

บทที่ 2

ทฤษฎีและสรุปสาระสำคัญของเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเส้นใยและสีย้อมผ้า

2.1.1 ใยผ้าชนิดต่างๆ

ใยผ้าแบ่งตามส่วนประกอบทางเคมีได้เป็น 4 หมู่ คือ

1. ใยเซลลูโลส

มีทั้งที่เป็นใยเซลลูโลสธรรมชาติ เช่น ฝ้าย แพลกซ์ หรือปอ และที่เป็นใยประดิษฐ์ โดยนำเซลลูโลสธรรมชาติมาดัดแปลงให้เป็นเส้นใย เช่น เรยอน แอซิเตด หรือโพลีโนลิก

2. ใยโปรตีน

ได้มาจากใยโปรตีนของสัตว์ เช่น ขน ผม และเคราของสัตว์รวมทั้งใยไหม นอกจากนี้ยังมีใยโปรตีนประดิษฐ์เคยผลิตจำหน่ายอยู่ครั้งหนึ่ง โดยใช้โปรตีนจากพืช เช่น ถั่วเหลือง ข้าวโพด และโปรตีนจากสัตว์ เช่น นม ปัจจุบันหยุดการผลิตแล้ว

3. ใยสังเคราะห์

ผลิตขึ้นจากสารประกอบเคมีโดยตรงมีหลายชนิดที่ใช้กันมากที่สุดได้แก่ โพลีเอไมด์ โพลีเอสเตอ์ และโพลีไครลิก ส่วนชนิดอื่นๆ อีกหลายสิบชนิดผลิตออกจำหน่ายบ้างไม่มากนักบางทีนำไปใช้ในกรณีอื่นที่ไม่ใช่เสื้อผ้า

4. ใยแร่

มีปริมาณน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับทั้ง 3 ชนิด ที่กล่าวมาแล้วเป็นใยที่ทนความร้อนได้สูงจึงใช้เฉพาะในกรณีพิเศษ ได้แก่ ใยแก้ว และใยหิน

ตารางที่ 2.1 การแบ่งชนิดของเส้นใย

เส้นใยธรรมชาติ			
เซลลูโลส (เส้นใยพืช)	โปรตีน (เส้นใยสัตว์)	แร่	ยาง
ฝ้าย (Cotton)	ขนสัตว์ (Wool)	แร่ใยหิน (Asbestos)	ยาง (Rubber)
ลินิน (Linen)	ไหม (Silk)		
ปอ (Jute)	ผม (Hair)		
รามี่ (Ramie)			
ป่าน (Hemp)			
นุ่น (Kapok)			

ตารางที่ 2.1 (มีต่อ)

เส้นใยประดิษฐ์			
เซลลูโลส	พอลิเมอร์ที่ไม่ใช่เซลลูโลส		แร่และเหล็ก
เรยอน (Rayon)	โอเลฟิน (Olefin)	อะคริลิก (Acrylic)	โลหะ (Metallic)
ไลโอเซลล์ (Lyocell)	พอลิเอสเตอร์ (Polyester)	มอดาอะคริลิก (Modacrylic)	แก้ว (Glass)
แอซีเตต (Acetate)	ซาราน (Saran)	อะรามิด (Aramid)	เซรามิก (Ceramic)
ไทรแอซีเตต (Inacetate)	สแปนเดกซ์ (Spandex)	ไนลอน (Nylon)	กราไฟท์ (Graphite)
	ไวเนียน (Vinyon)	โนโวลอยด์ (Novoloid)	

ที่มา : วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา, วิทยาศาสตร์เส้นใย, 2542.

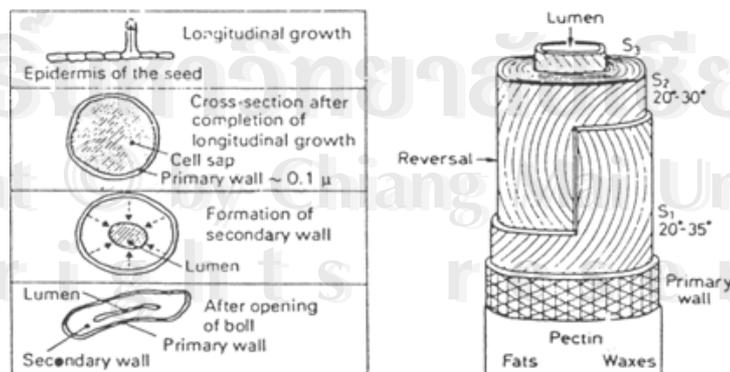
2.1.2 ฝ้าย

ลักษณะทางกายภาพ

รูปร่างจากกล้องจุลทรรศน์ ใยฝ้ายมีลักษณะเหมือนริบบิ้นที่แบน และเป็นเกลียวประมาณ 100-400 รอบต่อนิ้ว เกลียวทำให้ผิวเส้นใยไม่เรียบ มีรูปร่างภาคตัดขวางเป็นรูปถั่ว มีช่องตรงกลาง เรียกว่า ลูเมน (lumen)

ความยาว เส้นใยฝ้ายแต่ละเส้นมีความยาว 0.125 - 2.5 นิ้ว เส้นใยชนิดยาวเป็นพันธุ์ Egyptian และ Sea island สำหรับฝ้ายอเมริกันส่วนใหญ่จะยาวกว่า เส้นใยที่ยาวจะเป็นที่ต้องการเพราะสามารถปั่นด้ายที่มีความเหนียวทนต่อแรงดึงสูง

สี ฝ้ายโดยปกติมีสีขาว บางพันธุ์มีสีครีมหรือสีน้ำตาล



รูปที่ 2.1 ขยายรายละเอียดของใยฝ้าย

ที่มา : ลิลี่ โกศยานนท์, คู่มือวิชาการสิ่งทอ

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบทางเคมีของเส้นใยฝ้ายดิบ

ร้อยละของส่วนประกอบ	ปริมาณในเส้นใย	ปริมาณที่ผิวชั้นนอก
เซลลูโลส	88.0-96.0	52
เพกติน	0.7-1.2	12
ไขมัน	0.4-1.0	7
โปรตีน	1.1-1.9	12
ขี้เถ้า	0.7-1.6	3
สารอินทรีย์ชนิดอื่น	0.5-1.0	14

ที่มา : ลีลี โกศัยยานนท์, คู่มือวิชาการสิ่งทอ

2.1.3 ทฤษฎีการย้อมสี

สีที่ละลายอยู่ในน้ำจะมีการเคลื่อนตัวอยู่ตลอดเวลา เมื่อนำวัสดุสิ่งทอใส่ลงน้ำย้อม จะมีขั้นตอนการติดย้อมเกิดขึ้น 3 ขั้นตอน คือ

1. สีค่อยๆ เคลื่อนตัวในน้ำย้อมมาเกาะที่ผิวเส้นใย
2. สีจะยึดติดที่ผิวของเส้นใย
3. สีจะค่อยๆ เคลื่อนตัวจากผิวภายนอกของเส้นใยเข้าไปจนกระทั่งถึงกึ่งกลางของเส้นใย

การที่สีติดเส้นใยได้เพราะสารประกอบทั้งสองชนิดรวมเข้าเป็นสารประกอบเคมีใหม่แต่การรวมตัวนี้ไม่ได้เป็นการรวมตัวแบบโซเดียมกับคลอรีนที่เปลี่ยนรูปเป็นเกลือแกง การรวมตัวนี้เพียงเปลี่ยนคุณสมบัติกายภาพให้เห็นเป็นสีต่างๆ เท่านั้น การรวมตัวของเส้นใยและสียังคงเป็นสารประกอบอยู่ ซึ่งถ้าไม่มีการตกแต่งภายหลังการย้อมใดๆ แล้ว สีเหล่านี้สามารถเปลี่ยนกลับไปมาได้ ซึ่งหมายความว่า เมื่อย้อมสีติดเส้นใยแล้วสามารถทำให้หลุดแยกออกเป็นตัวสี และเส้นใยในสภาพเดิมได้ เรียกว่าสีตกนั่นเอง

ใยผ้าทุกชนิดมีลักษณะอย่างหนึ่งที่เหมือนกัน คือ ประกอบด้วย โมเลกุลเล็กๆ ต่อกันเหมือนโซ่เช่นไหมเป็น polypeptide ฝ้ายและเรยอนเป็น polycellobiose และไนลอนเป็น polyamide

ลักษณะโมเลกุลภายในเส้นใยมีอยู่ 2 แบบ ดังแสดงในรูป 2.2 คือ

1. แบบเรียงตัวกันเป็นระเบียบ เรียกว่า crystallites ในเส้นใยเซลลูโลสเรียกว่า micelles
2. แบบเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ amorphous region



รูปที่ 2.2 ลักษณะ โมเลกุลภายในเส้นใย
ที่มา : อัจฉราพร ไสละสูต, คู่มือการย้อมสี, 2527

อิทธิพลเชิงเคมี ที่ทำให้สีติดเส้นใยแบ่งได้กว้างๆ 4 ชนิดคือ

1. พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond)
2. แรงวานเดอร์วาลส์ (Van de Waals forces)
3. แรงไอออนิก (Ionic forces)
4. พันธะโควาเลนต์ (Covalent bond)

โครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลสี ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

1. พันธะคู่สลับ (conjugated double bonds)
2. หมู่ปฏิกิริยาที่เรียกว่า โครโมฟอร์ (chromophore)
3. หมู่ปฏิกิริยาที่เรียกว่า ออโซโครม (auxochromes)

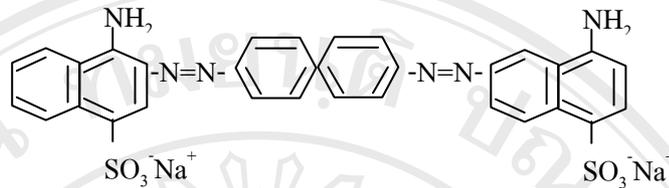
โครโมฟอร์ คือ หมู่ปฏิกิริยาที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงที่มองเห็นได้ เป็นหมู่ที่ไม่อิมตัว ยกเว้น $-NR_3^+$ มีหน้าที่คือ เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ตัวอย่างของโครโมฟอร์ ได้แก่

- N=N หมู่อะโซ (azo group)
- NO₂ หมู่ไนโตร (nitro group)
- C=O หมู่คาร์บอนิล (carbonyl group)
- NR₃⁺ อนุพันธ์แอมโมเนียมโมเนียม (alkyl ammonium derivatives)

ออโซโครม คือ หมู่ปฏิกิริยาที่อิมตัวที่มีอิเล็กตรอนซึ่งยังไม่เกิดพันธะเชื่อมอยู่กับพันธะคู่สลับ ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ตัวอย่างของออโซโครม ได้แก่

- NH₂ หมู่อะมิโน (amino groups)
- NHR หมู่โมโนแอลคิลอะมิโน (mono alkyl amino group)
- NR₂ หมู่ไดอัลคิลอะมิโน (dialkyl amino group)
- OH หมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group)
- OR หมู่อีเทอร์ (ether group)

ทั้งโครโมฟอร์และอโซโครมต่างเชื่อมอยู่กับพันธะคู่สลับ ทั้ง 3 ส่วนนี้เรียกรวมกันว่า โครโมเจน (chromogen) ดังตัวอย่าง โครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลสี ในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้าง C.I. Acid Red 1

ที่มา : อัจฉราพร ไสละสุต, คู่มือการย้อมสี, 2527

นอกจากนี้ อโซโครมยังให้คุณสมบัติการละลายน้ำ รวมทั้งการรวมตัวเกิดเป็นพันธะกับเส้นใยอีกด้วย การรวมกันของพันธะคู่สลับกับโครโมฟอร์ทำให้เกิดสีขึ้น แต่ความเข้ม และความสว่างของสีขึ้นอยู่กับอโซโครม

สีย้อมจะซึมเข้าไปในเส้นใยค่อนข้างช้า และหลุดออกได้ง่าย จึงจำเป็นต้องเติมสารเคมีเพิ่มเพื่อเร่งปฏิกิริยาให้เร็วขึ้นและทำให้ย้อมสีติดทนทานสม่ำเสมอ สารเคมีเหล่านี้เรียกว่าสารช่วยย้อม (dye auxiliaries) ที่สำคัญ และมีใช้มาก มีอยู่ 5 ชนิด ได้แก่

1. กรด ใช้สำหรับย้อมเส้นใยโปรตีน และไนลอนด้วยสีแอซิกทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายสี ทำให้ประจุไฟฟ้าลบในเส้นใยน้อยลง และเพิ่มประจุไฟฟ้าบวก แอนไอออนจึงสามารถเข้าไปในเส้นใยได้ดี
2. ด่าง ใช้สำหรับย้อมใยเซลลูโลสด้วยสีอะโซอิด แอซิด กำมะถัน และรีแอคทีฟ ทำให้โมเลกุลของสีทำปฏิกิริยาคัดติดกับโมเลกุลของใยเซลลูโลสได้ดียิ่งขึ้น

3. เกลือโซเดียมไอออน จะทำหน้าที่ลดปฏิกิริยาลบของเส้นใยทำให้แอนไอออนของสีสามารถเข้าไปใกล้เส้นใยจนกระทั่งแรงแวนเดอร์วาลส์ มีประสิทธิภาพ สามารถลดอุณหภูมิน้ำย้อมลงได้สารทำให้สีสม่ำเสมอ เป็นสารที่ดูดติดเส้นใยได้ง่าย ขึ้นแรกจะแข่งขันกันซึมเข้าไปภายในเส้นใยขณะเดียวกันสารเคมีนี้จะไปเพิ่มพลังงานให้แก่สีย้อม เพื่อรักษาสภาพเดิมของตัวสีไว้ทำให้สีรวมตัวกับเส้นใยได้ช้าลงในตอนหลัง

4. สารพา ส่วนมากเป็นสารประเภท 2-hydroxy diphenyl ทำหน้าที่ดูดติดที่ผิวเส้นใยก่อน เมื่อสีเข้าไปติดตัวสีจะละลาย แล้วเส้นใยจะดูดสีไว้ได้มากขึ้น ระดับการติดสีก็เพิ่มขึ้น สารละลายอินทรีย์ ช่วยเหลือที่ละลายน้ำได้น้อย ย้อมติดสีได้ดีขึ้นเพราะสารละลายอินทรีย์สามารถก่อเป็นเยื่อบางๆ ภายในเส้นใยได้อย่างรวดเร็ว ทำให้สีซึมผ่านไปติดเส้นใยได้เร็วขึ้น

5. สารรีดิวซ์ สีบางชนิดไม่ละลายน้ำ จึงต้องใช้สารเคมีมาช่วยทำให้โมเลกุลของสีมีขนาดเล็กลงจนสามารถซึมผ่านเข้าไปในช่องว่างของเส้นใยได้

2.1.4 การจำแนกสี

การจำแนกสีสามารถแบ่งได้หลายประเภทแล้วแต่จะพิจารณา เช่น

2.1.4.1. จำแนกชนิดสีตามวิธีใช้ ซึ่งแสดงลักษณะของสีแต่ละชนิด ดังในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การจำแนกชนิดสีตามวิธีใช้ และแสดงคุณลักษณะของสีแต่ละชนิดโดยสรุป

ประเภทสี	คำอธิบายทั่วไป	การใช้งาน	ความคงทน
สีเบสิก (basic or cationic)	สีสังเคราะห์ชนิดแรก (พ.ศ. 2399) พื้นฐานเป็นสารอินทรีย์ละลายในกรดอนินทรีย์ ละลายน้ำได้ ปัจจุบันมีใช้น้อยมาก มีหลายสีสัน และมีสีค่อนข้างสว่างสดใส	หากใช้ย้อมผ้าฝ้ายต้องมี mordant (โลหะออกไซด์) ช่วย สามารถใช้กับขนสัตว์ ไหม ไนลอน พอลิเอสเตอร์ อะคริลิก ใช้พิมพ์สีแบบไดเรกต์บนแอซี-เทต และพิมพ์แบบดิสซาร์จบนฝ้าย	ไม่ทนต่อแสง ยกเว้นกับเส้นใยอะคริลิก
สีแอซิก (acid or anionic)	พัฒนามาจากสีเบสิกรอบคลุมได้ครบทุกสี สีกลุ่มนี้เกือบทุกตัวเป็นเกลือของกรดซัลโฟนิก จุดความชื้นได้ง่าย	มีใช้กับขนสัตว์ และไหม รวมทั้งแอซีเทต ไนลอน อคริลิก มอดาอะคริลิก สเปนเดกซ์ เรยอนบางชนิด พอลิเอสเตอร์ และพอลิโพรพิลีน พิมพ์บนขนสัตว์ ไหม แอซีเทต	โดยทั่วไปทนต่อแสงได้ดี แต่ทนต่อการซักไม่ค่อยดี
สีอะโซอิก (azoic)	หรือที่รู้จักกันว่าเป็นอะโซที่ไม่ละลายน้ำ สีที่ใช้น้อยคือ เหลืองแดง และดำ ให้สีสว่างสดใส	มักใช้กับผลิตภัณฑ์ฝ้าย ใช้น้อยกับการพิมพ์สี เนื่องจากตัวสีสามารถใช้ร่วมกับสีกลุ่มอื่นได้ดี	ทนต่อแสงแดด และการซักได้ดีมาก
สีดิสเพอร์ส (disperse)	พัฒนาขึ้นมาสำหรับเส้นใยแอซีเทต (พ.ศ. 2465) ไม่ละลายน้ำ	ใช้กับเส้นใยแอซีเทต ไตรแอซี-เทต ไนลอน พอลิเอสเตอร์ อะคริลิกมอดาอะคริลิก โอเลฟินส์ เช่นเดียวกับเส้นใยเซลลูโลส ใช้กว้างขวางในเสื้อผ้า เครื่องนุ่งห่ม ผ้าที่ใช้ในการตกแต่ง ใช้ทั้งการย้อม และการพิมพ์	ทนต่อแสงแดด โดยขึ้นกับชนิดของเส้นใย

ตารางที่ 2.3 (มีต่อ)

ประเภทสี	คำอธิบายทั่วไป	การใช้งาน	ความคงทน
สีซัลเฟอร์ (sulfur)	เริ่มในปี พ.ศ. 2422 โดยทั่วไปไม่ละลายน้ำ ครอบคลุมสีได้กว้าง ยกเว้นสีแดง สีที่ได้ไม่สว่าง	ส่วนใหญ่ใช้ย้อมผ้าฝ้ายหนักทั้งผ้าทอผ้าดก มีใช้ในการพิมพ์สีบ้าง ปัจจุบันมีจำหน่ายในรูปที่ทำให้ละลายในน้ำได้	คงทนต่อแสง แต่ทนสารซักฟอกประเภทคลอรีนได้ไม่ค่อยดีนัก
สีแวต (vat)	สังเคราะห์ได้ครั้งแรกในปี พ.ศ. 2422 ไม่ละลายน้ำ ย้อมในปฏิกิริยารีดักชัน จำนวนสีมีไม่ครบทุกสี แต่ก็มีมากเพียงพอ	เริ่มจากการใช้ย้อมฝ้าย เช่นเดียวกับขนสัตว์ เลื่อผ้าทำงาน เลื่อภายนอก ชุดกีฬา ใช้มากในงานพิมพ์สี	ทนต่อแสงได้ดีมาก และทนต่ออากาศได้ดี
สีรีแอคทีฟ (reactive)	จำหน่ายครั้งแรกในปี พ.ศ. 2500 ทำการรวมตัวทางเคมีกับเส้นใย แตกต่างจากสีอื่นๆ ให้สีสว่างที่สุดต่อฝ้าย ละลายน้ำได้ดี	ใช้ย้อมฝ้าย ผ้าประดับที่ต้องการสีสด สีเกาะติดดีมาก ใช้ได้ดีทั้งกับการพิมพ์สี นอกนั้นยังใช้ได้กับขนสัตว์ ไหม ไนลอน อะคริลิก และเส้นด้ายผสม	ทนต่อแสงได้ดีมาก แต่ถ้าย้อมกับไนลอน ความคงทนลดลง ทนต่อการซักล้างได้ดี แต่อ่อนไหวต่อสารซักฟอกคลอรีน
ผงสี (pigment)	โดยทั่วไปเป็นสารสีประเภทสารอินทรีย์ทั้งหมด ไม่ละลายน้ำ จึงไม่สามารถยึดติดกับเส้นใยได้ ต้องใช้สารยึดเหนี่ยวพวก เรซิน และอบด้วยอุณหภูมิสูง มีทุกสี และให้สีสดใส	ใช้กับงานพิมพ์เป็นหลักบนผ้าฝ้าย รวมทั้งขนสัตว์ เรยอน แอซีเทต ไนลอน พอลิเอสเตอร์ และโอเลฟินส์	มีความคงทนสูง และ ความคงทนขึ้นกับตัวสารที่นำมาทำผงสี
สีไดเรกต์ (direct)	ใช้ย้อมจากน้ำละลายสีโดยตรงไม่ต้องย้อมผ้าด้วยสารช่วยติดก่อน เหมือนกับสีตัวอื่นๆ	นิยมใช้ย้อมผ้าฝ้าย ไหม	มีความคงทนสูง ทั้งต่อความร้อน กรด และด่าง
สีออกซิไดส์ (oxidation colorants)	ออกซิไดส์ด้วยสารเคมีที่เหมาะสม จะเกิดเป็นสีเกลืออะนินินไม่ติดใยเซลลูโลส	ย้อมติดกับใยเซลลูโลส	มีความคงทนสูง

ที่มา : รศ.ดร.วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา, อุตสาหกรรมสิ่งทอไทย

ตารางที่ 2.4 ความสามารถของสีข้อมในการข้อมติดเส้นใยชนิดต่างๆ

ชนิดสี	ชนิดเส้นใย					
	เซลลูโลส	โปรตีน	อะซิเตท	โพลีเอสเตอร์	ไนลอน	อะคริลิก
สีไคเร็กซ์	√	-	-	-	-	-
สีเบสติก	-	√	-	-	√	√
สีกรด	-	√	-	-	√	√
สีกำมะถัน	√	-	-	-	-	-
สีรีแอคทีฟ	√	√	-	-	-	-
สีอะโซอิก	√	-	√	-	√	-
สีแว็ต	√	-	√	-	-	-
สีดิสเพิร์ส	-	-	√	√	√	√
สีเมทัลคอมเพลกซ์	-	√	-	-	√	-
สีมอร์แดนท์	-	√	-	-	-	-

ที่มา : มณฑา จันท์เกตุเอี่ยม, วิทยาศาสตร์สิ่งทอเบื้องต้น, 2541

2.1.4.2 จำแนกชนิดสีโดยขบวนการวิธีข้อม ดังแสดงชนิดของสี ซึ่งจำแนกโดยขบวนการวิธีข้อม ดังนี้

ตารางที่ 2.5 การจำแนกชนิดสีโดยวิธีการข้อม

วิธีการข้อม	ลักษณะที่ได้
การข้อมโดยตรง	กำลังยึดระหว่างเส้นใย และตัวสีมีมาก การข้อมโดยตรงในน้ำซึ่งประกอบด้วยตัวสีและสารช่วยที่เหมาะสม ภาชนะน้ำข้อมจำแนกออกตามชนิดของสารช่วยออกเป็น 3 ชนิด คือ กรด ด่าง และเป็นกลาง สีในกลุ่มนี้ ได้แก่ สีข้อมโดยตรง สีกรด สีเบสติก สีดิสเพอส สีอะซิเตท ฯลฯ
การข้อมแบบต้องลดขนาดตัวสีก่อน	ตัวสีที่ไม่ละลายน้ำจะรวมตัวอยู่กับเส้นใยไม่ได้ เวลาข้อมต้องลดขนาดโมเลกุลของสีให้เล็กลงให้มากที่สุดก่อน (ละลาย) สารประกอบ leuco จะซึมเข้าไปภายในเส้นใย เวลาข้อมแล้ว ออกซิไดส์คืนเป็นตัวสีเดิมที่ไม่ละลายน้ำได้แก่สีกำมะถัน
การข้อมโดยวิธี ออกซิไดส์	ต้องข้อมเส้นใยด้วยสารออกซิไดส์ก่อนเพื่อให้สารนั้นทำปฏิกิริยาออกซิเดชันตัวสีกับเส้นใยให้เกิดเป็นสี สีในกลุ่มนี้ ได้แก่ สี oxidation สีแว็ตที่ละลายน้ำได้
การข้อมโดยการทำให้เกิดสี (developing)	ส่วนประกอบของสีแต่ละชนิดแยกกันข้อมทีละครั้ง การทำตกแต่งภายหลังให้เกิดเป็นสีไม่แต่เฉพาะจะใช้กับสีแนฟทาลเท่านั้น ใช้กับสีข้อมโดยตรงก็ได้ สีแนฟทาล และสี

ตารางที่ 2.5 (มีต่อ)

วิธีการย้อม	ลักษณะที่ได้
	อาซิเตคที่ต้องย้อมทับส่วนรวมอยู่ในกลุ่มนี้
การย้อมที่ต้องทำให้สีติด	สารที่ใช้เป็นตัวติดกับเส้นใยเองไม่ได้ ต้องทำให้ติดโดยการย้อมทับหรือตกแต่งภายหลังย้อม ใช้สารเคมีช่วย ได้แก่ ปีกเมนต์ชนิดต่างๆ
การย้อมโดยมีปฏิกิริยา	ตัวสีชนิดนี้ทำปฏิกิริยารวมตัวกับเส้นใยได้โดย covalent bond ระหว่างตัวสีกับเส้นใย ได้แก่ สิริแอคทีฟ (reactive dye)

ที่มา : อัจฉราพร ไสยะสุต. คร.เชิงรุ วาดานาเบ, วิศวกรรมสิ่งทอ, 2520

2.1.4.3 การจำแนกสีตามโครงสร้างเคมี

1. Azo Colorants
2. Phenylmethane Dyes
3. Xanthene Dyes
4. Indigoid Dyes
5. Polycyclicquinone (Anthraquinone, etc.) dyes
6. Sulphur Fusion Dyes
7. Amine Oxidation Colorants
8. Phthalocyanine Colorants
9. Onium Dyes
10. Reactive Dyes
11. Pigments

2.1.5 สิริแอคทีฟ

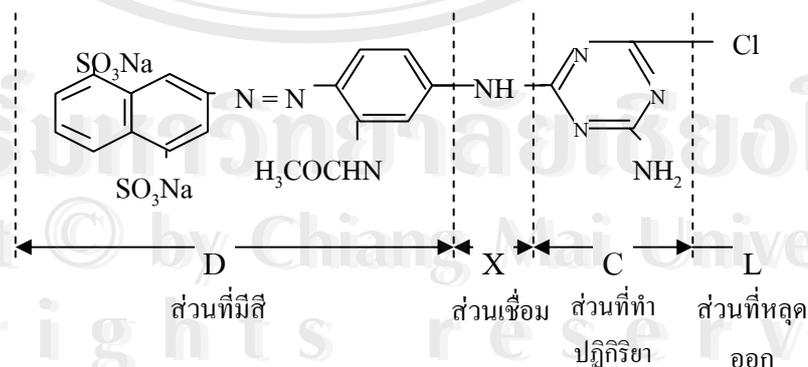
สิริแอคทีฟ เป็นสีย้อมที่สามารถทำปฏิกิริยาเกิดพันธะทางเคมีกับเส้นใยในสภาวะที่เหมาะสมได้ ก่อนที่จะมีการค้นพบสิริแอคทีฟ เมื่อปี ค.ศ. 1956 นั้น สีย้อมฝ้ายที่สำคัญมีเพียงสีไคเร็กซ์ สีแเว็ต และสีอะโซอิกเท่านั้น สีย้อมทั้ง 3 ประเภทนี้ล้วนมีข้อจำกัดในการใช้งาน กล่าวคือสีไคเร็กซ์แม้ว่าจะใช้ง่าย ราคาถูก แต่ความคงทนต่อการซักยังไม่ดีพอ ส่วนสีแเว็ตนั้น แม้ว่าจะให้ฝ้าย้อมที่มีความคงทนดีเลิศ แต่ก็มีราคาแพง และวิธีการย้อมก็ค่อนข้างยุ่งยาก อีกทั้งสีก็มีค่อนข้างจำกัด ส่วนสีอะโซอิกนั้นก็มีปัญหาข้อมสีเดิมได้ยาก โดยเฉพาะในกรณีใช้สีผสม การค้นพบสิริแอคทีฟทำให้เราได้สีย้อมประเภทใหม่ที่ปราศจากข้อจำกัดต่างๆ ดังกล่าวข้างต้น กล่าวคือ สิริแอคทีฟเป็นสีที่ข้อมง่าย และยังข้อมได้หลายวิธีไม่ว่าจะเป็นการย้อมแบบแช่ในอ่างข้อม แบบกึ่งต่อเนื่องหรือแบบต่อเนื่อง ทั้งยังให้ฝ้าย้อมที่มีความคงทนต่อการซักสูง ได้สีที่มีความสว่างสดใสมาก โดยเฉพาะ

เมื่อเทียบกับสียไคเร็กซ์หรือสียแควีต และยังมีสีอื่นต่างๆ ให้เลือกมาก ส่วนในด้านราคาก็ไม่แพงเกินไปจนเป็นที่ยอมรับกันว่า สียแควีตฟได้ทำให้ปริมาณการใช้สีย้อมฝ้ายประเภทอื่นๆ ลดลง โดยเฉพาะสียแควีต ซึ่งในปัจจุบันสียแควีตฟได้กลายเป็นสีย้อมฝ้ายที่มีความสำคัญมากประเภทหนึ่ง

สียแควีตฟ สามารถละลายน้ำได้ ทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในเส้นใยเซลลูโลส ได้พันธะโคเวเลนต์ที่มีความแข็งแรงกว่าพันธะไฮโดรเจนที่เกิดระหว่างสียไคเร็กซ์กับเส้นใยเซลลูโลสมากจึงมีความคงทนต่อการซักดี โครงสร้างทางเคมีของสียแควีตฟ ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 2 ส่วน

1. สารหรือกลุ่มเคมี ที่ทำให้เกิดสี (Coloring substance or Chromophore) ใช้แทนด้วยตัวอักษร “ D ”
2. ส่วนประกอบของกลุ่มไฮดรอกซิล หรือ อะมิโน ในโมเลกุลของสี เป็นกลุ่มที่ทำปฏิกิริยา (reactive component) ใช้แทนด้วยตัวอักษร “ R ”

ส่วนที่มีสีนั้น มีลักษณะโครงสร้างคล้ายคลึงกับโมเลกุลของสีย้อมต่างๆ ไป ส่วนใหญ่จะเป็นพวกสียอะโซ (Azo) แอนทราควินโนน (Anthraquinone) และฟทาโลไซยาเอมีน (Phthalocyanine) สำหรับส่วนที่เป็นกลุ่มทำปฏิกิริยานั้นสามารถแบ่งออกได้อีก 3 ส่วนคือ ส่วนที่ทำหน้าที่เชื่อมกับส่วนที่มีสี (ใช้แทนด้วยตัวอักษร “ X ”) ส่วนที่เป็นโครงสร้างหลักของกลุ่มทำปฏิกิริยา (ใช้แทนด้วยตัวอักษร “ C ”) และส่วนที่เป็นกลุ่มที่จะหลุดออกไป (Leaving group) (ใช้แทนด้วยตัวอักษร “ L ”) เมื่อสีย้อมทำปฏิกิริยากับเส้นใย ตัวอย่างสูตร โครงสร้างทางเคมีของสียแควีตฟ ที่แสดงให้เห็นเป็นส่วนประกอบต่างๆ ดังรูปที่ 2.4

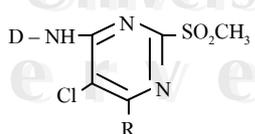
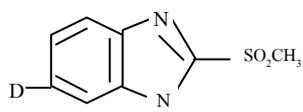


รูปที่ 2.4 โครงสร้างโดยทั่วไปของสียแควีตฟ

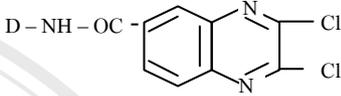
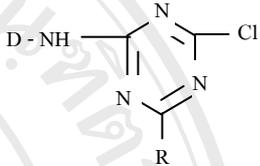
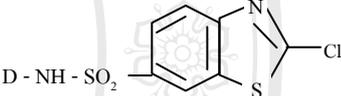
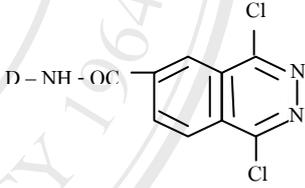
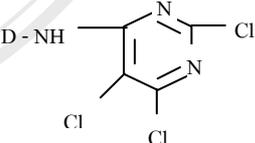
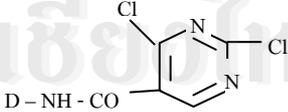
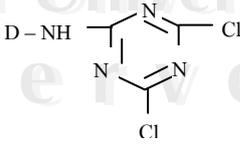
ที่มา : อัจฉราพร ไสละสูต. คร.เชิงรุ วาดานาเบ, วิศวกรรมสิ่งทอ, 2520

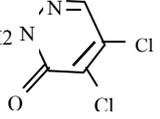
การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของกลุ่ม X กลุ่ม C หรือกลุ่ม L จะทำให้ได้สรีรเอคทีฟมีคุณสมบัติแตกต่างกันไปมากมาย สรีรเอคทีฟของแต่ละบริษัทนั้นส่วนมากจะแตกต่างกันที่กลุ่มทำปฏิกิริยา ซึ่งในขณะนี้ประมาณกันว่าในท้องตลาดมีสรีรเอคทีฟที่มีกลุ่มทำปฏิกิริยาชนิดต่างๆ อยู่ถึง 30 ชนิด โครงสร้างทางเคมีของกลุ่มทำปฏิกิริยานี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ประเภทที่อะตอมเรียงตัวกันเป็นแนวตรง (aliphatic chain) และประเภทที่อะตอมเรียงตัวกันเป็นวง (heterocyclic ring) ซึ่งชื่อทางการค้าและลักษณะโครงสร้างทางเคมีของกลุ่มทำปฏิกิริยาแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ชื่อทางการค้า และ โครงสร้างทางเคมีของกลุ่มทำปฏิกิริยา (R) ในสรีรเอคทีฟบริษัทต่างๆ

ชื่อบริษัท	ชื่อการค้า	ชื่อทางเคมีของกลุ่มปฏิกิริยา	โครงสร้างทางเคมีของกลุ่มทำปฏิกิริยา
1. Aliphatic Chain			
BASF	Primazin	β -sulphato propion amide	D-NH-OC-CH ₂ -CH ₂ -OSO ₃ H
Bayer	Levafix	β - sulphato ethy amide of sulphonic acid	D-SO ₂ -NH-CH ₂ -CH ₂ -OSO ₃ H
Cassella	Solidazol	β -sulphonyl propion amide	D-NH-OC-CH ₂ -CH ₂ -SO ₂ - 
Hoechst	Remazol	β -sulphato ethyl sulphone	D-SO ₂ -CH ₂ -CH ₂ -OSO ₃ H
	Remazol D	β -sulphato ethyl sulphonamide	D-NR-SO ₂ -NH-CH ₂ -CH ₂ -OSO ₃ H
2. Heterocyclic ring			
Bayer	Levafix P	Sulphonyl pyrimidine	
	Levafix P	2-sulphonyl benzo thiazole	

ตารางที่ 2.6 (มีต่อ)

ชื่อบริษัท	ชื่อการค้า	ชื่อทางเคมีของกลุ่มปฏิกิริยา	โครงสร้างทางเคมีของกลุ่มทำปฏิกิริยา
	Levafix E	Dichloro quinoxaline	
CIBA	Cibacron	Mono-chloro-s-triazine	
Du Pont	Cabalite	(เหมือน Levafix E)	
Francolor	Reatex	2-chloro benzothiazole	
	Elisiane	Dichloro phthalazine	
Geigy	Reactone	Trichloro pyrimidine	
	Reactofil	Dichloro pyrimidine	
ICI	Procion M	2,4-dichloro-s-triazine	
	Procion H	(เหมือน Cibacron)	
	Procion supra	(เหมือน Procion H แต่มีหมู่ปฏิกิริยา 2 หมู่ใน โมเลกุล)	

ชื่อบริษัท	ชื่อการค้า	ชื่อทางเคมีของกลุ่มปฏิกิริยา	โครงสร้างทางเคมีของกลุ่มทำปฏิกิริยา
Sandoz	Drimarene	(เหมือน Reactone)	
BASF	Primazin P	Pyridazone	$D-NH-OC-CH_2-CH_2-N$ 

ที่มา : เอกสารอบรมหลักสูตร วิทยาการฟอกย้อมสิ่งทอ, เรียบเรียงโดยกลุ่มงานเทคโนโลยีสิ่งทอ (เคมีสิ่งทอ) ส่วนอุตสาหกรรมสิ่งทอ

สีรีแอกทีฟนอกจากจะเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล ในเส้นใยเซลลูโลสแล้ว ยังสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำได้ด้วย ทำให้เกิดการสูญเสียสีบางส่วนไป แต่อย่างไรก็ตามสีส่วนใหญ่ยังคงมีแนวโน้มที่จะทำปฏิกิริยากับเส้นใยด้วยเหตุผล 2 ประการคือ

1. อัตราเร็วของปฏิกิริยาระหว่างสีกับเส้นใยสูงกว่าอัตราเร็วระหว่างสีกับน้ำมาก
2. มีความเป็นไปได้ที่สีจะกระจายตัวเข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยมากกว่าน้ำ

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใย ขึ้นอยู่กับอิทธิพลที่สำคัญ คือ

1. การดูดซึม (influence of affinity) สีจะดูดซึมเส้นใยดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของส่วนโมเลกุลที่ให้สี ถ้าใช้สีที่มีโครงสร้างในการดูดซึมเส้นใยน้อย ก็จะได้สีที่ไม่ทนต่อการซักล้าง และขัดถู แต่ถ้าสีที่ใช้มีแรงดึงดูดกับเส้นใยมาก การขจัดออกก็จะทำได้ยากตามไปด้วย ดังนั้นการดูดซึมของสีจึงมีความสำคัญมากในการเลือกใช้ตัวสีในแต่ละกระบวนการ

2. ปริมาณน้ำ (influence of liquor ratio) สีรีแอกทีฟนอกจากทำปฏิกิริยากับเส้นใยแล้วยังสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำด้วย โดยสีรีแอกทีฟที่ทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วเรียกว่า hydrolysed dye ซึ่งจะไม่สามารถทำปฏิกิริยากับเส้นใยอีก ทำให้สีย้อมติดเส้นใยลดลง ดังนั้นในการย้อมจึงต้องพยายามให้สีย้อมทำปฏิกิริยากับน้ำให้น้อยที่สุด ซึ่งสีย้อมที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาสูงก็จะทำปฏิกิริยากับน้ำได้ว่องไวด้วย

3. อุณหภูมิ (effect of temperature) สีย้อมที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาสูงสามารถย้อมได้ที่อุณหภูมิต่ำ (อุณหภูมิต่ำ) ซึ่งนับว่าเป็นข้อดีอย่างมากโดยปกติอุณหภูมิที่ใช้ในการย้อมจะแปรผันตามความว่องไวต่อปฏิกิริยาของกลุ่มทำปฏิกิริยา ดังนั้นในการย้อมจึงย้อมที่อุณหภูมิต่ำก่อนแล้วค่อยๆ เพิ่มอุณหภูมิขึ้น เพื่อให้สีดูดซึมเข้าไปได้มากขึ้น

4. ปริมาณอิเล็กโทรไลต์ (effect of electrolyte concentration) เมื่อปริมาณอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้น ความสามารถของน้ำสีในการดูดซึมเข้าไปในเส้นใย (เซลลูโลส) จะเพิ่มมากขึ้นด้วย

5. ค่า pH (effect of alkali) สีข้อมจะดูดซึมได้เร็วที่พีเอช 10.3 แต่ถ้าในน้ำข้อมมีพีเอชสูงกว่า 11 การดูดซึมก็จะลดลง และลดลงเรื่อยๆ เมื่อพีเอชเพิ่มสูงขึ้น

6. เส้นใย (effect of fiber) เซลลูโลสต่างชนิดกันจะดูดซึมสีข้อมได้ไม่เท่ากัน เช่น ฝ้ายชุบมันดูดซึมได้ดีกว่าฝ้ายธรรมดา ถ้ามีความหนาแน่นของเส้นใยสูงกว่าก็ดูดซึมได้น้อยลง

2.2 ทฤษฎีเบื้องต้นการดูดติดผิว

2.2.1 การดูดติดผิว (Surface Adsorption)

การดูดติดผิว เป็นการแยกอนุภาคออกจากของไหล (ก๊าซ หรือ ของเหลว) ให้มาติดบนพื้นผิวของแข็ง ซึ่งเรียกพื้นผิวสัมผัสนี้ว่า interfaces เรียกตัวกลางของแข็งนี้ว่า adsorbent และเรียกอนุภาคที่ถูกดูดติดว่า adsorbates โดยการดูดติดนี้เกิดกับตัวกลางชนิดเดียว หรือหลายชนิดกับของไหลที่ชนิดก็ได้ ระหว่างผิวตัวกลางกับอนุภาคสารจะต้องมีแรงดึงดูดระหว่างกัน แรงเหล่านี้มีความแรงต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามต้องมีมากพอที่จะดูดติดกันได้ ซึ่งสามารถแสดงชื่อเรียกส่วนต่างๆในการดูดติด ดังในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ชื่อเรียกส่วนต่างๆ ในการดูดติด

ที่มา : <http://www.rpi.edu/dept/chem-eng/Biotech-Environ/Adsorb/guide.htm>.

โดยสามารถแบ่งแรงดึงดูดนี้ได้เป็น 3 รูปแบบ

1. การดูดติดแบบแลกเปลี่ยน (Exchange adsorption) เป็นแรงที่เกิดขึ้นกับอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าโดยอนุภาคสามารถแลกเปลี่ยนไอออนกันได้ ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างผิวกับอนุภาคอนุภาคที่มีประจุสูงจะดูดติดได้ดี

2. การดูดซับแบบฟิสิกส์ (Physical adsorption) เป็นแรงดึงดูดที่เกิดจากแรง van der waals เกิดขึ้นภายในพื้นผิวตัวกลางแบบไม่เฉพาะเจาะจงบริเวณที่เกิด โดยเกิดที่อุณหภูมิต่ำ และลักษณะพลังงานในการดูดซับมีค่าน้อย

3. การดูดซับแบบเคมี (Chemical adsorption) เป็นแรงดึงดูดที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างอนุภาคสารกับตัวกลาง เกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง เพราะปฏิกิริยาเคมีส่วนใหญ่เกิดได้เร็วขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งการดูดซับแบบนี้มีลักษณะพลังงานในการดูดซับมีค่ามาก

โดยการดูดซับส่วนใหญ่เกิดจาก 3 รูปแบบนี้รวมกัน นอกจากนี้ยังมีผู้แบ่งแรงดึงดูดออกเป็น 2 ชนิด

ตารางที่ 2.7 ความแตกต่างของแรงดึงดูดบนพื้นผิว

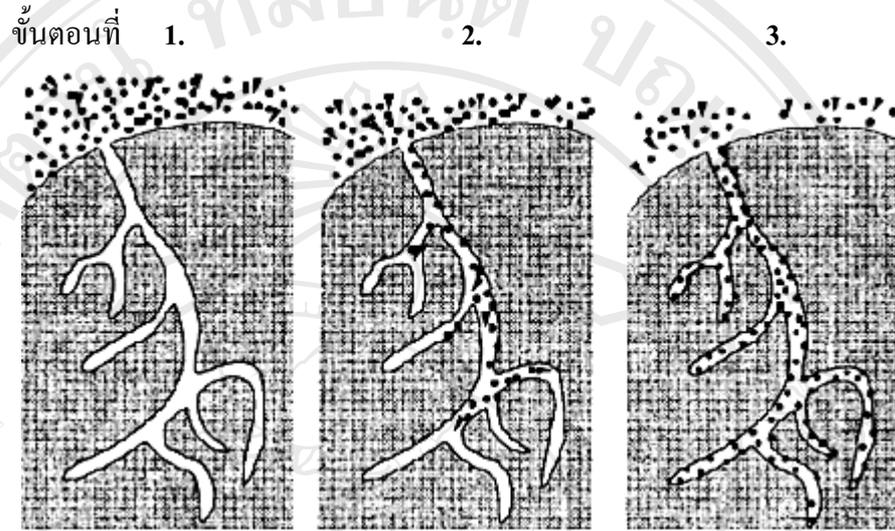
ลักษณะ	แรงดึงดูดทางฟิสิกส์	แรงดึงดูดทางเคมี
แรงดึงดูด	แรงทางฟิสิกส์ ส่วนใหญ่เกิดจากแรง Van der waals	เกิดจากปฏิกิริยาเคมี
ชั้นของอนุภาคบนตัวกลาง	มักมีอนุภาคเกาะติดหลายชั้น	มักมีอนุภาคชั้นเดียว
พลังงานกระตุ้น(activation energy)	ไม่มีพลังงานกระตุ้น	อาจมีพลังงานกระตุ้น
ช่วงอุณหภูมิ	อุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่าจุดเดือดของตัวกลาง)	สามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิสูง
ธรรมชาติของอนุภาค	จำนวนของอนุภาคหลุดออกจากตัวกลางมักขึ้นอยู่กับสมบัติของอนุภาคเองมากกว่าสมบัติของตัวกลาง	ขึ้นกับสมบัติทั้งของอนุภาคและตัวกลาง
ลักษณะผลึก	หลากหลาย ไม่ขึ้นกับพื้นผิวของตัวกลาง	เปลี่ยนแปลงตามพื้นผิว
ค่าความร้อน (heat of adsorption)	1 Kcal/mole	50 - 100 Kcal/mole

ที่มา : <http://www.eco-web.com>

กลไกการดูดซับ เกิดขึ้น 3 ขั้นตอน คือ

1. อนุภาคเคลื่อนที่ในของไหลเข้าไปใกล้พื้นผิวของตัวกลาง ผ่านชั้นของไหล (film diffusion)

2. อนุภาคเคลื่อนเข้าไปในรูของตัวกลาง (Pore Diffusion) ซึ่งถือเป็นจุดที่มีการดูดติดได้ เป็นส่วนใหญ่ เพราะภายในโพรงมี พื้นที่ผิวมาก
3. อนุภาคยึดติดกับตัวกลาง (Adhesion)



รูปที่ 2.6 กลไกการดูดติดของอนุภาคบนตัวกลาง

ที่มา : <http://lawr.ucdavis.edu/classes/ssc107/SSC107Syllabus/chapter6-01.pdf>.

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติด

1. พื้นที่ผิว (Surface area) การดูดติดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามพื้นที่ผิวสัมผัส ดังนั้นตัวกลางที่มีรูพรุนมากจึงมีความสามารถในการดูดติดมากกว่า

2. ธรรมชาติของอนุภาค (Nature of the adsorbate)

2.1 ความสามารถในการดูดติด แปรผกผันกับความสามารถในการละลายของอนุภาค กล่าวคือเมื่ออนุภาคละลายได้ดีจะสามารถดูดติดได้น้อย (Lundelius's rule)

2.2 ขนาดโมเลกุล โดยปกติตัวกลางที่มีขนาดเล็กจะมีอัตราเร็วในการดูดติดดีกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ (ตัวกลางชนิดเดียวกัน)

2.3 ประจุไฟฟ้า (Ionic species) อนุภาคที่มีโครงสร้างเป็นสายยาวแบบไม่ซับซ้อนจะดูดติดได้มากที่สุดที่สภาพธรรมชาติ และดูดติดได้น้อยลงเมื่อให้ประจุ ส่วนสารประกอบที่มีความซับซ้อนมากประจุไฟฟ้ามักไม่ค่อยมีผล

3. ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ส่วนใหญ่ความสามารถในการดูดติดของสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นเมื่อลด pH ลง

4. อุณหภูมิ (Temperature) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิความสามารถในการดูดซับลดลงเพราะปฏิกิริยาการดูดซับส่วนใหญ่เป็นแบบคายความร้อน

5. ส่วนประกอบของสารละลาย (Adsorption of Mixed Solutes) เมื่อสารละลายมีอนุภาคหลายชนิดอยู่ร่วมกัน โดยธรรมชาติของอนุภาคแต่ละชนิดอาจมีการแข่งขัน หรือส่งเสริมกันในการดูดซับ ดังนั้นชนิดของส่วนประกอบในสารละลายจึงมีความสำคัญ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายด้วย

6. ธรรมชาติของตัวกลาง (Nature of the adsorbent) ตัวกลางแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติในการดูดซับต่างกัน เนื่องจากมีรูพรุน และส่วนประกอบต่างกัน

2.2.2 สมดุลการดูดซับผิว(Adsorption Equilibrium)

adsorption isotherm เป็นสมการความสัมพันธ์ของอนุภาคในของไหลกับตัวกลาง บอกถึงจำนวนอนุภาคที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวกลาง ($X/M = q_e$) กับความเข้มข้นที่เหลืออยู่ในสารละลาย (C_e) ที่จุดสมดุล ใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำคัญที่ใช้ในการออกแบบ ในการศึกษาสมดุลการดูดซับผิว นิยมใช้สมมุติฐาน ดังนี้

1. Langmuir Equation มีสมมุติฐานว่า

- พลังงานที่ใช้มีลักษณะเหมือนกันทุกตำแหน่ง (uniform energies)
- โมเลกุลของอนุภาคถูกดูดซับชั้นเดียวบนผิวตัวกลาง (monolayer)
- พลังงานในการดูดซับมีค่าคงที่ (energy of adsorption is constant)
- อนุภาคไม่มีการย้ายตำแหน่ง (no transmigration)

สามารถนำมาเขียนเป็นสมการได้ ดังสมการที่ 2.1

$$\frac{X}{M} = \frac{abCe}{1 + bCe} \quad (2.1)$$

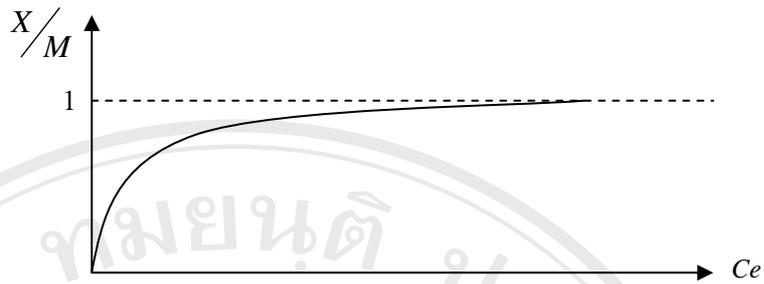
เมื่อ X = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับผิว

M = ปริมาณสารตัวกลางที่ใช้ดูดซับผิว

a, b = ค่าคงที่

C_e = ความเข้มข้นที่สถานะสมดุลของสารที่ถูกดูดซับผิว

นำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ X/M กับ C_e ได้ดังรูปที่ 2.7

รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ X/M กับ C_e

ที่มา : Davidson J.H. and P.H. McMurry, 2004

จากสมการที่ 2.1 เขียนในรูปสมการเส้นตรงได้ ดังสมการที่ 2.2

$$\frac{C_e}{X/M} = \frac{1}{ab} + \frac{1}{a} C_e \quad (2.2)$$

เมื่อนำสมการที่ 2.2 มาเขียนกราฟจะได้กราฟ ดังรูปที่ 2.8

รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ $\frac{C_e}{X/M}$ กับ C_e

ที่มา : Davidson J.H. and P.H. McMurry, 2004

จากกราฟความสัมพันธ์พบว่า

- a มีค่ามากทำให้ค่า X/M มาก ความสามารถในการดูดซับดี
- b มีความสัมพันธ์กับพลังงานในการดูดซับ โดย b มีค่ามากเมื่อแรงดึงดูดระหว่างพื้นผิวมีค่าสูง

2. The Freundlich Equation (Van Bemmelen equation)

- สมการได้มาจากการทดลอง

- สมการที่ได้มีความเฉพาะเจาะจงกับกรณี โดยอนุภาคจัดเรียงตัวหลายชั้น และแต่ละชั้นมีพลังงานต่างกัน (heterogeneous surface energies)

สามารถนำมาเขียนเป็นสมการได้ ดังสมการที่ 2.3

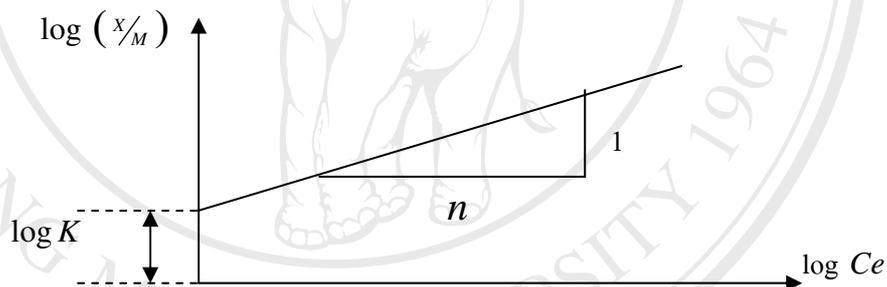
$$\frac{X}{M} = KCe^{1/n} \quad (2.3)$$

เมื่อ $K, n =$ ค่าคงที่

จากสมการที่ 2.3 สามารถนำมาเขียนในรูปสมการเชิงเส้นได้ ดังนี้

$$\log \frac{X}{M} = \log K + \frac{1}{n} \log Ce \quad (2.4)$$

เมื่อนำสมการที่ 2.4 มาเขียนกราฟจะได้กราฟ ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ $\log (X/M)$ กับ $\log Ce$

ที่มา : Davidson J.H. and P.H. McMurry, 2004

จากรูปที่ 2.9 พบความสัมพันธ์ ดังนี้

$-\frac{1}{n}$ เป็นค่าความชันของเส้นตรง บอกถึงความแข็งแรงของแรงดึงดูดที่

ผิว ซึ่งในการดูดติดสารอินทรีย์บนผิวถ่านกัมมันต์ ส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่า 1 เมื่อ $\frac{1}{n}$ มีค่ามาก (ค่าเข้าใกล้ 1) ความสามารถในการดูดติดผิวมีค่าสูงที่ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (Ce) สูง และจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นลง นอกจากนี้เมื่อ $\frac{1}{n}$ มีค่าน้อย ความสามารถในการดูดติดผิวจะลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (Ce) ให้ลดลง

- X/M เป็นค่าความสามารถในการดูดซับ มีค่าขึ้นอยู่กับความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายในของเหลว โดย X/M มีค่าสูงขึ้น เมื่อค่าความเข้มข้นของสารละลายในของเหลวที่สมดุลมีค่าสูงขึ้น

ลักษณะการจัดเรียงตัวของอนุภาคบนผิวตัวกลางแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.10

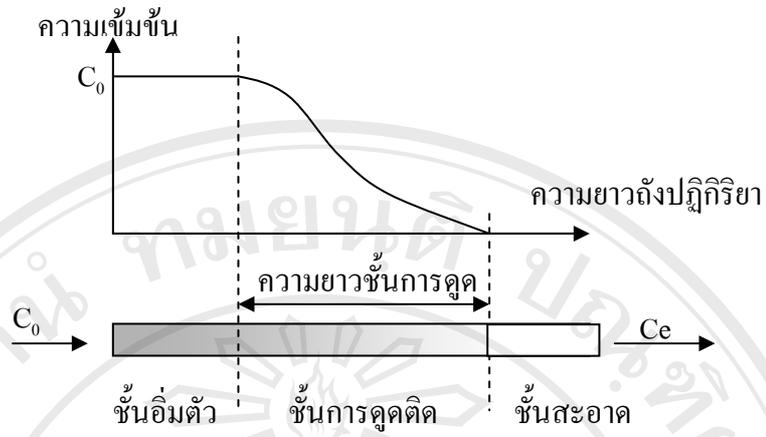


รูปที่ 2.10 ลักษณะการจัดเรียงชั้นของอนุภาค

ที่มา : <http://www.cheric.org/ippage/d/ipdata/2003/01/file/d200301-1101.ppt>.

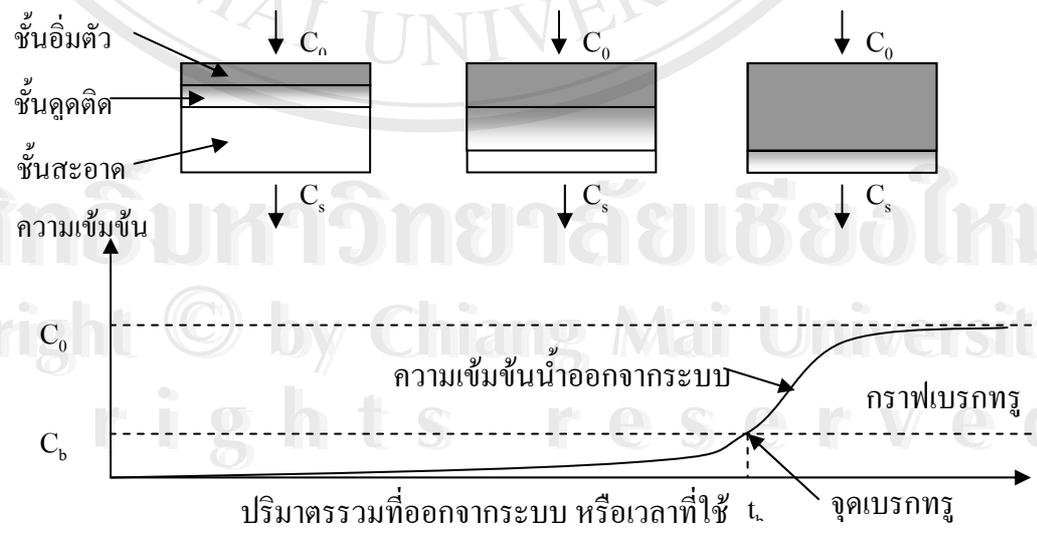
2.3 ลักษณะของกราฟเบรคทู (Breakthrough curve) และการเคลื่อนย้ายมวลสารสำหรับ Fixed-bed adsorption column

เมื่อพิจารณาการดูดซับแบบต่อเนื่องที่มีการจ่ายน้ำเสียผ่านชั้นตัวกลางในถังปฏิกิริยาแบบไหลจากด้านบนลงล่าง พบว่าด้านบนของถังปฏิกิริยาจะมีการดูดซับอนุภาคก่อน แล้วเคลื่อนชั้นของการดูดซับลงไปเรื่อยๆ จนหมดชั้นตัวกลาง ทำให้ชั้นตัวกลางที่อยู่ด้านบนสุดอึดตัวด้วยอนุภาคสารก่อนตัวกลางที่อยู่ด้านล่างของถังปฏิกิริยา ดังนั้นจึงสามารถแบ่งชั้นตัวกลางออกเป็น 3 ชั้นใหญ่ๆ ได้เป็นชั้นแรกคือชั้นสารตัวกลางอึดตัวด้วยอนุภาค (Saturated zone) ชั้นที่ 2 เป็นชั้นที่ตัวกลางกำลังดูดซับอนุภาคเรียกว่า ชั้นการดูดซับ (Mass transfer zone or Adsorption zone : MTZ) ซึ่งมีความยาวเท่ากับ L_{MTZ} ส่วนชั้นสุดท้ายตัวกลางยังไม่เกิดการดูดซับอนุภาค เรียกว่า ชั้นสะอาด (Clean zone or Fresh zone) ดังตัวอย่างของการแบ่งชั้นของสารตัวกลาง และความเข้มข้นของอนุภาคในชั้นต่างๆ ในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างของการแบ่งชั้นของสารตัวกลาง และความเข้มข้นของอนุภาคในชั้นต่างๆ
ที่มา : <http://lawr.ucdavis.edu/classes/ssc107/SSC107Syllabus/chapter6-01.pdf>.

เมื่ออนุภาคถูกดูดติดในชั้นตัวกลาง แล้วเลื่อนต่อลงมาจนหลุดออกจากถังปฏิบัติการ ก็จะสามารถตรวจพบอนุภาคนั้นๆ ได้ จนกระทั่งหมดสภาพการดูดติดผิวที่ส่วนล่างของชั้นสารตัวกลาง เรียกจุดนี้ว่าจุดเบรคทรู (Breakthrough point) หรือจุด C_b นั่นคือถึงจุดที่น้ำออกจากระบบมีความเข้มข้นถึงค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งหลังจากจุดนี้ต่อไปกราฟแสดงความสัมพันธ์ของเวลา (หรือปริมาณน้ำที่ออกจากระบบ) กับความเข้มข้นของอนุภาคที่หลุดออกมาจากถังปฏิบัติการก็จะได้กราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้งเรียกว่า กราฟเบรคทรู (Breakthrough curve) จนถึงจุดหมดสภาพ (Exhaustion point) ดังแสดงลักษณะกราฟความเข้มข้นของอนุภาคที่ออกจากระบบเทียบกับเวลา ในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างลักษณะกราฟความเข้มข้นของอนุภาคที่ออกจากถังปฏิบัติการเทียบกับเวลา
ที่มา : <http://lawr.ucdavis.edu/classes/ssc107/SSC107Syllabus/chapter6-01.pdf>.

ส่วนใหญ่กราฟเบรคทรูจะมีลักษณะคล้ายตัวเอส (S-Shape) หากกราฟมีความชันมากแสดงว่ามีค่าคงที่การดูดติดสูง (Film Transfer Coefficient and Internal Diffusion Coefficient) หรือ Freundlich Adsorption Isotherm มีลักษณะความชันต่ำ ($\frac{1}{n}$ มีค่าน้อย)

การหาความยาวของ Mass Transfer Zone หาได้โดยใช้สมการที่ 2.5

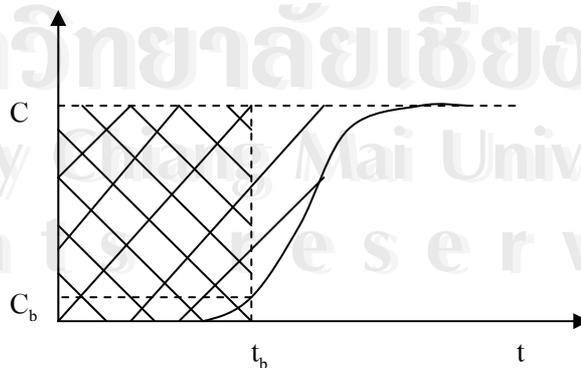
$$L_m = L \left(1 - \frac{t_b}{t_s} \right) \quad (2.5)$$

เมื่อ L_m = ความยาวของ Mass Transfer Zone
 L = ความสูงทั้งหมดของชั้นสารดูดติด
 t_b = เวลาที่ใช้ในการบำบัดน้ำ จากเวลาเริ่มต้นเดินระบบ จนถึงเวลาที่น้ำออกจากระบบมีความเข้มข้นเกินค่าที่ยอมรับได้ (Breakthrough Time)
 t_s = เวลาที่ใช้ในการบำบัดน้ำจากเวลาเริ่มต้นเดินระบบ จนถึงเวลาที่สารตัวกลางถูกดูดติดจนหมด (Time to Saturation)

ค่า t_b และ t_s สามารถหาได้ด้วยสมการที่ 2.6 และ 2.7

$$t_b = \int_0^{t_b} \left(1 - \frac{C}{C_0} \right) dt \quad (2.6)$$

$$t_s = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{C}{C_0} \right) dt \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.13 การหาค่า t_b และ t_s จาก Breakthrough Curve

ที่มา : Davidson J.H. and P.H. McMurry, 2004

ค่าความยาวของ Mass Transfer Zone ยังอาจหาได้ด้วยสมการที่ 2.8

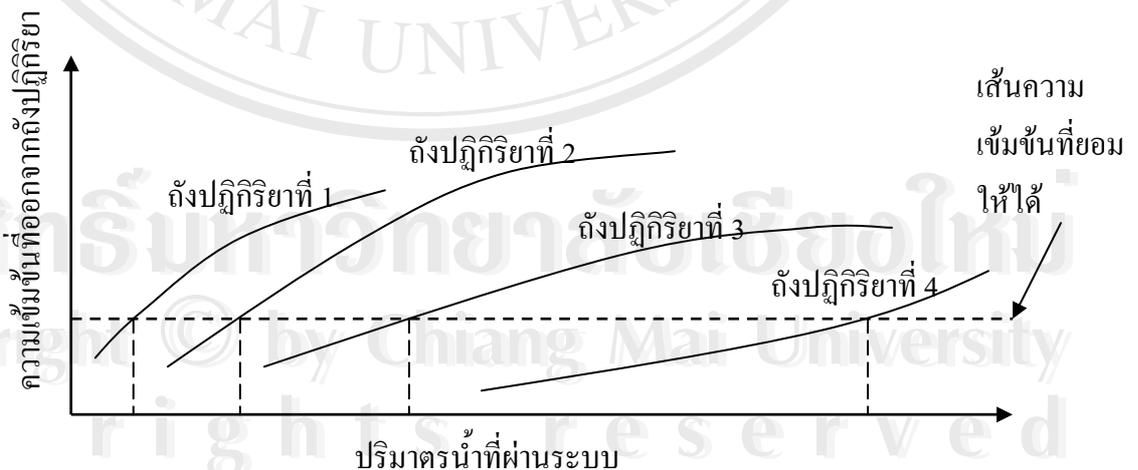
$$Z_s = Z \left(\frac{V_Z}{V_T - 0.5V_Z} \right) \quad (2.8)$$

เมื่อ Z_s = ความยาว Mass Transfer Zone
 Z = ความสูงทั้งหมดของชั้นสารดูดติด
 V_T = ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัด จากเวลาเริ่มต้นเดินระบบ จนถึงจุดหมดสภาพของสารตัวกลาง
 V_Z = ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัด ระหว่างจุดเบรกทรู จนถึงจุดหมดสภาพของสารตัวกลางหรือมีค่าเท่ากับ $V_T - V_B$

2.3.1 การประยุกต์ใช้งานของตัวกลางสำหรับ Fixed-bed adsorption column

1 วิธี Empty Bed Contact Time (EBCT)

ตัวแปรหลักที่ใช้ในการพิจารณา คือ เวลาสัมผัส และอัตราการใช้ตัวกลาง (usage rate) โดยวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคที่ออกจากถังปฏิกริยากับเวลาหรือปริมาณของน้ำที่ผ่านในแต่ละถังปฏิกริยา กำหนดค่าความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมรับได้ จากนั้นขีดเส้นตรงในแนวราบตัดผ่านทุกถังปฏิกริยาในกราฟ จะได้ปริมาณของถังปฏิกริยา (Breakthrough volume) แต่ละถังที่ต้องการ ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับปริมาณของน้ำที่ผ่านในแต่ละถังปฏิกริยา

ที่มา : Davidson J.H. and P.H. McMurry, 2004

ค่า EBCT หาได้จากสมการ ดังนี้

$$EBCT = \frac{\text{bed volume}}{\text{hydraulic surface loading} \times \text{bed surface area}} \quad (2.9)$$

เมื่อ
$$\text{Bed volume} = \frac{\text{weight of carbon}}{\text{carbon bulk density}} \quad (2.10)$$

$$EBCT = \frac{\text{bed volume}}{\text{flow rate}} \quad (2.11)$$

$$EBCT = \frac{\text{bed depth}}{\text{linear velocity}} \quad (2.12)$$

$$EBCT = \frac{\text{bed depth}}{\text{hydraulic surface loading}} \quad (2.13)$$

$$\text{usage rate} = \frac{\text{weight of carbon in column}}{\text{volume at breakthrough}} \quad (2.14)$$

2.4 สรุปสาระสำคัญของเอกสารที่เกี่ยวข้อง

G. Mckay et al. (1999) ได้ศึกษาโดยนำเอาแกลบข้าว เศษฝ้าย เปลือกไม้สัก เส้นผม และ ถ่านไม้บิบูมินัส มาดูดติดสี Safranin and Methylene Blue โดยนำตัวกลางทั้ง 5 ชนิดมาบดให้มี ขนาด 424.2 ไมโครกรัม ล้างด้วยน้ำสะอาด อบให้แห้ง แล้วนำมาทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง โดย ทดลองที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ใช้ความเข้มข้นสี 10 ถึง 1,000 พีพีเอ็ม. และแบบต่อเนื่อง โดย ใช้ขนาดถึงปฏิกิริยาเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.01 เมตร สูง 0.15 เมตร ความเข้มข้นสี 100 มก./ลบ.ม. อัตราการไหล 0.12 ลบ.ม/ชม. ผลที่ได้จากการทดลองแบบไม่ต่อเนื่องคือ เปลือกไม้สักดูดติดได้ดี ที่สุดทั้ง Methylene Blue และ Safranin โดยใช้ Langmuir isotherm ผลจากการทดลอง แบบต่อเนื่องโดยใช้ Langmuir equations พบว่า เปลือกไม้ เศษฝ้าย และแกลบข้าว สามารถดูดติด ได้ดี จุดเบรกทรู้อยละ 50 ของตัวกลางแต่ละชนิดมีค่าดังนี้ เปลือกไม้ มีค่ามากกว่า 100 ซม. แกลบ ข้าวมีค่า 36 ซม. เศษฝ้ายมีค่า 20 ซม. และเส้นผมความสามารถในการดูดติดไม่ค่อยดี

Kadirvelu^a K. et al. (2003) ได้ศึกษาโดยการนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเปลือกต้นฝ้าย เศษ ต้นมะพร้าว ของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตสาธู ชั่งข้าวโพด และแกนต้นกล้วย มาใช้ดูดติดสี

rhodamine-B, Congo red, methyl violet, methylene blue, malachite green, mercury (HgCl_2) and nickel (NiSO_4) ผลที่ได้จากการศึกษา คือ ถ่านกัมมันต์ที่ทำจากขังข้าวโพดสามารถดูดติด methylene blue, methyl violet, mercury and nickel ได้ทั้งหมดในเวลา 1 ชั่วโมง ในสภาวะกรด

Michael Angelo B. et al. (2000) ได้ศึกษาการใช้ฟางข้าวในการดูดติดสี Basic Rhodamine B โดยนำฟางข้าวมาทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง และแบบต่อเนื่อง ตัวกลางแยกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกไม่ผ่านกระบวนการใด มีค่า pH 2 ส่วนที่ 2 นำมาผ่าน $\text{NaOH-H}_2\text{O}_2$ มีค่า pH 12 ผลที่ได้จากการศึกษาแบบไม่ต่อเนื่อง คือ ที่ pH 2 มีความสามารถในการดูดติดสีดีกว่าที่ pH 12 ประมาณร้อยละ 65 และผลจากการทดลองแบบต่อเนื่องคือ เมื่อความสามารถในการดูดติดเพิ่มขึ้นตาม อัตราการไหล ความเข้มข้นของน้ำเข้าระบบ โดยค่า pH มีผลเพียงเล็กน้อย

Nigam^a P. et al. (2000) ได้ศึกษาโดยการนำเอาฟางข้าวสาธิต เศษไม้ เศษขังข้าวโพด มาใช้ดูดติดสีย้อมผ้า 8 ชนิดคือ Cibacron Red, Remazol Navy Blue, Remazol Red, Cibacron Orange, Remazol Golden Yellow, Remazol Blue, Remazol Turquoise Blue and Remazol Black B dyes ใช้ความเข้มข้น 200-500 มก./ล. และใช้ฟางข้าวสาธิต ขังข้าวโพด ขนาด 3x3x2 ลบ.ม. และเศษไม้ ขนาด 1x3x1 ลบ.ม. โดยใช้ปริมาณ 10 ก./100 มล. ของสารละลายสี ทดลองหาความสามารถในการดูดติดที่อุณหภูมิ 20 30 และ 45 °C นาน 48 ชม. จากนั้นนำเอาตัวกลางที่ผ่านการทดลองแล้วมาทำให้แห้งนำมาหมักโดยใช้จุลินทรีย์ คือ *Phanerochaete chrysosporium* 671.71 or *Coriolus versicolor* MUCL (UUC-stock) ภายใต้ภาวะขาดออกซิเจน ผลที่ได้จากการศึกษาคือ ฟางข้าวสาธิตมีอัตราการดูดติดสีและสามารถดูดติดสีดีที่สุด ส่วนเศษไม้คุณภาพในการดูดติดสีน้อยที่สุด เมื่อความเข้มข้นของสีมีค่าเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดติดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในทุกตัวกลาง อัตราการดูดติดเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และเศษไม้มีอัตราการดูดติดเร็วที่สุด ผลจากการหมักพบว่าฟางข้าวสาธิต และขังข้าวโพด มีจำนวนจุลินทรีย์มากกว่าเศษไม้ เมื่อวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนพบว่าฟางข้าวสาธิตมีปริมาณโปรตีนมากที่สุดที่เวลาหมักเท่ากัน

Orlando U.S. et al. (2001) ได้ศึกษาโดยการนำเอา ชานอ้อย ฟางข้าว เซลลูโลส และแอลคาไลคลิกนิน มาใช้ในการดูดติด $\text{N,N-dimethylformamide}$ โดยทำให้ตัวกลางเป็นประจุลบ เพื่อแลกเปลี่ยนประจุกับไนเตรท วิธีเตรียมตัวกลางโดย นำเอาตัวกลางทั้ง 4 ชนิดอย่างละ 10 กรัมแช่ใน epichlorohydrine 100 มก. รวมกับ DMF 120 มก. นาน 1 ชั่วโมง ที่ 100 องศาเซลเซียส เติม pyridine 40 มก. ลงในสารละลายแช่ต่อานาน 1 ชั่วโมง ที่ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นเติมร้อยละ 50

dimethylamine solution 100 มก. นาน 1 ชั่วโมง ที่ 100 องศาเซลเซียส นำตัวกลางที่ผ่านการเขย่ามาล้างด้วย 0.1M NaOH 0.1 M HCl and diluter athanol ตามลำดับ ที่ 40 องศาเซลเซียส แล้วนำมาหาค่าความสามารถในการดูดติดโดยใช้การทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง ผลจากการศึกษาคือ การเติม pyridine ทำให้ในโตรเจนดูดติดผิวของตัวกลางได้ดีกว่าไม่เติม การดูดติดดีขึ้นเมื่อมีการเพิ่มเวลาสัมผัส และเมื่อเพิ่มประมาณ pyridine มากขึ้น ฟางข้าวมีความสามารถในการดูดติดในโตรเจนได้ดีที่สุด ในการศึกษานี้ใช้ Langmuir isotherm

Robinson T. et al. (2002) ได้ศึกษาโดยการนำเอาฟางข้าวสาทิ ชั่งข้าวโพด และแกลบข้าวบาเลย์ มาใช้ในการดูดติดสีย้อมผ้า โดยสีที่ใช้ทดลองได้แก่ Cibacron Yellow C-2R, Cibacron Rad C-2G, Cibacron Blue C-R, Remazol Black B and Remazol Red RB ซึ่งใช้เป็นน้ำเสียดังเคราะห์ มีความเข้มข้น 100 มก./ล. นำตัวกลางทั้ง 3 ชนิดตัดเป็นชิ้นขนาด 2x4 มม. 1x4 มม. และ 1x4 มม. ตามลำดับ จากนั้นตัวกลางทั้ง 3 ชนิดแบ่งออกอย่างละ 0.5 กรัม จำนวน 4 ชุด ชุดแรกนำไปผ่านการอบไอน้ำที่ 121 °C นาน 15 นาที ชุดที่ 2 นำไปแช่ 0.25 โมลาร์ NaOH นาน 1 ชั่วโมง แล้วทำให้เป็นกลางด้วย HCl ชุดที่ 3 นำไปแช่ใน 2.9 โมลาร์ NH₄OH นาน 24 ชั่วโมงที่ 22 °C ชุดที่ 4 นำไปบดให้มีขนาดน้อยกว่า 600 ไมโครเมตร แล้วอบที่ 80°C นาน 24 ชั่วโมง พบว่า ตัวกลางแบบบด (ชุดที่ 4) สามารถดูดติดสีได้ดีในทุกตัวกลาง สำหรับตัวกลางชุดที่ 1 2 และ 3 ให้ผลในการดูดติดใกล้เคียงกัน แกลบข้าวบาเลย์มีอัตราเร็วในการดูดติดสีที่สุด โดยในการศึกษารั้งนี้ใช้ Langmuir and Freundlich isotherm

Robinson T. et al. (2002) ได้ศึกษาโดยการนำเอา ชั่งข้าวโพด และแกลบข้าวบาเลย์ มาใช้ในการดูดติดสีย้อมผ้า สีที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ Cibacron Yellow C-2R, Cibacron Blue C-R, Remazol Black B, and Remazol Red RB ซึ่งใช้เป็นน้ำเสียดังเคราะห์ มีความเข้มข้น 10 20 30 40 50 100 150 และ 200 มก./ล. นำตัวกลางทั้ง 2 ชนิดมาตัดเป็นชิ้นขนาด 1x4 มม. และ บดให้มีขนาดน้อยกว่า 600 ไมโครเมตร ตามลำดับ ตัวกลางทั้ง 2 ชนิด ใช้ปริมาตร 1 2 และ 5 กรัม พบว่า ที่ขนาด 1x4 มม. แกลบข้าวบาเลย์ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารละลายสี การดูดติดสีมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่วนชั่งข้าวโพดเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารละลายสี การดูดติดสีมีค่าลดลง ที่ขนาดน้อยกว่า 600 ไมโครเมตร อัตราเร็วการดูดติดสีที่ขนาด 1x4 มม. ทั้ง 2 ชนิด เมื่อใช้ปริมาณตัวกลาง 1 กรัมเท่ากัน ทดลองที่ขนาด 1x4 มม. และขนาดน้อยกว่า 600 ไมโครเมตร พบว่าแกลบข้าวบาเลย์ ดูดติดสีได้ดีกว่าชั่งข้าวโพด ซึ่งแกลบข้าวบาเลย์ ในอนาคตสามารถพัฒนาโดยใช้เทคโนโลยีการหมักด้วย ฟังไจ (Fungi) ในการดูดติดกากของเสียได้