด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ เช่น การเผาขน การลอกแป้ง ฯลฯ เพื่อให้เส้นใยมีความสะอาดและความพร้อมที่จะดูดซึมและติดสีย้อมในขบวนการย้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากนั้นจึงนำเส้นใยที่ผ่านการย้อมแล้ว เข้าสู่ขบวนการตกแต่งตามวัตถุประสงค์ของชิ้นงานที่จะนำไปใช้ต่อไป (ดูรูปที่ 2.1)

น้ำเสียที่ออกมาจากอุตสาหกรรมประเภทสิ่งทอนี้จะมาจากโรงย้อมเป็นส่วนใหญ่ ขบวนการใช้น้ำและทิ้งน้ำอื่น ๆ ที่สำคัญนอกจากขบวนการย้อมสีแล้ว ได้แก่ น้ำทิ้งที่มาจากขบวนการเตรียมสิ่งทอ เพื่อให้พร้อมสำหรับการย้อมอีกด้วย แต่ในงานวิจัยชิ้นนี้จะ เน้นหนักถึงน้ำทิ้งที่ออกมาจากขบวนการย้อมสี เท่านั้น

น้ำที่ปล่อยออกมาจากขบวนการย้อมสีจะมีปริมาณมากน้อยเท่าไรนั้นไม่อาจจะระบุให้ชัดเจนลงไปได้ แต่สิ่งซึ่งน่าจะพิจารณาเป็นอันดับแรกคือกรรมวิธีในการย้อม อันได้แก่ การย้อมในหม้อย้อมซึ่งเป็นแบบครั้งคราว (batch) หรือย้อมในเครื่องย้อมแบบต่อเนื่อง การย้อมแบบครั้งคราวนี้ให้ปริมาณน้ำน้อยแต่ปริมาณความเข้มข้นของสิ่งสกปรกสูง ส่วนเครื่องย้อมแบบต่อเนื่องให้ผลตรงกันข้าม แต่ก็ไม่อาจจะสรุปได้ว่ามีปริมาณมลสาร (pollutant) เท่ากันหรือไม่ ทั้งนี้เพราะกรรมวิธีการย้อมแต่ละแบบมีการคิดสับเนื้อผ้าแตกต่างกัน ตัวสีย้อมหรือสารช่วยย้อมต่าง ๆ จึงหลุดลอยออกมาไม่เท่ากัน

เส้นใยทุกชนิดทั้งที่อยู่ในรูป เส้นด้ายหรือผืนผ้า



รูปที่ 2.1 แสดงผังในการผลิตของอุตสาหกรรมประเภทสิ่งทอ

การที่จะทำความเข้าใจลักษณะของน้ำทิ้งจากโรงย้อมได้อย่างกว้าง ๆ นั้นจำเป็นต้องทำความเข้าใจถึงเรื่องดังต่อไปนี้เสียก่อน

2.1.1 การเตรียมวัสดุสิ่งทอสำหรับการย้อม

เส้นด้ายหรือผ้าที่ผลิตออกจากโรงกลั่นหรือโรงทอแล้วยังมีสิ่งเจือปน (impurities) ต่าง ๆ อยู่อีกมาก เช่น แมันที่ใช้ลงเส้นยืน ชีผึ้ง กาว สีธรรมชาติ ฯลฯ⁽⁵⁾ สารพวกนี้จะก่อให้เกิดอุปสรรคในการย้อม ทำให้น้ำย้อมไม่สามารถซึมเข้าเส้นใยได้อย่างทั่วถึง ผลที่ได้จากการย้อมจะต่าง ดังนั้นก่อนที่จะนำด้ายหรือผ้าไปทำการย้อมจึงต้องมีขบวนการกำจัดเอาสิ่งเจือปนต่าง ๆ เหล่านี้ออกเสียก่อน

การเอาสิ่งเจือปนซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการย้อมสีของเส้นใยออกนี้ เรียกกันว่า "การเตรียมวัสดุสิ่งทอ" ไม่ว่าจะเป็นการย้อมหรือการพิมพ์ต่างก็ต้องการด้ายหรือผ้าที่สะอาดหมดจดที่สุดและให้น้ำซึมเข้าได้ง่ายที่สุด ขบวนการเตรียมวัสดุสิ่งทอนี้มีหลายขั้นตอน แตกต่างกันตามชนิดของเส้นใยและลักษณะของผ้า ขบวนการที่จะกล่าวต่อไปนี้เน้นหนักไปในการเตรียมผ้าฝ้ายซึ่งเป็นเส้นใยที่มีสิ่งเจือปนมากกว่าเส้นใยชนิดอื่น ๆ ทำให้สรุปได้ว่า ผลการศึกษานี้จะครอบคลุมขบวนการเตรียมวัสดุสิ่งทออื่น ๆ ได้แทบทั้งหมด

การเอาสิ่งเจือปนออกจากวัสดุสิ่งทอหรือการทำความสะอาดวัสดุสิ่งทอ อาจจะทำในขั้นตอนที่เป็นด้ายหรือเป็นผ้าแล้วแต่จุดประสงค์ในการใช้งาน กรรมวิธีในการทำความสะอาดที่สำคัญได้แก่ การลอกแมัน (desizing) การขจัดสิ่งสกปรกพวกไขมัน น้ำมัน ชีผึ้ง (scouring) และการฟอกขาว (bleaching)

2.1.1.1 การลอกแมัน (desizing)

ผ้าฝ้ายเมื่อทอเสร็จแล้วจะมีปลายเส้นใยโผล่ขึ้นมาบนผิวผ้ามาก จะเป็นอุปสรรคต่อการย้อมสี ทำให้สีที่ได้จากการย้อมไม่เสมอ จึงต้องนำไปเผาเอาปลายขนเหล่านี้ออกไปเสียก่อน จากนั้นจึงนำผ้าที่เผาขนแล้ว เข้าสู่ขบวนการลอกแมัน

แป้งที่ติดอยู่บนเนื้อผ้ามาจากการลงแป้งบนด้ายในขบวนการทอผ้าทำให้ เส้นด้ายแข็งตัวพอที่จะทนทานต่อการเสียดสีของเครื่องทอ เมื่อทอเป็นผ้าแล้วก่อนนำไปย้อมต้องนำไปลอกแป้งออกให้หมดเสียก่อน มิฉะนั้นจะเกิดปัญหาในการตกแต่งหรือการย้อมในภายหลัง

การลอกแป้งโดยความหมายทางเทคนิค คือขบวนการที่ทำให้แป้งละลายตัวเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้ สามารถทำได้ด้วยกัน 4 วิธี คือ

- ก. แช่และหมักด้วยกรด (acid-Stuping)
- ข. แช่และหมักโดยอาศัยเชื้อต่าง ๆ (rot-stuping)
- ค. ต้มด้วยสารช่วยย่อย (enzyme desizing)
- ง. ใช้สารออกซิไดซ์ (oxidizing agent)

การลอกแป้งจะกระทำด้วยวิธีใดขึ้นอยู่กับทักษะและความสะดวกของเครื่องจักร อุปกรณ์ของแต่ละโรงงาน แต่โดยทั่วไปโรงงานอุตสาหกรรมมักจะกระทำการลอกแป้งโดยใช้สารออกซิไดซ์ ตัวสารที่นิยมใช้กันคือ โซเดียมโบรไมท์ (sodium bromite)⁽⁵⁾ และใช้งานโดยอัดผ้าด้วยน้ำยาที่มีแอสคิฟโบรไมท์และโซดาไฟ ทำการหมักผ้าไว้ 15-20 นาที แล้วจึงทำการซักล้างชะเอาน้ำยาออก

2.1.1.2 การขจัดสิ่งสกปรก (scouring)

หลังจากทำการลอกแป้งที่ติดอยู่ในเส้นใยออกไปแล้ว ขบวนการต่อไปคือการขจัดสิ่งสกปรก ได้แก่คราบน้ำมัน ชีดิน ชีผึ้ง กาว ฯลฯ ให้หมดไปจากเส้นใย

วิธีขจัดสิ่งสกปรกออกจากเส้นใยอาจกระทำได้ด้วยกัน 2 วิธี คือ ในหม้ออัดความดันที่เรียกกันว่าหม้อเคียร์ (kier) หรืออาจใช้ขบวนการแบบต่อเนื่อง โดยใส่น้ำยา ด่าง (ซึ่งนิยมใช้โซดาไฟ) ผสมกับสารลดความตึงผิว (surfactant) เช่น สบู่หรือผงซักฟอกลงในหม้อต้ม ด่างและสารลดความตึงผิวจะทำปฏิกิริยากับวัสดุเจือปนที่ติดอยู่กับเส้นใยให้ละลายออกมาอยู่ในน้ำ และเมื่อทำการซักล้างจะได้เส้นใยที่มีความสะอาดปราศจากวัสดุ

เจือปนเหล่านี้

2.1.1.3 การฟอกขาว (bleaching)

สิ่งสกปรกทั้งหลายใน เส้นด้ายหรือผ้าส่วนมากจะถูกขจัดออกไปโดยขบวนการลอกแฉังและการขจัดสิ่งเจือปน แต่สิ่งที่ได้จะยังมีสีอัน เป็นสมบัติทางธรรมชาติ อยู่ สีตามธรรมชาตินี้จะมีผลกระทบต่อการย้อมในภายหลัง จึงต้องทำการกำจัดออกเสียก่อน วิธีการกำจัดสีที่ว่านี้เรียกว่า การฟอกขาว ซึ่งถือได้ว่าเป็นการทำความสะอาดขั้นสุดท้ายก่อน นำเส้นใยไปย้อมหรือพิมพ์สีต่อไป

การฟอกขาวอาจจะกระทำได้ 2 วิธีด้วยกันคือ วิธีรีดักชัน (reduction method) และวิธีออกซิเดชัน (oxidation method) วิธีรีดักชันไม่นิยมใช้กันแล้วในปัจจุบัน คงใช้กันแต่วิธีออกซิเดชัน⁽⁷⁾

วิธีออกซิเดชันนี้กระทำได้โดยใช้สารเคมีที่มีอำนาจในการออกซิไดส์ สารเคมีที่นิยมใช้กันคือ โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (NaClO) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และสารประกอบพวกเปอร์ออกไซด์อื่น ๆ การที่จะเลือกใช้สารเคมีตัวใด นั้นขึ้นกับชนิดของเส้นใย เครื่องมือที่ใช้ในการฟอกและความต้องการในการนำสิ่งทอที่ฟอกแล้วไปใช้งาน เช่น ถ้านำเส้นใยไปย้อมสีเข้ม การฟอกก็ไม่จำเป็นต้องฟอกให้เส้นใยขาวมากนัก ในทางตรงกันข้าม การที่จะนำเส้นใยไปย้อมสีอ่อนจำเป็นต้องฟอกให้ขาวสะอาด จึงต้องพิถีพิถันในการเลือกสารเคมีและขบวนการที่ใช้ในการฟอก

เส้นใยที่ผ่านการฟอกด้วยสารเคมีแล้ว เมื่อนำไปซักล้าง จะได้เส้นใยที่สะอาดพร้อมที่จะนำไปย้อมสีหรือตกแต่งต่อไป

2.1.1.4 การชุบมัน (mercerizing)

การชุบมันไม่จัดอยู่ในการทำทำความสะอาดวัสดุสิ่งทอ แต่ยังคงอยู่ในขั้นตอนการเตรียมวัสดุสิ่งทอ วัตถุประสงค์ของขบวนการในขั้นนี้เพื่อที่จะเพิ่มความมันของวัสดุสิ่งทอ ทำให้วัสดุสิ่งทอดูดซึบสีย้อมได้มากขึ้นและ เส้นใยอ่อนนุ่มขึ้น

การชุบมันวัสดุสิ่งทอจะทำกับผืนผ้าโดยจะนำผ้าไปชุบน้ำยา
โซดาไฟ ผ้าจะหดตัวลง จากนั้นจึงใช้เครื่องมือดึงเนื้อผ้าให้ขยายเท่าเดิม และล้าง
โซดาไฟออกโดยเร็วด้วยน้ำ

การชุบมันในผ้าฝ้ายอาจจะทำก่อนหรือหลังการทำความสะดวก
เส้นใยก็ได้ แล้วแต่ว่าวิธีใดจะให้ความสวยงามและความประหยัดมากกว่ากัน

2.1.2 การย้อมสี

เป้าหมายของการย้อมสีโดยทั่วไปแล้วจะมุ่งพิจารณาถึงการย้อมด้วยหรือผืน
ผ้าให้มีสีสม่ำเสมอเหมือนกันตลอด สีย้อมที่ใช้จะต้องติดเส้นใยเข้าไปถึงภายใน จะติดแต่เพียง
ภายนอกเท่านั้นไม่ได้ และสีย้อม เมื่อติดลงบนเส้นใยแล้วจะต้องทนทานต่อการซักล้างดี ไม่หลุด
ลอกออกโดยง่าย

การที่จะทำความ เข้าใจถึงการย้อมสีให้ดีพอเพื่อที่จะบรรลุถึงวัตถุประสงค์
ของการย้อมสีดังกล่าวเป็นงานที่ยาก เพราะนอกจากจะต้องอาศัยความรู้ทางทฤษฎีอย่างละเอียด
แล้ว ยังต้องอาศัยประสบการณ์อีกไม่น้อย ดังนั้นการกล่าวถึงการย้อมสีในงานวิจัยชิ้นนี้จึงมุ่งที่จะ
กล่าวถึงปัจจัยหลักที่เกี่ยวข้องกับการย้อมสีอย่างกว้าง ๆ เพื่อที่จะให้เข้าใจถึงสภาพการย้อมโดย
สังเขป

