บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์

ความรู้ที่ว่าถ่านเป็นสารดูดติดผิว (adsorbent) และสามารถนำมาใช้งานได้นั้นเกิดขึ้นมานานมาก ในศตวรรษที่ 13 ถ่านถูกนำมาใช้ในกระบวนการฟอกสารละลายน้ำตาล และต่อมาในช่วงปลายศตวรรษที่ 18 มีการสังเกตเห็นความสามารถของถ่านในการกำจัดสีจากของเหลว และในช่วงกลางศตวรรษที่ 19 ประเทศอังกฤษได้ใช้ถ่านในการกำจัดรสและกลิ่นจากน้ำดื่ม จุดเริ่มต้นเหล่านี้นำไปสู่การพัฒนาการผลิตน้ำประปาและการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ถ่านทั้งในชุมชนและอุตสาหกรรม อาทิเช่น โรงงานเหล้าไวน์และเบียร์ โรงงานกระดาษและเยื่อกระดาษ โรงงานยา โรงงานอาหาร อุตสาหกรรมปิโตรเลียมและปิโตรเคมี เป็นต้น (Cheremisinoff และ Ellerbusch , 1978)

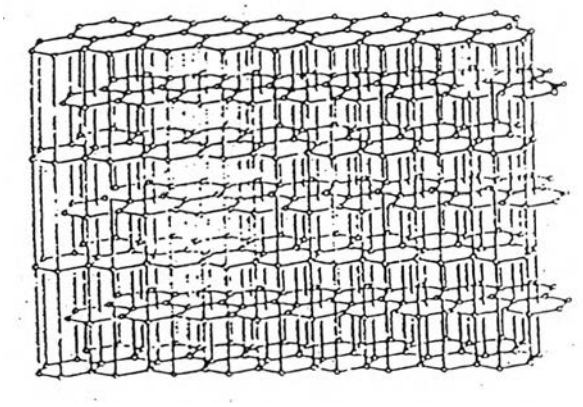
การดูดติดผิวมีความสามารถกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำเสีย ที่เป็นทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยอาศัยกลไกทางฟิสิกส์เคมี สำหรับสิ่งเจือปนในน้ำเสียที่กระบวนการดูดติดผิวกำจัดได้ทีหลากหลายเช่น สี กลิ่น บีโอดี ซีโอดี และยาฆ่าแมลงเป็นต้น (Metcalf และ Eddy ,1991)

ถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดติดผิวชนิดสำคัญ ทำจากวัตถุดิบได้หลายชนิด คือ ไม้ชนิดต่างๆ ขี้เลื่อย ถ่านบิทูมินัส กระดูก กะลามะพร้าว ลิกไนต์ ซากพืช โดยผ่านกระบวนการเพื่อทำให้เกิดรูพรุนจำนวนมากที่ผิว ในด้านคุณภาพถ่านจะแตกต่างกันไปตามชนิดวัตถุดิบ ถ่านกัมมันต์ที่นิยมใช้สำหรับงานบำบัดน้ำเสียส่วนมากทำจากถ่านหินและถ่านโค้กชนิดต่างๆ เนื่องจากข้อได้เปรียบทางด้านราคาและแหล่งจำหน่าย

ถ่านดูดติดผิวแบ่งตามลักษณะทางกายภาพโดยอาศัยขนาดได้เป็น 2 ชนิดคือ ถ่านเม็ด (Granular Carbon) และถ่านผง (Powered Carbon) เนื่องจากผ่านกระบวนการเพื่อทำให้เกิดรูพรุนจำนวนมากที่ส่วนผิวแล้วจึงเรียกว่าถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) สำหรับถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 0.1 มม. ส่วนถ่านกัมมันต์ชนิดผงมีขนาดเล็กกว่ารูตะแกรงเบอร์ 200 (Mulligan และ Fox ,1976).

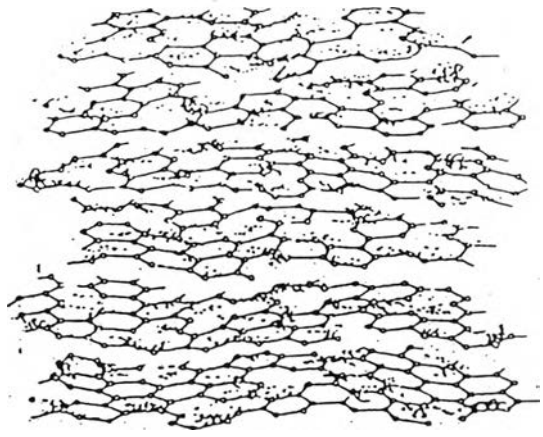
2.1.1 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างเป็นกลุ่มของคาร์บอนซึ่งมีลักษณะคล้ายกราไฟท์ แต่แตกต่างกันที่พื้นที่ผิวภายในของถ่านกัมมันต์ซึ่งมีมากมาย กราไฟท์ประกอบด้วยแผ่นชั้นที่เกิดจากอะตอมของคาร์บอนซึ่งเรียงตัวกันแบบหกเหลี่ยมด้านเท่า (Regular Hexagons) ระยะห่างระหว่างอะตอมของคาร์บอนในแต่ละชั้นมีขนาด 1.42 A° โดยในแต่ละชั้นเรียงตัวขนานกันระยะห่างระหว่างชั้นมีขนาด 3.35 A° อิเลคตรอน 3 ใน 4 ตัวของคาร์บอนจะสร้างพันธะโควาเลนซ์ (Covalent Bond) กับอะตอมที่ติดกัน ขณะที่อิเลคตรอนตัวที่ 4 เคลื่อนที่ระหว่างโครงสร้างวาเลนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของกราไฟท์ (Faust และ Aly, 1987)

โครงสร้างของถ่านกัมมันต์แตกต่างจากกราไฟท์ ซึ่งจะมีโครงสร้างเป็นผลึกที่เล็กมาก (Microcrystallites) ประกอบด้วยวงหกเหลี่ยมด้านเท่าของอะตอมคาร์บอนผสมกัน เส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นคาร์บอนที่สร้างผลึกเล็กๆ มีขนาดประมาณ 150 A° และระยะทางระหว่างผลึกเล็กๆ นี้มีค่าอยู่ระหว่าง 20-50 A° ดังแสดงในรูป 3.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ (Faust และ Aly, 1987)

2.1.2 สมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์

สมบัติบางประการของถ่านกัมมันต์ ที่นำมาใช้สำหรับกำหนดการใช้งานของถ่านกัมมันต์นั้นๆ (Cheremisinoff และ Ellerbusch, 1978) คือ

ก. พื้นที่ผิว (Surface Area) : ใช้กำหนดขีดความสามารถของการดูดติดผิว

ข. ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent Density) : ใช้บอกถึงโอกาสสูญเสียจากการใช้งาน

ค. ความหนาแน่นเชิงปริมาตร (Bulk Density) : ใช้กำหนดปริมาณถ่านที่ใช้

ง. ขนาดประสิทธิผล (Effective Size) : กำหนดสภาพทางชลศาสตร์

จ. ปริมาตรรูพรุน (Pore Volume) : ใช้กำหนดการดูดติดผิวของโมเลกุล

ฉ. การวิเคราะห์ผ่านตะแกรง (Sieve Analysis) : ใช้ตรวจสอบและกำหนดการบังคับการควบคุมระบบ

ช. อะบราชั่นนัมเบอร์ (Abrasion Number) : ระบุถึงความคงทนต่อการขัดสี

ซ. ร้อยละของขี้เถ้า (Ash Percent) : ระบุปริมาณกากที่เหลือจากการเผา

ฌ. ความชื้น (Mositure) : ระบุถึงปริมาณน้ำในถ่านกัมมันต์

ญ. ไอโอดีนนัมเบอร์ (Iodine Number) : ใช้กำหนดความจุของการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ในการดูดติดผิวสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

ฎ. โมลาสนัมเบอร์ (Molasses Number) : ใช้กำหนดความจุของการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ในการดูดติดผิวสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง

ฎ. ฟีนอลนัมเบอร์ (Phenol number) : ใช้กำหนดความจุของการดูดติดผิว

ฐ. ขนาดรูพรุน (Pore Size) : ใช้กำหนดขีดจำกัดในการดูดติดผิวโมเลกุลจำเพาะบางชนิด

2.1.3 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์มีมากมายหลายวิธี ซึ่งขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบและสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ ซึ่งโดยทั่วไปประกอบด้วย 3 ขั้นตอนดังนี้

2.1.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ

ถ่านกัมมันต์สามารถเตรียมได้จากวัสดุหลายชนิดดังตารางที่ 3.1 และควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ (บุญชัย ตระกูลมหชัย,2536)

- เป็นวัสดุเหลือทิ้ง หรือมีราคาถูก
- มีปริมาณคาร์บอนสูง
- มีปริมาณสารอนินทรีย์ต่ำ
- มีความสะดวกในการนำมาใช้งาน เช่น ไม่สลายตัวเมื่อเก็บ
- สามารถผลิตถ่านกัมมันต์ที่คุณภาพสูงได้

ตารางที่ 2.1 วัสดุที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ (Faust และ Aly, 1987)

ขานอ้อย	ของเสียจากโรงงาน	เปลือกถั่ว
สลัดจ์ของพืชผักกาด	ปลา	หินน้ำมัน
เลือด	ฝุ่น	ลูกพีท
กระดูก	แก่นผลไม้	สลัดจ์จากปิโตรเลียม
แป้ง	กราไฟท์	ถ่านปิโตรเลียม
ธัญพืช	สาหร่าย และวัชพืช	โปแตสเซียมเฟอโรไซยาเนต
ถ่าน	เขม่า	ของเสียจากโรงงานกระดาษ
กะลามะพร้าว	ของเสียจากโรงงานฟอกหนัง	รำข้าว
เมล็ดกาแฟ	ลิกนิน	ยาง
ซังข้าวโพด	ลิกไนต์	ผงเลื่อย
เมล็ดฝ้าย	กากน้ำตาล	ไม้

การผลิตถ่านกัมมันต์สามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรง หรือเริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วก็ได้ และโดยทั่วไปจะนำวัตถุดิบมาบดและคัดขนาดก่อนที่จะนำมาคาร์บอไนซ์

2.1.3.2 **การคาร์บอไนเซชั่น** (Carbonization)

การคาร์บอไนซ์เป็นกระบวนการไพโรไลซิสรูปแบบหนึ่งที่เผาในที่อับอากาศด้วยอุณหภูมิ 200-500 องศาเซลเซียส มีจุดมุ่งหมายคือเพิ่มเปอร์เซนต์คาร์บอนให้สูงขึ้น โดยให้ความร้อนแก่วัสดุจนกระทั่งสารปนเปื้อนที่ไม่ใช่คาร์บอนสลายตัวไป การคาร์บอไนซ์เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ เพราะเป็นขั้นตอนการเริ่มต้นการเกิดโครงสร้างที่เป็นรูพรุน โดยทำให้เกิดการแตกตัวทางเคมีของสารที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจน ออกมาในรูปก๊าซ คาร์บอนอิสระที่มีอยู่จะรวมตัวกันในรูปของซาร์ ถ่านซาร์ที่ได้ควรมีลักษณะดังนี้

- มีสีดำตลอด (Uniformly Black)
- เมื่อหักดู ส่วนที่หักจะมีผิวมันเงา
- ปลายที่หักจะแหลมคม (Sharp)
- ปราศจากผงฝุ่นและขี้เถ้า

ในการพิจารณาภาวะเหมาะสมของการคาบอไนซ์ จะพิจารณา ปริมาณสารระเหย ควบคู่ไปกับปริมาณผลิตภัณฑ์ และคาร์บอนคงตัว จากข้อมูลของ บุญชัย ตระกูลมชัย,2537 พบว่า ถ่านที่เหมาะสมควรมีปริมาณสารระเหยอยู่ในช่วงร้อยละ 20-25 และควรจะใช้อุณหภูมิและเวลาไม่สูงมากนัก สำหรับช่วงคาร์บอไนซ์นั้นถ่านซาร์ที่ได้จากการคาร์บอไนซ์ จะมีความสามารถในการดูดซับต่ำ ทั้งนี้เพราะว่าการทำถ่านซาร์ใช้อุณหภูมิประมาณ 200-500 องศาเซลเซียส ยังคงมีน้ำมันทาร์ตกค้างอยู่ภายในช่องว่าง (Pore) หรือเกาะอยู่ตามผิว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำถ่านซาร์ไปผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับต่อไป

2.1.3.3 **กระบวนการกระตุ้นถ่านซาร์**

วิธีการกระตุ้นเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์ สามารถแบ่งได้ดังนี้

ก. วิธีกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation) เป็นวิธีการผลิตสารกระตุ้นทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารเคมีที่นิยมใช้ ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) และกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ข้อดีของการกระตุ้นด้วยวิธีนี้คือใช้

อุณหภูมิไม่สูงมากนัก (400-600 องศาเซลเซียส) แต่มีข้อเสียคือมีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีออก อีกทั้งอุปกรณ์ที่ใช้ต้องเป็นชนิดพิเศษที่ทนการกัดกร่อน

