

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

ความรู้ที่ว่าถ่านเป็นสารดูดซับ(adsorbent)และสามารถนำมาใช้งานได้นั้น ได้เกิดขึ้นมานานมาก ในศตวรรษที่ 13 ถ่านถูกนำมาใช้ในกระบวนการสำหรับฟอกสารละลายน้ำตาล และต่อมาในช่วงปลายศตวรรษที่ 18 มีการสังเกตเห็นความสามารถของถ่านในการกำจัดสีจากของเหลว และในช่วงกลางศตวรรษที่ 19 ประเทศอังกฤษได้ใช้ถ่านในการกำจัดรสและกลิ่นจากน้ำดื่ม จุดเริ่มต้นเหล่านี้นำไปสู่การพัฒนาการผลิตน้ำประปาและการบำบัดน้ำเสียโดยอาศัยถ่านสำหรับทั้งในชุมชนและในอุตสาหกรรม อาทิเช่น โรงงานเหล้าไวน์และเบียร์, โรงงานกระดาษและเยื่อกระดาษ, โรงงานยา, โรงงานอาหาร, อุตสาหกรรมปิโตรเลียมและปิโตรเคมี เป็นต้น (Cheremisinoff and Ellerbusch, 1978)

การดูดซับมีความสามารถในการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำเสีย ที่เป็นทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์โดยอาศัยกลไกทางฟิสิกส์เคมี สำหรับสิ่งเจือปนในน้ำเสียที่กระบวนการดูดซับกำจัดได้มีหลากหลายเช่น สี, กลิ่น, บีโอดี, ซีโอดี และยาฆ่าแมลง เป็นต้น (Metcalf and Eddy, 1991)

ถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับชนิดสำคัญ ทำจากวัตถุดิบได้หลายชนิด คือ ไม้ชนิดต่าง ๆ ชีลื้อย ถ่านบิหุมินัส กระดุก กะลามะพร้าว ลิกไนต์ ซากพืช เปลือกเม็ดพิแคน สลัดจ์ โดยผ่านกระบวนการเพื่อทำให้เกิดรูพรุนจำนวนมากที่ส่วนผิว ในด้านคุณภาพถ่านจะแตกต่างกันไปตามชนิดวัตถุดิบ ถ่านกัมมันต์ที่นิยมใช้สำหรับงานบำบัดน้ำเสียส่วนมากทำจากถ่านหินและถ่านโค้กชนิดต่างๆ เนื่องจากข้อได้เปรียบเรื่องราคาและแหล่งจำหน่าย (Cheremisinoff and Ellerbusch, 1978)

ถ่านดูดซับแบ่งตามลักษณะทางกายภาพโดยอาศัยขนาดออกได้เป็น 2 ชนิดคือ ถ่านเม็ด (granular carbon)และถ่านผง(powdered carbon) เนื่องจากผ่านกระบวนการเพื่อให้เกิดรูพรุน

จำนวนมากที่ส่วนผิวแล้วจึงเรียกว่าถ่านกัมมันต์(activated carbon) สำหรับถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 0.1 มม. ส่วนถ่านกัมมันต์ชนิดผงมีขนาดเล็กกว่ารูตะแกรงเบอร์ 200 (Mulligan and Fox, 1976)

2.1.1 กระบวนการดูดติดผิว

โดยทั่วไปแล้วปรากฏการณ์การดูดติดผิวเป็นปรากฏการณ์ระหว่างของเหลว-ของเหลว, ของเหลว-ของแข็ง, ของแข็ง-ของแข็ง รวมถึง ก๊าซ-ของเหลว แต่การใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดติดผิวสารอินทรีย์ในน้ำเสียนั้นเป็นปรากฏการณ์ระหว่างของแข็งและของเหลว (Metcalf and Eddy, 1991)

การดูดติดผิวแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอน(Cheremisinoff and Ellerbusch, 1978)คือการดูดทางฟิสิกส์(physisorption)และการดูดทางเคมี(chemisorption) เมื่อโมเลกุลของสารใดๆในของเหลวเคลื่อนตัวมาสัมผัสบริเวณผิวของของแข็ง ซึ่งเป็นผลจากแรงดึงดูดของสารดูดติดผิวที่มีต่อโมเลกุลนั้นมากกว่าพลังงานจลน์(kinetic energy)ของโมเลกุลสารนั้น โมเลกุลของสารในของเหลวจะเกาะติดกับโมเลกุลของของแข็งด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์(Van der Waal's force)อันเป็นขั้นตอนการดูดทางฟิสิกส์ ซึ่งมีการเกาะตัวของโมเลกุลของของเหลวเป็นชั้นๆ จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของสารดูดติดผิวและสารถูกดูดติดผิว กลายเป็นสารประกอบเคมีใหม่ขึ้น ขั้นตอนนี้เป็นการดูดทางเคมี ซึ่งเมื่อเกิดแล้วจะคงอยู่ในรูปนั้น ไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปได้(irreversible) แต่การดูดทางฟิสิกส์สามารถแปรสภาพกลับไปมาได้(reversible)

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว(Cheremisinoff and Ellerbusch, 1978)

ก. สมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของสารดูดติดผิว เช่น พื้นที่ผิวมีผลต่อขีดความสามารถการดูดติดผิว, ปริมาตรรูพรุนกำหนดการดูดติดผิวโมเลกุลน้ำเสีย, ส่วนประกอบทางเคมีมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดติดผิว เป็นต้น

ข. สมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของสารถูกดูดติดผิว เช่น ขนาดโมเลกุลมีผลต่ออัตราการดูดติดผิว, ส่วนประกอบทางเคมีมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดติดผิว โดยให้ผลต่างกันไปตามชนิดของสารละลาย เป็นต้น

ค. ความเข้มข้นของตัวถูกดูดติดผิวในสารละลาย หากเข้มข้นมากอัตราการดูดติดผิวจะมาก

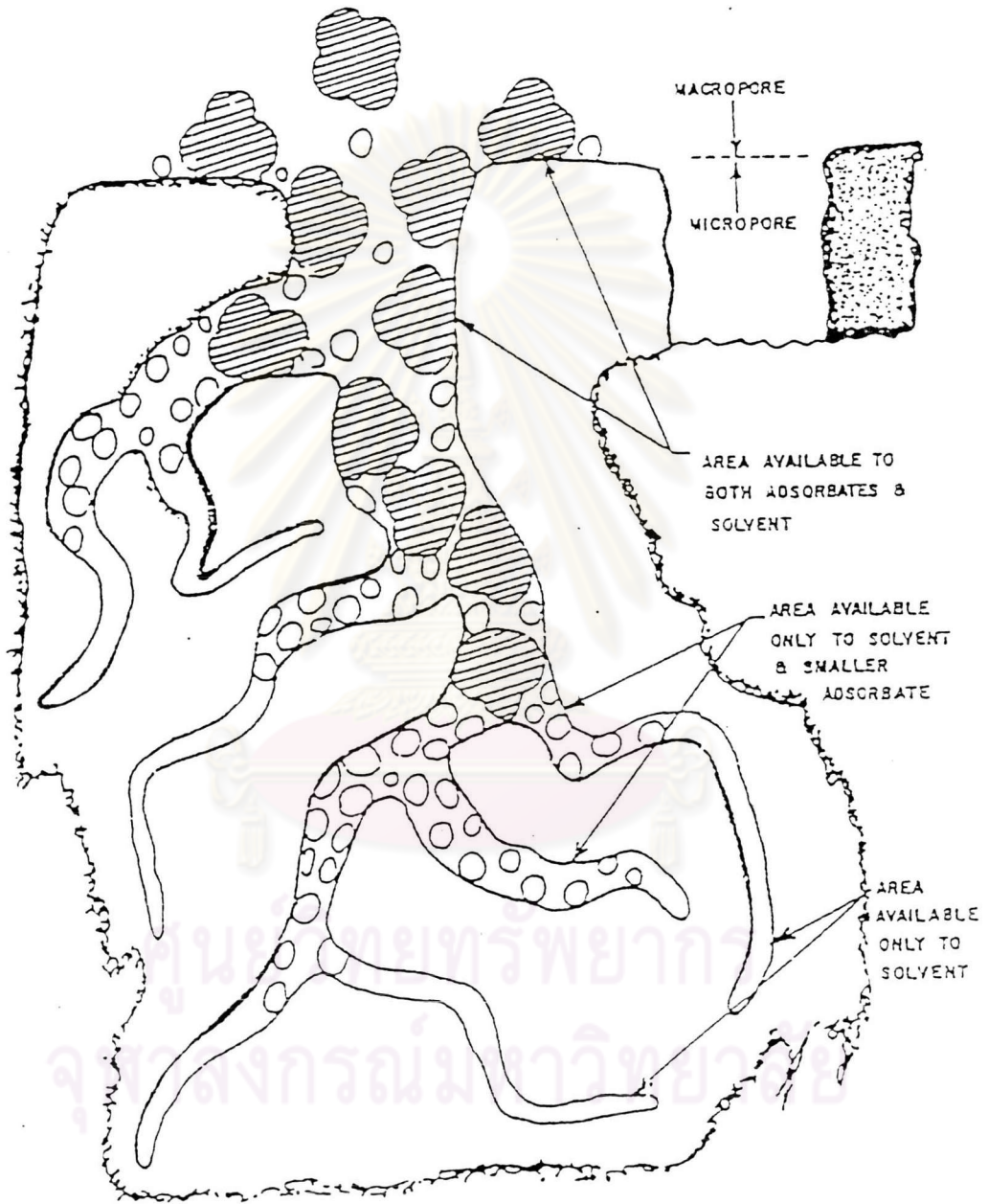
- ง. ลักษณะของสารละลาย เช่น พีเอชและอุณหภูมิมีผลต่ออัตราการดูดซับ เป็นต้น
 จ. ระยะเวลาสัมผัสหรือเวลาในการดูดซับ หากมีเวลามากจะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับ

ดี

การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์สามารถกำจัดสารประกอบอินทรีย์ในน้ำเสียบางส่วนที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีววิทยา ซึ่งอาจมีบางส่วนที่ก่อให้เกิดพิษรวมถึงกลิ่น, รสและสีที่ไม่สามารถกำจัดด้วยวิธีทั่วไปได้ สำหรับประสิทธิภาพในการดูดซับสารอินทรีย์ในน้ำเสียของถ่านกัมมันต์ขึ้นกับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ ปริมาณค่าพื้นที่ผิวอยู่ในช่วงประมาณ 500-1400 ตารางเมตร/กรัมถ่านกัมมันต์ (Cheremisinoff and Ellerbusch, 1978) รวมถึงลักษณะทางเคมีของผิวถ่านกัมมันต์ซึ่งสัมพันธ์กับแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล เช่นผิวของถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติเป็นเบสจะส่งผลต่อการดูดซับและสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่อิมตัว กล่าวคือความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับลักษณะของถ่านและชนิดของสารที่จะถูกดูดซับร่วมกัน

สำหรับลักษณะโดยทั่วไปของถ่านกัมมันต์ เมื่อพิจารณาจากภาพขยายของภาพตัดตามรูปที่ 2.1 (Cheremisinoff, and Ellerbusch, 1978) จะสามารถแบ่งรูพรุนออกได้เป็นสองขนาดคือรูพรุนใหญ่ (macropores) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 1000 \AA และรูพรุนจิ๋ว (micropores) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง $10-1000 \text{ \AA}$ ส่วนใหญ่ที่บริเวณผิวนอกของถ่านกัมมันต์จะประกอบไปด้วยรูพรุนใหญ่

โมเลกุลของสารอินทรีย์ที่เคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของถ่านกัมมันต์จะฟุ้งกระจายเข้าไปในรูพรุนใหญ่ แล้วจึงเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุนจิ๋วหากขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์นั้นไม่ใหญ่กว่าขนาดรูพรุนจิ๋ว อัตราการดูดซับจึงถูกควบคุมด้วยอัตราการฟุ้งกระจายของโมเลกุลเข้าไปในรูพรุนของถ่าน โดยอัตราการดูดซับนี้จะแปรผกผันกับกำลังสองของเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุล, น้ำหนักโมเลกุลและค่าพีเอช แต่จะแปรผันตามกำลังสองของเวลาสัมผัสระหว่างโมเลกุลของสิ่งสกปรกกับถ่านกัมมันต์ และความเข้มข้นของสิ่งสกปรกในน้ำเสียที่จะบำบัด (Metcalf and Eddy, 1991)



รูปที่ 2.1 ภาพตัดผ่านกัมมันต์เม็ด (Cheremisinoff, and Ellerbusch, 1978)

สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่สำคัญสำหรับกำหนดการใช้งาน(Cheremisinoff and Ellerbusch, 1978) คือ

- ก. พื้นที่ผิว : กำหนดขีดความสามารถในการดูดติด
- ข. ความหนาแน่นประจักษ์(apparent density) : บอกถึงโอกาสสูญเสียจากการใช้งาน
- ค. ความหนาแน่นก้อน(bulk density) : กำหนดปริมาณที่ใช้
- ง. ขนาดประสิทธิผล(effective size) : กำหนดสภาพทางชลศาสตร์
- จ. ปริมาตรรูพรุน(pore volume) : กำหนดการดูดติดผิวของโมเลกุล
- ฉ. การวิเคราะห์ค่าผ่านตะแกรง(sieve analysis) : ใช้ตรวจสอบและกำหนดการบ่งคับควบคุมระบบบำบัด
- ช. อะบราชัน นัมเบอร์(abrasion number) : ระบุถึงความคงทนต่อการขัดสี
- ซ. ร้อยละของเถ้า(ash percent) : ระบุปริมาณกากของถ่านกัมมันต์ที่เหลือจากการเผา
- ฌ. ความชื้น : ระบุปริมาณน้ำในถ่านกัมมันต์จากการผลิต
- ฎ. ไอโอดีนนัมเบอร์(iodine number) : กำหนดความจุการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ในการดูดติดผิวสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ
- ฏ. โมลาสนัมเบอร์(molasses number) : กำหนดความจุการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ในการดูดติดผิวสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง
- ฎ. ฟีนอลนัมเบอร์(phenol number) : กำหนดความจุการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์
- ฐ. ขนาดรูพรุน(pore size) : กำหนดขีดจำกัดในการดูดติดโมเลกุลจำเพาะบางชนิด

2.1.2 การฟื้นฟูสภาพของถ่านดูดติดผิว(carbon regeneration)

หากพิจารณาในแง่เศรษฐศาสตร์ การนำถ่านดูดติดผิวที่ใช้จนหมดประสิทธิภาพแล้วกลับมาใช้ใหม่ได้อีก จะช่วยลดต้นทุนที่จะต้องซื้อถ่านดูดติดผิวใหม่มาเพิ่มเติม การฟื้นฟูสภาพของถ่านดูดติดผิวอาศัยวิธีการนำถ่านไปกำจัดโมเลกุลของสิ่งสกปรกที่ถูกดูดติดผิวไว้ที่ถ่านออกไป ถ่านดูดติดผิวก็จะกลับมีประสิทธิภาพขึ้นใหม่แล้วนำมาใช้ได้อีก

กรรมวิธีที่สามารถฟื้นฟูสภาพของถ่านดูดติดผิวนั้นทำได้หลายวิธี ได้แก่ กรรมวิธีทางความร้อน กรรมวิธีทางเคมี และกรรมวิธีทางชีวภาพ

กรรมวิธีที่ใช้เป็นที่แพร่หลายคือกรรมวิธีทางความร้อน โดยอาศัยเตาเผาซึ่งแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งมีทั้งเตาเผาแบบ multiple hearth และ rotary kiln ในการเผาไหม้มีการควบคุมการเผาไหม้ให้โมเลกุลของสิ่งสกปรกกระเหยออกมาและถูกเผาไหม้ แบ่งเป็นขั้นตอนได้ดังนี้ (Cheremisinoff and Ellerbusch, 1978)

ก. ถ่านคูดติดผิวทั้งหมดประสิทธิภาพแล้วจะถูกรวมกับน้ำเป็นของเหลวข้น(slurry) แล้วถูกนำเข้าสู่ระบบฟื้นฟูสภาพโดยการสูบเข้าไป

ข. แยกถ่านคูดติดผิวออกจากน้ำ

ค. นำถ่านคูดติดผิวที่แยกน้ำแล้วส่งเข้าเตาเผาซึ่งควบคุมปริมาณก๊าซออกซิเจน ที่อุณหภูมิประมาณ 1600-1800 องศาฟาเรนไฮต์ จนโมเลกุลของสิ่งสกปรกในรูพรุนของถ่านคูดติดผิวระเหยออกมาเป็นไอและถูกเผาทำลายตัวไป

ง. เมื่อถ่านคูดติดผิวออกจากเตาเผาในขณะร้อนจัด จะถูกทำให้เย็นโดยการจุ่มลงในน้ำ (water quenching)

จ. เมื่อถ่านคูดติดผิวในถังจุ่ม(quench tank)เย็นตัวลงแล้ว นำไปล้างแยกเศษถ่านออกแล้วนำไปเก็บไว้เตรียมใช้งาน

ในขั้นตอนทั้งหมดของการฟื้นฟูสภาพถ่านคูดติดผิวจะใช้เวลารวมทั้งสิ้นประมาณ 30 นาที และมีอัตราการสูญเสียถ่านคูดติดเนื่องจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพราวร้อยละ 2 ถึงร้อยละ 10

2.2 การวิเคราะห์กระบวนการคูดติดผิว

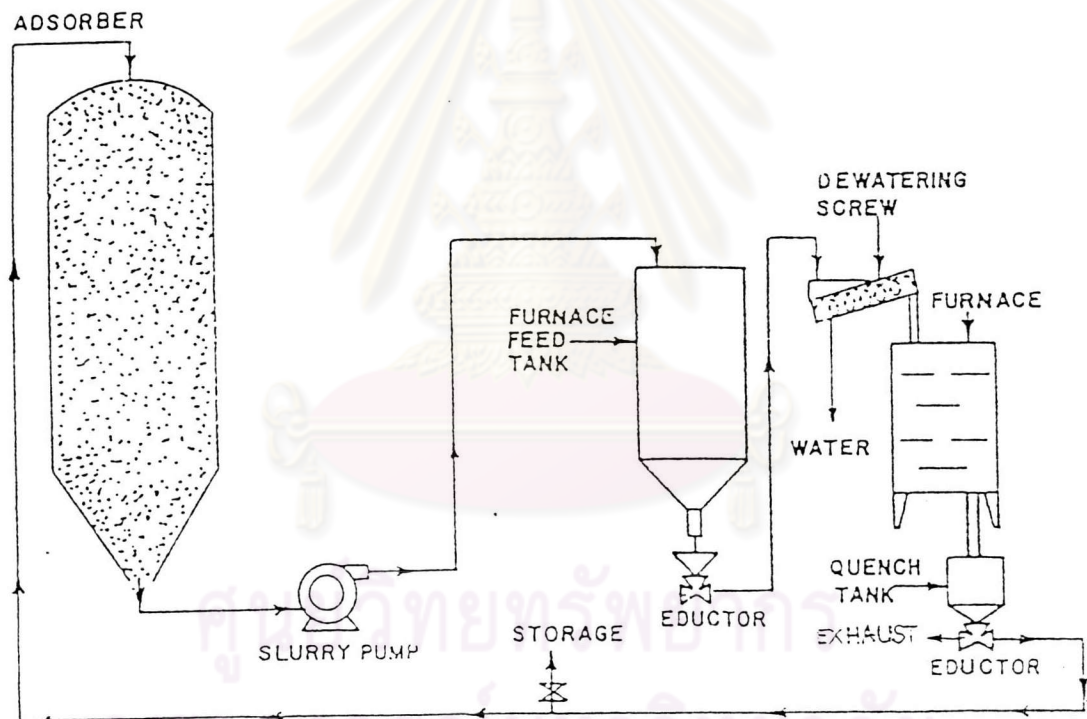
กระบวนการคูดติดผิวมีลำดับการเกิด 3 ลำดับคือ การขนถ่ายใหญ่(macro transport), การขนถ่ายจิ๋ว(micro transport)และการดูด(sorption) (Metcalf and Eddy, 1991)

การขนถ่ายใหญ่หมายถึงการเคลื่อนที่ของอนุภาคของสารถูกคูดติดผิวในน้ำโดยการพาและการซึมผ่าน การขนถ่ายจิ๋วหมายถึงการซึมผ่านของอนุภาคของสารถูกคูดติดผิวเข้าไปในรูพรุนใหญ่ของถ่านกัมมันต์เม็ด และการดูดหมายถึงขั้นตอนการเกาะติดของอนุภาคของสารถูกคูดติดผิวบนถ่านกัมมันต์เม็ด

ปริมาณของสารถูกคูดติดผิวที่สามารถถูกคูดติดผิวโดยถ่านกัมมันต์เม็ด มีความสัมพันธ์กับทั้งสมบัติและความเข้มข้นของสารถูกคูดติดผิวรวมถึงอุณหภูมิด้วย โดยทั่วไปพิจารณาถึงปริมาณ

ของสารที่ถูกดูดซับที่สามารถถูกดูดซับได้ดังเช่นความสัมพันธ์ของความเข้มข้นที่อุณหภูมิคงที่ และผลของความเข้มข้นนี้ถูกเรียกว่า “ไอโซเทอร์มการดูดซับ” (adsorption isotherm) สมการที่ใช้สำหรับบรรยายข้อมูลไอโซเทอร์มในการทดลองถูกพัฒนาขึ้นมา 3 สมการ โดย Freundlich, Langmuir และโดย Brunauer, Emmet และ Teller จากทั้ง 3 สมการนี้ ฟรอนดลิชไอโซเทอร์มจะใช้เป็นเครื่องมือสำหรับบรรยายสมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในงานบำบัดน้ำและน้ำเสียบ่อยที่สุด (Metcalf and Eddy, 1991)

GRANULAR CARBON REACTIVATION CYCLE



รูปที่ 2.2 กระบวนการฟื้นฟูสภาพของถ่านกัมมันต์ (Cheremisinoff and Ellerbusch, 1978)

2.2.1 ฟรุคตลิกโซเทอรัม

ฟรุคตลิกโซเทอรัมมีรูปสมการดังนี้(Metcalf and Eddy, 1991)

$$\frac{x}{m} = K_f C_e^{1/n}$$

เมื่อ x/m = ปริมาณทั้งหมดโดยน้ำหนักของสารที่ถูกดูดซับที่ถูกลดต่อหน่วยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์

C_e = ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลายที่จุดสมดุลภายหลังการดูดซับ

K_f, n = ค่าคงที่เอ็มไพริคัล หรือค่าคงที่จากการทดลอง

ค่าคงที่ในฟรุคตลิกโซเทอรัม สามารถหาได้โดยการกำหนดจุดบนกราฟระหว่างค่า $\log x/m$ กับค่า $\log C_e$ ที่ $C_e = 1$ จะได้ค่า K_f และค่า $\frac{1}{n}$ เท่ากับค่าความชันของเส้นกราฟ สามารถเขียนสมการใหม่ที่ใช้หาค่าคงที่จากการทดลองได้ดังนี้

$$\log(x/m) = \log K_f + (1/n) \log C_e$$

2.2.2 แลงมัวร์โซเทอรัม

แลงมัวร์โซเทอรัมมีรูปสมการดังนี้(Metcalf and Eddy, 1991)

$$\frac{x}{m} = \frac{abC_e}{1+bC_e}$$

เมื่อ x/m = ปริมาณทั้งหมดโดยน้ำหนักของสารที่ถูกดูดซับที่ถูกลดต่อหน่วยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์

a, b = ค่าคงที่เอ็มไพริคัล

C_e = ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลายที่จุดสมดุลภายหลังการดูดซับ

ฟิว

ค่าคงที่ในแลงมัวร์ไอโซเทอร์ม สามารถหาได้โดยการกำหนดจุดบนกราฟระหว่างค่า $C_e/(x/m)$ กับค่า C_e หากค่า a ได้จากค่าความชันของเส้นกราฟซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{a}$ และหากค่า b ได้จากค่าที่จุดตัดแกน y ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{ab}$ สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{C_e}{(x/m)} = \frac{1}{ab} + \frac{1}{a} C_e$$

2.2.3 ปีอีทีไอโซเทอร์ม

पीอีทีไอโซเทอร์มมีรูปสมการดังนี้ (Lary et al., 1982)

$$\frac{x}{m} = \frac{ACx_m}{(C_s - C) \left[1 + (A - 1) \frac{C}{C_s} \right]}$$

เมื่อ x/m = ปริมาณทั้งหมดโดยน้ำหนักของสารถูกดูดติดผิวที่ถูกดูดติดต่อหน่วยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์

x_m = ปริมาณทั้งหมดของสารถูกดูดติดผิวที่ถูกดูดติดในแบบผั่งชั้นเดียว โดยสมบูรณ์

C_s = ความเข้มข้นอิ่มตัวของสารถูกดูดติดผิวในสารละลาย

C = ความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิวในสารละลายที่จุดสมดุล

A = ค่าคงที่ที่ใช้บรรยายพลังงานของการเกิดร่วมกันระหว่างสารถูกดูดติดผิวกับพื้นที่ผิวของสารดูดติดผิว

ค่าคงที่ในพีอีทีไอโซเทอร์มสามารถหาได้โดยการกำหนดจุดบนกราฟระหว่างค่า $\frac{C}{(C_s - C) \frac{x}{m}}$ กับค่า C/C_s หากค่า A ได้จากค่าความชันของเส้นกราฟซึ่งมีค่าเท่ากับ $(A - 1)/A(x_m)$

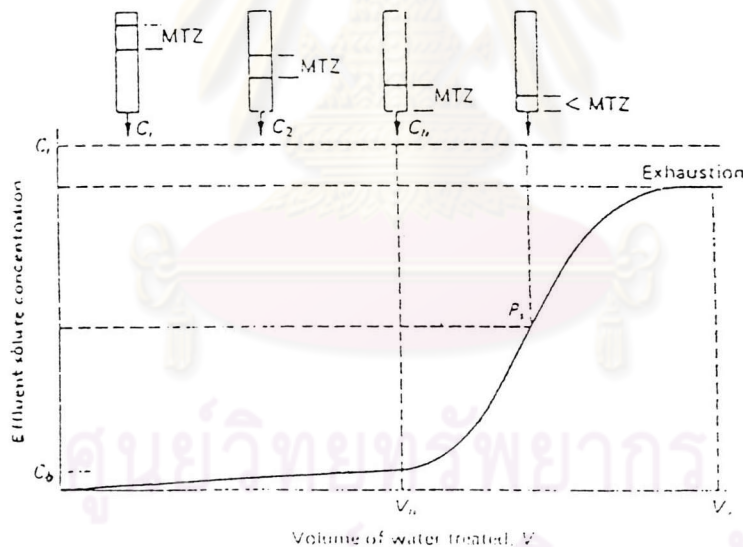
และค่าที่จุดตัดแกน Y ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1/A(x_m)$ และสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{C}{(C_s - C) \frac{x}{m}} = \frac{1}{A(x_m)} + \frac{A - 1}{A(x_m)} * C/C_s$$

2.2.4 เขตการถ่ายเทมวล

ในพื้นที่ของชั้นถ่านกัมมันต์เม็ดซึ่งเกิดการดูดติดผิวหรือดูดแนบเรียกว่า "เขตการถ่ายเทมวล" (mass transfer zone) หรือ MTZ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (Metcalf and Eddy, 1991) หลังจากน้ำที่ปนเปื้อนไหลผ่านเข้าไปในขอบเขตของชั้นที่มีความลึกเท่ากับ MTZ ความเข้มข้นของสิ่งปนเปื้อนในน้ำจะถูกลดลงมาที่ค่าต่ำสุดของมัน ถ้าหากเวลาสัมผัสชั้นที่ว่างสั้นเกินไปหรือความยาวของ MTZ มากกว่าความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์เม็ด สิ่งปนเปื้อนที่สามารถกำจัดได้จะไม่ถูกกำจัดไปอย่างสมบูรณ์ (Metcalf and Eddy, 1991)

ความหนาของ MTZ แปรผันกับอัตราการไหลเพราะว่าการกระจาย, การแพร่ และการเกิดร่องในตัวกลางเม็ดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราการไหล (Metcalf and Eddy, 1991)



รูปที่ 2.3 กราฟเบรกทรูสำหรับถ่านกัมมันต์ที่แสดงการเคลื่อนที่ของ MTZ เทียบกับปริมาตรที่ผ่านทั้งหมด (Metcalf and Eddy, 1991)

มีทางเดียวที่จะใช้ความจุที่กักกอดัมน์ให้ได้งานด้วยคือ การต่อสองคอลัมน์แบบอนุกรม หรือใช้หลายคอลัมน์ต่อขนาน (Cheremisinoff and Ellerbusch, 1978)

สำหรับความลึกของชั้นและอัตราการไหลที่เหมาะสมรวมถึงความจุปฏิบัติการของ ถ่านกัมมันต์ จะต้องถูกพิจารณาเพื่อกำหนดขนาดและจำนวนคอลัมน์ที่จำเป็นสำหรับการกำจัด แบบต่อเนื่อง ทั้งนี้เพราะว่าค่าพารามิเตอร์เหล่านี้กำหนดได้จากการทดสอบคอลัมน์พลวัต (dynamic column test) จึงได้แนะนำว่าควรมีการศึกษาด้วยโรงงานนำร่องก่อน (Metcalf and Eddy, 1991)

2.2.5 ความจุการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

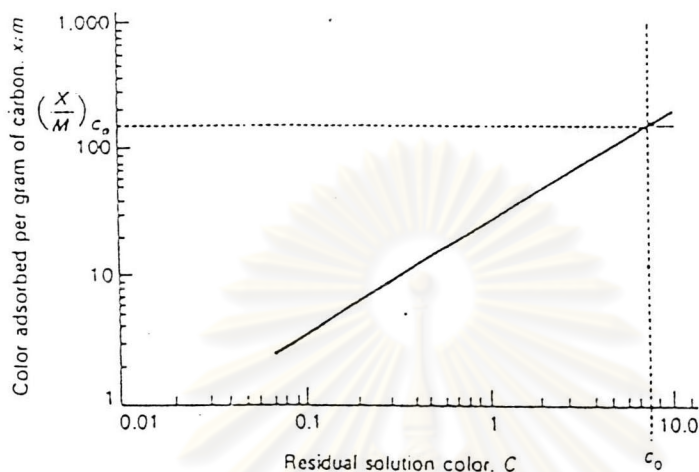
ความจุดูดซับของถ่านที่กำหนดประมาณค่าได้จากข้อมูลของไอโซเทอร์ม (Metcalf and Eddy, 1991) เมื่อข้อมูลของไอโซเทอร์มถูกกำหนดลงบนกราฟจะได้ผลไอโซ เทอร์มดังแสดงในรูปที่ 2.4 (Metcalf and Eddy, 1991) ความจุดูดซับของถ่านกัมมันต์สามารถ ประมาณได้จากเส้นแนวตั้งจากจุดสเกลบนแนวนอนซึ่งเป็นการเพิ่มขึ้นเริ่มต้น (C_0) ไปตัดกับ เส้นไอโซเทอร์มแล้วลากเส้นแนวนอนไปยังสเกลบนแนวตั้ง ได้ค่าที่แสดงปริมาณทั้งหมดโดย น้ำหนักของตัวดูดซับที่ดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ เมื่อถ่านกัมมันต์อยู่ที่จุด สมดุลกับความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกละลาย $x/m(C_0)$

