

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

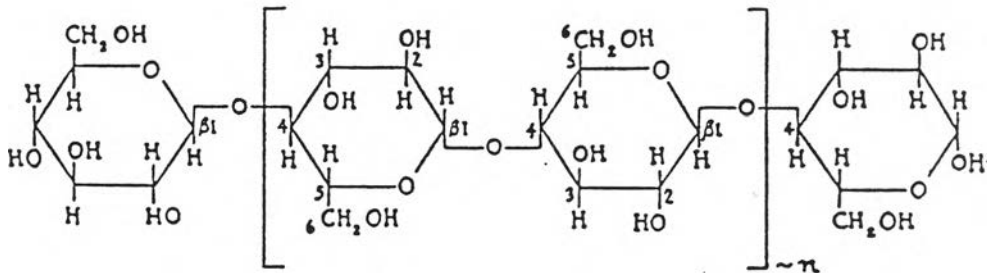
2.1 วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

2.1.1 องค์ประกอบในวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ส่วนใหญ่จะประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งโดยปกติปริมาณสารประกอบเหล่านี้จะแตกต่างกัน ขึ้นกับชนิด อายุ และขึ้นกับว่าเป็นส่วนประกอบส่วนไหนของพืช

2.1.1.1 เซลลูโลส (Cellulose)

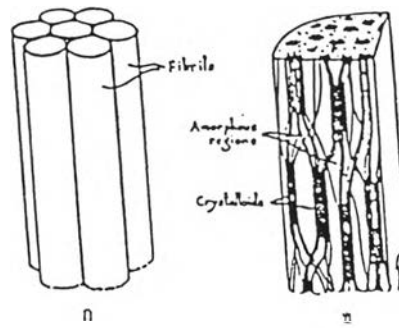
เซลลูโลสเป็นสารประกอบโพลีแซคคาไรด์ (Polysaccharides) ชนิดหนึ่งที่มีมากในผนังเซลล์ของพืช โครงสร้างของโมเลกุลเป็นแบบไม่มีกิ่งก้านสาขา ประกอบด้วยหน่วยย่อยของน้ำตาลกลูโคสหลายๆ หน่วยมาต่อกันเป็นเส้นยาวด้วยพันธะแบบ β (1 \rightarrow 4) Glycosidic Bond (รูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 แสดงสูตรโครงสร้างของเซลลูโลส, $[C_6H_{10}O_5]_n$

ที่มา : Roy และ James Teng (1970)

ประมาณกันว่าเซลลูโลสมีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 20,000-750,000 ดาลตัน ซึ่งเท่ากับ 100-4,000 หน่วยเซลลูโลส (น้ำหนักโมเลกุลของกลูโคสเท่ากับ 180.16 ดาลตัน) โมเลกุลของเซลลูโลสจะเรียงกันอยู่เป็นมัดๆ เรียกว่าFibril (รูปที่ 2.2 ก) เมื่อนำแต่ละ Fibril มาขยาย จะพบว่าประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนที่อยู่รวมกันเป็นกระจุก เรียกว่า Crystalloid และส่วนที่อยู่รวมกันแบบหลวมๆ เรียกว่าAmorphous Regions (รูปที่ 2.2 ข)



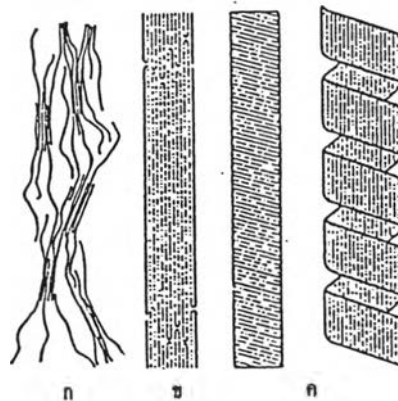
รูปที่ 2.2 ก. Bundle ของ Parallel Fibrils

ข. ภาพตัดด้านข้างของ 1 Fibril

ที่มา : Goksfyr และ Erikson, 1980

เซลลูโลสธรรมชาติ (Native Cellulose) ที่พบทั่วๆ ไปในผนังเซลล์ของพืชจะแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ คือ

1. Fringe Micelle ประกอบด้วย ส่วน Crystalloid และ Amorphous (รูปที่ 2.3 ก)
2. โครงสร้างของเซลลูโลสที่ม้วนหรือพับไปตามแกนของเส้นใยเซลลูโลส (รูปที่ 2.3 ข)
3. โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นริบบิ้นหนา เกิดจากการม้วนไปมาโดยตั้งฉากกับแกนของริบบิ้น และแถบริบบิ้นจะม้วนเป็นเกลียว (รูปที่ 2.3 ค)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเซลลูโลสที่พบในผนังเซลล์ของพืชทั่วๆ ไป (กนก, 2528)

เซลลูโลสมีคุณสมบัติไม่ละลายในน้ำ ตัวทำละลายอินทรีย์ หรือสารละลายต่างอ่อน แต่จะละลายในกรดและด่างแก่ เมื่อสลายตัวโดยสมบูรณ์ด้วยกรดหรือเอนไซม์ จะได้น้ำตาลกลูโคสอย่าง

เดี่ยว แต่ถ้าการสลายตัวไม่สมบูรณ์ จะได้เซลโลไบโอส (Cellobiose) ซึ่งเป็นไดแซคคาไรด์ (Disaccharide) และโอลิโกแซคคาไรด์ (Oligosaccharide) อื่นๆ

2.1.1.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

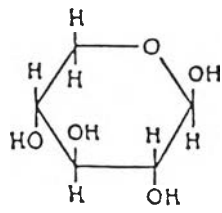
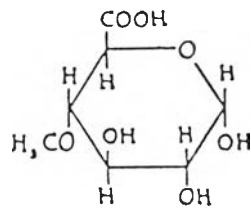
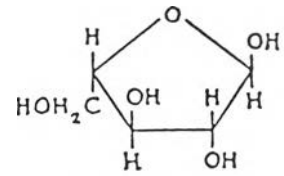
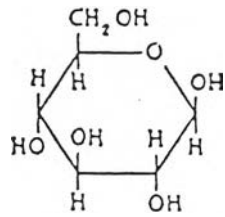
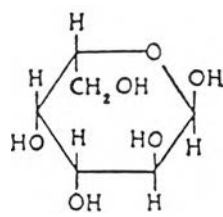
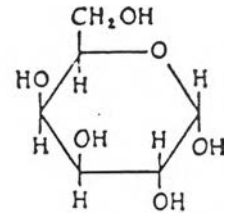
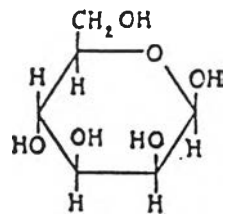
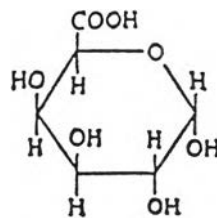
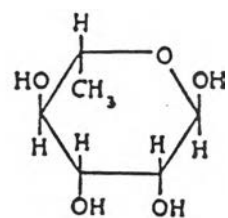
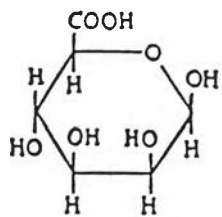
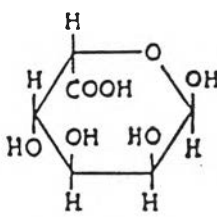
เฮมิเซลลูโลสเป็นสารประกอบพวก Amorphous Polymeric Carbohydrate พบมากในพวกไม้เนื้อแข็งและพืชตระกูลหญ้า ละลายในสารละลายที่เป็นด่างเจือจาง ปกติจะอยู่ร่วมกับเซลลูโลส ลิกนินและเพคติน (Pectin) ในผนังเซลล์ของพืช น้ำหนักโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสจะต่ำกว่าเซลลูโลส ขนาดของโมเลกุลมีความยาว 30-50 หน่วย โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสมีลักษณะเป็น Heteroglycan ซึ่งมีกิ่งก้านสาขาแตกต่างจากเซลลูโลสที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรง ประกอบด้วยน้ำตาลหลายชนิดมาต่อกัน เช่น β -D-xylopyranose, α -L-arabofuranose, β -D-glucopyranose, α -D-galactopyranose, β -D-mannopyranose และ α -L-fucopyranose ซึ่งน้ำตาลทั้งหมดจะมีลักษณะเป็นแบบไพราโนส (Pyranose Form) ยกเว้น Arabofuranose ที่มีลักษณะเป็นแบบฟูรานอส (Furanose Form) (รูปที่ 2.4)

2.1.1.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินจัดอยู่ในพวก Heterogeneous Organic Polymer จะอยู่ภายในโครงสร้างของพืช โดยอยู่รอบๆ เซลลูโลสและป้องกันเซลลูโลสจากการย่อยสลาย ลิกนินเป็นสารประกอบอะโรมาติก (Aromatic Compound) ประกอบด้วยหมู่เมธอกซิล ($-\text{OCH}_3$) หมู่ไฮดรอกซิล ($-\text{OH}$) และส่วนที่เป็นฟีนอลิก โดยปกติไม่สามารถระบุได้ว่าลิกนินเป็นสารประกอบประเภทใด เพราะไม่สามารถกำหนดโครงสร้างที่แน่นอนได้ ทั้งนี้เนื่องจากลิกนินไม่อยู่ในลักษณะตัวเดียว แต่จะเกาะเป็นสายยาว ซึ่งมีหลายแบบได้แก่ ฟีนิลโพรเพน (Phenyl Propane) กัวอิจะซีล ยูนิต (Guaiacyl Unit) ไชริงกิล ยูนิต (Syringyl Unit) พารา-ไฮดรอกซีฟีนิล ยูนิต (Para-Hydroxyphenyl Unit) ดังรูปที่ 2.5 โดยลักษณะการจับของฟีนิลโพรเพน อาจเชื่อมกันที่ตำแหน่งแอลฟา เบต้าหรือแกมมา กับหน่วยอื่นหรือที่ตำแหน่ง 4 และ 5 ของวงแหวนฟีนิล ได้รูปร่างเป็นเส้นตรง วงกลม หรือมีกิ่งก้านสาขาได้

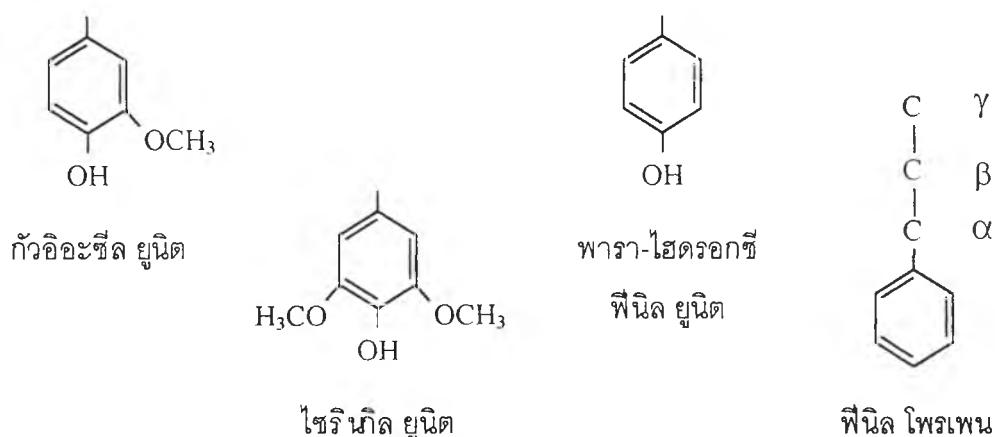
2.1.2 วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ใช้ในงานวิจัยนี้

รายละเอียดวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ใช้ในงานวิจัยได้แก่ ชานอ้อย ผักตบชวา และเส้นใยลูกปาล์ม มีดังนี้

 β -D-xylopyranose (I)4-O-methyl- α -D-glucuronic acid (II) α -L-arabofuranose (III) β -D-glucopyranose (IV) α -L-fucopyranose (V) α -D-galactopyranose (VI) β -D-mannopyranose (VII) α -D-galacturonic acid (VIII) α -L-rhamnopyranose (IX) β -D-mannuronic acid (X) α -L-guluronic acid (XI)

รูปที่ 2.4 แสดงน้ำตาลเพนโตส เฮกโตส และกรดยูโรนิก ที่เป็นองค์ประกอบ
ของเฮมิเซลลูโลส

ที่มา : Goodwin และ Mercer, 1983



รูปที่ 2.5 แสดงหน่วยย่อยในโครงสร้างของลิกนิน (ปราณี, 2537)

2.1.2.1 ชานอ้อย (Bagasse)

ชานอ้อยเป็นผลพลอยได้จากโรงงานน้ำตาล องค์ประกอบทางเคมีของชานอ้อยประกอบด้วยเซลลูโลสร้อยละ 44 ลิกนินร้อยละ 20 เพนโตเซนร้อยละ 27 และซีไธร์ร้อยละ 1.6 (ปรีชา, 2532) หนึ่งในสามส่วนของชานอ้อยจะใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเป็นพลังงานในอุตสาหกรรมน้ำตาล ที่เหลืออีกสองส่วนใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อทดแทนไม้ใบกว้างในอุตสาหกรรมการผลิตวัสดุหลายประเภทเช่น การผลิตเยื่อกระดาษ การผลิตแผ่นไม้ประดิษฐ์ หรือใช้ผลิตเป็นพลังงานในรูปแบบต่างๆ เช่นผลิตไฟฟ้า ชานอ้อยอัดแท่ง ถ่านอัดแท่ง หรือผลิตเป็นเชื้อเพลิงเหลวเป็นต้น ซึ่งแต่ละแบบนั้นมีความยากง่าย และการลงทุนที่แตกต่างกัน

ลำต้นอ้อยประกอบด้วยข้อและปล้องเป็นระยะๆ สลับกัน ภายในลำต้นอ้อยประกอบด้วยเนื้อเยื่อ 3 ประเภทคือเนื้อเยื่อที่อยู่รอบนอก เนื้อเยื่อประเภทท่อลำเลียง และเนื้อเยื่อประเภทสะสมอาหาร เมื่อนำอ้อยเข้ากระบวนการหีบอ้อย น้ำอ้อยจะถูกสกัดออกเหลือชานอ้อยซึ่งประกอบด้วยน้ำ ไฟเบอร์ และสารที่ละลายน้ำได้ปนอยู่เล็กน้อย ซึ่งสัดส่วนขององค์ประกอบเหล่านี้จะมากขึ้นกับชนิดของอ้อย การตัด และประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตของโรงงาน ซึ่งโดยเฉลี่ยจะมีความชื้นระหว่างร้อยละ 46-52 ไฟเบอร์ร้อยละ 43-52 และสารที่ละลายน้ำได้ (ส่วนใหญ่เป็นน้ำตาล) ร้อยละ 2-6

2.1.2.2 ผักตบชวา (Water Hyacinth)

ผักตบชวาเป็นวัชพืชน้ำหลายฤดู สามารถพบเห็นได้โดยทั่วไปตามแหล่งน้ำต่างๆ มีอายุนาน อยู่ได้ในน้ำนิ่งและน้ำไหล น้ำลึกและน้ำตื้น องค์ประกอบทางเคมีของผักตบชวาประกอบด้วย เซลลูโลสร้อยละ 43-44 ลิกนินร้อยละ 12-13 เพนโตเซนร้อยละ 14-15 และเถ้าร้อยละ 20-21 (ปราณี, 2537) ผักตบชวาเติบโตและขยายพันธุ์ได้อย่างรวดเร็ว ทำให้มีอยู่หนาแน่นตามแหล่งน้ำ ส่งผลกระทบต่อการจราจรทางน้ำ เป็นแหล่งเพาะพันธุ์ยุง ก่อให้เกิดโรคต่างๆ ปัจจุบันได้มีความพยายามที่จะกำจัดผักตบชวา โดยนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ อาทิ เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษ ใช้เป็นอาหารสัตว์ เป็นปุ๋ยสำหรับพืชหรือใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น

2.1.2.3 เส้นใยลูกปาล์ม (Palm Oil Fiber)

ปาล์มเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวลำต้นตรง คล้ายต้นมะพร้าวหรือต้นจาก มีผลเป็นทะลาย นิยมปลูกเพื่อนำมาสกัดเป็นน้ำมันปาล์ม ปาล์มมีปลูกรากทางภาคใต้ของประเทศ น้ำมันปาล์มที่ผลิตได้มี 2 ชนิดคือ ชนิดที่ผลิตได้จากเปลือกปาล์ม เรียกว่า น้ำมันปาล์มดิบ (Crude Oil) และชนิดที่ผลิตได้จากเนือปาล์ม เรียกว่า น้ำมันเนือปาล์ม (Palm Kernel Oil) สิ่งที่เหลือจากการผลิตน้ำมันปาล์มซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้มีดังนี้

1. กากเปลือกปาล์ม (Palm Press Fiber) เป็นส่วนที่ได้จากการหีบเปลือกปาล์ม ส่วนใหญ่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานปาล์มน้ำมัน
2. กากเนือในเมล็ดปาล์ม (Palm Kernel Meal) เป็นส่วนที่ได้จากการสกัดน้ำมันเนือปาล์ม
3. กากปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Fiber) เป็นส่วนที่ได้จากการหีบปาล์มทั้งผล เป็นส่วนที่มีมาก และใช้เลี้ยงสัตว์ได้

กากปาล์มน้ำมัน หรือเส้นใยลูกปาล์ม เป็นส่วนที่นำมาใช้ในงานวิจัย ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วย เซลลูโลสร้อยละ 39.9 เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 28.9 ลิกนินร้อยละ 20.3 และเถ้าร้อยละ 3.6 (จิรภรณ์, 2542)

2.2 สีย้อม

สีย้อมเป็นสารเคมีที่สกัดจากน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหิน เมื่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหินผ่านการสกัด จะได้สารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว เช่น เบนซิน ไทลีน แอนทราซีน โทลูอีน

แนพทาลีน และพาราฟิน ซึ่งสารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่างๆ (ธงชัย, 2527) ซึ่งสีย้อมที่ผลิตขึ้นมามีหลายชนิด ขึ้นอยู่กับ ความเหมาะสมกับเส้นใย และกระบวนการย้อมที่มีลักษณะแตกต่างกันไป

2.2.1 การเกิดสีของสีย้อม

สีซึ่งปรากฏออกมาทำให้ตามนุษย์ปกติมองเห็นได้ เกิดจากการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมประเภทหนึ่งภายในโมเลกุลของสีย้อม กลุ่มอะตอมที่กล่าวนี้เรียกกันว่า "โครโมฟอร์" ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 7 กลุ่ม (ธงชัย, 2527) คือ

- กลุ่มไนโตรโซ (Nitroso Group) : $-NO$ (หรือ $=N-OH$)
- กลุ่มไนโตร (Nitro Group) : $-NO_2$ (หรือ $=NO.OH$)
- กลุ่มอะโซ (Azo Group) : $-N=N-$
- กลุ่มเอทิลีน (Ethylene Group) : $>C=C<$
- กลุ่มคาร์บอนิล (Carbonyl Group) : $>C=O$
- กลุ่มคาร์บอนิล-ไนโตรเจน (Carbonyl-Nitrogen Group) : $>C=NH$ และ $-CH=N-$
- กลุ่มซัลเฟอร์ (Sulphur Group) : $>C=S$ และ $\geq C-S-S-C \leq$

กลุ่มอะตอมต่างๆ เหล่านี้จะเป็นตัวเพิ่มสีให้แก่สารประกอบอะโรมาติก โดยการดูดกลืนแถบสีขาวยาวบางแถบแสงและปล่อยออกมาบางแถบแสง ทำให้มนุษย์มองเห็นสีย้อมมีโทนสีแตกต่างกันไป

สีย้อมโดยทั่วไปนอกจากจะต้องมีกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์แล้ว ยังจำเป็นต้องมีกลุ่มอะตอมอีกชนิดหนึ่งได้แก่ กลุ่มอะตอม "ออกโซโครม (Auxochromes)" (ตารางที่ 2.1) เพื่อให้สีย้อมสามารถทำปฏิกิริยายึดติดกับเส้นใยได้ โมเลกุลใดที่ปราศจากกลุ่มอะตอมออกโซโครมจะแสดงคุณสมบัติของสีออกมาได้ แต่จะขาดสมบัติในการยึดติดกับเส้นใย โมเลกุลดังกล่าวนี้เรียกว่า "โครมาเจน (Chromagen)" ทั้งกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์ ออกโซโครม และโครมาเจนนี้จะเป็นส่วนสำคัญในการพิจารณาแบ่งกลุ่มของสีย้อมตามสูตรโครงสร้างทางเคมีซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

ตารางที่ 2.1 กลุ่มอะตอมออกซิโครม (Rangnekar และ Singh, 1980)

Name	Group	Name	Group
Amino	-NH ₂	Chloro	-Cl
Methylamino	-NHCH ₃	Methyl	-CH ₃
Dimethyl Amino	-N(CH ₃) ₂	Methoxy	-OCH ₃
Sulphonic Acid	-SO ₃ H	Cyano	-CN
Hydroxy	-OH	Acetyl	-COCH ₃
Carboxylic Acid	-COOH	Amido	-CONH ₂