ข. วิธีกระตุ้นทางฟิสิกส์ (Physical Activation) เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยให้ผิวของคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์ เช่น การจัดเรียงตัวใหม่ ซึ่งจะทำให้ถ่านเพิ่มความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ก๊าซที่นิยมใช้ในการออกซิไดซ์ได้แก่ ไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวด คาร์บอนไดออกไซด์ และออกซิเจน โดยใช้ร่วมกับความร้อน ปฏิกิริยาการกระตุ้นอาจเกิดจากความร้อนเพียงอย่างเดียว แต่ต้องใช้อุณหภูมิสูงมาก 1,200 องศาเซลเซียส แต่ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จะมีคุณภาพต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์ ปัจจัยที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์ คือ

- สมบัติทางเคมีและความเข้มข้นของก๊าซออกซิไดซ์ที่ใช้
- อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา
- ระยะเวลาของปฏิกิริยา
- ชนิดและปริมาณวัตถุดิบที่ใช้

อุณหภูมิที่ใช้ไม่สามารถกำหนดได้แน่นอนแต่มักไม่เกิน 1000 องศาเซลเซียส เพราะว่าถ้าใช้อุณหภูมิสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส จะทำให้อำนาจการดูดซับของถ่านลดน้อยลง อุณหภูมิที่ใช้ส่วนมากประมาณ 800-900 องศาเซลเซียส

การกระตุ้น คาร์บอนจะทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์ เป็นคาร์บอนไดออกไซด์แพร่ออกจากผิวของคาร์บอน เกิดแก๊สซิฟิเคชั่นบางส่วนของเม็ดถ่านเป็นรูพรุนในโครงสร้างของถ่าน ถ่านจากการคาร์บอไนซ์จะประกอบด้วยรูพรุนเล็กๆจำนวนมาก ซึ่งเกิดจากช่องว่างระหว่างผลึกในการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอม รูพรุนนี้จะถูกอุดตันไว้ด้วยทาร์ที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อนและถูกขัดขวางด้วยอะมอฟัสคาร์บอน ดังนั้นการกระตุ้นจึงเป็นการเปิดรูพรุนที่ถูกปิด และสร้างรูพรุนขึ้นมาใหม่ด้วย

2.2 กระบวนการดูดติดผิว

โดยทั่วไปแล้วปรากฏการณ์การดูดผิวเป็นปรากฏการณ์ระหว่างของเหลว-ของเหลว ของเหลว-ของแข็ง ของแข็ง-ของแข็ง รวมถึง ก๊าซ-ของเหลว แต่การใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดติดผิวสารอินทรีย์ในน้ำเสียนั้นเป็นปรากฏการณ์ระหว่างของแข็งและของเหลว (Metcalf และ Eddy, 1991)

การดูดติดผิวแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอน (Cheremisinoff และ Ellerbusch, 1978) คือ การดูดทางฟิสิกส์ (chemisorption) เมื่อโมเลกุลของสารใดๆ ในของเหลวเคลื่อนตัวมาผสมบริเวณผิวของของแข็ง ซึ่งเป็นผลจากแรงดึงดูดของสารดูดติดผิวที่มีต่อโมเลกุลนั้นมากกว่าพลังงานจลน์

(kinetic energy) ของโมเลกุลสารนั้น โมเลกุลของสารในของเหลวจะเกาะติดกับโมเลกุลของของแข็งด้วยแรงแวนเดอร์วัลล์ (Van der Waal's force) อันเป็นขั้นตอนการดูดทางฟิสิกส์ ซึ่งมีการดัวของโมเลกุลของของเหลวเป็นชั้นๆ จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของสารดูดติดผิวและสารถูกดูดติดผิว กลายเป็นสารประกอบเคมีใหม่ ขั้นตอนนี้เป็นการดูดทางเคมี ซึ่งเมื่อเกิดแล้วจะคงอยู่ในรูปนั้น ไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปได้(irreversible) แต่การดูดทางฟิสิกส์สามารถแปรสภาพกลับไปมาได้(reversible)

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว

ก. สมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของสารดูดติดผิว เช่น พื้นที่ผิวมีผลต่อขีดความสามารถการดูดติดผิว ปริมาตรรูพรุนกำหนดการดูดติดผิวโมเลกุลน้ำเสีย ส่วนประกอบทางเคมีมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดติดผิว เป็นต้น

ข. สมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของสารถูกดูดติดผิว เช่น ขนาดโมเลกุลมีผลต่ออัตราการดูดติดผิว, ส่วนประกอบทางเคมีมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดติดผิว โดยให้ผลมากน้อยแตกต่างกันไปตามชนิดของสารละลาย เป็นต้น

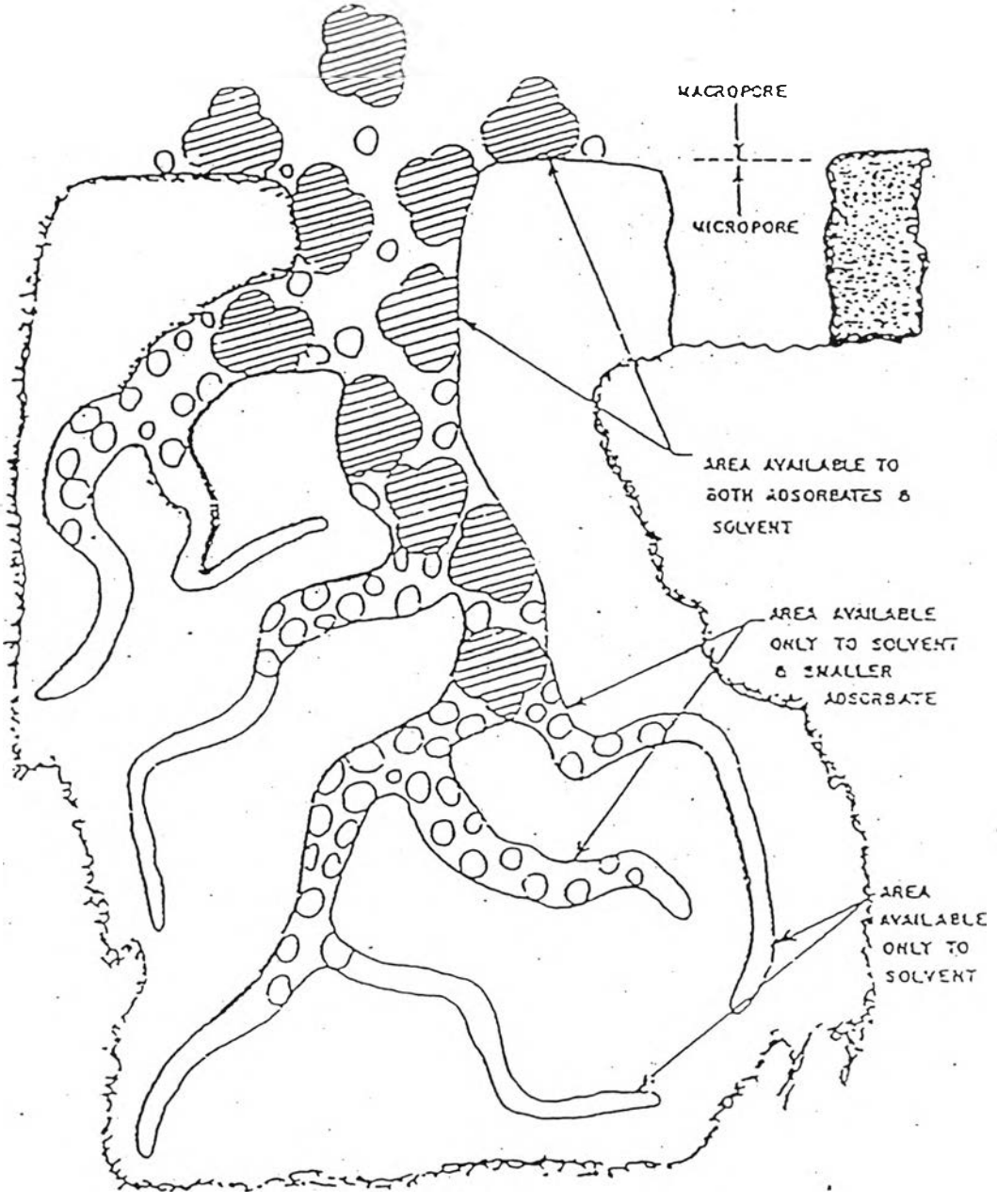
ค. ความเข้มข้นของตัวดูดติดผิวในสารละลาย หากเข้มข้นมากอัตราการดูดติดผิวจะมาก

ง. ลักษณะของสารละลาย เช่น พีเอชและอุณหภูมิมีผลต่ออัตราการดูดติดผิว เป็นต้น

จ. ระยะเวลาสัมผัสหรือเวลาในการดูดติดผิว หากมีเวลามากจะให้ประสิทธิภาพการดูดติดดี

การดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์สามารถกำจัดสารประกอบอินทรีย์ในน้ำเสียบางส่วนที่ไม่สามารถถูกย่อยสลายทางชีววิทยา ซึ่งอาจมีบางส่วนที่ก่อให้เกิดพิษรวมถึงกลิ่น รสและสีที่ไม่สามารถกำจัดด้วยวิธีทั่วไปได้ สำหรับประสิทธิภาพในการดูดิตดผิวสารอินทรีย์ในน้ำเสียของถ่านกัมมันต์ขึ้นกับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ ปกติมีค่าพื้นที่ผิวอยู่ในช่วงประมาณ 500-1400 ตารางเมตร/กรัมถ่านกัมมันต์ รวมถึงลักษณะทางเคมีของผิวถ่านกัมมันต์ซึ่งสัมพันธ์กับแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล เช่นผิวของถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติเป็นเบสจะส่งผลต่อการดูดติดสีและสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่อิ่มตัว กล่าวคือความสามารถในการดูดติดผิว จะขึ้นอยู่กับลักษณะของถ่านและชนิดของสารที่จะถูกดูดติดผิวร่วมกัน

สำหรับลักษณะโดยทั่วไปของถ่านกัมมันต์ เมื่อพิจารณาจากภาพขยายของภาพตัดตามขวางดังรูปที่ 2.3 จะสามารถแบ่งรูพรุนออกได้เป็นสองขนาดคือรูพรุนใหญ่ (macropores) มีขนาด



รูปที่ 2.3 ภาพตัดขวางถ่านกัมมันต์เม็ด (Cheremisinoff และ Ellerbusch, 1978)

เส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 1000 A^{o} ส่วนใหญ่ที่บริเวณผิวนอกของถ่านกัมมันต์จะประกอบไปด้วยรูพรุนใหญ่

โมเลกุลของสารอินทรีย์ที่เคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของถ่านกัมมันต์จะฟุ้งกระจายเข้าไปในรูพรุนใหญ่ แล้วจึงเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุนจิ๋วหากโมเลกุลของสารอินทรีย์นั้นไม่ใหญ่กว่าขนาด รูพรุนจิ๋ว อัตราการดูดติดผิวจึงถูกควบคุมด้วยอัตราการฟุ้งกระจายของโมเลกุลเข้าไปในรูพรุนของถ่าน โดยอัตราการดูดติดผิวนี้จะแปรผันกลับกันกับกำลังสองของเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุล, น้ำหนักโมเลกุลและค่าพีเอช แต่จะแปรผันตามกำลังสองของเวลาสัมผัสระหว่างโมเลกุลของสิ่งสกปรกกับถ่านกัมมันต์ และความเข้มข้นของสิ่งสกปรกในน้ำเสียที่จะบำบัด (Metcalf และ Eddy, 1991)

2.2.1 การวิเคราะห์กระบวนการดูดติดผิว

กระบวนการดูดติดผิวมีลำดับการเกิด 3 ลำดับ คือ การขนถ่ายใหญ่ (macro transport), การขนถ่ายเล็ก (micro transport) และการดูดติดผิว (sorption) (Metcalf และ Eddy, 1991)

การขนถ่ายใหญ่หมายถึงการเคลื่อนที่ของอนุภาคของสารถูกดูดติดผิวในน้ำโดยการพาและการซึมผ่าน การขนถ่ายเล็กหมายถึงการซึมผ่านของอนุภาคของสารถูกดูดติดผิวเข้าไปในรูพรุนใหญ่ของถ่านกัมมันต์เม็ด และการดูดหมายถึงขั้นตอนการเกาะติดของอนุภาคของสารถูกดูดติดผิวบนถ่านกัมมันต์เม็ด