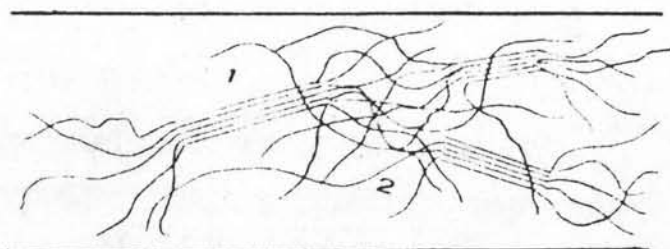
2.1.2.1 เส้นใย

ใยผ้าที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้อาจแบ่งออกได้เป็น 2 หมู่ใหญ่ ๆ
ด้วยกัน คือ ใยธรรมชาติและใยสังเคราะห์

ใยธรรมชาติอาจจะผลิตมาจากพืชหรือสัตว์ก็ได้ ใยธรรมชาติ
ที่ผลิตมาจากพืชได้แก่ฝ้ายและปอ มีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นเซลลูโลส ส่วนใย
ธรรมชาติที่ได้มาจากสัตว์ได้แก่ขนสัตว์และไหมซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นพวก โปรตีน

ใยสังเคราะห์ เป็นเส้นใยที่ผลิตขึ้นจากสารประกอบเคมีโดย
ตรงมืออยู่หลายชนิด ส่วนที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบันได้แก่ โพลีเอไมด์ โพลีเอสเตอร์และโพลี
อากริลิก (4)

เส้นใยผ้าทุกชนิดไม่ว่าจะเป็นใยสังเคราะห์หรือใยธรรมชาติ จะมีลักษณะที่เหมือนกัน ประกอบด้วยโมเลกุลเล็ก ๆ ค่อกันเป็นเส้นยาวเหมือนเชือก เมื่อนำเส้นใยไปดึงยืดจะทำให้โมเลกุลของเส้นใยเรียงตัวดีขึ้น และการเรียงตัวภายในเส้นใย จะแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือส่วนที่โมเลกุลเรียงกันอยู่เป็นระเบียบแน่น กับส่วนที่ไม่เป็นระเบียบและเรียงตัวกันอยู่อย่างหลวม ๆ ⁽⁶⁾ (ดูรูป 2.2)



1. คือส่วนที่เป็นคริสตอลไลต์
2. คือส่วนที่เรียงตัวกันอยู่อย่างหลวม ๆ

รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะการเรียงตัวของเซลลูโลสภายในเส้นใย

ส่วนที่เรียงตัวกันอย่างหลวม ๆ หรืออาจเรียกง่าย ๆ ว่า ช่องว่าง (pore) จะมีส่วนสัมพันธ์กับการเลือกขนาดโมเลกุลของสีย้อมหรือชนิดของสีย้อม เมื่อนำเส้นใยไปแช่น้ำจะเกิดการพองตัวของเส้นใยแต่เฉพาะบริเวณส่วนหลวม ซึ่งเส้นใยแต่ละชนิดจะพองตัวไม่เท่ากัน ดังนั้นขนาดโมเลกุลของสีย้อมที่จะใช้เพื่อซึมแทรกเข้าไปในช่องว่างนี้จึงไม่เท่ากันไปด้วย นี่คือสาเหตุหนึ่งที่ทำให้สีย้อมบางประเภทย้อมเส้นใยบางชนิดไม่ติดหรือติดสีอ่อน ๆ นอกเหนือไปจากคุณสมบัติทางเคมีโดยตรงระหว่างตัวสีกับเส้นใย

2.1.2.2 สีย้อม (dye)

สีย้อมที่นำมาใช้ในการย้อมเส้นใยมีอยู่ด้วยกันมากมายหลายชนิด การที่จะนำสีย้อมใด ๆ มาใช้ย้อมให้ได้ผลดีนั้น ขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใยต้องมีมากกว่าอำนาจการรวมตัวของสีกับน้ำ จะสามารถทำให้เกิดภาวะเช่นนี้ขึ้นได้เมื่อโมเลกุลของสีย้อมมีหมู่อะตอมซึ่งถูกจัดให้เรียงตัวกันในลักษณะที่จะทำให้เกิดการติดติด (substantivity) กับเส้นใยแล้วเกิดบอนด์ (bond) ยึดกันแน่น อาจกล่าวได้อย่างกว้าง ๆ ว่าอิทธิพลเชิงเคมี 4 ชนิดที่ทำให้สีติดกับเส้นใยได้คือ

1. ไฮโดรเจนบอนด์ (Hydrogen bond)

2. แรงแวนเดอวัลส์ (Van der Waals' forces)
3. แรงไอออน (Ionic forces)
4. โควาเลนต์บอนด์ (Covalent bond)

กำลังแรงเหล่านี้มักจะไปทำหน้าที่แค่เพียงลำพัง การดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับโมเลกุลของเส้นใยอย่างน้อยจะต้องประกอบไปด้วยแรง 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งก็อาจจะเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน แรงดูดติดทางเคมีที่จะให้การยึดติดได้ดีที่สุดได้แก่ โควาเลนต์บอนด์ (covalent bond)

การยึดติดของโมเลกุลสีย้อมกับโมเลกุลเส้นใยนอกจากจะเป็นอิทธิพลเชิงเคมีของแรงทั้ง 4 ชนิดแล้ว อิทธิพลด้านเรขาคณิตของโมเลกุลของสีหรืออาจกล่าวง่าย ๆ ว่า รูปร่างและขนาดของโมเลกุลของสีก็มีผลต่อการยึดติดหรือมีผลกระทบต่อการย้อมอย่างมากด้วย เช่น ถ้าโมเลกุลของสีย้อมยิ่งเล็กและยาวเท่าไรก็จะผ่านช่องว่างเข้าไปในเส้นใยได้มากขึ้น เท่านั้นอันจะทำให้การติดสีดีขึ้น หรือถ้าโมเลกุลของสีย้อมมีลักษณะแบนและมีความกว้างมากกว่าความยาวมาก ๆ จะทำให้เกิดการติดสีมีความคงทนสูงมากขึ้น ดังนี้ เป็นต้น⁽⁶⁾

อาจกล่าวได้ว่าการที่โมเลกุลของสีย้อมยึดเกาะกับโมเลกุลของเส้นใย เป็นผลเนื่องจากแรงทางเคมีและผลทางฟิสิกส์ร่วมมือสนับสนุนกัน โดยมีสารบางอย่าง เข้าช่วย เหลือ เพื่อที่จะทำให้โมเลกุลของสีย้อมและโมเลกุลของเส้นใย เกิดปฏิกิริยาระหว่างกันได้ดีขึ้น สารบางอย่างที่กล่าวนี้คือสารช่วยย้อม

2.1.2.3 สารช่วยย้อม (additives)

สารช่วยย้อมเป็นสารเคมีที่ใส่ลงไปในช่วงการย้อม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย้อมให้มีการดูดติดสีได้มากขึ้นสม่ำเสมอขึ้นและทำให้สีที่ติดเส้นใยแล้วมีความคงทนมากขึ้น

สารช่วยย้อมมีหลายชนิด แต่ที่สำคัญสามารถจัดแบ่งออกได้เป็น 7 ประเภทด้วยกัน⁽⁶⁾ คือ

1. กรด ใช้สำหรับย้อมเส้นใยโปรตีนและไนลอนเมื่อใช้ สีย้อมเอลิก
2. ด่าง ใช้สำหรับย้อมใยเซลลูโลสด้วยสีย้อมอะโซอิก, แวตและกำมะถัน
3. เกสโซ ใช้ในการย้อมด้วยสีย้อมเอลิกและการย้อมเส้น ใยเซลลูโลสทุกชนิด
4. สารช่วยให้สีสม่ำเสมอ ใช้กับสีแวต, ดิสเพอซและสี เอลิกบางชนิด
5. สารนำ (carriers) ใช้เมื่อย้อมเส้นใยสังเคราะห์ บางชนิด
6. สารละลายอินทรีย์ จะใช้เมื่อย้อมขนสัตว์และใยสังเคราะห์ บางชนิด
7. สารรีดิวซ์ ใช้สำหรับรีดิวส์ตัวสีบางชนิดเพื่อประโยชน์ ในการดูดซึมเข้าไปในเส้นใย

แต่ละประเภทของสารช่วยย้อมจะแบ่งออกเป็นชนิดสารเคมีต่าง ๆ อีกมากมาย ในการย้อมเส้นใยแต่ละลักษณะด้วยสีย้อมต่างชนิด จำต้องเลือกสารช่วยย้อมเพื่อเพิ่ม ประสิทธิภาพในการย้อมให้ดีขึ้นแตกต่างกันไป ทำให้หน้าเสียหรือน้ำทิ้งที่ปล่อยออกมาจากขบวนการ ย้อมแตกต่างกันตามไปด้วย

2.1.3 สีย้อมและการจำแนกสีย้อม

ก่อนที่จะศึกษาถึงการจำแนกสีย้อมควรจะมาทำความเข้าใจถึงตัวสีย้อมก่อนว่า สีย้อมส่วนใหญ่โดยปกติแล้วมีขั้นตอนการผลิตมาอย่างไร และทำไมสีย้อม (dye) จึงมีสี (colour) อันจะทำให้เกิดความเข้าใจและแง่คิดบางอย่างเกี่ยวกับการจำแนกสีย้อมได้ดีขึ้น

2.1.3.1 การผลิตสี้อม

007505

การผลิตสี้อมสามารถแสดงด้วยแผนภาพสั้น ๆ ⁽⁷⁾ ได้ดังนี้

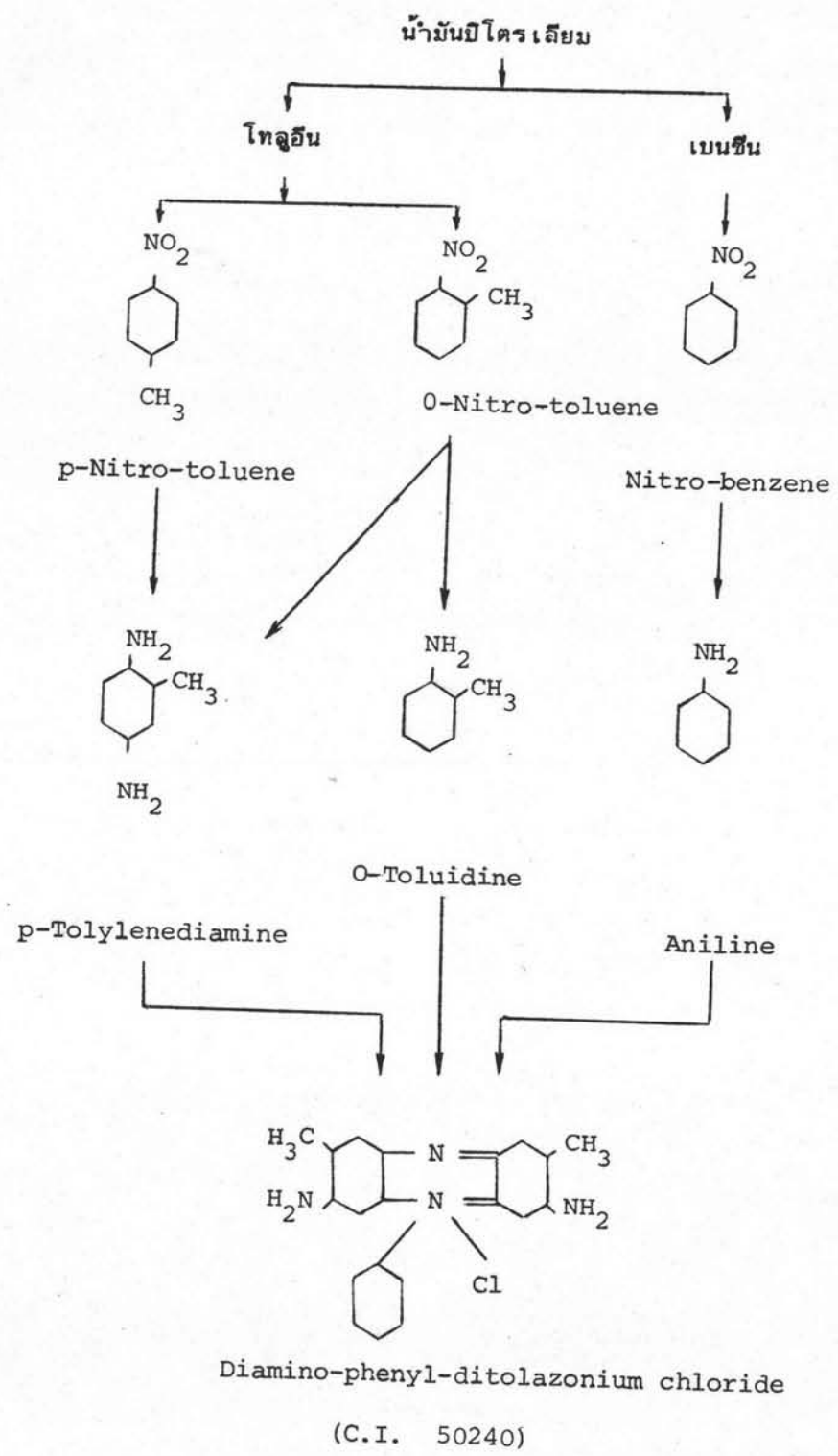


ที่มาของสี้อมเริ่มแรกมาจากน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหิน เช่นเดียวกับสารเคมีอีกมากมายที่มีใช้กันในปัจจุบันนี้ น้ำมันปิโตรเลียมและถ่านหินเมื่อผ่านการสกัดแล้วจะได้สารไฮโดรคาร์บอนออกมาที่สำคัญได้แก่ เบนซีน ไทลีน แอนทราซีน โทลูอีน แนพทาซีนและพาราฟิน ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว สารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้จะถูกนำไปทำปฏิกิริยากับขบวนการไนเตรชัน แอมมิเนชัน ฯลฯ เพื่อที่จะเปลี่ยนสภาพจากสารไฮโดรคาร์บอนไปเป็นสารตัวกลาง (Intermediates) และจากสารตัวกลางที่เตรียมได้นี้จะถูกนำไปเปลี่ยนเป็นตัวสี้อมด้วยเทคนิคต่าง ๆ ที่ยังไม่เปิดเผยกัน

ยกตัวอย่างเช่นการสังเคราะห์สี้อม เบสิก ⁽⁷⁾ C.I. 50240, Basic Red 2 หรือมีชื่อเรียกทางวิทยาศาสตร์ว่า Diamino-phenyl ditolazonium chloride (ดูรูปที่ 2.3) จากวัตถุดิบคือน้ำมันปิโตรเลียมหรือน้ำมันค้ำจากถ่านหิน (petroleum หรือ coal tar) เมื่อผ่านการสกัดแล้วจะได้สารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว 2 ชนิด คือ โทลูอีนและเบนซีน ทั้งโทลูอีนและเบนซีนจะถูกนำไปทำปฏิกิริยาไนเตรชันได้สาร p-Nitro-toluene, o-Nitro-toluene และ Nitro-benzene ซึ่งจัดว่าเป็นสารตัวกลาง จากนั้นจะถูกนำไปทำปฏิกิริยาแอมมิเนชันได้สารตัวกลางชนิดใหม่เกิดขึ้นได้แก่ p-Tolylenediamine, o-Toluidiene และ Aniline สารตัวกลางทั้ง 3 ชนิดนี้จะเป็นตัวเริ่มต้นสำหรับนักเคมีทางด้านวิเคราะห์สี้อมที่จะนำไปทำปฏิกิริยากันก่อให้เกิดตัวสี้อม Diamino-phenyl-ditolazonium chloride ได้ตามต้องการ

2.1.3.2 การเกิดสี (color) ของสี้อม (dye)

ได้มีผู้พยายามอธิบายถึงการเกิดสีของสี้อมไว้หลายคน แต่คำตอบที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางเป็นของ Mr. O.N. Witt ⁽⁷⁾ ซึ่งได้สรุปว่าสีซึ่งปรากฏ



รูปที่ 2.3 แสดงขั้นตอนการผลิตสีย้อม เบสิก

ออกมาทำให้ตามนุษย์ปกติมองเห็นได้เกิดมาจากการจัดเรียงตัวของกลุ่มอะตอมประเภทหนึ่งภายในโมเลกุลของสีย้อม กลุ่มอะตอมที่กล่าวนี้เรียกกันว่า "โครโมฟอร์" (Chromophores) ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 7 กลุ่ม คือ

1. กลุ่มไนโตรโซ (nitroso group): $-\text{NO}$ (หรือ $=\text{N}-\text{OH}$)
2. กลุ่มไนโตร (nitro group): $-\text{NO}_2$ (หรือ $=\text{NO}.\text{OH}$)
3. กลุ่มเอโซ (azo group): $-\text{N}=\text{N}-$
4. กลุ่มเอทิลีน (ethylene group): $\text{>C}=\text{C}<$
5. กลุ่มคาร์บอนิล (carbonyl group): $\text{>C}=\text{O}$
6. กลุ่มคาร์บอนิล-ไนโตรเจน (carbonyl-Nitrogen group):
 $\text{>C}=\text{NH}$ และ $-\text{CH}=\text{N}-$
7. กลุ่มซัลเฟอร์ (sulphur group): $\text{>C}=\text{S}$ และ $\text{>C}-\text{S}-\text{S}-\text{C}<$

กลุ่มอะตอมต่าง ๆ เหล่านี้จะเป็นตัวไปเพิ่มสีให้แก่สารประกอบอะโรมาติก (aromatic compound) โดยการดูดกลืนแถบแสงสีขาวยาวบางแถบแสงและปล่อยออกมาบางแถบแสง ทำให้มนุษย์มองเห็นสีย้อมมีโทนสี (hue) แตกต่างกันไป

สีย้อมโดยทั่วไปนอกจากจะต้องมีกลุ่มอะตอม "โครโมฟอร์" แล้วยังจำเป็นต้องมีกลุ่มอะตอมอีกชนิดหนึ่งได้แก่ กลุ่มอะตอม "ออกโซโครม" (Auxochromes) อันได้แก่ $-\text{OH}$, $-\text{NH}_2$, $-\text{NHR}$, $-\text{NR}_2$, $-\text{SO}_3$ และ $-\text{COOH}$ เพื่อให้สีย้อมสามารถทำปฏิกิริยายึดติดกับเส้นใยได้ โมเลกุลใดที่ปราศจากกลุ่มอะตอมออกโซโครม โมเลกุลนั้นจะแสดงสมบัติของสีออกมาได้แต่จะขาดสมบัติในการยึดติดกับเส้นใย โมเลกุลดังกล่าวนี้เรียกว่า "โครมาเจน" (Chromagen) ยกตัวอย่างเช่น สีย้อมอะมิโนเอโซเบนซีน (aminoazobenzene dyestuff) มีสูตรโมเลกุลคือ $\text{H}_2\text{N}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{N}=\text{N}-\text{C}_6\text{H}_5$ กลุ่มอะตอมโครโมฟอร์คือ $-\text{N}=\text{N}-$ กลุ่มอะตอมออกโซโครมคือ $-\text{NH}_2$ และโมเลกุลที่เรียกว่าโครมาเจน คือ $\text{C}_6\text{H}_5-\text{N}=\text{N}-\text{C}_6\text{H}_5$ ทั้งกลุ่มโครโมฟอร์ออกโซโครมและโครมาเจนนี้จะเป็นส่วนสำคัญในการพิจารณาแบ่งกลุ่มของสีย้อมตามสูตรโครงสร้าง

สร้างทางเคมีซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป

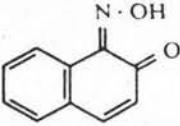
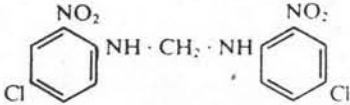
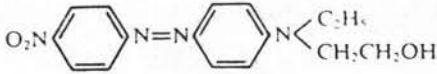
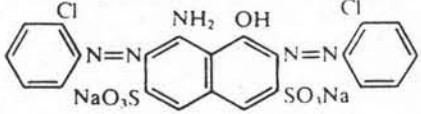
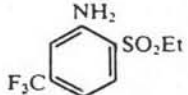
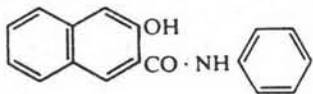
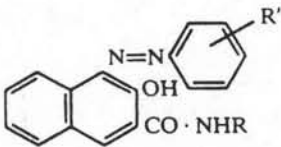
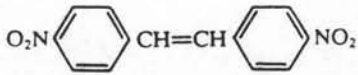
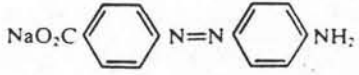
2.1.3.3 การจำแนกสีย้อม

การแบ่งกลุ่มหรือการจำแนกสีย้อมที่ใช้ย้อมในขั้นแรกอาจจะพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นสองชนิด⁽⁶⁾ ชนิดหนึ่งละลายน้ำได้ เรียกว่าสีย้อม (dye) อีกชนิดไม่ละลายน้ำเรียกว่า "สารสี" (pigment) การจำแนกสีย้อมที่ใช้ย้อมด้วยวิธีนี้ก่อให้เกิดความสับสน กล่าวคือ สำหรับสารสีที่ไม่ละลายน้ำ (pigment) โรงงานผู้ผลิตจำเป็นต้องหาวิธีการมาทำให้สีตัวนั้นละลายน้ำให้ได้โดยพยายามใช้ตัวทำละลายชนิดอื่นให้น้อยที่สุดเท่าที่จะน้อยได้เป็นตัวช่วยทำละลาย สารสีเมื่อถูกทำให้ละลายแล้วจะมีสมบัติเหมือนสีย้อม (dye) ทุกประการ สามารถถูกดูดซึมเข้าไปในเส้นใย สามารถติดเส้นใยโดยลักษณะทางฟิสิกส์และเคมี ทำให้การแบ่งกลุ่มของสีย้อมที่ใช้ย้อมด้วยวิธีนี้เกิดความสับสน

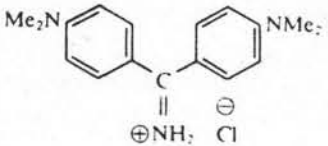
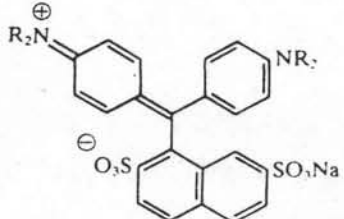
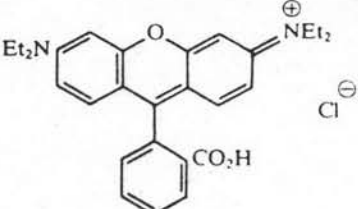
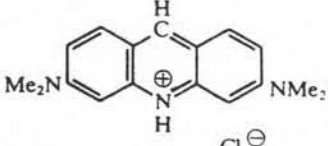
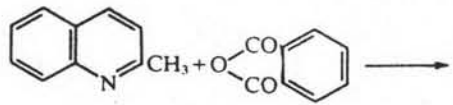
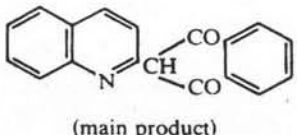
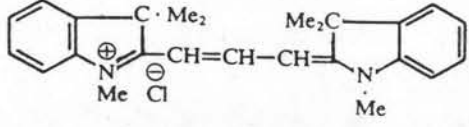
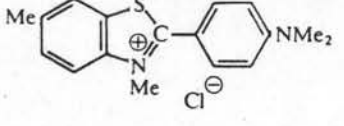
การจำแนกสีย้อมอีกวิธีหนึ่งคือการจำแนกสีตามส่วนประกอบทางเคมี วิธีนี้มีความยุ่งยากมากสำหรับผู้ที่ไม่ได้ผ่านการศึกษาด้านเคมีมาโดยตรง สีในกลุ่มเคมีเดียวกันอาจจะย้อมแตกต่างกัน เช่นสีในกลุ่มเอโซบางตัวย้อมได้ง่าย ๆ และโดยตรง เป็นสีโคเรกต์ (direct) บางตัวจะย้อมได้เมื่อน้ำย้อมมีภาวะเป็นกรดก็เป็นสีเอลิต ทำให้สีที่ได้นั้นต่างจากการย้อมแตกต่างกันไปมาก ประการสำคัญอีกข้อหนึ่งที่ทำให้การจำแนกสีย้อมด้วยวิธีนี้ยังไม่เป็นที่นิยมเท่าที่ควรก็คือ สูตรโครงสร้างที่แท้จริงของสีย้อมหลายชนิดที่นิยมใช้กัน ในปัจจุบันยังไม่เป็นที่ประจักษ์ ทำให้การจำแนกสีย้อมด้วยวิธีนี้มีขีดจำกัด แต่อย่างไรก็ตาม สำหรับสีย้อมที่รู้สูตรโครงสร้างแน่นอนและผู้ที่มีความรู้ทางด้านเคมีอย่างดีจะได้ประโยชน์อย่างสูงจากการจำแนกสีย้อมด้วยวิธีนี้ (ดูตารางที่ 2.1)

การจำแนกสีย้อมที่นิยมกันมากที่สุดเห็นจะได้แก่การจำแนกสีย้อมตามการนำไปใช้งาน การจำแนกสีย้อมวิธีนี้เป็นที่ยอมรับกันในบรรดาผู้ใช้และอุตสาหกรรมการผลิตสีเพียงแต่กำหนดชื่อการค้าของสีแต่ละชนิดของแต่ละบริษัทก็ทำให้เข้าใจกันได้ทั่วไป แม้แต่สมาคมย้อมและนักสี (The Society of Dyers and Colourist) ก็ยอมรับว่าเป็นวิธีจำแนกที่เหมาะสมที่สุด⁽⁶⁾ หนังสือดรรชนีสี (Color Index) ที่พิมพ์ออกจำหน่ายทั่วโลกก็ใช้วิธีนี้ ทำให้การจำแนกสีย้อมด้วยวิธีนี้มีความคล่องตัวสูง

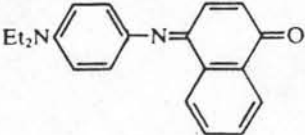
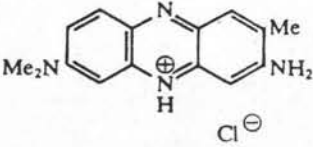
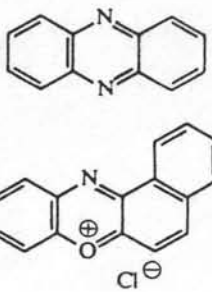
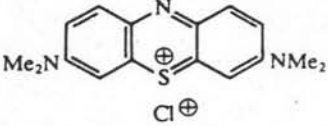
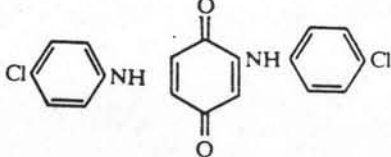
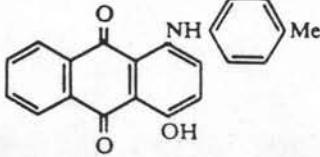
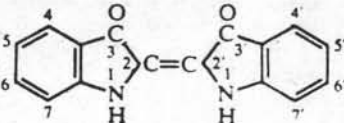
ตารางที่ 2.1 แสดงการจำแนกสีย้อมตามสูตรโครงสร้าง

ประเภท	ตัวอย่าง	โครงสร้าง
Nitroso	C.I. Mordant Green 4 10005	 <p>as bisulphite compound</p>
Nitro	C.I. Pigment Yellow 11 10325	
Azo Monoazo	C.I. Disperse Red 1 11110	
Disazo	C.I. Acid Blue 87 20415	 <p>See p. 105-107</p>
Trisazo		See p. 105-107
Polyazo (tetrakisazo, etc.)		See p. 107
Azoic	C.I. Azoic Diazo Component 19 37065	 <p>(as stabilized diazo component)</p>
	C.I. Azoic Coupling Component 2 37505	
		
Stilbene	C.I. Direct Orange 71 40205	<p>condensation product of</p>  <p>and</p> 

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

ประเภท	ตัวอย่าง	โครงสร้าง
Diphenylmethane (Ketone/imine)	C.I. Basic Yellow 2 41000 (Auramine)	 <p>Auramine O</p>
Triarylmethane	C.I. Acid Green 16 44025 (Naphthalene Green V)	
Xanthene	C.I. Basic Violet 10 45170 Rhodamine B	
Acridine	C.I. Basic Orange 14 Solvent Orange 15 (Acridine Orange) 46005	
Quinoline	C.I. Solvent Yellow 33 47000 (Quinoline Yellow, Spirit Soluble)	  <p>(main product)</p>
Methine	C.I. Basic Red 12 48070	
Thiazole	C.I. Basic Yellow 1 Pigment Yellow 18 (=phosphotungsto- molybdic acid lake) 49005 (Basic Yellow T)	

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

ประเภท	ตัวอย่าง	โครงสร้าง
Indamine	C.I. Solvent Blue 22 49705	
Azine	C.I. Basic Red 5 50040	
Oxazine	C.I. Basic Blue 6 51175 (Meldola's Blue)	
This group includes Dioxazines and Oxazines.		
Thiazine	C.I. Basic Blue 9 C.I. Solvent Blue 8 52015 (Methylene Blue)	
		Methylene Blue as zinc double chloride
Sulphur	ยังไม่มีสูตรโครงสร้างที่แน่นอน	
Lactone (amino-ketone and hydroxy- ketone dyes)	C.I. Vat Yellow 5 56005	
Anthra- quinone	C.I. Solvent Violet 13 60725	
Indigoid	C.I. Vat Blue 1 73000 Indigo (Synthetic)	

การจำแนกสีย้อมตามวิธีใช้งาน

1. สีย้อมแพร่ (disperse dyes)

สีย้อมชนิดนี้ผลิตขึ้นมาเพื่อใช้ย้อมเส้นใยอาซิเตทหรือเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด ที่ดูดซึมน้ำได้น้อย สีย้อมนี้ไม่ละลายน้ำแต่เป็นละอองละเอียดลอยตัวอยู่ในน้ำ เมื่อมีสารช่วยกระจาย (dispersing agent) ที่เหมาะสมจะสามารถใช้ย้อมในน้ำธรรมดาได้โดยไม่ต้องใช้สารเคมีอย่างอื่นช่วย นอกเสียจากสารพา (carrier) บางตัวที่ช่วยให้ตัวสีเข้าไปใกล้เส้นใยเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้

สีย้อมแพร่อาจแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ โดยพิจารณาจากกลุ่มเคมีในตัวสี ย้อมได้แก่ สีย้อมเอโซ (azo dyes) และสีย้อม aminoanthraquinone (เป็นการจำแนกสีย้อมตามส่วนประกอบทางเคมี) ซึ่งทั้ง 2 กลุ่มนี้ปกติแล้วจะประกอบไปด้วยอนุพันธ์ของ ethanolanine - $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ - หรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน

2. สีเอซิด (acid dyes)

ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนในน้ำย้อมซึ่งมีสภาพเป็นกรดเจือจาง อาจจะนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสที่ไม่ใช่เซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ด้วย เช่น ปอ ม่านและใยโพลีเอไมด์ เป็นต้น ตัวสีย้อมเกิดจากสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน

กลุ่มเคมีของสีเอซิดนี้ประกอบไปด้วย กลุ่มสีเอโซ, (triarylmeth และ anthraquinone

3. สีย้อมอะโซอิก (azoic dyes)

สีย้อมกลุ่มนี้นิยมใช้ย้อมกับเส้นใยเซลลูโลสเท่านั้น ตัวสีย้อมชนิดนี้เป็นสารประกอบเอโซเช่นกัน แต่ทว่าตัวสีไม่ละลายน้ำ ดังนั้นการที่สีจะก่อรูปบนเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อน แล้วจึงนำไปย้อมทับอีกครั้งหนึ่งด้วยเกลือไดอะโซเนียม (diazonium salt) เกลื่อนี้จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบฟีนอล เกิดเป็นสารประกอบเอโซที่ให้สีบนเส้นใย ปฏิกิริยานี้เรียกว่า คัปปลิง (coupling)

4. สีย้อม เบสิก (basic dyes)

นิยมใช้ย้อมขนสัตว์และเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด ย้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้เพียงเล็กน้อยหรือไม่ติดเลย ตัวสีย้อมเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครโมฟอร์ (Chromophore) ให้แคทอออน บางครั้งจะเรียกสีย้อมชนิดนี้ว่าสีแคทอออน ย้อมติดกับเส้นใยได้โดยประจุบวกของโมเลกุลของสีย้อมจะจับกับประจุลบของเส้นใย

5. สีย้อม ไค เรกท์ (direct dyes)

สีย้อมไคเรกท์บางครั้งถูกเรียกว่าสีย้อมฝ้าย ชื่อของสีย้อมชนิดนี้ได้มาจากการที่สีย้อมชนิดนี้เป็นสีสังเคราะห์ชนิดแรกที่สามารถย้อมติดใยฝ้ายได้โดยตรงไม่ต้องเติมสารช่วยย้อมใด ๆ ทั้งสิ้น แต่ในปัจจุบันการย้อมด้วยสีย้อมไคเรกท์นี้จะใช้เกลือเข้าช่วยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย้อมให้สูงขึ้น สีย้อมชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบเอโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคซึ่งทำให้ตัวสีย้อมละลายน้ำได้

สีย้อมในกลุ่มนี้มีโทนสี คุณสมบัติในการย้อม ความคงทนตลอดจนราคาแตกต่างกันมาก ถ้าเป็นสีที่มีความคงทนดีโครงสร้างของสีจะซับซ้อนมากขึ้น ราคาต้นทุนการผลิตและราคาจำหน่ายก็จะสูงขึ้น เป็นเงาตามตัว

6. สีย้อม มอ แคนท์ (mordant dyes)

ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ตัวสีย้อมกลุ่มนี้ส่วนใหญ่เป็นตัวสีในกลุ่มสีย้อมเอลิดที่ สามารถก่อรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะบางชนิดได้ เช่น โครเมียม อลูมิเนียมและเหล็ก อนุภาคของสีที่ก่อรูปบนเส้นใยภายหลังเมื่อย้อมทับด้วยเกลือโลหะแล้วจะมีความคงทนต่อขบวนการใช้น้ำ (wet fastness) ได้ดีกว่าที่ไม่ย้อมทับ

7. สีย้อม ซัลเฟอร์ (sulfur dyes)

ใช้ย้อมใยฝ้ายโดยเฉพาะ ตัวสีย้อมชนิดนี้ราคาค่อนข้างถูก สีย้อมได้ไม่ค่อยสดใส ตามปกติแล้วตัวสีย้อมชนิดนี้ไม่ละลายน้ำ แต่ในปัจจุบันได้มีผู้ผลิตสีย้อมชนิดนี้ขึ้นมาใหม่โดยนำตัวสีย้อมไปทำการรีดิวส์ ทำให้สีย้อมชนิดนี้สามารถละลายได้ดีในน้ำ

สีย้อมชนิดนี้ที่ได้ชื่อเรียกว่าสีซัลเฟอร์ เพราะว่าสารที่จะนำมาประดิษฐ์เป็น สารละลายของโซเดียมซัลไฟด์และโครโมฟอร์ของสีย้อมซัลเฟอร์ประกอบไปด้วยกลุ่มธาตุ ซัลเฟอร์ (sulfonic groups) สีย้อมชนิดนี้เมื่อทำให้ละลายได้ในน้ำแล้วจะแทรกซึมตัว เข้าไปในเส้นใยและสามารถทำให้ยึดติดกับเส้นใยได้อย่างถาวรได้โดยการออกซิไดส์ตัว สีย้อมกลับคืนสู่รูปเดิมที่ไม่ละลายน้ำ ด้วยวิธีทำปฏิกิริยากับอากาศ (air oxidation)

8. สีย้อมแวต (vat dyes)

นิยมใช้ย้อมกับเส้นใยเซลลูโลสโดยเฉพาะใยฝ้าย สีย้อมชนิดนี้ไม่ละลาย น้ำ ต้องใช้สารรีดิวส์ที่เหมาะสมมาทำให้ละลาย เช่นเดียวกับสีย้อมซัลเฟอร์ สารรีดิวส์ที่ นิยมใช้กันอยู่ทั่วไปได้แก่ โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ สีย้อมแวตเมื่อถูกรีดิวส์แล้วจะให้สาร ประกอบลิวโค (leuco compound) ซึ่งมีสีครามและมีประสิทธิภาพในการแทรกซึมเข้าไป ติดกับเส้นใยได้ และเมื่อนำเส้นใยไปสัมผัสกับอากาศ สารประกอบลิวโคจะถูกออกซิไดส์ กลับ เป็นตัวสีย้อมแวตที่ไม่ละลายน้ำดังเดิม ทำให้เกิดการติดทนอย่างถาวรกับเส้นใยได้ สีย้อมชนิดนี้มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญด้วยกัน 2 ชนิด คือ สีครามอินดิโก (indigo) และสีแอนทราควิโนน (anthraquinone)

9. สีย้อมรีแอคทีฟ (reactive dyes)

เป็นสีย้อมที่ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสที่ดีที่สุด ละลายได้ในน้ำ มีคุณสมบัติ เป็นแอนไอออน เมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่เป็นด่างโมเลกุลของสีจะทำปฏิกิริยากับหมู่ OH ในเซลลู โลสและเชื่อมโยงติดกันโดยโควาเลนต์บอนด์ กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลู โลส สมบัติการละลายและดูดติดเส้นใยของตัวสีจะทำให้สีเข้าไปอยู่ภายในเส้นใยได้ และ เมื่อเกิดปฏิกิริยาตัวสีก็จะติดกับเส้นใย

10. สีย้อมโลหะ (metallic dyes)

สารประกอบอนินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำหลายชนิดใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส และให้ สีต่าง ๆ กัน เมื่อย้อมแล้วต้องทำให้สารนี้ตกตะกอนภายในเส้นใย ตัวอย่างที่ดีได้แก่ mineral khaki ซึ่งเป็นสารประกอบของเหล็กออกไซด์และโครเมียมออกไซด์รวมกัน

11. สีย้อมไอเนียม (onium dyes)

ปกติตัวสีย้อมนี้นิยมใช้พิมพ์มากกว่าย้อมผ้า จัดเป็นสารสีที่สามารถทำให้ละลายได้ในน้ำ รูปแบบการย้อมก็ค้ำเนินคล้ายกับสีแวนด์คือต้องทำให้ตัวสีย้อมกลับคืนสู่รูปเดิม (ไม่ละลายน้ำ) ด้วยการออกซิโดสลับคืน

สีย้อมที่นิยมใช้ย้อมผ้าหรือฝืนผ้าฝ้ายในบ้านเรา มีอยู่ด้วยกัน 6 ประเภทคือ

- สีย้อมอะโซอิก
- สีย้อมไคเรกท์
- สีย้อมซิลเฟอร์
- สีย้อมแวนด์
- สีย้อมรีแอคตีฟ
- สีย้อมโลหะหรือสีย้อมเมทัลลิก

สีย้อมแต่ละประเภทนี้มีบริษัทต่าง ๆ หลายแห่งผลิตออกมาขาย สีย้อมแต่ละชนิดของแต่ละบริษัทแตกต่างกันไปในรายละเอียด ดังนั้นเพื่อความกระจ่างชัด การศึกษาถึงน้ำเสียจากการย้อมด้วยสีย้อมแต่ละประเภทจึงจำเป็นต้องระบุชื่อบริษัทหรือเครื่องหมายการค้าของตัวสีย้อมแต่ละชนิดลงไปด้วย รายละเอียดของสีย้อมแต่ละชนิดที่นำมาใช้ในการทดลองจะได้อ้างอิงไว้ในหัวข้อที่ 4.2 ต่อไป

การจำแนกสีย้อมตามโครงสร้างเคมี⁽⁴⁾

ดูรายละเอียดในตารางที่ 2.1

2.2 การวัดสี

การวัดสีของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม เมื่อพิจารณาอย่างผิวเผินอาจให้ความรู้สึกว่าจะสามารถกระทำได้อย่างง่าย ๆ เพราะตามนุษย์ปกติโดยทั่วไปสามารถแยกแยะและบอกความเข้มข้นของสีได้อย่างหยาบ ๆ อยู่แล้ว ในขณะที่การวัดค่าความสกปรกของน้ำทิ้งในรูปแบบอื่น ๆ เช่นค่า บีไอดี ซีไอดี ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ฯลฯ จะไม่สามารถบอก

ได้ว่ามีค่าประมาณเท่าไรโดยปราศจากการวิเคราะห์จากห้องปฏิบัติการ แต่เมื่อทำการศึกษามาตรการวัดสีและสมบัติของสีให้ละเอียดขึ้นแล้วจะพบว่า เป็นการยากที่จะระบุค่าของสีที่เห็นออกมาเป็นตัวเลขที่ให้ความหมายอย่างชัดเจนในทางวิทยาศาสตร์ ทั้งนี้เพราะสีเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่เกี่ยวพันกับความนึกคิดของมนุษย์ อาจจะกล่าวได้ว่าสีเป็นลักษณะกึ่งนามธรรม ไม่เป็นรูปธรรมที่ชัดเจนเหมือนค่า พีไอดี ซีไอดี ไนโตรเจน ฯลฯ และต้องมียงค์ประกอบหลายอย่าง ได้แก่ แสง วัตถุสี นัยน์ตาของผู้เห็นสี (ที่ตาไม่บอดสี) และสมองที่จะวิเคราะห์และตีความ จึงจะปรากฏลักษณะของสีให้บุคคลหนึ่ง ๆ รับทราบได้^(๑)

ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับ เรื่องของสี โดยนักวิทยาศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับงานสี โดยตรงมาเป็นเวลายาวนาน ในปัจจุบันมนุษย์สามารถเข้าใจและรับรู้เกี่ยวกับ เรื่องสีได้ถึงระดับหนึ่งและสามารถนำมาใช้กับงานที่เกี่ยวข้องได้เป็นอย่างดี เช่นงานเทียบสีของการย้อมผ้า งานเทียบสีของดิน เป็นต้น แต่กับงานทางด้านสีของน้ำเสียซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับวิศวกรสุขาภิบาลยังไม่ได้มีการศึกษากันเท่าที่ควร ที่ผ่านมามีกันแต่เพียงผิวเผิน ไม่ได้นำเอาความรู้ที่นักวิทยาศาสตร์ทางด้านสีคิดค้นขึ้นมาตัดแปลงมากนัก

เรื่องการวัดสีที่จะได้กล่าวถึงต่อไปนี้เป็นความพยายามที่จะสรุปว่าการวัดสีของน้ำเสียทางด้านวิศวกรสุขาภิบาลควรจะทำในรูปแบบใด โดยพยายามที่จะปูพื้นให้เห็นถึงขั้นตอนในการพัฒนาการระบบความคิดเกี่ยวกับสีมาจนถึงหน่วยวัดสีเอซีเอ็มไอ ซึ่งเป็นหน่วยวัดสีของน้ำเสียที่แม่นยำที่สุดในปัจจุบันที่ฟังจะกระทำได้

2.2.1 การบรรยายสี

สีเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่เกี่ยวพันกับความนึกคิดของมนุษย์ มีลักษณะค่อนข้างจะเป็นนามธรรมและต้องการองค์ประกอบหลายอย่างในการมองเห็น การพูดถึงสีที่ตามนุษย์ปกติมองเห็นมักใช้กฎเกณฑ์อย่างหยาบ ๆ ในการกล่าวถึงสีนั้น ๆ เช่น สีเขียว สีครีม สีเปลือกมังคุด เป็นต้น แต่การอ้างอิงมาตรฐานหรือนิยามดังกล่าวนี้จะไม่เพียงพอแก่การวิเคราะห์และวินิจฉัยทางวิศวกรรม ทำให้จำต้องหาหน่วยวัดสีที่เป็นรูปธรรมที่เด่นชัด และก่อให้เกิดความเข้าใจกันและกันได้ถ่องแท้มากกว่านี้ขึ้นมาใหม่

การกล่าวถึงสีหรือการบรรยายสีที่จะให้คำแน่นอนชัดเจนจำเป็นจะต้อง
กล่าวถึงสีที่มองเห็นด้วยค่ากำหนด 3 ค่า⁽¹⁴⁾ คือ

- โทนสี (hue)
- ความอิ่มสี (saturation)
- และ - ความจ้า (brightness)

หรืออาจกล่าวได้ว่าสีใด ๆ ก็ตามแต่ที่มนุษย์มองเห็นได้สามารถนำมา
จัดเรียงเป็นรูป 3 มิติ ซึ่งก่อนที่จะทำความเข้าใจถึงรูป 3 มิตินี้ได้ ควรมาทำความเข้าใจ
ถึงนิยามของค่ากำหนดทั้ง 3 ก่อน

โทนสี คือคำศัพท์ที่ใช้บรรยายสีที่เห็นว่าเป็นสีใด ๆ เช่น สีแดง
เหลือง เขียว เป็นต้น

ความอิ่มสี คือคำศัพท์ที่ใช้บรรยายสีที่เห็นว่ามีความเข้มของสีมากหรือ
น้อยอย่างไร เช่น แดงเข้ม แดงอ่อน เป็นต้น

ความจ้า คือคำศัพท์ที่ใช้บรรยายสีที่เห็นว่ามีสีขาวหรือความดำปะปน
อยู่ด้วยมากน้อยเพียงไร ถ้ามีสีขาวมากค่าความจ้าจะน้อย แต่ถ้ามีสีดำมากความจ้าจะมาก

ความเข้าใจเดิมของการบรรยายสีโดยทั่วไปแล้วมักจะกล่าวอย่างหยาบ ๆ
และระบุสีด้วยค่าเพียง 2 ค่า คือ โทนสีและความอิ่มสี มักจะไม่ระบุถึงค่าความจ้าลงไปด้วย
ทำให้การสื่อความหมายคลาดเคลื่อน แต่กระนั้นก็ตามแม้ว่าจะระบุความจ้าลงไปด้วย ถ้ายัง
ไม่มีการจัดแบ่งสเกลของค่าแต่ละค่าให้แน่นอนลงไป การสื่อความหมายก็ยังคงคลุมเครืออยู่ดี

ได้มีการจัดแบ่งสเกลของค่าทั้ง 3 ไว้ด้วยกันหลายระบบ แต่ระบบที่นิยม
ใช้กันอย่างแพร่หลายได้แก่ รหัสของมันเซลล์ (Munsell notation)

รหัสมันเซลล์ประกอบไปด้วยสัญลักษณ์ที่แสดงถึงโทนสี (hue) ความอิ่มสี
(saturation หรือ chroma) และความจ้า (brightness หรือ value) ของสี โดย
เขียนเรียงลำดับจากโทนสีไปยังความอิ่มสี และมีเส้นเอียงคั่นระหว่างสัญลักษณ์ของความจ้า
และสัญลักษณ์ของความอิ่มสีไว้ เช่น 10 YR 3/5 ซึ่ง 10 YR เป็นลักษณะของโทนสี 3

เป็นสัญลักษณ์ของความจำและ 5 เป็นสัญลักษณ์ของความอืมสิ (ดูรูป 2.4)

ไทนสิของวัตถุใด ๆ ก็ตาม เป็นสิ่งที่แสดงให้เห็นว่าสิของแสงที่สะท้อนจากวัตถุนั้น ๆ เป็นสิอะไรเป็นส่วนใหญ่ สัญลักษณ์ของไทนสิประกอบด้วยตัวเลขและตัวอักษรภาษาอังกฤษซึ่งเขียนเป็นตัวพิมพ์ใหญ่ (ดูรูป 2.5) ตัวอักษรนี้เป็นตัวย่อของสิ เช่น R หมายถึงสีแดง YR หมายถึงสีเหลืองปนแดงหรือสีส้ม และ Y หมายถึงสีเหลือง ตัวเลขที่อยู่หน้าตัวอักษรมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 ในกรณีของ 1OR หรือ OYR ถึง 1OYR ถ้าตัวเลขนี้เพิ่มขึ้นแสดงว่าสีมีความเข้มมากขึ้นและความแดงน้อยลง ดังนั้น OYR จึงเป็นสีที่ไม่มีสีส้มเลยมีแต่สีแดง OYR จึงเหมือนกันกับ 1OR

ความอืมสิของวัตถุใดเป็นสิ่งที่แสดงถึงความบริสุทธิ์ของสิที่สะท้อนจากวัตถุนั้น ๆ มีค่าเป็นตัวเลขตั้งแต่ 0 ถึง 10 ถ้าตัวเลขนี้มากแสดงว่าสีนั้น ๆ บริสุทธิ์มาก มีความเข้มของสีมาก

ความจำของวัตถุใดเป็นสิ่งที่แสดงถึงความขาว-ดำของวัตถุนั้น ถ้าพิจารณาที่ความอืมสิมีค่าเท่ากับ 0 หรือไม่มีสีนั่นเอง จะได้ว่าเมื่อความจำเท่ากับ 0 สิที่เห็นจะเป็นขาวล้วนและถ้าความจำเท่ากับ 10 สิที่เห็นจะเป็นสีดำล้วน

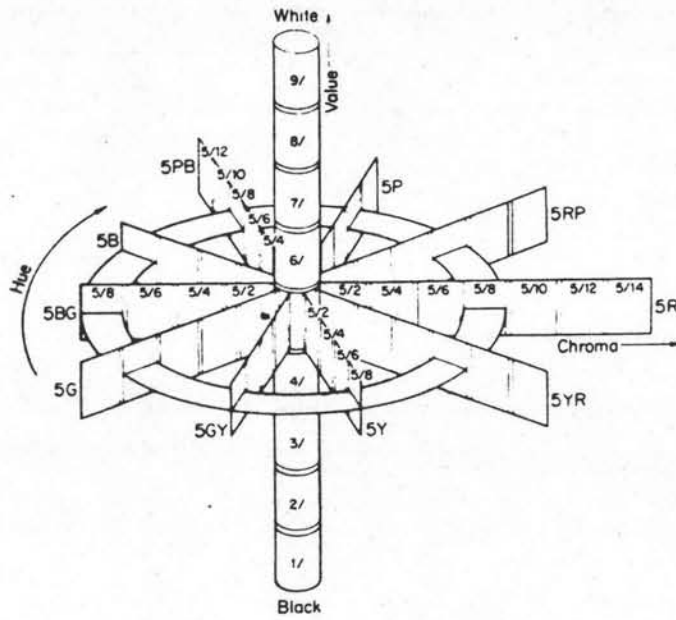
การบ่งบอกสีหรือการบรรยายสีด้วยรหัสมัน เซลล์นี้นิยมใช้กันมา เป็น เวลายาวนานและในปัจจุบันก็ยังนิยมใช้กันอยู่ โดยเฉพาะงานเทียบสีของดินเพราะรหัสมัน เซลล์สามารถตอบสนองความต้องการของชิ้นงานนี้ได้อย่างหมดจด สำหรับงานบางชนิดรหัสมัน เซลล์อาจไม่สามารถนำไปใช้ได้โดยตรง แต่ก็สามารถนำไปประยุกต์ใช้หรือสร้างเป็นระบบใหม่ขึ้นมาได้ โดยอาศัยหลักการพื้นฐานเดียวกันนี้

2.2.2 การวัดสี

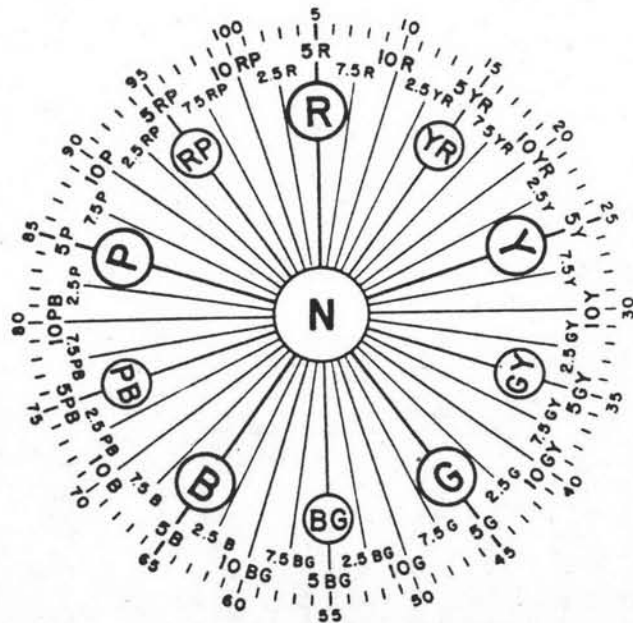
การวัดสีแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ตามลักษณะของการวัด คือ

2.2.2.1 การวัดสีทำโดยใช้สายตาเทียบกับสีมาตรฐาน

2.2.2.2 การวัดสีโดยใช้เครื่องมือวัด



รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโทนสี, ความอิ่มสี, และความจ้า



รูปที่ 2.5 โคอะแกรมแสดงการเปลี่ยนค่าของตัวเลขหน้าสัญลักษณ์ของโทนสี

2.2.2.1 การวัดสีที่เทียบกับสีมาตรฐาน

วิธีนี้ใช้ความรู้สีของคนเข้ามาเกี่ยวข้อง ทำการเปรียบเทียบสีที่ต้องการรู้ค่ากับสีมาตรฐานที่ใช้สำหรับอ้างอิง สีมาตรฐานดังกล่าวนี้มีอยู่ด้วยกันหลายระบบได้แก่ สีมาตรฐานของมันเซลล์ สีมาตรฐานของ DIN เป็นต้น

การวัดสีโดยเทียบกับสีมาตรฐานสำหรับอ้างอิงที่นิยมใช้กันคือเทียบกับสีมาตรฐานของรหัสมันเซลล์ นิยมใช้กับงานเทียบสีของดินเพราะสีของดินมีช่วงโทนสีแคบ แต่ไม่นิยมนำมาใช้กับงานเทียบสีทางน้ำเสียเพราะสีของน้ำเสียมีช่วงโทนสีและความจืดจางซึ่งจะทำให้เกิดความยุ่งยากในการจัดหาค่าสีว่าอยู่ในตำแหน่งใดในรหัสมันเซลล์

การวัดสีโดยการเทียบกับสีมาตรฐานกระทำกันบ้างในงานวิศวกรรมสุขาภิบาลโดยเฉพาะกับงานทางแหล่งน้ำ สีมาตรฐานนี้ถูกกำหนดขึ้นโดยสมาคมสาธารณสุขแห่งอเมริกา (American Public Health Association, APHA)⁽¹⁵⁾ ซึ่งเตรียมได้โดยใช้ K_2PtCl_6 และ $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน สารละลายมาตรฐานที่เตรียมได้นี้มีโทนสีออกเหลืองซึ่งคล้ายกับสีของแหล่งน้ำตามธรรมชาติ จึงเหมาะที่จะนำไปใช้กับงานทางด้านนี้โดยตรง แต่สำหรับงานเกี่ยวกับน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมซึ่งมีสีของน้ำเสียออกมาด้วยกันหลายโทนสี การวัดสีโดยเทียบกับสารละลายมาตรฐานของเอพีเอชเอนี้จึงทำไม่ได้ ต้องนำไปเทียบกับรหัสมันเซลล์หรือตามวิธีใน 2.2.2.2

2.2.2.2 การวัดสีโดยใช้เครื่องมือวัด แบ่งออกเป็น 2 วิธีด้วย⁽¹⁶⁾

คือ

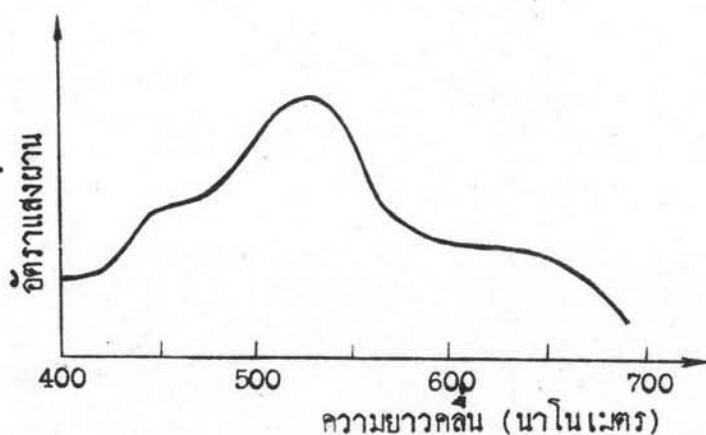
1. การวัดสีด้วยการวัดอัตราแสงผ่าน
2. การวัดสีด้วยการผสมแม่สีมาตรฐาน 3 สี

การวัดสีด้วยการวัดอัตราแสงผ่าน

การวัดสีด้วยวิธีนี้อาศัยหลักการที่ว่าสีของวัตถุหรือของเหลวใด ๆ ที่ตามนุษย์มองเห็น เกิดจากการสะท้อนของแถบแสงสีของวัตถุหรือของเหลวนั้น เข้าสู่ตามนุษย์ ถ้าวัตถุใด

สามารถสะท้อนแสงที่กระทบตัวมันออกมาได้ทุกความยาวคลื่นในแถบแสงสีขาวที่ตามนุษย์มองเห็น (ความยาวคลื่นตั้งแต่ 400-700 นาโนเมตร) โดยการไม่ดูดเอาแถบแสงสีใดสีหนึ่งไว้ วัตถุนั้นจะได้รับการมองเห็นเป็นสีขาว แต่ถ้าวัตถุนั้นดูดเอาแถบแสงสีทั้งหมดไว้ ไม่สะท้อนแสงสีแถบใดออกมาเลย วัตถุนั้นจะถูกมองเห็นเป็นสีดำ ส่วนในกรณีที่เรามองเห็นวัตถุหนึ่ง ๆ เป็นสีต่าง ๆ นั้น เป็นเพราะวัตถุนั้นดูดกลืนเอาแสงความยาวคลื่นช่วงหนึ่ง ๆ ไว้ และสะท้อนแต่แสงความยาวคลื่นอื่น ๆ ออกมา ยกตัวอย่าง เช่น ผีเสื้อเชือกเทศสูงจะดูดเอาแถบแสงสีที่มีช่วงความยาวคลื่นสั้น ๆ (น้ำเงินและเขียว) ไว้ และสะท้อนแต่แถบแสงสีที่มีความยาวคลื่นยาว ๆ (สีแดงหรือสีแสด) ออกมา ตาเราจึงมองเห็นผีเสื้อเชือกเทศเป็นสีแดงอมแดง หรือแดงอมแสด ทั้งนี้แล้วแต่พันธุ์และความสูงอมของผีเสื้อเทศผลนั้น ⁽⁹⁾

การวัดสีด้วยการวัดอัตราแสงผ่านนี้ ปกติแล้วจะทำการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยการวัดเปอร์เซ็นต์แสงผ่าน (Transmittance) หรือเปอร์เซ็นต์ดูดกลืนแสง (Absorbance) ที่ช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ ตั้งแต่ 400-700 นาโนเมตร ตัวอย่างของผลที่ได้จากการวัดสีด้วยวิธีนี้จะแสดงออกมามีรูปกราฟดังแสดงในรูป 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงผลตัวอย่างการวัดสีด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

การวัดสีด้วยวิธีนี้จะมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้นถ้าทำการวัดค่าเปอร์เซ็นต์อัตราแสงผ่านที่ความยาวคลื่นถี่ขึ้น

การวัดสีด้วยการผสมแม่สีมาตรฐาน 3 สี

การวัดสีด้วยวิธีนี้อาศัยหลักการที่ว่าสีใด ๆ ที่ตามนุษย์มองเห็น สามารถสร้างขึ้นมาโดยการใช้แม่สีมาตรฐาน 3 สีมาผสมกันในอัตราส่วนต่าง ๆ แม่สีมาตรฐาน 3 สีนี้แบ่งออกเป็น 2 ระบบ ถ้าเป็นระบบการผสมของแสง แม่สีทั้งสามนี้จะเป็นสีแดง (red) น้ำเงิน (blue) สีเขียว (green) ถ้าเป็นระบบการผสมของสารสี (pigment) แม่สีทั้งสามนี้จะเป็นสีบานเย็น (magenta) สีน้ำเงิน (cyan) และสีเหลือง⁽¹⁰⁾

เครื่องมือที่ใช้ทำการวัดสีโดยเทียบกับการผสมแม่สีมาตรฐาน 3 สีนี้มีชื่อว่าเครื่องเทียบสีทีนโทมิเตอร์ ผลิตโดยบริษัทไลวีนอนด์ในประเทศอังกฤษ ทำการวัดสีโดยใช้การผสมของแม่สี 2 สีใน 3 สีกับการปรับความสว่างในการมอง เพื่อสร้างสีให้เหมือนกับตัวอย่างสีที่นำมาวัด รายละเอียดของเครื่องมือชนิดนี้และวิธีการวัดดูได้จากบทความ "การเทียบสีน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม IV: ทีนโทมิเตอร์" โดย ธงชัย พรรณสวัสดิ์และสมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ⁽¹²⁾

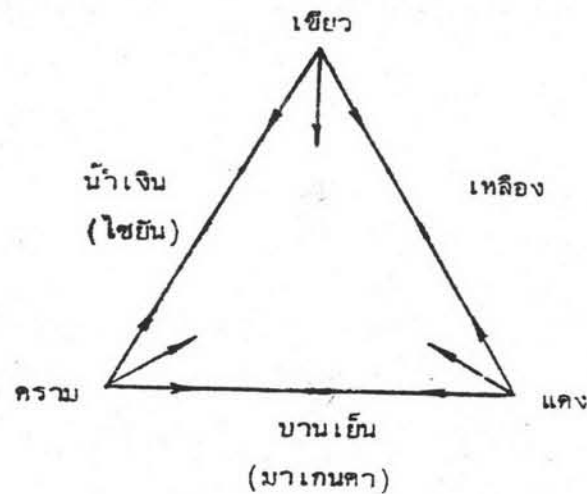
2.2.3 หน่วยสีซีไออี (CIE color unit)

จากหัวข้อ 2.2.2 จะเห็นว่า การวัดสีไม่ว่าจะเป็นการวัดโดยการเทียบกับสีมาตรฐานหรือการวัดด้วยเครื่องมือ ผลที่ได้จากการวัดจะแตกต่างกันไปตามระบบและเครื่องมือที่ใช้วัด ดังนั้นค่าของสีตัวอย่างหนึ่ง ๆ ถ้านำไปวัดด้วยเครื่องมือต่างชนิดกันหรือวัดด้วยระบบการวัดสีที่แตกต่างกันค่าของสีที่วัดได้จะมีรูปแบบแตกต่างกันไปทั้ง ๆ ที่มีความหมายเดียวกัน ซึ่งในบางครั้งก่อให้เกิดความสับสนในการวัดเทียบสี และยังทำให้การวัดเทียบสีแต่ละวิธีไม่สามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวางเท่าที่ควร ดังนั้นจึงควรมีหน่วยมาตรฐานหรือหน่วยสากล ซึ่งการวัดสีด้วยวิธีต่าง ๆ สามารถเปลี่ยนค่าเข้าสู่หน่วยสากลที่ว่านี้ได้ และหน่วยนี้ควรจะเป็นหน่วยที่ยอมรับกันทั่วไป หน่วยสากลที่ว่านี้ได้แก่หน่วยสีซีไออี (CIE unit) ซึ่งเป็นหน่วยที่ได้ตั้งขึ้นโดย the Commission Internationale de L'Eclairage อันเป็นองค์การที่นานาชาติยอมรับว่าเป็นองค์การหลักในเรื่องราวต่าง ๆ เกี่ยวกับสี⁽¹⁷⁾

หลักเกณฑ์ของหน่วยวัดสีสากลซีไออีเป็นการวัดสีในลักษณะ 3 มิติ คือมีค่าที่แสดงค่าสีที่เห็นอันเกิดมาจากการผสมแม่สี 2 สี (แสดงได้ใน 2 มิติ) และความจ้าของสี

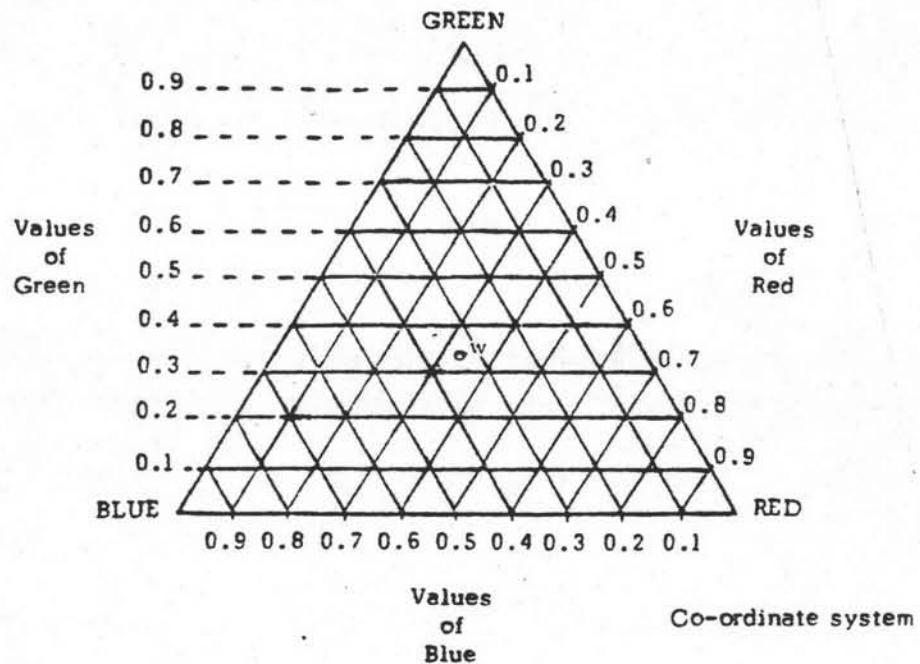
(อีก 1 มิติ) รวม เข้าด้วยกัน การบรรยายวิธีนี้อาศัยหลักการดั้งเดิมของทฤษฎีสาย
 เหลี่ยมแมกซ์เวลล์ประกอบกับหลักการพื้นฐานของระดัสมัน เซลล์มาคคแปลงให้เข้ากับสภาพ
 ความเป็นจริงที่ค้นพบจากการทดลอง

สาม เหลี่ยมแมกซ์เวลล์ เป็น เครื่องมือในการบ่งบอกลักษณะสี (ดูรูปที่
 2.7) ในสาม เหลี่ยมนี้จะกำหนดให้แม่สี เขียว (ระบบการผสมแม่สีของแสง) อยู่ที่ปลาย
 แแหลมหรือมุมทั้ง 3 และมีแม่สี เขียว (ระบบการผสมแม่สีของสารสี) อยู่ตามด้านของสาม
 เหลี่ยม โดยแม่สี เขียวจะ เกิดขึ้นจากการผสมของแม่สี เขียวในแต่ละด้านนั้น ๆ ทั้งนี้
 ความ เข้มข้นของสีทุกชนิดทั้งแม่สีลบและบวกจะค่อย ๆ ลดลง เมื่อวิ่ง เข้าสู่ศูนย์กลางของ
 สาม เหลี่ยมซึ่งเป็นสีขาว การลดลงของความ เข้มข้นของสี เกิดขึ้นจากอิทธิพลของการเจือ
 จางด้วยสีขาวที่มีมากขึ้นตามลำดับ เมื่อวิ่ง เข้าสู่ศูนย์กลางดังกล่าว (10)



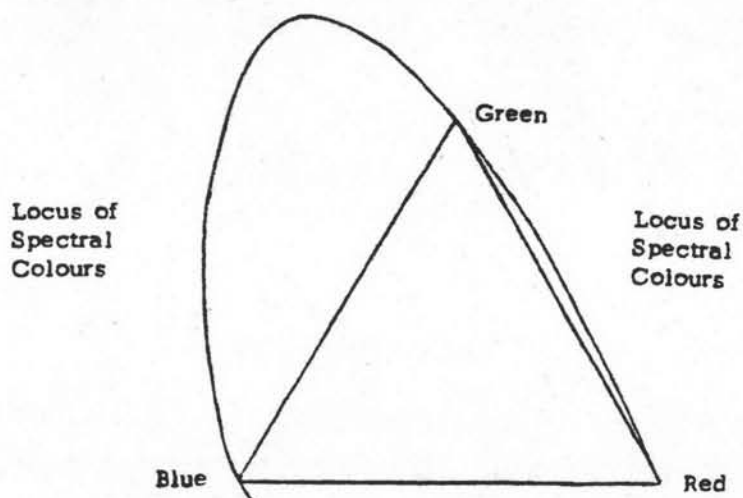
รูปที่ 2.7 ทฤษฎีสายเหลี่ยมแมกซ์เวลล์

ค่าของสีในรูปสาม เหลี่ยมแมกซ์เวลล์อาจนำมาจัดเสียใหม่โดยแสดงแค่ค่าของ
 แม่สีทั้งสามที่อยู่ตามมุมของสาม เหลี่ยมดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงการแบ่งค่าของแม่สีทั้งสาม

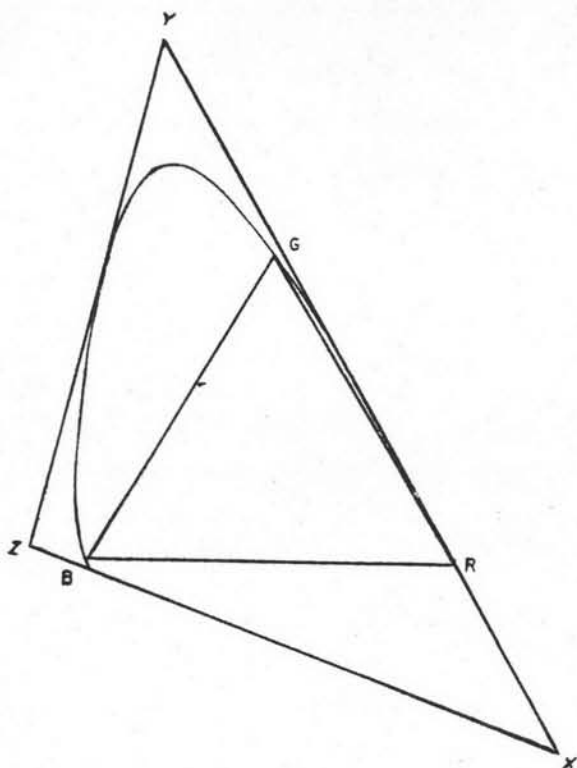
จากการทดลองผสมสีตามค่าที่ได้แบ่งไว้ในรูปที่ 2.8 ปรากฏว่าผลลัพธ์ไม่เป็นไปตามรูปสามเหลี่ยมแมกซ์เวลล์⁽¹⁰⁾ กล่าวคือจะมีค่าสีหลายค่าเมื่อผสมด้วยแม่สีในอัตราส่วนต่าง ๆ แล้วจะเกิดสีที่มีความเข้มอยู่นอกขอบเขตของสามเหลี่ยมแมกซ์เวลล์ออกไปขอบเขตที่สามารถแทนค่าสีที่เกิดจากการผสมแม่สีด้วยอัตราส่วนต่าง ๆ จะครอบคลุมด้วยเส้นโค้งที่เรียกว่า Locus of Spectral Colour ครอบคลุมสามเหลี่ยมแมกซ์เวลล์อีกทีหนึ่งดังแสดงไว้ในรูป 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงค่าขอบเขตการผสมสีของแม่สีทั้งสาม

ดังนั้นถ้าใช้สามเหลี่ยมแมกซ์เวลล์ RGB เดิมเป็นเส้นอ้างอิง (ดูรูปที่ 2.10) ค่าบางค่าของแถบแสงสีโดยเฉพาะสีน้ำเงิน (B) และสีแดง (R) จะต้องมีค่าเป็นลบ ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการตั้งสามเหลี่ยมสมมุติ XYZ ขึ้นมาใหม่ โดยมี X, Y, และ Z เป็นแม่สีสมมุติอยู่ที่มุมยอดของสามเหลี่ยมใหม่ วิธีนี้จะทำให้ค่าแม่สีอันใหม่เรียกว่า "ค่าสิ่งกระตุ้นให้เห็นสีสามค่า" (Tristimulus Values) X, Y และ Z จะมีค่าบวกตลอดเวลา⁽¹⁰⁾

เนื่องจากสีเป็นค่าที่จะอธิบายได้ในเทอม 3 มิติ แต่จากการปรับค่าสามเหลี่ยมแมกซ์เวลล์มาเป็นสามเหลี่ยม XYZ แล้วก็ตาม ยังคงแสดงค่าสีได้แค่ 2 มิติ ดังนั้นจึงได้มีการตกลงกันต่อไปว่า การพิจารณา "การมีแสง" (luminosity) หรือความจ้า (brightness) ซึ่งเป็นอีกมิติหนึ่งนี้ จะนำค่าไปจัดให้เท่ากับสี Y หรือสีเขียวเข้มเกินอ้อม (supersaturated green) ส่วนสี X หรือสีแดงเข้มเกินอ้อม และสี Z หรือสีครามเข้มเกินอ้อมนั้น กำหนดให้พิจารณาเฉพาะด้านสีแต่เพียงอย่างเดียว ดังนั้นรูปสามเหลี่ยม XYZ ที่แสดงไว้ในรูป 2 มิติ จำเป็นจะต้องจัดรูปใหม่เพื่อที่จะทำให้มองเห็นและเกิดภาพเป็นรูป 3 มิติดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.11 และการระบุค่าของสีใด ๆ จึงสามารถระบุค่าสีนั้น ๆ ที่ชัดเจนได้โดยการระบุว่าสีนั้นมีค่า Tristimulus values X, Y, Z (ตัวใหญ่) เท่าไร⁽¹⁰⁾



สามเหลี่ยม RGB คือสามเหลี่ยม
แมกซ์เวลล์เดิมที่มีสีคราม, เขียว
และแดง เป็นแม่สีเชิงบวก สาม
เหลี่ยม XYZ เป็นสามเหลี่ยมที่พัฒนา
มาจากสามเหลี่ยมแมกซ์เวลล์

รูปที่ 2.10 สามเหลี่ยม XYZ ที่พัฒนามาจากสามเหลี่ยมแมกซ์เวลล์

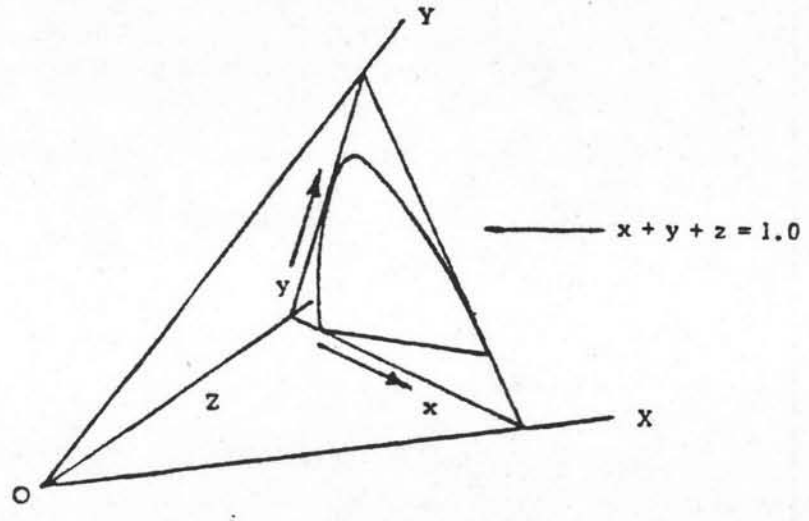
ในบางครั้งเพื่อความสะดวกในการนำค่าไปวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์หรือนำค่า
มาแสดงไว้ในเทอย 2 มิติ จึงได้มีการกำหนดค่า x , y , z ซึ่งเรียกกันว่า Chromaticity
coordinates ขึ้นมาโดยกำหนดให้

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

และ $x + y + z = 1.0$



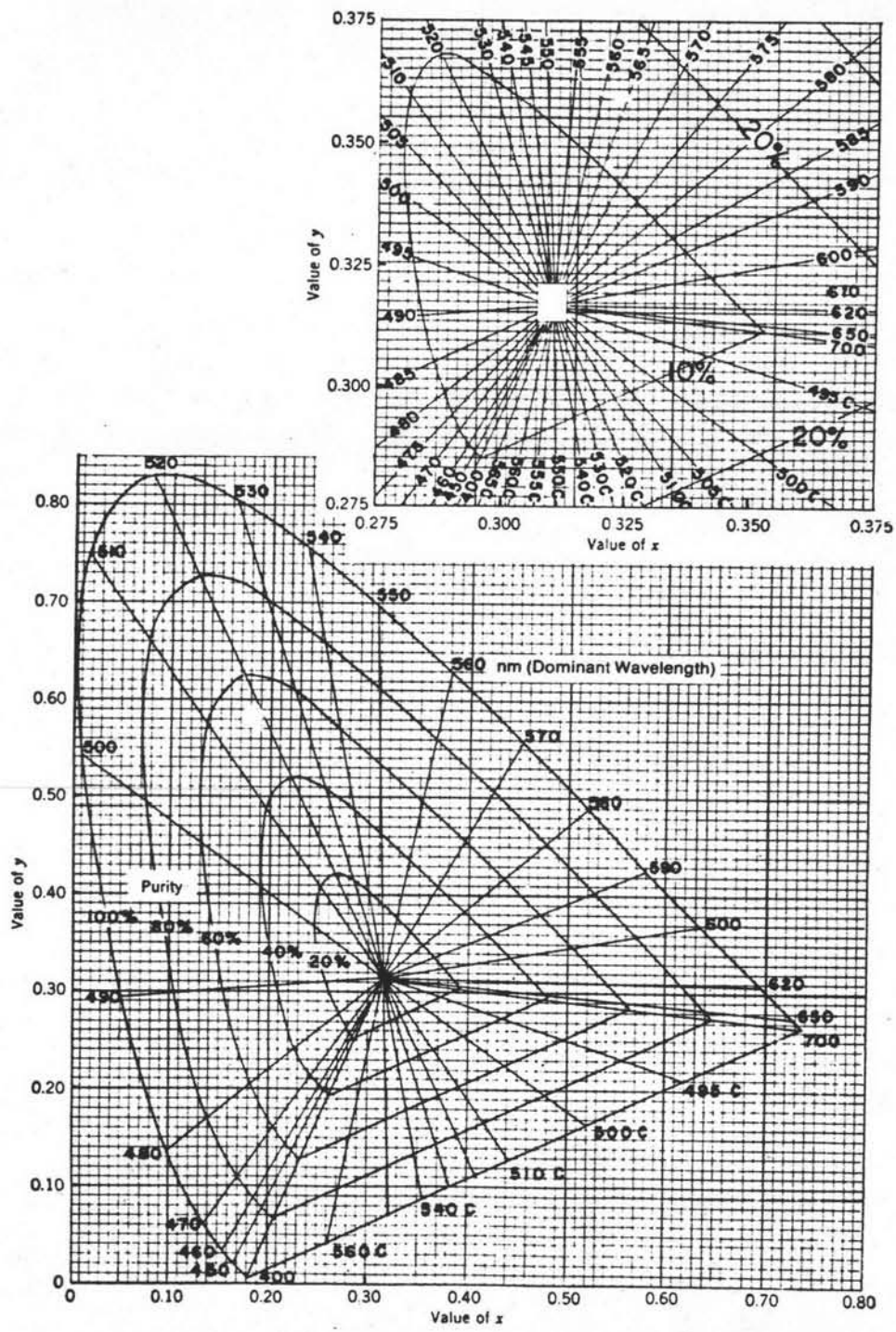
Oblique projection colour space

รูปที่ 2.11 รูปแสดงค่าของสีในหน่วยซีไออี

ดังนั้น x, y, z จะเป็นสัดส่วนกับ X, Y, Z และสองค่าใด ๆ ของ x, y, z ได้แก่ xy, yz, xz จะให้ความรู้สึกของโทนสีและความอิ่มสี โดยมี Y เป็นค่าแสดงความจ้าของตัวอย่าง และถ้า X, Y, Z มีการเปลี่ยนค่าแต่ยังคงสัดส่วนกันอยู่ สีจะคงเป็นสีเดิม แต่จะแตกต่างกันตรงที่ความจ้าของตัวอย่างเท่านั้น ค่าของ Chromaticity coordinates มักจะแสดงในรูปของค่า x และ y ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.12

กล่าวโดยสรุปการวัดสีโดยให้ค่าของสีแสดงอยู่ในหน่วยสากลซีไออีจะต้องบ่งบอกค่าของสีในรูปของ X, Y, Z หรือในรูปของ x, y และ $Y^{(17)}$

ผลลัพธ์ค่าของสีที่วัดได้ด้วยวิธีต่าง ๆ จะต้องสามารถแปลงค่าเข้าสู่หน่วยสากลซีไออีได้จึงจะถือว่าการวัดค่าของสีด้วยวิธีต่าง ๆ เหล่านี้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ ปกติแล้วเครื่องมือที่ใช้วัดค่าของสีในงานวิเคราะห์วิจัยทางวิศวกรรมสาขาภิบาลมักจะใช้เครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์และเครื่องเทียบสีทีนโทมิเตอร์ ซึ่งเครื่องวัดสีทั้งสองชนิดนี้จะให้ค่าของการวัดออกมาในรูปแบบเฉพาะตัว เมื่อจะนำค่าสีไปใช้งานต่อจำเป็นต้องเปลี่ยนค่าที่วัดได้ไปสู่หน่วยสากลซีไออี การเปลี่ยนค่าที่วัดได้ด้วยเครื่องมือทั้งสองชนิดนี้จะไม่กล่าวในที่นี้ แต่สามารถหาอ่านดูได้จากบทความเรื่อง "การเทียบสีน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม" ตอนที่ 3 และ 4 โดย



รูปที่ 2.12 แผนภาพสี (Chromaticity Diagram)

ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และสมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ (11,12)

2.2.4 การแปลงค่าหน่วยสีซีไออี เป็นหน่วยสีเอดีเอ็มไอ

ปัญหาเรื่องการวัดสีและการนำค่าของสีที่ได้ไปใช้งานควรจะยุติลงได้แล้วเมื่อได้มีการตกลงยอมรับหน่วยมาตรฐานสากลซีไออี และมีวิธีเปลี่ยนค่าของสีที่วัดได้ด้วยเครื่องมือต่าง ๆ เข้าสู่หน่วยซีไออีได้ แต่สำหรับงานทางด้านกำจัดสีของน้ำเสียแล้วยังไม่เป็นที่เพียงพอ เพราะถ้าใช้ค่าของสีในหน่วยซีไออีมาใช้งาน จะเกิดปัญหายุ่งยากขึ้นอีกที่เห็นได้ชัดคือค่าของสี ๆ หนึ่งจะต้องแสดงตัวเลขบ่งบอกถึง 3 ค่า ดังนั้นถ้าต้องการจะเปรียบเทียบค่าของสี 2 สีก็จะมีตัวเลขด้วยกันถึง 6 ค่า ทำให้ไม่สามารถนำค่าดังกล่าวมา เปรียบเทียบกันได้

ปัญหานี้เป็นปัญหาเบื้องต้นซึ่งไม่ใช่วัตถุประสงค์หลักในงานวิจัยการกำจัดสีก็จริง แต่ถ้าไม่สามารถแก้ไขปัญหานี้ให้ลุล่วงไปงานวิจัยก็ไม่สามารถดำเนินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ คณะกรรมการวิเคราะห์ที่เนชั่นของสถาบันผู้ผลิตสีย้อมแห่งอเมริกา, เอดีเอ็มไอ (The American Dye-Manufacturers Institute, ADMI) ได้ตระหนักถึงปัญหานี้เป็นอย่างดี จึงได้คิดค้นหน่วยวัดสีขึ้นมาใหม่ โดยทำการแปลงค่าสีที่วัดได้ในหน่วยซีไออี ซึ่งมีค่าตัวเลขแสดงค่าสีถึง 3 ค่า ให้เหลือตัวเลขเพียงตัวเดียว ทำให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์กับงานวัดสีของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทฟอกย้อม เป็นอย่างดี (19)

วิธีการเปลี่ยนค่าตัวเลขของสีในหน่วยซีไออีให้ออกมาเป็นตัวเลขในหน่วยเอดีเอ็มไอ มีขั้นตอนที่ยุ่งยากและซับซ้อน จะไม่นำมากล่าวในที่นี้แต่จะหาได้จากบทความ "การเทียบสีน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม V : หน่วยวัดสีเอดีเอ็มไอ" โดยธงชัย พรรณสวัสดิ์ และสมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ (13) ซึ่งได้อธิบายถึงขั้นตอนในการเปลี่ยนค่าของสีไว้อย่างละเอียดพอสมควร ประกอบกับได้ยกตัวอย่างในการคำนวณไว้อย่างพร้อมมูล และสำหรับผู้ที่ต้องการโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับป้อนข้อมูล จะสามารถหารายละเอียดได้จากบทความ "การวัดสี : สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ VS ทินโทมิเตอร์" โดยธงชัย พรรณสวัสดิ์ และอติชาติ ปานเจริญ (18)

2.3 ความเป็นมาของการกำจัดสีด้วยขบวนการโคแอกกูเลชัน

ได้มีการศึกษาถึงการกำจัดสีในน้ำเสียโดยเฉพาะน้ำเสียจากโรงย้อมด้วยขบวนการโคแอกกูเลชันมาเป็นเวลายาวนานพอสมควร แต่ข้อมูลที่ได้รับยังไม่สามารถจับประเด็นเป็นแก่นสารได้มากนัก ที่เป็นดังนี้เพราะชนิดของสีย้อมที่เจือปนอยู่ในน้ำเสียมีอยู่มากมายประกอบด้วยปัญหาในด้านการวัดค่าของสีจึงทำให้ข้อมูลที่ได้รับเกี่ยวกับการกำจัดสีจะใช้ได้กับโรงงานหนึ่งในภาวะการณ์หนึ่งเท่านั้น ไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโรงงานแห่งอื่น ๆ หรือภาวะการณ์อื่น ๆ ในโรงงานเดียวกันได้

ในเวลาต่อมาการศึกษาถึงการกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงย้อม เริ่มทำกันอย่างมีหลักการที่ขึ้นมาบ้างโดยพยายามแบ่งกลุ่มของสีย้อมออกเป็นชนิดต่าง ๆ เช่น กลุ่มของสีย้อมซิลเฟอร์ (2,20) กลุ่มของสีย้อมแวนดีน เป็นต้น เพื่อทำการศึกษาคูว่าสีย้อมในแต่ละกลุ่มจะถูกกำจัดไปโดยขบวนการโคแอกกูเลชันได้หรือไม่มากหรือน้อยอย่างไร ซึ่งทำให้ข้อมูลที่ได้รับจากการศึกษาคูด้วยการแบ่งกลุ่มของสีย้อมนี้เริ่มมองเห็นแนวทางที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานได้บ้าง ประกอบกับในปี 1970 คณะกรรมการวิเคราะห์นิเวศของสถาบันผู้ผลิตสีย้อมแห่งอเมริกา หรือใช้ชื่อย่อว่า "เอตีเอ็มไอ" ได้คิดหน่วยสำหรับการวัดค่าของสีในน้ำทิ้งที่นำเชื่อถือขึ้นมาได้ ทำให้การพัฒนาการทางด้านกำจัดสีของน้ำเสีย เริ่มที่จะคืบคลาน และผลการทดลองศึกษาเริ่มที่จะจับแก่นสารได้มากขึ้น สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้กว้างขึ้น

ผลการทดลองศึกษาถึงการกำจัดสีด้วยขบวนการโคแอกกูเลชันที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เป็นผลการทดลองขององค์การต่อต้านบ่อนักสภาวะแวดล้อม เป็นพิษประเทศสหรัฐอเมริกา⁽²⁾ ได้สรุปถึงการใช้สารส้มเป็นตัวช่วยให้เกิดตะกอนในขบวนการโคแอกกูเลชันว่า สารส้มสามารถกำจัดสีของน้ำทิ้งอันเกิดมาจากการเจือปนของสีย้อมแวนดีนซิลเฟอร์คิสเพอร์ส ได้เป็นผลดี แต่ไม่ได้มีการกล่าวถึงสารเคมีตัวอื่น ๆ ที่น่าจะนำมาใช้ในขบวนการโคแอกกูเลชันได้เป็นต้นว่าปูนขาวหรือ FeCl_3 เป็นต้น

ในปี ค.ศ. 1972 Thompson และคณะ⁽²⁰⁾ ได้ทดลองนำเอา MgCO_3 ซึ่งผลิตได้จากตะกอนเลนของการผลิตน้ำประปา นำมาใช้ในการผลิตน้ำประปาพบว่าได้ผลดีไม่แพ้การใช้สารส้มในด้านประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น และได้ผลดีมากในการกำจัดสีออกจากน้ำ ทำให้เริ่มมีความคิดที่จะนำ MgCO_3 มาทดลองใช้ในขบวนการโคแอกกูเลชัน โดยเฉพาะทางด้าน

กำจัดสีขึ้น

ในปี ค.ศ. 1978 Oldham และ Rush⁽²¹⁾ ได้ทดลองนำเอา $MgCO_3$ ซึ่งผลิตมาจากตะกอนเลนของน้ำประปามาใช้ในการกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษพบว่าสามารถลดสีลงไปได้ถึง 90 % และตะกอนของแมกนีเซียมที่เกิดขึ้นสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยวิธีการอย่างง่าย ๆ โดยที่ประสิทธิภาพในการกำจัดสียังคงเดิม และในปีเดียวกันนี้เอง Judkin และ Hornsby⁽²²⁾ ก็ได้้นำ $MgCO_3$ ซึ่งผลิตมาจากตะกอนเลนของการผลิตน้ำประปาเช่นกันมาใช้ในการกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมซึ่งได้รับผลดีพอสมควร แต่เป็นที่น่าเสียดายว่าการทดลองของพวกเขาครอบคลุมประเภทของสีเพียงไม่กี่ชนิด การตรวจสอบและการวัดสีก็ยังไม่แม่นยำกล่าวคือ เขาได้ใช้การวัดความเข้มข้นของสีโดยการเทียบอัตราการทะลุของแสงที่มีความยาวคลื่นที่เลือกมาแล้วหนึ่ง ๆ ซึ่งการกระทำเช่นนี้กล่าวได้ว่าไม่ถูกต้อง มาตรการในการวัดสีที่ดีควรจะทำในรูปของหน่วยสีเอดีเอ็มไอ นอกจากนี้การทดลองของ Judkin และ Hornsby ไม่ได้ทำการทดลองโดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณปูนขาวทำให้ไม่สามารถจะทราบได้ว่าจำนวน $MgCO_3$ หนึ่ง ๆ จะเหมาะสมกับปริมาณปูนขาวเท่าใดในน้ำเสีย แต่อย่างไรก็ตาม การทดลองของพวกเขาทำให้พอที่จะคาดเดาได้ว่าการนำ $MgCO_3$ มาใช้ในการกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงย้อมน่าจะมีความเป็นไปได้สูง

จากความเป็นมาของการกำจัดสีด้วยขบวนการโคแอกกูเลชันดังกล่าว ทำให้การวิจัยขึ้นนี้ได้เลือกเอา สารส้ม, ปูนขาวและแมกนีเซียมคาร์บอเนตไฮเดรตเบสิคมาทดลองใช้กำจัดสีของน้ำทั้งจากโรงย้อมเพื่อหาข้อมูลสรุปเพิ่มเติมเกี่ยวกับการกำจัดสีด้วยขบวนการโคแอกกูเลชันต่อไป