2.2.2 การจำแนกสีย้อม

Rangnekar และ Singh (1980) สามารถจำแนกสีย้อมได้ 2 วิธี คือ จำแนกสีย้อมตามวิธีการใช้งาน และจำแนกสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมี

การจำแนกสีย้อมตามส่วนประกอบทางเคมี จะมีความยุ่งยากสำหรับผู้ที่ไม่ได้ศึกษาทางเคมีมาโดยตรง และสีกลุ่มเคมีเดียวกันยังมียุทธวิธีการย้อมแตกต่างกัน เช่น สีในกลุ่มอะโซ บางตัวย้อมง่าย ๆ โดยตรง แต่บางตัวจะติดเส้นใยได้เมื่อน้ำย้อมมีสภาพเป็นกรด และบางตัวจำเป็นต้องมีสารบางอย่างช่วยจึงจะติดเส้นใย จึงทำให้จดจำได้ยาก ดังนั้นการจำแนกสีย้อมตามวิธีในการย้อม จึงเป็นที่นิยมมากกว่าและเป็นที่ยอมรับกันในบรรดาผู้ใช้และอุตสาหกรรมการผลิตสี แต่อย่างไรก็ตาม การจำแนกสีตามส่วนประกอบทางเคมี ก็ยังมีประโยชน์ในการศึกษาถึงกลไกการบำบัดน้ำเสียสีของโรงงานฟอกย้อม ดังนั้นหัวข้อนี้จะขอกล่าวถึงการจำแนกสีย้อมทั้งแบบโครงสร้างทางเคมีและแบบการนำไปใช้งาน ดังนี้

2.2.2.1 การจำแนกสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมี

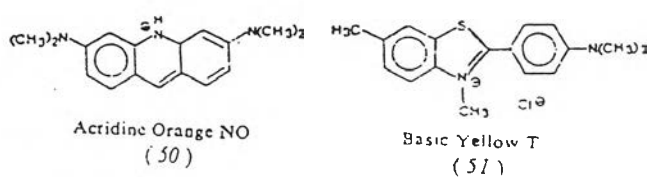
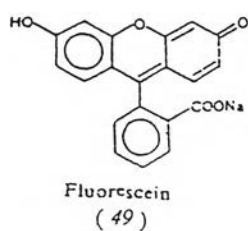
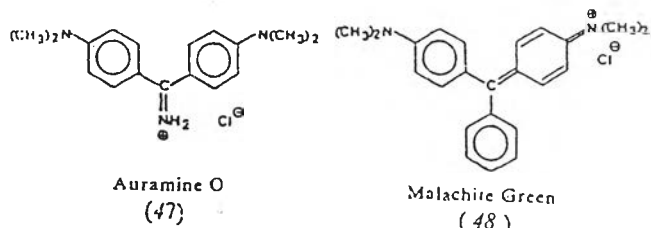
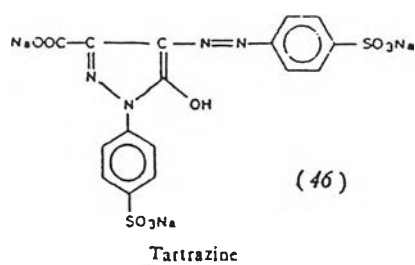
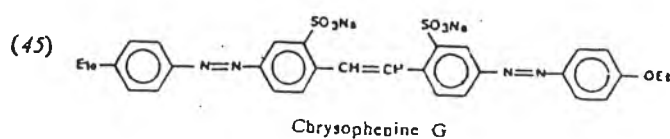
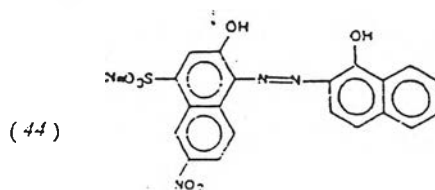
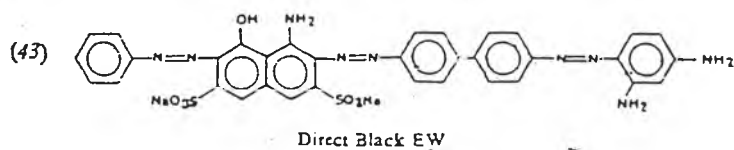
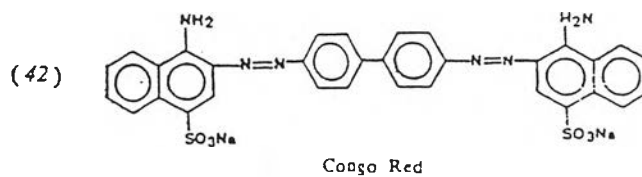
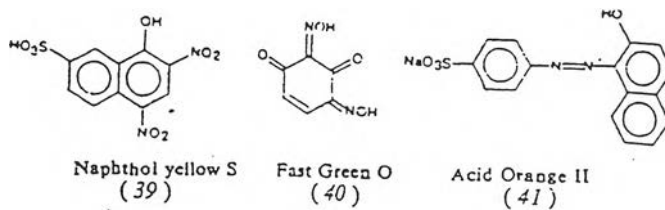
สามารถจำแนกได้ดังตารางที่ 2.2

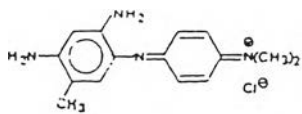
2.2.2.2 การจำแนกสีย้อมตามวิธีการใช้งาน

สามารถจำแนกได้ 9 ประเภทดังนี้ (Rangnekar และ Singh, 1980)

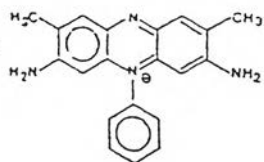
ตารางที่ 2.2 การจำแนกสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมี (Rangnekar และ Singh, 1980)

Class	Subclass	Example	Structure
Nitro	-	Naphthol Yellow S	(39)
Nitroso	-	Fast Green O	(40)
Azo	Monoazo	Acid Orange II	(41)
	Diazo	Congo Red	(42)
	Triazo	Direct Black EW	(43)
	Polyazo	-	
	Mordant azo	Erichrome Black T	(44)
	Stilbene azo	Chrysophenine G	(45)
	Pyrazolone azo	Tartrazine	(46)
Diphenylmethane	-	Auramine O	(47)
Triphenylmethane	-	Malachite Green	(48)
Xanthene	-	Fluorescein	(49)
Acridine	-	Acridine Orange NO	(50)
Thiazole	-	Basic Yellow T	(51)
Indamine&Indophenol	-	Toluylene Blue	(52)
Azine	-	Safranin T	(53)
Oxazine	-	Capri Blue GN	(54)
Thiazine	-	Methylene Blue	(55)
Cyanine	Methine	Astrafloxine FF	(56)
	Quinoline	Kryptocyanine	(57)
Sulphur	-	Sulphur Black T	(58)
Lactone	-	Resoflavine W	(59)
Aminoketone	-	Helindon Brown CR	(60)
Hydroxyketone	-	Alizarin Dark Green W	(61)
Anthraquinonoid	-	Perlon Fast Green 3B	(62)
Indigoid	-	Indigo	
Sulphurized Vat Dyes	-	Hydron Blue R	(64)
Phthalocyanine	-	Monastral Fast Blue BS	(65)

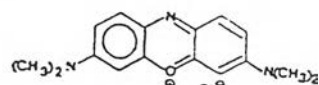




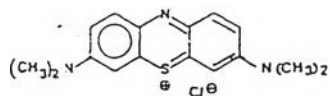
Toluyleno Blue
(52)



Safranin T
(53)

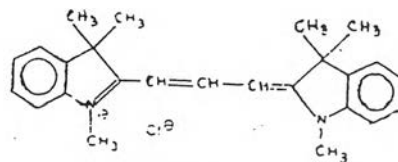


Capri Blue GN
(54)

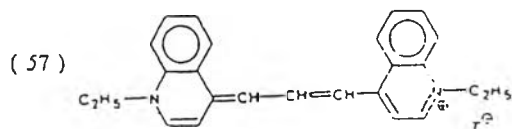


Methylene Blue
(55)

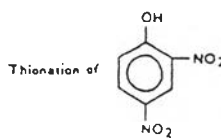
(56)



Astraflavine FF

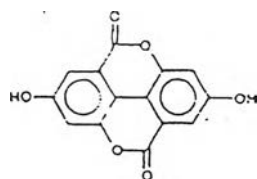


Kryptocyanine



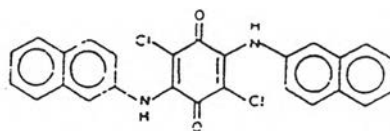
Thionation of

alpha Nitrophenol
(58)

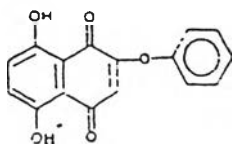


Resorufine W
(59)

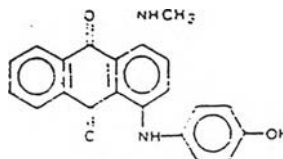
(60)



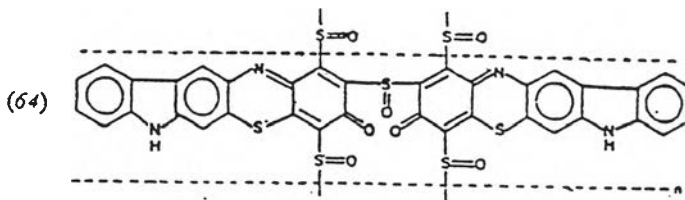
Heliodon Brown CR



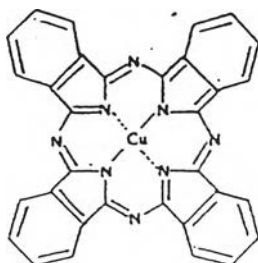
Alizarin Dark Green W
(61)



Perlon Fast Green BR
(62)



Hydron Blue R



Monostral Fast Blue BS
(65)

1. สีแอซิด (Acid Dyes)

เป็นสีย้อมที่ให้ประจุลบ สามารถละลายน้ำได้ดี เหมาะกับเส้นใยในลอนและเส้นใยโปรตีน เช่นขนสัตว์ ไหมเป็นต้น ไม่เหมาะที่จะนำไปย้อมเส้นใยประเภทเซลลูโลส ส่วนใหญ่มีโครงสร้างทางเคมีเป็นพวกอะโซ ไตรฟีนิลมีเทนและแอนทราควิโนน สีย้อมแอซิดย้อมติดเส้นใยด้วยพันธะไอออนิกในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง

2. สีมอร์แดนต์ (Mordant Dyes)

เป็นสีย้อมที่ให้ประจุลบ สามารถละลายน้ำได้ดี เหมาะกับเส้นใยโปรตีน ตัวสีย้อมนี้ส่วนใหญ่เป็นตัวสีในกลุ่มแอซิดที่มีโครงสร้างทางเคมีเป็นพวกอะโซที่สามารถก่อรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะบางชนิดได้ เช่น โครเมียม อลูมิเนียมและเหล็ก ในกระบวนการย้อมต้องมีการเติมเกลือของโลหะ เช่น โซเดียมไดโครเมต ทำให้สีติดเส้นใยด้วยพันธะเชิงซ้อนและพันธะโควาเลนต์

3. สีเบสิก (Basic Dyes)

เป็นสีย้อมที่ให้ประจุบวก สามารถละลายน้ำได้ดี เหมาะกับเส้นใยอะคริลิก ส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างทางเคมีเป็นพวกไดฟีนิลมีเทน ไตรฟีนิลมีเทน ออกซาซีน ไทอาซีนและอะโซ ซึ่งสามารถย้อมติดเส้นใยด้วยพันธะไอออนิก

4. สีไดเรกต์ (Direct Dyes)

เป็นสีย้อมที่ให้ประจุลบ สามารถละลายน้ำได้ดี เหมาะกับเส้นใยเซลลูโลส สีกลุ่มนี้ส่วนใหญ่จะเป็นกลุ่มอะโซ กระบวนการย้อมสีไดเรกต์ ต้องมีการเติมสารอิลเลคโตรไลต์ เช่น โซเดียมคลอไรด์ โซเดียมซัลเฟต เพื่อช่วยให้สีซึมเข้าภายในเส้นใยได้มากขึ้น ซึ่งสีย้อมนี้จะติดเส้นใยด้วยพันธะไอออนิก

5. สีดีสเพอร์ส (Disperse Dyes)

เป็นสีย้อมที่ไม่สามารถละลายน้ำได้หรือละลายได้เล็กน้อย ดังนั้นตัวสีจะอยู่ในรูปคอลลอยด์ ต้องย้อมในสภาวะที่มีอุณหภูมิและความดันสูง เพื่อให้สีย้อมกระจายตัวเข้าใกล้เส้นใย และสามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้เหมาะสมกับเส้นใยเซลลูโลส อะซิเตด ไนลอนและโพลีเอสเตอร์ ส่วนใหญ่มีโครงสร้างทางเคมีเป็นพวกอะโซ และแอนทราควิโนน

6. สีอะโซอิก (Azoic Dyes)

เป็นสีย้อมที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เหมาะกับเส้นใยเซลลูโลส เป็นกลุ่มที่มีโครงสร้างทางเคมีเป็นพวกอะโซ

7. สีแวต (Vat Dyes)

เป็นสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ จึงต้องมีการเติมสารรีดิวซ์ที่เหมาะสมจึงจะสามารถละลายน้ำได้ สารรีดิวซ์ที่นิยมใช้ได้แก่ โซเดียมไฮไดรซัลไฟด์ หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ วิธีการย้อมทำได้โดยนำผ้าไปแช่ในน้ำย้อม และเมื่อสีย้อมเข้าไปในเส้นใยแล้ว เมื่อผ้าสัมผัสกับอากาศ สีย้อมถูกออกซิไดซ์ จะไม่ละลายน้ำเหมือนเดิม ทำให้สีติดเส้นใยได้ เหมาะกับเส้นใยเซลลูโลส ส่วนใหญ่มีโครงสร้างทางเคมีเป็นพวกแอนทราควิโนน

8. สีซัลเฟอร์ (Sulphur Dyes)

เป็นสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ ดังนั้นจึงใช้โซเดียมซัลไฟด์เป็นสารรีดิวซ์ และเมื่อสีย้อมเข้าไปในเส้นใย เมื่อเส้นใยสัมผัสกับอากาศ สีย้อมจะถูกออกซิไดซ์ เปลี่ยนเป็นไม่ละลายน้ำดังเดิม ทำให้สีติดเส้นใยได้ เหมาะกับเส้นใยเซลลูโลส

9. สีรีแอคทีฟ (Reactive Dyes)

เป็นสีย้อมที่ให้ประจุลบ สามารถละลายน้ำได้ดี เป็นสีที่ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด เมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่เป็นด่าง โมเลกุลของสีจะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซีอิออนในเซลลูโลส และเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ซึ่งทำให้สียึดติดเส้นใยได้ดี

2.2.3 ความเป็นพิษของสีย้อมและมลพิษของสีย้อม

โดยทั่วไปสีย้อมเป็นสารที่จัดได้ว่ามีความเป็นพิษต่ำ โดยไม่พบว่ามีอัตราการตายหรือเจ็บป่วยของผู้ที่ทำงานในโรงงานฟอกย้อมสูงกว่าบุคคลอาชีพอื่นแต่อย่างใด สีย้อมอาจเข้าสู่ร่างกายของผู้ใช้ได้ 3 ทางคือทางจุกโดยการสูดดม ทางผิวหนังโดยการสัมผัส และทางระบบทางเดินอาหารโดยปนเข้าไปกับอาหารการกิน แต่ก็เป็นที่ทราบกันดีว่าสารวัตถุพิษที่ใช้ในการสังเคราะห์สีย้อม มีจำนวนไม่น้อยที่มีความเป็นพิษสูงมาก และมีหลายตัวเป็นสารก่อมะเร็ง เช่น 2-naphthylamine และ benzidine

ผลกระทบของสีย้อมต่อสิ่งแวดล้อม หรือสมบัติด้านมลพิษของสีย้อมนั้น พบว่าสีย้อมเป็นสารที่ยากต่อการสลายตัวทางชีวภาพ แต่ความเป็นพิษต่อปลาค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตามปัญหาสำคัญของสีย้อมในน้ำทิ้งปัจจุบันมิได้อยู่ที่ความเป็นพิษของสีย้อม แต่อยู่ที่สีของน้ำทิ้ง เนื่องจากสีย้อมเป็นสารที่มีสีเข้ม ดังนั้นแม้มีสีอยู่ในน้ำเพียงปริมาณเล็กน้อย ก็สามารถทำให้น้ำมีสีเป็นที่รังเกียจของผู้พบเห็นได้ จึงต้องมีการกำจัดสีของน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม (นันทยา, 2539)

2.3 กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อม

กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เริ่มตั้งแต่การผลิตวัตถุดิบคือเส้นใย ซึ่งถือว่าเป็นอุตสาหกรรมขั้นต้น จากนั้นจะเป็นขั้นตอนการปั่นด้าย การทอหรือการถักผ้า การฟอกย้อมพิมพ์ และเป็นอุตสาหกรรมเสื้อผ้าสำเร็จรูปในขั้นตอนสุดท้าย จึงอาจกล่าวได้ว่ากระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมสิ่งทอประกอบด้วยกระบวนการหลักที่สำคัญ 5 กระบวนการ (นันทยา, 2539) คือ

ขั้นตอนที่ 1	การผลิตเส้นใย (Fiber Production)
ขั้นตอนที่ 2	การปั่นด้าย (Spinning)
ขั้นตอนที่ 3	การทอ-ถักผ้า (Weaving-Knitting)
ขั้นตอนที่ 4	การฟอกย้อม (Textile Finishing)
ขั้นตอนที่ 5	การผลิตเสื้อผ้าสำเร็จรูป (Garment Manufacturing)

น้ำเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมสิ่งทอส่วนใหญ่เกิดจากขั้นตอนการฟอกย้อม ซึ่งขั้นตอนนี้ส่วนใหญ่จะเป็นกระบวนการที่ต้องใช้สารเคมีในการปรับเปลี่ยนคุณภาพเส้นใยให้เหมาะต่อการย้อมสีและต้องใช้น้ำในปริมาณมาก ดังนั้นในหัวข้อนี้จะขอกกล่าวถึงเฉพาะกระบวนการในการฟอกย้อม ซึ่งขั้นตอนการผลิตอุตสาหกรรมฟอกย้อม ประกอบด้วยกระบวนการหลักๆ คือ กระบวนการเตรียมผ้าสำหรับการย้อมและการย้อมสี

2.3.1 การเตรียมผ้าสำหรับการย้อม (เกษม, 2541)

การเตรียมผ้าเป็นการขจัดสิ่งสกปรกหรือสิ่งเจือปนต่างๆ ในเส้นใย เพื่อเตรียมวัสดุสิ่งทอให้พร้อมสำหรับการย้อมพิมพ์ หรือตกแต่งสำเร็จในลำดับต่อไป กระบวนการเตรียมเส้นใยผ้ามีหลายขั้นตอนแตกต่างกันตามชนิดของเส้นใยและลักษณะของผ้า ถ้าเป็นเส้นใยสังเคราะห์ซึ่งเป็นเส้นใยที่มีความสะอาดอยู่แล้ว กระบวนการเตรียมจะไม่มี ความยุ่งยาก แต่ถ้าเป็นเส้นใยฝ้ายซึ่งเป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีสิ่งสกปรกเจือปนอยู่มาก กรรมวิธีการเตรียมผ้าจะค่อนข้างยุ่งยาก ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

การเผาขน (Singeing)

ผ้าใยสั้นเมื่อทอเสร็จแล้ว จะมีปลายเส้นใยโผล่ขึ้นมาบนผิวผ้ามาก ทำให้ดูไม่สวย และยัง เป็นอุปสรรคต่อการย้อมสีหรือการตกแต่งอีกด้วย ถ้าเป็นเส้นใยใหญ่มากทำให้เนื้อผ้าบริเวณปลาย เส้นใยที่นอนแบนราบลงไปทับนั้นดูดติดสีได้น้อย ดังนั้นต้องเผาเอาปลายขนเหล่านี้่ออกเสียก่อน การเผาขนทำได้โดยการใช้ความร้อนซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ เปลวไฟแก๊ส แผ่นโลหะร้อนและไฟ ฟ้า การเผาด้วยเปลวไฟแก๊ส เป็นที่นิยมใช้กันมาก เพราะมีประสิทธิภาพสูง และเดินเครื่องจักรง่าย

การลอกแป้ง (Desizing)

แป้งที่ติดในเส้นใยผ้า เกิดจากการลงแป้งด้ายยืนในกระบวนการทอผ้า ทำให้การทอมีประ สติภาพที่ดี เส้นด้ายไม่ขาดง่าย ดังนั้นต้องมีการลอกแป้งออกก่อน เพื่อให้เส้นใยผ้าเปียกน้ำได้ดี เป็นผลให้กระบวนการผลิตขั้นต่อไปมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ประหยัดเวลาและสารเคมี คือ สาร ลอกแป้งประเภทสารเอนไซม์ (Enzyme Desizing) และสารออกซิไดซิงส์ (Oxidizing Agent)

การขจัดสิ่งสกปรก (Scouring)

เส้นใยฝ้ายจะมีสิ่งสกปรกตามธรรมชาติเจือปนอยู่ เช่นที่ฝัง เพคติน โปรตีนและเศษเปลือก เมล็ดฝ้าย การขจัดสิ่งสกปรกเหล่านี้ก่อนการย้อมสี ทำให้เส้นใยสะอาด มีความสามารถในการดูด ซึมน้ำได้ดี เปียกได้ง่ายขึ้น และยังช่วยให้สีย้อมและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการต่อไปซึมทะลุเข้าไป ในเส้นใยได้มากขึ้นด้วย ซึ่งวิธีขจัดสิ่งสกปรกออกจากเส้นใยทำได้โดยนำไปต้มกับสารละลายต่าง (โซดาไฟและโซดาแอช) และผสมกับสารลดความตึงผิว เช่น สบู่หรือผงซักฟอก ทำให้ฝ้ายพองตัว และสิ่งสกปรกในเส้นใยบางส่วนถูกเปลี่ยนเป็นสารที่ละลายน้ำได้ บางส่วนถูกกำจัดออกไปเป็น สารแขวนลอย

การฟอกขาว (Bleaching)

ผ้าที่ผ่านการขจัดสิ่งสกปรกแล้ว จะยังคงมีสีปรากฏอยู่ ซึ่งเป็นสีตามธรรมชาติของเส้นใย ดังนั้นการฟอกขาว จึงมีความจำเป็น โดยเฉพาะผ้าที่นำไปเป็นผ้าขาว หรือผ้าย้อมสีอ่อน เพื่อให้ได้ ผ้าขาวหรือสีที่สดใส การฟอกขาวอาจกระทำได้ 2 วิธีคือ วิธีดักซัน (Reduction Method) และวิธี ออกซิเดชัน (Oxidation Method) แต่ในปัจจุบันนิยมใช้วิธีออกซิเดชัน ซึ่งกระทำได้โดยใช้สารเคมีที่ มีอำนาจในการออกซิไดซ์ เช่น โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (NaClO) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และสารประกอบเปอร์ออกไซด์อื่นๆ การเลือกสารเคมีตัวใดนั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใย เครื่องมือ ที่ใช้ในการฟอก และความต้องการในการนำสิ่งทอที่ฟอกไปใช้งาน

การชุบมัน (Mercerizing)

วัตถุประสงค์ของกระบวนการนี้ เพื่อเพิ่มความมันของผ้า ทำให้เส้นใยอ่อนนุ่ม และดูดซึ่มสี ย้อมได้มากขึ้น การชุบมันทำได้โดยนำผ้ามาผ่านสารละลายโซดาไฟเข้มข้น โดยให้สารละลาย โซดาไฟซึมเข้าไปในเส้นใย ทั้งที่ผ้ายังถูกดึงให้ตึงอยู่และล้างโซดาไฟออกโดยเร็วด้วยน้ำ ซึ่งจะทำ ให้ผ้ามีความมัน และลักษณะการบิดเป็นเกลียวของเส้นใยหรือส่วนที่เรียงตัวเป็นระเบียบน้อยลง เพราะเส้นใยพองตัวใหญ่ขึ้น ซึ่งจะทำให้เส้นใยอ่อนนุ่มขึ้น และดูดซึ่มสีย้อมและสารเคมีดีขึ้น

2.3.2 การย้อมสี

ผ้าที่ผ่านกระบวนการเตรียมผ้าแล้ว จะเข้าสู่ขั้นตอนการย้อมสี ซึ่งหลักการสำคัญของการ ย้อมสี คือ การทำให้สีติดผ้าสม่ำเสมอเหมือนกันตลอด สีย้อมจะต้องติดเส้นใยเข้าไปถึงภายใน จะ ติดแต่เฉพาะรอบนอกไม่ได้ และสีย้อมเมื่อติดบนเส้นใยแล้วต้องทนทานต่อการซักล้างไม่หลุดลอก ออกง่าย ซึ่งการย้อมสีให้บรรลุถึงวัตถุประสงค์ จะต้องเข้าใจปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดติดสีของ เส้นใย เช่น การใช้สีย้อมแต่ละประเภทให้เหมาะสมกับลักษณะเส้นใยแต่ละชนิด (ตารางที่ 2.3) และการใช้ประเภทของสารช่วยย้อมให้เหมาะสม

ตารางที่ 2.3 ประเภทสีที่ใช้กับเส้นใยแต่ละชนิด (Duff และ Sinclair, 1989)

เส้นใย	ชนิดสี
เซลลูโลส	ไดเรกท์ ซัลเฟอร์ อะโซอิก แวต รีแอคทีฟ
โปรตีน	แอสิด มอร์แดนท์ รีแอคทีฟ
ไนลอน	ดีสเพอร์ส แอสิด มอร์แดนท์
อะครีลิก	เบสิค แอสิด
โพลีเอสเตอร์	ดีสเพอร์ส

ชนิดและลักษณะของเส้นใย

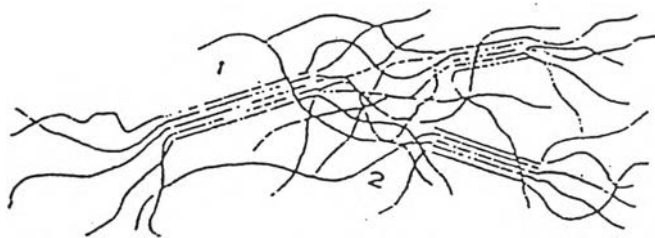
เส้นใยที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอมีอยู่หลายชนิด อาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ (เกษม, 2541) คือ

- | | |
|-------------------|---|
| ก. เส้นใยธรรมชาติ | ประกอบด้วย |
| - เส้นใยจากพืช | เป็นเส้นใยเซลลูโลส ได้แก่ ฝ้าย ปอ ลินิน |
| - เส้นใยจากสัตว์ | เป็นเส้นใยโปรตีน ได้แก่ ไหม ขนแกะ |

- ข. เส้นใยประดิษฐ์ ประกอบด้วย
- เส้นใยกึ่งสังเคราะห์ ได้แก่ เรยอน
 - เส้นใยสังเคราะห์ ได้แก่ โพลีเอสเตอร์ ไนลอน อะครีลิก เป็นต้น

เส้นใยทุกชนิดมีลักษณะเหมือนกันอยู่อย่างหนึ่ง คือ ประกอบด้วยโมเลกุลเล็กๆ ต่อกันเป็นเส้นยาวเหมือนเชือก เช่น ไหม จะเป็นโพลีเปปไทด์ (Polypeptide) ฝ้ายและเรยอน จะเป็นโพลีเซลลูโลส (Polycellobiose) ส่วนไนลอน จะเป็นโพลีเอไมด์ (Polyamide) เมื่อนำเส้นใยไปดึงยืดจะทำให้การเรียงตัวของโมเลกุลดีขึ้น ซึ่งการเรียงตัวภายในเส้นใยอาจแบ่งได้เป็น 2 ส่วน (รูปที่ 2.6) คือส่วนที่เรียงตัวเป็นระเบียบ เรียกว่า คริสตอลไลต์หรือไมเซลล์ (Crystallites or Micelles) และส่วนที่สอง เป็นการเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ หรือเรียงตัวกันอย่างหลวมๆ เรียกว่าช่องว่าง (อัจฉราพร, 2527)

เมื่อเส้นใยเปียกน้ำจะทำให้เส้นใยพองตัว ซึ่งจะเกิดเฉพาะบริเวณเส้นใยที่มีการเรียงตัวกันอย่างหลวมๆ ทำให้ช่องว่างในเส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้น โมเลกุลของสีย้อมก็สามารถผ่านเข้าเส้นใยได้ นอกจากนี้ต้องมีอำนาจอีกอย่างหนึ่งมาทำให้ตัวสีแยกตัวออกจากน้ำและดูดติดกับเส้นใย นั่นคือกลุ่มเคมีที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวสีและเส้นใย



1. คือส่วนที่เป็นคริสตอลไลต์
2. คือส่วนที่เรียงตัวกันอย่างหลวมๆ

รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะการเรียงตัวของเซลลูโลสภายในเส้นใย
(อัจฉราพร, 2527)

การรวมตัวของสีย้อมกับเส้นใย

การย้อมสีให้ได้ผลดีนั้น อำนาจการรวมตัวของสีย้อมกับเส้นใยต้องมีมากกว่าอำนาจการรวมตัวของสีย้อมกับน้ำ และสามารถทำให้เกิดภาวะเช่นนี้ได้ถ้าโมเลกุลของสีย้อมมีหมู่อะตอม ซึ่ง

ถูกเรียงตัวกันในลักษณะที่ถูกทำให้เกิดการดูดติด (Substantivity) กับเส้นใยแล้ว ทำให้เกิดพันธะยึดกันแน่น อาจกล่าวได้อย่างกว้างๆ ว่ามีอิทธิพลเชิงเคมี 4 ชนิด (อัจฉราพร, 2527) ที่ทำให้สีย้อมดูดติดกับเส้นใยได้ คือ

- ก. พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bond)
- ข. แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals' Forces)
- ค. แรงไอออนิก (Ionic Forces)
- ง. พันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond)

กำลังแรงเหล่านี้มักไม่ทำหน้าที่แต่เพียงลำพัง การดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับโมเลกุลของเส้นใยอย่างน้อยจะต้องประกอบไปด้วยแรง 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งก็เกิดขึ้นพร้อมกันด้วยแรงทั้ง 4 ชนิด สำหรับแรงยึดติดทางเคมีที่จะทำให้สีย้อมติดเส้นใยได้ดีที่สุด ได้แก่พันธะโควาเลนต์

การยึดติดของโมเลกุลสีย้อมกับเส้นใย นอกจากจะเป็นอิทธิพลเชิงเคมีของแรงทั้ง 4 ชนิดแล้ว อิทธิพลด้านเรขาคณิตของโมเลกุลของสีย้อม หรืออาจกล่าวอย่างง่าย ๆ ว่ารูปร่างและขนาดของโมเลกุลของสีย้อมก็มีผลต่อการยึดติดหรือมีผลกระทบต่อการย้อมอย่างมากด้วย เช่น ถ้าโมเลกุลของสีย้อมยิ่งเล็กและยาว ก็จะสามารถผ่านช่องว่างเข้าไปในเส้นใยได้มากขึ้น จะทำให้การติดสีดีขึ้น หรือถ้าโมเลกุลของสีย้อมมีลักษณะแบนและมีความกว้างมากกว่าความยาวมากๆ จะทำให้เกิดการติดสีที่มีความคงทนสูงมากขึ้น อาจกล่าวได้ว่าการที่โมเลกุลของสีย้อมยึดเกาะกับโมเลกุลของเส้นใยเป็นผลเนื่องจากแรงทางเคมีและผลทางฟิสิกส์ร่วมกัน

สารช่วยย้อม (Additives)

สารช่วยย้อม เป็นสารเคมีที่ใส่ลงไปในกระบวนการย้อม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย้อมให้มีการดูดติดสีได้มากขึ้น สม่ำเสมอมากขึ้น และทำให้สีย้อมติดเส้นใยแล้วมีความคงทนขึ้น สารช่วยย้อมที่สำคัญ สามารถแบ่งได้เป็น 7 ประเภท คือ

- กรด ใช้สำหรับย้อมเส้นใยโปรตีนและไนลอนเมื่อใช้สีย้อมแอสิด
- ด่าง ใช้สำหรับย้อมเส้นใยเซลลูโลสด้วยสีย้อมอะโซอิก แวต และกำมะถัน
- เกลือ ใช้ในการย้อมด้วยสีย้อมแอสิดและการย้อมเส้นใยเซลลูโลสทุกชนิด
- สารช่วยให้สีสม่ำเสมอ ใช้กับสีแวต ดิสเพอร์สและสีย้อมบางชนิด
- สารพา (Carrier) ใช้เมื่อย้อมเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด
- สารละลายอินทรีย์ ใช้ย้อมขนสัตว์และใยสังเคราะห์บางชนิด

- สารรีดิวซ์ ใช้สำหรับรีดิวซ์ตัวสีบางชนิดเพื่อประโยชน์ในการดูดิซึมเข้าไปในเส้นใย

2.4 ลักษณะและผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมีลักษณะดังต่อไปนี้ (เกรียงสิน, 2536)

1. มีปริมาณสารอินทรีย์สูง เนื่องจากค่าบีโอดี และซีโอดีสูง จากกระบวนการฟอกย้อมได้แก่ แป้ง สีย้อม เส้นใย และเส้นด้ายที่ปนออกมาจากกระบวนการย้อมและตกแต่ง ไขมันและตัวทำละลายต่างๆ
2. มีความเป็นด่างสูง เนื่องจากมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคาร์บอเนตปนอยู่
3. มีอุณหภูมิสูง
4. มีปริมาณของแข็งละลายน้ำสูง เนื่องจากมีเกลือโซเดียมและกรดต่างๆ ปนอยู่
5. มีสีเข้มมาก จากกระบวนการย้อมผ้า
6. มีโลหะหนักเจือปน เนื่องจากสีที่ใช้ในการย้อมผ้า ส่วนใหญ่มีโลหะพวกทองแดง โครเมียม ตะกั่ว และสังกะสีปนอยู่
7. มีปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดสูง

ลักษณะน้ำเสียเหล่านี้จะแตกต่างกันในแต่ละโรงงาน โดยขึ้นอยู่กับ ชนิดของเส้นใยที่นำมาย้อม และกระบวนการย้อมเส้นใยที่แตกต่างกัน ส่วนผลกระทบจากการที่มีสีย้อมปนเปื้อนมากับน้ำทิ้งที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ ขึ้นอยู่กับ

1. ความเข้มข้นของสีย้อมในน้ำเสีย โดยทั่วไปอยู่ในช่วง 0-200 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. อัตราการไหลของน้ำเสีย
3. ขนาดของแหล่งน้ำธรรมชาติ
4. คุณภาพแหล่งน้ำธรรมชาตินั้นๆ

ปัญหาที่เกิดจากสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงาน สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ก่อให้เกิดความไม่สวยงามทางด้านทัศนียภาพ
2. สีย้อมที่เป็นสารอินทรีย์ย่อยสลายได้ ทำให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำลดลง
3. ขัดขวางการเดินทางของแสง ซึ่งจำเป็นต่อการสังเคราะห์แสงของพืช
4. การผลิตออกซิเจนลดลง เนื่องจากผลกระทบจากข้อ 3 ซึ่งส่งผลต่อสัตว์น้ำ
5. ความเป็นพิษของตัวสีย้อม บางชนิดเป็นสารก่อมะเร็ง

6. ทั้งหมดข้างต้นส่งผลให้สถานะของแหล่งน้ำไม่เหมาะต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ

2.5 การจัดการสีในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อม

2.5.1 การลดปริมาณของเสีย

การวางแผนจัดการให้เกิดปริมาณของเสีย หรือลดปริมาณของเสียให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด ณ แหล่งกำเนิด เป็นสิ่งแรกที่ต้องคำนึงถึง เพราะหมายถึงต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบขนถ่ายของเสียและระบบบำบัดน้ำเสีย รวมไปถึงค่าใช้จ่ายในการดำเนินการและค่าบำรุงรักษาด้วย

ผู้ประกอบการในฝ่ายผลิตต้องมีการจัดระบบการจัดการให้สามารถสร้างประสิทธิภาพในการย้อมที่เหมาะสมที่สุดที่จะลดปริมาณการรั่วไหลของสีย้อม หรือปริมาณสีย้อมที่ปนออกมากับน้ำเสียให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านวัตถุดิบได้ด้วย เช่น

- หลีกเลี่ยงการใช้สีย้อมที่มากเกินไป
- เลือกใช้สารเคมีหรือสีย้อมที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม หรือง่ายต่อการนำไปบำบัด เช่น ใช้สีย้อมหรือสารเคมีที่ไม่มีพิษ
- ตรวจสอบป้องกันไม่ให้เกิดรอยรั่วรอยร้าวที่ถังย้อม เส้นท่อต่างๆ เป็นต้น
- จัดแผนงานการผลิตให้เหมาะสมกับเวลา ปริมาณสีย้อม และสารเคมี ไม่ให้มีสีย้อมและสารเคมีเหลือ ควรรอให้มีผ้ามากพอสำหรับการย้อมแต่ละครั้ง
- ในช่วงการล้างชิ้นงาน เพื่อกำจัดสีย้อมและสารเคมีส่วนเกิน ควรพยายามใช้น้ำเท่าที่จำเป็น
- เพื่อให้เกิดความสะอาดในช่วงการบำบัดน้ำเสีย ควรสร้างระบบระบายน้ำแยก ในกรณีที่โรงย้อมนั้นมีกระบวนการผลิตอื่นร่วมด้วย

นอกจากความร่วมมือของผู้ปฏิบัติงานในฝ่ายผลิตแล้ว การแก้ไขในส่วนเทคโนโลยีการย้อมหรือการผลิตก็มีความสำคัญเช่นกัน ไม่ว่าจะเป็นเทคโนโลยีด้านเคมีและอุปกรณ์เครื่องจักร ซึ่งวิธีนี้ต้องอาศัยความร่วมมือจากผู้ชำนาญการหลายส่วน เช่น ผู้ผลิตเครื่องจักรที่ใช้ในการย้อมผ้า ต้องมีการวิจัยพัฒนากระบวนการหรือวิธีการย้อมผ้าแบบใหม่ที่ให้ความสะอาด มีประสิทธิภาพ ประหยัดพลังงาน ใช้ร่วมกับสารเคมีที่ก่อให้เกิดมลพิษน้อยที่สุด หรือเป็นมลพิษที่สามารถกำจัดได้

ละดวกและไม้ลื่นเปลือง เป็นต้น ตัวอย่างของการแก้ไขเปลี่ยนแปลงเพื่อช่วยลดปริมาณของเสียมีดังนี้

1. กระบวนการข้อมผ้าโดยอาศัยปฏิกิริยาเอก ซอสที่ชั้น (Exhaustion) ปัจจุบันได้มีการพัฒนาการข้อมสีแบบใช้อัตราส่วนของเหลวต่ำ (Short Liquor) สำหรับข้อมผ้าฝ้ายและผ้าผสมฝ้าย เป็นการใช้อัตราส่วนของเหลวต่ำ ซึ่งช่วยให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ ประหยัดและช่วยลดปริมาณของเสียที่เกิดในกระบวนการข้อมได้ด้วย ซึ่งวิธีนี้สามารถลดปริมาณน้ำเสียได้ร้อยละ 30 ลดการใช้ไอน้ำลงร้อยละ 40-50 ลดปริมาณสารเคมีได้ร้อยละ 40 ลดปริมาณเกลือและสีข้อม โดยเฉพาะสีย้อมเพอร์ส สีนีโอคทีฟ สีแวต สีซัลเฟอร์ และสีไดเรกต์ได้ร้อยละ 15-20 เมื่อใช้โทนสีเข้ม แต่สามารถลดการใช้สีข้อมเบสิค สีแอสิด สีเมทัลคอมเพล็กซ์ได้ไม่มากนัก

2. เพิ่มปริมาณการใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ ซึ่งจะช่วยควบคุมฟังก์ชันและปัจจัยต่างๆ ในการผลิตให้สามารถทำได้อย่างแม่นยำและใช้ทรัพยากรเท่าที่จำเป็น เช่น ควบคุมการใช้ปริมาณสีข้อม ปริมาณสารเคมี อุณหภูมิ อัตราการไหลเวียนสีข้อมและสารเคมี การจัดโปรแกรมไฟลของเวลาให้สัมพันธ์กับปริมาตร และความเร็วมอเตอร์ ฟีเอช และยังสามารถควบคุมการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ได้อีกด้วย

3. ลดปริมาณการใช้สีข้อมที่เป็นพิษ สารอะโซเป็นสารก่อมะเร็งและสีข้อมไดเรกต์ส่วนใหญ่ก็เป็นสารประกอบอะโซ สำหรับสารเบนซิดีน (Benzedine) จากกระบวนการสังเคราะห์คองโกเรด (Congo Red) ก็ถือว่าเป็นสารที่ก่อมะเร็งเช่นเดียวกัน ส่วนสีข้อมซัลเฟอร์และสีแวต ก็มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเช่นกัน ดังนั้นแนวโน้มในอนาคตคาดว่าจะมุ่งพัฒนาสีข้อมดิสเพอร์ส ซึ่งขณะนี้ยังไม่ส่งผลกระทบต่อเป็นพิษใดๆ

2.5.2 การบำบัดสีในน้ำทิ้ง

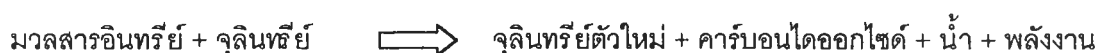
สิ่งเจือปนในน้ำทิ้งเนื่องจากการข้อมผ้าในโรงงานฟอกข้อมนั้น ส่วนใหญ่จะเป็นสีข้อมและสารเคมี ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือตกค้างอยู่ในน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต และจะถูกปล่อยลงแหล่งน้ำทิ้ง แม้จะมีการโต้เถียงกันว่าสีข้อมไม่ควรถูกจัดให้เป็นสารก่อมลภาวะในน้ำ แต่เนื่องจากทำให้เกิดความรู้สึกน่ารังเกียจต่อคนทั่วไป ตามความในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม กำหนดให้สีในน้ำทิ้งไม่เป็นที่น่ารังเกียจ ดังนั้นน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกข้อมก่อนปล่อยออกจากโรงงานต้องผ่านระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อทำการกำจัดสารต่างๆ รวมทั้งสีที่ตกค้างก่อน วิธีการบำบัดสีมีหลายวิธีดังนี้ (Metcalf และ Eddy, 1991)

2.5.2.1 การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical Coagulation)

เป็นกระบวนการกำจัดที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยมักใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรด ต่าง และสามารถใช้เป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้นก่อนกระบวนการบำบัดทางชีววิทยา สารตกตะกอนที่นิยมใช้คือ ปูนขาว สารส้ม เพอร์รอสคลอไรด์ หรือ เพอร์รัสซัลเฟต เป็นต้น การกำจัดโดยใช้กระบวนการตกตะกอนด้วยสารส้ม เป็นผลจากการทำให้โมเลกุลของสีถูกดูดซับบนอนุภาคของสารส้ม ทำให้เกิดตะกอนของสีจมตัวลงในน้ำทิ้ง จากนั้นทำให้น้ำทิ้งเป็นกลางก่อนปล่อยลงท่อน้ำทิ้ง เทคนิคนี้สามารถกำจัดสีออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากน้ำทิ้งจะมีลักษณะแตกต่างไปตามชนิดของโมเลกุลสีย้อม ถ้าสีย้อมมีโมเลกุลเล็ก เช่น สีประเภทสีแอสิด สีรีเอคทีฟ การเกิดตะกอนของสีโดยใช้สารส้มจะไม่สามารถทำได้ ดังนั้นต้องปรับปรุงประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการตกตะกอนให้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ โดยใช้สารช่วยให้เกิดการรวมตัวของตะกอนเช่น โพลีอิเล็กโตรไลต์ ซึ่งต้องใช้ในปริมาณที่เหมาะสม เนื่องจากความเข้มข้นของโพลีอิเล็กโตรไลต์ที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้งจะส่งผลเสียต่อกระบวนการไนตริฟิเคชัน

2.5.2.2 กระบวนการบำบัดทางชีววิทยา (Biological Treatment)

กระบวนการนี้อาศัยจุลินทรีย์ในการลดสี โดยจุลินทรีย์ที่เติบโตขึ้นมาใหม่จะมีการดูดซับสีไปด้วยทำให้สามารถบำบัดสีได้ แบ่งออกเป็น 2 ระบบคือ ระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยา ซึ่งอาศัยจุลินทรีย์ในการทำลาย กิน ดูดซับ หรือเปลี่ยนรูปของมวลสารต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสีย ให้มีค่าความสกปรกลดลง ปฏิกิริยาทางชีวเคมีของกระบวนการแสดงได้ดังนี้



ระบบที่ 2 คือระบบบ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon) ดัดแปลงจากการบำบัดน้ำเสียแบบที่มีอากาศและไม่มีอากาศรวมกันโดยเพิ่มเครื่องเติมอากาศที่ผิวน้ำ ระบบนี้คล้ายกับระบบตะกอนเร่งต่างกัน เพียงบ่อนี้จะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ขุดจากพื้นดินโดยตรง คุณภาพของน้ำเมื่อผ่านกระบวนการนี้จะมีค่าบีโอดีลดลงประมาณร้อยละ 30-50

2.5.2.3 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

การดูดซับบนถ่านกัมมันต์ เป็นกระบวนการดูดซับที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย สามารถใช้กำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่มีข้อจำกัดที่น้ำหนักโมเลกุลของของเสียที่จะถูกดูดซับต้องมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 400 ซึ่งโดยทั่วไปน้ำหนักโมเลกุลของของเสียในอุตสาหกรรมสีจะมีน้ำหนัก

โมเลกุลต่ำกว่า 400 และสูงกว่า 1200 ดังนั้นก่อนการกำจัดด้วยกระบวนการดูดซับบนถ่านกัมมันต์ จะต้องมีการปรับขนาดโมเลกุลของของเสียให้เหมาะสมก่อน โดยการไฮโดรไลซิสด้วยปูนขาว ซึ่งต้องใช้ปูนขาวปริมาณมากในการปรับพีเอชของสารละลายให้อยู่ในช่วง 10-11 ซึ่งส่งผลให้พีเอชของน้ำทิ้งสูง ดังนั้นต้องมีการปรับพีเอชให้เป็นกลางก่อนปล่อยทิ้งด้วยการกำจัดด้วยกระบวนการดูดซับบนถ่านกัมมันต์ เป็นกระบวนการที่ทำให้โมเลกุลของสียดูดติดบนผิวของถ่านกัมมันต์ ดังนั้นประสิทธิภาพการดูดซับสีจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์ เพราะพื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้นนั่นเอง แต่การทำให้โมเลกุลของสีหลุดออกจากผิวของถ่านนั้นทำได้ยาก ต้นทุนการนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่จึงสูงมาก เพราะต้องผ่านการเผาและการกำจัดกากซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง รวมถึงค่าใช้จ่ายในส่วนที่มีการปรับพีเอชก่อนปล่อยออกจากโรงงานด้วย ทำให้เทคนิคนี้ไม่เป็นที่นิยม แม้จะมีประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงก็ตาม

2.5.2.4 การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน (Ozone Treatment)

โดยทั่วไปโมเลกุลสีย้อมจะมีหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นสารประกอบอินทรีย์เป็นพวกวงแหวนกับพันธะคู่ หรือพันธะเดี่ยว ดังนั้นการที่จะทำลายโมเลกุลของสีนั้น ต้องทำลายหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยวก่อน ซึ่งการบำบัดทางชีววิทยาไม่สามารถทำได้ กระบวนการกำจัดสีโดยใช้โอโซนเป็นเทคนิคที่นำมาใช้ไม่นานนัก ซึ่งอาจได้รับความนิยมเมื่อมาตรฐานการปล่อยน้ำทิ้งเข้มงวดขึ้น การโอโซนชั้น (Ozonation) เป็นการออกซิไดซ์พันธะคู่ที่เป็นพันธะเคมีของหมู่โครโมฟอร์ของโมเลกุลด้วยโอโซน แต่เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมาก จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบในน้ำทิ้งอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโมเลกุลของสีย้อม ซึ่งส่วนใหญ่มักประกอบด้วยไนโตรเจน คลอรีน หรือ ซัลเฟอร์ จะเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารเริ่มต้นเดิม

2.5.2.5 เทคโนโลยีเยื่อแผ่น (Membrane Technology)

กระบวนการกำจัดสีด้วยเยื่อแผ่น (Membrane) สามารถใช้ในการกำจัดสี นำเอาสารเคมีที่ใช้ในการย้อมสี และสีย้อมบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ได้ แบ่งออกเป็น 4 ประเภทดังนี้

1. ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration)

ใช้ในการกำจัดสีย้อมที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ (Colloid) ที่ถูกปล่อยออกจากหม้อย้อมหลังจากผ่านการล้าง โดยใช้กำจัดสีประเภทสีย้อมสีดิสเพอร์สที่ใช้อยู่ในเส้นใยประเภทโพลีเอสเตอร์ และสีย้อมประเภทสีย้อมสีซัลเฟอร์ สีแสด และสีย้อมสีอะซิติกที่ใช้อยู่ในเส้นใยฝ้าย และวิสคอส (Viscose) สีย้อมดิสเพอร์สเมื่อผ่านกระบวนการไมโครฟิลเตรชันแล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

2. ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis)

เหมาะสำหรับใช้กำจัดไอออนที่ย่อม และโมเลกุลของสีย้อมที่มีขนาดใหญ่ เป็นกระบวนการที่จะต้องผ่านเยื่อแผ่น 2 ชั้นตอน คือเยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำกร่อย (Brackish Water) และเยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำทะเล (Sea Water) ซึ่งเยื่อแผ่นแรกจะสามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 90 ความเข้มข้นของสีที่เหลือจะถูกส่งผ่านไปยังเยื่อแผ่นที่สอง และสามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 94 อย่างไรก็ตามสีย้อมที่ใช้ย้อมเส้นใยประเภทฝ้าย ไม่สามารถใช้กระบวนการนี้ได้

3. ไดนามิก เมมเบรน (Dynamic Membrane)

ใช้กำจัดสีย้อมที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่โดยใช้ตัวรองรับที่มีรูพรุน เช่น เหล็ก แสตนเลส วัสดุคาร์บอน หรือเซรามิก ซึ่งต่อมาได้พัฒนามาใช้ Hydrous zirconium (IV) oxide และกรดโพลีอะคริลิก (Zr/PAA) เพื่อปรับปรุงขนาดของรูพรุน กระบวนการนี้สามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 95 หรือมากกว่า

4. นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration)

ใช้กำจัดสีย้อมประเภทสีรีแอคทีฟที่ใช้อยู่เส้นใยฝ้าย เนื่องจากการย้อมสีรีแอคทีฟต้องใช้สาร อิเลคโตรไลต์ช่วยในการย้อม เช่น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ซึ่งกระบวนการนี้สามารถแยกสารพวกอิเลคโตรไลต์เหล่านี้ออกมาและนำกลับมาใช้ได้ด้วย

2.5.2.6 เทคโนโลยีใหม่ๆ (New Technology)

เทคโนโลยีใหม่ๆ มากมายที่เกิดขึ้น มีพื้นฐานตั้งอยู่บนเทคนิคต่างๆ กัน แต่มีวัตถุประสงค์เดียวกันคือเพื่อลดผลกระทบต่างๆ ให้เหลือน้อยที่สุด ตัวอย่างเช่น

1. ตัวดูดซับชนิดอนินทรีย์ ซึ่งถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น และมีการนำมาใช้กันอยู่ในโรงงาน ประสิทธิภาพในการกำจัดสีค่อนข้างดี อัตราการกำจัดเป็นไปอย่างรวดเร็ว ให้ผลการกำจัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้แม้จะมีความแปรผันของความเข้มข้นสีที่สูง หรือมีสารเจือปนก็ตาม ซึ่งต้นทุนวิธีนี้ต่ำกว่าเทคนิคอื่นๆ ที่คล้ายกัน ดังนั้นเทคนิคนี้จึงคุ้มค่าต่อการพิจารณาในอนาคตต่อไป
2. ระบบที่มีพื้นฐานของอิเลคโตรไลซิสที่อยู่ในระหว่างกำลังพัฒนา พลังงานที่ใช้จะสูงและบางครั้งคลอรีน และไฮดรอกซีเรดิคัลสามารถเกิดขึ้นได้ ซึ่งจะทำให้เกิดการตกพันธะอย่างควบคุมไม่ได้

3. ตัวดูดซับชนิดอินทรีย์หรือพืชแห้ง เช่น ผักตบชวา จะมียอดประกอบที่สำคัญคือ เซลลูโลส ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันอัลไค์แอลกอฮอล์หรือโมเลกุลของสารอินทรีย์ได้

2.6 การคัดเลือกและรายละเอียดสีย้อมที่นำมาใช้ในการทดลอง

2.6.1 การคัดเลือกสีย้อมที่นำมาใช้ในการทดลอง

ดังได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 2.2 เรื่องสีย้อม ซึ่งสีย้อมสามารถแบ่งออกได้หลายประเภททั้งตามวิธีการใช้งาน และตามสูตรโครงสร้าง ดังนั้นการที่จะทำการทดลองศึกษาถึงการกำจัดสีของน้ำเสียให้ครอบคลุมสีทุกชนิดจึงเป็นไปได้ยาก ดังนั้นการศึกษากำจัดสีย้อมโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดควอร์เทอร์นารีโครอสส์ลิงค์เซลลูโลส ซึ่งเป็นเรซินชนิดแอนไอออนนี้ จึงได้มีขั้นตอนการเลือกสีย้อมที่ใช้ในการศึกษาดังนี้

1. ทำการเลือกสีย้อมที่สามารถละลายน้ำได้ดี เนื่องจากสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำสามารถบำบัดได้ง่ายกว่า ซึ่งสีย้อมที่ละลายน้ำได้ ได้แก่ สีย้อมแอสิด สีดเรกท์ สิบเบส สิริแอคทีฟ และส้อมอร์แดนท์
2. สีย้อมที่สามารถละลายน้ำได้ แบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่ให้ประจุลบ และประจุบวก จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า กลุ่มที่ให้ประจุบวกสามารถบำบัดสีได้ดีโดยการดูดซับของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรชนิดต่างๆ แต่กลุ่มที่ให้ประจุลบ จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำกว่ามาก (ดูหัวข้อ 2.12) ดังนั้นเราจึงพิจารณาการกำจัดสีย้อมโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนประจุลบ ซึ่งคาดว่าจะสามารถแลกเปลี่ยนไอออนประจุลบได้กับสีย้อมที่มีประจุลบเช่นกัน สีย้อมประจุลบ ได้แก่ สีย้อมแอสิด สีดเรกท์ สิริแอคทีฟ และส้อมอร์แดนท์
3. เนื่องจากวัสดุที่ใช้ทำเรซินมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นจึงเลือกสีย้อมไดเรกท์ และสิริแอคทีฟ ซึ่งเป็นสีย้อมที่มีโมเลกุลใหญ่และเล็กตามลำดับ มาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เนื่องจากสีทั้งสองเป็นสีที่เหมาะสมกับเส้นใยเซลลูโลส และมีใช้กันอย่างแพร่หลาย
4. การคัดเลือกโทนสีซึ่งมีอยู่แตกต่างกันออกไป จะพิจารณาจากความนิยมของตลาดเป็นสำคัญ โดยเลือกโทนสีที่ได้รับความนิยมมาก สำหรับใช้ในการทดลอง 3 โทนสีคือ สีดำ สีน้ำเงิน และสีแดง นอกจากนี้ ความเข้มข้นของสีย้อมที่ใช้ในการทดลอง จะพิจารณาความเข้มข้นของสีย้อมในน้ำเสียจริง ซึ่งโดยทั่วไปอยู่ในช่วง 0-200 มิลลิกรัม

ต่อลิตร แตกต่างกันในแต่ละกระบวนการผลิตของแต่ละโรงงาน ดังนั้นจะทำการศึกษาความเข้มข้นของสีย้อม 4 ค่า คือ 50 100 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

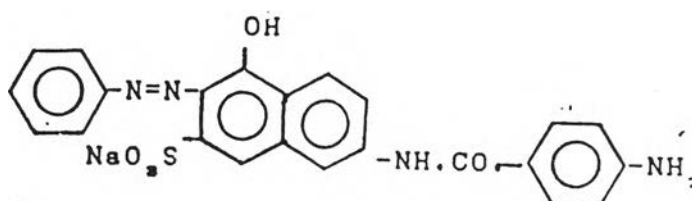
2.6.2 รายละเอียดสีย้อมที่ใช้ในการทดลอง

รายละเอียดของสีย้อมไดเรกต์และสีย้อมรีแอคทีฟ มีดังนี้

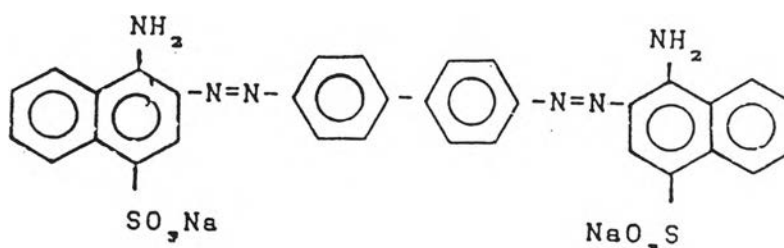
2.6.2.1 สีไดเรกต์

สีไดเรกต์ส่วนใหญ่เป็นเกลือซัลโฟเนต (Sulphonate Group) ประเภทอะโซ (Azo) ที่สามารถละลายน้ำได้ ในบรรดาสีที่ใช้ย้อมสิ่งทอ สีไดเรกต์เป็นสีกลุ่มใหญ่ที่สุด สีแต่ละตัวในกลุ่มนี้มีความคงทนต่อสภาพการใช้งานไม่เท่ากัน ซึ่งมีสมบัติเฉพาะในการซึมติดเส้นใยได้ในตัวเอง (Substantivity) จึงเหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลส เช่นฝ้าย เรยอน เป็นต้น สีไดเรกต์ที่ใช้กันอยู่มี 7 กลุ่ม แบ่งตามโครงสร้างทางเคมีได้ดังนี้

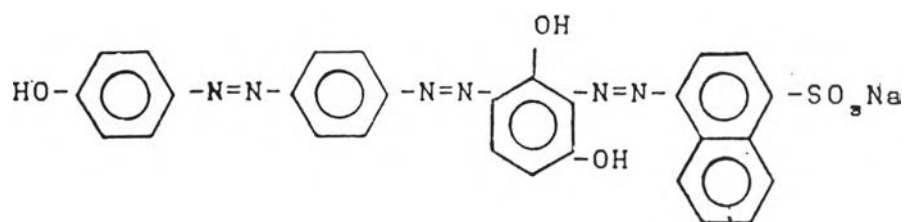
1. กลุ่มโมนาโซ (Monazo) ตัวอย่างได้แก่ Diazomine scarlet 5B (C.I. direct red 14) มีสูตรโครงสร้างดังนี้



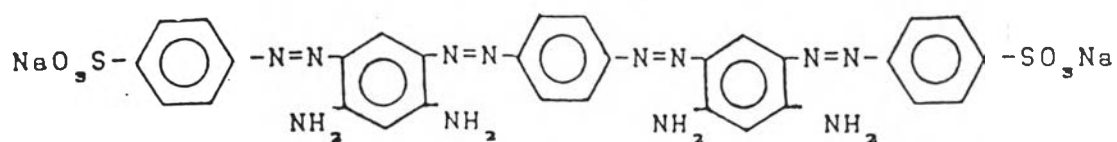
2. กลุ่มบีสอะโซ (Bisazo) ตัวอย่างได้แก่ Original congo red (C.I. direct red 28) มีสูตรโครงสร้างดังนี้



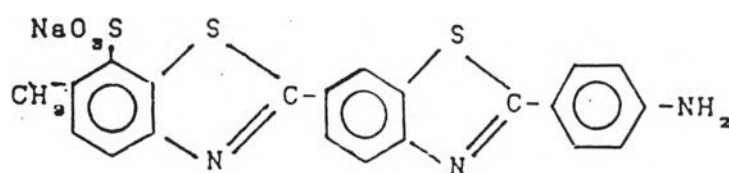
3. กลุ่มทริสอะโซ (Trisazo) ตัวอย่างได้แก่ Congo brown R (C.I. direct brown 21) มีสูตรโครงสร้างดังนี้



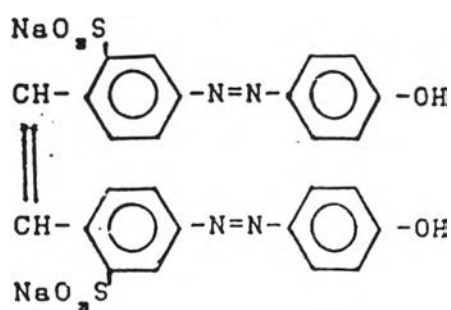
4. กลุ่มโพลีอะโซ หรือ ททระคิสอะโซ (Polyazo or Tetrakisazo) ตัวอย่างได้แก่ Chloazol brown GM (C.I. direct brown 44) มีสูตรโครงสร้างดังนี้



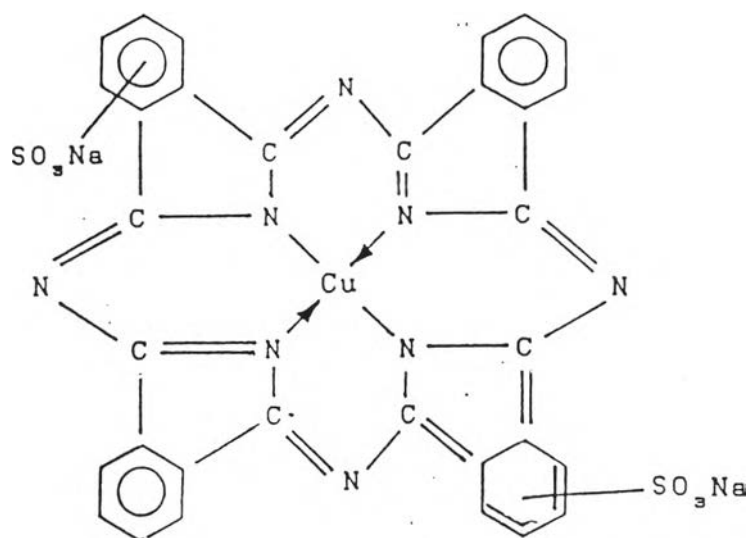
5. กลุ่มไทอะโซล (Thiazole) เป็นกลุ่มที่เตรียมได้จากพริมูลิน (Primuline) มีสูตรโครงสร้างทั่วไปดังนี้



6. กลุ่มที่ได้จากสทิลบีเน (Stilbene) ตัวอย่างเช่น Diphenyl chrysoine G (C.I. direct yellow 19) มีสูตรโครงสร้างทั่วไปดังนี้



7. กลุ่มฟาทาไลไซยานีน (Phthalocyanine) ตัวอย่างเช่น Durazon blue 8G (C.I. direct blue 8G) มีสูตรโครงสร้างทั่วไปดังนี้



การย้อมสีไคโรเรทท์กับผ้าใยเซลลูโลส เป็นการดูดติดทางกายภาพ เพราะโครงสร้างของเซลลูโลสไม่มีกลุ่มเคมีตอนปลายที่จะรวมตัวกับเกลือในโครงสร้างของตัวสีได้ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างโมเลกุลสีกับการดูดติดเส้นใยนั้นพอสรุปได้ดังนี้

1. สีย้อมจะต้องมีโครงสร้างโมเลกุลที่มีลักษณะเป็นแนวตรงและอยู่ในระนาบเดียวกัน
2. โมเลกุลสีต้องมีหมู่เคมีที่จะก่อให้เกิดพันธะไฮโดรเจนได้
3. ควรมีจำนวนหมู่เคมีที่ช่วยทำให้ตัวสีละลายได้พอเหมาะ
4. หมู่เคมีที่จะทำให้ตัวสีละลายได้นั้น จับอยู่ที่โครงสร้างของตัวสีด้านหนึ่ง และอีกด้านหนึ่งเป็นหมู่เคมีที่จะทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจน
5. ระยะของหมู่เคมีที่จะก่อให้เกิดพันธะไฮโดรเจน ควรอยู่ใกล้กับเซลลูโลสมากที่สุด
6. การรวมตัวกันโดยพันธะคู่ จะช่วยเสริมให้โมเลกุลเข้ามาเรียงตัวในแนวเดียวกันได้มากขึ้น และยังอาจทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นที่บริเวณตอนปลายของสายโมเลกุลที่รวมตัวกันนี้ได้ด้วย

จากหลักการนี้ การย้อมสีไคโรเรทท์สามารถอธิบายขั้นตอนการย้อมได้ 3 ขั้นตอนคือ

1. สีจะถูกดูดซึมติดที่ผิวของเส้นใย
2. สีจะถูกดูดซึมเข้าไป แล้วกระจายสู่ใจกลางของเส้นใย
3. สีจะถูกดูดยึดติดที่จุดที่ให้สีติดในเส้นใยได้

สีย้อมโดเรทที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วยสี Best Direct Black B, สี Sirius Blue KCFN และสี Sirius Rubine KZBL ซึ่งสูตรโครงสร้างของสีทั้ง 3 ไม่สามารถทราบได้ เนื่องจากเป็นสูตรเฉพาะของทางบริษัท ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สีดังกล่าว ซึ่งทางบริษัทไม่สามารถเปิดเผยได้

2.6.2.2 สีรีแอคทีฟ

สีรีแอคทีฟเป็นสีย้อมที่ละลายน้ำได้ดี สามารถย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด โดยมีคุณสมบัติเป็นแอนไอออนเมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่เป็นด่าง โมเลกุลของสีจะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลไอออนในเซลลูโลส และเชื่อมโยงติดกันโดยพันธะเคมีโควาเลนต์ กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส ทำให้เป็นสีที่มีความคงทนต่อการซักฟอกและการขัดถู

โครงสร้างทางเคมีของสีรีแอคทีฟ ประกอบด้วยกลุ่มพื้นฐาน 4 กลุ่ม (Shore, 1995) คือ

S - D - T - X

โดย S คือกลุ่มที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูง โดยทั่วไปจะเป็นพวกซัลโฟนิค (-SO₂Na) ซึ่งจะอยู่ติดกับกลุ่มโครโมฟอร์

D คือกลุ่มของเคมีที่ทำให้เกิดสี เรียกว่ากลุ่มโครโมฟอร์ (Chromophore)

T คือกลุ่มอะตอมที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างกลุ่มรีแอคทีฟ กับกลุ่มโครโมฟอร์ (Bridging Group) เช่น กลุ่ม -NH-, -NHCO-, -SO₂-, -NHSO₂- และ -NCH₃ เป็นต้น

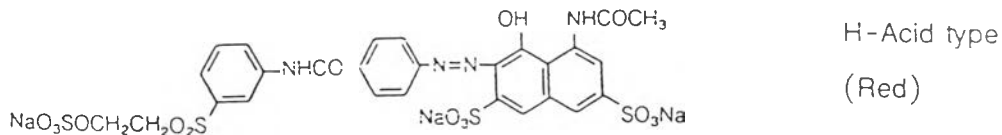
X คือกลุ่มรีแอคทีฟ ซึ่งเป็นกลุ่มที่ทำให้สีทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลในเส้นใย

บางกรณีกลุ่มรีแอคทีฟจะติดกับกลุ่มโครโมฟอร์โดยตรง ไม่ต้องมีตัวเชื่อม และกลุ่มรีแอคทีฟ ส่วนใหญ่จะเป็นสาร Heterocyclic Ring ลักษณะของกลุ่มตัวเชื่อมและส่วนประกอบของ Heterocyclic Ring มีอิทธิพลอย่างมากต่อความสามารถในการทำปฏิกิริยา และคุณสมบัติอื่นๆ ของสี จากส่วนประกอบดังที่กล่าวมานี้ จะพบว่าปัจจัยสำคัญที่ทำให้สีแต่ละชนิดแตกต่างกันไปก็คือ กลุ่มอะตอมที่ทำให้เกิดสี และกลุ่มรีแอคทีฟ

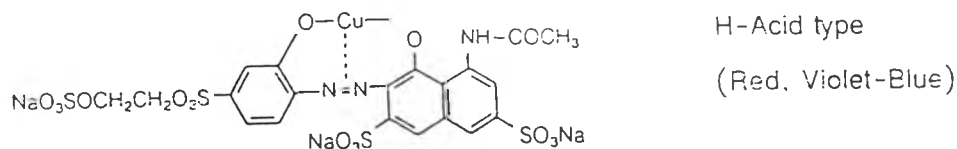
กลุ่มอะตอมที่ทำให้เกิดสี (Chromophore)

กลุ่มอะตอมที่ทำให้เกิดสีส่วนใหญ่พัฒนามาจากสีแอลิต โดยแบ่งตามโครงสร้างได้เป็นหลายกลุ่มดังนี้

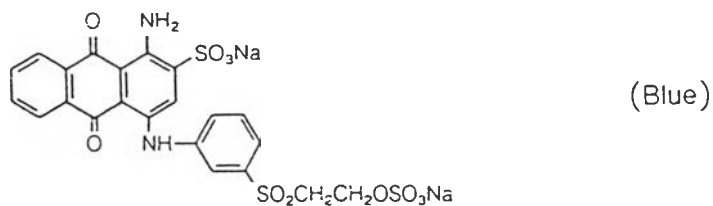
1. กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Unmetallised Azo เป็นหลัก ซึ่งสีรีเอคทีฟส่วนใหญ่จะมีสารที่ทำให้เกิดสีชนิดนี้อยู่ ตัวอย่างเช่น



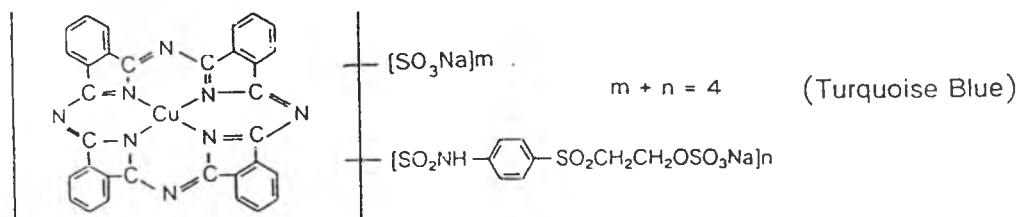
2. กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Metal-Complex Azo เป็นหลัก ตัวอย่างเช่น



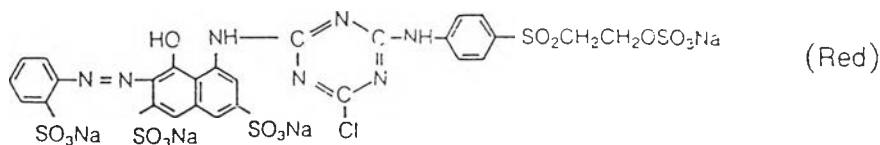
3. กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Anthraquinone เป็นหลัก ตัวอย่างเช่น



4. กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Phthalocyanine เป็นหลัก ตัวอย่างเช่น



5. กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Azo เป็นหลัก ในสีที่มีกลุ่มรีแอคทีฟแบบ Bifunctional ตัวอย่างเช่น



จะเห็นได้ว่า กลุ่มสารที่ทำให้เกิดสีในสีย้อมรีแอคทีฟนั้น ต่างก็มีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้งานที่แตกต่างกัน โดยองค์ประกอบของกลุ่มโครโมฟอร์ในสีย้อมรีแอคทีฟนั้น แสดงไว้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 เปอร์เซนต์การกระจายของลักษณะโครงสร้างของกลุ่มโครโมฟอร์ในสีย้อมรีแอคทีฟแบ่งตามโทนสีต่างๆ (Shore, 1990)

Chemical Class	ร้อยละการกระจายของโทนสี								ร้อยละของสีย้อมรีแอคทีฟทั้งหมด
	เหลือง	ส้ม	แดง	ม่วง	ฟ้า	เขียว	น้ำตาล	ดำ	
Unmetallised Azo	97	90	90	63	20	16	57	42	66
Metal-Complex Azo	2	10	9	32	17	5	43	55	15
Anthraquinone				5	34	37		3	10
Phthalocyanine					27	42			8
Miscellaneous	1		1		2				1
รวม	100	100	100	100	100	100	100	100	100

จากตารางข้างต้นจะเห็นได้ว่า สีย้อมรีแอคทีฟส่วนใหญ่จะประกอบด้วยกลุ่มโครโมฟอร์ชนิดอะโซ (Unmetallised Azo และ Metal-Complex Azo) โดยถ้าไม่รวมสีย้อมรีแอคทีฟที่มีโทนสีฟ้าและเขียวแล้ว จะพบว่า สีย้อมรีแอคทีฟจะมีกลุ่มอะโซเป็นองค์ประกอบอยู่สูงถึงร้อยละ 95 ดังนั้นในการบำบัดน้ำเสียสีย้อม ถ้าสามารถทำลายพันธะอะโซในกลุ่มโครโมฟอร์ได้ ก็จะสามารถลดสีในน้ำเสียลงได้

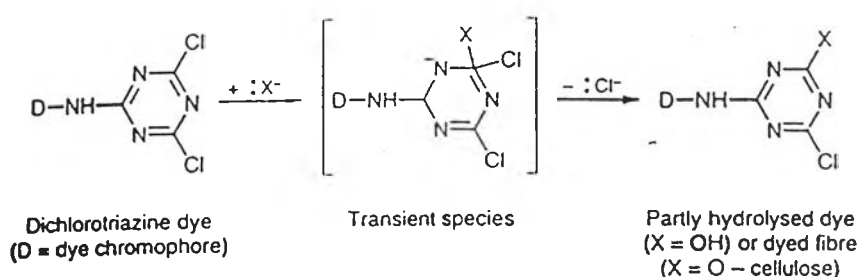
กลุ่มรีแอคทีฟ (Reactive Group)

กลุ่มรีแอคทีฟเป็นกลุ่มอะตอมที่มีหน้าที่ทำปฏิกิริยากับเส้นใย และทำให้สีสามารถติดกับเส้นใยได้ สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่ม Monofunction คือสีที่มีกลุ่มรีแอคทีฟเพียงกลุ่มเดียวในโมเลกุลของสีย้อม และกลุ่ม Bifunction คือสีที่มีกลุ่มรีแอคทีฟอยู่ 2 กลุ่มในโมเลกุลของสี

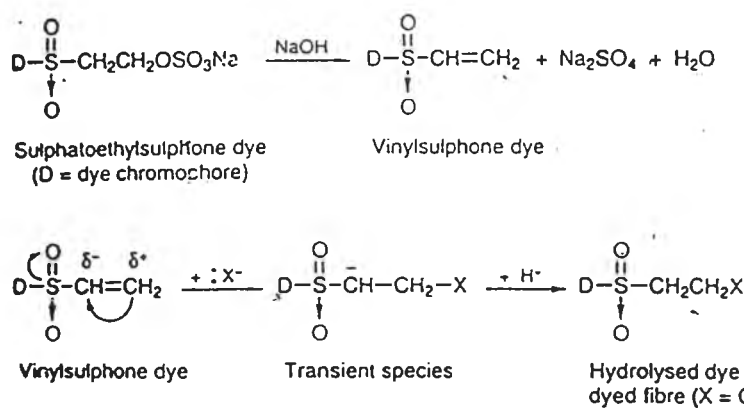
ย้อม ซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดติดกับเส้นใยสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะมีกลุ่มมีแอกทีฟ ที่สามารถสร้างพันธะกับ เส้นใยได้เป็น 2 เท่าของกลุ่มแรก และเมื่อก่อนหนึ่งทำปฏิกิริยากับเส้นใยแล้ว อีกกลุ่มหนึ่งก็ยังสามารถในการสร้างพันธะกับเส้นใยได้อยู่

ปฏิกิริยาการสร้างพันธะระหว่างกลุ่มมีแอกทีฟของสีกับเส้นใยสามารถแบ่งได้ 2 แบบดังนี้

- ไฮดรอกไซด์ไอออนหรือเส้นใย เข้าแทนที่อะตอมพวงฮาโลเจน (Halogen) ในโมเลกุลสี (Nucleophilic Substitution) เกิดเป็นพันธะระหว่างสีกับเส้นใยขึ้น ลักษณะของปฏิกิริยาแสดงได้ดังนี้



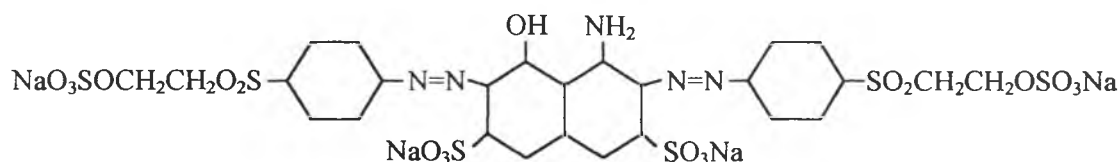
- ไฮดรอกไซด์ไอออนหรือเส้นใย สร้างพันธะกับโมเลกุลของสีโดยการสลายพันธะคู่ของคาร์บอนอะตอม 2 อะตอม ในกลุ่มไวนิลซัลโฟน (Vinylsulphone) แล้วเชื่อมตัวมันเข้าไปกับคาร์บอนตัวท้ายของกลุ่มดังกล่าว (Nucleophilic Addition) ลักษณะของปฏิกิริยาแสดงได้ดังนี้



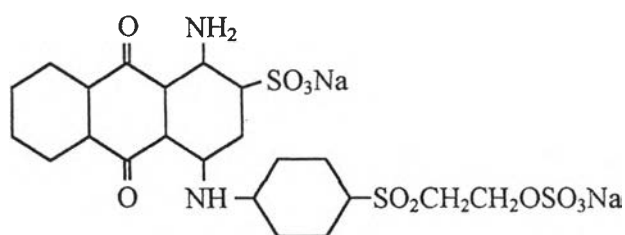
การสร้างพันธะกับโมเลกุลของสี สามารถเกิดได้ทั้งกับเส้นใยหรือไฮดรอกไซด์ไอออน แต่ความสามารถในการสร้างพันธะกับเส้นใยจะมีมากกว่าการสร้างพันธะกับไฮดรอกไซด์ไอออนที่สร้างพันธะกับไฮดรอกไซด์ไอออน เรียกว่าสีที่ไฮโดรไลซ์แล้ว ไม่สามารถสร้างพันธะติดกับเส้นใยได้ อีก จึงหลงเหลือไปกับน้ำย้อมและน้ำล้างได้เป็นบางส่วน

สีย้อมรีแอคทีฟที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่สี Remazol Black B, สี Remazol Brilliant Blue R และสี Remazol Brilliant Red 3BS โดยทราบสูตรโครงสร้างสี 2 สี ได้แก่

- สี Remazol Black B (20505 C.I. Reactive Black 5) เป็นสีย้อมที่มีกลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Unmetallised Azo เป็นหลัก



- สี Remazol Brilliant Blue R (61200 C.I. Reactive Blue 19) เป็นสีย้อมที่มีกลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Anthraquinone เป็นหลัก



2.7 กรรมวิธีการผลิตสุรา

ในการผลิตสุรานั้น จะต้องใช้วัตถุดิบจากน้ำตาล (Molasses) และข้าวเหนียว โดยนำมาหมักในถังหมักในอัตราความเข้มข้นที่เหมาะสม พร้อมกับใส่เชื้อยีสต์ หรือเชื้อหมักและสารเคมีที่จำเป็น เช่นแอมโมเนีย ฟอสเฟต จากนั้นเมื่อหมักได้นาน 48 ชั่วโมงแล้ว เชื้อยีสต์ก็จะเปลี่ยนจากน้ำตาลให้เป็นแอลกอฮอล์ (เอทิลแอลกอฮอล์) ส่วนผสมในถังหมักเมื่อได้แอลกอฮอล์แล้วรวมเรียกว่า เบียร์หรือแมช (Beer or Mash) การแยกเอาแอลกอฮอล์ออกจากของเหลวรวม ทำได้โดยวิธีการกลั่น เพราะจุดเดือดของแอลกอฮอล์อยู่ที่อุณหภูมิราว 78.5 องศาเซลเซียส แต่ของเหลวอื่นหรือน้ำจะมีจุดเดือดที่ 100 องศาเซลเซียส โดยใช้ไอน้ำให้ความร้อนแก่เบียร์แยกเอาแอลกอฮอล์ออกมา ในการกลั่นครั้งแรก จะได้น้ำผสมแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ร้อยละ 50

จากนั้นก็นำแอลกอฮอล์ส่วนนี้มาเจือจางราวร้อยละ 28 จะได้สุราขาว จากนั้นก็จะบรรจุขวดเพื่อจำหน่ายต่อไป

ในการทำสุราสีหรือสุราผสม ทำได้โดยใช้แอลกอฮอล์เข้มข้นร้อยละ 50 นี้ นำไปกลั่นต่อในขั้นที่สอง เพื่อให้ได้แอลกอฮอล์เข้มข้นและบริสุทธิ์ร้อยละ 95 จากนั้นก็นำไปเก็บไว้เพื่อรอเจือจางด้วยน้ำโดยให้มีแอลกอฮอล์เข้มข้นราวร้อยละ 35 หรือ 35 องศาแล้วเติมสี ยาสมุนไพรหรือส่วนผสมอื่นๆ ที่ทำให้เกิดกลิ่นหอม และรสชาติดี แล้วนำไปบรรจุเพื่อจำหน่ายต่อไป (สิวลี, 2541)

2.8 ลักษณะน้ำทิ้งจากโรงงานสุรา

น้ำเสียจากโรงงานสุรา แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. น้ำเสียประเภทเจือจาง ได้แก่ น้ำล้างขวด น้ำที่มีอุณหภูมิสูง น้ำล้างพื้น
2. น้ำเสียประเภทเข้มข้น ได้แก่ น้ำกากสา น้ำเสียที่มีอุณหภูมิสูง ได้แก่ น้ำจากการพ่นเข้า (Blow Down) เครื่องกำเนิดไอน้ำ และน้ำที่ใช้สำหรับหล่อเย็นในหม้อสำหรับทำให้น้ำกลายเป็นไอ (Condenser) ของเครื่องกลั่นสุรา

น้ำกากสาเป็นน้ำเสียส่วนใหญ่ของโรงงาน ซึ่งได้มาจากเครื่องกลั่นสุรา ลักษณะของน้ำกากสาจะอยู่ในรูปของเหลวสีน้ำตาล โดยมีสารอาหารสำหรับพืชในปริมาณพอสมควรที่จะนำไปเป็นปุ๋ยหรืออาหารได้ น้ำกากสาที่ใช้ในการทดลองได้ใช้น้ำเสียจากโรงงานสุราแห่งหนึ่ง ซึ่งเป็นน้ำกากสาที่ผ่านระบบบำบัดแล้ว มีคุณสมบัติแสดงดังตารางที่ 2.5

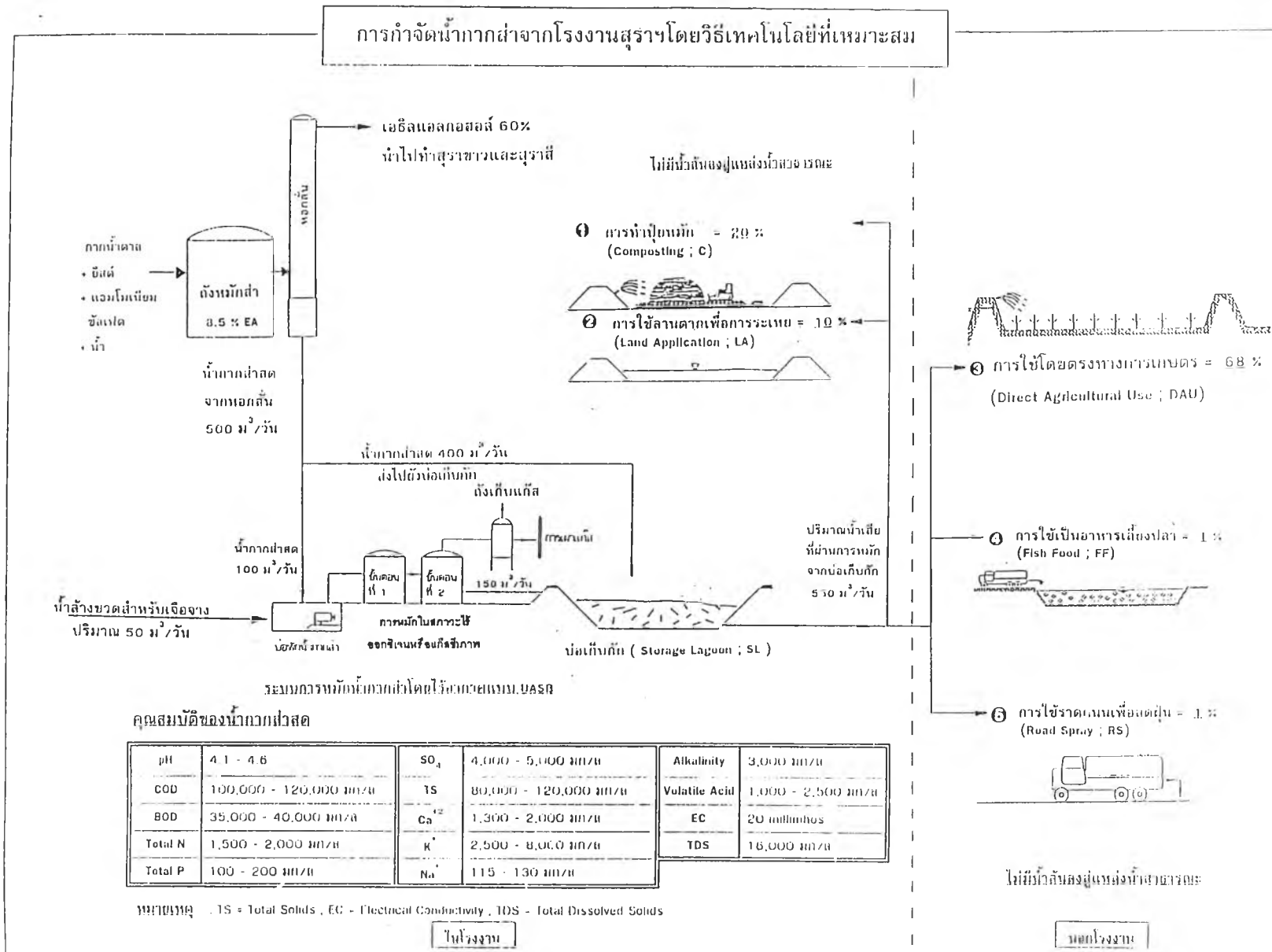
สีน้ำตาลเข้มในน้ำกากสานั้น เกิดจากสองสาเหตุด้วยกัน คือ เกิดจากสีของคชาเมลจากน้ำตาลชนิดต่างๆ ที่มีเหลือในกากน้ำตาลที่ยีสต์ไม่ใช้ในการหมักแอลกอฮอล์ เป็นสารที่ไม่มีธาตุไนโตรเจน และเกิดจากสารเมลานอยดิน ซึ่งเป็นสารที่มีธาตุไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ เกิดจากการรวมตัวระหว่างน้ำตาลชนิดต่างๆ กับกรดอะมิโนชนิดต่างๆ ภายใต้อุณหภูมิสูง โดยผ่านกระบวนการปฏิกิริยา บราวนิง (Browning Reaction) ซึ่งมีสีเหลืองถึงน้ำตาลเข้ม และมีผลทำให้น้ำกากน้ำตาลและน้ำกากสามีสีน้ำตาลเข้มด้วย สารนี้เป็นสารที่ถูกย่อยสลายได้ยาก จึงเป็นปัญหาในการกำจัดก่อนที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ (สุจินต์, 2527)

ตารางที่ 2.5 แสดงคุณสมบัติของน้ำกากส่าที่ผ่านระบบบำบัดแล้วที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ปริมาณ	หน่วย
พีเอช	8.35	-
ซีไอดี	36,247	มก./ล.
บีไอดี	4,000	มก./ล.
ค่าความเป็นด่าง (ในเทอมของหินปูน)	10,600	มก./ล.
ปริมาณของแข็งทั้งหมด	44,840	มก./ล.
ปริมาณของแข็งแขวนลอย	3,725	มก./ล.
ปริมาณกรดไขมันระเหยได้ (ในเทอมของกรดอะซิติก)	535	มก./ล.
ฟอสเฟต	0.0144	มก./ล.
ซัลเฟต	341	มก./ล.
ไนโตรเจนทั้งหมด	1,795	มก./ล.
โปแตสเซียม	9,000	มก./ล.
แคลเซียม	3,125	มก./ล.
โซเดียม	41	มก./ล.
ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด	24,690	มก./ล.

2.9 การจัดการน้ำทิ้งจากโรงงานสุรา

จากตารางที่ 2.5 จะเห็นได้ว่า น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียแล้ว ยังคงมีหลายพารามิเตอร์เกินค่ามาตรฐานอยู่ แต่เนื่องจากน้ำกากส่าดังกล่าวมีสารอาหารที่พืชต้องการ ไม่ว่าจะเป็นไนโตรเจน ฟอสฟอรัส หรือโปแตสเซียม ดังนั้น น้ำกากส่าจึงสามารถนำมาใช้ทดแทนปุ๋ยเคมีได้ โดยที่เกษตรกรซึ่งอยู่ใกล้โรงงาน ไม่ต้องลงทุนซื้อสารเคมี เพียงแต่ใช้น้ำกากส่าในอัตราส่วนที่เหมาะสมกับพืช ก็จะทำให้เกษตรกรได้ผลผลิตไม่ต่ำกว่าเดิม แต่สามารถลดต้นทุนลงได้ การใช้น้ำกากส่าเพื่อการเกษตรนี้ ได้มีการดำเนินการอย่างต่อเนื่องมากกว่า 20 ปีแล้ว ซึ่งการกำจัดน้ำกากส่าโดยวิธีเทคโนโลยีที่เหมาะสม ประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การกำจัดน้ำกากส่าจากโรงงานสุราโดยวิธีเทคโนโลยีที่เหมาะสม

2.10 กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน

2.10.1 ทฤษฎีการแลกเปลี่ยนไอออน

การแลกเปลี่ยนไอออน เป็นปรากฏการณ์ชนิดหนึ่งที่มีการสลับเปลี่ยนไอออนกลับไปกลับมา (Reversible Interchange) ระหว่างตัวกลาง 2 ชนิด คือตัวกลางของเหลว และตัวกลางของแข็ง โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านโครงสร้างของตัวกลางของแข็ง

หน้าที่ของกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน มี 2 ประการซึ่งเกิดขึ้นต่อเนื่องกัน คือ

1. การกำจัดไอออนต่างๆ ออกจากน้ำ เช่น แคลเซียมไอออน แมกนีเซียมไอออน ซัลเฟต และคลอไรด์ เป็นต้น นอกจากนี้ ในบางครั้งเรซินอาจใช้กำจัดโลหะพิษต่างๆ ออกจากน้ำได้ด้วย แต่ทั้งนี้ต้องใช้เรซินที่สังเคราะห์เป็นพิเศษ
2. ทำให้ไอออนต่างๆ มีความเข้มข้นสูงมากๆ คือ ไอออนที่ถูกกำจัดออกจากสารละลาย จะหลุดออกมากับสารละลายรีเจนเนอเรนต์ในระหว่างการทำรีเจนเนอเรชัน เนื่องจากปริมาตรของสารละลายรีเจนเนอเรนต์ต่ำกว่าปริมาตรสารละลายซึ่งเป็นที่อยู่เดิมของไอออน ความเข้มข้นใหม่ของไอออนจึงสูงกว่าเดิม ดังนั้นจึงเป็นการทำให้ไอออนซึ่งเดิมเจือจางมาก มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นหลายๆ เท่า

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนใช้มากที่สุดในการแก้ความกระด้างของน้ำ และในการทำให้น้ำบริสุทธิ์ปราศจากแร่ธาตุ (Demineralization) เพื่อใช้ในการทำไอน้ำและในงานอุตสาหกรรมบางชนิด สำหรับในการกำจัดน้ำทิ้งนั้น กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนใช้กันมากในการกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ และการกำจัดแอมโมเนีย

2.10.2 การทำงานของระบบแลกเปลี่ยนไอออน

ระบบการแลกเปลี่ยนไอออนสามารถแบ่งการทำงานได้ 3 วิธี คือ

1. การทำงานแบบแบตช์ (Batch Operation)

เป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนที่ง่ายที่สุด น้ำทิ้งจะกวนผสมกับเรซินในถังปฏิกรณ์ จากนั้นจึงแยกเรซินโดยการกรองหรือตกตะกอน ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของวิธีนี้ ขึ้นอยู่กับค่าคงที่สมดุลย์ (Equilibrium Constant) ของระบบการแลกเปลี่ยนไอออน

2. การทำงานแบบคอลัมน์ (Column Process)

ใช้ในการศึกษาในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาหาความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนและสภาวะที่เหมาะสม ขนาดคอลัมน์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ มีอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกับความสูงอยู่ในช่วง 1:10-1:20

3. การทำงานแบบต่อเนื่อง (Continuous Process)

คือการทำงานแบบคอลัมน์ซึ่งมีเรซินบรรจุอยู่ในถังและปล่อยน้ำทิ้งไหลผ่านชั้นเรซินอย่างต่อเนื่อง ทำให้การแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นตลอดเวลา เมื่อใช้งานไปนานๆ เรซินจะหมดประสิทธิภาพ (Exhausted Resin) จะต้องฟื้นฟูประสิทธิภาพโดยใช้สารละลายกรดหรือด่างแล้วแต่ชนิดเรซิน

2.10.3 โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

โครงสร้างของเรซินมีความสำคัญต่อการกำหนดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน เรซินจะมีโครงสร้างคล้ายตาข่ายสามมิติ โดยมีกลุ่มไอออนที่มีประจุอยู่ตามตำแหน่งต่างๆ บนตาข่ายเรียกว่า เมตริก ส่วนหมู่ไอออนที่มีประจุไฟฟ้าที่อยู่บนตำแหน่งต่างๆ ของตาข่ายเรียกว่าหมู่ไอออน (Functional Group) ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมต่างๆ ของเรซิน โครงร่างของเรซินเป็นส่วนที่ทำให้มันมีรูปร่างเป็นอย่างไรที่ปรากฏ และมีรูปร่างอยู่ได้โดยไม่ละลายน้ำ และไม่แตกหักโดยง่าย โครงร่างนี้สร้างขึ้นจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำนวนมากและชนิดเดียวกัน ซึ่งต่อกันเป็นสายยาว และมีไฮโดรคาร์บอนอีกชนิดหนึ่งทำหน้าที่ประสาน เพื่อให้เกิดเป็นรูปลามมิติที่มีความโปร่งหรือความพรุน

หมู่ไอออนของเรซิน เป็นตัวกำหนดพฤติกรรมต่างๆ ของเรซิน เช่น ความสามารถหรืออำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นต้น ถ้าโครงสร้างเมตริกมีประจุลบประจำตัว หมู่ไอออนจะมีประจุบวก เรียกว่าเป็น Cation Exchanger คือเป็นสารแลกเปลี่ยนประจุบวก ถ้าโครงสร้างเมตริกมีประจุบวกประจำตัว หมู่ไอออนจะมีประจุลบ คือเป็นสารแลกเปลี่ยนประจุลบ เรียกว่า Anion Exchanger

2.10.4 สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน (Cellulose Ion Exchanger)

สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน มีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนเหมือนกับเรซินสังเคราะห์ แต่จะมีคุณสมบัติบางประการที่แตกต่างกัน เช่น โครงร่างตาข่ายของเซลลูโลส จะเป็นไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) แต่โครงร่างตาข่ายของเรซินสังเคราะห์เป็นไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) เนื่องจากเซลลูโลสมีคุณสมบัติเป็นไฟเบอร์ การยึดเกาะกันของโครงตาข่ายจะยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน โดยมีหมู่ไอออนอยู่ตามตำแหน่งต่างๆ บนโครงร่างตาข่าย ดังนั้นไอออนที่มีขนาดใหญ่ซึ่งไม่สามารถผ่านเรซินแบบสังเคราะห์ได้ จะสามารถผ่านสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบนสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน

จากลักษณะโครงสร้างของเซลลูโลส พบว่าโมเลกุลของเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซีที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 2 3 และ 6 ซึ่งเป็นส่วนที่จะเกิดการทำปฏิกิริยามากที่สุด สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนมีขนาดประมาณ 15-20 ไมครอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ โครงร่างของเซลลูโลสและองค์ประกอบอื่นๆ แต่จะไม่มีผลต่อคุณสมบัติของสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน การปรับปรุงลักษณะโครงสร้างและหมู่ไอออนในเซลลูโลส สามารถทำได้โดยใช้กระบวนการทางเคมี ซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานและความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนให้สูงขึ้น

2.11 สมดุลย์และไอโซเทอมของการดูดซับ

(Equilibrium Adsorption and Adsorption Isotherms)

การดูดซับ เกิดจากตัวถูกละลายเคลื่อนที่ออกจากสารละลาย และก่อให้เกิดความเข้มข้นเพิ่มขึ้นที่ผิวหน้าของของแข็ง ในเวลานั้นจะเป็นสภาวะสมดุลย์พลศาสตร์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลาย กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของของแข็ง ที่สภาวะสมดุลย์ของตัวดูดซับ จะมีค่าเป็นร้อยละโดยน้ำหนักหรือปริมาตรของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับไว้บนตัวดูดซับหนึ่งหน่วยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิศูนย์องศาเซลเซียส ความดัน 760 มิลลิเมตรปรอท ซึ่งอาจแสดงได้ด้วยการสร้างกราฟระหว่างความเข้มข้น หรือปริมาณ หรือปริมาตรของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับไว้เทียบกับความดันย่อย หรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับนั้นที่อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า กราฟการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ (Adsorption Isotherms) ซึ่งเป็นแบบที่นิยมกันมากที่สุด

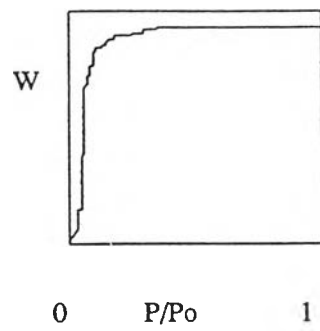
กราฟการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่นี้ อธิบายถึงการกระจายตัวของตัวถูกละลายระหว่างเฟสของของเหลวและของแข็ง อัตราการกระจายตัวนี้สามารถวัดได้ที่จุดสมดุล และจะเป็นฟังก์ชันกับความเข้มข้นของตัวทำละลาย คุณสมบัติของตัวถูกละลาย หรือความเข้มข้นและสมบัติของตัวถูกละลาย เมื่อวิเคราะห์แนวโน้มของข้อมูลดังแสดงในรูปความสัมพันธ์ของจำนวนตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของของแข็ง กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล การแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของการดูดซับ เมื่อความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเปลี่ยนไปที่อุณหภูมิคงที่นี้ โดยทั่วไปจำนวนของสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารที่ถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้น แต่อาจจะไม่แปรผันเป็นเส้นตรง

2.11.1 รูปแบบของไอโซเทอมของการดูดซับ (Cheremisinoff และ Ellerbusch, 1978)

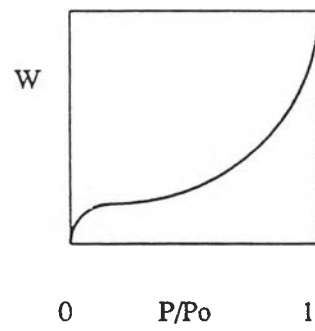
รูปแบบของไอโซเทอมของการดูดซับ มี 5 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.8

ไอโซเทอมแบบที่ 1 (รูปที่ 2.8a) พบมากที่สุด เป็นการดูดซับโดยที่มีชั้นของตัวถูกละลายคลุมบนผิวของตัวดูดซับได้หนาเพียงหนึ่งโมเลกุล (Single Layer Adsorption) พบทั้งในการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางฟิสิกส์ จะเป็นปรากฏการณ์การดูดซับของวัสดุที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Microporous Powders) ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (Relative Pressure) ต่ำๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูงๆ เข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งถ้ามีการดูดซับแบบนี้แสดงว่าผลิตภัณฑ์มีรูพรุนขนาดเล็ก และมีปริมาณมากเมื่อเทียบกับพื้นผิวภายนอกของผลิตภัณฑ์

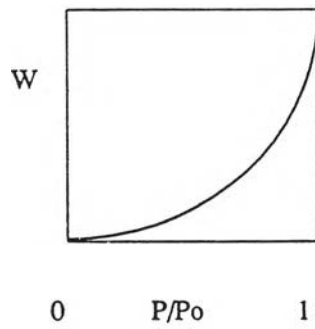
ไอโซเทอมแบบที่ 2 (รูปที่ 2.8b) พบมากในปรากฏการณ์การดูดซับที่มีชั้นของตัวถูกละลายคลุมผิวของตัวดูดซับหนาขึ้นเรื่อยๆ (ปริมาณที่ถูกดูดซับเข้าสู่ค่าอินฟินิต) โดยจะเกิดบนวัสดุที่ไม่มีรูพรุน (Nonporous Powder) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุนกว้างกว่ารูพรุนขนาดเล็ก (1.5 นาโนเมตร) ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (Inflection Point or Knee of Isotherm) เกิดขึ้น เมื่อการดูดซับบนพื้นผิวชั้นแรกเกิดเกือบสมบูรณ์แล้ว (เป็น Monolayer เกือบสมบูรณ์) และถ้าเพิ่มความดันสัมพัทธ์ จะทำให้การดูดซับเกิดมากกว่า 1 ชั้น ดังนั้นการดูดซับแบบนี้ จะเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer)



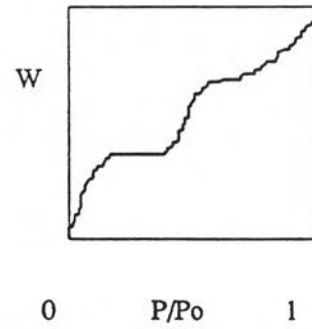
(a)



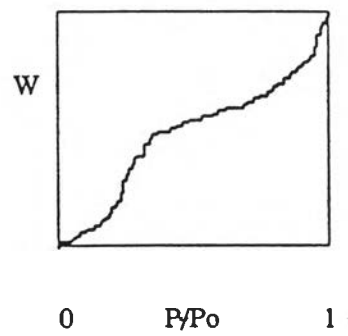
(b)



(c)



(d)



(e)

รูปที่ 2.8 รูปแบบไอโซเทอมของการดูดซับ : W = ปริมาณการดูดซับ; P/P_0 = ความดันสัมพัทธ์ (Cheremisinoff และ Ellerburch, 1978)

ไอโซเทอมแบบที่ 3 (รูปที่ 2.8c) การดูดซับคล้ายแบบที่ 2 แต่การดูดซับของชั้นแรกนั้นให้ความร้อนออกมาน้อยกว่าความร้อนของการควบแน่น เป็นลักษณะเฉพาะของการเกิดความร้อนของการดูดซับ (Heat of Adsorption) มีน้อยกว่าความร้อนของการจับตัวกันของตัวถูกดูดซับที่เป็นของเหลว (The Adsorbate Heat of Liquefaction) ดังนั้นการดูดซับที่เพิ่มขึ้นเกิดเพราะตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยากับชั้นของตัวถูกดูดซับมากกว่าเกิดปฏิกิริยากับผิวของตัวดูดซับ

ไอโซเทอมแบบที่ 4 (รูปที่ 2.8d) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดบนตัวดูดซับ มีรัศมีรูพรุนประมาณ 15-1000 อังสตรอม การดูดซับคล้ายแบบที่ 2 สำหรับความหนาของชั้นโมเลกุลชั้นแรกๆ แต่การดูดซับจะถึงจุดอิ่มตัวเนื่องจากรูพรุนแคปิลารีภายในตัวดูดซับเต็มหมดแล้ว ความชันที่เพิ่มขึ้นเมื่อความดันสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าตัวถูกดูดซับถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนได้มากขึ้น ปรากฏการณ์ที่มีจุดเปลี่ยนกราฟนี้เกิดเช่นเดียวกับในแบบที่ 2 คือเกือบเป็นแบบผิวชั้นเดียว (Monolayer) สมบูรณ์

ไอโซเทอมแบบที่ 5 (รูปที่ 2.8e) การดูดซับคล้ายแบบที่ 3 ในช่วงความเข้มข้นต่ำ แต่เมื่อการดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะเข้าสู่ค่าสูงสุดค่าหนึ่งเช่นเดียวกับแบบที่ 4 เป็นปรากฏการณ์การดูดซับที่เป็นผลมาจากแรงดึงดูดของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับมีค่าน้อยๆ โดยขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วงประมาณ 15-1000 อังสตรอม

2.11.2 สมการที่ใช้อธิบายไอโซเทอมการดูดซับ

สมการที่นิยมใช้อธิบายไอโซเทอมของการดูดซับ (ชลธา และคณะ, 2538) ได้แก่

1. ไอโซเทอมการดูดซับแบบ BET (Brunauer, Emmett and Teller Adsorption Isotherm, BET)

แสดงได้ดังรูปที่ 2.9 โดยค่า C จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ Cs ซึ่งมีสมการดังนี้

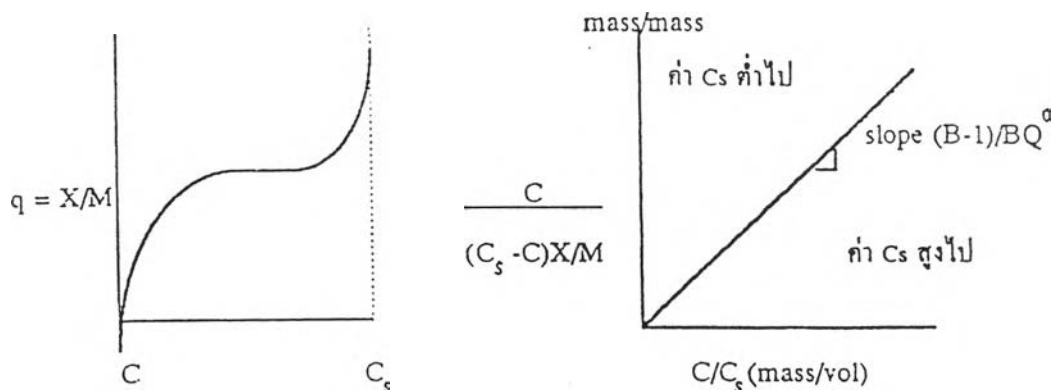
$$q = X/M = BCQ^0 / [(Cs-C)*(B-1)*C/Cs]$$

หรือ $C/Cs = [BQ^0/(B-1)] * [CM/X(Cs-C)]$

เมื่อ	X/M	คือ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ(มก./กรัม)
	B	คือ ค่าคงที่ ขึ้นกับพลังงานของ adsorbent-adsorbate interaction
	C	คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลาย

- Q° คือ น้ำหนักของตัวดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่เรียงตัวแบบผิวชั้นเดียว
- Cs คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่อิ่มตัว

เมื่อวาดกราฟระหว่าง $[CM/X(C_s-C)]$ กับ C/C_s จะได้รูปที่ 2.10 ซึ่งสามารถคำนวณหา ค่าคงที่ B และ Q° ได้ แต่อย่างไรก็ตาม จากรูปที่ 2.9 จะต้องประมาณค่า Cs เพื่อนำมาคำนวณ และเขียนกราฟในรูปที่ 2.10 ก่อน ถ้าไม่ได้เส้นตรง ต้องปรับค่า Cs ใหม่ให้เหมาะสม ซึ่งถ้าปรับค่า Cs สูงหรือต่ำเกินไป จะได้ลักษณะของเส้นกราฟดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะไอโซเทอมการดูดซับ แบบ BET (ชลดธา และคณะ, 2538)

รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะไอโซเทอมการดูดซับแบบ BET แบบเส้นตรง (ชลดธา และคณะ, 2538)

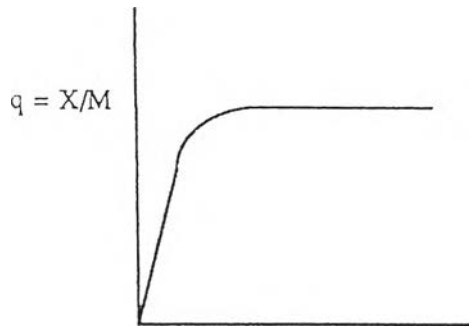
2. ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

รูปแบบนี้สมมติให้การดูดซับของตัวดูดซับ มีลักษณะเป็นผิวชั้นเดียว (Monolayer) และไม่มีการเคลื่อนย้ายของตัวดูดซับไปตำแหน่งอื่นในผิวสัมผัส ไอโซเทอมลักษณะนี้ แสดงในรูปที่ 2.11 และ 2.12 โดยสมการแลงมัวร์ แสดงได้ดังนี้

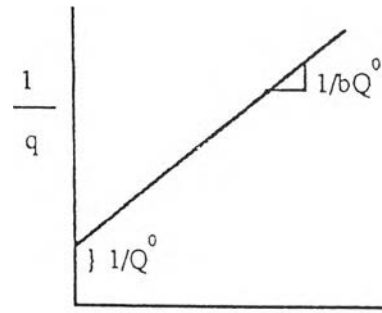
$$q = X/M = bCQ^\circ / (1+bC)$$

หรือ $1/q = [(1/bQ^\circ) * (1/C)] + (1/Q^\circ)$

$$K_L = bQ^\circ$$



C



1/C

รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะไอโซเทอมการดูดซับ ของแสงมัวร์ (ชลธา และคณะ, 2538)

รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะไอโซเทอมการดูดซับของแสงมัวร์ แบบเส้นตรง (ชลธา และคณะ, 2538)

- เมื่อ b คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ (ลบ.ตม./มก.)
- Q° คือ ปริมาณตัวถูกละลายบนตัวดูดซับ (มก.สี/กรัมของตัวดูดซับ)
- K_L คือ ค่าคงที่สมดุลของแสงมัวร์ (ลบ.ตม./กรัมของตัวดูดซับ)

ลักษณะของรูปไอโซเทอม สามารถบอกได้ว่าการดูดซับในการทดลองได้ผลดีหรือไม่ซึ่งเราจะใช้การคำนวณจากค่าคงที่ของไอโซเทอมแบบแสงมัวร์ โดยจะแสดงให้เห็นอยู่ในรูปค่าคงที่ของการแยกตัว r (dimensionless constant separation factor) ซึ่งจะหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ

$$r = 1 / (1 + bC_0)$$

โดยที่ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย (มก./ลบ.ตม.)

ผลของค่า r ที่มีการดูดซับแสดงไว้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 แสดงผลของแฟกเตอร์ของการแยกตัวจากลักษณะของรูปไอโซเทอม (ชลธา และคณะ, 2538)

Separation Factor "r"	ลักษณะของไอโซเทอม
$r > 1$	การดูดซับไม่ดี
$r = 1$	การดูดซับคงที่หรือการดูดซับดี
$0 < r < 1$	การดูดซับดี
$r = 0$	ปฏิกิริยาย้อนกลับได้

3. ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดริช (Freundlich Adsorption Isotherm)

สมการของฟรุนดริช และกราฟจะมีลักษณะเป็นแบบอ็อกโปเนนเชียล ซึ่งสมการมีดังนี้

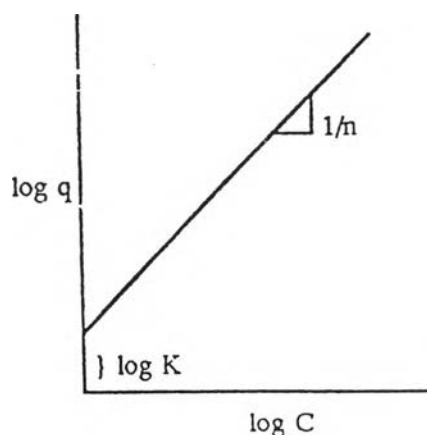
$$q = X/M = KC^{1/n}$$

$$\text{หรือ } \log q = \log K + (1/n) * \log C$$

โดย K คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดติดผิวของตัวดูดติดผิว

$1/n$ คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดติดผิว

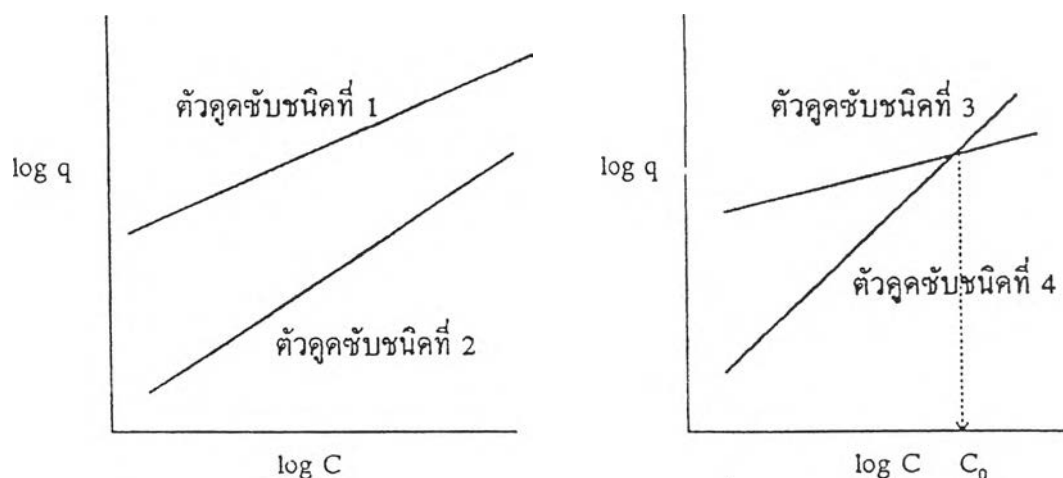
เมื่อวาดรูปตามสมการของฟรุนดริช จะมีลักษณะเหมือนรูปที่ 2.10 ค่าคงที่ต่างๆ (K และ n) คำนวณหาได้จากการวาดรูประหว่าง $\log q$ กับ $\log C$ (รูปที่ 2.13) ค่า n จะใช้เป็นตัวบอกความสามารถในการดูดซับที่ดี และความจุของตัวดูดซับ ถ้าค่า n มากกว่า 1 หมายความว่า ตัวดูดซับที่ใช้สามารถดูดซับตัวถูกละลายได้ดี และถ้าค่า n มากกว่า 1 แต่น้อยกว่า 10 การดูดซับนั้นสามารถดำเนินไปได้ด้วยดี



รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดริช (ชลธา และคณะ, 2538)

สมการนี้จะใช้ได้ดีในสารละลายที่มีความเข้มข้นปานกลาง ในการพิจารณาเลือกว่าตัวดูดซับชนิดใดมีประสิทธิภาพในการบำบัดมากกว่ากัน พิจารณาจากค่าไอโซเทอมได้ ดังรูปที่ 2.14 ก จะเห็นได้ว่า ไอโซเทอมของตัวดูดซับชนิดที่ 1 สูงกว่าตัวดูดซับชนิดที่ 2 ในช่วงความเข้มข้นเดียวกัน ส่วนในรูปที่ 2.14 ข ตัวดูดซับชนิดที่ 3 มีไอโซเทอมสูงกว่าตัวดูดซับชนิดที่ 4 ในช่วงความเข้มข้น

ที่ต่ำกว่า C_0 แต่ตัวดูดซับชนิดที่ 4 จะสูงกว่าชนิดที่ 3 ในช่วงความเข้มข้นสูงกว่า C_0 ดังนั้น จึงต้องเลือกตัวดูดซับให้เหมาะกับช่วงความเข้มข้นที่ต้องการ ในรูปที่ 2.14x ตัวดูดซับชนิดที่ 4 มีความชันมากกว่าชนิดที่ 3 แสดงว่าถ้าต้องการบำบัดแบบที่มีการไหลต่อเนื่องแล้วตัวดูดซับชนิดที่ 4 จะเหมาะสมกว่าชนิดที่ 3



รูปที่ 2.14 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของตัวดูดซับชนิดต่างๆ โดยพิจารณาจากรูปแบบไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนดริช (ชลธา และคณะ, 2538)

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยต่างๆ ที่ได้มีการศึกษาไว้ในอดีต พบว่า วัสดุที่มีการนำมาทดลองใช้บำบัดน้ำทิ้งที่มีสารละลายสีปนเปื้อนอยู่ ได้แก่ ขี้เลื่อย (Sawdust) ขี้เถ้าลอย (Fly Ash) ปูนขาว (Lime) ขานอ้อย (Bagasse) ชังข้าวโพด (Corn Cob) ดินเหนียว (Clay) เปลือกถั่วเหลือง (Soybean Hull) และก้านดอกทานตะวัน (Sunflower Stalk) เป็นต้น

Poots และคณะ, 1976 ศึกษาการกำจัดสีย้อมแอสิตโดยใช้ไม้และพีทที่ล้างด้วยน้ำกลั่นแล้วนำไปอบแห้งที่ 90°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เป็นตัวดูดซับสี ผลการศึกษาพบว่า ไม้และพีท สามารถกำจัดสีย้อมแอสิตได้เป็นอย่างดี โดยพีทมีความสามารถในการดูดซับสีได้มากกว่าไม้ ซึ่งวัสดุทั้ง 2 ชนิดสามารถใช้แทนถ่านกัมมันต์ได้ โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการเผาและกระตุ้นเหมือนถ่านกัมมันต์ เพียงอบให้แห้งก็นำไปใช้งานได้ แต่ไม้และพีท จะใช้เวลาสัมผัสก่อนเข้าถึงจุดสมดุลนานพอสมควร โดยพีทจะใช้เวลาสัมผัสประมาณ 2 ชั่วโมง ส่วนไม้จะใช้เวลาสัมผัสสูงถึง 6 ชั่วโมง จึงจะเข้าสู่สมดุล

Asfour และคณะ, 1985 ศึกษาการกำจัดสีย้อมเบสิก โดยใช้ซีลี้อยไม้เนื้อแข็งที่มีความชื้น ร้อยละ 13 เป็นตัวดูดซับสี ทำการทดลองแบบแบดซ์โดยใช้สารละลายสี Astrazone Blue (Basic Blue FRR69) ศึกษาผลของการกวน ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสี ขนาดของอนุภาคซีลี้อย และ ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความสามารถในการดูดซับสี ผลการทดลองพบว่า ความสามารถในการกำจัดสี จะแปรผันตรงกับความเร็วยอบในการกวน ความเข้มข้นสีเริ่มต้น และอุณหภูมิ และจะแปรผกผันกับขนาดอนุภาค ดังตารางที่ 2.7 โดยความสามารถในการกำจัดสีของซีลี้อยไม้เนื้อแข็ง ในสารละลายสีที่มีความเข้มข้น 200 มก./ลบ.ตม. สูงถึงร้อยละ 85 ที่เวลาสัมผัส 100 นาที อุณหภูมิ 80^oซ โดยใช้ซีลี้อยไม้เนื้อแข็งที่มีขนาด 250-500 นาโนเมตร นอกจากนี้อุณหภูมียังมีผลต่อระยะเวลาสัมผัส โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 25^oซ เป็น 80^oซ จะสามารถลดระยะเวลาสัมผัสได้ถึงร้อยละ 44.4

ตารางที่ 2.7 แสดงความสามารถในการดูดซับสีของซีลี้อยไม้เนื้อแข็ง
(Asfour และคณะ, 1985)

ความเร็วยอบในการกวน(รอบ/นาที)	100	200	400	800
ความสามารถในการดูดซับสี (q; มก.สีย้อม/กรัมซีลี้อย)	42	52	60	68
ความเข้มข้นสีเริ่มต้น(มก./ลบ.ตม.)	100	150	200	250
ความสามารถในการดูดซับสี (q; มก.สีย้อม/กรัมซีลี้อย)	45	52	60	65
ขนาดของอนุภาค(นาโนเมตร)	63-125	125-250	250-500	500-1000
ความสามารถในการดูดซับสี (q; มก.สีย้อม/กรัมซีลี้อย)	75	65	60	52
อุณหภูมิ (°ซ)	25	40	60	80
ความสามารถในการดูดซับสี (q; มก.สีย้อม/กรัมซีลี้อย)	60	70	75	85

Gupta และ Bhattacharya , 1985 ศึกษาการกำจัดสีของโรงงานฟอกเยื่อกระดาษโดยใช้ซีลี้อย (Fly Ash), Kemamine T 1902D (High molecular weight amine) และปูนขาว (Lime) โดยทำการทดลองแบบแบดซ์ ผลการทดลองพบว่าซีลี้อยสามารถกำจัดสีได้ร้อยละ 94

ส่วนสารเอมีนมีความสามารถในการกำจัดสีได้ดีกว่าซีไธลอลอยคือประมาณร้อยละ 97 แต่มีราคาสูงกว่ามาก และสำหรับปูนขาว กำจัดสีได้ร้อยละ 90

McKay และคณะ, 1987(1) ศึกษาการกำจัดสีย้อมเบสิคและสีย้อมแอสิค อย่างละ 2 โทนสีคือ สีน้ำเงิน และสีแดง โดยใช้ชานอ้อยเป็นตัวดูดซับสี และศึกษาผลของอุณหภูมิสีย้อม และขนาดอนุภาคของชานอ้อย ที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดติดผิว โดยการทดลองแบบแบตช์ ผลการทดลองพบว่า ชานอ้อยมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมเบสิคได้สูงสุด เท่ากับ 158 มก.สีย้อมต่อกรัมชานอ้อย สำหรับสี Basic Blue 69 และ 77 มก.สีย้อมต่อกรัมชานอ้อยสำหรับสี Basic Red 22 แต่สามารถดูดซับสีย้อมแอสิคได้ดีกว่า คือเท่ากับ 23 มก.สีย้อมต่อกรัมชานอ้อยสำหรับสี Acid Red 114 และ 22 มก.สีย้อมต่อกรัมชานอ้อยสำหรับสี Acid Blue 25 ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น พบว่า เป็นการเพิ่มการเคลื่อนที่ของไอออนขนาดใหญ่ในสีย้อม ทำให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมสูงขึ้น

McKay และคณะ, 1987(2) ศึกษาการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียโดยใช้สารดูดติดผิวราคาถูก 6 ชนิด คือ เปลือกไม้สัก แกลบ เศษฝ้าย ถ่าน เส้นผม และเบนโทไนท์ โดยใช้สีย้อมเบสิค แอสิค ไดรอกท์ และดิสเพอร์ส อย่างละ 2 โทนสีคือ สีแดง และสีน้ำเงิน ผลการทดลองพบว่า เบนโทไนท์สามารถดูดซับสีได้มากกว่าร้อยละ 80 ทุกสีย้อมยกเว้นสีย้อมแอสิค โดยเบนโทไนท์จะเกิดพันธะที่แข็งแรงในการดูดติดสีย้อม ทำให้การรีเจนเนอเรตเป็นไปได้ยาก ส่วนแกลบ เปลือกไม้สัก เศษฝ้าย และเส้นผม สามารถดูดติดผิวได้กับสีย้อมเบสิคเท่านั้น

El Geundi, 1991 ศึกษาการกำจัดสีย้อมเบสิค 2 สี คือ Astrazon Blue และ Maxilon Red และสีย้อมแอสิค 2 สีคือ Telon Blue และ Erionyl Red โดยใช้ซังข้าวโพดป่น ทำการทดลองโดยแปรค่าความเร็วในการกวน ขนาดอนุภาคและปริมาณของซังข้าวโพดป่น ผลการทดลองพบว่า ซังข้าวโพดป่นสามารถดูดซับสีย้อมเบสิคได้ดีคือเท่ากับ 160 และ 94.5 มก.ต่อกรัมของสี Astrazon Blue และ Maxilon Red ตามลำดับ แต่สามารถดูดซับสีย้อมแอสิคได้ดีกว่า คือเท่ากับ 47.7 และ 41.4 มก.ต่อกรัมของสี Erionyl Red และ Telon Blue ตามลำดับ การเพิ่มความเร็วในการกวนและปริมาณของวัสดุ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดติดผิว และการลดขนาดซังข้าวโพดป่นจะเพิ่มประสิทธิภาพการดูดติดผิว โดยให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเบสิคสูงกว่าสีย้อมแอสิค เนื่องจากซังข้าวโพดมีเซลลูโลสประกอบเป็นโครงสร้าง และเมื่อเซลลูโลสสัมผัสกับน้ำจะให้ประจุลบ ดังนั้นจึงสามารถดูดติดผิวกับสีย้อมประจุบวกได้

Li และ Zhao, 1991 ศึกษาทดลองเดินระบบกำจัดสีด้วยซีเถ้าและเถ้าลอย ซึ่งใช้หลักการกรองติดผิวโดยสร้างเป็นชั้นกรองของเถ้า พบว่าให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสูง และได้แนะนำให้ใช้ระบบดังกล่าวแทนระบบชีวภาพและอิเล็กโทรไลซิส สำหรับโรงงานที่มีเถ้าเพียงพอลอยู่แล้ว หรือใช้ร่วมกันในกรณีที่หาเถ้าได้ไม่พอ เพราะจะประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบ และค่าใช้จ่ายด้านพลังงานได้มากกว่าการเลือกใช้แต่เฉพาะระบบชีวภาพและอิเล็กโทรไลซิส

Nassar และ El-Geundi, 1991 ศึกษาค่าใช้จ่ายในการกำจัดสีจากน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อมด้วยตัวดูดซับจากธรรมชาติ วัสดุธรรมชาติที่ใช้เป็นตัวดูดซับคือ ดินเหนียว ชานอ้อย และขังข้าวโพด เปรียบเทียบกับผงถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) สีที่ใช้ในการทดลองได้แก่ Telon Blue ANL (สีแอสลิด; $\lambda_{max} = 600$ นาโนเมตร), Maxilon Red BL-N (สีเบสิค; $\lambda_{max} = 538$ นาโนเมตร) และ Astrazon Blue FRR (สีเบสิค; $\lambda_{max} = 585$ นาโนเมตร) ทำการทดลองแบบแบดซ์โดยใช้ตัวดูดซับที่มีปริมาณเท่ากัน แล้วแปรค่าความเข้มข้นของสารละลายสี ที่อุณหภูมิห้อง (23-27 องศาเซลเซียส) ผลการทดลองพบว่า ผงถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับสีย้อมทุกชนิดได้ดีที่สุดแต่เมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายของวัสดุแต่ละชนิดเทียบกับถ่านกัมมันต์ ที่มีความสามารถในการดูดซับสีได้เท่ากัน พบว่าดินเหนียวและขังข้าวโพด มีค่าใช้จ่ายในการดูดซับสี เบสิคและสีแอสลิดต่ำที่สุด (ตารางที่ 2.8)

ตารางที่ 2.8 แสดงค่าใช้จ่ายในการกำจัดสีของตัวดูดซับแต่ละชนิดเทียบกับถ่านกัมมันต์ (Nassar และ El-Geundi, 1991)

สารละลายสี	ค่าใช้จ่ายเปรียบเทียบเมื่อใช้กำจัดสี 1 กิโลกรัม			
	ผงถ่านกัมมันต์	ดินเหนียว	ขังข้าวโพด	ชานอ้อย
Maxilon Red	1.000	0.024	0.083	0.103
Astrazon Blue	1.000	0.017	0.039	0.041
Telon Blue	1.000	0.030	0.029	0.052

Meyer และคณะ, 1992 ศึกษาการกำจัดสีของน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยใช้วัสดุทางธรรมชาติมาเป็นตัวดูดซับ วัสดุที่ใช้ได้แก่ ถ่านหินบาร์บีคิว (barbecue charcoal) พีชเส้นใย (vermiculite) ซีเลื่อย (sawdust) ขังข้าวโพด (maize stack) ททราย (sand) ผักเน่า (peatmoss) และแกลบ (rice husks) ผลการทดลองพบว่าวัสดุทุกชนิดยกเว้นพีชเส้นใย กำจัดสีได้มากกว่าร้อยละ 50 โดยวัสดุที่มีประสิทธิภาพสูงสุดคือ ถ่านหินบาร์บีคิวและเปลือกข้าว มีประสิทธิภาพในการ

กำจัดสูงถึงร้อยละ 67 และ 65 ตามลำดับ จากผลการทดลองเบื้องต้น ได้นำถ่านหินบาร์บิคิวมาทดลองหาผลของพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีของถ่านหินบาร์บิคิว โดยแปรค่าพีเอชจาก 4 ถึง 9 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีของถ่านหินบาร์บิคิวค่อนข้างคงที่ในช่วงพีเอชระหว่าง 5 ถึง 8 นอกจากนี้ ได้ทำการทดลองแบบถังปฏิกรณ์แบบชั้นตรึง (fixed-bed reactor) เพื่อบ่งชี้ถึงความสามารถในการดูดซับของถ่านหินบาร์บิคิวโดยให้มีเวลากักน้ำเท่ากับ 1.6 ชั่วโมง พบว่าถ่านหินจะอิ่มตัวเต็มที่เมื่อวันที่ 25 ของการทดลอง โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 82

Laszlo และ Dintzis, 1994 ทำการวิจัยปรับปรุงเสถียรภาพทางกายภาพ และความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของเปลือกถั่วเหลือง และชานอ้อย ด้วยการสร้างโครอสต์ลิงก์ โดยใช้อีพิกคลอไรไฮดรินและเบล ผลการทดลองพบว่า เปลือกถั่วเหลืองและชานอ้อย ที่ไม่ผ่านการสร้างโครอสต์ลิงก์มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนประมาณครึ่งหนึ่งของเปลือกถั่วเหลืองและชานอ้อยที่ผ่านการสร้างโครอสต์ลิงก์ โดยเปลือกถั่วเหลืองและชานอ้อย ที่ผ่านการบำบัดด้วยอีพิกคลอไรไฮดริน จะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเท่ากับ 0.9 และ 1.3 มิลลิกรัมสมมูลต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และเวลาในการทำปฏิกิริยากับอีพิกคลอไรไฮดรินที่เหมาะสมคือ 4-6 ชั่วโมง

Laszlo, 1995 ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของอิเล็กโตรไลต์ในการกำจัดสีรีแอกทีฟที่ละลายน้ำ โดยใช้ควอร์เทอร์ไนซ์เซลลูโลส ผลการทดลองพบว่า ควอร์เทอร์ไนซ์เซลลูโลสสามารถกำจัดสีรีแอกทีฟที่ละลายน้ำได้ แม้ในสภาพที่มีสารอิเล็กโตรไลต์ความเข้มข้นสูง และควอร์เทอร์ไนซ์เซลลูโลสสามารถทำการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) ด้วยต่างแก่ได้ ซึ่งประหยัดกว่าการใช้สารแลกเปลี่ยนไอออนแบบอื่นในการกำจัดสีจากน้ำทิ้ง

Mehna และคณะ, 1995 ทำการวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดสีจากน้ำทิ้งของโรงงานเยื่อกระดาษ โดยใช้เชื้อรา *Trametes versicolor* strain B7 ร่วมกับผลผลิตทางการเกษตรและสารอื่นๆ คือ ชูโครส กลูโคส แป้ง เอทธานอล คาร์บอกซีเมทิล-เซลลูโลส และชานอ้อย ผลการทดลองสรุปได้ว่า เมื่อใช้ *T. versicolor* ร่วมกับชูโครส สามารถกำจัดสีได้ดีที่สุด โดยพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสีด้วยเชื้อรา ชนิดนี้คือ 4.5-5.0 และอุณหภูมิ 25-30°C ในการทดลองใช้ความเข้มข้นสีเท่ากับ 18,500 หน่วย สามารถกำจัดสีได้สูงสุดเท่ากับร้อยละ 92 และ กำจัดสีโอดี และบีโอดีได้ร้อยละ 69 และ 68 ตามลำดับ

Laszlo, J.A. , 1996 ทำการวิจัยโดยใช้ขานอ้อยกำจัดสีมีเเคทฟีพในน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อม โดยนำขานอ้อยที่ผ่านการทำควอร์เทอร์ไนซ์ และ ครออสส์ลิงก์ ด้วย N-(3-chloro-2-hydroxypropyl) trimethylammonium chloride และอิพิคลอโรไฮดรินตามลำดับ เป็นเรซินที่ใช้ในการกำจัดสี โดยสีย้อมมีเเคทฟีพที่ใช้ในการวิจัยคือ Remazol Brilliant Red (F3B) และทำการทดลองแบบเบตซ์ ผลการวิจัยพบว่า ขานอ้อยที่ผ่านการทำควอร์เทอร์ไนซ์ครออสส์ลิงก์ มีความสามารถในการกำจัดสี ได้ดีกว่า Commercial Quaternized Cellulose (QA52) โดยเรซินที่ได้ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูงสุดถึง ร้อยละ 95 ใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุล 5-15 นาที และควรมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 100 ไมครอน

Ahmedna และคณะ, 1997 ศึกษาการกำจัดสีของน้ำตาลดิบ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตขึ้นจากแกลบ ฟางข้าว เปลือกถั่วเหลือง และเปลือกถั่วพีแคน ที่สภาวะการเผากระตุ้นแตกต่างกัน ผลการทดลองพบว่า ฟางข้าวและแกลบให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้สูงสุดประมาณร้อยละ 60 และเปลือกถั่วเหลืองให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้ต่ำสุดคือ ต่ำกว่าร้อยละ 20

Gang และ Xiangjing, 1997 ศึกษาความสามารถในการกำจัดสีย้อมเบสิค 2 สี คือ Methylene Blue และ Basic Red 9 และสีไดเรกท์ 2 สีคือ Direct Blue 71 และ Congo Red โดยใช้ก้านดอกทานตะวันเป็นตัวดูดซับสี ทำการทดลองโดยแปรค่าความเข้มข้นของสี ขนาดอนุภาคของวัสดุ และส่วนต่างๆ ของก้านดอกทานตะวัน จากการทดลองพบว่า ก้านดอกทานตะวันสามารถดูดซับสีเบสิค ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นแคทไอออนได้สูง คือเท่ากับ 205 และ 317 มก./กรัมของสี Methylene Blue และ Basic Red 9 ต่อวัสดุตามลำดับ แต่สามารถดูดซับสีไดเรกท์ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นแอนไอออนได้ต่ำกว่า คือเท่ากับ 26.8 (ที่ตะแกรงเบอร์ 25-45) และ 37.8 (ที่ตะแกรงเบอร์ >60) มก./กรัมของสี Direct Blue 71 และ Congo Red ตามลำดับ นอกจากนี้จากการศึกษาความสามารถในการดูดซับสี โดยใช้ส่วนต่างๆ ของก้านดอกทานตะวันยังพบว่า ที่แก่นของก้านซึ่งเป็นส่วนที่นุ่มและมีรูพรุน จะมีความสามารถในการดูดซับสีเป็น 2 เท่าของเปลือก และขนาดอนุภาคของวัสดุก็มีผลต่อการดูดซับสีด้วย โดยอนุภาคขนาดเล็กจะมีความสามารถในการดูดซับสีมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ สรุปได้ว่าภายในเวลา 30 นาที สีเบสิคสามารถถูกกำจัดได้ร้อยละ 80 และอัตราการดูดซับสีย้อมที่มีคุณสมบัติเป็นแคทไอออนจะสูงกว่าแอนไอออน

Pendyal และคณะ, 1999 ศึกษาการกำจัดสีจากโรงงานน้ำตาล โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากแกลบ ฟางข้าว และขานอ้อย ผลการทดลองพบว่า ขานอ้อยสามารถกำจัดสีได้ดีที่สุดประมาณร้อยละ 42.6 รองลงมาคือแกลบและฟางข้าวร้อยละ 30.5 และ 24.1 ตามลำดับ โดยถ่าน

กัมมันต์ที่สามารถกำจัดได้ดีที่สุด จะมีปริมาตรรูพรุนสูง ซึ่งภายในประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็ก (0-20 อังสตรอม), รูพรุนขนาดกลาง (20-500 อังสตรอม) และรูพรุนขนาดใหญ่ (>500 อังสตรอม) เท่ากับร้อยละ 60-75, 20-30 และ 4-5 ของปริมาตรรูพรุนทั้งหมด ตามลำดับ

Valencia และ คณะ, 1999 ศึกษาการกำจัดสีย้อมเบสิค และสีย้อมรีแอคทีฟอย่างละ 2 โทนสี คือสีน้ำเงินและสีแดง โดยใช้ซังข้าวโพดเป็นตัวดูดซับสี สีย้อมที่ใช้ได้แก่ สี Basic Blue 54 (BB54), Basic Red 46 (BR46), Reactive Blue 52 (RB52) และ Reactive Red 120 (RR120) ศึกษาผลของอุณหภูมิและพีเอช ที่มีต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสี ผลการทดลองพบว่า เมื่อกำหนดให้ค่าพีเอชคงที่เท่ากับ 5.0 ความสามารถในการดูดซับสีจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และเมื่อให้อุณหภูมิคงที่ที่ 28°C ความสามารถในการดูดซับสีจะเพิ่มขึ้น เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น โดยใช้ซังข้าวโพดสามารถดูดซับสีย้อมเบสิคได้ดีกว่าสีย้อมรีแอคทีฟ และดูดซับสีน้ำเงินได้ดีกว่าสีแดง

Ahmedna และคณะ, 2000(1) ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ แกลบ ฟางข้าว ชานอ้อย และเปลือกถั่วพีแคน ที่สภาวะการเผากระตุ้นต่างๆ และทดสอบประสิทธิภาพถ่านกัมมันต์โดยการดูดซับสีของน้ำตาลจากโรงงานน้ำตาล ผลการทดลองพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ทำจากชานอ้อย ที่ใช้น้ำเชื่อมที่ทำจากข้าวโพดเป็นสารปรุงแต่ง ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้สูงสุดประมาณร้อยละ 17

Ahmedna และคณะ, 2000(2) ศึกษาลักษณะพื้นผิวและประสิทธิภาพการลดสีของน้ำตาลดิบจากโรงงานน้ำตาล โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตขึ้นจากชานอ้อยที่มีน้ำเชื่อมที่ทำจากข้าวโพด และน้ำมันดินเป็นสารปรุงแต่ง ผลการศึกษาพบว่าถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมสำหรับการลดสีของน้ำตาลควรมีพื้นที่ผิวและมีสัดส่วนของรูพรุนขนาดเล็กและใหญ่ที่เหมาะสม และมีประจุบริเวณพื้นผิวตรงข้ามกับสารที่ถูกดูดซับ กล่าวคือ ถ้าสารที่ถูกดูดซับมีประจุตรงกับพื้นที่ผิวคาร์บอน จะเกิดการผลักกัน ทำให้ขัดขวางการดูดซับ แต่ถ้าประจุต่างกันจะดูดกัน ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพของคาร์บอนในการดูดซับสีของน้ำตาลจะลดลง เมื่อเพิ่มประจุลบที่ผิวคาร์บอน และประสิทธิภาพการดูดซับสีจะเพิ่มสูงสุด เมื่อคาร์บอนที่ใช้ไม่มีประจุลบ แสดงให้เห็นว่า น้ำเสียจากโรงงานน้ำตาล เป็นน้ำเสียที่มีประจุลบ

ชลธา และคณะ, 2538 ศึกษาการกำจัดสีจากน้ำตาล โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากชานอ้อย และศึกษาผลของความชื้นที่ใช้ในการกระตุ้นถ่านให้ได้ถ่านกัมมันต์ ผลการทดลองพบว่า

ความชื้นที่เหมาะสมในการกระตุ้นเท่ากับร้อยละ 54.4 ซึ่งจะให้ผลการดูดซับสีจากน้ำตาลได้สูงสุดถึงร้อยละ 97.4

สัญญาวัล, 2539 ศึกษาความเป็นไปได้ในการลดสีโอดีและสีจากน้ำชะมูลฝอย ด้วยกระบวนการดูดติดผิวโดยใช้ถ่านกัมมันต์ ถ่านไม้และแกลบ ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของสารดูดติดผิว ทำการทดลองแบบแบดซ์ โดยทดสอบไอโซเทอมของการดูดติดผิว และทดลองแบบต่อเนื่องโดยศึกษาความสามารถในการดูดติดผิว ผลการทดลองพบว่า ถ่านไม้และถ่านแกลบไม่มีความเป็นไปได้ทางวิศวกรรม เนื่องจากความสามารถในการดูดติดผิวสีโอดีและสีต่ำ ส่วนถ่านกัมมันต์มีความเป็นไปได้ทางวิศวกรรม โดยประสิทธิภาพเริ่มต้นของการลดสีโอดีและสีอยู่ในช่วงร้อยละ 78-97 และ 37-96 ตามลำดับ และที่ความสูงของถ่านกัมมันต์ 1.2 เมตร อัตราการะบรทุกทางน้ำ 0.15 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ความเข้มข้นสีโอดีเริ่มต้น 250 มิลลิกรัม/ลิตร จะให้ความสามารถในการลดสีโอดี และสีสูงสุด

วิภาดา และศรีประภา, 2540 ศึกษาการกำจัดสีไดเรกท์ ด้วยผงผักตบชวา โดยสีไดเรกท์ที่ใช้ ได้แก่ สี Sirius Red F3B, Sirius Red Violet RL, Sirius Blue S-BRR และ Sirius Orange K-CF โดยทำการทดลองแบบแบดซ์ ผลการทดลองพบว่าผงผักตบชวาจะดูดซับสีไดเรกท์ทุกชนิดได้อย่างรวดเร็ว โดยจะใช้เวลาถึงจุดสมดุลน้อยกว่า 40 นาที และจะมีค่าประสิทธิภาพการบำบัดสูงประมาณร้อยละ 90 และสามารถบำบัดสีได้ดีในช่วงพีเอช 6-10 นอกจากนี้การฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) ของผักตบชวา สามารถทำได้ง่าย โดยแช่ในสารละลายเมธานอลร้อยละ 50 หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พีเอช 11 แต่การฟื้นฟูสภาพนั้นไม่คุ้มค่า เนื่องจากผงผักตบชวามีราคาถูก และสามารถล้างสีออกมาได้น้อย จึงไม่เหมาะต่อการนำกลับมาใช้ใหม่

จิรภรณ์, 2542 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมของชานอ้อย ผักตบชวา และเส้นใยลูกปาล์ม ที่ผ่านการปรับเป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดควอร์เทอร์ไนซ์โครอสส์ลิงก์เซลลูโลส และที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ สีย้อมที่ใช้ได้แก่ สีไดเรกท์ (Best Direct Black B, Sirius Blue KCFN และ Sirius Rubine KZBL) และสีรีนอคทีฟ (Remazol Black B, Remazol Brilliant Blue R และ Remazol Brilliant Red 3BS) ที่มีความเข้มข้น 10 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการทดลองแบบแบดซ์ พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสีของวัสดุทั้ง 3 ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและที่ผ่านการทำควอร์เทอร์ไนซ์โครอสส์ลิงก์ คือต่ำกว่าร้อยละ 4 และร้อยละ 95-99 ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีของวัสดุทั้ง 3 ที่ผ่านการทำควอร์เทอร์ไนซ์โครอสส์ลิงก์ สูงกว่าที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมาก

บุญยฤทธิ์, 2543 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดควอเทอร์นารีไนซ์โครอสส์ลิงก์เซลลูโลสที่ทำจากซังข้าวโพด เปลือกถั่วเหลืองและก้านดอกทานตะวัน โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุทั้งสาม ที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ และที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารควอเทอร์นารีไนซ์และสารสร้างโครอสส์ลิงก์ และศึกษาลักษณะทางกายภาพ ค่าไอโซเทอมการดูดติดสี และโครงสร้างของวัสดุ โดยทำการทดลองกับสี 2 ชนิด คือสีไดเรกท์ (Best Direct Black B, Sirius Blue KCFN และ Sirius Rubine KZBL) และสีรีแอคทีฟ (Remazol Black B, Remazol Brilliant Blue R และ Remazol Brilliant Red 3BS) ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 50 70 90 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยวิธีอาร์เทสต์ ผลการทดลองพบว่า ซังข้าวโพด เปลือกถั่วเหลืองและก้านดอกทานตะวันที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีต่ำกว่าควอเทอร์นารีไนซ์โครอสส์ลิงก์เซลลูโลสที่ทำจากวัสดุชนิดเดียวกัน โดยประสิทธิภาพของวัสดุทั้งสามชนิดที่ไม่ผ่านการปรับสภาพจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีไดเรกท์และสีรีแอคทีฟต่ำกว่า 23.35% และ 16.91% ตามลำดับ ในขณะที่ควอเทอร์นารีไนซ์โครอสส์ลิงก์ที่ทำจากทั้งสามวัสดุมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีไดเรกท์คือสี Sirius Blue KCFN, Sirius Rubine KZBL และ Best Direct Black B 58.62-100%, 64.27-100% และ 30.74-79.79% ตามลำดับ ส่วนสีรีแอคทีฟมีประสิทธิภาพ 97.31-100% ความสามารถสูงสุดในการดูดติดผิวเฉลี่ยหาโดยใช้ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ของ Q-R ซังข้าวโพด Q-R เปลือกถั่วเหลือง และ Q-R ก้านดอกทานตะวันกับสีไดเรกท์มีค่าเฉลี่ย 697, 222 และ 268 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ สำหรับสีรีแอคทีฟมีค่าเฉลี่ย 1120, 661 และ 789 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