ปริมาณของสารถูกดูดติดผิวที่สามารถถูกดูดติดผิวโดยถ่านกัมมันต์เม็ด มีความสัมพันธ์กับทั้งสมบัติและความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิวรวมถึงอุณหภูมิด้วย โดยทั่วไปพิจารณาถึงปริมาณของสารถูกดูดติดผิวที่สามารถถูกดูดติดผิวดังเช่นความสัมพันธ์ของความเข้มข้นที่อุณหภูมิคงที่และผลของความสัมพันธ์นี้ถูกเรียกว่า "ไอโซเทอมการดูดติดผิว" (adsorption isotherm) สมการที่ใช้สำหรับบรรยายข้อมูลไอโซเทอมในการทดลองถูกพัฒนาขึ้นมา 3 สมการ โดย Freundlich, Langmuir และโดย Brunauer, Emmet และ Teller จากทั้ง 3 สมการนี้ ฟรุนดลิชไอโซเทอมจะใช้เป็นเครื่องมือสำหรับบรรยายสมบัติการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในงานบำบัดน้ำและน้ำเสียบ่อยที่สุด (Metcalf และ Eddy, 1991)

2.2.1.1 ฟรุนดลิชไอโซเทอม

ฟรุนดลิชไอโซเทอมมีรูปสมการดังนี้ (Metcalf และ Eddy, 1991)

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

เมื่อ x/m = ปริมาณทั้งหมดโดยน้ำหนักของสารถูกดูดติดผิวที่ถูกดูดติดต่อหน่วยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์

C_e = ความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิวในสารละลายที่จุดสมดุลภายหลังการดูดติดผิว

K_f, n = ค่าคงที่เอ็มไพริกัล หรือค่าคงที่จากการทดลอง

ค่าคงที่ในฟรุนดลิชไอโซเทอม สามารถหาได้โดยการกำหนดจุดบนกราฟระหว่างค่า log x/m กับค่า logC_e ที่ C_e = 1 จะได้ค่า K_f และค่า $1/n$ เท่ากับค่าความชันของเส้นกราฟ สามารถเขียนสมการใหม่ที่ใช้หาค่าคงที่จากการทดลองได้ดังนี้

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

2.2.1.2 แลงมัวร์ไอโซเทอม

แลงมัวร์ไอโซเทอมีรูปสมการดังนี้ (Metcalf และ Eddy, 1991)

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

เมื่อ x/m = ปริมาณทั้งหมดโดยน้ำหนักของสารถูกดูดติดผิวที่ถูกดูดติดต่อหน่วยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์

a, b = ค่าคงที่เอ็มไพริกัล

C_e = ความเข้มข้นของสารถูดดูดติดผิวในสารละลายที่จุดสมดุลภายหลังการดูดติดผิว

ค่าคงที่ในแลงมัวร์ไอโซเทอม สามารถหาได้โดการกำหนดจุดบนกราฟระหว่างค่า $C_e / (x/m)$ กับค่า C_e หาค่า a ได้จากค่าความชันของเส้นกราฟซึ่งมีค่าเท่ากับ $1/a$ และหาค่า b ได้จากค่าที่จะจุดตัดแกน y ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1/ab$ สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

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

2.2.1.3 **บีอีทีไอโซเทอม**

บีอีทีไอโซเทอมจะมีรูปสมการดังนี้ (Lary และคณะ ,1982)

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

เมื่อ x/m = ปริมาณทั้งหมดโดยน้ำหนักของสารถูกดูดติดผิวที่ถูกดูดติดต่อหน่วยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์

x_m = ปริมาณทั้งหมดของสารถูกดูดติดผิวที่ถูกดูดติดในแบบผนังชั้นเดียวโดยสมบูรณ์

C_s = ความเข้มข้นอิ่มตัวของสารถูกดูดติดผิวในสารละลาย

C = ความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิวในสารละลายที่จุดสมดุล

A = ค่าคงที่ใช้บรรยายพลังงานของการเกิดร่วมกันระหว่างสารถูกดูดติดผิวกับพื้นที่ผิวของสารดูดติดผิว

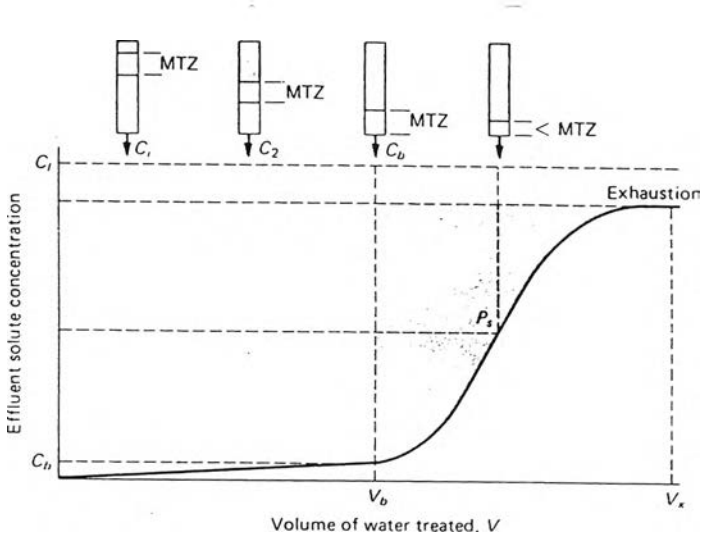
ค่าคงที่ในบีอีทีไอโซเทอมสามารถหาได้โดยการกำหนดจุดบนกราฟระหว่างค่า $\frac{C}{(C_s - C)\, x/m}$ กับค่า C/C_s หาค่า A ได้จากค่าความชันของของเส้นกราฟซึ่งมีค่าเท่ากับ $(A\text{-}1) / A\ (x_m)$ และค่าที่จุดตัดแกน Y ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1/ A\ (x_m)$ และสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

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

2.2.1.4 เขตการถ่ายเทมวล

ในพื้นที่ของชั้นถ่านกัมมันต์เม็ดซึ่งเกิดการดูดติดผิวหรือดูดแนบเรียกว่า "เขตการถ่ายเทมวล" (mass transfer zone) หรือ MTZ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 หลังจากน้ำที่ปนเปื้อนไหลผ่านเข้าไปในขอบเขตของชั้นที่มีความลึกเท่ากับ MTZ ความเข้มข้นของสิ่งปนเปื้อนในน้ำจะถูกลดลงมาที่ค่าต่ำสุดของมัน ถ้าหากเวลาสัมผัสชั้นที่ว่างสั้นเกินไปหรือความยาวของ MTZ มากกว่าความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์เม็ด สิ่งปนเปื้อนที่สามารถกำจัดได้จะไม่ถูกกำจัดไปอย่างสมบูรณ์

ความหนาของ MTZ แปรผันกับอัตราการไหลเพราะว่าการกระจาย การแพร่ และการเกิดร่องในตัวกลางเม็ดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราการไหล



รูปที่ 2.4 กราฟเบรกทรูสำหรับถ่านกัมมันต์ที่แสดงการเคลื่อนที่ของ MTZ เทียบกับปริมาตรที่ผ่านทั้งหมด (Metcalf และ Eddy, 1991)

มีทางเดียวที่จะใช้ความจุที่ก้นคอลัมน์ให้ได้งานด้วย คือ การต่อสองคอลัมน์แบบอนุกรมหรือใช้หลายคอลัมน์ต่อขนาน

สำหรับความลึกของชั้นและอัตราการไหลที่เหมาะสม รวมถึงความจุปฏิบัติการของถ่านกัมมันต์จะต้องถูกพิจารณาเพื่อกำหนดขนาดและจำนวนคอลัมน์ที่จำเป็นสำหรับการกำจัดแบบต่อเนื่องทั้งนี้เพราะว่าค่าพารามิเตอร์เหล่านี้กำหนดได้จากการทดสอบคอลัมน์พลวัต(dynamic column test) จึงได้แนะนำว่าควรมีการศึกษาด้วยโรงงานนำร่องก่อน (Metcalf และ Eddy, 1991)

2.2.1.5 ความจุการดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์

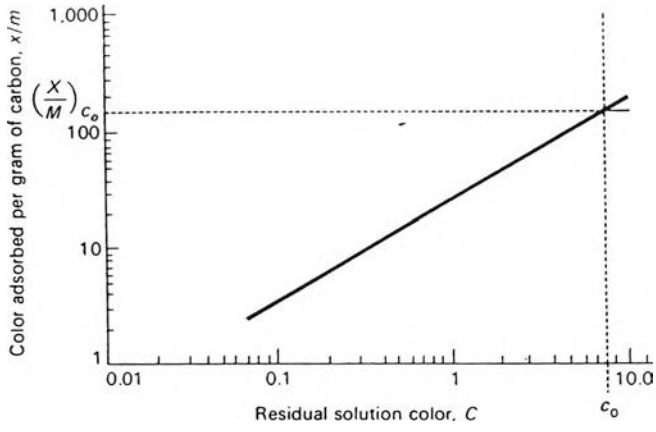
ความจุดูดติดผิวของถ่านที่กำหนดประมาณค่าได้จากข้อมูลของไอโซเทอร์ม (Metcalf และ Eddy, 1991) เมื่อข้อมูลของไอโซเทอมถูกกำหนดลงบนกราฟจะได้ผลไอโซเทอร์มดังแสดงในรูป 3.5 ความจุดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์สามารถประมาณได้จากเส้นแนวตั้งจากจุดสเกลบนแนวนอนซึ่งเป็นความเข้มข้นเริ่มต้น *(Co)* ไปตัดกับเส้นไอโซเทอร์มแล้วลากเส้นแนวนอนไปยังสเกลบนแนวตั้ง ได้ค่าที่แสดงปริมาณทั้งหมดโดยน้ำหนักของตัวดูดถูกดูดติดผิวที่ถูกดูดติดต่อหน่วยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ เมื่อถ่านกัมมันต์อยู่ที่จุดสมดุลกับความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกละลาย $x/m(Co)$

2.2.1.6 ความจุการดูดติดผิวเบรกทรู

ความจุการดูดติดผิวเบรกทรู $(x/m)_b$ ของถ่านกัมมันต์เม็ดในคอลัมน์เต็มมาตราส่วนในงานมีค่าน้อยกว่าความจุการดูดติดผิวทางทฤษฎีที่หาได้จากไอโซเทอม $(x/m)_b$ ของคอลัมน์เดี่ยว สามารถถือได้ว่ามีค่าประมาณ 25 ถึง 50% ของความจุทางทฤษฎี $(x/m)_o$

เมื่อรู้ค่า $(x/m)_b$ แล้วสามารถคำนวนหาค่าเวลา t_b ที่ทำให้เกิดเบรกทรูได้ดังสมการ (Metcalf และ Eddy, 1991)

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



รูปที่ 2.5 รูปแบบฟรุนดลิชไอโซเทอม (Metcalf และ Eddy, 1991)

2.3 การมองเห็นสี

การมองเห็นสีจะเกิดได้เมื่อมีองค์ประกอบสี่ประการคือ แสง วัตถุ(สี) นัยน์ตาของผู้มองเห็น และสมองที่จะวิเคราะห์หรือตีความสิ่งที่เห็น ส่วนแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ต้นกำเนิดแสงอาจมาจากดวงอาทิตย์หรือแหล่งกำเนิดแสงอื่นที่มนุษย์เป็นผู้สร้างขึ้นก็ได้ ช่วงความยาวคลื่นที่ตามนุษย์สามารถรับภาพได้อยู่ในช่วงประมาณ 400 – 700 นาโนเมตร ในปีค.ศ. 1666 Sir Isaac Newton ได้ค้นพบว่าสีทั้งหมดรวมกันอยู่ในแสงธรรมชาติ โดยแสงธรรมชาติหรือแสงแดดสามารถถูกแยกออกโดยการให้แสงส่องผ่านปริซึม ซึ่งจะทำให้เกิดการแบ่งสีตามลักษณะความยาวคลื่นคือ สีม่วง สีน้ำเงิน สีน้ำเงิน-เขียว สีเหลือง สีส้ม และสีแดง

2.4 สีย้อม

2.4.1 ลักษณะโดยทั่วไปของสีย้อม

สีย้อมเป็นสารเคมีที่สำคัญสำหรับการฟอกย้อม โดยจะทำหน้าที่ให้สีติดไปกับผ้าหรือด้ายที่นำมาย้อม โดยคุณสมบัติของสีที่จะติดผ้าชนิดต่างๆนั้น ต้องติดคงทน ทนต่อแสงแดด น้ำ สบู่

และน้ำยาซักแห้ง ดังนั้นเมื่อสีย้อมส่วนที่ไม่ได้ติดไปกับเนื้อผ้าก็จะปนไปกับน้ำทิ้ง ซึ่งจะกลายเป็นน้ำเสียที่ยากแก่การบำบัดเพราะจะมีโครงสร้างที่ซับซ้อน

(ธงชัย พรรณสวัสดิ์.,2527) กล่าวว่าสีย้อมที่นำมาใช้ในการย้อมเส้นใยมีอยู่ด้วยกันมากมายหลายชนิด การที่จะนำสีย้อมใดๆ มาใช้ย้อมให้ได้ผลดีนั้น ขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใยซึ่งต้องมีมากกว่าอำนาจการรวมตัวของสีกับน้ำ เราจะสามารถทำให้เกิดสภาวะเช่นนี้ขึ้นได้เมื่อโมเลกุลของสีย้อมมีหมู่อะตอมซึ่งถูกจัดให้เรียงตัวกันในลักษณะที่จะทำให้เกิดการดูดติดกับเส้นใยแล้วเกิดพันธะยึดกันแน่น อาจกล่าวได้อย่างกว้างๆ ว่าอิทธิพลเชิงเคมี 4 ชนิดที่ทำให้สีดูดติดกับเส้นใยได้คือ

ก. พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond)

ข. แรงแวนเดอวัลส์ (van der waals forces)

ค. แรงไอออน (ionic forces)

ง. พันธะโควาเลนท์ (covalent bone)

กำลังแรงเหล่านี้มักจะไม่ทำหน้าที่แต่เพียงลำพัง การดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับโมเลกุลของเส้นใยอย่างน้อยจะต้องประกอบไปด้วยแรง 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งก็อาจจะเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน สำหรับแรงยึดติดทางเคมีที่จะให้การยึดติดได้ดีที่สุด ได้แก่ พันธะโควาเลนท์

การยึดติดของโมเลกุลสีย้อมกับโมเลกุลเส้นใยนอกจากจะเป็นอิทธิพลเชิงเคมีของแรงทั้ง 4 ชนิดแล้ว อิทธิพลด้านเรขาคณิตของโมเลกุลของสี หรืออาจกล่าวง่ายๆ ว่ารูปร่างและขนาดของสีก็มีผลต่อการยึดติดหรือมีผลกระทบต่อการย้อมอย่างมากด้วย เช่น ถ้าโมเลกุลของสีย้อมยิ่งเล็กและยาวเท่าไรก็จะผ่านช่องว่างเข้าไปในเส้นใยได้มากขึ้นเท่านั้น อันจะทำให้การติดสีดีขึ้น หรือถ้าโมเลกุลของสีย้อมมีลักษณะแบนและมีความกว้างมากกว่าความยาวมากๆ จะทำให้เกิดการติดสีมีความคงทนสูงมากขึ้น ดังนี้เป็นต้น

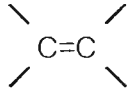
2.4.2 การเกิดของสีย้อม (อำพล เตโชวณิชย์.,2541)

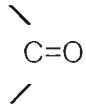
สีซึ่งปรากฏออกมาทำให้ตามนุษย์ปกติมองเห็นได้เกิดมาจากการจัดเรียงตัวของกลุ่มอะตอมประเภทหนึ่งภายในโมเลกุลของสีย้อมกลุ่มอะตอมที่กล่าวนี้เรียกกันว่า "โครโมฟอร์" (chromophores) ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 7 กลุ่มคือ

1.กลุ่มไนโตรโซ -NO

2.กลุ่มไนโตร $-NO_2$

3.กลุ่มเอโซ -N=N-

4.กลุ่มเอ็ททิลลีน 

5.กลุ่มคาร์บอนิล 

6.กลุ่มคาร์บอนิล – ไนโตรเจน C=NH และ -CH=N-

7.กลุ่มซัลเฟอร์ C=S และ -C-S-S-C-

กลุ่มอะตอมต่างๆ เหล่านี้ จะเป็นตัวไปเพิ่มสีให้แก่สารประกอบอะโรเมติก โดยการดูดกลืนแถบแสงสีขาวไว้บางแถบแสงและปล่อยออกมาบางแถบแสง ทำให้มนุษย์มองเห็นสีย้อมมีโทนสีแตกต่างกันออกไป

สีย้อมโดยทั่วไปนอกจากจะต้องมีกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์แล้ว ยังจำเป็นต้องมีกลุ่มอะตอมอีกชนิดหนึ่งได้แก่ กลุ่มอะตอม "ออกโซโครม " (auxochromes) อันได้แก่ -OH, $-NH_2$, -NHR, $-NR_2$, $-SO_3$ และ -COOH เพื่อให้สีย้อมสามารถทำปฏิกิริยายึดติดกับเส้นใยได้ โมเลกุลใดที่ปราศจากกลุ่มอะตอมออกโซโครม โมเลกุลนั้นจะแสดงสมบัติของสีออกมาได้แต่จะขาดสมบัติในการยึดติดกับเส้นใย โมเลกุลดังกล่าวนี้เรียกว่า "โครมาเจน" (chromagen) ยกตัวอย่างเช่น สีย้อมอะมิโนเอโซเบนซิน (aminoazobenzene dyestuff) มีสูตรโมเลกุลดังนี้ คือ H_2N- -N=N- ซึ่งกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์คือ -N=N- กลุ่มอะตอมออกโซโครมคือ $-NH_2$ และโมเลกุลที่เรียกว่าโครมาเจนคือ -N=N- ทั้งกลุ่มโครโมฟอร์ ออกโซโครม และโครมาเจนนี้จะเป็นส่วนสำคัญในการพิจารณาการแบ่งกลุ่มของสีย้อมตามสูตรโครงสร้างทางเคมีซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

2.4.3 การจำแนกสีย้อม (วรญา ประทุมแก้ว,2543)

2.4.3.1 จำแนกตามลักษณะทางกายภาพออกได้เป็น 2 ชนิด

1) สีย้อม (dyes) สามารถละลายน้ำ
2) ปิกเมนต์ (pigments) ไม่สามารถละลายน้ำ อาจใช้ละลายในเรซิน ยึดติดเส้นใยได้โดยเชิงกล มีบางตัวเหมือนกันที่ติดเส้นใยได้โดยเชิงเคมี

2.4.3.2 การจำแนกตามวิธีใช้

ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันในบรรดาผู้ใช้และอุตสาหกรรมการผลิตสี รวมถึงสมาคมผู้ย้อมสีและผู้ผลิต

1) สีย้อมเบสิค (basic dyes)
2) สีย้อมแอซิด (acid dyes)
3) สีย้อมมอแดนท์ (mordant dyes)
4) สีย้อมไดเรกท์ (direct dyes)
5) สีย้อมดิสเพอร์ส (disperse dyes)
6) สีย้อมอะโซอิค (azoic dyes)
7) สีย้อมแว็ต (vat dyes)
8) สีย้อมซัลเฟอร์ (sulphur dyes)
9) สีย้อมรีแอกทีฟ (reactive dyes)
10)สีย้อมโลหะ (metallic dyes)
11)สีย้อมโอเนียม (onium dyes)

2.4.3.3 การจำแนกสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมี

การจำแนกสีแบบนี้ ใช้โครงสร้างทางเคมีของสีเป็นหลัก สีที่แบ่งตามลักษณะการย้อมบางตัวจะอยู่ในกลุ่มเคมีหนึ่ง บางตัวก็อาจอยู่ในกลุ่มเคมีหนึ่ง ทำให้เกิดความสับสนได้ แต่ถ้าสามารถจดจำได้จะทำให้ใช้ตัวสีได้ถูกต้อง ซึ่งแบ่งได้ดังนี้

1) Azo Colourants

1.1)Aromatic Diazo Compound

- Diazotization and Diazo Compound
- The Coupling Reaction

1.2)Azo Compound

- Basic Dyes
- Acid Dyes
- Mordant and Premetallized Dyes
- Direct Dyes
- Azoic Dyes

2) Phenymethane Dyes

3) Xanthene Dyes

4) Indigoid Dyes

5) Polycyclicquinone (Anthraquinone , etc.) Dyes

5.1) Anthraquinone Group – Vat Dyes

- Acylanino Anthraquinone
- Condensation Products of Amino Anthraquinone and Cyanuric Chloride
- Anthraquinone Acridones
- Benzanthrones
- Anthrathrones
- Pyranthone and Flavanthrone
- Anthrimides
- Carbazoles
- Sulphur : Containing Anthraquinone Compounds

5.2) Naphthalenic Acid Group – Vat Dyes

5.3) Esters of Anthraquinone Vat Dyes

5.4) Anthraquinone Acid Dyes

6). Sulphur Fusion Dyes

7). Amine Oxidation Colorants

8). Phthalocyanine Colorants

9). Onium Dyes

10).Reactive Dyes

11).Pigments

การจำแนกสีย้อมตามแบบการใช้งานดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน (อภิชาติ หิรัญจิตต์, 2539)

ประเภทสีย้อม	สมบัติทางกายภาพและเคมี	เส้นใยที่เหมาะสมกับสีย้อม	พันธะหรือกลไกการติดสี	วิธีใช้ทั่วไป
สีย้อมแอซิด	-ประจุลบ -ละลายน้ำดี -สีติดไม่แน่น	-ไนลอน -ขนสัตว์	-พันธะไอออนิก	-แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 3-5 -เส้นใยซึ่งสมมติว่ามีประจุบวกติดกับสีย้อมที่มีประจุลบที่อุณหภูมิ 50 – 110^{o}C
สีย้อมเมทัลคอมเพล็กซ์แอซิด	-ประจุลบ -ละลายน้ำน้อย -สีติดแน่นดี	-ไนลอน -ขนสัตว์	-พันธะไอออนิก	-แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 5-7 -เส้นใยซึ่งสมมติว่ามีประจุบวกติดกับสีย้อมที่มีประจุลบที่อุณหภูมิ 50 – 110^{o}C
สีย้อมไดเรกท์	-ประจุลบ -ละลายน้ำดี -สีติดไม่แน่น	-ฝ้าย -วิสคอส	-พันธะไอออนิก	-แช่เส้นใยในสารละลายด่างอ่อน -เติมอิเลคโตรไลท์โซเดียมคลอไรด์ โซเดียมซัลเฟต และสีย้อมที่อุณหภูมิ 98 ^{o}C
สีย้อมเบสิก	-ประจุบวก -ละลายน้ำดี	-อะคริริค	-พันธะไอออนิก	-แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 4-6 -เติมสีย้อมแล้วเพิ่มอุณหภูมิให้ได้ 100-105^{o}C
สีย้อมดิสเพอร์ส	-ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยมาก -กระจายอยู่ในน้ำเป็นอนุภาคคอลลอยด์ -สีติดแน่นดี	-อะคริริค -โพลีเอสเตอร์ -ไนลอน -เซลลูโลส -อะซิเตต	-คอลลอยด์ของสีย้อมดูดติดผิวเส้นใย	-แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 4-5 -เติมสีย้อมแล้วเพิ่มอุณหภูมิให้ได้ 100-105^{o}C

ตารางที่ 2.2(ต่อ)

ประเภทสีย้อม	สมบัติทางกายภาพและเคมี	เส้นใยที่เหมาะสมกับสีย้อม	พันธะหรือกลไกการติดสี	วิธีใช้ทั่วไป
สีย้อมรีแอกทีฟ	-ประจุลบ -ละลายน้ำดี -สีติดแน่น	-ฝ้าย -ขนสัตว์ -วิสคอส	-พันธะโควาเลนท์	-แช่เส้นใยในสารละลายกรด -เติมเกลือเพื่อกระจายสีสู่เส้นใย -เติมด่างเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างสีกับเส้นใย
สีย้อมซัลเฟอร์	-เป็นคอลลอยด์หลังเกิดปฏิกิริยาในน้ำ -ไม่ละลายน้ำ -สีติดแน่น	-ฝ้าย -วิสคอส	-ปฏิกิริยาตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย	-ละลายสีย้อมในสารละลายด่างที่มีโซเดียม ซัลเฟอร์ -สีย้อมจะแพร่กระจายสู่เส้นใยด้วยอิเล็คโตรไลท์
สีย้อมแวท	-เป็นคอลลอยด์หลังเกิดปฏิกิริยาในน้ำ -ไม่ละลายน้ำ -สีติดแน่น	-ฝ้าย -วิสคอส	-ปฏิกิริยาตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย	-ละลายสีย้อมในสารละลายด่างที่มีโซเดียม ซัลเฟอร์ -สีย้อมจะแพร่กระจายสู่เส้นใยด้วยอิเล็คโตรไลท์
สีย้อมอโซอิก	-เป็นคอลลอยด์หลังเกิดปฏิกิริยาในน้ำ -ไม่ละลายน้ำ -สีติดแน่น	-ฝ้าย -วิสคอส	-ปฏิกิริยาตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย	-ละลายสีย้อมในสารละลายด่างที่มีโซเดียม ซัลเฟอร์ -สีย้อมจะแพร่กระจายสู่เส้นใยด้วยอิเล็คโตรไลท์ -ต้มเพื่อให้เกิดตะกอนผลึก
สีย้อมมอร์แดนท์	-ประจุลบ -ละลายน้ำดี -สีติดแน่น	-ขนสัตว์	-คอลลอยด์ของสีย้อมดูดติดผิวเส้นใย	-แช่เส้นใยในสารละลายกรด -เติมโครเมียมไดโครเมต และสีย้อม -เพิ่มอุณหภูมิถึง 98^{0}C

2.4.4 สีย้อมรีแอกทีฟ (Reactive Dye)

2.4.4.1 ประวัติของสีรีแอกทีฟ

ในปี 1884 ได้มีการค้นพบสีย้อมที่สามารถย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้โดยตรง ได้แก่ สีแวต และ สีซัลเฟอร์ ความพยายามในช่วงต่อมา คือ การทำให้สีที่ไม่ละลายน้ำเหล่านี้สามารถละลายน้ำและติดกับเส้นใยได้ นอกจากนี้ยังมีการค้นคว้าเพื่อหาวิธีย้อมให้สีเกิดปฏิกิริยาโดยตรงกับเส้นใยเซลลูโลส นักค้นคว้าได้พยายามทุกวิถีทาง ตั้งแต่การใช้สารเคมีราคาแพง กระบวนการย้อมสีที่สลับซับซ้อน ใช้สารทำละลายที่อันตราย แต่ความพยายามต่างๆ เหล่านี้กลับไม่เกิดผลในทางเทคนิคเลย จวบจนช่วงต้นของทศวรรษที่ 50 คือในปีค.ศ.1952 ได้มีการวางจำหน่ายสีไวนิลซัลโฟน (vinylsulphone) ที่ทำปฏิกิริยาติดกับเส้นใยจำพวกขนสัตว์ (wool) ต่อมาบริษัทอิมพีเรียลเคมีคอลอินคอร์เปอเรชัน (ICI) ประสบความสำเร็จในการคิดค้นกระบวนการย้อมเส้นใยฝ้ายด้วยสีรีแอกทีฟ และได้วางจำหน่ายสีรีแอกทีฟชนิดแรกในปี คศ.1956 คือสี Procion

ตัวสีของบริษัทไอซีไอ ใช้ชื่อทางการค้าว่าโพรเซียน (Procion) ประกอบด้วยตัวสี 3 หมู่ ผลิตออกจำหน่ายมาแล้วมากกว่า 70 สี ต่อมาก็มีอีกหลายบริษัทที่ผลิตออกจำหน่าย ใช้ชื่อทางการค้าต่างๆ กัน เช่น บริษัทซิบา (Ciba) เรียกซิบาครอน (Cibacron), บริษัทเฮิกท์ เรียกเรมาซอล (Remazol) เป็นต้น ตัวสีเหล่านี้มีฮาโลเจนอะตอมซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสได้เมื่อมีด่างเกิดเป็นพันธะโควาเลนท์ทำให้สีติดได้ดีและมากกว่าสีซึ่งติดโดยแรงฟิสิกคัลเคมี (physical – chemical forces) ซึ่งสามารถสลายตัวได้

2.4.4.2 คุณสมบัติของสีรีแอกทีฟ

เป็นสีย้อมที่ละลายน้ำได้ดี สามารถย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด มีหลายสี มีความคงทนดี ย้อมง่าย ตัวสีเหล่านี้มีฮาโลเจนอะตอม ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับ หมู่ OH^- ของเซลลูโลสได้เมื่อมีด่างเกิดเป็นพันธะโควาเลนท์ทำให้สีติดได้ดี และมากกว่าสีที่ติดโดยแรงฟิสิกคัลเคมี (วรญา ประทุมแก้ว.,2543) เนื่องจากโมเลกุลสีเชื่อมโยงติดกับเซลลูโลสโดยพันธะเคมีโควาเลนท์นั้น ทำให้เกิดเป็น Cross link Compound กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส ทำให้สีมีความคงทนต่อการซักฟอก และการขัดถู (โสภา ชินเวชกิจวานิชย์ ,2540)

2.4.4.3 โครงสร้างทางเคมีของสีรีแอกทีฟ

กลุ่มเคมีของสีรีแอกทีฟประกอบด้วยกลุ่มพื้นฐาน 4 กลุ่ม ซึ่งสามารถแสดงเป็นโครงสร้างทั่วไปได้ดังนี้

S-D-T-X

โดย S คือ กลุ่มที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้สูง โดยทั่วไปจะเป็นพวกซัลโฟนิก ($-SO_2Na$) ซึ่งติดอยู่กับกลุ่มโครโมฟอร์

D คือ กลุ่มของเคมีที่ทำให้เกิดสี เรียกว่ากลุ่มโครโมฟอร์ (Chromophore)

T คือกลุ่มอะตอมที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างกลุ่มรีแอกทีฟกับกลุ่มโครโมฟอร์ (Bridging Group) เช่นกลุ่ม -NH-, -NHCO- , $-SO_2-$, $-NHSO_2-$ และ $-NCH_3-$ เป็นต้น

X คือ กลุ่มรีแอกทีฟ (Reactive Group) ซึ่งจะเป็นกลุ่มที่ทำให้สีทำปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซิลในเส้นใย

ในบางกรณีกลุ่มรีแอกทีฟก็จะติดกับระบบโครโมฟอร์โดยตรง ไม่ต้องมีตัวเชื่อมก็ได้ และกลุ่มรีแอกทีฟส่วนใหญ่เป็นสาร Heterocyclic ring ลักษณะของกลุ่มตัวเชื่อมและส่วนประกอบของ Heterocyclic ring มีอิทธิพลอย่างมากต่อความสามารถทำปฏิกิริยา และคุณสมบัติอื่นๆ ของสี จากส่วนประกอบที่กล่าวมานี้ พบว่ามีสองส่วนที่สำคัญคือ สารที่ทำให้เกิดสี และกลุ่มรีแอกทีฟ โดยส่วนประกอบทั้งสองส่วนนี้ จะเป็นปัจจัยที่ทำให้สีแต่ละชนิดแตกต่างกันไป

2.4.4.4 กลุ่มอะตอมที่ทำให้เกิดสี (Chromophore)

กลุ่มอะตอมที่ทำให้เกิดสีส่วนใหญ่พัฒนามาจากสีแอซิด โดยแบ่งโครงสร้างได้เป็นหลายกลุ่มดังนี้

1) กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Unmetallised Azo เป็นหลักซึ่งสีรีแอกทีฟส่วนใหญ่จะมีสารที่ทำให้เกิดสีชนิดนี้เป็นส่วนมาก
2) กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Metal-Complex Azo เป็นหลัก
3) กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Anthraquinone เป็นหลัก
4) กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Phthalocyanine เป็นหลัก
6) กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Azo เป็นหลัก ในสีกลุ่มที่มีกลุ่มรีแอกทีฟแบบ Bifunctional

กลุ่มสารที่ทำให้เกิดสีในสีย้อมรีแอกทีฟนั้น ต่างก็มีโครงสร้างที่แตกต่างกันซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปใช้งานที่แตกต่างกันออกไป โดยองค์ประกอบของกลุ่มโครโมฟอร์ในสีรีแอกทีฟนั้นแสดงในตาราง 2.3

ตารางที่ 2.3แสดงเปอร์เซ็นต์การกระจายของลักษณะโครงสร้างของกลุ่มโครโมฟอร์ในสีรีแอกทีฟแบ่งตามโทนสีต่างๆ (Shore.,1990)

Chemical class	Distribution in hue sector (%)								
	Yellow	Orange	Red	Violet	Blue	Green	Brown	Black	% of all reactive dyes
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

จากตารางจะเห็นได้ว่าสีรีแอกทีฟส่วนใหญ่จะประกอบด้วยสีโครโมฟอร์ชนิด Azo (Unmetallised Azo Metal-complex Azo) เป็นส่วนมากสูงถึงร้อยละ 81 และถ้าไม่รวมสีรีแอกทีฟที่มีโทนสีฟ้าและสีเขียว ซึ่งประกอบด้วยโครโมฟอร์ประเภท Anthraquinone และ Phthalocyanine เป็นส่วนใหญ่แล้วพบว่า สีรีแอกทีฟจะมีกลุ่มอะโซ เป็นองค์ประกอบอยู่สูงถึงร้อยละ 95 ดังนั้นในการบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อม ถ้าสามารถทำลายพันธะอะโซในกลุ่มโครโมฟอร์ของสีรีแอกทีฟได้ก็จะสามารถลดสีในน้ำเสียได้

2.4.4.5 กลุ่มรีแอกทีฟ (Reactive Group)

กลุ่มรีแอกทีฟเป็นกลุ่มที่มีหน้าที่สร้างพันธะกับเส้นใยทำให้สีย้อมสามารถดูดติดกับเส้นใยได้ การสร้างพันธะระหว่างกลุ่มรีแอกทีฟกับเส้นใยแบ่งได้ 2 ลักษณะคือ

1.เส้นใยหรือไฮดรอกไซด์อิออนเข้าแทนที่อะตอมฮาโลเจน ในโมเลกุลสี (Nucleophilic Substitution) เกิดเป็นพันธะระหว่างสีกับเส้นใยขึ้น

2.เส้นใยหรือไฮดรอกไซด์อิออน สร้างพันธะกับโมเลกุลของสีโดยการสลายพันธะคู่ของคาร์บอนอะตอม 2 อะตอม ในกลุ่มไวนิลซัลโฟน แล้วเชื่อมตัวมันเข้าไปกับคาร์บอนตัวสุดท้ายของกลุ่มไวนิลซัลโฟนดังกล่าว

การสร้างพันธะกับโมเลกุลสีสามารถเกิดได้ทั้งกับเส้นใยหรือไฮดรอกไซด์อิออน แต่ความสามารถในการสร้างพันธะกับเส้นใยจะมีมากกว่าการสร้างพันธะกับไฮดรอกไซด์อิออน สีที่สร้างพันธะกับไฮดรอกไซด์อิออน เรียกว่าสีที่ไฮโดรไลซ์ แล้วไม่สามารถสร้างพันธะติดกับเส้นใยได้อีก

จึงหลงเหลือไปกับน้ำย้อมและน้ำล้างได้เป็นบางส่วน นอกจากนี้กลุ่มรีแอกทีฟที่มีการพัฒนาคิดค้นขึ้นมาก การพิจารณาจัดกลุ่มขึ้นอยู่กับกลไกในการสร้างพันธะและความคงทนของพันธะนี้ในขั้นตอนต่างๆ หลังการย้อม โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มดังนี้

1.พวก Monofunctional ส่วนใหญ่จะมีกลุ่มรีแอกทีฟเพียงกลุ่มเดียวในโมเลกุล เช่น กลุ่มรีแอกทีฟที่มีอะตอมฮาโลเจนของสีพวก Aminohalotriazine หรือกลุ่มรีแอกทีฟที่มีกลุ่มไวนิลซัลโฟน นอกจากนี้ยังมีกลุ่มรีแอกทีฟเพียงกลุ่มเดียวแต่มีอะตอมฮาโลเจนมากกว่า 1 อะตอม เช่น กลุ่มรีแอกทีฟพวก Dichlorotriazine , Difluoropyrimidine

2.พวก Bifunctional จะมีกลุ่มรีแอกทีฟ 2 กลุ่มใน 1 โมเลกุลสีซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดติดกับเส้นใยดีขึ้น ทั้งนี้เพราะเท่ากับมีกลุ่มรีแอกทีฟให้เส้นใยเข้าสร้างพันธะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า และเมื่อกลุ่มหนึ่งเข้าทำปฏิกิริยากับเส้นใยแล้ว อีกกลุ่มก็ยังมีความสามารถในการสร้างพันธะได้ดีอยู่

2.4.5 การกำจัดสีในน้ำเสียโรงฟอกย้อม

การกำจัดสีในน้ำเสียโรงฟอกย้อมได้ถูกพัฒนาต่อๆ กันมา จากเดิมซึ่งโรงงานทั่วๆ ไปมักจะใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย โดยในสมัยก่อนสีที่ถูกปล่อยออกมามีปริมาณน้อยทำให้ยังไม่เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม แต่ในปัจจุบันอุตสาหกรรมสิ่งทอได้เพิ่มจำนวนมากขึ้นตามการเพิ่มประชากร อีกทั้งยังมีการพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการฟอกย้อม ไม่ว่าจะเป็นเครื่องจักรที่ทันสมัย การเติมสารเคมีช่วยเพิ่มคุณภาพของผ้า จนกระทั่งการพัฒนาสีที่ใช้ในการย้อมผ้าเพื่อให้สีติดผ้ามากขึ้น ทำให้น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมประกอบด้วยสารเคมีและสีย้อมมากมายหลายชนิดจนไม่สามารถใช้กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพชนิดแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ในการกำจัดสีให้ลดลงได้ จึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีเกี่ยวกับการกำจัดสีหลายวิธีดังนี้

2.4.5.1 การกำจัดสีโดยวิธีทางกายภาพ

1) กระบวนการโคแอกกูเลชั่น

การกำจัดสีโดยวิธีทางกายภาพเป็นการบำบัดขั้นต้นก่อนที่จะเข้าสู่ระบบบำบัดขั้นที่สองต่อไป นอกจากนี้อาจใช้วิธีกายภาพตามหลังกระบวนการบำบัดแบบชีวภาพก็ได้ ตัวอย่างของการกำจัดสีโดยวิธีกายภาพ ได้แก่ กระบวนการโคแอกกูเลชั่นโดยใช้สารเคมีซึ่งสามารถกำจัดสีอินทรีย์

สารสี และสารประกอบอื่นๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ กลไกของกระบวนการดังกล่าวเกิดจากอนุภาคหรือสิ่งปนเปื้อนจะถูกดูดติดผิวฟล็อกโดยขัดขวางการเกิดการย่อยสลายของจุลินทรีย์ โรงฟอกย้อมส่วนมากนิยมใช้สารประกอบในการทำให้เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชั่น ได้แก่ ปูนขาว สารส้ม เกลือเฟอริกหรือโพลีอิเลกโทรไลต์ แล้วตามด้วยกระบวนการตกตะกอน ซึ่งพบว่ามีข้อเสียเนื่องจากการใช้สารเคมีปริมาณมากในการกำจัดสี เช่น มีตะกอนทางเคมีเกิดขึ้นในปริมาณมาก ทำให้ต้องเพิ่มวิธีการกำจัดตะกอนอีกขั้นหนึ่งและเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นตามมา (Reife และ Free man. ,1996)

2) กระบวนการดูดติดผิว

กระบวนการดูดติดผิวเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและเป็นที่นิยมใช้ในการกำจัดสีเนื่องจากง่ายในการออกแบบ ง่ายต่อการก่อสร้างและดำเนินระบบ และไม่มีสารพิษตกค้าง การกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดติดผิวจะใช้กับน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ในความเข้มข้นต่ำๆ ซึ่งโดยมากจะนิยมใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ซึ่งเตรียมได้จาก ลิกไนต์,ถ่านหิน,เศษไม้,เศษฝ้าย,กะลามะพร้าว เป็นต้น ซึ่งวัสดุดังกล่าวมีพื้นที่ผิวระหว่าง 500 – 1400 $ม^2/ก$ (Reife และ Free man, 1996) นอกจากนี้ยังมีดินเหนียวดูดซึม (Fullers earth) , ขี้เถ้า (fly ash) , ดินเหนียวทนไฟ (fired clay) , ซิลิกาเจล , ไม้ , โพลิเมอร์สังเคราะห์ การกำจัดสีดิสเพอร์ สีวัต และสีพิกเมนท์ โดยถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพไม่สูง (Shah, 1997)

3) กระบวนการไฟฟ้าเคมี

กระบวนการไฟฟ้าเคมีได้มีการพัฒนาครั้งแรกเมื่อปลายศตวรรษที่ 20 ต่อมาได้มีการปรับปรุงแก้ไข (Reife และ Free man, 1996) ซึ่งเดิมจุดมุ่งหมายในการใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีเพื่อกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย และต่อมาได้นำมาใช้ลดสีน้ำเสียเป็นครั้งแรก และมีการจดลิขสิทธิ์เป็นครั้งแรกโดยใช้ชื่อ Andco Environmental process ในปี 1989 (Reife และ Free man, 1996)

วิธีการไฟฟ้าเคมีจะสามารถกำจัดได้ทั้งสี ซีโอดี และเอสเอสในน้ำเสีย กระบวนการเติมสารคลอรีนรวมกับการใช้ไฟฟ้าจะเติมสารโซเดียมไฮโปคลอไรท์ซึ่งจะไปทำลายโครงสร้างสารอินทรีย์และสี และจากงานวิจัยของ Ling (1994) (อ้างโดย Shah, 1997) พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอกทีฟ สีดิสเพอร์ส และสีผสมระหว่างสีดิสเพอร์สและวัต สูงถึง 92 %

4) กระบวนการเมมเบรน

มีการนำเมมเบรนมาใช้ในการลดสีโดยมีการนำมาใช้ที่จุดรวมของน้ำเสียหรือจุดที่เกิดน้ำเสียโดยมีวัตถุประสงค์ในการนำน้ำมาใช้ใหม่แต่ต้นทุนในการก่อสร้างและติดตั้งสูง

5) การแลกเปลี่ยนอิออน

วิธีแลกเปลี่ยนอิออนเหมาะกับสารละลายเจือจาง โดยที่เรซินชนิดลบใช้กำจัดสีย้อมที่มีประจุลบ ในขณะที่เรซินประจุบวกใช้กำจัดสีย้อมที่มีประจุบวก ในขณะที่ถ่านกัมมันต์จะใช้กำจัดสารอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว เรซินจะมีอัตราการแลกเปลี่ยนสูงและง่ายต่อการทำรีเจนเนอเรท โดยเรซินที่ประจุบวกจะใช้กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟูริก หรือโซเดียมคลอไรด์ ส่วนเรซินประจุลบใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ทำรีเจนเนอเรท

มีการนำวิธีการแลกเปลี่ยนอิออนมาใช้กำจัดสีจากน้ำเสีย โดยที่ประสิทธิภาพในการลดสีแอซิด สีรีแอกทีฟ และสีดิสเพอร์สสูง 90 % แต่ประสิทธิภาพในการลดซีโอดีจะน้อยกว่า

6) กระบวนการ Ionizing Radiation

สารอินทรีย์จะถูกทำลายโครงสร้างโดยรังสี มีการนำรังสีแกมม่ามาลดสี หรือมีการใช้ร่วมกับการเติมคลอรีนลงไปเป็นสารออกซิแดนซ์ ซึ่งพบว่าการใช้รังสีอย่างเดียวจะต้องใช้รังสีแกมม่าในปริมาณที่สูงและใช้เวลานาน แต่เมื่อมีการเติมคลอรีนจะมีผลให้ใช้เวลาสั้นลงเพียงไม่กี่นาที (Shah, 1997)

2.4.5.2 การกำจัดสีโดยกระบวนการทางเคมี

1) กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation)

มีวิธีการใช้สารเคมีไปออกซิไดซ์สีเช่น การเติมคลอรีน ทั้งในรูปของเหลว หรือแก๊ส หรือไฮโปคลอไรด์ ซึ่งเป็นการบำบัดขั้นต้นก่อนส่งไประบบบำบัดทางชีวภาพต่อ แต่อย่างไรก็ตามการเติมคลอรีนมีผลทำให้มีสารตกค้างที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมจากการศึกษาของ Ghosh และคณะ (อ้างโดย Reife และ Free man, 1996) ในการลดสีโดยการเติมคลอรีนที่ 150 มก/ล ลดสีได้ 77 % แต่มีสารคลอรีนตกค้าง 110 มก/ล ในน้ำเสีย แต่เมื่อเติมคลอรีนในปริมาณ

100 มก/ล จะไม่พบสารตกค้างแต่ประสิทธิภาพในการลดสีเหลือ 57 %(Reife และ Free man, 1996)

ได้มีการใช้โอโซนซึ่งมีความสามารถในการออกซิไดซ์สูงกว่าคลอรีนและไม่พบสารตกค้างในน้ำเสีย ในงานวิจัยของ Horning (1978) (Reife และ Free man, 1996) พบว่าการใช้ โอโซนปริมาณ 1 มก/ล ในการลดสีย้อมซนิดรีแอกทีฟ และเบสิกได้ แต่ไม่มีประสิทธิภาพในการลดสีซนิดดิสเพอร์ส ส่วนในการกำจัดสีไดเรกต์จะใช้โอโซนในปริมาณไม่แน่นอน และจากการศึกษาในประเทศญี่ปุ่นอ้างโดย (Reife และ Free man, 1996) ที่มีโรงฟอกย้อมมากกว่า 120 แห่ง พบว่าสีที่มีสารอินทรีย์สีเหลืองเป็นองค์ประกอบจะไม่ถูกย่อยสลาย แต่เมื่อวิเคราะห์ค่าทีโอซี และซีโอดี มีปริมาณลดลงแต่เมื่อวิเคราะห์ค่าบีโอดีกลับเพิ่มมากขึ้นซึ่งแสดงว่าต้องมีการย่อยสลายทางชีวภาพต่อจากกระบวนการเติมโอโซนมาแล้ว และวิธีการเติมโอโซนจะมีต้นทุนในการบำบัดน้ำเสียสูงกว่าการใช้ระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์เป็น 2 เท่า (Reife และ Free man, 1996)

2) กระบวนการรีดักชั่น (Reduction)

ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการรีดักชั่นของสีอะโซโดยการแตกพันธะอะโซเป็นสารประกอบที่มีขนาดเล็กคือ สารประกอบอะโรมาติกเอมีนภายใต้สภาวะแอนแอโรบิกซึ่งเป็นสารพิษที่ต้องมีการบำบัดต่อโดยกระบวนการแอโรบิกที่จะกล่าวในส่วนของกระบวนการทางชีวภาพ สารเคมีที่ใช้ในการรีดิวซ์สีคือ โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ ,โซเดียมไดไฮโอไนต์ , ไทโอยูเรียไดออกไซด์, Formamidine sulfinic (FAS) acid, Sodium borohydride, Sodium formaldehydesulfoxylate และ tin (II) chloride การใช้สารเคมีในการตกตะกอน ออกซิไดซ์ และรีดิวซ์ และมีผลให้ประสิทธิภาพที่แตกต่างกันไปซึ่งต้องมีการทดลองหาปริมาณใช้ที่เหมาะสมกับน้ำเสียนั้นๆ (Reife และ Free man, 1996)

2.4.5.3 การกำจัดสีโดยกระบวนการทางชีวภาพ

2) กระบวนการชีวภาพแบบแอโรบิก

Beszedits, 1980 อ้างโดย Hussain, 1994 สรุปไว้ว่ากระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงฟอกย้อม ระบบโปรยกรอง บ่อเติมอากาศ และกระบวนการแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ ซึ่งเป็นวิธีที่เก่าแก่และนิยมใช้มากที่สุด การใช้วิธีทางชีวภาพสามารถลดบีโอดี ซีโอดี และเอสเอสสูง แต่ประสิทธิภาพในการลดสีย้อมในน้ำเสียมีค่าต่ำเพราะเนื่องจากสีย้อมที่ผลิตขึ้นมาใช้มีความสามารถทนต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ

การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบแอโรบิกเป็นวิธีที่นิยมใช้บำบัดน้ำเสียจากโรงฟอกย้อม ซึ่งในอดีตน้ำเสียจากโรงฟอกย้อมจะปล่อยรวมกับน้ำเสียชุมชนและส่งต่อไปบำบัดรวมโดยใช้ระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์แต่จะพบปัญหาที่ไม่สามารถลดสีได้เนื่องจากการผลิตสีย้อมมาเพื่อต้านทานการย่อยสลายโดยใช้ออกซิเจนและมีการเติมสารเคมีลงไปในสีย้อมเพื่อให้ทนต่อการออกซิไดซ์โดยสารเคมีและแสง (Reife และ Free man,1996)

Grau, 1991 อ้างโดย Hussain, 1994 ได้อธิบายถึงกระบวนการแอโรบิกที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียมี 2 ลักษณะ คือ

3) ใช้กระบวนการกายภาพ-เคมี ก่อนแล้วตามด้วยกระบวนการทางชีวภาพ คือ มีการเติมเฟอร์รัสซัลเฟตเพื่อการลดสี และตามด้วยกระบวนการแอกทิเวเต็ดสลัดจ์โดยที่มีการเติมผงถ่านกัมมันต์

2) ใช้กระบวนการทางชีวภาพตามด้วยกระบวนการกายภาพ – เคมี ในวิธีนี้อาจจำเป็นต้องมีการบำบัดขั้นต้นเพราะในน้ำเสียอาจมีสารพิษที่เป็นอันตรายต่อระบบ หรือมีการปรับค่าพีเอชให้เหมาะสมกับระบบ แล้วส่งบำบัดต่อ โดยใช้กระบวนการถังกรองชีวภาพ , อาร์บีซี หรือแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ และเติมเฟอร์รัสซัลเฟตหรือสารส้ม,เกลือเฟอร์ริก

ปัญหาที่พบในการใช้ระบบการบำบัดทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจนลดสี คือ ความสามารถในการปรับตัวของกลุ่มจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสีย้อม ซึ่งอาจเนื่องจากกระบวนการผลิตในโรงฟอกย้อมมีกระบวนการผลิตที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา จากการศึกษาของ Porter และ Snider พบว่าเมื่อทดสอบค่าบีโอดี 30 วัน โมเลกุลสีจะถูกย่อยสลายมากกว่าที่ทดสอบที่ค่าบีโอดี 5 วัน โดยการศึกษาใช้กลุ่มจุลินทรีย์ที่ไม่ชินกับน้ำเสียที่มีสีย้อมปนเปื้อน ซึ่งสรุปได้ว่าน้ำเสียที่มีสีย้อมต้องการระยะเวลาในการปรับตัวของกลุ่มจุลินทรีย์นานและย่อยสลายได้ช้าซึ่งก็ตรงกับงานวิจัยของ Shriver และ Daque, 1978 อ้างโดย (Reife และ Free man,1996) ได้กล่าวว่าน้ำเสียจากโรงฟอกย้อมจะย่อยสลายได้ช้ากว่าน้ำเสียจากชุมชนโดยทำการทดลองวัดค่าบีโอดีเมื่อเวลาผ่านไป 10 วัน พบว่าน้ำเสียจากโรงฟอกย้อมถูกย่อยสลาย 31% ในขณะที่น้ำเสียชุมชนจะถูกย่อยสลาย 92 %

4) กระบวนการแอนแอโรบิก

ภายใต้กระบวนการแอนแอโรบิกที่พันธะอะโซจะถูกรีดิวซ์ทำให้พันธะอะโซแตกออก (ซึ่งสามารถแตกได้ทางเคมีและการย่อยสลายทางชีวภาพภายใต้สภาวะไร้อากาศ) ในกระบวนการแอนแอโรบิกเมื่อพันธะอะโซแตกออกจะเกิดสารอะโรมาติกเอมีนที่ปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อมใน

สภาพตามธรรมชาติจะเกิดสภาพไร้อากาศได้เช่น ที่ก้นลำธาร หรือในหลุมฝังกลบ ทำให้มีสารอะโรมาติกเอมีนปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อมด้วยสาเหตุนี้ต้องมีกระบวนการมาบำบัดสารเหล่านี้ต่อ

การย่อยสลายสีภายใต้สภาวะแอนแอโรบิกจะเกิดสารอะโรมาติกเอมีนที่เป็นพิษเกิดขึ้นซึ่งต้องใช้กระบวนการแอโรบิกไปย่อยสลายต่อเพื่อให้สามารถกำจัดสีได้สมบูรณ์ แต่การแตกพันธะอะโซมีผลทำให้

1.ลดสีในน้ำเสีย

2.เป็นการเตรียมน้ำเสียสำหรับส่งต่อไปยังกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพแบบแอโรบิกต่อ (Reife และ Free man.,1996)

3) กระบวนการแอนแอโรบิก – แอโรบิก

จากการย่อยสลายสีด้วยกระบวนการแอนแอโรบิกจะเกิดสารประกอบอะโรมาติกเอมีนเกิดขึ้นซึ่งจะจำเป็นต้องมีการใช้กระบวนการแอโรบิกมาย่อยสลายสารที่เกิดขึ้นเพื่อให้น้ำเสียที่ออกจากระบบไม่มีสารที่เป็นอันตราย

การบำบัดด้วยกระบวนการแอนแอโรบิก – แอโรบิกจะสามารถกำจัดสีได้สูงกว่ากระบวนการแอโรบิก คือที่ 88% กับ 28%(Reife และ Free man ,1996)

2.5 งานวิจัยที่ผ่านมา

Brown และคณะ.,1983 ได้ทำการศึกษากระบวนการในการบำบัดน้ำเสียขั้นที่ 3 ประกอบด้วยโมดุลสำหรับการดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์เม็ด, การเติมโอโซน และกระบวนการออสโมซิสผันกลับ ได้ถูกใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ออกจากถังทำน้ำใสในระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ สำหรับหน่วยดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์ประกอบด้วย 3 คอลัมน์ แต่ละคอลัมน์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร และสูง 1.6 เมตร มีอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 60 มล. ต่อวินาที ข้อมูลที่เก็บจากการทดลองคือ ค่าทีโอซี และซีโอดี และวัดสีในน้ำที่ออกจากระบบด้วย ผลการทดลองที่ได้คือ อายุระบบผันแปรตามปริมาณซีโอดี และ ทีโอซี ที่แตกต่างกันในแต่ละช่วง

Gergova K. และคณะ ,1993 ได้ทำการทดลองผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น Apricot stone ,Cherry stone และ Grape seeds ด้วยขั้นตอนเดียวโดยรวมกระบวนการคาร์บอไนซ์เซชั่น และการกระตุ้นด้วยไอน้ำเข้าด้วยกัน พบว่า Apricot stone ได้โครงสร้างรูพรุนชนิดไมโครพอร์ และมีความเหมาะสมในการดูดซับโมเลกุลขนาดเล็ก ส่วน Cherry

stone และ Grape seeds โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จะเป็นชนิด มีโซพอร์ และแมคโครพอร์ จึงเหมาะสมในการดูดซับสารที่มีโมเลกุลใหญ่ ดังนั้นวัตถุดิบที่ใช้ผลิตถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดมีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน จึงมีผลต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์

Gergova K. **และคณะ**, 1995 ได้ทำการศึกษาโครงสร้างรูพรุนของแอนทราไซต์ที่เผาด้วยแก๊สต่างๆก่อน แล้วทำการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูง และโครงสร้างรูพรุนที่ดี ซึ่งมีโครงสร้างเป็นไมโครพอร์ และพบว่า สารที่ใช้กระตุ้นถ่านมีผลต่อความพรุนของถ่าน

Graham, N.,Chen, X.G **และ** Jayaseelan, S., 2001 ศึกษาการบำบัดสี Methylene Blue และ Crystal Violet โดยใช้ตัวดูดซับคือ ส่วนผสมของสลัดจ์กับ Coconut husk (DC) และสลัดจ์กับ Peanut Shell (DP) ทำการทดลองแบบแบตช์เพื่อตรวจสอบจลน์ศาสตร์ และสมดุลของการดูดซับพบว่าส่วนผสมทั้งสองชนิดให้ความจุการดูดติดผิวสูง และคาร์บอน DP ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดสี

Guzel F., 1996 ได้ทำการศึกษาผิวของถ่านกัมมันต์ชนิดที่เป็นกรด โดยการดูดซับสารละลาย Methylene blue (Cationic) กับ Metanil yellow (Anionic) พบว่าที่ 298 เคลวิน ผิวของถ่านกัมมันต์มีปริมาณของ Methylene blue มากกว่า Metanil yellow ทั้งนี้เพราะถูกผลักออกจากผิวถ่านกัมมันต์ ส่วน Methylene blue ถูกดึงดูดเข้าสู่ผิวถ่านกัมมันต์

Hu., Z., Srinivasan, M.P. **และ** Ni, Y., 2001 ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยใช้ The Novel Activated Process ในเพิ่มประสิทธิภาพของการกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ พบว่าสามารถทำให้เกิดพื้นที่ผิวแบบบีอีทีของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวได้ถึง 2400 ตารางเมตร/กรัม และให้อัตราส่วนระหว่างปริมาตรรูพรุนขนาดกลาง ต่อปริมาตรรูพรุนทั้งหมด เท่ากับ 71 %

Khraisheh, M.A.M., Al-Degs, Y.S., Allen, S.J. **และ** Ahmad ,M.N., 2002 ได้ศึกษาจลน์ศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟด้วยถ่านกัมมันต์ FS-400 พบว่าที่เวลาสัมผัส 6 ชั่วโมงให้ค่าความจุของการดูดติดผิว 20 % โดย 30 นาทีแรกการแพร่ภายนอกจะควบคุมกลไกการดูดซับ หลังจากนั้นการแพร่ภายในจะเป็นตัวควบคุม ซึ่งกลไกการดูดซับจะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน

Luhadia, A., Kaushik, K.K. และ Murthy, Z.V.P, 2003 ศึกษาการบำบัดสีและซีโอดีจากถ่านกัมมันต์ที่ขายเป็นการค้า เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากขี้เลื่อยและกะลามะพร้าวซึ่งถูกกระตุ้นทางเคมีด้วย $ZnCl_2$ พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ขายเป็นการค้าให้ค่าความจุการดูดติดสีและซีโอดีได้ดีกว่า อีกทั้งถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นจากวัสดุทั้งสองชนิดดังกล่าวต้องใช้สารเคมีจำนวนมากในการกระตุ้น

Milich, P., Moller, F., Piriz, J., Vivo, G. และ Tancredi, N., 2002 ศึกษาการกำจัดสารละลาย Cr^{3-} ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไม้ยูคาลิปตัสและขี้เลื่อย โดยใช้การกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอากาศที่ 2 ชั่วโมง 400 และ 800 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับการกระตุ้นด้วยกรดไนตริกเพื่อเพิ่มกลุ่มฟังก์ชั่นที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบบนพื้นผิว พบว่าการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอากาศ จะให้ค่าความจุของการดูดติดผิว Cr^{3-} สูงกว่าการกระตุ้นด้วยกรดไนตริก

Moeira, R.F.P.M, Soares, J.L., Jose, H.J., และ Rodriques, A.E., 2001 ศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟด้วยถ่านชาร์จากเถ้าลอย ที่อุณหภูมิ 30-60 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิ 30-40 องศาเซลเซียส ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดติดจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า 40 องศาเซลเซียส ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดติดจะลดลง

Pereira, Manuel Fernando R., Soares, Samanta F., Orfao, Jose J.M.และ Figueiredo, Jose L., 2003. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์เพื่อกำจัดสีย้อม พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยก๊าซไฮโดรเจนที่ 700 องศาเซลเซียส เหมาะสำหรับกำจัดสีเบสิก ส่วนสีรีแอกทีฟ สีไดเรกท์ และสีแอซิด ที่มีประจุลบ ก็เหมาะกับการถูกกำจัดด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากสภาวะดังกล่าว กลไกการดูดซับของสีย้อมที่มีประจุบวกจะเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง Oxygen-free Lewis basic sites กับ Free electrons ของสีย้อม ส่วนสีย้อมที่มีประจุลบนั้นจะขึ้นอยู่กับ Functional Group ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ

Ramakrishna , Konduru R. และ Viraraghavan T. ,1998 ศึกษาการกำจัดสีย้อมด้วย GAC และ Slag พบว่า สามารถกำจัดสีดิสเพอร์ส(Nonionic)ได้ 49 % และ 94 % ตามลำดับ ส่วนสีแอซิด(Anionic) กำจัดได้ด้วย Slag 47 – 74 % และ GAC 100 % ส่วนการศึกษาแบบคอลัมน์พบว่า Slag ให้ค่าความจุการดูดซับสีดิสเพอร์ส 1.3 มก./ ก. และน้ำทิ้งที่ได้ยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

I21937898

Singh, Kunwar P., Mohan, D., Sinha, S., Gosh, D. และ Tondon, G.S., 2003 ศึกษาการกำจัดสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว โดยใช้สีย้อม Methylene Blue (Basic) และ Methyl Orange (Acidic) พบว่าการดูดซับเป็นปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง (The first order rate equation) สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านฟิล์มของสีที่ความเข้มข้นสูงจะเท่ากับความเข้มข้นต่ำ

Shende R.V. และ Mahajani V.V. ,2002 ศึกษาการฟื้นสภาพ PAC และ GAC ที่ดูดซับสีรีแอกทีฟ Chemictive Brilliant Blue R. และ Cibacron Turquoise Blue G. ด้วยวิธี Wet Oxidative Regeneration (WOR) พบว่าสามารถทำให้สีย้อมหลุดออกจาก PAC และ GAC ที่ใช้แล้วได้ถึง 98 % แต่จะมีปริมาณถ่านกัมมันต์สูญเสียระหว่างการฟื้นสภาพ 40 % และหลังจากฟื้นสภาพแล้วจะมีโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไป

Tancredi, N., Cordero, T. และ Rodriguez, J.J., 1997 ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส ด้วยการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างกัน พบว่าการอุณหภูมิมีผลต่อการเกิดรูพรุนขนาดเล็ก โดยอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้คือ 800 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากที่สุด แต่อุณหภูมิมีผลอย่างไม่มีนัยสำคัญต่อการเกิดรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่

Viraraghavan, T., และ Ramakrishna, K.R., 1999 ศึกษาการกำจัดสีย้อมหลายชนิดด้วยเถ้าลอย พบว่าเถ้าลอยให้ผลดีในการกำจัดสี Basic Blue 9, Acid blue 29 และ Acid Red 91 อีกทั้งเถ้าลอยสามารถกำจัดสี Disperse Red 1 ได้ดีกว่า GAC เถ้าลอยขนาดเล็กให้ผลดีกว่าขนาดใหญ่เพราะมีพื้นที่ผิวภายนอกมากกว่า ส่วนการใช้เถ้าลอยบำบัดสีย้อมยังมีข้อจำกัดเนื่องจากปูนขาวและโลหะหนักที่เป็นองค์ประกอบของเถ้าลอย จะทำให้น้ำทิ้งหลังการบำบัดมีค่าพีเอชและโลหะหนักสูงกว่ามาตรฐานกำหนด

Walker G.M. และ Weatherley L.R. ,2000 ศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ ด้วย GAC Filtrasorb 400 โดยกำหนดค่าเวลาสัมผัสที่เหมาะสมกับถังเดี่ยว พบว่าเมื่อใช้น้ำเสียจริงความจุของการดูดติดผิวลดลง 12 - 25 % เมื่อเทียบกับใช้น้ำเสียสังเคราะห์สีแอซิดชนิดเดียว

Yeh, R. Y., Liu, R., L., Chiu, H.,M. และ Hung, Y.,T., 1993 ได้ทำการเปรียบเทียบความจุของการดูดติดผิวของตัวดูดติดผิวชนิดต่างๆ สำหรับบำบัดน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของปริมาณที่ใช้ เวลาสัมผัสและชนิดของตัวดูดติดในการกำจัดซีโอดีและสีจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม โดยใช้ตัวดูดติดผิวชนิดต่างๆ ดังนี้คือ ถ่านกัมมันต์ผง, ถ่านกัมมันต์เม็ด, อะลูมินากัมมันต์, ไดอะตอม และขี้เลื่อย ทำการทดสอบกำจัดสีดีสเพิสแดง การทดลองใช้น้ำเสียเข้าที่มีความเข้มข้นของสีย้อม 150 พีพีเอ็ม ใช้ปริมาณสารดูดติด 15 กรัมต่อลิตร และใช้เวลาสัมผัส 2 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองคือ ประสิทธิภาพของการกำจัดซีโอดีเท่ากับร้อยละ 98 เมื่อใช้ถ่านกัมมันต์ผง ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเท่ากับร้อยละ 65 เมื่อใช้อะลูมินากัมมันต์ ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเท่ากับร้อยละ 60 เมื่อใช้ถ่านกัมมันต์เม็ด ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเท่ากับร้อยละ 30 เมื่อใช้ไดอะตอม และประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี เท่ากับร้อยละ 24 เมื่อใช้ขี้เลื่อย ประสิทธิภาพการกำจัดสีเท่ากับร้อยละ 55 เมื่อใช้ถ่านกัมมันต์ผง ร้อยละ 50 เมื่อใช้อะลูมินากัมมันต์ ร้อยละ 48 เมื่อใช้ไดอะตอม ร้อยละ 47 เมื่อใช่ถ่านกัมมันต์เม็ด และร้อยละ 45 เมื่อใช้ขี้เลื่อย

นวลละออ เนียมสอิ้ง, 2525 ได้ทำการศึกษาการกำจัดสีจากน้ำเสียโรงงานย้อมฝ้ายโดยวิธีพีเอซี – แอกทิเวเต็ดสลัดจ์ ใช้ถังปฏิกรณ์ขนาด 2 ลบ.ดม. ที่ค่าตะกอนแขวนลอยโวลาไทล์ในช่วง 1500-2000 มก./ลบ.ดม. อายุตะกอนเท่ากับ 10 วัน ป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ 1 ลบ.ดม./วัน อัตราการป้อนน้ำเสีย 33 ลบ.ซม./นาที ช่วงเวลาการเติมอากาศ 22.5 ชม./วัน เวลาตกตะกอน 1.5 ชม./วัน ใส่ผงถ่าน 0.2 , 0.25 , 0.3 , 0.35 , 0.4 กรัม/ลบ.ดม. โดยมีอีกชุดหนึ่งเป็นหน่วยควบคุมซึ่งเป็นแอกทิเวเต็ดสลัดจ์แบบเอสบีอาร์ปกติ ผลการทดลองพบว่าแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ธรรมดากำจัดสารอินทรีย์ได้ดีสำหรับสีย้อมทุกประเภท ประสิทธิภาพอยู่ในช่วงร้อยละ 77 ถึง 95 ยกเว้นสีเมททัลลิกประสิทธิภาพการกำจัดเพียงร้อยละ 11 ถึง 20 ในขณะที่ระบบพีเอซี – แอกทิเวเต็ดสลัดจ์ สามารถลดสารอินทรีย์ได้มากกว่าร้อยละ 90 และกำจัดสีได้มากกว่าร้อยละ 80 สำหรับสีทุกชนิดยกเว้นสีเมทัลลิกถูกกำจัดได้ร้อยละ 35 ถึง 84 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสีเมทัลลิกไม่ละลายน้ำ

อดิชาต ปานเจริญ, 2526 ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการลดสีย้อม 7 ประเภทในน้ำเสียสังเคราะห์ คือ สีย้อมไดเร็กต์ แว็ต รีแอกทีฟ เอซิด เบสิค ซัลเฟอร์ และอะโซอิก โดยใช้โซเดียมไฮโดรซัลไฟท์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และโซเดียมไฮโปคลอไรท์ พบว่า โซเดียมไฮโดรซัลไฟท์สามารถลดสีได้มากกว่าร้อยละ 50 ขึ้นไปในทุกประเภทสีย้อมยกเว้นสีแว็ต และสารช่วยย้อมไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการลดสี ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีประสิทธิภาพการลดสีต่ำมาก

โซเดียมไฮโปคลอไรท์สามารถลดสีได้มากกว่าร้อยละ 75 ขึ้นไป สารช่วยย้อมไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการลดสีมากนัก ราคาค่าสารเคมีอยู่ในระดับประมาณ 0.13-18.8 บาท/ลบม.

วิไลพร วณิชย์วโรดม, 2536 ศึกษาถึงประสิทธิภาพถ่านกัมมันต์ในการกำจัดสีและซีโอดีจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยเตรียมจากสีย้อมผ้าชนิดรีแอกทีฟแดง และน้ำเงิน ผ่านคอลัมน์ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดขนาด 0.5-2.36 มม. ทำจากกะลามะพร้าวจากบริษัท UDP chemical ทำการทดลองที่อัตราล้นผิว 1.17 , 2.34 , และ 4.68 gpm/ft^2 พบว่าที่อัตราน้ำล้นผิวต่ำ ประสิทธิภาพในการดูดซับสีและซีโอดีมีค่าสูง และอายุการใช้งานของชั้นถ่านจะสูงกว่าอัตราน้ำล้นผิวสูง ที่ความลึกของชั้นถ่านต่างๆกัน (20,50,80 ซม.) จะพบว่าที่ความลึก 80 ซม. ประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีโอดีจะสูงที่สุด

วจน์สิร ประยูรพรหม, 2539 ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของความเข้มสีรวมถึงความสัมพันธ์ระหว่างไอโอดีนนัมเบอร์และโมลาสนัมเบอร์ที่มีต่อการกำจัดสี โดยเปรียบเทียบผลการกำจัดสี 4 ประเภทได้แก่ สีรีแอกทีฟ สีไดเรกต์ สีอะโซอิก และสีดีสเพิส โดยใช้ถ่านกัมมันต์เม็ดจากบริษัท คาร์โบกาญจน์ จำกัด มีพื้นที่ผิวใกล้เคียงกันและมีค่ารูพรุนเฉลี่ย 4 ค่า คือชนิดเอ 17.5673 A° ชนิดบี17.5673 A° ชนิดซี 18.7475 A° และชนิดดี 18.9368 A° ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสีแปรผันตามไอโอดีนนัมเบอร์เช่นเดียวกับโมลาสนัมเบอร์ เวลาอิ่มตัวของการดูดติดผิวแตกต่างไปตามประเภทสีย้อมและโทนสี พีเอชไม่มีแนวโน้มที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด ขนาดรูพรุนใหญ่ที่สุดให้ผลดีที่สุดในการกำจัดสี ค่าความเข้มสีสูงสุดให้ค่าความจุการดูดติดผิวมากที่สุดในการกำจัดสีทุกชนิด ภาระที่เหมาะสมสำหรับกำจัดสีรีแอกทีฟและไดเรกต์อยู่ในช่วง 265-860 ปริมาตรเบด ส่วนสีอะโซอิกและดีสเพิสอุดตันขณะทดสอบ ต้นทุนโดยสังเขปราคาถ่านกัมมันต์เม็ดในการกำจัดสีประมาณ 90 บาทต่อ 1 ลบม.

วุฒิ วิพันธ์พงษ์, 2540 ศึกษาประสิทธิภาพของสารเคมีเฟนตัน (ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และ เหล็ก) ในการกำจัดสีและสารอินทรีย์จากน้ำเสียจริงที่มีสีรีแอกทีฟจากโรงงานย้อมผ้าและด้ายฝ้าย พบว่า เมื่อใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 200 มก./ล. ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเหล็ก R = 5:1 ในการบำบัดน้ำเสียโทนสีดำ โทนสีแดง โทนสีน้ำตาลอ่อน และที่ R = 10:1 ในการบำบัดน้ำเสียโทนสีม่วง จะสามารถกำจัดสีได้สูงกว่า 80 % และพบว่า 1 ซม. เพียงพอสำหรับการเกิดปฏิกิริยา

อภิชาติ หิรัญจิตต์, 2539 ได้ศึกษากระบวนการร่วมของการดูดติดผิวและโคแอกูเลชั่นในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีแดงและน้ำเงินในน้ำเสียย้อมผ้าสังเคราะห์ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดผงรุ่น YAO H M325 มีพื้นที่ผิว 1250 ตรม./ก. และเถ้าลอยลิกไนต์จากโรงไฟฟ้า ใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนท์ พบว่าน้ำเสียโทนสีแดงต้องการผงถ่าน 800 มก./ล. โทนสีแดง 600 มก./ล. ที่ประสิทธิภาพการกำจัดสี 95 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่เถ้าลอยประสิทธิภาพไม่แน่นอนขึ้นกับตัวอย่าง การกำจัดผงถ่านกัมมันต์ในน้ำที่ผ่านกระบวนการดูดติดผิว ต้องการสารส้มเพียง 30 มก./ล. สารส้มที่มากกว่านี้ไม่ช่วยเพิ่มการตกตะกอน ส่วนเถ้าลอยสามารถตกตะกอนเกือบหมดโดยไม่ต้องใช้สารส้มช่วย ค่าใช้จ่ายสารเคมีของกระบวนการร่วมของการดูดติดผิวและโคแอกกูเลชั่นอยู่ที่ 36.10 บาท/ลบม. สำหรับน้ำเสียโทนสีแดง และ 29.30 บาท/ลบม. สำหรับโทนสีน้ำเงิน สรุปได้ว่าไม่เหมาะกับการใช้งานจริง

กมลรัตน์ ดีประเสริฐวงศ์, 2539 ศึกษาอิทธิพลของถ่านกัมมันต์ที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ในการกำจัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม โดยใช้น้ำเสียจริงในการทดลองที่มีสีรีแอกทีฟเป็นส่วนใหญ่ซึ่งมีค่าซีโอดีอยู่ในช่วง 229-280 มก./ล. มีค่าสีในช่วง 89-122 เอสยู พบว่าผงถ่านกัมมันต์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสีของระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ได้ดีขึ้น คือเมื่อเติมผงถ่านมากขึ้นจะกำจัดสีได้มากขึ้น แต่ไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมากนักและเมื่อปริมาณสลัดจ์ที่เกิดในระบบแพคท์จะมีปริมาณมากกว่าในระบบเอเอส 4.5 เท่า

สัญชวัล อิงคภาคย์, 2539 ศึกษาความเป็นไปได้ในการลดซีโอดี และสีออกจากน้ำชะมูลฝอยด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดจากบริษัท Calgon Corp. รุ่น Filtrasorb 300 ถ่านไม้โกงกาง และถ่านแกลบ ทดลองโดยใช้ถังดูดติดผิวแบบแท่งป้อนน้ำสีแบบไหลลง ความเข้มข้นซีโอดี 250-1000 มก./ล. อัตราภาระบรรทุกทางน้ำ 0.15-1.2 $ม^3/ม^2$ –ชม. พบว่าถ่านไม้โกงกางและถ่านแกลบไม่มีความเป็นไปได้ทางวิศวกรรมเนื่องจากประสิทธิภาพในการลดสีและซีโอดีต่ำ ส่วนถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการลดซีโอดี และสีอยู่ในช่วงร้อยละ 78-89 และ 37-96 ตามลำดับ ในการทดลองที่ชั้นความสูงถ่านกัมมันต์ 1.2 ม. อัตราภาระบรรทุกทางน้ำ 0.15 $ม^3/ม^2$ –ชม. ความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้น 250 มก./ล. มีความสารถในการลดซีโอดี และสีสูงสุด โดยมีค่าร้อยละ 97 และ96 ตามลำดับ

ศิริอุมา บำรุงวงษ์, 2541 ศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี และกระบวนการดูดซับด้วยคาร์บอนโดยใช้น้ำเสียจริง พบว่าการใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตเป็นสารสร้างตะกอนร่วมกับการดูดซับด้วยคาร์บอนให้ประสิทธิภาพในการบำบัดดีที่สุด โดยมีประสิทธิ

ภาพในการกำจัดสี ซีโอดี ความขุ่น และของแข็งแขวนลอย เป็น 98.73-99.94% 79.99-89.44% 99.16-99.54% และ 73.81-82.74%

สุจินต์ เอี่ยมปี, 2544 ศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมสีที่ผ่านการตกตะกอนด้วยปูนขาว และเฟอร์รัสซัลเฟตแล้ว ดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ทำจากกะลามะพร้าว มีพื้นที่ผิว 1100 ตรม./กรัม ทำการทดลองโดยให้น้ำเสียไหลผ่านคอลัมน์ตามแรงโน้มถ่วงที่บรรจุถ่านกัมมันต์เม็ดที่ความสูง 20 50 และ 80 ซม. โดยใช้อัตราน้ำล้นผิว 0.4 0.6 0.8 1.0 และ 1.2 ลบม./ตรม.-ซม. ตามลำดับพบว่าที่ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 80 ซม. อัตราน้ำล้นผิว 0.4 2 ลบม./ตรม.-ซม. มีประสิทธิภาพในการกำจัดสี ซีโอดี ของแข็งแขวนลอย และความขุ่น มีค่า 73.0-96.5% 64.2-95.9 % 77.2-88.1% และ 71.9-96.2% ตามลำดับ และเมื่อระยะเวลาการเดินระบบมากขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดจะลดลง