

บทที่ 2

ทฤษฎี และวรรณกรรม

2.1 สีไคเร็กต์ (Direct dye)

สีไคเร็กต์ละลายน้ำได้ ใช้ย้อมจากน้ำละลายสีโดยตรงให้ซึมเข้าไปภายในเส้นใย เซลลูโลส ผลิตออกจำหน่ายเป็นครั้งแรกใน พ.ศ.2427 โดย Bottiger มีสีแดงเรียกว่า Congo Red สามารถใช้ย้อมได้ทันทีไม่ต้องย้อมผ้าด้วยสารช่วยติดก่อนเหมือนกับสีตัวอื่นๆซึ่งใช้กันอยู่ก่อนจึงเรียกว่า สีไคเร็กต์ หรือ สีย้อม โดยตรง

สีไคเร็กต์ส่วนใหญ่เป็นเกลือของสี Azo ในโครงสร้างมีกลุ่มเคมีของกรดกำมะถันที่ทำให้สามารถละลายน้ำได้ผลิตออกจำหน่ายเป็นผงละเอียดมาก ความเข้ม (Strength) เมื่อผลิตออกมาครั้งแรกไม่เท่ากัน ผู้ผลิตจึงผสมเกลือแกง (NaCl) หรือเกลือโซเดียมชนิดอื่นที่ไม่ทำให้ตัวสีเปลี่ยน เพื่อให้ความเข้มของสีเท่ากับมาตรฐาน (Standardized) หรือให้ละลายได้ง่ายขึ้น สำหรับใช้พิมพ์ผ้า จะผสมด้วย Dextrin

ในบรรดาสีที่ใช้ย้อมสิ่งทอ สีไคเร็กต์เป็นสีกลุ่มใหญ่ที่สุด สีแต่ละตัวในกลุ่มนี้มีความคงทนไม่เท่ากัน การค้นคว้าเพื่อปรับปรุงคุณภาพของสีกลุ่มนี้กำลังก้าวหน้ายิ่งขึ้นทำให้สีกลุ่มนี้มีหลายตัวมีความคงทนต่อแสงและการซักดี

นิยมใช้ย้อมเรยอนมากที่สุด มีสีแตกต่างกันมากมาย ความคงทนของสีเพื่อประโยชน์ใช้สอย บางประการดี ย้อมง่าย คุณสมบัติความคงทนต่อขบวนการใช้น้ำ (Wet Process) ของสีบางตัวมีเพียงปานกลาง แต่สามารถทำให้ดีขึ้นได้ด้วยการตกแต่งภายหลังโดยใช้สารทำให้สีติด เช่น Fixanol (ไอซีไอ) การตกแต่งให้ทนยับด้วยเรซินช่วยให้สีคงทนมากขึ้นด้วย

ใช้ย้อมใยขนสัตว์ปนใยเซลลูโลส ด้านใยยาวและใยสั้นย้อมด้วยสีไคเร็กต์เพื่อตกแต่งให้เกิดสีต่างๆกัน ด้ายที่มีลักษณะพิเศษ ฝ้ายย้อมเส้นด้าย พรม ฝ้ายตกแต่งเครื่องเรือน ฝ้ายเย็บที่นอน ฝ้ายลูกไม้ ด้ายเย็บผ้าและด้ายใยสั้นสำหรับทอพรมเหล่านี้นิยมใช้ย้อมด้วยสีไคเร็กต์เหมือนกัน

ผ้าตัดเสื้อไม่ว่าจะทอด้วยใยสั้นหรือใยยาวก็ย้อมด้วยสีไคเร็กต์ได้ ฝ้าย่วนและทฟเฟ้ด้าทอด้วยด้ายใยสั้นย้อมสีไคเร็กต์ในเครื่องจักร (Jigger) ฝ้ายเรยอนใยสั้นและลินิน ใยยาวย้อมด้วยเครื่องวินซ์ (Winch) ฝ้ายกาบดินสำหรับสำหรับตัดเสื้อชุด ผ้าตัดเสื้อกันฝน เสื้อเชิ้ตและเสื้อสตรี ผ้าตัดเสื้อฤดูร้อน ผ้าตัดเสื้อซึ่งทอด้วยด้ายเรยอนใยยาว ด้ายพุ่งเป็นใยสั้น ฝ้ายดูป็อง ฝ้ายลูกฟูก ฝ้ายทัสเซอร์ ฝ้ายขนดุง ผ้าตัดเสื้ออบน้ำเหล่านี้ย้อมด้วยสีไคเร็กต์เป็นส่วนใหญ่ ฝ้ายซับในไม่ว่าจะทอด้วยใยวิสคอส ฝ้ายหรือทั้งสองชนิดปนกัน อาซิเตดปนวิสคอสก็นิยมย้อมด้วยสีไคเร็กต์ สำหรับฝ้ายอาซิเตดปนวิสคอสจะย้อมออกมาเป็น 2 สี ทำให้เกิดลักษณะพิเศษตามลักษณะของเส้นใยที่ทอ

รวมแล้วอาจกล่าวได้ว่า ผ้าที่ทอด้วยเส้นใยเซลลูโลสทุกชนิดที่เป็นเส้นใยสั้น ไม่ว่าจะ เป็นใยธรรมชาติหรือใยสังเคราะห์สามารถย้อมได้ด้วยสีไคเร็กซ์ที่ได้ผลที่น่าพึงพอใจทั้งสิ้น มีชื่อทางการค้าแตกต่างกันตามบริษัทผู้ผลิตเช่น Chlorzol, Durazol (ไอซีไอ), Solar (ไบเออร์) Solophenyl, Cuprophenyl, Diphenyl (ชิบา-ไกกิ) เป็นต้น

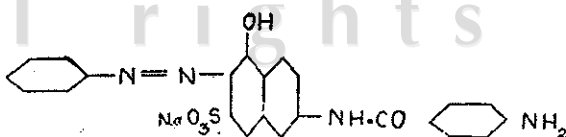
สีไคเร็กซ์ซึมติดเส้นใยได้ในตัวเอง (Substantivity) มีหลายตัวที่ใช้ย้อมใยโปรตีนได้ โครงสร้างของสีเป็นสารประกอบ Sulphonated Azo เหมือนกับสีแอซิก จนไม่สามารถจะแยกออกให้เห็นความแตกต่างของสีทั้งสองตัวนี้ได้ชัดเจน ถ้าเลือกตัวสีที่เหมาะสมจะย้อมใยขนสัตว์ปน ใยเซลลูโลสให้เป็นสีเดียวกันได้

สีรีแอคทีฟ เป็นสีย้อมที่สามารถทำปฏิกิริยาเกิดพันธะทางเคมีกับเส้นใยในสภาวะที่เหมาะสมได้ ก่อนที่จะมีการค้นพบสีรีแอคทีฟ เมื่อปี ค.ศ.1956 นั้น สีย้อมฝ้ายที่สำคัญมีเพียงสีไคเร็กซ์ สีแวนด์ และสีอะโซอิกเท่านั้น สีย้อมทั้ง 3 ประเภทนี้ล้วนมีข้อจำกัดในการใช้งาน กล่าวคือ สีไคเร็กซ์แม้ว่าจะใช้ง่าย ราคาถูก แต่ความคงทนต่อการซักยังไม่ดีพอ ส่วนสีแวนด์นั้น แม้ว่าจะให้ฝ้ายย้อมที่มีความคงทนดีเลิศ แต่ก็มีราคาแพง และวิธีการย้อมก็ค่อนข้างยุ่งยาก อีกทั้งสีก็มีค่อนข้างจำกัด ส่วนสีอะโซอิกนั้นก็มีปัญหาข้อมสีเดิมได้ยาก โดยเฉพาะในกรณีใช้สีผสม การค้นพบสีรีแอคทีฟทำให้เราได้สีย้อมประเภทใหม่ที่ปราศจากข้อจำกัดต่างๆ ดังกล่าวข้างต้น กล่าวคือ สีรีแอคทีฟเป็นสีที่ย้อมง่าย และยังย้อมได้หลายวิธีไม่ว่าจะเป็นการย้อมแบบแช่ในอ่างย้อม แบบกึ่งต่อเนื่องหรือแบบต่อเนื่อง ทั้งยังให้ฝ้ายย้อมที่มีความคงทนต่อการซักสูง ได้สีที่มีความสว่างสดใสมาก โดยเฉพาะเมื่อเทียบกับสีไคเร็กซ์หรือสีแวนด์ และยังมีสีสันท่างๆ ให้เลือกมาก ส่วนในด้านราคาก็ไม่แพงเกินไป จนเป็นที่ยอมรับกันว่า สีรีแอคทีฟได้ทำให้ปริมาณการใช้สีย้อมฝ้ายประเภทอื่นๆ ลดลง โดยเฉพาะสีแวนด์ ซึ่งในปัจจุบันสีรีแอคทีฟได้กลายเป็นสีย้อมฝ้ายที่มีความสำคัญมากประเภทหนึ่ง

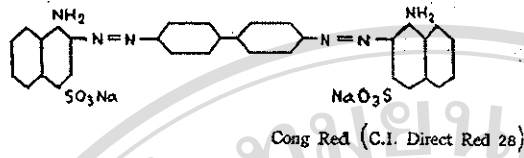
2.2 โครงสร้างเคมีของสีไคเร็กซ์

สีไคเร็กซ์ประกอบด้วยกลุ่มของสารประกอบ Sulphonated Azo อยู่ 7 ชนิดด้วยกัน คือ

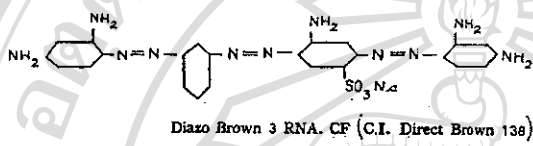
- 1) กลุ่ม Mono-Azo ตัวอย่างที่ดีได้แก่ Diazamine Scarlet B (C.I Disect Red 118)



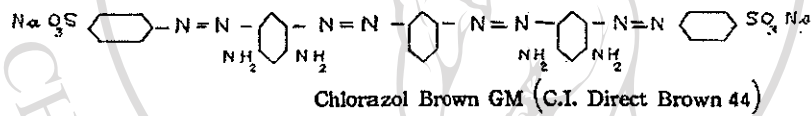
2) กลุ่ม Disazo



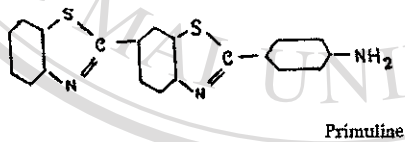
3) กลุ่ม Thiazole



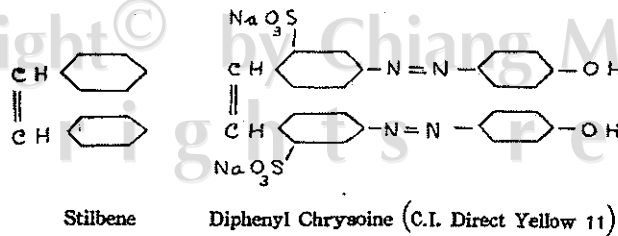
4) กลุ่ม Polyazo หรือ Tetrakis Azo



5) กลุ่ม Phthalocyanin



6) กลุ่ม Stilbene

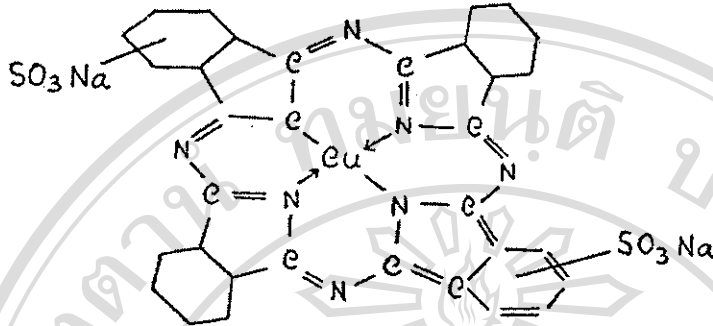


ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright © by Chiang Mai University

All rights reserved

7) กลุ่ม Phthalocyanine



ทั้งหมดนี้เป็นตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของสีไดเร็กต์แต่ละกลุ่มมีตัวสีเป็นจำนวนมากผลิตออกจำหน่ายโดยบริษัทต่างๆกัน ความคงทนและความสม่ำเสมอของสีแต่ละตัวไม่เท่ากัน

2.3 ผลกระทบของการทิ้งน้ำเสียสีรวมจากการย้อมผ้า

น้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมสีผ้าส่วนใหญ่มีอนุภาคหรือโมเลกุลของสีย้อมปนอยู่เป็นจำนวนมากมีผลทำให้น้ำเสียสีรวมที่ได้จากการย้อมสีผ้ามีคุณสมบัติที่เป็นต่างและมีสารอินทรีย์มีสีเข้มมาก มีเกลือละลายอยู่มาก ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะก่อให้เกิดผลกระทบต่างๆ ซึ่งพอที่จะสรุปได้ดังนี้

- 1) เนื่องจากน้ำเสียสีรวมมีสีเข้มมาก ก่อให้เกิดความรู้สึกน่ารังเกียจต่อผู้ที่พบเห็นและยังขัดขวางการเดินทางของแสงสู่แหล่งน้ำซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศของแหล่งน้ำนั้นโดยตรง
- 2) บดบังทางเดินของแสงที่จะลงสู่ผิวด้านใต้ของแหล่งน้ำทำให้ กิจกรรมการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำเกิดขึ้น ได้น้อยลงส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศของแหล่งน้ำโดยตรง
- 3) สีที่มีสารประกอบพวกอะโซ (Azo Compound) อาจเกิดการเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบอันตรายบางตัวที่อาจเป็นสารก่อมะเร็ง

2.4 ประเภทของสิ่งสกปรกที่เจือปนอยู่ในน้ำเสีย

โดยทั่วไปจะจำแนกสิ่งสกปรกที่เจือปนอยู่ในน้ำทิ้งจากกิจกรรมย้อมสีผ้าไว้ดังนี้

- 1) สีย้อม ในการย้อมเส้นใยจะมีการดูดซึมสีย้อมได้เพียงบางส่วนเท่านั้น ส่วนที่เหลือจะยังคงอยู่ในน้ำย้อม และจะถูกปล่อยออกมากับน้ำเสียในที่สุด ปริมาณสีที่ยังคงเหลืออยู่ในน้ำย้อมจะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสีที่ทำการผสมและประเภทของสีที่ใช้

2) สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการย้อม สารเคมีเหล่านี้จะมีอยู่หลายประเภทซึ่งส่วนใหญ่จะคงเหลืออยู่ในน้ำย้อมและจะถูกปล่อยออกมาเป็นน้ำเสีย

3) เศษเส้นใย

2.5 กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation Process)

1) ชนิดของสารแขวนลอยในน้ำ

สารแขวนลอยซึ่งเป็นสาเหตุของสี และความขุ่นในน้ำเป็นพวกคอลลอยด์ ขาจากพวกอินทรีย์หรืออนินทรีย์สารก็ได้ คอลลอยด์เหล่านี้จะมีประจุซึ่งอาจเป็น + หรือ - แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือชนิดที่เกลียดน้ำ (Hydrophobic Colloid) คอลลอยด์ชนิดนี้มีประจุ + หรือ - บนอนุภาคก็ได้แต่ต้องเป็นประจุชนิดเดียวกัน คอลลอยด์ชนิดนี้สามารถกำจัดได้โดยให้ร่วมกับโลหะหนักที่มีประจุ +3 เช่น อลูมิเนียม เหล็ก กลายเป็นเกลือซึ่งไม่ละลายน้ำ แต่กำจัดยากต้องใช้สารเคมีจำนวนมาก

2) กระบวนการโคแอกกูเลชัน และ ฟลอคกูเลชัน (Flocculation)

โคแอกกูเลชัน มาจากคำภาษาละตินว่า Coagulare ซึ่งหมายความว่า “To Drive Together” คือการเข้ารวมตัวกัน ซึ่งเป็นผลจากการเติมสารเคมีลงในน้ำซึ่งมีสารแขวนลอยอยู่ทำให้การอยู่ตัวของอนุภาคถูกทำลายไปโดยการลดแรงผลักทำให้อนุภาคอยู่ห่างกัน การตกตะกอนทางเคมีที่เหมาะสมซึ่งจะทำให้อนุภาคต่าง ๆ เข้ามาเกาะกันเมื่อสารเคมีสัมผัสกับอนุภาคต่าง ๆ การผสมในขั้นนี้จึงเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งจะทำให้การกระจายตัวของสารเคมีเป็นไปได้ดี และเพิ่มโอกาสที่จะทำให้อนุภาคต่าง ๆ มาเจอกัน กระบวนการนี้เกิดขึ้นในระยะเวลาสั้น ๆ ผลที่ได้คืออนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น หลังจากการสูญเสียการอยู่ตัว (Destabilized) ของคอลลอยด์ จากนั้นอนุภาคจะรวมตัวกันเป็นกลุ่มเรียกว่า Flocc เรียกว่ากระบวนการ ฟลอคกูเลชัน คำนี้มาจากภาษาละตินว่า Flocculare แปลว่า “To Form a Flocc” คือ การรวมตัวกันเป็นกลุ่มหรือการเกิดปุ๋ย ซึ่งมีลักษณะคล้ายก้อนขนสัตว์เป็นปุ๋ย ฟลอคกูเลชันเกิดโดยการผสมเบา ๆ และใช้เวลานานเพื่อที่จะเปลี่ยนอนุภาคจากชิ้นเล็ก ๆ ให้เป็นชิ้นใหญ่ซึ่งมองเห็นได้และจะตกตะกอนอย่างรวดเร็ว

2.5.1 การเกิดเสถียรภาพของอนุภาค

อนุภาคจะถือว่าเสถียรภาพ เมื่อสามารถดำรงอยู่ในสถานะแขวนลอยในน้ำได้โดยไม่ตกตะกอนลงมากายในระยะเวลาอันสั้น เสถียรภาพของอนุภาคเกิดขึ้นเนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็กมากจนจมตัวช้า และมีสาเหตุอื่นที่ทำให้อนุภาคแขวนลอยเกิดเสถียรภาพได้อีก 2 ประการคือ

1. การยึดเกาะกันระหว่างอนุภาคแขวนลอยกับโมเลกุลน้ำ ทำให้โมเลกุลของอนุภาคแขวนลอยเกิดมีน้ำล้อมรอบ และสามารถสัมผัส หรือเกาะกันให้มีขนาดใหญ่ขึ้นได้

2. ประจุไฟฟ้าที่ผิวของอนุภาคแขวนลอย เกิดขึ้นจากการแตกตัวของอนุมูลต่างๆ จากการดูดซับไอออนจากน้ำ หรือเกิดจากการแทนที่ไอออนที่ผิวของอนุภาคโดยไอออนจากภายนอก ประจุบนผิวของอนุภาคจะดึงดูดไอออนต่างประจุ ทำให้เกิดชั้นของไอออนต่างประจุล้อมรอบอนุภาค ซึ่งจะถูกรบกวนโดยการเคลื่อนไหวของโมเลกุลของน้ำ ทำให้มีลักษณะเป็นชั้นกระจาย (Diffuse Layer) ที่มีความหนาแน่นของไอออนที่บริเวณผิวของอนุภาค ซึ่งเรียกว่าชั้นถาวร (Fixed Layer) จะเรียกพื้นผิวของชั้นถาวรนี้ว่า Shear Plane ศักย์ไฟฟ้าของอนุภาคจะมากที่สุดบริเวณผิวของอนุภาค และจะลดลงตามระยะห่างที่ออกไป จนมีค่าเท่ากับศูนย์

เนื่องจากประจุไฟฟ้าของอนุภาคมีผลต่อการเกิดเสถียรภาพของอนุภาคมากกว่าสาเหตุอื่นมาก ดังนั้นการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคจะเป็นการลดผลของประจุไฟฟ้าซึ่งมีอิทธิพลมากกว่าเป็นสำคัญ

2.5.2 การลดเสถียรภาพของอนุภาคสารแขวนลอย

การลดเสถียรภาพของสารแขวนลอยแบ่งออกได้เป็น 4 แบบ คือ

1. โดยการลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse Layer)

การเพิ่มจำนวนไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามกับประจุของอนุภาค จะทำให้จำนวนไอออนต่างประจุ (Counter-Ion) ในชั้นกระจายเพิ่มขึ้น และทำให้ความหนาของชั้นกระจายลดลง เนื่องจากจำนวนของประจุลบของอนุภาคไม่สามารถส่งออกไปได้ไกลเท่าเดิม ทำให้อนุภาคสามารถเข้าใกล้กันจนเกาะกันได้ด้วยแรงดึงดูด

2. โดยการดูดติดและทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาคแขวนลอย (Adsorption Charge Neutralization)

สารเคมีบางชนิดสามารถแตกตัวให้ประจุตรงกันข้ามกับอนุภาคแขวนลอย และมีความสามารถในการดูดติดกับอนุภาคแขวนลอย ทำให้ศักย์ไฟฟ้าของอนุภาคแขวนลอยลดลง(แรงผลักระหว่างอนุภาคลดลง) และทำลายเสถียรภาพของอนุภาคแขวนลอยจนทำให้สามารถเข้าใกล้กันแล้วรวมตัวกันเป็นตะกอนตกลงได้

3. โดยการจับอนุภาคคอลลอยด์ไว้ในตะกอนของสารประกอบที่สร้างขน (Sweep Coagulation)

เป็นการเติมสารประกอบของเกลือของโลหะบางชนิด ซึ่งมีความสามารถในการตกผลึกอย่างรวดเร็วโดยใช้อนุภาคแขวนลอยเป็นแกนกลาง ทำให้อนุภาคมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นและอิทธิพลของประจุไฟฟ้าลดลง อนุภาคจึงสัมผัสกันและตกตะกอนได้

4. โดยการใช้สารอินทรีย์โพลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคแขวนลอย

โพลิเมอร์เป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และมีอนุภาคต่อกันเป็นสายยาว เมื่อเติมลงไป ในน้ำจะแตกตัวและมีส่วนยึดเกาะกับอนุภาคได้โดยกลไกต่าง ๆ และมีหน้าที่เชื่อมอนุภาคเข้าด้วยกัน ทำให้เกิดเป็นตะกอนใหญ่ขึ้น

2.5.3 กลไกการทำโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มและสารประกอบเหล็ก

สารส้มและสารประกอบเหล็ก สามารถทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์จนเกิดโคแอกกูเลชันได้ด้วยกลไกหลัก 2 ประการ คือ กลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุไฟฟ้า และกลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ด้วยผลึกหรือ Sweep Coagulation แต่การทำโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มหรือเหล็กส่วนใหญ่ยังมีกลไกแบบ Sweep Coagulation เป็นกลไกหลัก และอาจมีกลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุเป็นกลไกร่วม

ลำดับของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในสมการ มีความสำคัญในการกำหนดกลไกของโคแอกกูเลชันมาก อีออน Complex ที่มีประจุ (ก่อนจะกลายเป็นผลึกของ $Al(OH)_3$) กลไกการทำลายเสถียรภาพจะเป็นแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ แต่ถ้าการดูดติดผิวไม่เกิดขึ้นภายในเวลา 1 วินาที ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสก็จะดำเนินต่อไปจนกระทั่ง Hydroxo Complex กลายเป็น $Al(OH)_3$ กลไกการทำลายเสถียรภาพจะเป็นแบบ Sweep Coagulation

1. กลไกโคแอกกูเลชันแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ

สารส้มหรือสารละลายประกอบเหล็กสร้างกลไกแบบดูดติดผิว และทำลายประจุไฟฟ้า โดยการแตกตัวเป็นอีออน Complex ชนิดต่าง ๆ เช่น $Al(OH)^{+2}$, $Al_8(OH)_{20}^{+4}$ ซึ่งสามารถดูดติดบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ และสามารถทำลายประจุลบของคอลลอยด์ทำให้สูญเสียเสถียรภาพและจะรวมตัวกันหลาย ๆ อนุภาคจนกลายเป็น Floc กลไกนี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อปริมาณของสารส้มมีน้อยจนกระทั่งผลคูณของ (Al^{+3}) และ (OH) ต่ำกว่า K_{sp} และ พีเอช ต้องไม่สูงหรือต่ำเกินไป กลไกแบบนี้มีข้อดีคือไม่เปลืองสารส้มและได้สลัดจ์ที่มีคุณสมบัติที่ดีคืออัดตัวได้แน่นและทำให้แห้งหรือดึงเอาน้ำออกจากสลัดจ์ได้ง่าย

ถึงแม้ว่ากลไกแบบคอลลอยด์ และทำลายประจุมีข้อดีดังกล่าว แต่ในทางปฏิบัติการ ออกแบบและควบคุมให้โคแอกกูเลชันมีกลไกแบบนี้มักไม่สามารถกระทำได้ ดังนั้น โคแอกกูเลชันส่วนใหญ่มีกลไกเป็น Sweep Coagulation ซึ่งเกิดได้ง่ายกว่ามาก เหตุผลเนื่องมาจากกลไกแบบคอลลอยด์และทำลายประจุ อีออน Complex ที่มีประจุบวกต่าง ๆ ต้องคอลลอยด์อนุภาค คอลลอยด์ภายในเวลา 10^{-4} -1 วินาที ถ้าเลยช่วงเวลานี้ไปแล้ว ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะดำเนินต่อไป จนเกิดผลึก $Al(OH)_3$ ทำให้เกิด Sweep Coagulation ปัจจัยที่ขัดขวางกลไกแบบคอลลอยด์และทำลายประจุ และสนับสนุนกลไกแบบ Sweep Coagulation คือการสัมผัสระหว่าง อีออนคอมเพล็กซ์ และอนุภาคคอลลอยด์ เป็นการยากที่จะทำให้เกิดขึ้นได้สมบูรณ์ภายในเวลา 10^{-4} - 1 วินาที และความสามารถในการละลายของ $Al(OH)_3$ อยู่ในระดับต่ำ (เช่น $Al(OH)_3$ จะตกผลึกเมื่อมีความเข้มข้นมากกว่า $7.8 \times 10^{-5} \text{ mg/l}$ ที่ พีเอช 7)

2. ด้วยกลไกโคแอกกูเลชัน แบบห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึก

สารส้มสร้างกลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึกหรือ Sweep Coagulation การสร้างผลึก $Al(OH)_3$ ซึ่งมีลักษณะคล้ายเป็นปุย เมื่ออนุภาคคอลลอยด์สัมผัสกับผลึก $Al(OH)_3$ ก็จะเกาะจับตัวอยู่บนผลึกนั้นเมื่อเกิดขึ้นมาก ๆ จะได้ Floc ขนาดใหญ่ที่ตกตะกอนได้ง่าย สารส้มที่ใช้ต้องมีปริมาณสูงพอจนทำให้ผลคูณของ Al^{3+} และ $(OH)^-$ มีค่าเกินกว่า K_{sp} นอกจากนี้ พีเอชของน้ำควรอยู่ในช่วง 6 - 7.5 จึงจะได้ผลดีที่สุด กลไกแบบนี้เกิดขึ้นได้ง่ายกว่าแบบคอลลอยด์และทำลายประจุ แต่มีข้อเสียคือเปลืองสารส้ม และให้สลัดจ์ จำนวนมากแต่คุณภาพต่ำคืออัดตัวไม่แน่น และคังน้ำออกได้ยากมาก

2.5.4 ชนิดของสารโคแอกกูแลนต์

1. สารส้ม

Aluminum Sulfate

สูตรเคมี

$Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$

ชื่อทั่วไป

สารส้ม

รูปร่าง

เป็นเม็ด, ผง, และเป็นก้อน

สีและคุณสมบัติ

สีน้ำตาลอ่อนจนถึงสีเทา-เขียว ; เป็นผง, ฝาด,

มี Hygroscopic น้อยกว่า ; 1% สารละลาย มี พีเอช 3.4

น้ำหนัก

960 ถึง 1200 kg/m^3

ส่วนประกอบ

อย่างน้อยที่สุดจะมี Al_2O_3 17%

ปริมาณสาร

สารละลาย ความเข้มข้นสูงสุดที่ละลายได้ในน้ำ 60 g/l

Alum, Liquid

สูตรเคมี	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{XH}_2\text{O}$
ชื่อทั่วไป	สารส้ม
รูปร่าง	เป็นสารละลาย
สี และคุณสมบัติ	สีเขียวอ่อนถึงสีน้ำตาลอ่อน ; 1% สารละลายมี พีเอช 3.4
น้ำหนัก	1270 g/l
ส่วนประกอบ	5.8 ถึง 8.5 % ของ Al_2O_3
ปริมาณสาร	เจือจางสารจนเหลือความเข้มข้น 3% ของสารละลายก่อนเติมลงน้ำ

2 Ferrous Sulfate

สูตรเคมี	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
ชื่อทั่วไป	Copperas, Iron Sulfate, Sugar Sulfate, Green Vitriol
รูปร่าง	เป็นเม็ด, ผลึก, ผง และเป็นก้อน
สี และคุณสมบัติ	สีเขียวถึงสีน้ำตาลอ่อนเหลือง ; มี Hygroscopic
น้ำหนัก	ประมาณ 1000 kg/m ³
ส่วนประกอบ	20% Fe
ปริมาณสาร	ใส่เป็นเม็ดดีที่สุด, ละลาย 60 g/l, ใช้ Detention Time 5 นาที

3 Ferric Chloride

สูตรเคมี	FeCl_3 (Anhydrous และ สารละลาย) ; $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
ชื่อทั่วไป	Ferrichlor, Iron Chloride
รูปร่าง	สารละลาย, เป็นเม็ด และเป็นก้อน
สี และคุณสมบัติ	สารละลาย---สีน้ำตาลเข้ม ; ผลึก---สีเหลือง-สีน้ำตาล Anhydrous---สีเขียว, สีดำ ; 1% สารละลายมี พีเอช 2.0
น้ำหนัก	สารละลาย ประมาณ 1440 kg/m ³ ; ผลึก 1000 kg/m ³ Anhydrous 1440 kg/m ³
ส่วนประกอบ	สารละลาย 35 ถึง 40% ; ผลึก 60%, และ Anhydrous 96 ถึง 97% ของ FeCl_3
ปริมาณสาร	สารละลาย ความเข้มข้นสูงสุดที่ละลายได้ในน้ำ 60 g/l

2.6 กระบวนการดูดติดผิว (Adsorption)

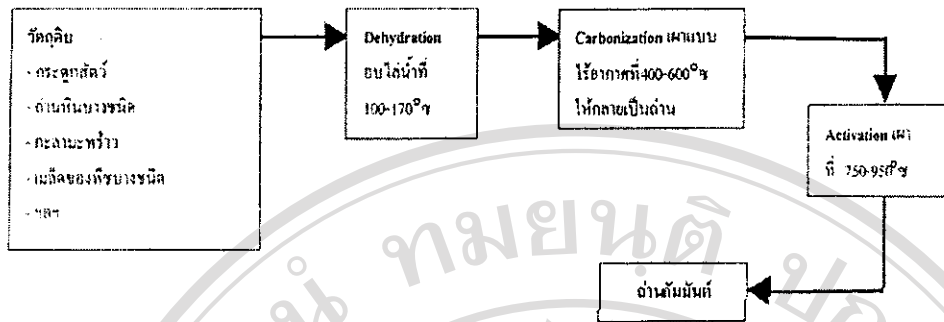
กระบวนการดูดติดผิวเป็นการแยก โมเลกุลของตัวถูกละลายออกจากสารละลายด้วยการใช้ผิวของของแข็ง การดูดติดผิวนี้จะเกิดขึ้นได้เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างอะตอมและโมเลกุลของตัวถูกละลายกับสารที่มาประกอบกันขึ้นมาเป็นพื้นผิว เมื่อตัวถูกละลายในของเหลวเคลื่อนที่ไปใกล้ผิวของของแข็ง กระบวนการดูดติดผิวจะเกิดขึ้นที่ระหว่างหน้าของแข็งกับของเหลว (Solid – Liquid Interface) โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างหน้าดังกล่าวจะเป็นผู้กำหนดอัตราเร็วและความสามารถในการดูดติดของพื้นผิว กระบวนการดูดติดของตัวถูกละลายในของเหลวบนผิวของของแข็งนี้เป็นกระบวนการที่นิยมใช้กันมากในการกำจัดสิ่งเจือปนที่ละลายน้ำออกจากน้ำ โดยตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดบนผิวของของแข็งนี้เรียกว่าสารที่ถูกดูดติด (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่สามารถดูดติดตัวถูกละลายไว้ที่ผิวเรียกว่า วัสดุดูดซับ (Adsorbent)

2.6.1 วัสดุดูดซับ (Adsorbent)

วัสดุดูดซับที่ใช้ในการกระบวนการดูดติดผิวมีด้วยกันอยู่หลายชนิด เช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ดินเหนียวประเภทต่างๆ แอคติเวตเต็ดชิลิกา แอคติเวตเต็ดอลูมินา ซิลิกาเจล แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ถ่านกระดูก ถ่านกะลา ฯลฯ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันถ่านกัมมันต์นับเป็นวัสดุดูดซับที่ดีที่สุดและนิยมใช้กันมากที่สุด ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด โดยการทำให้มีรูพรุนหรือมีโพรงภายในเนื้อถ่านมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ทั้งนี้เนื่องจากการดูดติดผิวเป็นปรากฏการณ์พื้นผิว

การผลิตถ่านกัมมันต์จะเกิดขึ้นในสภาวะที่อัดอากาศ เพื่อเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนของสารอินทรีย์ ขณะเดียวกันก็ได้ผลิตก๊าซอื่นที่เป็นของเหลวและแก๊สออกมาด้วย โดยโครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกหลักที่เหลือกลายเป็นโครงสร้างของถ่านชาร์ ส่วนกลุ่มโครงสร้างโมเลกุลหรือหมู่ที่มีขนาดเล็กกว่าจะกลั่นสลายตัวออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้แก่ น้ำ แอมโมเนีย น้ำมันทาร์ และแก๊สต่างๆ

โดยการผลิตถ่านกัมมันต์จะมีขั้นตอนแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 ซึ่งโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการไล่น้ำ (Dehydration) การทำให้เป็นถ่าน (Carbonization) และการทำให้มีรูพรุนสูง (Activation) ในปัจจุบันเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์นั้นสามารถทำให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงถึง 600-1000 ตารางเมตรต่อกรัมหรือมากกว่านั้น การที่ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงจะทำให้สามารถดูดติดโมเลกุลจำนวนมากๆ ได้ ดังนั้นพื้นที่ผิวดังกล่าวจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดสมรรถภาพของการดูดติดผิว



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนของกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ (วรัญญู สงกรานต์, 2549)

ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในงานทางสิ่งแวดล้อมนั้นสามารถแบ่งตามขนาดออกได้เป็น 2 แบบ ดังนี้

1) แบบผง (Powder Activated Carbon; PAC)

ถ่านกัมมันต์แบบนี้มีขนาดอยู่ในช่วง 10-50 ไมครอนหรือน้อยกว่า การใช้ถ่านกัมมันต์แบบนี้กระทำโดยการเติมลงไปใต้น้ำและ/หรือน้ำเสีย โดยอาจเติมพร้อมกับสาร โคแอกกูแลนต์ในถังกวนเร็วก็ได้ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วจะรวมกับตะกอนแขวนลอยในน้ำกลายเป็นฟล็อก ซึ่งสามารถแยกออกจากน้ำโดยการตกตะกอนหรือการกรอง ด้วยเหตุนี้จึงนิยมเติมถ่านกัมมันต์ก่อนกระบวนการตกตะกอนหรือการกรอง การใช้ถ่านกัมมันต์แบบนี้มีข้อดีตรงที่ราคาถูก

การเพิ่มหรือลดปริมาณถ่านกัมมันต์เพื่อให้สอดคล้องกับความแปรปรวนของคุณภาพน้ำน้ำดิบนั้นสามารถกระทำได้ทันทีและสะดวก นอกจากนี้การดูดซับก็เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและไม่มีการลงทุนเบื้องต้น แต่อย่างไรก็ตามการใช้ถ่านกัมมันต์แบบนี้ก็มีข้อเสียตรงที่ใช้ได้ครั้งเดียวต้องทิ้งเนื่องจากการทำให้พื้นดินสภาพ (Regeneration) นั้นไม่คุ้มค่าและสามารถกำจัดสารปนเปื้อนให้เหลือน้อยได้ แต่การกำจัดจนหมดนั้นไม่คุ้มค่าเนื่องจากต้องใช้ถ่านกัมมันต์เป็นปริมาณมาก โดยรูปที่ 2.2 แสดงภาพของถ่านกัมมันต์ชนิดผง



รูปที่ 2.2 ลักษณะของถ่านกัมมันต์แบบผง

ที่มา: <http://www.carbonresources.com/images/powder.gif>

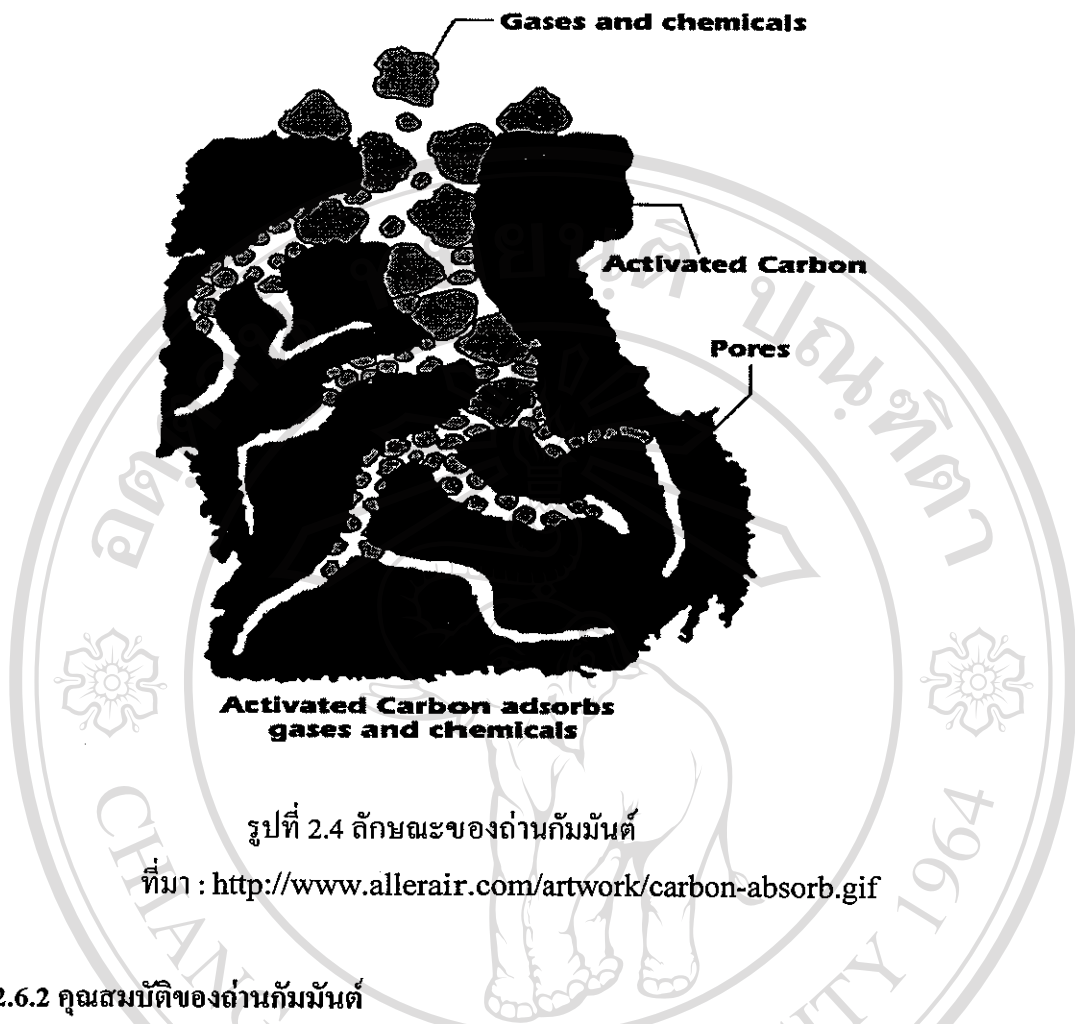
2) แบบเกล็ด (Granular Activated Carbon; GAC)

การใช้ถ่านกัมมันต์แบบนี้ในการกำจัดสารละลายออกจากน้ำกระทำโดยการบรรจุถ่านกัมมันต์ดังกล่าวลงในถังแล้วให้น้ำไหลผ่านเหมือนการกรองน้ำ ถังถ่านกัมมันต์นี้มักวางไว้หลังถังกรองเพื่อมิให้ถ่านกัมมันต์ต้องทำหน้าที่ในการกรองความขุ่นซึ่งอาจทำให้สมรรถนะในการดูดซับเสื่อมลงอันเนื่องมาจากการอุดตัน ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดที่ใช้งานเสื่อมสภาพแล้วสามารถนำมาทำให้ฟื้นสภาพด้วยการนำไปเผาใหม่ที่อุณหภูมิประมาณ 750-950 องศาเซลเซียส และนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยรูปที่ 2.3 แสดงภาพของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด และรูปที่ 2.4 แสดงลักษณะภายในของถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 แบบ



รูปที่ 2.3 ลักษณะของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด

ที่มา : <http://www.carbonresources.com/images/powder.gif>



รูปที่ 2.4 ลักษณะของถ่านกัมมันต์

ที่มา : <http://www.allerair.com/artwork/carbon-absorb.gif>

2.6.2 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์

1) การกระจายขนาดของอนุภาค

เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของปฏิกิริยาการดูดซับผิวและการสูญเสียเฮด โดยการใช้อนุภาคที่มีขนาดเล็ก อัตราเร็วของปฏิกิริยาการดูดซับผิวจะสูงและการสูญเสียเฮดจะสูงด้วย

2) ปริมาตรของโพรง (Pore Volume)

เป็นปริมาตรรวมของโพรงขนาดใหญ่และโพรงขนาดเล็กที่มีอยู่ในอนุภาคถ่านกัมมันต์

3) พื้นที่ผิว (Surface Area)

เป็นตัวกำหนดความสามารถในการดูดซับผิวของถ่านกัมมันต์ โดยถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวมากจะมีความสามารถในการดูดซับผิวที่สูง

4) เลขไอโอดีน (Iodine Number)

ใช้บอกความสามารถในการดูดติดผิวโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก โดยถ่านกัมมันต์ที่มีเลขไอโอดีนมากจะมีความสามารถในการดูดซับ โมเลกุลขนาดเล็กมาก

5) Molasses Number

ใช้บอกความสามารถในการดูดซับ โมเลกุลขนาดใหญ่ โดยถ่านกัมมันต์ที่มีค่า Molasses Number สูงจะสามารถดูดซับ โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ได้ดี

6) Bulk Density

ใช้บอกปริมาตรครอบครอง (Occupied Volume) ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์

2.6.3 กลไกของกระบวนการดูดติดผิว

การดูดติดผิว (Adsorption) เป็นกระบวนการกักพวงสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กซึ่งละลายอยู่ในน้ำให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง โดยที่สารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กนี้เรียกว่า Adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารที่ถูกดูดติดเรียกว่า Adsorbent การดูดติดผิวนี้จะเป็นการดูดติดแบบระหว่างสถานะ (Phase) ต่างๆทั้งสามสถานะ คือ ของเหลว (Liquid) ก๊าซ (Gas) และ ของแข็ง (Solid) ซึ่งมีได้ทั้งแบบของเหลว-ของเหลว ก๊าซ-ของเหลว ก๊าซ-ของแข็ง และ ของเหลว-ของแข็ง โดยในที่นี้จะพิจารณาถึงเฉพาะแบบ ของเหลว-ของแข็ง (Liquid –Solid Interface)

ในการดูดติดผิว โมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยก็จะถูกกำจัดออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนผิวถ่านกัมมันต์ โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของถ่านกัมมันต์และมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาถ่านกัมมันต์เกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อย เพราะ โมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่กับถ่านกัมมันต์ โดยในการเกาะติดจะมี Driving Force อยู่ 2 แบบ ดังนี้

ก. การดูดติดทางกายภาพ (Physical Adsorption) เกิดจากความแตกต่างของพลังงาน หรือแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrical Attractive Force) อย่างอ่อนๆ ซึ่งเรียกว่าแรง Van der Waals จะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของ Adsorbate กับ Adsorbent ดูดติดกันโดยวิธีทางกายภาพ ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นหลายๆชั้น (Multilayer) ซ้อนทับกัน โดยแต่ละชั้นจะซ้อนทับอยู่เหนือชั้นที่เกิดขึ้นก่อน โดยจำนวนชั้นที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับ ความเข้มข้นของสาร

ข. การดูดติดทางเคมี (Chemical Adsorption) เกิดจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของ Adsorbate กับ Adsorbent เกิดเป็นสารประกอบเคมี (Chemical Compound) โดยการดูดติดผิวชนิดนี้จะเลือกเฉพาะบริเวณที่สามารถเกิดพันธะเคมีได้เท่านั้น ซึ่งไม่เหมือนกับการดูดติดทางกายภาพที่ไม่จำกัดบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา

อย่างไรก็ตามการดูดติดผิวจะเกิดขึ้นทั้ง 3 กรณีในเวลาเดียวกันและยากที่จะแยกได้ว่าการดูดติดผิวที่เกิดขึ้นอยู่ในลักษณะใด

2.6.4 ทฤษฎีของการกระบวนการดูดติดผิว (Adsorption Theory)

โดยทั่วไปกระบวนการดูดติดผิวของโมเลกุลต่างๆ สามารถเขียนอยู่ในรูปปฏิกิริยาของการดูดติดได้ดังนี้



โดยที่ A คือ Adsorbate B คือ Adsorbent และ A*B คือ สารประกอบที่เกิดจากการดูดติดผิว (Adsorbed Compound) ในปฏิกิริยาของการดูดติดผิวที่เกิดขึ้นนี้ Adsorbate จะถูกดูดติดกับผิวของ Adsorbent ด้วยแรงทางเคมีและฟิสิกส์ชนิดต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น แรงเนื่องจากพันธะไฮโดรเจน แรงไฟฟ้าชนิด Dipole-Dipole และ แรง Vander Waals ถ้าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ (Reversible) ซึ่งมักจะเกิดขึ้นกับสารส่วนใหญ่ที่ถูกดูดติดบนผิวของถ่านกัมมันต์ โมเลกุลของสารต่างๆ จะถูกดูดติดและสะสมอยู่บนของ Adsorbate จนกระทั่งอัตราการดูดติดแบบไปข้างหน้าเท่ากับอัตราการย้อนกลับของการดูดติด (Desorption) ส่งผลให้เกิดสถานะที่เรียกว่า สถานะสมดุล (Equilibrium) โดยที่สถานะนี้ การสะสมตัวของโมเลกุลต่างๆ บนผิวของ Adsorbate จะไม่สามารถเกิดเพิ่มขึ้นได้อีกต่อไป

กระบวนการการดูดติดผิวได้ถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้อยู่ในรูปของสมการอย่างง่าย แล้วนำสมการมาวาดกราฟเพื่อที่จะสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่างๆ ได้ ซึ่งค่าคงที่ต่างๆ เหล่านี้จะเป็นแนวทางที่นำมาใช้ในการคำนวณออกแบบระบบดูดติดผิว โดยมีผู้สร้างสมการเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์และอธิบายลักษณะข้อมูลของการดูดติดผิวไว้หลายสมการ แต่ที่นิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายได้แก่ Langmuir Adsorption Isotherm และ Freundlich Adsorption Isotherm

2.6.5 Freundlich Adsorption Isotherm

สมการของ Freundlich เป็นสมการที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อที่จะอธิบายสมดุลของการดูดติด โดยมีรูปแบบที่เป็น Empirical Equation สมการของ Freundlich เป็นที่นิยมกันอย่างกว้างขวางอัน

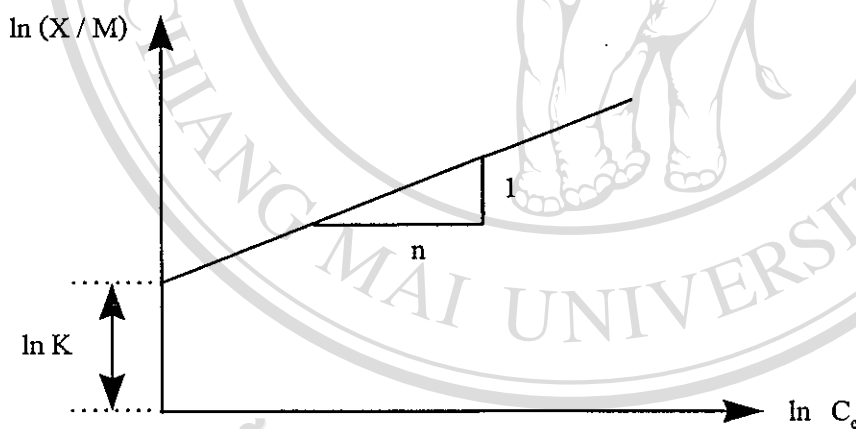
เป็นผลเนื่องมาจากสาเหตุที่สมการของ Freundlich สามารถอธิบายข้อมูลของกระบวนการดูดติดส่วนใหญ่ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ โดยสมการ Freundlich สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการได้ดังนี้

$$X/M = KC_e^{1/n} \quad (2.2)$$

และสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\ln (X/M) = \ln K + (1/n)\ln C_e \quad (2.3)$$

รูปที่ 2.5 แสดงสมการเชิงเส้นของ Freundlich Isotherm โดยที่ X/M คือ มวลสารของ Adsorbate / มวลสารของ Adsorbent หรือ จำนวน โมลของ Adsorbate / มวลของ Adsorbent ที่สภาวะสมดุล ค่า C_e คือ ค่าความเข้มข้นของสารละลายของ Adsorbate ที่สภาวะสมดุล และ ค่า K และ $1/n$ เป็นค่าคงที่ โดยค่า $1/n$ เป็นค่าคงที่ที่ไม่มีหน่วย ส่วนค่า K เป็นค่าคงที่ที่มีหน่วย โดยหน่วยของค่า K นั้นจะขึ้นอยู่กับหน่วยของ X/M และ C_e ที่ใช้ในสมการของ Isotherm



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(X/M)$ และ $\ln C_e$

ค่า K ในสมการของ Freundlich จะแสดงให้เห็นถึงความสามารถเริ่มต้นของการดูดติดของ Adsorbate บนผิวของ Adsorbent ส่วนค่า $1/n$ เป็นค่าที่แสดงความแข็งแรงของการดูดติดผิว (Strength of Adsorption) โดยในกรณีที่ค่า K มีค่าสูงมากๆ จะแสดงถึงความสามารถในการดูดติดผิวของของ Adsorbate ที่สูง (X/M มีค่าที่สูง) ส่วนในกรณีที่กำหนดให้ค่า K และ C_e มีค่าที่คงที่ เมื่อค่าของ $1/n$ มีค่าที่ต่ำมากๆ จะแสดงให้เห็นว่าสภาพของการดูดติดของ Adsorbate จะมีแนวโน้มที่จะไม่ขึ้นอยู่กับค่าของ C_e ทำให้กราฟของสมการ Isotherm มีความชันที่ต่ำจนเริ่มที่

จะขนานกับแนวแกน x ที่สภาวะเช่นนี้แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาการดูดซับของ Adsorbate บนผิวของ Adsorbent เป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับไม่ได้ (Irreversible) ส่วนในกรณีที่มีค่า $1/n$ มีค่าสูงมากๆ จะแสดงให้เห็นถึงความไม่แข็งแรงของพันธะในการดูดซับ ดังนั้นค่า X/M จะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีการเพิ่มหรือลดลงของค่า C_e

อย่างไรก็ตามสมการของ Freundlich ไม่สามารถที่จะนำมาใช้ประโยชน์ได้สำหรับทุกๆ ค่าของ C_e ที่ใช้ในการทดลอง กล่าวคือ เมื่อ C_e มีค่าที่เพิ่มขึ้น (ตามสมการที่ 2.2) ค่า X/M ก็จะมีค่าที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน จนกระทั่งปริมาณ Adsorbate ที่ถูกดูดซับบน Adsorbent เริ่มเข้าสู่สภาวะที่อิ่มตัว ค่า X/M ก็จะเริ่มมีค่าที่คงที่ เมื่อค่า C_e มีค่าที่เพิ่มขึ้นจากจุดนี้ ค่า X/M จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ (มีค่าที่คงที่) ดังนั้นที่สภาวะเช่นนี้ สมการของ Freundlich จะไม่สามารถใช้ทำนายกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นได้อีกต่อไป ดังนั้นในการทดลองของ Isotherm จำเป็นต้องคำนึงถึงเรื่องนี้เป็นสิ่งสำคัญ

2.6.6 Langmuir Adsorption Isotherm

บางครั้งเรียกว่า Ideal Localized Monolayer Model มีสมมุติฐานที่สำคัญ ดังนี้

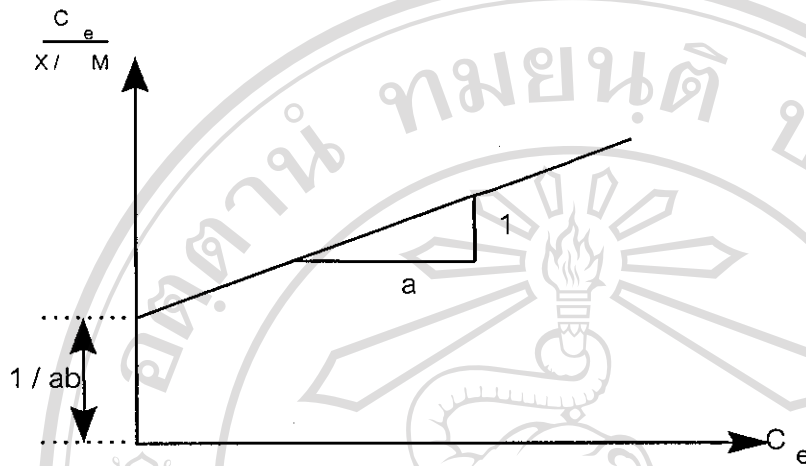
- แต่ละตำแหน่งที่ถูกดูดซับผิวจะรับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้นหรือกล่าวได้ว่าการดูดซับผิวเพียงชั้นเดียว
- มีพื้นที่ที่ถูกดูดซับจำกัด โมเลกุลที่ถูกดูดซับที่ผิวของของแข็งอยู่ในตำแหน่งที่แน่นอน
- ตรงบริเวณดูดซับผิวจะเกิดอัตราการติดและหลุดออก ซึ่งอัตราการติดมีมากกว่าอัตราการหลุดจนกระทั่งถึงสภาวะสมดุล (อัตราการติดเท่ากับการหลุด)
- พลังงานในการดูดซับมีค่าเท่ากันในทุกๆ ตำแหน่ง

นอกจากนี้ โมเลกุลที่ถูกดูดซับผิวไม่สามารถเคลื่อนย้ายไปมาอย่างอิสระระหว่างพื้นที่ผิวหรือทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นที่อยู่ใกล้ได้ โดยสมการ Isotherm ของ Langmuir แสดงไว้ในรูปดังนี้

$$\frac{X}{M} = \frac{abC_e}{1+bcC_e} \quad (2.4)$$

และสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังนี้ โดยรูปที่ 2.6 แสดงกราฟสมการเชิงเส้นของ Langmuir Isotherm

$$\frac{C_e}{(X/M)} = \frac{1}{ab} + \frac{1}{a}C_e \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{C_e}{X/M}$ และ C_e

โดยที่ค่า X/M และค่า C_e มีความหมายเช่นเดียวกับอธิบายไว้ในตอนแรก ค่า a และค่า b เป็นค่าคงที่ ซึ่งในสมการ Isotherm ของ Langmuir ค่า a เป็นค่าคงที่ที่แสดงความสามารถในการดูดซับสูงสุดของ Adsorbate บน Adsorbent ที่มีลักษณะของการดูดซับแบบ Mono Layer ส่วนค่า b จะแสดงถึงค่าพลังงานของการดูดซับ (Energy of Adsorption) โดยค่า b จะมีค่าที่สูงขึ้นเมื่อค่าความแข็งแรงของพันธะในการดูดซับมีค่าที่สูงขึ้น

2.6.7 จลศาสตร์ของการดูดซับ (Adsorption Kinetics)

การกำจัดสารต่างๆออกจากสารละลาย โดยกระบวนการดูดซับผิวจะประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆดังนี้

1) ขั้นตอนการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารละลายเข้าหาถ่านกัมมันต์ (Bulk Solution Transport)

Adsorbate จะเคลื่อนที่จากบริเวณที่เป็นสารละลาย (Bulk Solution) ไปสู่บริเวณที่ใกล้ๆกับอนุภาคของ Adsorbent (Boundary Layer) การเคลื่อนที่นี้จะเกิดขึ้นโดยผ่านกระบวนการแพร่ (Diffusion)

2) ขั้นตอนการแพร่ผ่านฟิล์มบางๆที่ผิวของ Adsorbate (Film Diffusion)

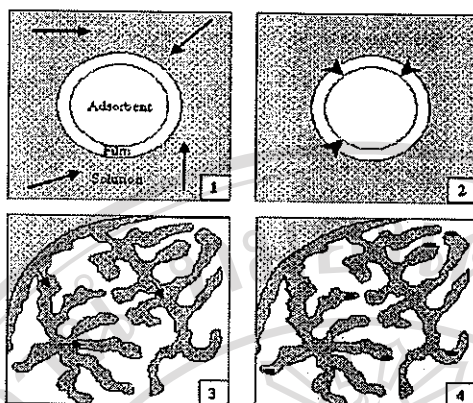
ในขั้นตอนนี้ Adsorbate จะเคลื่อนที่ผ่านชั้นฟิล์มบางๆของน้ำที่อยู่หนึ่งที่ถูกรอบๆอนุภาคของ Adsorbent โดยใช้วิธีการแพร่ (Molecular Diffusion) ระยะทางและเวลาในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านอนุภาคของ Adsorbate หรือการปั่นป่วนของน้ำใน Bulk Solution โดยที่อัตราการไหลและความปั่นป่วนที่สูงความหนาของชั้นฟิล์มบางๆนี้จะสั้นลง

3) ขั้นตอนการเคลื่อนที่ของโมเลกุลผ่านช่องว่างใน Adsorbate (Internal (Pore) Transport หรือ Pore Diffusion)

ภายหลังโมเลกุลเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มบางๆรอบอนุภาคของ Adsorbent โมเลกุลของ Adsorbate จะเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในช่องว่าง (Pore) ของ Adsorbent การเคลื่อนที่ของโมเลกุลภายในอนุภาคนี้ (Interparticle Transport) อาจเกิดขึ้นโดยผ่านกระบวนการแพร่ของโมเลกุลผ่านสารละลายในช่องว่างใน Adsorbent (Pore Diffusion) หรือโดยกระบวนการแพร่ไปตามพื้นผิวของ Adsorbent (Surface Diffusion)

4) ขั้นตอนการดูดติดผิว (Adsorption)

เมื่อโมเลกุลของ Adsorbate เข้าถึงบริเวณที่เป็นผิวของ Adsorbent การสร้างพันธะของกระบวนการดูดติด (Adsorption Bond) ระหว่าง Adsorbent และ Adsorbate จะเกิดขึ้น ขั้นตอนกระบวนการดูดติดผิวจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วสำหรับกระบวนการดูดติดผิวแบบกายภาพ (Physical Adsorption) ด้วยเหตุนี้ขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่งที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้นี้จะทำหน้าที่เป็นขั้นตอนที่ควบคุมปฏิกิริยาในการกำจัดโมเลกุลต่างๆออกจากสารละลาย แต่เมื่อใดก็ตามที่ขั้นตอนการดูดติดผิวเป็นการดูดติดผิวแบบเคมี (Chemical Adsorption) ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางธรรมชาติของโมเลกุลที่ถูกดูดติดผิว เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาจะช้า ซึ่งอาจจะช้ากว่าขั้นตอนต่างๆที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้นี้ ดังนั้นขั้นตอนการดูดติดผิวนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดปฏิกิริยาในการกำจัดโมเลกุลต่างๆ ออกจากสารละลาย



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการดูดติดผิว

ที่มา : <http://www.alcoholpurification.com>

2.6.8 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดติดผิว

1) ความปั่นป่วน

อัตราเร็วของการดูดติดผิวนั้นจะขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนของน้ำ เมื่อความปั่นป่วนต่ำ ชั้นฟิล์มบางๆ ของน้ำที่ห่อหุ้มอนุภาคของ Adsorbent จะหนา เป็นเหตุให้การแทรกตัวของโมเลกุลผ่านชั้นฟิล์มของน้ำเกิดขึ้นได้ช้า ดังนั้นในกรณีนี้ Film Diffusion จะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของปฏิกิริยา ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูง ฟิล์มของน้ำที่ห่อหุ้มวัสดุดูดซับจะบาง การแทรกตัวของโมเลกุลผ่านชั้นฟิล์มของน้ำจะเกิดขึ้นได้รวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในช่องว่างของ Adsorbent ในกรณีเช่นนี้ Pore Diffusion จะเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราเร็วของปฏิกิริยา ด้วยเหตุนี้เองอัตราเร็วของการดูดซับของถ่านกัมมันต์แบบผงจะขึ้นกับ Pore Diffusion เนื่องจากระบบที่ใช้ถ่านกัมมันต์แบบผงมีความปั่นป่วนที่สูง ในขณะที่อัตราเร็วของการดูดซับของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดจะขึ้นอยู่กับ Film Diffusion ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดนั้นมีลักษณะการใช้งานคล้ายกับการกรองน้ำ ซึ่งมีระดับความปั่นป่วนของน้ำที่ต่ำ

2) ขนาดและพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์

โดยปกติถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดเล็กจะมีอัตราเร็วในการดูดติดผิวสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นถ่านกัมมันต์แบบผงจึงมีอัตราเร็วในการดูดติดผิวสูงกว่าถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ส่วนความสามารถในการดูดติดผิวนั้นจะแปรผันโดยตรงกับพื้นที่ผิว เพราะฉะนั้นถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงจะดูดติดโมเลกุลได้มากกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวที่ต่ำ แต่เนื่องจากการดูดซับส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นภายในช่องว่างของ Adsorbent ดังนั้นขนาดของถ่านกัมมันต์จึงมีบทบาทน้อย

ในการกำหนดพื้นที่ผิว ถ่านกัมมันต์แบบผงและแบบเกล็ดจึงมีพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักใกล้เคียงกัน
ความสามารถในการดูดซับจึงใกล้เคียงกันด้วย

3) ความสามารถในการละลายน้ำของ Adsorbate

โดยปกติแล้วสารที่ละลายน้ำได้น้อยมักดูดซับที่ผิวถ่านกัมมันต์ได้ดีกว่าสารที่ละลายได้ดี ทั้งนี้เนื่องจากการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลของตัวถูกละลายจะถูกดึงออกจากน้ำไปดูดซับที่ผิวของถ่านกัมมันต์ ถ้าตัวถูกละลายเป็นสารที่ละลายได้ดี แรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารดังกล่าวกับน้ำก็จะมีมาก จึงทำให้ตัวทำละลายถูกดูดซับที่ผิวได้ยาก แต่อย่างไรก็ตามเกณฑ์ข้างต้นก็ไม่เป็นจริงเสมอไปในบางสถานการณ์ และอาจเป็นไปได้ในทางตรงกันข้ามได้

4) ขนาดของ Adsorbate

ขนาด โมเลกุลของตัวถูกละลายที่ต้องการกำจัดมีความสำคัญต่อกระบวนการดูดซับผิว เนื่องจากการดูดซับส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นภายในช่องว่าง (Pore) ภายในถ่านกัมมันต์ จากการวิจัยพบว่า การดูดซับผิวจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อ โมเลกุลมีขนาดเล็กกว่า โพร่งเล็กน้อย กล่าวคือ พอดีที่จะเข้าไปในโพร่งได้ เพราะแรงดึงดูดระหว่าง โมเลกุลและถ่านกัมมันต์จะมีค่ามากที่สุด

5) พีเอช ของสารละลาย

เนื่องจาก พีเอช ของสารละลายมีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็น ไอออนและการละลายของสารต่างๆ ดังนั้น พีเอช ของสารละลายจึงมีผลต่อการดูดซับด้วย ตัวอย่าง เช่น กรดอินทรีย์จะถูกดูดซับได้ดีที่ พีเอช ค่าที่นี้เนื่องจากกรดอินทรีย์จะแตกตัวได้น้อยที่ พีเอช ดังกล่าว สำหรับ พีเอช ที่เหมาะสมต่อการดูดซับนั้นหาได้จากกราฟทดลองเท่านั้น

6) อุณหภูมิของสารละลาย

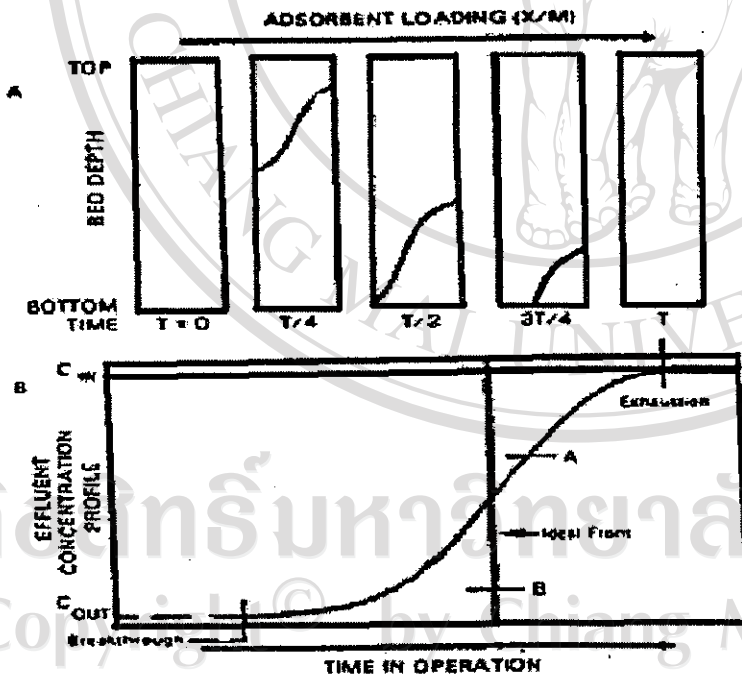
อุณหภูมิของสารละลายมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและความสามารถในการดูดซับผิว กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิของสารละลายเพิ่มขึ้น อัตราเร็วของการดูดซับผิวจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสามารถในการดูดซับผิวลดลง เพราะปฏิกิริยาของการดูดซับผิวเป็นปฏิกิริยาการคายความร้อน

2.6.9 ลักษณะของกราฟเบรคทูร์ (Breakthrough Curve) และการเคลื่อนย้ายมวลสารสำหรับ Fixed-bed adsorption column

Fixed-bed Adsorption Column เป็นระบบการดูดซับที่ให้น้ำเสียไหลลงผ่านชั้นดูดซับผิวที่อยู่กับที่ไม่มีลงไปในลักษณะเดียวกับการกรอง ลักษณะการดูดซับผิวเริ่มเกิดขึ้นบริเวณส่วนบนของระบบ แล้วบริเวณการดูดซับผิวจะเริ่มเคลื่อนที่ลงเกิดขึ้นที่ส่วนล่างของชั้นสารดูดซับ

จนกระทั่งหมดสภาพการดูดติดผิวที่ส่วนก้นของชั้นสารดูดติด ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ณ จุดที่การดูดติดผิวเริ่มทำงานไม่ได้ประสิทธิภาพ นิยมเรียกว่า จุดเริ่มหมดสภาพ (Breakthrough) หรือ จุด C_B และหลังจากจุดนี้ต่อไปเป็นเส้นโค้งยกตัวสูงขึ้นคือ การดูดติดผิวที่ค่อย ๆ หมดสภาพจนไม่สามารถบำบัดน้ำเสียได้อีก ซึ่งนิยมเรียกสั้น ๆ ใ้สั้นว่า Breakthrough Curve จนถึงจุด C_E ซึ่งเป็นจุดที่เรียกว่าจุดหมดสภาพ (Exhaustion Point) นิยมใช้กันที่ 95% ของความเข้มข้นของน้ำที่เข้าระบบ

กราฟเบรคทรูโดยทั่วไปมีลักษณะคล้ายตัวเอส (S-Shape) กรณีที่เส้นกราฟมีความลาดชันมาก ๆ แสดงว่า ในการดูดติดผิวจะมี Film Transfer Coefficient และ Internal Diffusion Coefficient สูง หรือ Freundlich Adsorption Isotherm มีลักษณะความลาดชันต่ำ ($1/n$ มีค่าน้อย) เมื่อกรองน้ำที่มีความเข้มข้นของสารละลายในของเหลวที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น C_0 ผ่านคอลัมน์ซึ่งบรรจุสารดูดติดผิว ความเข้มข้นของสารละลายในของเหลวที่ออกมาจากคอลัมน์ที่เวลาต่าง ๆ (ปริมาตรต่าง ๆ) คือ C_e ซึ่งจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงความเข้มข้นที่สนใจคือ เบรคทรู และจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งความเข้มข้นเท่ากับ $0.95C_e$ หรือจุด C_E ซึ่งเป็นปริมาตรที่สารดูดติดผิวหมดสภาพ



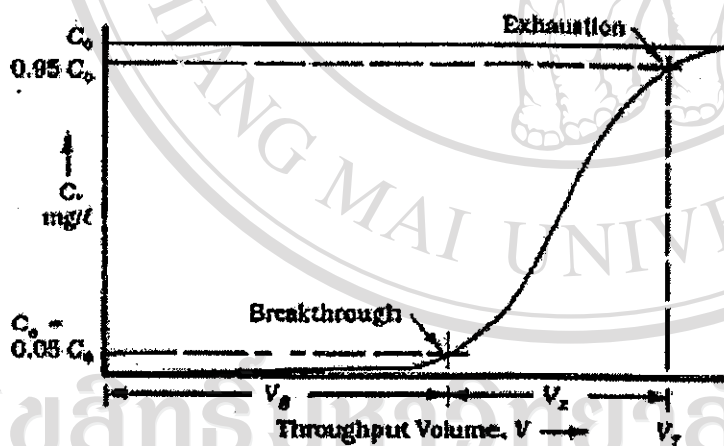
รูปที่ 2.8 Breakthrough Curve ของ Fixed-bed Adsorption Column

ที่มา : Faust Aly, 1987

รูปที่ 2.9 ถ้าคำนวณพื้นที่ภายใต้เส้น $0.95C_e$ ลงมาจนถึงเส้น C_e จะได้ค่าปริมาณสารในของเหลวทั้งหมดที่สะสมในคอลัมน์ และถ้านำปริมาณสารดูดติดผิวที่บรรจุในคอลัมน์มาหารจะได้ค่าความสามารถในการดูดติดผิวของวัสดุดูดซับที่สามารถดูดติดสารที่อยู่ในของเหลว นั้น ๆ ความสามารถในการดูดติดผิวเท่ากับผลรวมของพื้นที่ที่แบ่งเป็นส่วนเล็ก ๆ หารด้วยวัสดุดูดซับที่นำมาใช้เป็นสารดูดติดผิวในคอลัมน์ ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นสมการที่ ได้นั้นคือ

$$\text{ความสามารถในการดูดติดผิว} = \frac{\sum_{i=1}^n (C_E - C_{ei}) dV_i}{\text{Weight Media}} \quad (2.6)$$

- โดยที่ C_e = ความเข้มข้นของสารที่อยู่ในของเหลวที่จุดหมดสภาพ (95% ของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารที่อยู่ในของเหลวที่เข้าระบบ)
- C_{ei} = ความเข้มข้นของสารที่อยู่ในของเหลว (Solute) ที่ผ่านระบบ ณ ปริมาตรที่ i
- V_i = ปริมาตร ณ เวลา i



รูปที่ 2.9 รูปแบบของกราฟเบรคทรูในกระบวนการดูดติดผิว
ที่มา : Richards and Reynolds, 1996

ลิขสิทธิ์โดย Chiang Mai University
All rights reserved

2.6.10 การหาความยาวของ Mass Transfer Zone

ความยาวของ Mass Transfer Zone หรือ Sorption หาโดยสมการที่ 2.7

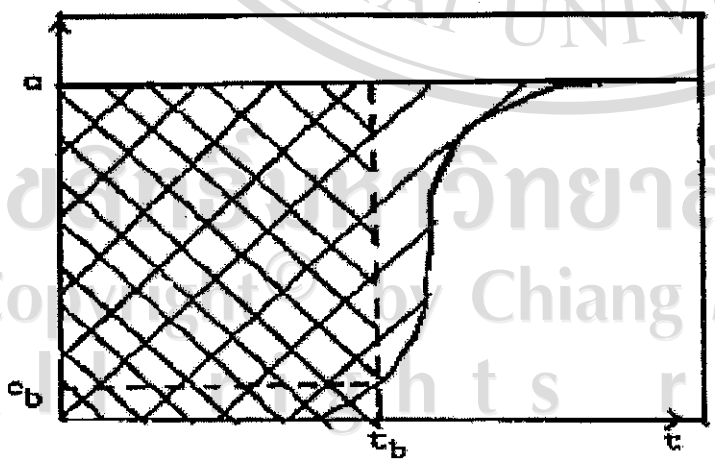
$$L_m = L \left[1 - \frac{t_b}{t_s} \right] \tag{2.7}$$

- โดยที่
- L_m = ความยาวของ Mass Transfer Zone
 - L = ความสูงทั้งหมดของชั้นสารดูดซับ
 - t_b = เวลาที่ใช้ในการบำบัดน้ำ จากเริ่มดำเนินระบบ จนกระทั่งน้ำออกเริ่มมีค่าความเข้มข้นเกินค่าที่ยอมรับได้ (Breakthrough Time)
 - t_s = เวลาที่ใช้ในการบำบัดน้ำ จากเริ่มดำเนินระบบ จนกระทั่งสารดูดซับถูกใช้จนหมด (Time to Saturation)

ค่า t_b และ t_s ในสมการที่ 2.7 อาจจะได้กราฟเบรคทรูคังในรูปที่ 2.10 หรือ โดยใช้สมการที่ 2.8 และสมการที่ 2.9 ดังนี้

$$t_b = \int_0^{t_b} \left(1 - \frac{C}{C_0} \right) dt \tag{2.8}$$

และ $t_s = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{C}{C_0} \right) dt \tag{2.9}$



รูปที่ 2.10 การหาค่า t_b และ t_s จาก Breakthrough Curve

ที่มา : Faust and Aly, 1987

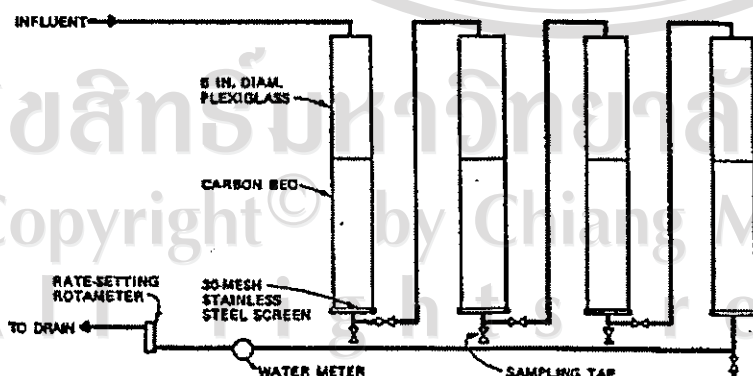
นอกจากสมการที่ 2.7 แล้ว ยังสามารถหาความยาวของ Mass Transfer Zone ได้โดยใช้สมการที่ 2.10 ดังนี้

$$Z_s = Z \left[\frac{V_z}{V_T - 0.5V_z} \right] \quad (2.10)$$

โดยที่ Z_s = ความยาวของ Mass Transfer Zone
 Z = ความสูงทั้งหมดของชั้นสารดูดติด
 V_T = ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัด ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพของสารดูดติด ดังแสดงในรูปที่ 2.9
 V_z = ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัด ระหว่างจุดเบรคทฤษฎีจนถึงจุดหมดสภาพของสารดูดติดหรือมีค่าเท่ากับ $V_T - V_B$

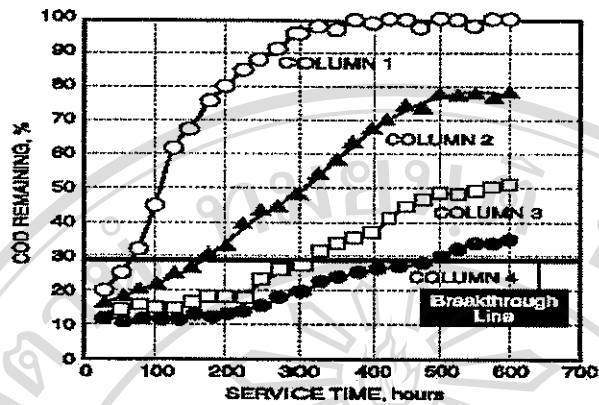
2.7 การนำถ่านกัมมันต์มาประยุกต์ใช้ในงานจริง

การนำถ่านกัมมันต์มาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย จะต้องมีทดสอบหาอัตราการใช้ถ่านที่เหมาะสม ซึ่งจะช่วยให้อาจใช้ถ่านกัมมันต์ได้ประหยัดที่สุด การทดสอบจะทำโดยใช้วิธี Pilot – Scale ดังแสดงในรูปที่ 2.11 คอลัมน์ที่ใช้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในตั้งแต่ 1-6 นิ้ว ต่อกันแบบอนุกรม ซึ่งอย่างน้อย 3 คอลัมน์ การวิเคราะห์ข้อมูลจะทำการพล็อตระหว่างค่าความเข้มข้นของสารที่ตรวจวัด และปริมาณของน้ำที่บำบัดได้ของแต่ละคอลัมน์ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 สำหรับการออกแบบถึงปฏิบัติการที่จะนำมาใช้จริง จะมีวิธีที่ใช้กันโดยทั่วไป 2 วิธี คือ Empty Bed Contact Time (EBCT) และ Bed Depth – Service Time (BDST)



รูปที่ 2.11 รูปแบบการดำเนินการติดตั้งของการทดลอง Pilot – Scale

ที่มา : Faust and Aly, 1987

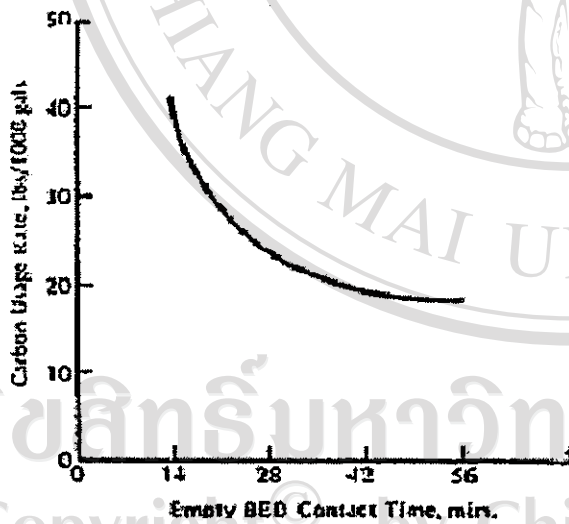


รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง COD และระยะเวลาในการบำบัดน้ำเสียในแต่ละคอลัมน์

ที่มา : http://www.eco_web.com/editirial/040221.html

2.7.1 วิธี Empty Bed Contact Time (EBCT)

วิธีนี้จะทำโดยพล็อตระหว่างอัตราการใช้คาร์บอนต่อปริมาณน้ำที่บำบัดได้กับ EBCT ดังแสดงในรูปที่ 2.13 แล้วเลือกค่า EBCT ที่เหมาะสมมาใช้ในการออกแบบ



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้คาร์บอนกับ Empty Bed Contact Time (EBCT)

ที่มา : Faust and Aly, 1987

ค่า Empty Bed Contact Time (EBCT) หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$EBCT = \frac{\text{Bed volume}}{\text{Flow rate}} \quad (2.11)$$

โดยที่ $\text{Bed volume} = Q/A$ (2.12)

และอัตราการใช้คาร์บอน (Carbon Usage Rate) หาได้จากสมการที่ 2.13

$$\text{Carbon usage rate} = \frac{\text{Weight of carbon in column}}{\text{Volume at breakthrough}} \quad (2.13)$$

2.7.2 วิธี Bed Depth – Service Time

วิธีนี้จะทำโดยการพล็อตระหว่างเวลาในการ Operate และความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ ดังแสดงในรูป 2.14 การออกแบบโดยวิธีนี้จะใช้ Bohart – Adams Model ซึ่งคิดขึ้นโดย Bohart และ Adams ซึ่งจะได้อธิบายรายละเอียดดังต่อไปนี้

$$\ln\left(\frac{C_0}{C} - 1\right) = \ln\left[\exp\left(\frac{KN_0D}{V}\right) - 1\right] - KC_0t \quad (2.14)$$

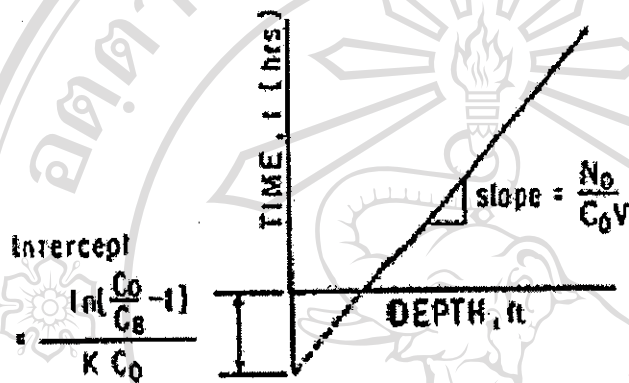
จากสมการ 2.14 เขียนในรูปสมการเส้นตรงได้ดังสมการ 2.15

$$t = \frac{N_0}{C_0V} \left[D - \frac{V}{KN_0} \ln\left(\frac{C_0}{C_B} - 1\right) \right] \quad (2.15)$$

โดยที่	t	=	เวลาการใช้งาน (ชม.)
	V	=	อัตราเร็วของน้ำ (เมตร/ชั่วโมง)
	D	=	ความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ (เมตร)
	D_0	=	ความลึกวิกฤตของชั้นถ่าน (เมตร)
	K	=	ค่าคงที่ (ล./มก.-ชม.)
	N_0	=	ค่าคงที่ (มก./ล.)
	C_0	=	ความเข้มข้นของน้ำเข้า (มก./ล.)
	C_B	=	ความเข้มข้นน้ำออกที่จุดเบรคทรู (มก./ล.)

ซึ่งความยาวของ Mass Transfer Zone หรือ ความลึกวิกฤตของชั้นถ่าน (Critical Bed Depth) สามารถหาได้จากสมการที่ 2.16 เมื่อ $t = 0$

$$D_0 = \frac{V}{KN_0} \left[\ln \left(\frac{C_0}{C_B} - 1 \right) \right] \quad (2.16)$$



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Service Time กับความลึกของชั้นถ่าน
ที่มา : Faust and Aly, 1987

จุดตัดแกน Y (Intercept) และความชัน (Slope) ของกราฟที่พล็อต ระหว่าง t และ D

คือ

$$b = \frac{1}{C_0 K} \ln \left(\frac{C_0}{C_B} - 1 \right) \quad (2.17)$$

$$\text{slope} = \frac{N_0}{C_0 V} \quad (2.18)$$

ต่อมา Bohart – Adams Model ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดย Hutchins โดย Model ใหม่ ที่มีชื่อว่า Hutchins' BDST Design Equation ซึ่งสามารถใช้ทำนายเมื่อน้ำเสียมีการเปลี่ยนแปลง อัตราการไหล และความเข้มข้น ซึ่งจากสมการเส้นตรงของกราฟที่พล็อตระหว่าง t และ D สามารถเขียนได้ว่า

$$t = ax + b \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned}
 \text{โดยที่ } t &= \text{ระยะเวลาใช้งาน} \\
 x &= \text{ความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์} \\
 a &= \text{slope} = \frac{N_0}{C_0 V} \\
 b &= \text{Intercept } b = \frac{1}{C_0 K} \ln \left(\frac{C_0}{C_B} - 1 \right)
 \end{aligned}$$

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำเสียค่าความชันของกราฟเส้นใหม่จะเปลี่ยนไป ซึ่งค่าความชันของกราฟเส้นใหม่สามารถหาได้จากสมการที่ 2.20

$$a' = \frac{Va}{V'} \quad (2.20)$$

โดยที่ a และ a' คือ ความชันเดิม และความชันใหม่
 V และ V' คือ ความเร็วของน้ำเดิม และความเร็วใหม่

สมการใหม่นี้ได้รับการยอมรับเพราะการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลมีผลน้อยมากหรือแทบไม่มีผลกระทบต่อ Intercept (b)

เมื่อการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นน้ำเสีย ค่าความชัน และ Intercept ของเส้นกราฟใหม่จะมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งความชัน และค่า Intercept ของกราฟเส้นใหม่สามารถหาได้จากสมการที่ 2.21 และ 2.22 ตามลำดับ

$$a' = \frac{C_0 a}{C_1} \quad (2.21)$$

$$b' = b \left(\frac{C_0}{C_1} \right) \frac{\ln \left[\left(\frac{C_1}{C_f} \right) - 1 \right]}{\ln \left[\left(\frac{C_0}{C_b} \right) - 1 \right]} \quad (2.22)$$

โดยที่ C_0 และ C_1 คือ ความเข้มข้นของน้ำเข้าเดิม และความเข้มข้นใหม่

C_b และ C_f คือ ความเข้มข้นของน้ำออกเดิม และความเข้มข้นใหม่

2.8 สรุปสาระสำคัญของเอกสารที่เกี่ยวข้อง

กฤษฎา คำหลอม (2545) ได้ทำการศึกษาสมรรถนะในการกำจัดสี่อ้อมรีแอกทีฟด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว การทดลองทำขึ้น โดยการบรรจุวัสดุดูดซับลงในแบบจำลองในห้องปฏิบัติการซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 7.21 ซม. ชั้นวัสดุดูดซับสูง 60 ซม. แล้วผ่านน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากการผสมน้ำประปากับสี่อ้อมเข้าสู่ระบบน้ำเสียที่ผ่านแบบจำลองมีค่า

ความเข้มข้นเท่ากับ 500 มก./ล. โดยศึกษาน้ำเสียที่ย้อมที่พีเอชต่างๆกัน 5 ค่าคือ 10.8, 10, 8, 7 และ 5 มีอัตราการบรรทุกษลศาสตร์ 176 ล./ตรม.-ชม. ดำเนินระบบแบบต่อเนื่องจนกระทั่งน้ำออกจากระบบมีความเข้มข้นมีความเข้มข้นของสีย้อมเท่ากับ 400 มก./ล. จึงหยุดระบบ โดยสีย้อมที่ใช้ในการศึกษามี 2 โทนีคือ โทนีสีแดง (LEVSFIX RED E-RN) และ โทนีเหลือง (8 G) จากผลการศึกษาพบว่า ความสามารถในการดูดติดสีย้อมรีแอคทีฟตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสมดุลสำหรับสีย้อมโทนีแดงจะมีค่าอยู่ในช่วง 10.84-41.50 มก./ก. สำหรับสีย้อมโทนีเหลือง ความสามารถในการดูดติดสีย้อมตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสมดุลจะมีค่าอยู่ในช่วง 16.54-24.76 มก./ก. ผลของพีเอชที่มีต่อการย้อมติดสีย้อมรีแอคทีฟที่มีต่อค่าความสามารถในการดูดติดสีย้อมตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสมดุล พบว่า โทนีแดงเมื่อพีเอชของน้ำเสีลดลงจาก 10.8-5 ค่าความสามารถในการดูดติดสีย้อมตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสมดุลมีค่าเพิ่มจาก 10.84 มก./ก ถึง 41.50 มก./ก สำหรับสีย้อมโทนีเหลืองพบว่าพีเอชไม่มีผลต่อค่าความสามารถในการดูดติดสีย้อมตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงจุดสมดุล

จิรวัดน์ ชาลีวรรณ (2541) ได้ทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดติดสีย้อมรีแอคทีฟด้วยถ่านกัมมันต์และถ่านแกลบโดยเป็นการศึกษาความสามารถในการดูดติดสีย้อมรีแอคทีฟโทนีแดง (Lsevfrix red E-RN) ในสารละลายสีรีแอคทีฟและน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้วัสดุดูดซับ 3 ชนิดคือ ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหิน 2 ชนิด คือ GAC SET- 79 และ GAC SET-110 และถ่านแกลบ โดยทำการทดลองเป็นแบบแบทช์ จากผลการศึกษาพบว่าความสามารถในการดูดติดสีของถ่านกัมมันต์ ชนิด GAC SET-70 จะมีค่าสูงสุดคือ 1.169 มก/ก ในสารละลายสีรีแอคทีฟและ 1.463 ในสารละลายสีรีแอคทีฟที่ผสมกับน้ำเสียสังเคราะห์ โดยมีค่าคงที่ตามสมการ Freundlich $n = 1.020$ และ $k = 0.526$ สำหรับสารละลายสีรีแอคทีฟ และ $n = 1.906$ และ $k = 1.036$ สำหรับสารละลายสีรีแอคทีฟผสมกับน้ำเสียสังเคราะห์ ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านแกลบมีค่าการดูดติดน้อยที่สุดคือ 0.505 มก./ล. สำหรับสารละลายสีรีแอคทีฟ และ 0.623 สำหรับสารละลายสีรีแอคทีฟผสมกับน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการทดลองในครั้งนี้ สารละลายสีรีแอคทีฟที่ใช้มีค่าความเข้มข้นเท่ากับ 375 มก./ล. ส่วนน้ำเสียสังเคราะห์ทำได้โดยการผสมสีรีแอคทีฟ 375 มก./ล. โซเดียมคลอไรด์ 75 กรัม และ โซเดียมคาร์บอเนต กับน้ำประปาและทำให้ปริมาตรเป็น 1 ลิตร

นนทรฐ อินยิ้ม (2541) ได้ศึกษาสมรรถนะในการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟจากน้ำเสียด้วยถ่านแกลบโดยเป็นการศึกษาการใช้ถ่านทดลองเป็นวัสดุดูดซับในการดูดติด โดยได้บรรจุถ่านแกลบไว้ในแบบจำลองระดับห้องปฏิบัติการซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.80 ซม. สูง 80 ซม. แล้วผ่านน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากการผสมน้ำประปากับสีย้อมรีแอคทีฟโทนีแดง (LEVEFIX RED E- RN) และสารช่วยย้อมที่มีความเข้มข้นของสีย้อมต่างๆ กันในช่วง 25 – 100 มก/ล (หรือมีความเข้มข้นของ ทีโอซี ในช่วง 6.13 – 24.52 มก/ล) ด้วยอัตราการไหลเข้าระบบ

ในช่วง 37.67 – 150.68 ล./ตรม.-ชม. เพื่อเปรียบเทียบผล การศึกษาแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของสี ย้อมและอัตราการไหลของน้ำที่เข้าสู่ระบบมีผลต่อสมรรถนะในการกำจัดสีของถ่านแกลบ โดย เมื่อความเข้มข้นของสีย้อมและอัตราการไหลเข้าสู่ระบบเพิ่มขึ้น ความยาวของ Mass Transfer Zone จะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 20.80 ซม. ไปเป็น 77.42 ซม. ในขณะที่อายุการใช้งานมีค่าลดลงจาก 2,448 ชม. เหลือเพียง 24 ชม. และปริมาณ ทีโอซี ที่ถูกกำจัดต่อหน่วยน้ำหนักของถ่านแกลบมีค่า ลดลงจาก 3.46 มก./ก. เหลือเพียง 0.54 มก./ก. โดยถ่านแกลบมีสมรรถนะในการกำจัดสีย้อมสูงสุดที่ ความเข้มข้นของสีย้อม 25 มก/ล (หรือที่ความเข้มข้นของ ทีโอซี = 6.13 มก./ล.) และอัตราการไหล ของน้ำเข้าสู่ระบบไม่เกิน 75.34 ลบ./ตรม.-ชม (หรือมีเวลากักน้ำไม่น้อยกว่า 11.1 ชม.) สำหรับ การศึกษาอิทธิพลของโทนสีที่มีต่อสมรรถนะในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟ 3 สี (โทนสีเหลือง, น้ำ เงินและแดง) โดยใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 50 มก./ล. อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบเท่ากับ 37.67 ล./ตรม. ชม พบว่าถ่านแกลบมีสมรรถนะในการกำจัดสีทุกตัวใกล้เคียงกัน โดยมีปริมาณ ทีโอ ซี ที่ถูกกำจัดต่อหน่วยน้ำหนักของถ่านแกลบอยู่ในช่วง 0.88 – 1.02 มก/ก

ปฤษฎา เมืองมหาธา (2546) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดติดสีย้อมรีแอกทีฟของ ถ่านกัมมันต์กะลามะพร้าว และถ่านกัมมันต์ลิกไนต์ โดยการทดลองทำโดยการบรรจุสารตัวในถัง ปฏิภาณที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 ซม. ชั้นตัวกลางสูง 60 ซม. แล้วผ่านน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียม จากการผสมน้ำประปากับสีย้อมและสารช่วยย้อม (โซเดียมคลอไรด์ 60 กรัม และ โซเดียม คาร์บอเนต 15 กรัม) โดยมีอัตราการบรรจุทุกทางชลศาสตร์ 176 ล./ตรม.-ชม. เข้าสู่ระบบ น้ำเสีย ผ่าน แบบจำลองจะมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 300 มก./ล และมีค่า พีเอช ต่างกัน 5 ค่า คือ 10.84, 10, 8, 7 และ 5 การดำเนินระบบเป็นแบบต่อเนื่อง โดยสีที่ใช้คือสีรีแอกทีฟโทนสีแดง (LEVAFIX RED E-RN) จากผลการศึกษาพบว่าถ่านกัมมันต์กะลามะพร้าวมีค่า Mass Transfer Zone อยู่ในช่วง 52.34 – 55.76 ซม. ความสามารถในการดูดติดอยู่ในช่วง 7.91 – 9.53 มก/ก ความสามารถในการดูด ติดจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดเบรคทรมีค่าในช่วง 2.11 – 3.14 มก./ก. และสำหรับถ่านกัมมันต์ลิกไนต์ ค่า Mass Transfer Zone มีค่าอยู่ในช่วง 41.25 – 47.55 ซม. ความสามารถในการดูดติดอยู่ในช่วง 21.66 – 34.50 มก./ก. สำหรับผลของพีเอชของน้ำเสียสีย้อมรีแอกทีฟ พบว่าในกรณีของ ถ่านกัมมันต์กะลามะพร้าว ประสิทธิภาพในการดูดติดสีย้อมสูงสุดมีค่าอยู่ในช่วง พีเอช 7 ในขณะที่ ถ่านกัมมันต์ลิกไนต์มีประสิทธิภาพในการดูดติดสีย้อมสูงสุดที่ พีเอช 8

Ali Riza Dinçer et al. (2006) ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูด ติดผิวของตัวกลางสองชนิด คือ GAC และ CBBA กับน้ำเสียสีสังเคราะห์ชนิด Reactive Dye โดยทำการทดลอง ผลของ พีเอช ความเข้มข้นสีเริ่มต้น เวลาสัมผัส และปริมาณของถ่านกัมมันต์ ที่มี ต่อความสามารถในการดูดติด โดยเตรียมน้ำเสียสีสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 500 mg/L ที่ พีเอช

เท่ากับ 7 ทำการจำกัดปริมาณของถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดที่ 10g /300 ml อุณหภูมิในการทดลอง 25 °C ความเข้มข้นของสีที่ต่าง ๆ กัน (25, 50, 75, 100, 150 และ 300 mg/l) และใช้เวลาที่ต่างกัน (5, 15, 30, 45, 60 และ 90 นาที) ทำการปรับ พีเอช ให้อยู่ในช่วง 4-9 ผลการทดลองพบว่า CBBA มีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียได้ดีและเป็นทางเลือกที่ดีเนื่องจากมีราคาถูก โดยความสามารถในการดูดติดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อลดความเข้มข้นของวีเริ่มต้น และเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัส แต่อย่างไรก็ตาม GAC มีความสามารถในการดูดติดดีกว่า CBBA ที่ระยะเวลาสัมผัส และความเข้มข้นของสีเท่ากัน

Boon Hai Tan et al. (1999) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียโดยสาร Coagulant 2 ชนิดในการทดลองคือ Magnesium Chloride เปรียบเทียบกับ Alum and Polyaluminium (PAC) โดยใช้ น้ำเสียสีจริงจากกระบวนการย้อมซึ่งเป็นสีชนิด Reactive Dye ทำการทดลองโดย กระบวนการ Jar Test ทำการศึกษาถึงผลของ พีเอช ปริมาณของ Coagulant ที่ใช้ และ ชนิดของ Coagulant ที่ใช้ ที่มีต่อประสิทธิภาพในการตกตะกอน โดยทำการกวนและปรับ พีเอช ที่ 80-85 rpm เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นกวนช้าที่ 30-35 rpm เป็นเวลา 10 นาที ทำการปรับ พีเอช ในช่วง 4-12 และ ปริมาณของ Coagulant ที่ใช้แตกต่างกัน 2-7g of Coagulant / Litre of Waste ซึ่งจากการทดลองสรุปได้ว่า การตกตะกอนเกิดขึ้นได้ดีที่ พีเอช 10.5-11 และเวลาในการสร้างตะกอนของ Magnesium Chloride ใช้เวลาน้อยกว่า PAC โดยเปอร์เซ็นต์ในการบำบัดของ Magnesium Chloride ในการกำจัด สี COD และ Suspended Solid เท่ากับ 97.9% 88.4% และ 95.5% ตามลำดับ

Cliona O Neill et al. (2002) ได้พิจารณาถึงค่า ADMI กับค่าของความเข้มข้นสี reactive azo dye ในกระบวนการย้อมสีผ้าฝ้าย เขาได้พบว่าความเข้มข้นของสีในน้ำออกจากกิจกรรมการย้อมผ้าจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.01 g dm⁻³ ถึง 0.7 g dm⁻³ และค่า ADMI จะเปลี่ยนแปลงตามชนิดของสีที่ใช้ในกระบวนการย้อมซึ่งจะเป็นการยากที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า ADMI นี้กับปริมาณความเข้มข้นของสี ยกตัวอย่างเช่น Red Dye มีค่าความเข้มข้นเท่ากับ 0.18 g dm⁻³ และ 0.43 g dm⁻³ สำหรับ Blue Dye จะมีค่า ADMI ที่เท่ากันซึ่งเท่ากับ 1500 หน่วย (Unit) และโดยทั่วไปน้ำเสียจากกิจกรรมการย้อมผ้าฝ้ายจะมีค่า ADMI อยู่ในช่วง 50 ถึง 3890 หน่วย

Emin Erdem et al. (2004) ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดติดสี 3 ชนิด คือ S1f Blau BRF (SB), Everzol Brill Red 3BS (EBR) และ Int Yellow 5GF (IY) ทำการทดลองแบบ แบบทซ์ที่อุณหภูมิ 30 °C ประสิทธิภาพในการดูดติดสีหาได้จากกระบวนการ UV-vis Spectorphotometric โดยทำการศึกษาผลของ ขนาดของ Diatomite, ปริมาณของ

Diatomite, ความเข้มข้นของสีเริ่มต้น และเวลาสัมผัสที่มีต่อความสามารถในการดูดติด โดยทำการหาความสามารถในการดูดติดหาด้วยการใช้ ไอโซเทอมของ Langmuir และ Freudlich โดยจากการทดลองพบว่า Diatomite สามารถใช้ในกระบวนการดูดติดสำหรับสีชนิด IY ได้ดีที่สุด รองลงมาคือชนิด SB และ EBR ตามลำดับ โดยเปอร์เซ็นต์ของการกำจัดอยู่ที่ 28.60% ถึง 99.23% ตามลำดับ

Minguang Dai et al. (1993) ได้ทำการศึกษาผลของพีเอชต่อปริมาณการดูดติดของสีชนิดต่างๆที่สภาวะอิ่มตัว (As) และหาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ζ Potential กับค่า As โดยการศึกษานี้ใช้สี 4 ชนิดคือ Methyl Green (MG), Methyl Violet (MV), Phenol Red (PR), Carmine (CM) และ Titan Yellow (TY) โดยที่ MG และ MV มีประจุเป็นบวก (Cationic Dye) ส่วน PR CM และ TY มีประจุเป็นลบ (Anionic Dye) โดยสีทั้ง 5 ชนิดนี้มีความแตกต่างกันทางด้านน้ำหนักโมเลกุลและโครงสร้างทางเคมี โดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดติด จากผลการทดลองพบว่าค่า As ของสีที่ติดบนถ่านกัมมันต์จะมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับค่าแรงดึงดูดและผลักรทางไฟฟ้า (Electrostatic Force) ระหว่างประจุบนผิวของถ่านกัมมันต์และประจุบนตัวสี โดยที่สภาวะที่พีเอชต่างๆ ค่า As ของสีชนิด MG และ MV ที่มีประจุเป็นบวกจะมีค่าที่ต่ำกว่าสีชนิด PR, CM และ TY ซึ่งมีประจุเป็นลบ ซึ่งเหตุเช่นนี้เป็นผลเนื่องมาจากที่พีเอชต่างๆประจุบนผิวของถ่านกัมมันต์จะมีแนวโน้มที่จะเป็นประจุบวกและจะเป็นบวกเพิ่มขึ้นเรื่อยๆที่พีเอชต่ำมากๆ ด้วยเหตุนี้จึงเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างประจุลบของสีกับประจุบวกบนผิวของถ่านกัมมันต์ อย่างไรก็ตามแม้ว่าสีชนิด MG และ MV จะมีหมู่ฟังก์ชันที่แตกต่างกันแต่กลับไม่พบความแตกต่างระหว่างค่า As ของสีทั้งสองชนิดนี้ จากผลการทดลองยังพบว่าประจุบนผิวของถ่านกัมมันต์จะสามารถเปลี่ยนแปลงเป็น 3 สภาวะที่แตกต่างกันซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงค่า ζ Potential บนผิวของถ่านกัมมันต์ ในสภาวะที่ศักย์ไฟฟ้าเป็นกลาง (Neutral Potential State) ค่า ζ Potential จะมีค่าใกล้เคียงกับ 0 ที่สภาวะนี้แรงการดูดติดส่วนใหญ่มาจากแรง Dispersion Force ดังนั้นที่สภาวะเช่นนี้พีเอชไม่มีผลต่อค่า As ในสภาวะที่ศักย์เป็นลบหรือบวก แรงของการดูดติดจะเกิดจากแรงดึงดูดและผลักรทางไฟฟ้าระหว่างถ่านกัมมันต์ กับประจุของสี โดยที่ค่าแรงของการดูดติดที่เกิดขึ้นจะหาได้จากผลรวมหรือผลต่างระหว่าง Dispersion และแรงทางไฟฟ้า ซึ่งผลเช่นนี้ได้สนับสนุนถึงผลของพีเอชต่อการดูดติดอันเป็นผลเนื่องมาจากค่า ζ Potential จะเปลี่ยนแปลงเมื่อค่าพีเอชเปลี่ยนไป

Namasivayam และ Kavitha (2002) ทำการวิจัยกำจัดสี Congo Red โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ทำจากเปลือกมะพร้าว โดยศึกษาผลของ เวลาในการกวน, ความเข้มข้นสีเริ่มต้น, ปริมาณตัวดูดติด, พีเอช และอุณหภูมิ พบว่าการดูดติดเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง ถ่านมีความสามารถในการดูด

ติด 6.7 mg/g การดูดติดจะดีที่พีเอชเป็นกรด และการดูดติดทางเคมีอาจจะเป็นกลไกหลักในการดูดติด

S. Venkata Mohn et al. (2002) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพและกลไกการกำจัดสีของวัสดุที่มีโครงสร้างพื้นฐานที่เป็นคาร์บอน 3 ชนิดคือ Lignite Coal, Charfine Coal และ Bituminous Coal โดยเปรียบเทียบกับ ถ่านกัมมันต์ชนิด Filtrasorb-400 การทดลองนี้ทำขึ้นการโดยนำ Lignite และ Bituminous มาบดให้ได้ค่า Geometric Mean (GM) ขนาด 106 mm^2 แล้วนำมาทำความสะอาด Char fine เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำ Carbonization ของ Lignite Coal ที่ในการทดลองนี้เป็นสี Direct Brown ที่มีโครงสร้างเป็นแบบ Triazo การทดลองถูกทำขึ้นในระดับห้องปฏิบัติการแบบ Batch โดยการใส่ตัวกลางดูดติด 100 mg ลงในขวดแก้ว 250 ml ในขวดแก้วจะมีปริมาตรสารละลายสีทดสอบ 100 ml โดยมีความเข้มข้น 50 mg/l นำขวดไปเขย่าที่ 100 rpm จลศาสตร์ของการดูดติดจะหาได้จากการวิเคราะห์ปริมาณการดูดติดของสีในสารละลายที่เวลาต่างๆกัน (5, 10, 20, 40, 60, 90, 120, 240, 360 และ 480 นาที) การศึกษา Isotherm เพื่อที่จะหาปริมาณการดูดติดสี เขาได้ทำการทดลองโดยการใช้ตัวกลางดูดติดในปริมาณที่แตกต่างกัน และนำสารผสมไปเขย่าโดยใช้เวลาเท่ากับ Equilibrium Time ที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนแรก เพื่อศึกษาผลกระทบของพีเอชต่อความสามารถในการดูดติดสี เขาได้ทำการปรับพีเอชของสารผสม (สารละลายสี และตัวกลางดูดติด) ให้อยู่ในช่วง 3.0-11.0 และหาปริมาณสีที่ตกค้างอยู่ในสารละลายภายหลัง Equilibrium Contact Time ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดติดสีได้สูงที่สุดที่สภาวะสมดุลย์ (84 %) และมีค่าลดน้อยลงใน Charfine (30 %), Bituminous (24 %) และ Lignite (22 %) ตามลำดับ

Sanja Papić et al. (2003) ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียสี ชนิด Reactive ด้วยกระบวนการ Coagulation ตามด้วย กระบวนการ Adsorption โดยใช้สี C.I. Reactive Red 45 และ C.I. Reactive Green 8 ซึ่งในส่วนของกระบวนการตกตะกอนศึกษาผลของ พีเอช และ ปริมาณของ Al(III) ที่มีต่อประสิทธิภาพในการตกตะกอน ส่วนในการทดลองกระบวนการดูดติดสี ใช้ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง PAC ทำการทดลองแบบเบทซ์โดยศึกษาผลของปริมาณ GAC ที่มีต่อความสามารถในการดูดติดโดยทำการวัดออกมาในรูปของ COD, ทีโอซี และ AOX ซึ่งในการบำบัดขั้นตองแรก กระบวนการตกตะกอนใช้น้ำเสียดังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นสี 1 g/l ทำการทดลองแบบ Jar Test ที่อุณหภูมิ 22- 25 องศาเซลเซียส ปริมาณของ Al(III) ที่ใช้แปรผันในช่วง 0.4-5.0 g/l และ พีเอช ที่เปลี่ยนแปลงในช่วง 3-5 จากนั้นทำการทดลองกระบวนการดูดติด แบบเบทซ์โดยทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ 7 ค่า (0.05, 0.10, 0.25, 0.50, 1.00, 1.50, 2.00) โดยทำการปรับ พีเอช ให้คงที่ที่ พีเอช เท่ากับ 6 ทำการทดลองหาเวลาสัมผัสที่ดีที่สุดที่ 0.25,

0.50, 1.00, 1.50, 2.00, 4.00, 6.00 h หลังจากนั้นนำไปหาความสามารถในการดูดติดโดยใช้ ไอโซเทอม ของ Freundlich เป็นตัวอธิบาย ซึ่งจากการทดลองพบว่าในกระบวนการตกตะกอน พีเอช ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับสี RR 45 และ RG 8 คือ ที่ พีเอช เท่ากับ 5 ทั้งของสี และปริมาณของ Coagulant ที่ดีที่สุด ที่ 3.0 g/l และ 1.5 g/l ตามลำดับ ในส่วนของกระบวนการดูดติดทำการทดลองแบบแบทช์ ได้เวลาสัมผัสที่ดีที่สุดที่ 2 ชั่วโมง โดยเปอร์เซ็นต์การกำจัดอยู่ที่ 98% และ 91% สำหรับที่ชนิด RR45 และ RG 8 ตามลำดับและในการทดลองถึงผลของปริมาณถ่านกัมมันต์ที่มีต่อความสามารถในการดูดติดพบว่าความสามารถในการดูดติดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของถ่านกัมมันต์ และจากการทดลองเปอร์เซ็นต์ในการกำจัด COD กำจัดได้ 95.7% และ 91.3%, ทีโอซี กำจัดได้ 99.7% และ 99.2%, AOX กำจัดได้ 99.8% สำหรับ สีชนิด RR45 และ RG8 ตามลำดับ

Vera Golob et al. (2005) ได้ทำการทดลองทำการตกตะกอน น้ำเสียสีจากหม้อย้อมผ้า ซึ่งสีที่ใช้เป็นสีชนิดที่ Reactive Dye โดยทำการศึกษาถึงค่า พีเอช, COD, BOD และ AOX ในการทดลองใช้ Coagulants 3 ชนิดคือ สารส้ม เพอร์รัสซัลเฟต และ เพอร์ริคคลอไรด์ เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารทั้ง 3 ชนิด โดยทดลองหา ปริมาณของ Coagulant ที่ใช้ และ พีเอช ที่เหมาะสม ที่สุดสำหรับการตกตะกอน โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณการใช้ที่ 0.01-0.4 g/L และ พีเอช ที่ 6-9 ทำการทดลองโดยวิธี Jar Test ทำการกวนเร็ว 2 นาที ด้วยความเร็วรอบ 100 rpm จากนั้น กวนช้า 20 นาที ด้วยความเร็วรอบ 20 rpm และทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลานาน 30-150 นาที ซึ่งจากการทดลองพบว่าสามารถทำการบำบัดน้ำเสียสีย้อมผ้าได้เป็นอย่างดีโดยที่สามารถลดปริมาณความเข้มข้นของสี, ทีโอซี และ COD ได้ 98%, 50% และ 45% ตามลำดับ ซึ่งสาร Coagulant ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดคือ สารส้ม และ พีเอช ที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองครั้งนี้คือ พีเอช เท่ากับ 9

W. Chu (2000) ได้ทำการนำเอา Recycled Alum Sludge (RAS) มาเพื่อเป็นสารช่วยสร้างตะกอนใช้ในกระบวนการตกตะกอนร่วมกับสารส้มโดยใช้สี 2 ชนิดในการทดลองคือ Dianix Blue FBL-E และ Ciba-corn Yellow P-6GS ซึ่งเป็นสีชนิดที่แสดงประจุเป็นลบ โดยทำการทดลองด้วยวิธี Jar test และทำการวัดปริมาณสีที่ถูกกำจัดด้วยวิธีการ UV Spectronic Genesys-2 Spectrophotometer from Milton Roy ในขั้นตอนการทดลองได้ทำการกวนเร็วด้วยความเร็วรอบ 80 rpm เป็นเวลา 1 นาที และกวนช้าด้วยความเร็วรอบ 30 rpm เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 20 นาที ทำการเปลี่ยนแปลง พีเอช ให้อยู่ในช่วง 8-11 ซึ่งพบว่า RAS สามารถทำการกำจัดสีทั้งสองชนิดได้เป็นอย่างดี โดยช่วยให้ประหยัดการใช้สารส้มถึง 1 ใน 3 ส่วนของปริมาณสารส้มปกติ ยกตัวอย่างเช่นประสิทธิภาพในการบำบัดอยู่ที่ 88% สำหรับสีชนิด Dianix Blue FBL-E โดยใช้ สารส้ม 75 mg/l ที่ พีเอช เท่ากับ 9.13 ซึ่งหากใช้สารส้มร่วมกับ RAS ปริมาณของสารส้มที่ใช้จะลดลงเหลือ 50 mg/l

Y. Al-Degs et al. (2000) ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบค่าการดูดติดสีรีแอคทีฟ 3 ชนิดคือ Remazol Reactive Yellow, Remazol Reactive Black และ Remazol Reactive Red โดยสีทั้ง 3 ชนิดนี้จะแสดงลักษณะที่เป็นประจุลบ (Anionic reactive dye) จากผลการทดลอง พบว่าเมื่อใช้ถ่านกัมมันต์ชนิด F-400 (มีพื้นที่ผิวเท่ากับ $1100 \text{ m}^2/\text{g}$, ค่า Bulk Density เท่ากับ $0.425 \text{ cm}^3/\text{g}$ และมีค่า Iodine Number เท่ากับ 1050) มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง $300\text{-}500 \mu\text{m}$ จะมีค่าการดูดติดที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 1111 (พีเอช 5.5), 434 (พีเอช 5) และ 400 (พีเอช 5) mg g^{-1} สำหรับ Reactive Yellow, Reactive Black และ Reactive Red ตามลำดับ สำหรับการทดลองศึกษาการผสมสีแต่ละชนิดเข้าด้วยกันแล้วนำไปวิเคราะห์การดูดติดสีรวมบนถ่านกัมมันต์ ผลการทดลองพบว่าการผสมสีทั้ง 3 ชนิดเข้าด้วยกันส่งผลให้ค่าการดูดติดสีที่จุดสมดุลย์ของสีทั้ง 3 ตัวมีค่าลดลง โดยจะมีค่า เท่ากับ 590, 140 และ 65 mg g^{-1} สำหรับสี Reactive Yellow, Reactive Black และ Reactive Red ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 Copyright© by Chiang Mai University
 All rights reserved