2.2.6 ความจุการดูดซับเบรกทรู

ความจุการดูดซับเบรกทรู $(\frac{x}{m})_b$ ของถ่านกัมมันต์เมื่อในคอลัมน์เต็มมาตราส่วนใน งานสนามมีค่าน้อยกว่าความจุการดูดซับทางทฤษฎีที่หาได้จากไอโซเทอร์ม $(\frac{x}{m})_0$ ของคอลัมน์ เดี่ยวสามารถถือได้ว่ามีค่าประมาณ 25 ถึง 50% ของความจุทางทฤษฎี $(\frac{x}{m})_0$

เมื่อรู้ค่า $(\frac{x}{m})_b$ แล้วสามารถคำนวณหาค่าเวลา t_b ที่ทำให้เกิดเบรกทรูได้ดังสมการ (Metcalf and Eddy, 1991)

$$\left(\frac{x}{m}\right)_b = \frac{X_b}{M_c} = Q\left(c_i - \frac{c_b}{2}\right) \frac{t_b}{M_c}$$



รูปที่ 2.4 รูปแบบฟรอนด์ิชไอโซเทอร์ม(Metcalf and Eddy, 1991)

2.3 สีข้อมและการข้อมสี

ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ การผลิตผลิตภัณฑ์สิ่งทอเริ่มต้นที่เส้นใยแล้วกลายมาเป็นผ้าทั้งผืน ก่อนที่จะสู่ขั้นตอนการข้อมสีต้องผ่านขั้นตอนต่างๆหลายขั้นตอน เช่นขั้นตอนการขจัดสิ่งสกปรกออกจากผืนผ้าหรือเส้นใย การกำจัดขนออกโดยการเผา เป็นต้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เส้นใยหรือผ้าทั้งผืนมีความสะอาดและพร้อมที่จะดูดซับสีต่อไป หลังการข้อมแล้วก็จะนำเส้นใยหรือผ้าเข้าตกแต่งตามลักษณะที่จะนำไปใช้งานต่อไป

กรรมวิธีในการข้อมแบ่งออกเป็น 2 ประเภท(ส่งเสริมอุตสาหกรรม, กรม, 2531) คือการข้อมเป็นแบตช์(batch)และการข้อมแบบต่อเนื่อง ในการข้อมแบบต่อเนื่องจะมีปริมาณน้ำเสียมากกว่าแต่ความเข้มข้นน้อยกว่า(สมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, 2525) แต่ทั้งนี้ก็ยังขึ้นอยู่กับความแตกต่างของการข้อมในแต่ละแบบ ทั้งในส่วนของชนิดและปริมาณของตัวสีข้อมหรือสารช่วยข้อมรวมถึงความสามารถในการติดสีบนเนื้อผ้าเป็นต้น การข้อมที่มีประสิทธิภาพคือการข้อมที่ติดสีสม่ำเสมอ

กันทั่วทั้งชิ้นงาน สีย้อมต้องติดเส้นใยเข้าไปถึงภายในและจะต้องทนทานต่อการซักล้างไม่หลุดออกโดยง่าย

2.3.1. สีย้อม

สีย้อมแบ่งออกได้หลายชนิด(นวลละอ อ เนียมสะอิ่ง, 2525) การย้อมที่ให้ผลดีขึ้นอยู่กับความสามารถในการรวมตัวของสีกับเส้นใยมากกว่าความสามารถในการรวมตัวของสีกับน้ำ การเกิดสภาวะนี้เมื่อโมเลกุลของสีย้อมมีหมู่อะตอมซึ่งถูกจัดเรียงตัวกันให้อยู่ในลักษณะที่จะทำให้เกิดการยึดเกาะกับเส้นใยแล้วเกิดพันธะยึดกันแน่น

อิทธิพลที่ส่งผลต่อการติดสีระหว่างสีกับเส้นใยคือ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์และกาญจนา ครอบธรรมชาติ, 2535)

- ก. พันธะไฮโดรเจน(hydrogen bond)
- ข. แรงแวนเดอวาลส์(Van der waal's forces)
- ค. แรงไอออน(ionic forces)
- ง. พันธะโควาเลนต์(covalent bond)

การติดสีระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับโมเลกุลของเส้นใยอย่างน้อยจะต้องประกอบไปด้วยแรงสองชนิดขึ้นไปจนถึงสี่ชนิด ส่วนตัวที่มีอิทธิพลต่อแรงยึดติดมากที่สุดได้แก่พันธะโควาเลนต์ นอกจากอิทธิพลของแรงทั้งสี่ชนิดแล้วอิทธิพลจากขนาดและรูปร่างโมเลกุลของสีก็มีผลต่อการยึดติดซึ่งส่งผลต่อการย้อมด้วย เช่น โมเลกุลของสีย้อมที่เล็กและยาวก็จะผ่านช่องว่างเข้าไปในเส้นใยได้มากขึ้นการติดสีจะดีขึ้น หากโมเลกุลของสีย้อมมีลักษณะแบนกว้างและยาวมากการติดสีจะมีความคงทนมากขึ้น ดังนั้นการที่โมเลกุลของสีย้อมยึดเกาะกับโมเลกุลของเส้นใยนั่นเป็นผลจากแรงทางฟิสิกส์และเคมีร่วมกัน(นวลละอ อ เนียมสะอิ่ง, 2535)

2.3.2 การจำแนกสีย้อม

สีย้อมสามารถจำแนกได้จากหลายหลักเกณฑ์คือ การจำแนกตามสมบัติการละลายน้ำของสีย้อม การจำแนกตามองค์ประกอบทางเคมีของสีย้อม และการจำแนกสีย้อมตามการนำไปใช้งาน (ส่งเสริมอุตสาหกรรม, กรม, 2531) ซึ่งแบ่งประเภทสีย้อมออกได้ 12 ประเภทดังนี้

ก. สีดิสเพอร์ส : ใช้ย้อมเส้นใยอาซิเตทหรือเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด เนื่องมาจากสีย้อมนี้ไม่ละลายน้ำแต่จะเป็นอนุภาคแขวนลอยอยู่ในน้ำ หากย้อมในน้ำควรต้องมีสารช่วยกระจาย(dispersing agent) ส่วนสารเคมีอื่นนั้นไม่จำเป็นต้องใช้ บางกรณีการใช้สารช่วยพา(carrier)จะช่วยให้ผลการย้อมดีขึ้น อาจแบ่งสีดิสเพอร์สออกเป็นกลุ่มย่อยได้ 2 กลุ่มตามชนิดองค์ประกอบทางเคมีของสีย้อม คือสีย้อมเอโซ(azodyes)และสีย้อม aminoanthraquinone

ข. สีเอซิค : ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนหรือเส้นใยเซลลูโลสที่ไม่บริสุทธิ์ สีย้อมละลายน้ำได้ซึ่งส่วนมากเป็นเกลือของกรดกำมะถัน

ค. สีย้อมอะโซอิก : ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส โดยต้องอาศัยการทำให้เกิดปฏิกิริยากับปลิง(coupling) เป็นการย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ แล้วย้อมทับครั้งที่สองด้วยเกลือไดอะโซเนียมทำปฏิกิริยากับสารประกอบฟีนอล จะเกิดสารประกอบเอโซที่ให้สีบนเส้นใย

ง. สีย้อมเบสิก : ใช้ย้อมขนสัตว์หรือเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด ในบางกรณีอาจย้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้บ้างเล็กน้อย กลไกการย้อมอาศัยประจุบวกของโมเลกุลสีย้อมจับกับประจุลบของเส้นใย ตัวสีย้อมเป็นสารประกอบอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่มีโครโมฟอร์(chromophore)เกิดเป็นแคตไอออนได้ จึงสามารถเรียกสีย้อมนี้อีกชื่อหนึ่งว่าสีแคตไอออน

จ. สีย้อมไคเรคต์ : ใช้ย้อมเส้นใยฝ้ายได้โดยตรงไม่ต้องอาศัยสารช่วยย้อม การใช้เกลือเข้าช่วยในการย้อมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการย้อมได้ สีย้อมชนิดนี้ประกอบไปด้วยสารประกอบเอโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเป็นส่วนใหญ่และสามารถละลายน้ำได้ อันเนื่องมาจากมีส่วนประกอบของหมู่กรดซัลโฟนิค สีย้อมชนิดนี้สามารถให้สมบัติในด้านความคงทนจากการย้อมได้ดี

ฉ. สีย้อมมอแคนท์ : ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน สามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะบางชนิดได้เช่น เหล็ก โครเมียม เป็นต้น เนื่องจากส่วนใหญ่เป็นสีย้อมในกลุ่มสีเอซิค การเสริมสร้างความคงทนของสีที่ย้อมติดเส้นใยแล้วต่อการใช้ที่เปียกน้ำคือ การย้อมทับด้วยเกลือของโลหะ

ช. สีย้อมซัลเฟอร์ : ใช้ย้อมผ้าฝ้าย ปรกติสีย้อมชนิดนี้ไม่ละลายน้ำ แต่มีบางชนิดที่นำตัวสีย้อมไปรีดิวส์แล้วจะสามารถละลายน้ำได้ โดยสารที่นำมารีดิวส์อยู่ในกลุ่มของสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ สีที่ย้อมออกมาจากสีย้อมชนิดนี้ค่อนข้างไม่สดใส โครโมฟอร์ของสีย้อมซัลเฟอร์ประกอบไปด้วยกลุ่มธาตุซัลเฟอร์(sulfonic groups) กลไกในการย้อมเกิดขึ้นดังนี้คือ เมื่อสีย้อมละลายในน้ำทั่วแล้วจะเริ่มเข้าแทรกสู่ตัวเส้นใยเกิดการออกซิไดส์ ทำให้ตัวสีย้อมกลายสภาพเป็นรูปที่ไม่ละลายน้ำ ส่งผลให้สีย้อมยึดติดกับเส้นใยที่ย้อมได้อย่างถาวร

ซ. สีย้อมแควด : ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสและเส้นใยฝ้าย การย้อมต้องใช้สารรีดิวซ์ที่เหมาะสมมาช่วยทำให้ละลายเช่น โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ เป็นต้น เนื่องจากตัวสีย้อมแควดนี้มีสมบัติไม่ละลายน้ำ กลไกในการย้อมเกิดขึ้นโดยเมื่อสีย้อมถูกรีดิวซ์จะเกิดสารประกอบลิวโค (Leuco compound) แล้วแทรกเข้าไปติดกับเส้นใยได้ เมื่อติดเส้นใยแล้วสัมผัสกับอากาศจะทำให้สารประกอบลิวโคถูกออกซิไดส์เปลี่ยนสภาพเป็นสีแควด ซึ่งมีสมบัติไม่ละลายน้ำจึงทำให้สามารถเกาะติดกับเส้นใยที่ย้อมได้อย่างถาวร

ฉ. สีย้อมรีเอกทีฟ : ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสเป็นส่วนมากและให้ผลดี สีย้อมนี้มีสมบัติในการละลายน้ำได้แล้วเกิดเป็นแอนไอออน มีกลไกการย้อมเป็นดังนี้คือ ในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นเบสจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของสีกับหมู่ไฮดรอกไซด์ในเซลลูโลส เกิดพันธะโควาเลนต์เชื่อมโยงติดกันเป็นสารประกอบชนิดใหม่ เมื่ออาศัยสมบัติการละลายและดูดติดเส้นใยของตัวสี ซึ่งทำให้สีซึมเข้าไปภายในเส้นใยได้แล้ว ดังนั้นหลังเกิดปฏิกิริยาจะทำให้ตัวสีซึมติดอยู่กับเส้นใยได้

ญ. สีย้อมโลหะ : ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส ตัวสีย้อมเป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่มีสมบัติไม่ละลายน้ำ กลไกในการย้อมอาศัยการตกตะกอนของตัวสีย้อมภายในเส้นใย

ฎ. สีย้อมไอเนียม : ใช้พิมพ์ผ้าเป็นส่วนใหญ่จึงมีการนำไปใช้ย้อมผ้าน้อย ในด้านสมบัติการละลายน้ำสามารถทำให้ละลายน้ำได้ กลไกในการทำให้ติดสีอาศัยการทำให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ก่อน เมื่อดูดซึมลงในเส้นใยแล้วทำการออกซิไดส์เปลี่ยนให้ตัวสีกลับไปอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำอย่างเดิม

2.3.3 สารช่วยย้อม

สารช่วยย้อมหมายถึงสารเคมีที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการย้อมสี ทำให้เกิดการติดสีที่เส้นใยได้ดีและมากขึ้น ส่งผลให้สีบนเส้นใยที่ย้อมมีความคงทนสวยงาม ในการใช้สารช่วยย้อมร่วมกับการย้อมสีนั้น จะใส่ลงไปในกระบวนการย้อมร่วมกับสีย้อมที่ใช้ (สมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, 2525)

สารช่วยย้อมสามารถแบ่งออกตามสมบัติเฉพาะตัวได้ 7 ประเภท คือ

ก. สารช่วยย้อมประเภทกรด ใช้สำหรับย้อมเส้นใยโปรตีนและไนลอนเมื่อใช้สีย้อมเอซิค

- ข. สารช่วยข้อมประเภทเบส ใช้สำหรับข้อมเส้นใยเซลลูโลสเมื่อใช้สีข้อมอะโซอิก สีข้อมแวนด์ และสีข้อมซัลเฟอร์
- ค. สารช่วยข้อมประเภทเกลือ ใช้สำหรับข้อมเส้นใยเซลลูโลสทุกชนิดและเมื่อใช้สีข้อมเอซิก
- ง. สารช่วยให้สีสม่ำเสมอ เมื่อใช้สีข้อมแวนด์, สีข้อมดีสเพอร์สและสีข้อมเอซิกบางชนิด
- จ. สารพา ใช้สำหรับข้อมเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด
- ฉ. สารละลายอินทรีย์ ใช้สำหรับข้อมขนสัตว์และใยสังเคราะห์บางชนิด
- ช. สารรีดิวซิ่ง ใช้สำหรับรีดิวส์สีข้อมบางชนิดเพื่อให้สามารถถูกดูดซึมเข้าไปในเส้นใยที่ทำการข้อมได้

สารช่วยข้อมที่กล่าวมาข้างต้นยังสามารถแบ่งย่อยออกตามองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้หน้าเสียจากระบวนการข้อมสีแตกต่างกันไป (นวลละอองเนียมสะอิ่ง, 2525)

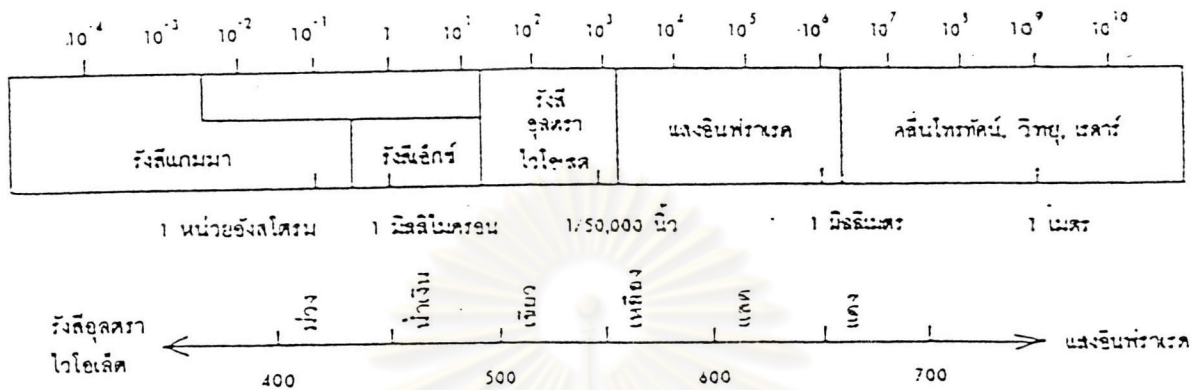
2.4 สีและการวัดสี

สีในน้ำทิ้งโดยเฉพาะน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมข้อมผ้า หากมีปริมาณสีมากขึ้นมาถึงระดับหนึ่งจะสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า แต่การสังเกตด้วยการมองของมนุษย์นั้นจะแตกต่างกันไปตามแต่ละบุคคล อาจไม่สามารถใช้เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบที่แน่นอนได้

2.4.1 สี

สีที่แตกต่างกันเกิดเนื่องจากแสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และสมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, กพ.2526) เมื่อแสงส่องกระทบผิววัตถุหรืออนุภาคซึ่งมีสมบัติการดูดกลืนคลื่นแสง โดยการดูดกลืนคลื่นแสงของวัสดุแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน ช่วงคลื่นแสงต่าง ๆ ที่ไม่ถูกดูดกลืนโดยวัสดุนั้น ๆ จะถูกปล่อยออกมา เกิดเห็นเป็นสีตามช่วงคลื่นที่ปล่อยออกมา(ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และสมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, กพ.2526) หากปล่อยออกมาหลายช่วงคลื่นสีที่ได้จะเป็นผลรวมของหลายสีที่เกิดขึ้น น้ำบริสุทธิ์ไม่มีสิ่งเจือปนอยู่จะไม่

มีสี หากน้ำมีสีแสดงว่ามีสิ่งเจือปนอยู่ในน้ำ ดังนั้น การพิจารณาถึงความบริสุทธิ์ของน้ำโดยอาศัยการวัดปริมาณสีในน้ำสามารถใช้เป็นเกณฑ์อย่างหนึ่งได้



รูปที่ 2.5 แถบแสงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและแถบแสงสีที่มองเห็นได้

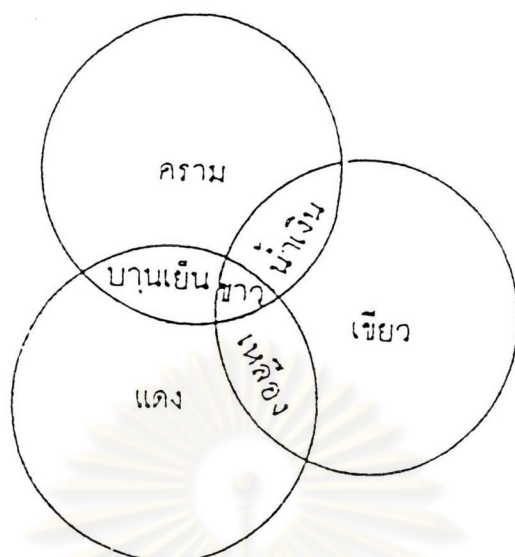
ตารางที่ 2.1 โทนสีสำหรับช่วงความยาวคลื่นเด่นของแสงต่างๆ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และสมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, กพ.2526)

ช่วงความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	โทนสี
400 - 465	ม่วง
465 - 482	น้ำเงิน
482 - 497	เขียวออกน้ำเงิน
497 - 530	เขียว
530 - 575	เหลืองออกเขียว
575 - 580	เหลือง
580 - 587	แดงออกเหลือง
587 - 598	แดง
598 - 620	แดงออกแดง
620 - 700	แดง
400 - 530 c	ม่วงน้ำเงิน
530c - 700	ม่วงแดง

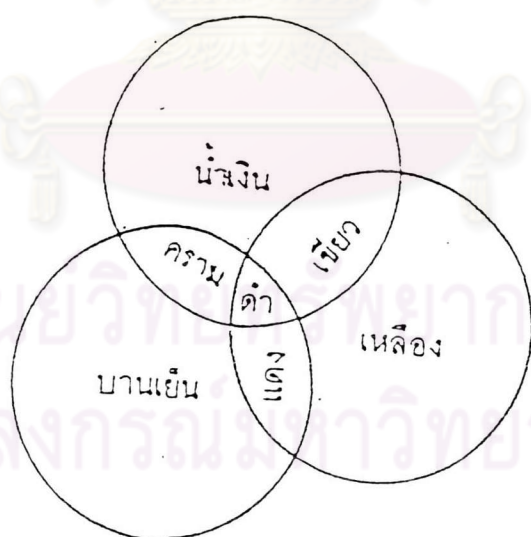
ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และ สมกิต วงศ์ไชยสุวรรณ(กพ.2526)กล่าวไว้ว่า “ทฤษฎีที่นิยมใช้ในการแสดงการมองเห็นสีและการวัดสีได้แก่ทฤษฎีว่าด้วยแม่สีไตรรงค์ ทั้งนี้มีรากฐานมาจากการทดลองที่พิสูจน์ให้เห็นว่า สีใดๆก็ตามเราสามารถมองเห็นได้ในโลกนี้สามารถที่จะเลียนให้เหมือนได้ โดยการผสมแม่สีสามสีเข้าด้วยกันในอัตราส่วนที่เหมาะสม แม่สีดังกล่าวคือสีแดง (red) สีเขียว(green) และสีน้ำเงินเข้ม(blue)หรือสีคราม ตามทฤษฎีแม่สีไตรรงค์นี้ เมื่อประสาทตาได้รับการกระตุ้นจากต้นกำเนิดแสงสี เช่นได้รับการกระตุ้นจากต้นกำเนิดแสงสีแดงและแสงสีเขียว สมองเราจะวิเคราะห์และส่งงานออกมาให้จิตสำนึกรู้สึกเป็นสีระหว่างกลางของแถบแสงสีแดงและเขียวซึ่งคือสีเหลือง ในบางกรณีอาจจะได้ความรู้สึกเป็นสีส้มหรือสีเขียวออกเหลืองก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของต้นกำเนิดแถบแสงสีแดงและแสงสีเขียว ในทำนองเดียวกันถ้าต้นกำเนิดเป็นแสงสีเขียวและแสงสีคราม จะได้ความรู้สึกจากการมองเห็นเป็นสีน้ำเงินออกฟ้าที่บางคนนิยมเรียกว่าสีไซอัน(cyan) และเมื่อผสมแสงแม่สีทั้งสามนี้เข้าด้วยกันจะได้ความรู้สึกเป็นสีขาว ปราณุกการณการสร้างสีโดยแสงสีขึ้นมาเช่นนี้เรียกว่า การผสมเชิงบวกของแสงสี(additive mixture of lights)ซึ่งมีแสงสีแดง สีคราม และสีเขียวเป็นแม่สีเชิงบวก(additive primary colours)”

“แม่สีเชิงลบ (subtractive primary colour) เกิดขึ้นโดยวัตถุที่เรามองเห็นจะตัดทอน (subtract) คลื่นแสงสีบางส่วนออกจากแสงสีขาว เช่นสีข้อมหรือสารสีโคคูลเอาแสงสีเขียวไว้ สีข้อมหรือสารสีนั้นจะสะท้อนแต่เพียงแสงสีแดงและครามออกมา ทำให้จิตสำนึกรับรู้เป็นสีบานเย็น (magenta) ถ้าคูดสีแดงไว้จะได้เป็นสีน้ำเงิน ส่วนถ้าคูดเอาสีครามไว้จะได้เป็นสีเหลือง และเมื่อนำแม่สีเชิงลบคือสีบานเย็น สีไซอัน และสีเหลืองมาผสม ก็จะได้สีตามอัตราส่วนต่างๆที่ผสม”

นอกจากนั้นได้กล่าวถึงว่า “ได้มีการทดลองให้เห็นว่า ถ้าเอาลำแสงของแม่สีเชิงบวกมาส่องทาบกันลงบนฉากขาวในห้องมืด จะได้สีปรากฏต่อความรู้สึกตามที่แสดงในรูปที่ 2.6 โดยมีแสงสีขาวปรากฏอยู่ตรงกลางเมื่อแม่สีเชิงบวกทั้งสามมาทาบซ้อนกัน แต่ถ้าเอาแม่สีเชิงลบของสารสีมาผสมกันก็จะได้สีต่างๆจำนวน 6 สีตามที่แสดงในรูปที่ 2.7 และมีจุดดำตรงกลางแทนสีขาวเพราะแสงถูกดูดกลืนไปบนวัตถุ (ในที่นี้คือส่วนผสมของแม่สีเชิงลบ) หหมดแล้ว จึงไม่มีแสงสะท้อนออกมาและให้ผลปรากฏต่อจิตสำนึกเป็นสีดำ



รูปที่ 2.6 การผสมเชิงบวกของแสงสี(light)(ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และสมคิด วงศ์ไชย
สุวรรณ, กค.2526)



รูปที่ 2.7 การผสมเชิงลบของสารสี(pigment)(ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และสมคิด วงศ์
ไชยสุวรรณ, กค.2526)

ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของสี 3 ค่า ที่ใช้อธิบายคุณลักษณะปรากฏของสีคือ

ก. โทนสี(hue)บรรยายถึงชื่อของสีที่เกิดขึ้น เช่นสีแดง สีเหลือง สีนํ้าเงิน เป็นต้น

ข. ความอิ่มสี(saturation)หรือเรียกอีกอย่างว่าความเต็มของสี(colourfulness) บอกถึงปริมาณความเข้มของสี เช่น โทนสีแดง มีความอิ่มสีมาก จะเรียกว่า สีแดงเข้ม เป็นต้น

ค. ความจ้าของสี(brightness) บอกถึงปริมาณความขาวหรือความดำที่ปนอยู่ด้วย หากมีสีขาวปนอยู่มากค่าความจ้าจะมาก แต่หากมีสีดำปนอยู่มากค่าความจ้าจะน้อย สามารถวัดเทียบกับผิวสีขาวที่ให้ความจ้าต่อเซลล์แสงไฟฟ้า(photoelectric cell)โดยถือว่าผิวสีขาวจะให้ความจ้าเท่ากับร้อยละ 100

2.4.2 การวัดสี

วิธีการวัดสีมี 3 แบบคือ(ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และ สมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ,ธค.2526)

1. วิธีเทียบสีกับสีมาตรฐานที่ยอมรับกันเป็นสีสำหรับอ้างอิง เช่นสีมาตรฐานของ APHA
2. วิธีวัดปริมาณแถบแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ แล้วนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์หาความเป็นสีในหน่วยของ Tristimulus values X, Y และ Z ต่ออีกทอดหนึ่ง
3. วิธีเทียบสีโดยการผสมสีมาตรฐาน 3 แม่สี ในปริมาณต่างๆกันเพื่อให้ได้เนตรสำนึก(visual perception)เหมือนกับสีของตัวอย่าง แล้วนำค่าของปริมาณสีมาตรฐานที่ใช้ผสมมาวิเคราะห์เป็นค่าสี x, y, z ต่อไป

การวัดสีแบ่งตามลักษณะการวัดได้ 2 ประเภท คือ

ก. การวัดสีโดยใช้สายตา

ข. การวัดสีโดยใช้เครื่องมือวัด

การวัดสีโดยใช้เครื่องมือวัดแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

ก. การวัดสีด้วยการวัดอัตราแสงผ่าน อาศัยหลักการของการสะท้อนคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆ ทำให้เกิดเห็นเป็นสีต่างกันไป ช่วงคลื่นแสงที่ทำให้เกิดสีต่าง ๆคือ ช่วง 400-700 นาโนเมตร หากวัสดุชนิดใดสะท้อนคลื่นแสงทุกช่วงคลื่น ก็จะเห็นเป็นสีขาวบนผิวของวัสดุนั้น ในทางกลับกันหากวัสดุชนิดใดดูดกลืนทุกช่วงคลื่นหรือไม่สะท้อนทุกช่วงคลื่น จะเห็นเป็นสีดำบนผิววัสดุนั้น ส่วนกรณีวัสดุมีสีนํ้าเงินก็เนื่องจาก วัสดุนั้นดูดกลืนช่วง

คลื่นแสงที่ให้สีแดงและสีเขียวไว้ เป็นต้น ในการวัดสีด้วยการวัดอัตราแสงผ่านนี้สามารถใช้ เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์วัดค่าร้อยละของแสงที่ผ่านมา (transmittance) หรือวัดค่าร้อยละของการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่ช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 นาโนเมตรจนถึง 700 นาโนเมตร หากเพิ่มความถี่ในการวัดค่าร้อยละของแสงผ่านที่ความยาวคลื่นต่างๆในช่วงคลื่นรวม ก็จะช่วยให้เพิ่มความถูกต้องของการหาค่าอัตราแสงผ่านเพื่อการวัดสีได้

ข. การวัดสีด้วยการผสมแม่สีมาตรฐาน 3 สี อาศัยหลักการสร้างสีขึ้นมาเปรียบเทียบโดยใช้แม่สีมาตรฐาน 3 สี มีทั้งระบบการผสมของแสงสีซึ่งจะประกอบไปด้วยสีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน และระบบการผสมของสารสีซึ่งจะประกอบไปด้วยสีบานเย็น สีเหลือง สีน้ำเงิน ส่วนเครื่องมือที่ใช้สามารถใช้เครื่องเทียบสีทีนโทมิเตอร์ได้(สมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, 2525)

2.5 หน่วยวัดสี

สีเป็นรูปธรรมที่จิตสำนึกประสาทตาและสมองสั่งให้เกิดความรู้สึกรับรู้ขึ้นมา ดังนั้นเราไม่สามารถวัดสีโดยอุปกรณ์วัดสีใดๆได้ แต่อย่างไรก็ตามเราสามารถบรรยายความรู้สึกรับรู้ออกมาเป็นรูปธรรมได้(ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และสมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, กค.2526)

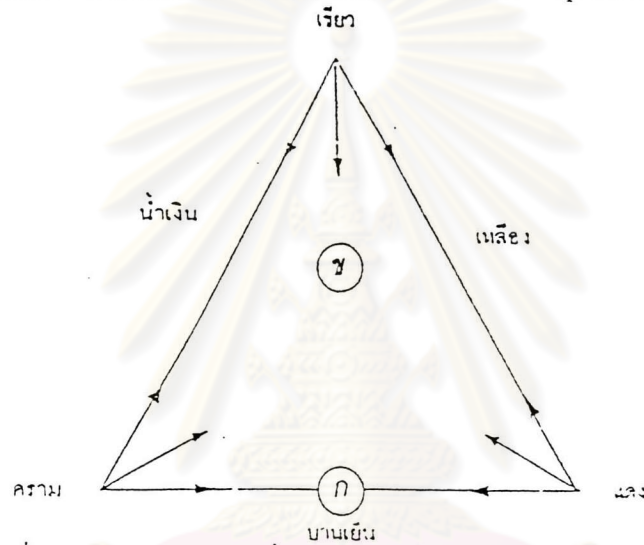
2.5.1 การบรรยายสี

ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และสมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ (กค.2526) ได้กล่าวถึงหลักพื้นฐานเบื้องต้นในการบรรยายสีคือ “ใช้ทฤษฎีของแมกซ์เวลล์ซึ่งอาศัยสามเหลี่ยมแมกซ์เวลล์เป็นเครื่องมือในการบ่งบอกลักษณะสี รูปสามเหลี่ยมของแมกซ์เวลล์ตามรูปที่2.8 กำหนดให้แม่สีเชิงบวกอยู่ที่ปลายแหลมหรือมุมทั้งสาม ส่วนด้านของสามเหลี่ยมจะแสดงถึงแม่สีเชิงลบ ซึ่งแม่สีเชิงลบเกิดจากการผสมของแม่สีเชิงบวกในแต่ละด้านนั้นๆ ความเข้มข้นของสีทุกชนิดทั้งแม่สีลบและบวกจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งเข้าสู่บริเวณกึ่งกลางของสามเหลี่ยมซึ่งเป็นสีขาว เนื่องจากอิทธิพลของการเจือจางด้วยสีขาวมากขึ้นตามลำดับเมื่อวิ่งเข้าสู่ศูนย์กลาง ดังนั้นจุด ณ ตำแหน่งใดๆ ภายในบริเวณรูปสามเหลี่ยมจะแสดงความเป็นสีหนึ่งๆอย่างไม่มีเปลี่ยนแปลง”

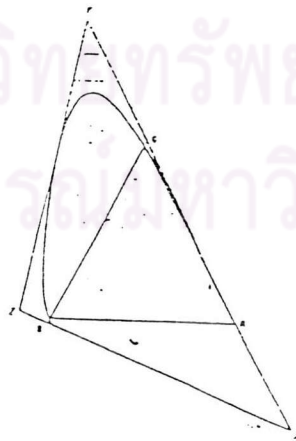
2.5.2 หน่วยสี่ ซี่ไออี

การวัดสี่ในลักษณะ 3 มิติ อาศัยหลักเกณฑ์ของหน่วยวัดสากลซี่ไออี มีค่าแสดงค่าสี่ที่เห็นอันเนื่องจากการผสมแม่สี่ 2 สี(แสดงได้ 2 มิติ)และความจำของสี่(1 มิติ)รวมกัน(ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และสมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, กค.2526)

แต่ในทางปฏิบัติเมื่อใช้แถบแสงของแม่สี่ทั้งสามผสมกันจะเกิดความเข้มอยู่นอกขอบเขตรูปสามเหลี่ยม ซึ่งเกิดแนวขอบเขตเป็นเส้นโค้งเรียกว่า Spectrum Locus



รูปที่ 2.8 ทฤษฎีสามเหลี่ยมแมกเวลล์ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และสมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, กค.2526)



รูปที่ 2.9 สามเหลี่ยม XYZ ที่พัฒนามาจากสามเหลี่ยมแมกซ์เวลล์(ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และสมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, กค.2526)

ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และสมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, (กค.2526) กล่าวว่า “สามเหลี่ยมใหม่ที่สามารรถคลุมรูปทั้งหมดได้ คือสามเหลี่ยมสมมติ XYZ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยมี X, Y และ Z เป็นแม่สีสมมติอยู่ที่มุมยอดของสามเหลี่ยมใหม่ วิธีนี้จะทำให้ค่าแม่สีใหม่ที่เรียกว่า “ค่าสิ่งกระตุ้นให้เห็นสีสามค่า” (Tristimulus values) X, Y และ Z จะมีค่าบวกเสมอ ซึ่งแสดงค่าของสีได้ 2 มิติ”

“การพิจารณาการมีแสง (luminosity) หรือความจ้า (brightness) ซึ่งเป็นอีกมิติหนึ่งจะนำไปวัดให้เท่ากับสี Y หรือสีเขียวเข้มเกินอิ่ม (supersaturated green) ส่วนสี X หรือสีแดงเข้มเกินอิ่มและสีครามเข้มเกินอิ่มหรือสี Z นั้น กำหนดให้พิจารณาเฉพาะด้านสีแต่เพียงอย่างเดียว”

สำหรับการนำไปคำนวณทางคณิตศาสตร์ เพื่อการวิเคราะห์หรือการนำค่ามาแสดงในทอม 2 มิติ ได้กำหนดค่า x, y, z เรียกว่า Chromaticity coordinate (ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และสมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, กค.2526)

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

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

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

และ

$$x+y+z = 1.0$$

“โดยค่า x, y, z จะมีความสัมพันธ์กับ X, Y, Z สองค่าใดๆของ X, Y, Z คือ XY, YZ, ZX จะให้ความรู้สีถึงโทนสีและความอิ่มสีได้โดยมี Y เป็นค่าแสดงความจ้าของตัวอย่าง ค่า Chromaticity coordinates นี้มักแสดงในรูปของค่า X, Y ดังนั้นหน่วยสากล ซีไออี เป็นผลการวัดสีที่แสดงในรูป X, Y, Z หรือ x, y, z ทำให้การวัดสีที่สมบูรณ์ต้องมีผลลัพธ์ที่สามารถแปลงค่าเข้าหน่วยสากลซีไออีได้” (ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และสมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, กค.2526)

2.6 เครื่องเทียบสีทินโทมิเตอร์

เครื่องเทียบสีทินโทมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อให้การวัดสีเป็นไปได้เร็วขึ้น โดยยึดหลักที่ว่าพลังงานของแสงสีจะถูกวัดและวิเคราะห์เปรียบเทียบได้ ต้องอาศัยจิตสำนึกเข้ามา ร่วมในการวินิจฉัยด้วย(ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และสมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, กพ.2527)

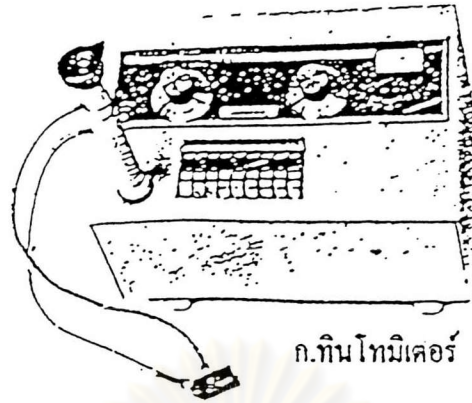
2.6.1 ลักษณะทั่วไปของเครื่องเทียบสีทินโทมิเตอร์

กล่าวคืออุปกรณ์นี้ไม่ใช่เป็นเครื่องวัดสีแต่เป็นเครื่องเทียบสี “ต้องมีผู้สังเกตหรือผู้อ่านสีร่วมในการเทียบสีด้วย โดยใช้หลักการการผสมแม่สี ให้เห็นเป็นสีเหมือนกับตัวอย่างที่ต้องการวัดสี ซึ่งอาศัยการใช้แม่สีในอัตราส่วนต่างๆกัน ค่าที่อ่านได้จะเป็นสัญญาณของแม่สีซึ่งลบ คือแดง R เหลือง Y และน้ำเงิน B ซึ่งใช้ทำให้เกิดสีเหมือนตัวอย่าง”(ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และสมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, กพ.2527)

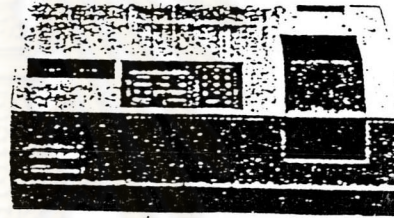
“แม่สีเชิงลบสามสี คือสีแดง(บานเย็น,มาเกนดา) สีเหลือง และสีน้ำเงิน(ไชยัน) เมื่อรวมกันในอัตราส่วนที่เท่ากันจะให้เป็นสีดำขึ้นมา ซึ่งสีดังนี้ก็คือความทึบของสี(หรืออีกนัยหนึ่งคือความจ้าของสี) ค่าความทึบหรือความสว่างนี้ขึ้นกับปริมาณของแม่สีทั้งสามที่นำมาผสมกัน ในส่วนการสังเกตสีจากเครื่องเทียบสีทินโทมิเตอร์ สีที่ตาผู้สังเกตมองเห็นนั้นจะมาจาก การผสมแม่สีเพียง 2 ชนิดใน 3 ชนิด ทั้งนี้ที่ความทึบ(หรือความสว่าง)ต่างๆกัน ในอุปกรณ์ทินโทมิเตอร์เช่น Lovibond Flexible Optics Tintometer ในรุ่น AF751 ดังแสดงในรูปที่2.10 มีปุ่มสำหรับควบคุมความจ้าในการเทียบสีด้วย ค่าที่ได้จึงถูกต้องแม่นยำขึ้น สามารถดัดแปลงให้เข้ากับหน่วยของซีไอไอได้”(ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และสมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, กพ.2527)

2.6.2 การวัดสีโดยเครื่องเทียบสีทินโทมิเตอร์

การวัดสีโดยเครื่องเทียบสีทินโทมิเตอร์ อาศัยฟิลเตอร์สำหรับเทียบสี 3 ชนิด คือ สีแดง, สีเหลืองและสีน้ำเงิน โดยจะอ่านค่าออกมาเพียง 2 ค่าจาก 2 สีใน 3 สี แล้วสามารถหาค่าของสีในหน่วยซีไอไอได้โดยใช้กราฟสำเร็จรูปที่มากับเครื่องมือ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และสมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, กพ.2527)



ก.ทินโทมิเตอร์



ข.ซูวีสเปกโทรโฟโทมิเตอร์

รูปที่ 2.10 ทินโทมิเตอร์และซูวีสเปกโทรโฟโทมิเตอร์



รูปที่ 2.11 รูปกราฟการเปลี่ยนค่าหน่วยสีต่างๆให้อยู่ในหน่วย CIE (ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และ สมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, กพ.2527)

“การวัดความจ้า(brightness)ไม่สามารถหาได้โดยตรงต้องหาจากความหนาแน่นทางตา (visual density) หรือค่า“วีดี” โดยการหาค่าความหนาแน่นทางตาใช้กราฟสำเร็จรูปที่มากับเครื่องมือ เนื่องจากในระหว่างการวัดต้องมีการเพิ่มหรือลดค่าตามการปรับความจ้าในการวัด ทำให้ต้องมีการปรับค่าความหนาแน่นทางตาตามไปด้วย ซึ่งโดยปรกติจะตั้งค่าวีดี=0 ที่ความจ้า 50% ในกรณีนี้จะใช้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดยค่าที่ได้จากกราฟการเพิ่มหรือลดค่าตามการปรับความจ้าในการวัด จะนำไปรวมกับค่าความหนาแน่นทางตาที่อ่านไว้ จึงจะได้ค่าความหนาแน่นทางตาที่ถูกต้อง แล้วนำไปคำนวณค่าความจ้าได้จากสูตร” (ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และสมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, กพ.2527)

$$\begin{aligned} \text{ความจ้า} \quad Y(\%) &= 100(10^{-D}) \\ D &= -\log_{10} \frac{(Y\%)}{100} \\ \text{เมื่อ} \quad D &= \text{visual density} \end{aligned}$$

จากนั้นนำมาแปลงค่าให้อยู่ในรูป Tristimulus values X, Y, Z ได้โดยอาศัย สมการ

$$\begin{aligned} Y &= \text{ค่าความจ้า (ได้จากการวัดและคำนวณ)} \\ X &= \frac{x}{y} Y \\ Z &= \frac{z}{y} Y \end{aligned}$$

2.7 การแปลงหน่วยวัดสี

การแปลงค่าหน่วยสีซีไออีเป็นหน่วยสีเอ็ดเอ็มไอ เพื่อให้สามารถนำค่ามาเปรียบเทียบกันได้ หลังจากได้ค่า Tristimulus values ซึ่งเป็นค่าในหน่วย ซีไออี แล้ว ต้องเปลี่ยนค่า X, Y, Z เป็นค่ามันเชลล์ (Munsell value) V_x, V_y และ V_z โดยอาศัยสูตรของ McLaren” (ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และสมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, ธค.2527)

$$\begin{aligned} X &= 0.98071(1.2219V_x - 0.23111V_x^2 + 0.23951V_x^3 \\ &\quad - 0.021009V_x^4 + 0.0008404V_x^5) \end{aligned}$$

$$Y = (1.2219V_y - 0.2311V_y^2 + 0.23951V_y^3 - 0.021009V_y^4 + 0.0008404V_y^5)$$

$$Z = 0.11822(1.2219V_z - 0.2311V_z^2 + 0.23951V_z^3 - 0.021009V_z^4 + 0.0008404V_z^5)$$

นอกจากนี้ยังสามารถหาค่า x , y และ z ได้จากตารางใน

"Color Science : Concepts and Methods Quantitative Data and Formular"

ต่อมาจึงหา DE โดยอาศัยการคำนวณจากสูตรความแตกต่างสีของอาดัมส์-นิกเกอร์สัน
"(ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และสมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, ธค.2527)

$$DE = [(0.23\Delta V_y)^2 + \{\Delta(V_x-)\} + \{0.4\Delta V_y-\})^2]^{1/2}$$

ทั้งนี้ต้องทำการหาค่า X, Y, Z และวิเคราะห์ค่า DE สำหรับทั้งน้ำกลั่น(ความไร้สี)
 X_c, Y_c, Z_c และน้ำตัวอย่าง ปกติแล้วความไร้สีของน้ำกลั่นควรอ่านค่าได้ประมาณ"(ธงชัย
พรรณสวัสดิ์ และสมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, ธค.2527)

$$X_c = 98.00 - 98.06$$

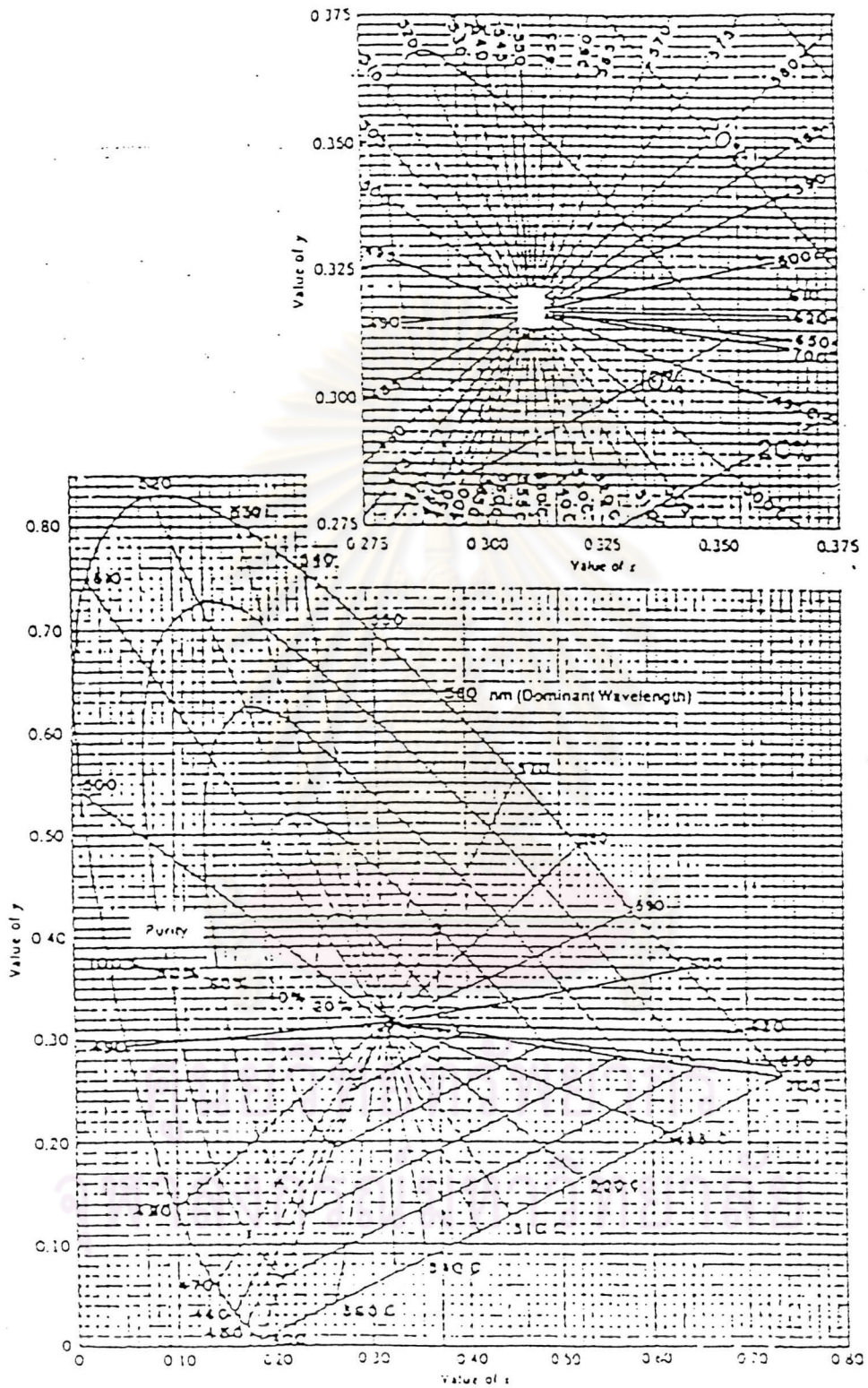
$$Y_c = 100$$

$$Z_c = 188.35 - 118.14$$

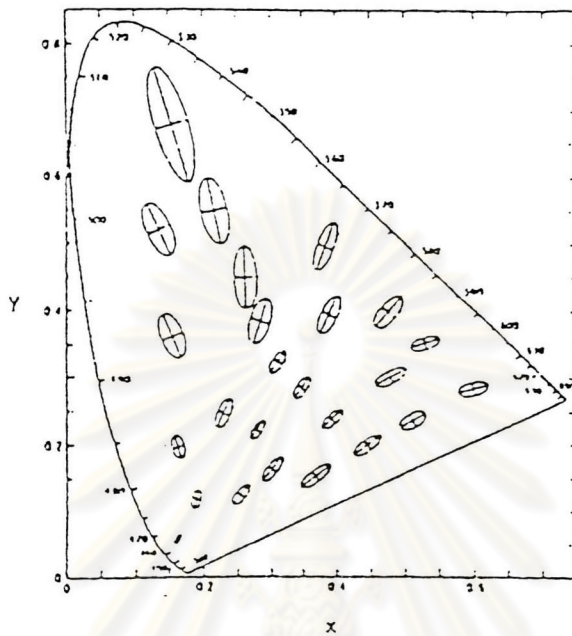
สรุปความสัมพันธ์ได้เป็น(สมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, 2525)

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

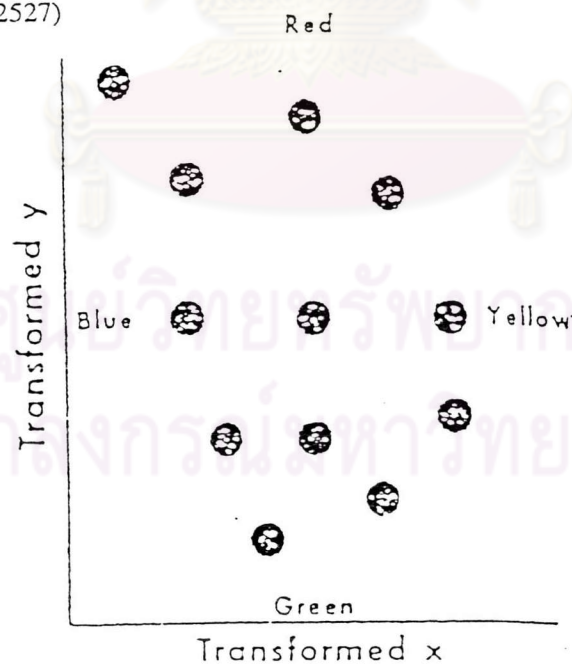
แล้วหาค่า $ADMI$ โดยการคำนวณจากสูตร (ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และสมคิด วงศ์ไชย
สุวรรณ, ธค.2527)



รูปที่ 2.13 แผนภาพสี(Chromaticity Diagram) (ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และ สมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, ๒๕๒๗)



รูปที่ 2.14 รูปรีของอาดัมส์ที่ให้ความรับรู้สีเท่ากัน (ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และ สมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, ธค.2527)



รูปที่ 2.15 รูปรีที่ถูกเปลี่ยนให้เป็นวงกลมสำหรับการวัดสีใน Chromaticity Diagram (ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และ สมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, ธค.2527)

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

โดย $F = \text{constant}$ มีค่า 1400 กรณีเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ความไวสูง

และ มีค่า 1600 กรณีเครื่องเทียบสีทีนโทมิเตอร์

$b =$ เป็นความกว้างของเซลล์บรรจุสารละลาย น้ำกลั่น หรือตัวอย่างน้ำมีหน่วยเป็นซม.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย