



บทที่ 2

ทบทวนเอกสาร

อุตสาหกรรมประเภทสิ่งทออาจแบ่งอย่างกว้าง ๆ ได้เป็น 2 ประเภท คือ โรงปั่นหรือโรงทอ และโรงย้อม ผ้าหรือด้ายที่ออกจากโรงทอหรือโรงปั่นจะถูกนำมาจัดเตรียมตามกรรมวิธีต่าง ๆ เท่าที่จำเป็น เช่นการเผาขน, การลอกแป้ง, การฟอกขาว ฯลฯ เพื่อให้ให้สะอาดและพร้อมสำหรับการย้อมหรือลงสี จากนั้นเส้นใยที่ผ่านการย้อมแล้ว เข้าสู่ขบวนการตกแต่งตามวัตถุประสงค์ที่จะนำไปใช้งานต่อไป (ดูรูปที่ 2.1)

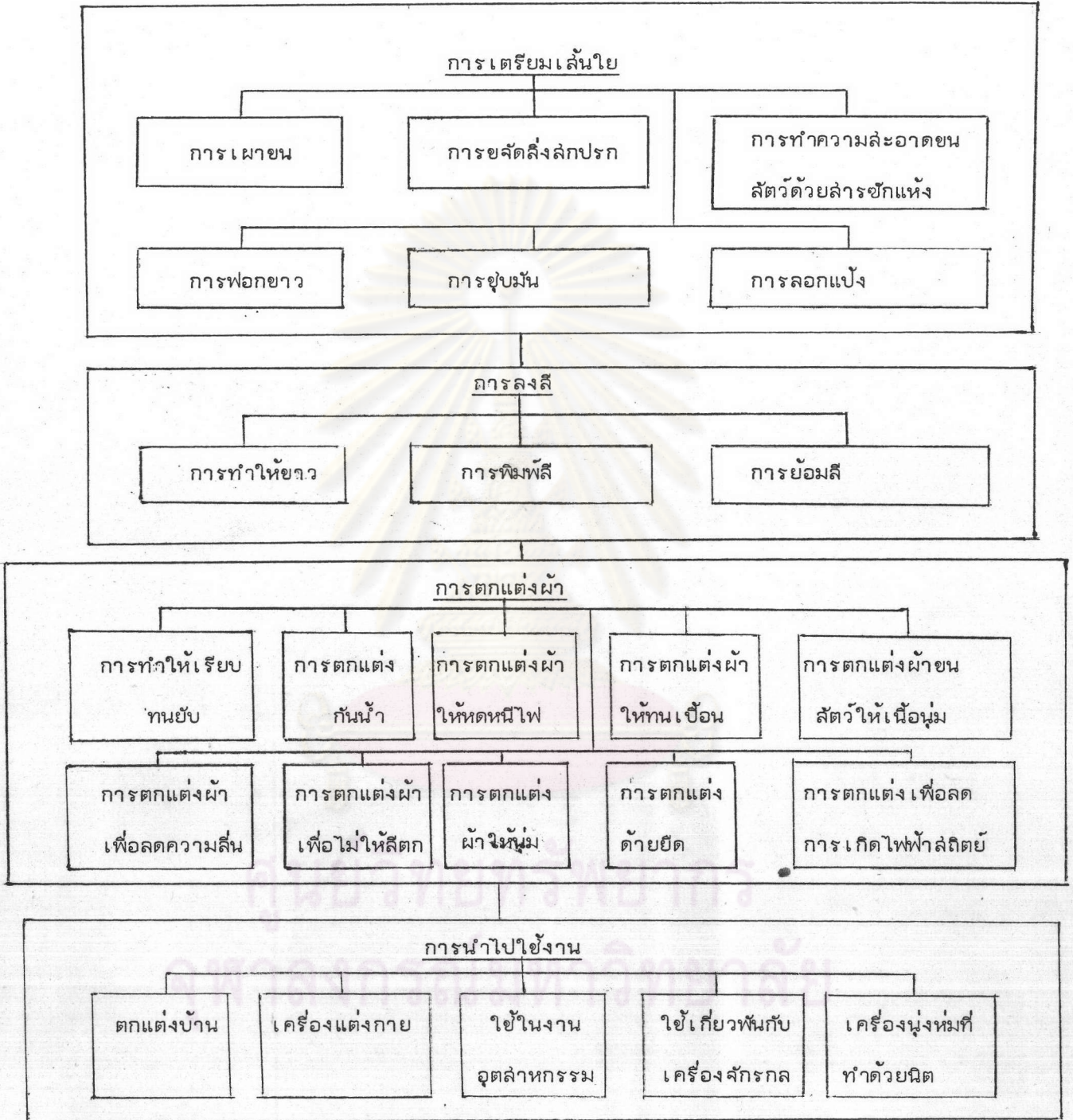
น้ำเสียจากโรงงานประเภทสิ่งทอส่วนใหญ่มาจากโรงย้อม น้ำเสียอื่น ๆ นอกจากนี้ได้แก่น้ำเสียที่มาจากขบวนการเตรียมวัสดุสิ่งทอก่อนทำการย้อม แต่ในงานวิจัยนี้จะเน้นถึงน้ำเสียที่ออกจากขบวนการย้อมสีเป็นสำคัญ ปริมาณน้ำเสียมีมากน้อยเท่าไรนั้นไม่อาจจะระบุให้ชัดเจนลงไปได้ เพราะสีย้อมแต่ละประเภทมีกรรมวิธีในการย้อมที่แตกต่างกัน เช่นการย้อมในหม้อย้อมแบบครั้งคราว (batch) จะให้ปริมาณน้ำน้อยแต่ปริมาณความเข้มข้นของสิ่งสกปรกสูง ส่วนการย้อมในเครื่องย้อมแบบต่อเนื่องจะให้ผลตรงกันข้าม ทั้งนี้ปริมาณมลสารสีในน้ำเสียจะขึ้นอยู่กับกรรมวิธีของการย้อมแต่ละแบบ ว่ามีการติดสีบนเนื้อผ้าดีมากน้อยต่างกันเพียงไรด้วย

การที่จะทำความเข้าใจถึงลักษณะน้ำทิ้งจากโรงงานประเภทสิ่งทอนั้นจำเป็นต้องทำความเข้าใจถึงเรื่องการย้อมตั้งแต่การเตรียมวัสดุสำหรับการย้อม, สีย้อม, สารเคมีที่ช่วยในการย้อม ฯลฯ เสียก่อน อันจะได้กล่าวโดยย่อ ๆ ดังต่อไปนี้

2.1 การเตรียมวัสดุสำหรับการย้อม

เส้นด้ายและผ้าที่ออกจากโรงปั่นหรือโรงทอนั้น มักมีลักษณะหยาบและมีสิ่งสกปรกเสียดปนมากมาย เช่น แป้งที่ใช้ลงเส้นด้ายยีน คราบไขมัน ซีดิน ซีผึ้ง สีสรรรมชาติในเส้นใย ฯลฯ สารพวกนี้ก่อให้เกิดอุปสรรคในการย้อม ถ้าไม่ทำการขจัดออกผลที่ได้จากการย้อมจะต่างและสีจะติดด้ายหรือผ้าไม่สม่ำเสมอ⁽⁶⁾ การขจัดสิ่งเสียดปนซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการย้อมสีของผ้าหรือเส้นใยออกนี้เรียกว่า "การเตรียมวัสดุสิ่งทอ" ขบวนการมีหลายขั้นตอน แตกต่างกันไป

เส้นใยทุกชนิดทั้งที่อยู่ในรูปเส้นด้ายหรือผืนผ้า



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการผลิตของอุตสาหกรรมประเภทสิ่งทอ

ตามชนิดของ เส้นใยและลักษณะของผ้า ขบวนการที่จะกล่าวต่อไปนี้เน้นหนักไปในการเตรียมผ้าฝ้ายซึ่งเป็นเส้นใยที่มีสิ่งเจือปนมากกว่าเส้นใยชนิดอื่น ๆ และผลการศึกษานี้จะครอบคลุมขบวนการเตรียมวัสดุสิ่งทออื่น ๆ ได้แทบทั้งหมด

การขจัดสิ่งเจือปนออกจากวัสดุสิ่งทอนี้ อาจทำในขั้นตอนที่เป็นด้ายหรือผ้า แล้วแต่จุดประสงค์ในการใช้งาน กรรมวิธีในการทำ ความสะอาดที่สำคัญได้แก่การลอกแป้ง (desizing) การขจัดสิ่งสกปรกพวกไขมัน, ขี้ผึ้ง (scouring) และการฟอกขาว (bleaching)

2.1.1 การลอกแป้ง (desizing)

ผ้าฝ้ายก่อนทำความสะอาดมักจะทำการเผา เส้นใยที่เป็นขนซึ่งโผล่ขึ้นมาจากผิวผ้า เพื่อให้ผ้ามีผิวเรียบก่อน จากนั้นจึงเข้าสู่ขบวนการลอกแป้ง

แป้งที่ติดอยู่บนเนื้อผ้ามาจากการลงแป้ง เส้นด้ายยืนในขบวนการทอผ้า ทำให้เส้นด้ายแข็งตัวพอเพื่อความสะอาดในการทอ และทนต่อการเสียดสีของเครื่องทอ การลอกแป้งเป็นขบวนการทำให้แป้งละลายตัวไปเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้ สามารถจำแนกได้ 2 วิธีคือ

1. การลอกแป้งโดยวิธีไฮโดรไลส (hydrolytic methods)
2. การลอกแป้งโดยวิธีออกซิไดส์ (oxidative methods)

การลอกแป้งโดยวิธีไฮโดรไลส กระทำได้ 3 แบบคือ

- ก. แช่เปื่อยโดยอาศัยเชื้อต่าง ๆ (rot steeping)
- ข. แช่ด้วยกรด (acid steeping)
- ค. ต้มด้วยสารช่วยย่อย (enzyme desizing)

การลอกแป้งโดยวิธีออกซิไดส์ นิยมใช้ก๊าซคลอรีน โซเดียมคลอไรท์ และโซเดียมโบรไมท์

การลอกแป้งจะกระทำด้วยวิธีใดขึ้นกับทักษะและเครื่องมืออุปกรณ์ของแต่ละโรงงาน แต่ในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไปมักจะทำการลอกแป้งโดยโซเดียมโบรไมท์

2.1.2 การขจัดสิ่งสกปรก (scouring)

Scouring มีจุดมุ่งหมายเพื่อขจัดสิ่งสกปรกที่ไม่ใช่เซลล์ลูลล์ เช่น ไขมัน, ไขมันขี้ผึ้ง สีธรรมชาติ ให้หมดไปจากเส้นใยเพื่อให้ผ้ามีคุณสมบัติกันสีย้อม และสารช่วยย้อมดีขึ้น วิธีขจัด

สิ่งสกปรกออกจากเส้นใยกระดาษได้ 2 วิธีคือ ทำในหม้ออัดความดันที่เรียกว่า หม้อเคียร์ (kier) หรืออาจใช้ขบวนการแบบต่อเนื่องโดยใส่สารละลายต่างแก๊ (นิยมใช้โซดาไฟ) ผสมกับสารลดความตึงผิว เช่น สบู่หรือผงซักฟอกลงในหม้อต้ม ต่างและสารลดผิวจะทำปฏิกิริยากับวัสดุเสี้ยนที่ติดอยู่กับเส้นใย เพื่อให้ละลายออกมาและหลังจากทำการซักล้างจะได้ผ้าหรือเส้นใยที่สะอาดปราศจากสารเสี้ยนเหล่านี้

2.1.3 การฟอกขาว (bleaching)

สิ่งสกปรกทั้งหลายในเส้นด้ายและผ้าส่วนมากจะถูกขจัดออกไปโดยการลอกแป้งและการขจัดสิ่งเสี้ยน จะคงเหลือแต่สีตามธรรมชาติ ซึ่งต้องทำการขจัดออกเสียก่อน เพราะจะมีผลกระทบในการย้อมสีภายหลังได้ วิธีการขจัดดังกล่าวเรียกว่า การฟอกขาว ซึ่งถือว่าเป็นการทำความสะอาดขั้นสุดท้ายก่อนนำไปย้อมสี

การฟอกขาวกระดาษได้ 2 วิธีใหญ่ ๆ คือ วิธีรีดักชัน (reduction method) และวิธีออกซิเดชัน (oxidation method) ปัจจุบันวิธีรีดักชันไม่นิยมใช้แล้ว นอกจากจะใช้ลอกสีที่ไม่ต้องการออก

วิธีออกซิเดชัน เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในการฟอกขาว มีเคมีที่ใช้ยู่หลายชนิดคือ โซเดียมไฮโปคลอไรท์, โซเดียมคลอไรท์, ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และสารประกอบเปอร์ออกไซด์อื่น ๆ แต่ละชนิดมีผลภาวะในการฟอกขาวที่แตกต่างกันออกไป ผ้าหรือเส้นใยที่ผ่านการฟอกขาวเมื่อนำไปซักล้างจะได้ผ้าและเส้นใยที่สะอาด พร้อมทั้งจะนำไปทำการฟอกย้อมหรือตกแต่งต่อไป

2.2 การย้อมสี

วัตถุประสงค์ของการย้อมสีโดยสรุปคือทำเพื่อเพิ่มคุณสมบัติและคุณค่าของผ้าให้สูงขึ้น การย้อมผ้าหรือด้ายให้มีสีสม่ำเสมอและทนทานต่อการซักล้างดีนั้น จะต้องทำให้สีย้อมเข้าไปติดภายในเส้นใย จะติดแต่เพียงภายนอกไม่ได้ การที่จะทำความเข้าใจถึงการย้อมสีให้ลึกซึ้งเป็นงานที่ยาก เพราะนอกจากต้องอาศัยความรู้ทางทฤษฎีอย่างละเอียดแล้วยังต้องอาศัยประสบการณ์อีกไม่น้อย ดังนั้นการศึกษารวสีนี้จะกล่าวถึงปัจจัยหลักที่เกี่ยวข้องกับการย้อมสีอย่างกว้าง ๆ เพื่อให้เข้าใจถึงสภาพของการย้อมสีโดยสังเขป

2.2.1 เส้นใย

เส้นใยที่ใช้ในการปั่นด้ายและทอผ้าแบ่งเป็น 2 หมู่ใหญ่ ๆ คือ ไยธรรมชาติและ
ใยสังเคราะห์

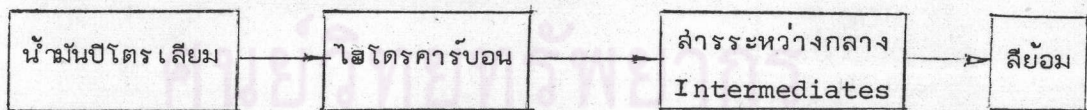
ใยธรรมชาติได้จากพืชหรือสัตว์ก็ได้ ที่ผลิตจากพืชได้แก่ฝ้าย, ปอ ส่วนใหญ่จะ
ประกอบด้วยเซลลูโลส ส่วนใยที่ผลิตจากสัตว์ได้แก่ ขนสัตว์หรือไหม ซึ่งส่วนประกอบทางเคมี
ส่วนใหญ่เป็นโปรตีน

ส่วนใยสังเคราะห์ผลิตขึ้นจากสารเคมีโมเลกุลใหญ่ ๆ บั่นออกมาเป็นเส้นใยให้ได้ขนาด
ตามต้องการ ที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบันได้แก่ โพลีเอสเตอร์ โพลีเอไมด์ และโพลีอะคริลิค (7,8)

เส้นใยไม่ว่าจะเป็นใยธรรมชาติหรือใยสังเคราะห์ประกอบด้วยโมเลกุลเล็ก ๆ ต่อกัน
เป็นเส้นยาว เมื่อนำไปดึงให้ยืดออกโมเลกุลจะเรียงตัวดีขึ้น การเรียงตัวแบ่งได้เป็น 2 แบบ
คือส่วนที่โมเลกุลเรียงตัวเป็นระเบียบแน่น และส่วนที่โมเลกุลเรียงตัวกันไม่เป็นระเบียบ ซึ่งจะ
เรียงตัวกันอย่างหลวม ๆ อาจเรียกง่าย ๆ ว่า ช่องว่าง (pore) ดังนั้นในการเลือกสีย้อม
สำหรับเส้นใยแต่ละชนิดต้องเลือกสีย้อมที่มีขนาดของโมเลกุลพอเหมาะที่จะให้สีซึมเข้าไประหว่าง
โมเลกุลเส้นใยได้ทั่วถึงและสม่ำเสมอ

2.2.2 สีย้อม

การผลิตสีย้อมสามารถแสดงด้วยแผนภาพสั้น ๆ (8) ได้ดังนี้



ขบวนการไนเตรชัน

แอมมิเนชัน ฯลฯ

สีย้อมที่มีการผลิตขึ้นใช้ในขบวนการย้อมด้ายหรือผ้ามีหลายชนิด การที่จะนำสีย้อมชนิด
ใดมาใช้ย้อมให้ได้ผลดีนั้น ขึ้นอยู่กับการรวมตัวของสีกับเส้นใยซึ่งต้องมีความมากกว่าการที่สีจะรวมตัว
กับน้ำ ภาวะเช่นนี้เกิดขึ้นได้เมื่อโมเลกุลของสีย้อมมีหมู่อะตอม ซึ่งถูกจัดให้เรียงตัวในลักษณะที่ทำให้
ให้เกิดการติดติดกับเส้นใยแล้วเกิดแขน (bond) ยึดกันแน่น อันอาจการติดติดของสีย้อมกับเส้นใย
จำแนกได้เป็น 4 ชนิด ดังนี้

1. ไฮโดรเจนบอนด์ (hydrogen bond)
2. แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waals' forces)
3. แรงไอออน (ionic forces)
4. โควาเลนต์บอนด์ (covalent bond)

การดูดติดระหว่างโมเลกุลของสีย้อม และโมเลกุลของเส้นใยมักจะไม่ได้เกิดจากอิทธิพลของแรงใดแต่ลำพัง อย่างน้อยจะต้องประกอบด้วยแรง 2 ชนิดขึ้นไป หรืออาจจะเกิดทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน แรงดูดติดทางเคมีที่จะทำให้การยึดติดได้ดีที่สุดได้แก่ โควาเลนต์บอนด์

นอกจากนี้รูปร่าง และขนาดของโมเลกุลสีย้อม ก็มีอิทธิพลหรือผลกระทบในการดูดติดระหว่างโมเลกุลสีย้อมกับโมเลกุลเส้นใยด้วย กล่าวคือโมเลกุลของสีย้อมยิ่งเล็ก และยาวเท่าไร มีโอกาสที่จะลอดทะลุผ่านช่องว่างเข้าไปในเส้นใยได้มาก การดูดติดจึงดีขึ้น หรือถ้าโมเลกุลของสีย้อมมีลักษณะแบน และมีความกว้างมากกว่าความยาวมาก ๆ ก็ทำให้การติดของสีย้อมมีความคงทนมากขึ้นด้วยดังนี้ เป็นต้น⁽⁹⁾ กล่าวได้ว่าโมเลกุลของสีย้อมยึดเกาะกับโมเลกุลของเส้นใยเป็นผลเนื่องจากแรงทางเคมีและผลทางฟิสิกส์ร่วมสนับสนุนกัน โดยมีสารบางชนิดเข้าช่วยเพื่อที่จะทำให้โมเลกุลของสีย้อมและโมเลกุลของเส้นใยเกิดปฏิกิริยาระหว่างกันได้ดีขึ้น สารเคมีที่กล่าวถึงนี้คือสารช่วยย้อม

2.2.3 สารช่วยย้อม (additives)

สารช่วยย้อมที่ใส่ในขบวนการย้อมผ้า เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย้อมให้มีการดูดติดสีได้มากขึ้น และสม่ำเสมอขึ้น นอกจากนี้ยังเพิ่มความคงทนในการยึดเกาะของสีกับเส้นใยอีกด้วย สารช่วยย้อมมีหลายชนิด แต่ที่สำคัญสามารถแบ่งได้เป็น 7 ประเภท⁽⁹⁾ คือ

1. กรด : ใช้สำหรับการย้อมเส้นใยจำพวกโปรตีนและไนลอน เมื่อใช้สีย้อมเอซิด
2. ด่าง : ใช้สำหรับย้อมใยเซลลูโลสด้วยสีย้อม แร็ด, กัมมะถันและอะโซอิด
3. เกลือ : ใช้ในการย้อมด้วยสีย้อมเบสิกและการย้อมเซลลูโลสทุกชนิด
4. สารช่วยให้สีสม่ำเสมอ : ใช้กับสีย้อมแร็ด, สีย้อมเอซิดบางชนิดและสีย้อมดิสเพิร์ส
5. สารนำสี (carriers) : จะใช้เมื่อย้อมใยสังเคราะห์บางชนิด
6. สารละลายอินทรีย์ : จะใช้เมื่อย้อมขนสัตว์และใยสังเคราะห์บางชนิด





7. สารรีดิวซ์ : ใช้สำหรับรีดิวซ์ตัวสีบางชนิด เพื่อประโยชน์ในการดูตีมเข้าไปในเส้นใย

2.3 การเกิดสีของสีย้อม

Witt (10) ได้สรุปว่าสีซึ่งปรากฏออกมาทำให้ตามนุษย์ปกติมองเห็นได้ เกิดจากการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมประเภทหนึ่งภายในโมเลกุลของสีย้อมกลุ่มอะตอมที่กล่าวนี้ เรียกว่า "โครโมฟอร์" (chromophores) ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายกลุ่มคือ

1. กลุ่มไนโตรโซ (nitroso group) - NO (หรือ = N-OH)
2. กลุ่มไนโตร (nitro group) :-NO₂ (หรือ = NO.OH)
3. กลุ่มเอโซ (azo group) : - N = N-
4. กลุ่มเอททีลีน (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 (sulfur group) $\text{>C} = \text{S}$ และ $\text{>C-S-S-C}<$

กลุ่มอะตอมต่าง ๆ เหล่านี้จะเป็นตัวดูดคลื่นแถบแสงสีขาวบางแถบแสงและปล่อยออกมาบางแถบแสง ทำให้มองเห็นสีย้อมมีโทนสีแตกต่างกันไป (10)

สีย้อมโดยทั่วไปนอกจากประกอบด้วยกลุ่ม "โครโมฟอร์" แล้วยังจำเป็นต้องมีกลุ่มอะตอมที่ทำให้สีย้อมทำปฏิกิริยายึดติดกับเส้นใยได้ ซึ่งเรียกกลุ่มอะตอมนี้ว่า "ออกโซโครม" (auxo - chromes) อันได้แก่ - OH, -NH₂, - NHR-, -NR₂ - SO₃ และ -COOH โมเลกุลของสีย้อมใดที่ปราศจากกลุ่มอะตอมออกโซโครม โมเลกุลนั้นจะแสดงคุณสมบัติของสีออกมาได้ แต่ขาดคุณสมบัติในการยึดเกาะกับเส้นใย เรียกโมเลกุลดังกล่าวว่า "โครมาเจน" (Chromagen) ยกตัวอย่างเช่น สีย้อมอะมิโนเอโซเบนซีน มีสูตรโมเลกุลคือ H₂N- - N = N -  กลุ่มอะตอมโครโมฟอร์คือ -N=N- กลุ่มอะตอมออกโซโครม คือ -NH₂ และโมเลกุลที่เรียกว่าโครมาเจนคือ  - N=N-  กลุ่มอะตอมทั้ง 3 ชนิดนี้ จะเป็นส่วนสำคัญ ในการพิจารณาแบ่งกลุ่มของสีย้อมตามสูตรโครงสร้าง

2.4 การจำแนกสีย้อม

การจำแนกสีย้อมในขั้นแรกอาจพิจารณาลักษณะทางกายภาพซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น 2 ชนิดคือ ชนิดหนึ่งละลายน้ำได้ เรียกว่า สีย้อม (dye) อีกชนิดไม่ละลายน้ำเรียกว่า "สีย้อมสี" (pigment) ⁽⁹⁾ แต่ผู้ผลิตจำเป็นต้องหาวิธีการทำให้สีทุกชนิดละลายน้ำได้ เพื่อให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสมและสะดวกในการย้อม โดยอาจใช้ตัวทำละลายช่วยในการทำให้สีประเภทที่ไม่ละลายน้ำ ให้สามารถละลายน้ำได้ ดังนั้นการจำแนกสีย้อมโดยวิธีนี้จึงเกิดความสับสนขึ้นได้ง่าย

โดยทั่วไปแล้ว การจำแนกสีย้อมจะคำนึงถึงส่วนประกอบทางเคมีและการนำไปใช้งาน การจำแนก สีย้อมตามส่วนประกอบทาง เคมีอาจจะมีความยุ่งยากสำหรับผู้ที่ไม่ได้ผ่านการศึกษาด้านเคมีมาโดยตรง แต่การจำแนกสีย้อมด้วยวิธีนี้ยังไม่เป็นที่นิยมเท่าที่ควร เพราะสีในกลุ่มเดียวกันอาจจะมีวิธีการย้อมที่แตกต่างกัน อีกประการที่สำคัญคือ สูตรโครงสร้างที่แท้จริงของสีย้อมหลายชนิดที่นิยมใช้ในปัจจุบันยังไม่ทราบกันเป็นที่แน่ชัด ทำให้การจำแนกสีย้อมด้วยวิธีนี้อาจจะมีขีดจำกัดแต่อย่างไรก็ตามสำหรับสีย้อมที่มีสูตรโครงสร้างที่แน่นอนวิธีจำแนกแบบนี้ก็ยังมีประโยชน์มากสำหรับผู้ศึกษาด้านเคมีโดยตรง ตารางที่ 2.1 เป็นตัวอย่างการจำแนกสีย้อมตามสูตรโครงสร้างทางเคมี ⁽¹¹⁾

การจำแนกสีย้อมที่นิยมกันมากที่สุดในปัจจุบันคือ การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการนำไปใช้งาน การจำแนกสีย้อมด้วยวิธีนี้ เป็นที่ยอมรับกันทั้งผู้ใช้และผู้ผลิตสีย้อม แม้แต่สมาคมที่เกี่ยวข้องกับการย้อมสี "The Society of Dyers and Colourist" ก็ยอมรับว่าเป็นวิธีจำแนกสีย้อมที่เหมาะสม ⁽⁹⁾

ตัวอย่างการจำแนกสีย้อมตามลักษณะการนำไปใช้งาน ได้แก่

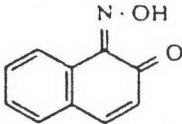
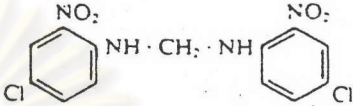
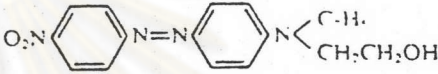
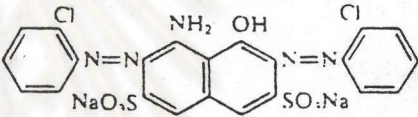
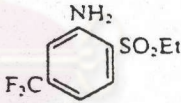
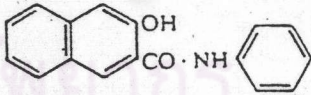
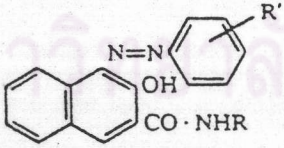
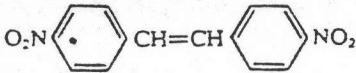
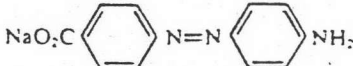
1. สีย้อมเอซิด (acid dyes)

ใช้ย้อมเส้นใยพวกโปรตีน ขนสัตว์ ในสภาวะที่เป็นกรดเจือจาง อาจย้อมพวกฝ้ายได้เล็กน้อย มีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นสีย้อมประกอบของกรดกำมะถันและกลุ่มเอโซ (azo) , แอนทราควิโนน (antraquinone)

2. สีย้อมเบสิค (basic dyes)

เป็นอินทรีย์สีย้อมชนิดที่มีประจุบวก ของเกลือแอมโมเนียม ซัลโฟเนียม หรือ

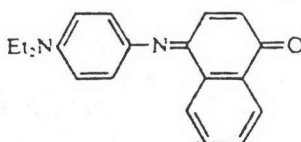
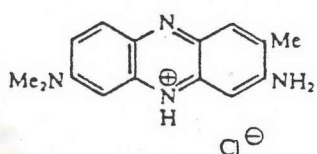
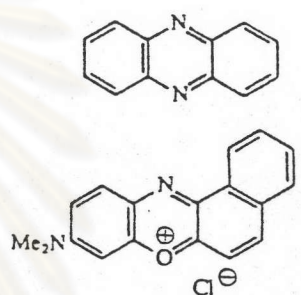
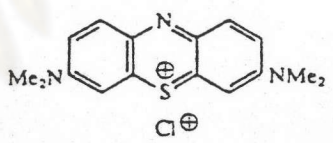
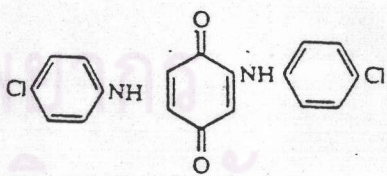
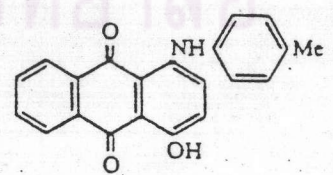
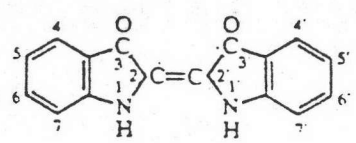
ตารางที่ 2.1 แสดงการจำแนกสีย้อมตามสูตรโครงสร้าง (11)

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	ยังไม่มีสูตร โครงสร้างที่แน่นอน	
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)	

ออกโซเนียม ไซย้อมขนสัตว์และเส้นใยชนิดอื่น ๆ ที่เตรียมให้มีประจุลบในสภาวะที่เป็นกรด มีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดี

3. สีย้อมไคเร็กท์ (direct dyes)

สีย้อมไคเร็กท์ หรือสีย้อมโดยตรง ที่ได้ชื่อแบบนี้เพราะสามารถไซย้อมพวกฝ้ายหรือเส้นใยพวกเซลลูโลสได้โดยตรงไม่ต้องเติมสารเคมีในการช่วยย้อมใด ๆ ทั้งสิ้น แต่ปัจจุบันการย้อมด้วยสีย้อมไคเร็กท์นี้จะใช้เกลือเข้ามาช่วย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย้อมให้สูงขึ้น สีย้อมชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบเอโซพวกซัลโฟนิค เมื่อละลายน้ำอนุโมลลิสจะมีประจุลบ ดังนั้นการย้อมควรมีสารอิเล็กโตรไลต์ เพื่อช่วยในการดูดซึมและย้อมติดเส้นใยได้ดียิ่งขึ้น

4. สีย้อมแวลิต (vat dyes)

ปกติสีย้อมแวลิตไม่ละลายน้ำ ดังนั้นต้องเปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ก่อน จึงจะย้อมได้ โดยใช้สารละลายต่างโซดาไฟกับสารรีดิวซ์ โซเดียมไฮโดรซัลไฟท์เป็นตัวช่วย และการทำให้สีแวลิตกลับคืนอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำโดยการทำออกซิเดชัน สีย้อมประเภทนี้ไซย้อมเส้นใยพวกเซลลูโลสโดยเฉพาะฝ้าย ส่วนประกอบทางเคมีของสีย้อมประเภทนี้ แบ่งเป็น 2 หมู่ ได้แก่ พวกอินดิโก (indigo) และพวกแอนทราควิโนน (antraquinone)

5. สีย้อมรีแอคทีฟ (reactive dyes)

เป็นสีย้อมที่ไซย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุดละลายน้ำได้ดีมาก เมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นต่างโมเลกุลของสีจะทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันโดยโควาเลนต์

6. สีย้อมซัลเฟอร์ (sulfur dyes)

ไซย้อมเส้นใยพวกเซลลูโลสได้ทุกชนิด ปกติสีย้อมประเภทนี้ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้เพียงเล็กน้อย แต่จะละลายน้ำได้ในสารละลายของสารรีดิวซ์ ส่วนใหญ่ประกอบด้วยกลุ่มซัลโฟนิค (sulfonic groups) สีย้อมชนิดนี้เมื่อทำให้ละลายน้ำแล้วจะแทรกซึมตัวเข้าไปในเส้นใยได้ และทำกลับคืนให้อยู่ในรูปเดิมที่ไม่ละลายน้ำได้โดยการทำออกซิเดชัน

7. สีย้อมอะโซอิก (azoic dyes)

สีย้อมประเภทนี้นิยมไซย้อมเส้นใยเซลลูโลส ตัวสีเป็นสารประกอบเอโซ สีย้อมอะโซอิกเป็นสีย้อมที่เกิดขึ้นในเส้นใยด้วยตัวเองโดยปฏิกิริยาทางเคมีที่เรียกว่าปฏิกิริยาควบปลั่ง

(coupling reaction) ระหว่างสารเคมี 2 พวกคือ coupling component พวกหนึ่ง และ diazo component อีกพวกหนึ่งทำให้เกิดสีขึ้น กล่าวคือ ฟูบิวล์ที่ต้องการย้อมด้วย สารประกอบแนพทอลก่อน แล้วย้อมทับหรือทำให้เกิดสีโดยสารละลายไดเอโซเนียม (diazonium salt) เกลื่อนี้จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบแนพทอลเกิดเป็นสารประกอบเอโซที่ให้สีบนเส้นใย

นอกจากนี้ยังมีสีย้อมดิสเพิร์ส (disperse dyes) สีย้อมโลหะ (meltalic dyes) สีย้อมมอแดนท์ (mordant dyes) และสีย้อมโอเนียม (onium dyes) ซึ่งจะไม่กล่าวถึงในที่นี้

2.5 การศึกษาการวัดสี

ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องสี โดยนักวิทยาศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับงานสีโดยตรง มาเป็น เวลายาวนาน ในปัจจุบันมนุษย์สามารถเข้าใจและรับรู้เกี่ยวกับเรื่องสีได้ถึงระดับหนึ่ง และสามารถ นำมาใช้กับงานที่เกี่ยวข้องได้เป็นอย่างดี เช่นงานเทียบสีของการย้อมผ้า งานเทียบสีของน้ำมันพืช เป็นต้น ในประเทศการวัดสีของน้ำเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรม ยังไม่ได้มีการศึกษากันเท่าที่ควร ที่ผ่านมากะทำกันแต่เพียงผิวเผิน และยากที่จะทำการวัดสีออกมาเป็นค่าตัวเลขที่ให้ความหมาย ชัดเจนในทางวิทยาศาสตร์ เพื่อนำไปใช้แสดงหรือเปรียบเทียบได้ด้วยความมั่นใจ เหมือนกับการ วัดค่าความลึกปรกของน้ำทั้งในรูปอื่น ๆ เช่น ค่าบีโอดี, ซีโอดี ฯลฯ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จาก ห้องปฏิบัติการออกมาเป็นตัวเลขที่ชัดเจน

เรื่องการวัดสีที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้จะสรุปการวัดสีของน้ำเสียทางด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม โดยจะกล่าวถึงขั้นตอนในการพัฒนาความคิดเกี่ยวกับสี จนถึงหน่วยวัดสีเอดีเอ็มไอ ซึ่งเป็นหน่วย สีของน้ำเสียที่ให้ความหมายชัดเจน และแม่นยำที่สุดในปัจจุบันที่พึงจะกระทำได้

2.5.1 สีและการเห็นสี

"สี" เป็นสิ่งที่มีลักษณะพิเศษที่รับรู้ได้โดยความรู้สึกของบุคคลและสามารถบรรยายให้ ผู้อื่นรับรู้ได้คร่าว ๆ โดยการเรียกชื่อนั้น ๆ การเห็นสีจะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อมีองค์ประกอบสี่ประการ ด้วยกันคือ แสง วัตถุสี นัยน์ตาของผู้เห็นสี (ที่ตาไม่บอดสี) และสมองที่จะวิเคราะห์และตีความของ สีนั้น ๆ (12)

ถ้าปราศจากแสง จะทำให้ไม่เห็นสี ช่วงคลื่นแสงที่ตามองเห็นได้มีค่าประมาณ 400 - 700 นาโนเมตร การที่เรามองเห็นวัตถุหนึ่ง ๆ เป็นสีต่าง ๆ นั้นเพราะวัตถุนั้นดูดกลืนเอาแสงที่

ความยาวคลื่นช่วงหนึ่งๆไว้ และสะท้อนแต่แสงที่มีความยาวคลื่นอื่นๆออกมา ยกตัวอย่าง เช่นผิวมะ-
เขือเทศลูกจะดูดเอาแถบแสงที่มีช่วงคลื่นความยาวสั้นๆ (น้ำเงินและเขียว)ไว้และสะท้อนแต่
แถบที่มีความยาวคลื่นยาวๆ (สีแดงหรือแสด) ออกมาตามองเห็นผิวมะเขือเทศลูกเป็นสีแดง
อมส้มเป็นต้น แต่การกล่าวถึงสีต่างๆนั้น ถ้าจะบรรยายให้รู้ว่าการกล่าวถึงสีอะไรอย่างชัด-
-เจน จำต้องมีหน่วยวัดที่สามารถบอกออกมาเป็นกฎเกณฑ์ทางวิทยาศาสตร์ ที่เป็นรูปธรรมที่เด่นชัด

2.5.2 การวัดสี

การวัดสีแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆตามลักษณะของการวัดคือ

- การวัดสีที่เทียบกับสีมาตรฐาน
- การวัดสีโดยใช้เครื่องมือวัด

2.5.2.1 การวัดสีที่เทียบกับสีมาตรฐาน

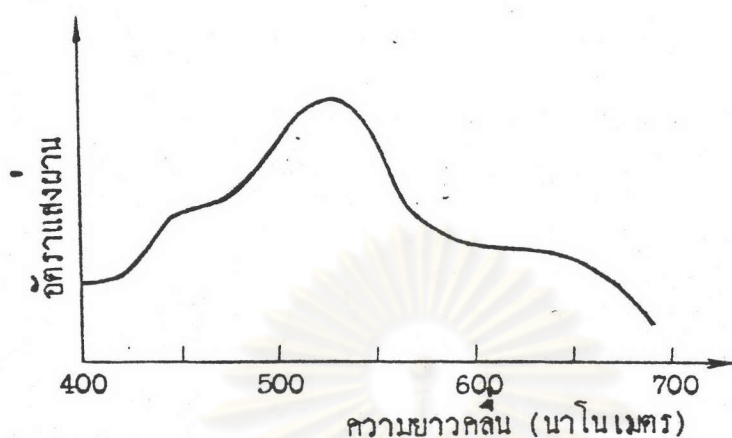
วิธีนี้ใช้ความรู้ลึกของบุคคลเข้ามาเกี่ยวข้อง การวัดสีโดยการเทียบกับสี
มาตรฐาน กระทำกันบ้างในงานทางแหล่งน้ำ สีมาตรฐานนี้ถูกกำหนดขึ้นโดยสมาคมสาธารณสุข
แห่งอเมริกา (American Public Health Association , A P H A)⁽¹³⁾ สาร
ละลายมาตรฐานดังกล่าวเตรียมได้โดยใช้โปตัสเซียมคลอโรแพลทดีเนท (K_2PtCl_6) และ
โคบอลท์คลอไรด์ ($CoCl_2 \cdot 6H_2O$) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน ซึ่งจะมีโทนสีออกเหลืองคล้าย
กับสีของแหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้กับงานแหล่งน้ำโดยตรง สำหรับงานที่
เกี่ยวกับสีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรม โดยเฉพาะโรงงานฟอกย้อมซึ่งมีสีของน้ำเสียออกมาหลาย
โทนสี การวัดสีโดยเทียบกับสารละลายมาตรฐานของ เอพีเอชเอ็นนี้จึงกระทำไม่ได้

2.5.2.2 การวัดสีโดยใช้เครื่องมือวัด แบ่งออกเป็น 2 วิธีด้วยกันคือ

1. การวัดสีด้วยการวัดอัตราแสงผ่าน
 2. การวัดสีด้วยการผสมแม่สีมาตรฐาน 3 สี
- ก. การวัดสีด้วยการวัดอัตราแสงผ่าน

การวัดสีด้วยอัตราแสงผ่านนี้ปกติแล้วจะทำการวัดด้วยเครื่องสเปค-
โตรโฟมิเตอร์ เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์แสงผ่าน (transmittance) ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ
ตั้งแต่ 400-700 นาโนเมตร การวัดสีวิธีนี้จะมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น ถ้าทำการวัดเปอร์เซ็นต์

แสงผ่านที่ความยาวคลื่นในช่วงที่ถี่ขึ้น การวัดด้วยวิธีนี้จะแสดงออกมาด้วยรูปภาพ
ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างการวัดสีด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

เมื่อได้ค่าเปอร์เซ็นต์แสงผ่านแล้ว สามารถแปลงไปเป็นหน่วยสีสากลซึ่งรู้จักในชื่อหน่วย
ซีไออี ได้โดยนำค่าไปคำนวณ โดยใช้ตารางที่ 2.2 เป็นฐาน

ข. การวัดโดยการผสมแม่สีมาตรฐาน 3 สี

การวัดสีด้วยวิธีนี้อาศัยหลักการที่ว่าสีใด ๆ ที่ตามนุษย์มองเห็น สัก
สามารถสร้างเปลี่ยนขึ้นมาได้โดยการใช้แม่สีมาตรฐาน 3 สี ผสมกันในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่เหมาะสม
แบ่งออกได้เป็น 2 ระบบ ถ้าเป็นระบบการผสมเชิงบวกของแสงสี (additive mixture) of
lights) แม่สีทั้งสามนี้จะเป็นแสงสีแดง (red) , เขียว (green) และน้ำเงิน (blue)
ถ้าเป็นระบบการผสมเชิงลบของสารสี แม่สีทั้งสามนี้จะเป็นสีบานเย็น (magenta) สีน้ำเงิน
(cyan) และสีเหลือง⁽¹²⁾

เครื่องมือที่ทำการวัดสีโดยอาศัยการผสมแม่สีมาตรฐาน 3 สี มีชื่อว่าอุปกรณ์โท-
มิเตอร์ ผลิตโดยบริษัทโลวิบอนด์ ในประเทศอังกฤษ ซึ่งในต่างประเทศรู้จักกันแพร่หลายมา
นานพอสมควร แต่ในประเทศไทยเพิ่งจะมีการนำเข้ามาเมื่อไม่นาน อุปกรณ์นี้ไม่ใช่เป็นเครื่อง
วัดสี แต่เป็นเครื่องเทียบสี จำเป็นต้องมีผู้สังเกตหรือผู้อ่านสีมาร่วมในการเทียบสีด้วย การวัดสี
ทำโดยใช้หลักการผสมแม่สี 2 สีใน 3 สี กับการปรับความสว่างในการมอง เพื่อให้ได้สีเหมือน
กับตัวอย่างที่นำมาวัด

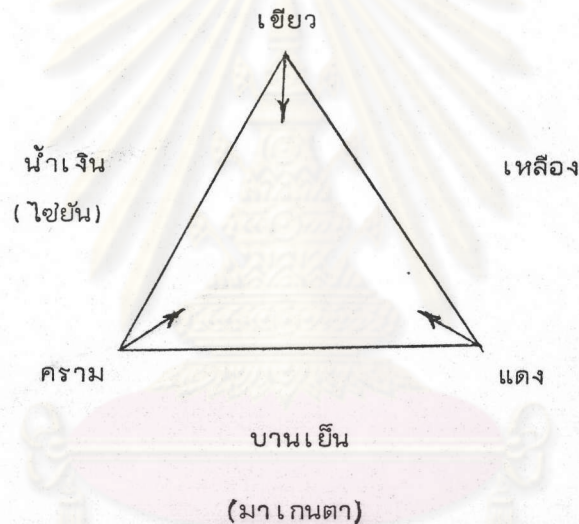
ตารางที่ 2.2 การเปลี่ยนค่าอัตราแสงผ่านเป็น หน่วยสี CIE (14)

Wave-length nm.	% T	X		Y		Z	
		Factor	%T x Fact.	Factor	%T x Fact.	Factor	%T x Fact.
400		0.00108		0.00002		0.00513	
410		0.00329		0.00009		0.01570	
420		0.01238		0.00037		0.05949	
430		0.02997		0.00122		0.14628	
440		0.03975		0.00262		0.19938	
450		0.03915		0.00443		0.20638	
460		0.03362		0.00694		0.19299	
470		0.02272		0.01058		0.14972	
480		0.01112		0.01618		0.09461	
490		0.00363		0.02358		0.05274	
500		0.00052		0.03401		0.02864	
510		0.00089		0.04833		0.01520	
520		0.00576		0.06462		0.00712	
530		0.01523		0.07934		0.00388	
540		0.02785		0.09149		0.00195	
550		0.04282		0.09832		0.00086	
560		0.05880		0.09841		0.00039	
570		0.07322		0.09147		0.00020	
580		0.08417		0.07992		0.00016	
590		0.08984		0.06627		0.00010	
600		0.08949		0.05316		0.00007	
610		0.08325		0.04176		0.00002	
620		0.07070		0.03153		0.00002	
630		0.05309		0.02190		0.00000	0.00
640		0.03693		0.01443		0.00000	0.00
650		0.02349		0.00886		0.00000	0.00
660		0.01361		0.00504		0.00000	0.00
670		0.00708		0.00259		0.00000	0.00
680		0.00369		0.00134		0.00000	0.00
690		0.00171		0.00062		0.00000	0.00
700		0.00156		0.00056		0.00000	0.00
		X = Sum =		Y = Sum =		Z = Sum =	

การพัฒนาการวัดสีไปเป็นหน่วยลากล ซี ไอ อี

เริ่มแรกมีการใช้กฎเกณฑ์อย่างหยาบ ๆ ในการอ้างอิงเกี่ยวกับเรื่องสี เช่น สีครีม สีเปลือกมังคุด สีหมากลู้ก เป็นต้น แต่การอ้างอิงมาตรฐานหรือนิยามดังกล่าวนี้ไม่เพียงพอแก่การวิเคราะห์และวินิจฉัยทางวิศวกรรม จำต้องหาหน่วยวัดสีที่เป็นรูปธรรมที่เด่นชัด และก่อให้เกิดความเข้าใจกันและกันได้ถ่องแท้มากกว่านี้ขึ้นมาใหม่

แมกซ์เวลล์ได้ให้หลักการเกี่ยวกับการบรรยายสีขึ้นมา โดยใช้สามเหลี่ยมแมกซ์เวลล์ เป็นเครื่องมือในการบ่งบอกลักษณะสี (ดูรูปที่ 2.3)

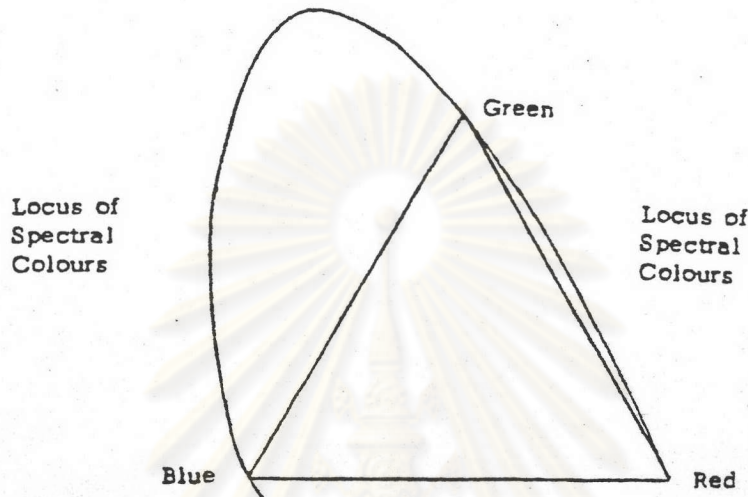


รูปที่ 2.3 ทฤษฎีสามเหลี่ยมแมกซ์เวลล์

ในสามเหลี่ยมนี้ กำหนดให้แม่สีเชิงบวกอยู่ที่ปลายแหลมหรือมุมทั้งสามและแม่สีเชิงลบอยู่ตามด้านของสามเหลี่ยม โดยแม่สีเชิงลบเกิดขึ้นจากการผสมของแม่สีเชิงบวกในแต่ละด้าน ทั้งนี้ความเข้มข้นของสีทุกชนิดทั้งแม่สีลบและบวกจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อวิ่งเข้าสู่ศูนย์กลางของสามเหลี่ยม การลดลงของความเข้มของสีเกิดจากอิทธิพลของการเลี้ยวด้วยสีขาวที่มีมากขึ้นตามลำดับ เมื่อวิ่งเข้าสู่ศูนย์กลางดังกล่าว จุดใด ๆ ภายในบริเวณสามเหลี่ยมนี้แสดงความเป็นสีหนึ่ง ๆ ได้อย่างไม่มีการเปลี่ยนแปลง

จากการทดลองใช้แถบแสงของแม่สี R, B และ G ผสมกันปรากฏผลลัพธ์ไม่เป็นไปตามรูปสามเหลี่ยมแมกซ์เวลล์ กล่าวคือจะมีค่าสีหลายค่าเมื่อผสมด้วยแม่สีในอัตราส่วนต่าง ๆ

แล้วจะเกิดสีที่มีความเข้มอยู่นอกเขตของสามเหลี่ยมแมกซ์เวลล์ออกไป แต่ยังอยู่ในขอบเขตของเส้นโค้งที่เรียกว่า Locus of Spectral Colour ที่คลุมรอบสามเหลี่ยมแมกซ์เวลล์ อีกที่หนึ่ง ดังรูปที่ 2.4



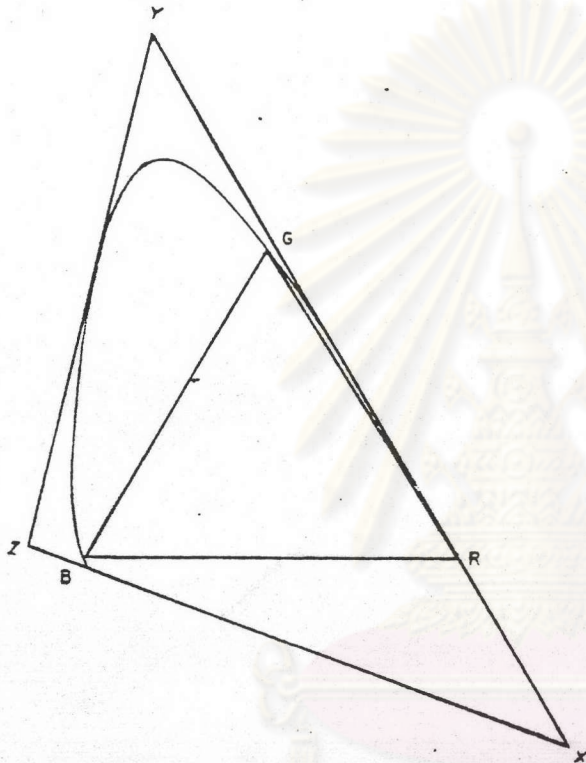
รูปที่ 2.4 แสดงค่าขอบเขตการผสมสีของแม่สีทั้งสาม

ดังนั้นถ้าใช้สามเหลี่ยมแมกซ์เวลล์ RGB เดิมเป็นเส้นอ้างอิง ค่าบางค่าของแถบแม่สี โดยเฉพาะสี B และ R จะต้องเป็นค่าลบ ด้วยเหตุนี้จึงได้ตั้งสามเหลี่ยมสมมติ XYZ ขึ้นมาใหม่ โดยมี X, Y และ Z เป็นแม่สีสมมติอยู่ที่ยอดของสามเหลี่ยมใหม่ (ดูรูปที่ 2.5) วิธีนี้จะทำให้ค่าแม่สีอันใหม่ เรียกว่า "ค่าสิ่งกระตุ้นให้เห็นสีสามค่า" (tristimulus values) X, Y และ Z จะมีค่าบวกตลอดเวลา⁽¹⁵⁾

แม้ว่าปรับค่าสามเหลี่ยมแมกซ์เวลล์มาเป็นสามเหลี่ยม XYZ แล้วก็ตาม ยังคงแสดงสีได้แค่ 2 มิติ ต่อมาเมื่อองค์กรนานาชาติที่ยอมรับว่าเป็นองค์กรหลักในเรื่องราวต่าง ๆ เกี่ยวกับสีคือ The Commission International De L'Eclairage (CIE) ได้จัดประชุมและตกลงกันให้มาตรฐานทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นรูปธรรมมาช่วยในการบรรยายความเป็นสีที่เป็นนามธรรม และตั้งหน่วยสากล ซีไออี ขึ้น⁽¹⁵⁾

หลักเกณฑ์ของหน่วยวัดสีสากล ซีไออี เป็นการวัดสีในลักษณะ 3 มิติ คือ มีค่าที่แสดงค่าสีที่เห็นอันมาจากการผสมแม่สี 2 สี (แสดงได้ 2 มิติ) และความจ้าของสี (อีก 1 มิติ) รวมเข้าด้วยกันโดยอาศัยหลักการตั้ง เดิมของทฤษฎีสามเหลี่ยมแมกซ์เวลล์ มาดัดแปลงให้เข้ากับสภาพ

ความเป็นจริงที่ค้นพบจากการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และมีการตกลงกันต่อไปว่า การพิจารณาการมีแสง (luminosity) หรือความจ้า (brightness) ซึ่งเป็นอีกมิติหนึ่งจะนำค่าไปวัดให้เท่ากับสี Y หรือสีเขียวเข้มเกินอิม (supersaturated green) ส่วนสี X หรือสีแดงเข้มเกินอิม และสี Z หรือสีครามเข้มเกินอิมนั้น -



ล้ามเหลี่ยม RGB คือล้ามเหลี่ยมแมกซ์เวลล์เดิมที่มีสีคราม, เขียว และแดง เป็นแม่สีเชิงบวก ล้ามเหลี่ยม XYZ เป็นล้ามเหลี่ยมที่พัฒนามาจากล้ามเหลี่ยมแมกซ์เวลล์

รูปที่ 2.5 ล้ามเหลี่ยม XYZ ที่พัฒนามาจากล้ามเหลี่ยมแมกซ์เวลล์

กำหนดให้พิจารณาเฉพาะด้านสีแต่เพียงอย่างเดียว ยังบ่งบอกถึงความจ้าหรือความทึบของตัวอย่างด้วย การระบุค่าของสีใด ๆ จึงสามารถระบุค่าสีนั้น ๆ ที่ชัดเจนได้โดยการระบุว่าสีนั้นมีค่า tristimulus values X,Y,Z เท่าไร

ในบางครั้งเพื่อความสะดวกในการนำไปวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์หรือนำค่ามาแสดงในทอม 2 มิติ จึงได้กำหนดค่า x,y,z ซึ่งเรียกว่า Chromaticity Coordinates ขึ้นมาโดยกำหนดให้

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

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

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

$$\text{และ } x+y+z = 1.0$$

ดังนั้น x, y, z จะเป็นสัดส่วนกับ X, Y, Z และส่องค่าใด ๆ ของ x, y, z ได้แก่ xy, yz, zx จะให้ความรู้สึกของโทนสีและความอิ่มสี โดยมี Y เป็นค่าแสดงความจ้าของตัวอย่าง แต่ถ้า X, Y, Z มีการเปลี่ยนค่า แต่ยังคงเป็นสัดส่วนกันอยู่ สีจะคงเป็นสีเดิม แต่จะแตกต่างกันตรงที่ความจ้า ค่า chromaticity coordinates มักจะแสดงในรูปของค่า x, y ดังแสดงในรูปที่ 2.6

สรุปการวัดสีโดยให้ค่าแสดงอยู่ในหน่วยลากล ซีไออี จะต้องบ่งบอกค่าของสีในรูปของ X, Y, Z หรือในรูปของ x, y, z (16)

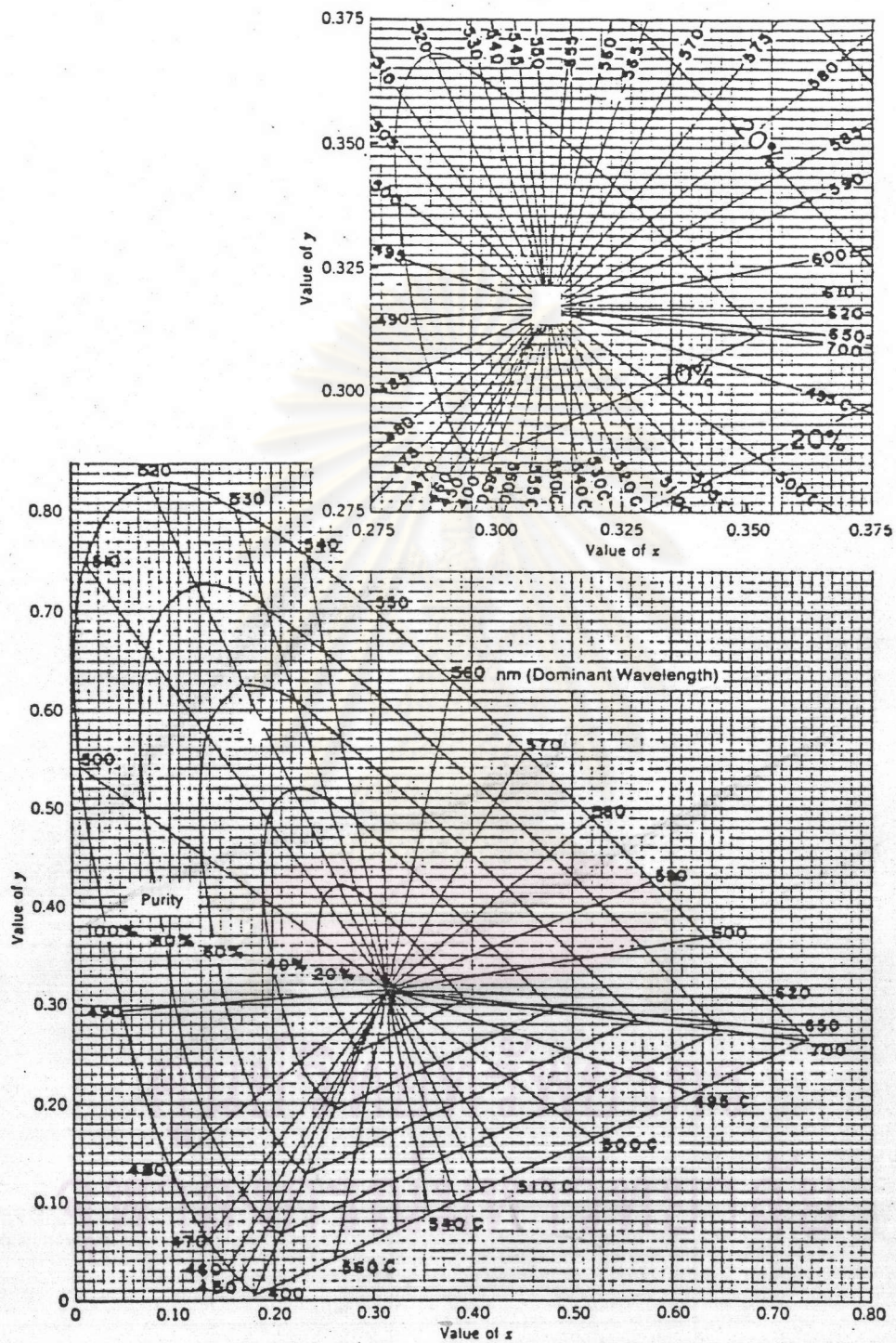
การวัดสีด้วยวิธีต่าง ๆ จะถือว่าการวัดค่าของสีเป็นไปอย่างสมบูรณ์ ผลลัพธ์จะต้องสามารถแปลงค่าเข้าหน่วยลากล ซีไออี ได้ โดยปกติเครื่องมือที่ใช้วัดค่าของสี, ในงานวิเคราะห์วิจัยทางด้านวิศวกรรมมักจะใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และเครื่องเทียบสีกินโทมิเตอร์ ซึ่งเครื่องมือวัดสีทั้งสองชนิดนี้จะมีวิธีการวัดและให้ค่าออกมาในรูปแบบเฉพาะตัว เมื่อจะนำค่าสีไปใช้งานต่อจำเป็นต้องเปลี่ยนค่าที่วัดได้ไปสู่หน่วยลากล ซีไออี

การวัดสีโดยสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และแปลงค่าที่ได้เป็นหน่วยลากล ซีไออี X, Y, Z ดังแสดงในหัวข้อ "การวัดสีด้วยการวัดอัตราแสงผ่าน" ที่กล่าวมาแล้ว

การวัดสีโดยเครื่องเทียบสีกินโทมิเตอร์โดยสรุป

ในที่นี้จะกล่าวถึงเครื่องกินโทมิเตอร์แบบ Lovibond AF 751 ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์วิจัยครั้งนี้

เครื่องกินโทมิเตอร์มีฟิลเตอร์สำหรับเทียบสี 3 ชนิดคือ สีแดง, เหลือง, น้ำเงิน การอ่านจะอ่านออกมาเพียง 2 สีใน 3 สี เช่น แดง / เหลือง, เหลือง / น้ำเงิน, น้ำเงิน / แดง



รูปที่ 2.6 แผนภาพสี (Chromaticity Diagram)

กับค่าความจ้า (brightness) อีก 1 ค่า โดยปรับที่ scale reading การเปลี่ยนค่าไปเป็นหน่วย ซีไออี ต้องใช้กราฟสำเร็จรูปที่มากับเครื่องมือ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.7, 2.8 และ 2.9 ยกตัวอย่างเช่น ตัวอย่างน้ำชนิดหนึ่งให้ค่าอ่านออกมาได้เท่ากับแดง 3.7 เหลือง 4.4 โดยมีความจ้าปรับโดยเครื่อง (scale reading) = 65 จากรูปที่ 2.7

จากจุดอ้างอิง ลากเส้นผ่านจุดตัดของแดง 3.7 และเหลือง 4.4 ได้ chromaticity coordinates x และ z เท่ากับ 0.442 และ 0.161 ตามลำดับ ดังนั้น $y = 1.0 - 0.442 - 0.161 = 0.397$

การวัดความจ้าไม่ล่ามารถหาได้โดยตรงต้องหาจากค่าความหนาแน่นทางตา หรือที่กำหนดเรียกเป็นค่า "วีดี" (visual density) โดยใช้กราฟสำเร็จรูปที่ 2.8 จากจุดอ้างอิง ลากผ่านแดง 3.7 และเหลือง 4.4 ได้ค่าความหนาแน่นทางตาเท่ากับ 0.21 ค่านี้ยังไม่ถูกต้อง เพราะระหว่างการอ่านค่าสี จำต้องมีการปรับความจ้าหรือทึบของแสงโดยปุ่มควบคุมความจ้า โดยปกติจะตั้งค่าวีดี = 0 ที่ความจ้า 50 % ต้องทำการปรับค่าวีดี ตามด้วย ในกรณีนี้ต้องอาศัย กราฟรูปที่ 2.9 ช่วย ค่าความสว่างในการวัด (scale reading) เท่ากับ 65 จากรูปที่ 2.9 ได้ค่าวีดีเท่ากับ + 0.25 ดังนั้นความหนาแน่นทางตาของตัวอย่างนี้เท่ากับ $0.21 + 0.25 = 0.46$ จากนั้นจึงคำนวณหาค่าความจ้าจากสูตร

$$\text{ความจ้า } Y (\%) = 100 (10^{-VD}) \text{ โดย } VD = \text{visual density}$$

จากค่า chromaticity coordinates x, y, z , และ Y ที่วัดและคำนวณ ได้จะแปลงเป็นหน่วย ซีไออี ในรูป tristimulus values X, Y, Z ได้จากสมการ

$$Y = \text{ค่าความจ้า (ที่ได้จากการวัดและคำนวณ)}$$

$$X = \frac{x}{y} \cdot Y$$

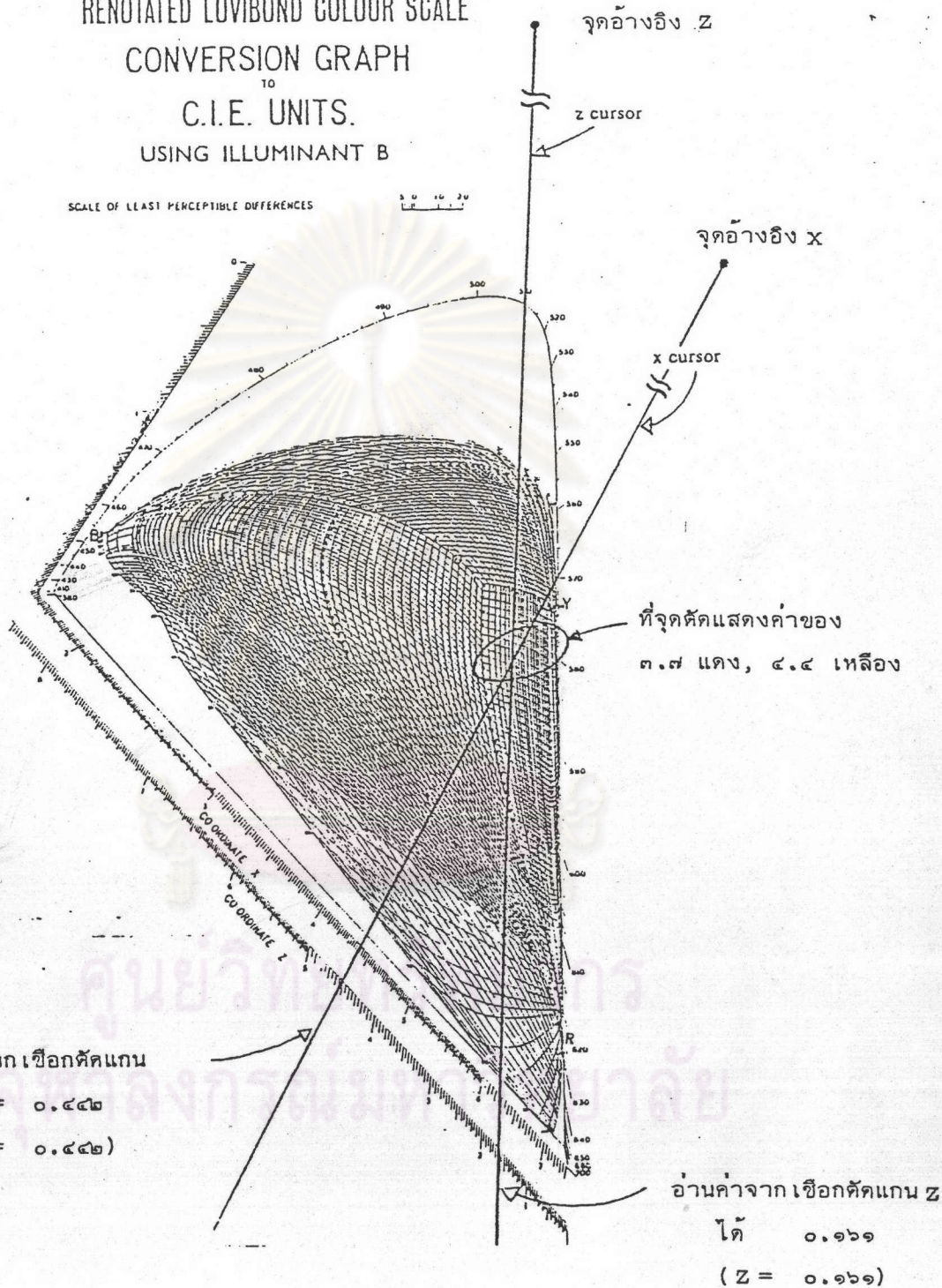
$$Z = \frac{z}{y} \cdot Y$$

2.5.3 การแปลงค่าหน่วยสี ซีไออี เป็นหน่วย เอดีเอ็มไอ

การวัดค่าสีด้วยเครื่องมือต่าง ๆ และเปลี่ยนเข้าสู่หน่วย ซีไออี ได้ถือว่าเป็นวิธีการวัดสีที่เชื่อถือได้ และสมบูรณ์แล้ว ด้วยสามารถอ้างอิงกลับมาเป็นสีเดิมได้ทุกครั้งโดยไม่ผิดพลาด แต่สำหรับงานด้านการกำจัดสีของน้ำเสียแล้วยังไม่เพียงพอ เพราะถ้าใช้ค่าสีในหน่วยซีไออี มาใช้

RENOTATED LOVIBOND COLOUR SCALE
 CONVERSION GRAPH
 TO
 C.I.E. UNITS.
 USING ILLUMINANT B

SCALE OF LEAST PERCEPTIBLE DIFFERENCES



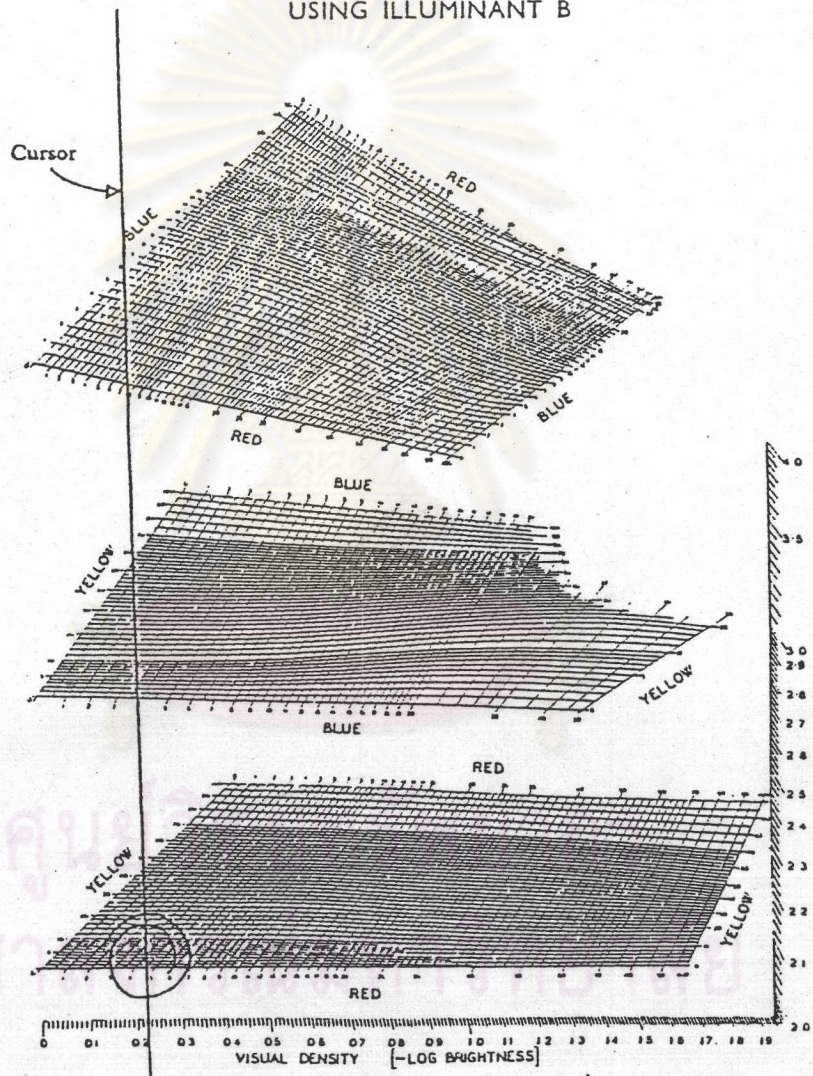
อ่านค่าจากเชือกตัดแกน
 \bar{x} ได้ = ๐.๔๔๒
 ($x = ๐.๔๔๒$)

อ่านค่าจากเชือกตัดแกน Z
 ได้ ๐.๑๖๑
 ($Z = ๐.๑๖๑$)

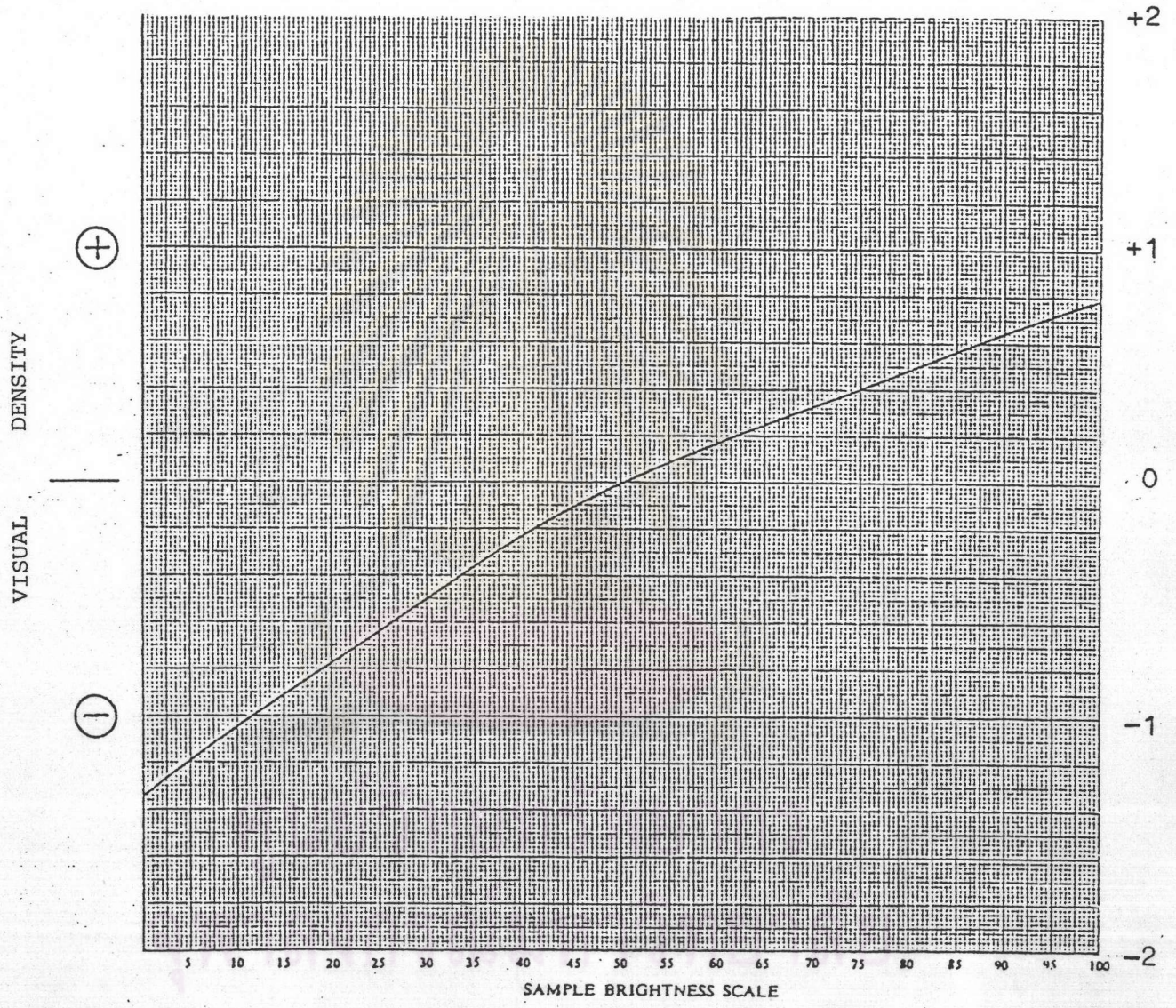
รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนค่าหน่วยสีต่างๆ จากดินโทมิเตอร์กราฟ

RENOTATED LOVIBOND COLOUR SCALE VISUAL DENSITY FACTORS.

USING ILLUMINANT B



รูปที่ 2.8 การหาความหนาแน่นทางสายตา



รูปที่ 2.9 การปรับค่าความหนาแน่นทางสายตา

งานจะเกิดปัญหายุ่งยาก เพราะค่าสีหนึ่ง ๆ แสดงด้วยตัวเลขถึง 3 ค่า ดังนั้นถ้าต้องการเปรียบเทียบค่าของสี 2 สี ก็จะมีตัวเลขด้วยกัน 6 ค่า ทำให้ไม่สามารถนำค่าดังกล่าวมาเปรียบเทียบกันได้

คณะกรรมการวิเคราะห์สีของสถาบันผู้ผลิตสีย้อมแห่งอเมริกา, เอดีเอ็มไอ (The American Dye Manufacturers Institute, ADMI) ได้ตระหนักถึงปัญหานี้ จึงได้คิดค้นหน่วยวัดสีขึ้นใหม่ โดยทำการแปลงค่าสีที่มีหน่วยสี ซีไออี ซึ่งมีค่าตัวเลขแสดงค่าสีถึง 3 ตัวให้เหลือเพียงตัวเดียว ชื่อหน่วย "เอ ดี เอ็ม ไอ" ทำให้สามารถนำมาใช้ประโยชน์กับงานวัดสีน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ประเภทฟอกย้อมได้เป็นอย่างดี

สำหรับการเปลี่ยนค่าของสีในหน่วย ซีไออี มาเป็นหน่วย เอ ดี เอ็ม ไอ มีขั้นตอนยุ่งยาก และซับซ้อนพอควร แต่สรุปโดยย่อและจัดรูปเป็นสูตรให้ง่ายขึ้น ดังนี้

เมื่อทราบค่าของสีในหน่วย ซีไออี คือ X, Y และ Z จะต้องเปลี่ยนค่า X, Y, Z เป็นค่ามันเชลล์ (Munsell Value) V_x, V_y, V_z เสียก่อนโดยสูตรของ McLaren⁽¹⁷⁾.

$$X = 0.98071 (1.2219 V_x - 0.23111 V_x^2 + 0.23951 V_x^3 - 0.021009 V_x^4 + 0.0008404 V_x^5)$$

$$Y = 1.2219 V_y - 0.23111 V_y^2 + 0.23951 V_y^3 - 0.021009 V_y^4 + 0.0008404 V_y^5$$

$$Z = 0.11822 (1.2219 V_z - 0.23111 V_z^2 + 0.23951 V_z^3 - 0.021009 V_z^4 + 0.0008404 V_z^5)$$

แต่การคำนวณหาค่า V_x, V_y, V_z ตามสมการข้างบนยุ่งยากมากเพื่อความสะดวกจึงใช้ตารางสำเร็จรูปสำหรับหาค่า V_x, V_y, V_z เมื่อทราบค่า X, Y, Z แล้วตารางดังกล่าวนี้มีปริมาณมากจึงจะไม่ขอก้าวในที่นี้ แต่สามารถหาดูได้ใน "Color science : Concepts and Methods Quantitative Data and Formular"⁽¹⁸⁾

จากนั้นจึงหาค่า DE จากสูตร

$$DE = \left[\left\{ 0.23(9.902 - V_y) \right\}^2 + \left\{ V_y - V_x - 0.002 \right\}^2 + \left\{ 0.4(V_z - V_y - 0.008) \right\}^2 \right]^{1/2}$$

และหาค่า A D M I จากสูตร

$$ADMI = \frac{F}{b} \cdot DE$$

โดย F เป็นค่าคงที่ ปกติมีค่า = 1400 สำหรับเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ ที่มีความไวสูง และมีค่า = 1600 สำหรับเครื่องเทียบสปีกนโทมิเตอร์แบบ AF 751 (19)

การหาค่า เอดีเอ็มไอ ปริมาณมาก ๆ ควรใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้าช่วย โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ดังแสดงในรูปที่ 2.10

2.6 แนวเหตุผลทฤษฎี

น้ำเสียที่ออกจากขบวนการย้อมผ้า ประกอบด้วยสีที่มีความเข้มสูง เนื่องจากสีย้อม (dyes) และสารช่วยย้อมซึ่งเหลือจากการย้อมไม่ติดกับเนื้อผ้า (ประมาณ 5-35 %) ขึ้นอยู่กับชนิดและกรรมวิธีในการย้อม

สีย้อมเป็นได้ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ส่วนใหญ่มักเป็นสารอินทรีย์ ซึ่งมีอะตอมคาร์บอนเป็นโครงหลัก (backbone) ส่วนสารอนินทรีย์ที่ก่อให้เกิดสีส่วนมากจะเป็นสารสี ซึ่งพวกหลังนี้สามารถกำจัดได้ง่ายด้วยกระบวนการตกตะกอน (20)

ก) กลไกการเกิดสีและการกำจัด

ต้นเหตุสำคัญของการเกิดสี คือสารอินทรีย์ โดยปกติสารอินทรีย์เกือบทุกชนิดก่อให้เกิดสีได้ แต่สารอินทรีย์ส่วนใหญ่ไม่ดูดแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ (ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 400 - 700 นาโนเมตร) แต่จะดูดแสงได้ในช่วงอุลตราไวโอเล็ต กลไกการดูดแสงจะเกิดขึ้นได้โดยกลุ่มสารอินทรีย์ ที่มีชื่อว่ากลุ่มโครโมฟอร์ค (chromophoric groups) ซึ่งสารส่วนนี้จะมีส่วนเกินของอิเล็กตรอนอยู่ เช่น carbon - carbon double and triple bonds, Nitro group และอื่น ๆ ซึ่งสารประกอบที่สามารถดูดแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้นี้มีอิเล็กตรอนมาก และเรียงตัวเป็นลูกโซ่ยาว ความยาวของลูกโซ่และจำนวนอิเล็กตรอน จะแสดงความอ่อนเข้ม (shade) ของสีการแตกของส่วนใดส่วนหนึ่งของกลุ่มดังกล่าวอาจจะทำลายการเรียงตัวของโมเลกุล และเปลี่ยนสีจากที่สามารถมองเห็นเป็นมองไม่เห็นในช่วงความยาวคลื่นปกติ แต่สามารถมองเห็นได้ในช่วงอุลตราไวโอเล็ตหรืออินฟราเรด (20)

110

DOS FORTRAN IV 360N-FO-479 3-8

MAINPGM

```

0001          WRITE (3,100)
0002          A = .12219E1
0003          B = .23111E0
0004          C = .23951E0
0005          D = .21009E-1
0006          E = .8404E-3
0007          1  READ(1,10,END=500) X,Y,Z,YY
0008          10  FORMAT(4F6.3)
0009          XX = X/Y*YY
0010          ZZ = Z/Y*YY
0011          VA =0.
0012          VX = 1.E-3
0013          15  VA = VA+VX
0014          XR = .98071*(A*VA-B*VA**2+C*VA**3-D*VA**4+E*VA**5)
0015          IF(XR.GE.XX) GO TO 25
0016          IF(VA.GT.10.) GO TO 200
0017          GO TO 15
0018          25  VB = 0.
0019          26  VB = VB+VX
0020          YR = 1.2219*VB-B*VB**2+C*VB**3-D*VB**4+E*VB**5
0021          IF (YR.GE.YY) GO TO 35
0022          IF (VB.GT.10.) GO TO 210
0023          GO TO 26
0024          35  VC =0.
0025          36  VC = VC+VX
0026          ZR = 1.18225*(A*VC-B*VC**2+C*VC**3-D*VC**4+E*VC**5)
0027          IF (ZR.GE.ZZ) GO TO 50
0028          IF (VC.GT.10) GO TO 220
0029          GO TO 36
0030          50  DE = (.23*(9.902-VB))**2+(VB-VA-.002)**2+(.4*(VC-VB-.008))**2
0031          DE = SQRT (DE)
0032          IF (DE-1.) 55,55,60
0033          55  ADMI = 14.3+449.6*DE-40.*DE**2
0034          GO TO 58
0035          60  ADMI = 295.9-85.1*DE+234.4*DE**2
0036          58  WRITE (3,80) X,Y,Z,YY,ADMI
0037          GO TO 1
0038          200 WRITE (3,110) X,Y,Z,YY
0039          GO TO 1
0040          210 WRITE (3,120) X,Y,Z,YY
0041          GO TO 1
0042          220 WRITE (3,130) X,Y,Z,YY
0043          500 STOP
0044          100 FORMAT(1H1/T25,'X',T35,'Y',T45,'Z',T55,'YY',T65,'ADMI'//)
0045          80  FORMAT (20X,5F10.3)
0046          110 FORMAT (5X,'VX IS OUT OF RANGE',5X,4F 12.3)
0047          120 FORMAT (5X,'VY IS OUT OF RANGE',5X,4F 12.3)
0048          130 FORMAT (5X,'VZ IS OUT OF RANGE',5X,4F 12.3)
0049          END

```

หมายเหตุ :- โปรแกรมนี้ใช้สำหรับการคำนวณหาดีอีจากหน่วยซีไออีได้ในทุกกรณี

แต่สำหรับการหาเอดีเอ็มไอจะเข้าได้กับเฉพาะอุปกรณ์หินโทมิเตอร์รุ่นแบบ AF 751

รูปที่ 2.10 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการเปลี่ยนค่าของดีอีจากหน่วย ซีไออี เป็นหน่วย เอดีเอ็มไอ

ข) วิธีการลดสีโดยการออกซิเดชัน-รีดักชันด้วยสารเคมี

การลดสีโดยการออกซิเดชัน-รีดักชันด้วยสารเคมี เป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของกลุ่มที่ทำให้เกิดสีคือ กลุ่มโครโมฟอร์ ไปอยู่ในอีกรูปหนึ่งซึ่งมองไม่เห็นสี สารเคมีที่ใช้ในการทำออกซิเดชัน-รีดักชันจะเลือกจากศักยภาพ ในการออกซิไดส์ทางเคมี (chemical oxidation potential) และศักยภาพในการรีดิวซ์ทางเคมี (chemical reduction potential) ซึ่งเป็นตัวชี้ถึงความสามารถในการเกิดออกซิเดชันและรีดักชัน

จาก Handbook of Chemistry and Physics⁽²¹⁾ พบว่า

$$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4 ; \text{S}_2\text{O}_4^{=2} + 4\text{OH}^- \longrightarrow 2\text{SO}_4^{=2} + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- , E^\circ = 1.12 \text{ Volt}$$

$$E^\circ = \text{ค่าศักยภาพการออกซิเดชัน-รีดักชันทางเคมี เทียบกับไฮโดรเจนอิเล็กโตรมาตรฐาน}$$

$\text{S}_2\text{O}_4^{=2}$ มีแนวโน้มในการให้ e^- สูง ถือเป็นตัวรีดิวซ์ที่ดี

$\text{NaOCl} ; \text{OCl}^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Cl}^- + 2\text{OH}^- , E^\circ = 0.94 \text{ Volt.}$

OCl^- มีแนวโน้มในการรับ e^- ได้ดีพอควร ถือว่าเป็นตัวออกซิไดส์ที่ดี

$\text{H}_2\text{O}_2 ; \text{H}_2\text{O}_2 \longrightarrow \text{O}_2 + \text{H}^+ + \text{e}^- , E^\circ = -0.68 \text{ Volt}$

H_2O_2 มีแนวโน้มในการให้ e^- ไม่ดีซึ่งถือเป็นตัวออกซิไดส์ที่ดีพอควร

ด้วยเหตุผลดังกล่าว ในการทดลองวิจัยการลดสีน้ำเสียจากโรงงานทอผ้า ครั้งนี้จึงเลือก $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4, \text{NaOCl}$ และ H_2O_2 เป็นสารลดสี นอกจากนี้เป็นเพราะสารเคมีดังกล่าวเป็นที่รู้จักโดยทั่วไป หาง่ายในท้องตลาด และราคาพอสมควร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย