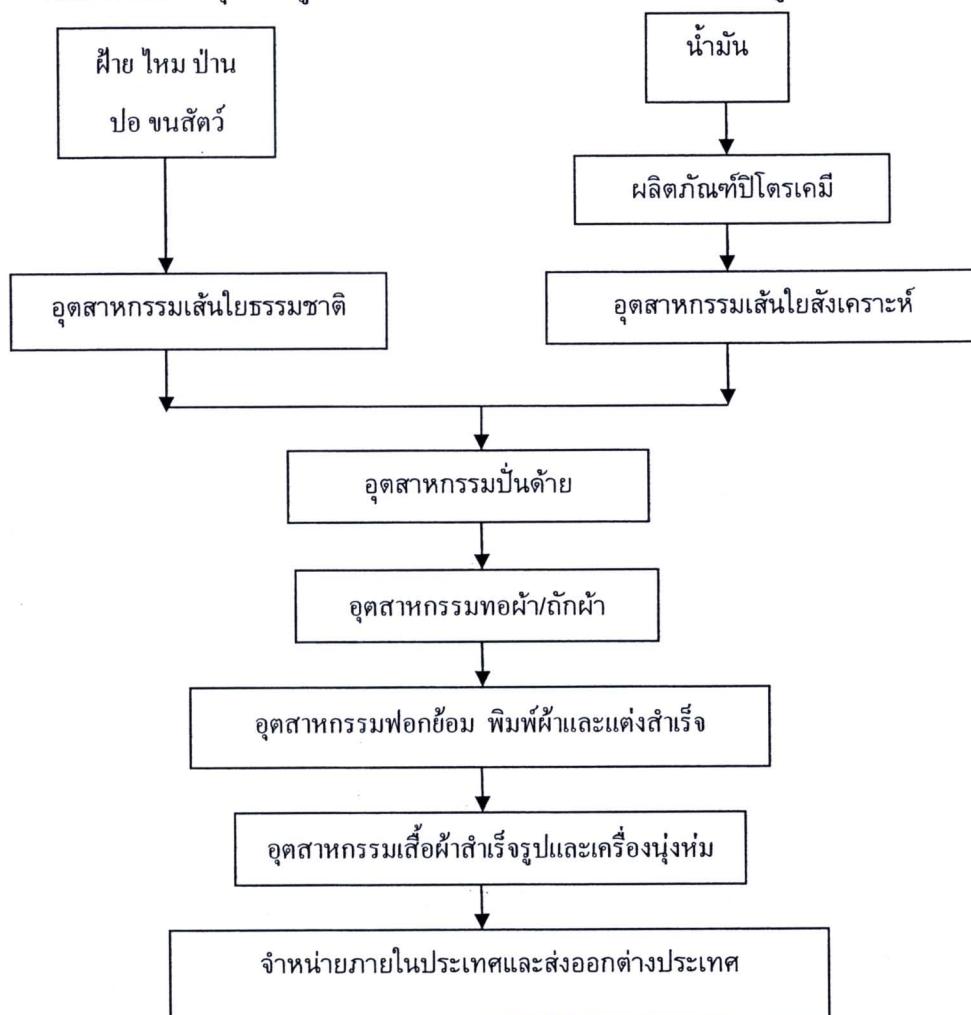


บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กรรมวิธีการผลิต

โครงสร้างอุตสาหกรรมสิ่งทอของไทยมีลักษณะครบวงจร ครอบคลุมตั้งแต่อุตสาหกรรมเส้นใย อุตสาหกรรมปั่นด้าย อุตสาหกรรมทอผ้าและถักผ้า อุตสาหกรรมฟอกย้อม พิมพ์และแต่งสำเร็จ และอุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่ม ดังนั้นอุตสาหกรรมพิมพ์ผ้าจึงเป็นอุตสาหกรรมชั้นกลางในอุตสาหกรรมสิ่งทอดังกล่าว ซึ่งเป็นขั้นตอนที่เปลี่ยนวัสดุสิ่งทอที่อยู่ในรูปเส้นด้ายหรือผ้าดิบให้เป็นวัสดุสำเร็จรูปที่สามารถนำไปผลิตหรือจำหน่ายให้แก่ผู้บริโภคต่อไปได้ ดังรูป 3.1



รูปที่ 2.1 ภาพรวมอุตสาหกรรมสิ่งทอ

ที่มา : คู่มือการกำกับดูแลอุตสาหกรรมฟอกย้อม, 2551 โรงงานฟอกย้อมสิ่งทอแบ่งเป็น 3 ประเภทตามวัตถุดิบ ดังนี้

1. การฟอกย้อมเส้นใย หรือเส้นด้าย
2. การฟอกย้อมผ้าทอ
3. การฟอกย้อมผ้าดัก

สำหรับโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอโดยทั่วไปจะประกอบด้วย 5 กระบวนการหลัก ดังนี้

1. กระบวนการเตรียมวัสดุก่อนย้อม เช่น การเผาขน การลอกแป้ง การขจัดสิ่งสกปรก การฟอกขาว และการชุบมัน เป็นต้น
2. กระบวนการให้สี เช่น การย้อม และการฝีนสี เป็นต้น
3. กระบวนการอบแห้งและการตกแต่งสำเร็จ
4. กระบวนการตรวจสอบคุณภาพ
5. กระบวนการบรรจุ

2.1.1 การเตรียมผ้าก่อนการย้อม

กระบวนการเตรียมผ้า นับว่าเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากการฟอกย้อมและตกแต่งสำเร็จ ทั้งนี้เพราะขั้นตอนนี้เป็นการนำเส้นด้ายหรือผ้าดิบออกจากโรงปั่นหรือทอ มาผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อเตรียมเส้นด้ายหรือผ้านั้นให้อยู่ในสภาพที่สามารถนำไปย้อมสีหรือตกแต่งสำเร็จได้เป็นอย่างดี

ขั้นตอนในการเตรียมผ้าโดยทั่วไปมี 5 ขั้นตอน คือ

- 1) การเผาขน (singeing)
- 2) การลอกแป้ง (desizing)
- 3) การกำจัดสิ่งสกปรก (scouring)
- 4) การฟอกขาว (bleaching)
- 5) การชุบมัน (mercerization)

1) การเผาขน (singeing)

ปกติผ้าฝ้ายและผ้าเรยอนจะประกอบด้วยเส้นใยสั้น จึงมักพบว่ามีปลายเส้นใยโผล่ออกมาบนผิวผ้า และส่วนนี้เองที่มีผลทำให้ผ้าติดไม่สม่ำเสมอ และสามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยการเผาขนหรือเส้นใยสั้นๆ ที่โผล่ออกมาบนผิวผ้า การเผาขนมี 3 วิธี ได้แก่ การใช้เปลวก๊าซ แผ่นโลหะ ความร้อน และไฟฟ้า (เกษม พิพัฒน์ปัญญาคุณ, 2541) แต่การเผาขนด้วยเปลวก๊าซเป็นวิธีที่นิยมมากที่สุด เพราะมีประสิทธิภาพสูงและการเดินเครื่องจักรที่ง่ายกว่าวิธีอื่น การเผาขนอาจเผาขนผ้าทั้งสองด้านหรือเผาแต่เพียงด้านเดียวก็ได้ การเผาขนขึ้นอยู่กับระดับคุณภาพของผ้า และจุดมุ่งหมายของการนำผ้าไปใช้งาน อย่างไรก็ตามสิ่งสำคัญก็คือ ต้องเผาให้ขนไหม้สม่ำเสมอทั่วกันทั้งผืนผ้า และไม่ใช้ความร้อนสูงจนกระทั่งเส้นใยเสื่อมคุณภาพ นอกจากนี้ถ้าจะให้ผลดีที่สุดต้องทำการเผาขนหลังจากการลอกแป้ง จึงจะกำจัดเส้นใยสั้นที่โผล่บนผิวผ้าได้สม่ำเสมอ แต่ในทางปฏิบัติมักทำ

การเผาขนก่อนการลอกแป้ง ทั้งนี้เส้นที่เกิดจากการเผาขนจะมีผลต่อพีเอชของน้ำในขั้นตอนต่อไปที่มีการใช้น้ำในกระบวนการ เช่น การลอกแป้ง การกำจัดสิ่งสกปรก เป็นต้น

2) การลอกแป้ง (desizing)

ในขั้นตอนการทอผ้าจำเป็นต้องมีการลงแป้งเพื่อทำให้ด้ายยืนแข็ง และทอได้ง่ายขึ้น นอกจากจะใส่แป้งแล้วยังมีการนำสารสังเคราะห์ซึ่งเรียกว่าสารไซซิง (sizing agent) เช่น โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol; PVA) คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (carboxyl methyl cellulose; CMC) โพลีอะคริลิก (polyacrylic) เป็นต้น แป้งหรือสารไซซิงข้างต้นจำเป็นต้องมีการกำจัดออกก่อนเพื่อทำให้การทำความสะอาดเส้นใยในขั้นตอนต่อไปได้ผลดี การลอกแป้งอาจทำได้โดยนำผ้าแช่น้ำร้อนให้เส้นใยพองตัว เพื่อทำให้สารช่วยย่อย (เอนไซม์) เข้าไปทำปฏิกิริยากับแป้งบนเส้นใยได้ง่าย ซึ่งทำให้แป้งหลุดออกจากเส้นใยและอยู่ในน้ำทิ้งของกระบวนการ วิธีนี้จะทำให้การเอาแป้งออกได้ผลดีโดยเฉพาะเมื่อใช้วิธีเอาแป้งออกแบบต่อเนื่อง (เกษม พิพัฒน์ปัญญานุกูล, 2541)

กระบวนการลอกแป้งสามารถกระทำได้ด้วยวิธีอื่นๆ อีก นอกจากวิธีการต้มด้วยสารช่วยย่อยดังที่ได้กล่าวข้างต้น คือ แช่และหมักด้วยกรด (acid-steeping) แช่และหมักด้วยเชื้อต่างๆ (rot-steeping) และการใช้สารออกซิไดซ์ซิง (oxidizing agent) (สมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, 2525) ดังนั้นสารเคมีที่นิยมใช้ในการลอกแป้งมี 2 ประเภท คือ สารลอกแป้งประเภทเอนไซม์และสารลอกแป้งประเภทออกซิไดซ์ซิง สารลอกแป้งแต่ละประเภทมีทั้งข้อดีและข้อเสีย ทั้งนี้ต้องเลือกให้เหมาะสมจึงจะทำการลอกแป้งได้ผลดีที่สุด ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเลือกใช้สารลอกแป้ง ได้แก่ ชนิดของสารไซซิง ชนิดของเครื่องจักร กรรมวิธีการผลิต สารเคมีอื่นๆ ที่ใช้ร่วม เป็นต้น ประโยชน์ของการลอกแป้งมีดังนี้คือ ทำให้ผ้าเปียกน้ำได้ดีและสม่ำเสมอขึ้น เป็นผลให้กระบวนการผลิตในขั้นตอนต่อไปมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ประหยัดเวลาและสารเคมี และทำให้ผ้านุ่ม ไม่หยาบกระด้าง

3) การกำจัดสิ่งสกปรก (scouring)

การทำความสะอาดเพื่อกำจัดสิ่งเจือปนที่ติดบนเนื้อผ้าเป็นขั้นตอนที่จำเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะผ้าฝ้ายหรือเส้นใยธรรมชาติ เพื่อให้เส้นใยสะอาดและบริสุทธิ์ ช่วยให้สีย้อมสามารถซึมผ่านเข้าไปในเส้นใยได้มากขึ้น วิธีการทำความสะอาดมีหลายวิธี เช่น การต้มในหม้อเคียร์ (kier boiling) การอัดสารเคมีแล้วอบไอน้ำ (pad steam) แบบต่อเนื่องโดยการรวมถังหลายๆ ถังและที่อบไอน้ำแบบถังรูปตัวจ (j-box) หรือรูปตัวยู (u-box) เข้าด้วยกัน

การกำจัดสิ่งสกปรกในเส้นใยฝ้ายจะมีกรรมวิธียุ่งยากกว่าเส้นใยประดิษฐ์ เนื่องจากเส้นใยฝ้ายมีสิ่งสกปรกตามธรรมชาติปนเปื้อน ได้แก่ สารขี้ผึ้ง (wax) ขี้ผึ้งเทียม (wax-like substance) แพนดทิน โพรตีน เศษใบไม้ เปลือกเมล็ดฝ้าย เป็นต้น ส่วนเส้นใยประดิษฐ์ (เช่น โพลีเอสเตอร์ ไนลอน) มีความสกปรกน้อยกว่าเส้นใยฝ้าย และสิ่งสกปรกจากเส้นใยเหล่านี้ส่วนมากเป็นสาร

ห่อล่อนที่ถูกเติมเข้าไปในช่วงปั่นด้ายและทอเป็นผ้าผืน จึงสามารถกำจัดได้ง่ายกว่าเส้นใยฝ้าย เพียงแค่การต้มด้วยสบู่หรือเพิ่ม โซดาแอซอีกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

4) การฟอกขาว (bleaching)

เป็นขั้นตอนของการขจัดสีที่มีอยู่บนเส้นใย ส่วนใหญ่คิดมาตามธรรมชาติหรือจากการปนเปื้อนที่เกิดในขั้นตอนการปั่นหรือการทอ ซึ่งหลังจากทำความสะอาดแล้วจะยังคงมีสีและวัสดุเจือปนอื่นๆ เหลืออยู่ในผ้า การฟอกขาวจะทำให้สิ่งเหล่านั้นสลายตัวหรือลดน้อยลง ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การฟอกขาวสมบูรณ์ การฟอกขาวเพื่อนำไปย้อมกึ่งฟอกขาว เป็นต้น

การฟอกขาวมีความจำเป็นเฉพาะกับผ้าที่จะนำไปทำเป็นผ้าขาวและผ้าย้อมสีอ่อน เพื่อให้ได้ความขาวหรือได้สีที่สดใส สำหรับผ้าที่นำไปย้อมสีเข้มอาจไม่จำเป็นต้องฟอกขาวก็ได้ สำหรับเส้นใยสังเคราะห์ซึ่งค่อนข้างสะอาดและขาวอยู่แล้วไม่จำเป็นต้องฟอกขาวก็ได้ ยกเว้นกรณีที่ต้องการนำไปทำเป็นผ้าขาว

สารฟอกขาวที่นิยมใช้กัน ได้แก่ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogenperoxide; H_2O_2) โซเดียมไฮโปคลอไรต์ (Sodium Hypochlorite; $NaOCl$) และ โซเดียมคลอไรต์ (Sodium Chlorite; $NaClO_2$) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างคลอรีนกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ การใช้สารคลอรีนจะทำให้เส้นใยเปราะและเหลืองได้เพราะยังคงมีคลอรีนเหลือค้างอยู่ ตรงกันข้ามถ้าฟอกขาวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะทำให้เส้นใยเสียหายน้อย เส้นใยขาวสะอาดทนทานกว่า และวิธีฟอกกึ่งง่ายกว่าด้วย

การฟอกขาวที่สมบูรณ์ให้ผลดังนี้ คือ จะได้ผ้าที่มีความขาวอย่างสม่ำเสมอและถาวรเมื่อเก็บไว้นานๆ ผ้าไม่กลับเป็นสีเหลือง ผ้าที่ฟอกแล้วต้องมีการดูดซึมสีย้อมและสารเคมีอย่างสม่ำเสมอ รวมทั้งต้องไม่ทำให้ผ้าเปื่อย การฟอกขาวเส้นใยให้ได้ผลดีจะต้องมีสภาวะดังต่อไปนี้ คือ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานพอ มีการยึดตัวดี และสามารถหกดตัวกลับได้อย่างอิสระในระหว่างการฟอก ผ้าจะต้องมีการคลี่ตัวออกเพื่อป้องกันการยับ (โดยเฉพาะเส้นใยโพลีเอสเตอร์) และจะต้องมีมาตรฐานเดียวกันในกระบวนการผลิตเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพสม่ำเสมอ

5) การชุบมัน (mercerization)

การชุบมันหรือเมอร์เซอไรซ์เป็นการเพิ่มความเงามันให้กับเส้นด้ายและผ้า ซึ่งส่วนใหญ่มักกระทำกับเส้นใยฝ้ายและลินินหลังขั้นตอนการกำจัดสิ่งสกปรกและฟอกขาวมาแล้ว โดยนำผ้ามาอัดด้วยสารละลายโซดาไฟเข้มข้น (ร้อยละ 15-30) ให้ซึมเข้าไปภายในทั้งที่ฝ้ายยังถูกดึงให้ตั้งอยู่ ซึ่งในทางปฏิบัติกระทำได้โดยแช่ผ้าให้จมอยู่ในสารละลายโซดาไฟ แล้วผ่านลูกกลิ้งบีบน้ำออก

หลังจากผ่านขั้นตอนการชุบมันแล้ว สมบัติทางเคมีของฝ้ายไม่เปลี่ยนแปลง แต่

สมบัติทางกายภาพเปลี่ยนไป คือ ทำให้ลักษณะบิดเป็นเกลียวของเส้นใยคลายตัวกลับมาเป็นเส้นเรียบ ระบายมีความเสถียรและมีความคงทนมากขึ้น อีกทั้งยังทำให้เส้นใยส่วนที่เป็นผลึกมีการขยายตัวและหลวมมากขึ้น มีผลทำให้การดูดซึมน้ำที่ย้อมและสารเคมีดีขึ้นในขั้นตอนต่อไป

สามารถสรุปจุดมุ่งหมาย วิธีการและสารเคมีของการเตรียมผ้าได้โดยแสดงในตาราง

ที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 จุดมุ่งหมายของการเตรียมผ้า

ขั้นตอน	จุดมุ่งหมาย	วิธีการและสารเคมี
เผาขน	กำจัดขนหรือเส้นใยที่โผล่เหนือผ้า	เปลวไฟ แผ่นความร้อน
ลอกแป้ง	ย่อยและกำจัดแป้ง ทำให้เส้นใยพองตัว	เอนไซม์ สารออกซิไดซ์ซิง
กำจัดสิ่งสกปรก	กำจัดสิ่งสกปรก ทำให้สีซึมเข้าไปในเส้นใยมากขึ้น	น้ำสบู่
ฟอกขาว	กำจัดสารมีสี ทำให้ผ้าขาวขึ้น	โซดาไฟ น้ำสบู่
ชุบมัน	ทำให้เส้นใยพองตัวอย่างสม่ำเสมอ และสามารถดูดซึมน้ำ ย้อมได้ดีขึ้น	สารออกซิไดซ์ซิง โซดาไฟเข้มข้น

ที่มา : เกษม พิพัฒน์ปัญญาคุณ, 2541

2.1.2 กระบวนการย้อม

2.1.2.1 การย้อมสี

กรรมวิธีในการย้อมผ้าแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การย้อมในหม้อย้อมแบบครั้งคราว และย้อมแบบต่อเนื่องในเครื่องย้อม การย้อมแบบเป็นครั้งคราวนั้นให้ปริมาณน้ำเสียน้อยแต่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกสูง ส่วนเครื่องย้อมแบบต่อเนื่องให้ผลตรงกันข้ามเนื่องจากกรรมวิธีการย้อมแต่ละแบบมีความแตกต่างกัน ทางด้านตัวสีย้อม สารช่วยย้อม และความสามารถติดสีบนเนื้อผ้าเป็นต้น จึงทำให้มีปริมาณสารมลพิษที่ติดมากับน้ำย้อมแตกต่างกัน การย้อมที่มีประสิทธิภาพ คือ การย้อมให้ผ้ามีสีสม่ำเสมอเท่ากันตลอด สีย้อมต้องติดเส้นใยเข้าไปถึงภายในและต้องทนทานต่อการซักล้างไม่หลุดออกได้ง่าย

2.1.2.2 สีย้อม

สีย้อมมีหลายชนิด การนำสีย้อมมาใช้ให้ได้ผลดีขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใยต้องมีมากกว่าอำนาจการรวมตัวของสีกับน้ำ การเกิดสภาวะนี้เกิดเมื่อโมเลกุลของสีย้อมมีหมู่อะตอมซึ่งถูกจัดให้เรียงตัวกันในลักษณะที่ทำให้เกิดการดูดติด (substantivity) กับเส้นใยแล้วเกิดพันธะยึดกันแน่น อิทธิพลที่ทำให้เกิดการดูดติดกับเส้นใยได้ คือ

- 1) ไฮโดรเจนบอนด์ (hydrogen bond)
- 2) แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waal's forces)

3) แรงไอออน (ionic forces)

4) โควาเลนต์บอนด์ (covalent bond)

แรงดึงดูดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับโมเลกุลของเส้นใยอย่างน้อยจะต้องประกอบไปด้วยแรง 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งอาจเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน แรงดึงดูดทางเคมีที่ทำให้เกิดการยึดติดได้ดีที่สุด ได้แก่ โควาเลนต์บอนด์ (covalent bond) นอกจากนี้อิทธิพลของแรงทั้ง 4 ชนิดนี้แล้ว อิทธิพลของรูปร่างและขนาดโมเลกุลของสีย้อมมีผลต่อการยึดติดหรือมีผลกระทบต่อการทำงานของสีย้อมอย่างมากด้วย เช่น ถ้าโมเลกุลของสีย้อมเล็กและยาวเท่าไรก็จะผ่านช่องว่างเข้าไปในเส้นใยได้มากขึ้นเท่านั้น ทำให้การติดสีดีขึ้นหรือถ้าโมเลกุลของสีย้อมมีลักษณะแบน และมีความกว้างความยาวมากๆ จะทำให้การติดสีมีความคงทนสูงมากขึ้น

สรุปได้ว่าการที่โมเลกุลของสีย้อมยึดติดกับโมเลกุลของเส้นใยเป็นผลเนื่องจากแรงทางเคมีและฟิสิกส์ โดยมีสารบางอย่างเข้าช่วยเพื่อที่จะทำให้โมเลกุลของสีย้อมและโมเลกุลของเส้นใยเกิดปฏิกิริยาระหว่างกันได้ดียิ่งขึ้น สารบางอย่างนี้คือ สารช่วยย้อม (additive)

2.1.2.3 สารช่วยย้อม

สารช่วยย้อม คือ สารเคมีที่ใส่ลงไปกระบวนการย้อมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการติดสีได้มากขึ้น ทำให้สีที่ติดเส้นใยมีความคงทนและสม่ำเสมอ

สารช่วยย้อมแบ่งเป็น 7 ประเภทด้วยกัน คือ

- 1) กรด ใช้สำหรับย้อมเส้นใยโปรตีน และไนลอนเมื่อใช้สีย้อมเอซิด
- 2) ด่าง ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสด้วยสีย้อมอะโซอิก แวต และกำมะถัน
- 3) เกลือใช้ในการย้อมด้วยสีย้อมเอซิด และการย้อมเส้นใยเซลลูโลสทุกชนิด
- 4) สารช่วยให้สีสม่ำเสมอ ใช้กับสีแวต
- 5) สารนำ (carrier) ใช้เมื่อย้อมเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด
- 6) สารละลายอินทรีย์ ใช้เมื่อย้อมขนสัตว์และเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด
- 7) สารรีดิวซิง ใช้สำหรับรีดิวซ์สีบางชนิดเพื่อประโยชน์ในการดูดซึมเข้าไปในเส้นใย

สารช่วยย้อมแต่ละประเภทยังแบ่งออกเป็นสารเคมีต่างๆ มากมาย ดังนั้นสีย้อมแต่ละชนิดมีสารช่วยย้อมแตกต่างกันไป เป็นผลทำให้น้ำเสียจากกระบวนการย้อมแตกต่างกันไปด้วย

2.1.3 การมองเห็นสี

การมองเห็นสีจะเกิดได้เมื่อมีองค์ประกอบสี่ประการคือ แสง วัตถุ(สี) นัยน์ตาของผู้มองเห็นและสมองที่จะวิเคราะห์หรือตีความสิ่งที่เห็น ส่วนแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งต้นกำเนิดแสงอาจมาจากดวงอาทิตย์หรือแหล่งกำเนิดแสงอื่นที่มนุษย์เป็นผู้สร้างขึ้นก็ได้ ช่วงความยาวคลื่นที่ตามนุษย์สามารถรับภาพได้อยู่ในช่วงประมาณ 400-700 นาโนเมตร โดยแสงธรรมชาติ

หรือแสงแดดสามารถถูกแยกออกโดยการให้แสงส่องผ่านปริซึม ซึ่งจะทำให้เกิดการแบ่งสีตามลักษณะความยาวคลื่นคือ สีม่วง สีนํ้าเงิน สีนํ้าเงิน-เขียว สีเหลือง สีส้ม และสีแดง ซึ่งในโมเลกุลของสีย้อม (อ้างถึงใน อติชาติ ปานเจริญ, 2527) มนุษย์สามารถมองเห็นได้ เนื่องจากเกิดการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมในโมเลกุลสีย้อม ซึ่งกลุ่มอะตอมดังกล่าวเรียกว่า “โครโมฟอร์” (chromophores) ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 7 กลุ่ม คือ

- 1) กลุ่มไนโตรโซ (Nitroso Group) : $-NO$ (หรือ $=N-OH$)
- 2) กลุ่มไนโตร (Nitro Group) : $-NO_2$ (หรือ $=NO.OH$)
- 3) กลุ่มอะโซ (Azo Group) : $-N=N-$
- 4) กลุ่มเอทิลีน (Ethylene Group) : $C=C$
- 5) กลุ่มคาร์บอนิล (Carbonyl Group) : $C=O$
- 6) กลุ่มคาร์บอนิล-ไนโตรเจน (Carbonyl-Nitrogen Group) : $C=NH$ และ $-CH=N-$
- 7) กลุ่มซัลเฟอร์ (Sulphur Group) : $C=S$ และ $-C-S-S-C-$

กลุ่มอะตอมต่างๆ เหล่านี้ จะเป็นตัวไปเพิ่มสีให้แก่สารประกอบอะโรเมติก โดยการดูดกลืนแถบแสงสีขาวยุ่บางแถบแสงและปล่อยออกมาบางแถบแสง ทำให้มนุษย์มองเห็นสีย้อมมีโทนสีแตกต่างกันออกไป สีย้อมโดยทั่วไปนอกจากจะต้องมีกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์แล้ว ยังจำเป็นต้องมีกลุ่มอะตอมอีกหนึ่งชนิดได้แก่ กลุ่มอะตอม “ออกโซโครม” (auxochromes) อันได้แก่ $-OH$, $-NH_2$, $-NHR$, $-NR_2$, $-SO_3$ และ $-COOH$ เพื่อให้สีย้อมสามารถทำปฏิกิริยาคู่ติดกับเส้นใยได้ โมเลกุลใดที่ปราศจากกลุ่มอะตอมออกโซโครม โมเลกุลนั้นจะแสดงสมบัติของสีออกมาได้แต่จะขาดสมบัติในการยึดติดกับเส้นใย โมเลกุลดังกล่าวนี้เรียกว่า “โครมาเจน” (chromagen) ยกตัวอย่างเช่น สีย้อมอะมิโนเอโซเบนซีน (aminoazobenzene dyestuff) มีสูตรโมเลกุลดังนี้ คือ $H_2N-N=N-$ ซึ่งกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์คือ $-N=N-$ กลุ่มอะตอมออกโซโครม คือ $-NH_2$ และโมเลกุลที่เรียกว่าโครมาเจนคือ $-N=N-$ ทั้งกลุ่มโครโมฟอร์ ออกโซโครม และโครมาเจนนี้จะเป็นส่วนสำคัญในการพิจารณาการแบ่งกลุ่มของสีย้อมตรมสูตรโครงสร้างทางเคมีซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

2.1.4 การจำแนกสีย้อม (อัจฉราพร ไศละสูต, 2527)

การจำแนกสีย้อม สามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท คือ

- 1) จำแนกตามลักษณะทางกายภาพ สามารถแบ่งสีย้อมได้เป็น 2 ชนิด ชนิดหนึ่งละลายน้ำได้เรียกว่า สีย้อม (Dyes) อีกชนิดหนึ่งไม่ละลายน้ำเรียกว่า ปิกเมนต์ (Pigments)
- 2) จำแนกตามส่วนประกอบทางเคมี จะมีความยุ่งยากสำหรับผู้ที่ไม่ได้ผ่านการศึกษาด้านเคมีมาโดยตรง นอกจากนี้ สีในกลุ่มเคมีเดียวกันอาจมีวิธีการย้อมแตกต่างกัน ใช้กับเส้นใยแตกต่างกัน อีกประการหนึ่งคือ สูตรโครงสร้างที่แท้จริงของสีย้อมหลายชนิดที่นิยมใช้ใน

ปัจจุบันยังไม่ทราบกันเป็นที่แน่ชัด ทำให้มีข้อจำกัดในการจำแนกสีย้อมด้วยวิธีนี้ อย่างไรก็ตามสามารถจำแนกสีตามโครงสร้างเคมีของสีได้ดังนี้

2.1) Azo Colorants

2.1.1) Aromatic Diazo Compound

- Diazotization and Diozo Compounds
- The Coupling Reaction

2.2.2) Azo Compound

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

2.2) Phenylmethane Dyes

2.3) Xantene Dyes

2.4) Indigoid Dyes

2.5) Polycyclicquinone (Anthraquinone, etc.) Dyes

2.5.1) Anthraquinone Group – Vat Dyes

- Acylamino Anthraquinones
- Condensation Products of Amino Anthraquinone and Cyanuric Chloride
- Anthraquinone Acridones
- Benzanthrones
- Anthanthrones
- Pyranthone and Flavanthrone
- Anthrimides
- Carbazoles
- Sulfur-Containing Anthraquinone Compounds

2.5.2) Napthalenic Acid Group – Vat Dyes

2.5.3) Esters of Anthraquinone – Vat Dyes

2.5.4) Anthraquinonoid – Acid Dyes

2.6) Sulfur Fusion Dyes

2.7) Amine Oxidation Colorants

2.8) Phthalocyanine Colorants

2.9) Onium Dyes

2.10) Reactive Dyes

2.11) Pigments

2.3) จำแนกตามลักษณะทางกายภาพและทางเคมีเพื่อความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน

2.1.4.1 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน

สีย้อมที่ใช้ในโรงงานทอผ้ามีอยู่มากมายหลายชนิด ตามชนิดของเส้นใยหรือผ้าที่จะนำไปย้อม สีย้อมอาจจำแนกได้หลายประเภทตามลักษณะทางกายภาพ โดยแบ่งออกเป็นสารสีที่ละลายน้ำได้และสารสีที่ไม่ละลายน้ำ หรือจำแนกตามส่วนประกอบทางเคมี ซึ่งวิธีนี้ยุ่งยากด้วยอาศัยความรู้ทางเคมีและสูตร โครงสร้างของสีด้วย วิธีจำแนกสีย้อมที่ได้รับความนิยมและเข้าใจง่าย ได้แก่ การจำแนกสีย้อมตามการใช้งาน ซึ่งแบ่งสีย้อมทั้งหมดออกเป็น 11 ประเภทด้วยกัน คือ

1) สีดิสเพิร์ส (disperse dyes)

ใช้ย้อมเส้นใยอะซิเตท หรือเส้นใยสังเคราะห์บางชนิดที่ดูดซึมน้ำได้น้อย สีย้อมนี้ไม่ละลายน้ำแต่เป็นละอองละเอียด ละลายอยู่ในน้ำเมื่อมีสารช่วยกระจาย (dispersing agent) ที่เหมาะสม จะสามารถใช้ย้อมในน้ำธรรมดาได้โดยไม่ต้องใช้สารเคมีอื่นช่วยนอกเสียจากสารพา (carrier) บางตัวที่ช่วยให้สีเข้าไปใกล้เส้นใยเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้

สีดิสเพิร์สแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม โดยพิจารณาจากกลุ่มเคมีในตัวสีย้อม ได้แก่ สีเอโซ (azo dyes) และสีย้อม amino anthraquinone ซึ่งทั้งสองกลุ่มนี้ปกติจะประกอบด้วยอนุพันธ์ของ ethanoline-NH₂CH₂CH₂OH หรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน

2) สีเอไซด์ (azid dyes)

ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนในน้ำย้อมซึ่งมีสภาพเป็นกรดเจือจาง จะนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสที่ไม่ใช่เซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน และ โพลีเอสเตอร์ ตัวสีย้อมเกิดจากสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน

3) สีย้อมอะโซอิก (azoic dyes)

นิยมใช้ย้อมเซลลูโลสเท่านั้น ตัวสีไม่ละลายน้ำ ดังนั้นการที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอล ซึ่งละลายน้ำได้ก่อนแล้วจึงนำไปย้อมทับอีกครั้งหนึ่งด้วยเกลือไดอะโซเนียม (diazonium salt) เกลื่อนี้จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบฟีนอล เกิดเป็นสารประกอบเอโซที่ให้สีบนเส้นใย ปฏิกิริยานี้เรียกว่า คัปลิง (coupling)



4) สีย้อมเบสิก (basic dyes)

ใช้ย้อมขนสัตว์และเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด โดยย้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้เพียงเล็กน้อยหรือไม่ติดเลย ตัวสีย้อมเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครโมฟอร์ (chromofore) ให้แคทไอออน ทำให้เรียกสั้นๆ ว่า สีแคทไอออน ย้อมติดกับเส้นใยได้โดยประจุบวกของโมเลกุลสีย้อมจะจับกับประจุลบของเส้นใย

5) สีย้อมไคเรกต์ (direct dyes)

บางครั้งเรียกว่า สีย้อมฝ้าย เนื่องจากเป็นสีสังเคราะห์ชนิดแรก ที่สามารถย้อมติดเส้นใยได้โดยตรง ไม่ต้องเติมสารช่วยย้อม แต่ในปัจจุบันจะใช้เกลือช่วยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย้อมให้สูงขึ้น สีย้อมชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบเฮโซ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคซึ่งทำให้ตัวสีย้อมละลายน้ำได้

สีย้อมนี้ให้คุณสมบัติในการย้อมคงทนตลอด จนราคาแตกต่างกันมาก ถ้าเป็นสีที่คงทนดี โครงสร้างของสีจะซับซ้อนมากขึ้น ราคาต้นทุนการผลิต และราคาจำหน่ายย่อมสูงขึ้นด้วย

6) สีย้อมเมอร์แดนท์ (merdant dyes)

ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ตัวสีย้อมกลุ่มนี้ส่วนใหญ่เป็นสีย้อมในกลุ่มสีย้อมเอลิตที่สามารถก่อเป็นสารเชิงซ้อนกับโลหะ แล้วจะมีความคงทนต่อกระบวนการใช้น้ำ (wet fastness) ได้ดีกว่าไม่ย้อมทับ

7) สีย้อมซัลเฟอร์ (sulfur dyes)

ใช้ย้อมผ้าฝ้ายโดยเฉพาะ ราคาค่อนข้างถูก แต่สีย้อมไม่สดใส ตามปกติแล้วสีย้อมชนิดนี้ไม่ละลายน้ำ แต่ได้มีผู้ผลิตสีย้อมชนิดนี้ขึ้นมาใหม่ โดยนำตัวสีย้อมไปทำการรีดิวซ์ ทำให้สีย้อมชนิดนี้ละลายน้ำได้ สีย้อมชนิดนี้ได้ชื่อว่าสีย้อมซัลเฟอร์เพราะว่า สารที่นำรีดิวซ์เป็นสารละลายของโซเดียมซัลไฟด์ และโครโมฟอร์ของสีย้อมซัลเฟอร์ ประกอบด้วยกลุ่มซัลโฟนิล (sulfonic group) เมื่อสีย้อมละลายในน้ำแล้วจะแทรกซึมตัวเข้าไปในเส้นใยและสามารถทำให้ยึดติดกับเส้นใยได้อย่างถาวร โดยการออกซิไดส์ตัวสีย้อมกลับคืนสู่สภาพเดิมที่ไม่ละลายน้ำด้วยวิธีทำปฏิกิริยากับอากาศ

8) สีย้อมแวต (vat dyes)

ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสโดยเฉพาะฝ้าย สีย้อมชนิดนี้ไม่ละลายน้ำต้องใช้สารรีดิวซ์ที่เหมาะสมทำให้ละลาย ที่นิยมใช้ทั่วไปได้แก่ โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ สีย้อมเมื่อถูกรีดิวซ์แล้วจะให้สารประกอบลิวโค (leuco compound) ซึ่งมีสีครามและมีประสิทธิภาพในการแทรกซึมเข้าไปในเส้นใยได้ และเมื่อนำเส้นใยไปสัมผัสอากาศ สารประกอบลิวโคจะถูกออกซิไดส์กลับคืนสภาพเป็นสีแวตที่ไม่ละลายน้ำ ทำให้เกิดการติดทนอย่างถาวรกับเส้นใยได้ดี สีย้อมชนิดนี้มี



ส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญ 2 ชนิด คือ สีครามอินดิโก (indigoid) และสีแอนทราควินอยด์ (anthraquinoid)

9) สีย้อมรีแอกทีฟ (reactive dyes)

ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด ละลายน้ำได้คุณสมบัติเป็นแอนไอออนเมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่เป็นด่าง โมเลกุลของสีจะทำปฏิกิริยากับหมู่ OH ในเซลลูโลส และเชื่อมโยงติดกันด้วยโควาเลนต์บอนด์ กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่เซลลูโลส สมบัติการละลายและดูดซับเส้นใยของตัวสีจะทำให้สีเข้าอยู่ในเส้นใยได้ และเมื่อเกิดปฏิกิริยาตัวสีจะติดกับเส้นใย

10) สีย้อมโลหะ (metallic dyes)

สารประกอบอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำหลายชนิดใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส และให้สีต่างๆ กัน เมื่อย้อมแล้วต้องทำให้สารนี้ยึดจับตัวในเส้นใย

11) สีย้อมโอเนียม (onium dyes)

นิยมใช้พิมพ์มากกว่าย้อมผ้า จัดเป็นสารสีที่สามารถทำให้ละลายน้ำได้รูปแบบการย้อมค่านิยมคล้ายกับสีแวต คือต้องทำให้ตัวสีย้อมกลับคืนสู่สภาพเดิมไม่ละลายน้ำด้วยการออกซิไดซ์กลับคืน

การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งานแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน (อภิชาติ หิรัญจิตต์, 2539)

ประเภทสีย้อม	สมบัติทางกายภาพและทางเคมี	เส้นใยที่เหมาะสม	พันธะหรือกลไกติดสี	วิธีใช้ทั่วไป
เอซิด (acid dye)	- กระจุก - ละลายน้ำได้ดี - สีติดไม่แน่น	- ไนลอน - ขนสัตว์	- พันธะไอออนิก	- แห้งเส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 3-5 - สมมติว่าเส้นใยมีประจุบวกติดกับสีย้อมที่มีประจุลบที่อุณหภูมิ 50-110 องศาเซลเซียส
เมทัลคอมเพล็กซ์เอซิด (metal complex acid)	- กระจุก - ละลายน้ำได้น้อย - สีติดแน่น	- ไนลอน - ขนสัตว์	- พันธะไอออนิก	- แห้งเส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 5-7 - สมมติว่าเส้นใยมีประจุบวกติดกับสีย้อมที่มีประจุลบที่อุณหภูมิ 50-110 องศาเซลเซียส
ไดเรกต์ (direct dye)	- กระจุก - ละลายน้ำได้ดี - สีติดไม่แน่น	- ฝ้าย - วิสคอส	- พันธะไอออนิก	- แห้งในสารละลายค่าง่อน - เติมนิเลคโตรไลต์โซเดียมคลอไรด์โซเดียมซัลเฟตและสีย้อมที่อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส
เบสิก (basic dye)	- กระจุก - ละลายน้ำได้ดี	- อะคริลิก	- พันธะไอออนิก	- แห้งเส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 4-6 - เติมสีย้อมแล้วเพิ่มอุณหภูมิ 100-105 องศาเซลเซียส
ดิสเพอร์ส (disperse dye)	- ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยมาก - กระจายเป็นอนุภาคคอลลอยด์ - สีติดแน่นดี	- โพลีเอสเตอร์ - ไนลอน - อะคริลิก - เซลลูโลส - อะซิเตด	- เนื่องจากเป็นคอลลอยด์จึงเป็นการดูดติดผิวเส้นใย	- แห้งเส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 4-5 - เติมสีย้อมแล้วเพิ่มอุณหภูมิถึง 130 องศาเซลเซียส
รีแอกทีฟ (reactive acid)	- กระจุก - ละลายน้ำได้ดี - สีติดแน่น	- ฝ้าย - วิสคอส - ขนสัตว์	- พันธะโควาเลนต์	- แห้งเส้นใยในสารละลายกรด - เติมเกลือเพื่อกระจายสีไปสู่เส้นใย

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน (อภิชาติ หิรัญจิตต์, 2539)

ประเภทสีย้อม	สมบัติทางกายภาพและทางเคมี	เส้นใยที่เหมาะสม	พันธะหรือกลไกติดสี	วิธีใช้ทั่วไป
รีแอกทีฟ(reactive acid) (ต่อ)	- กระจุลบ - ละลายน้ำได้ดี - สีติดแน่น	- ฝ้าย - วิสคอส - ขนสัตว์	- พันธะโควาเลนต์	- หลังจากนั้นเติมด่างเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างเส้นใยกับสีย้อม
อะโซอิก (azoic dye)	- เป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยา - ไม่ละลายน้ำ - สีติดแน่น	- ฝ้าย - วิสคอส	- เกิดการตกผลึกภายในเส้นใย	- ละลายสีย้อมในสารละลายด่างที่มีโซเดียมซัลเฟอ์ - สีย้อมจะแพร่กระจายไปสู่เส้นใยด้วยอิเล็กโตรไลต์
แวลต์ (vat dye)	- เป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยา - ไม่ละลายน้ำ - สีติดแน่น	- ฝ้าย - วิสคอส	- เกิดการตกผลึกภายในเส้นใย	- ละลายสีย้อมในสารละลายด่างที่มีโซเดียมซัลเฟอ์ - สีย้อมจะแพร่กระจายไปสู่เส้นใยด้วยอิเล็กโตรไลต์
มอร์แดนท์หรือโครม (mordant or chrome)	- กระจุลบ - ละลายน้ำได้ดี - สีติดแน่น	- ขนสัตว์	- พันธะเชิงซ้อนของเส้นใย โครม และสีย้อม	- แช่เส้นใยในสารละลายกรด - เติมโซเดียมไดโครเมต เติมสีย้อมเพิ่มอุณหภูมิถึง 98 องศาเซลเซียส

ที่มา : Buckley, 1992

2.1.5 โครงสร้างทางเคมีของสีรีแอกทีฟ

กลุ่มเคมีของสีรีแอกทีฟประกอบด้วยกลุ่มพื้นฐาน 4 กลุ่ม ซึ่งสามารถแสดงเป็นโครงสร้างทั่วไปได้ดังนี้



โดย S คือ กลุ่มที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้สูง โดยทั่วไปจะเป็นพวกซัลโฟนิค (-SO₂Na) ซึ่งติดอยู่กับกลุ่มโครโมฟอร์

D คือ กลุ่มของเคมีที่ทำให้เกิดสี เรียกว่ากลุ่มโครโมฟอร์ (Chromophore)

T คือ กลุ่มอะตอมที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างกลุ่มรีแอกทีฟกับกลุ่มโครโมฟอร์ (Bridging Group) เช่นกลุ่ม -NH-, -NHCO-, -SO₂-, -NHSO₂- และ -NCH₃- เป็นต้น

X คือ กลุ่มรีแอคทีฟ (Reactive Group) ซึ่งจะเป็นกลุ่มที่ทำให้สีทำปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซิลในเส้นใย

ในบางกรณีกลุ่มรีแอคทีฟก็จะติดกับระบบโครโมฟอร์โดยตรง ไม่ต้องมีตัวเชื่อมก็ได้ และกลุ่มรีแอคทีฟส่วนใหญ่เป็นสาร Heterocyclic ring ลักษณะของกลุ่มตัวเชื่อมและส่วนประกอบของ Heterocyclic ring มีอิทธิพลอย่างมากต่อความสามารถทำปฏิกิริยา และคุณสมบัติอื่นๆ ของสี จากส่วนประกอบที่กล่าวมานี้ พบว่ามีสองส่วนที่สำคัญคือ สารที่ทำให้เกิดสี และกลุ่มรีแอคทีฟ โดยส่วนประกอบทั้งสองส่วนนี้ จะเป็นปัจจัยที่ทำให้สีแต่ละชนิดแตกต่างกันไป

2.1.6 กลุ่มอะตอมที่ทำให้เกิดสี (Chromophore)

กลุ่มอะตอมที่ทำให้เกิดสีส่วนใหญ่พัฒนามาจากสีแอซิด โดยแบ่งโครงสร้างได้เป็นหลายกลุ่มดังนี้

- 1) กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Unmetallised Azo เป็นหลักซึ่งสีรีแอคทีฟส่วนใหญ่จะมีสารที่ทำให้เกิดสีชนิดนี้เป็นส่วนมาก
- 2) กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Metal-Complex Azo เป็นหลัก
- 3) กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Anthraquinone เป็นหลัก
- 4) กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Phthalocyanine เป็นหลัก
- 5) กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Azo เป็นหลัก ในสีกลุ่มที่มีกลุ่มรีแอคทีฟแบบ Bifunctional

กลุ่มสารที่ทำให้เกิดสีในสีรีแอคทีฟนั้น ต่างก็มีโครงสร้างที่แตกต่างกันซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปใช้งานที่แตกต่างกันออกไป โดยองค์ประกอบของกลุ่มโครโมฟอร์ในสีรีแอคทีฟนั้น แสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 2.3 แสดงเปอร์เซ็นต์การกระจายของลักษณะโครงสร้างของกลุ่มโครโมฟอร์ในสีรีแอคทีฟ แบ่งตามโทนสีต่างๆ (Shore., 1990)

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

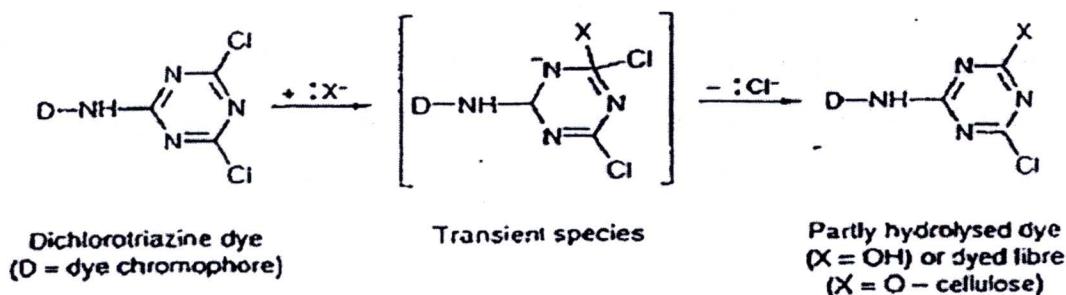
จากตารางจะเห็นได้ว่าสีรีแอคทีฟส่วนใหญ่จะประกอบด้วยสีโครโมฟอร์ชนิด Azo (Unmetallised Azo Metal-complex Azo) เป็นส่วนมากสูงถึงร้อยละ 81 และถ้าไม่รวมสีรีแอคทีฟที่มีโทนสีฟ้าและสีเขียว ซึ่งประกอบด้วยโครโมฟอร์ประเภท Anthraquinone และ Phthalocyanine เป็นส่วนใหญ่แล้วพบว่า สีรีแอคทีฟจะมีกลุ่มอะโซ เป็นองค์ประกอบอยู่สูงถึงร้อยละ 95 ดังนั้นในการบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อม ถ้าสามารถทำลายพันธะอะโซในกลุ่มโครโมฟอร์ของสีรีแอคทีฟได้ก็จะสามารถลดสีในน้ำเสียได้

ดังนั้นสีย้อมรีแอคทีฟที่ใช้ในการทดลองนี้ ได้แก่สีรีแอคทีฟ โทนสีแดง โทนสีน้ำเงินและโทนสีเหลือง (C.I. Reactive Unknown) โดยทราบสูตรโครงสร้างสีซึ่งเป็นสีย้อมที่มีกลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Unmetallised Azo เป็นหลัก ซึ่งสีรีแอคทีฟส่วนใหญ่จะมีสารที่ทำให้เกิดสีชนิดนี้เป็นส่วนมาก

2.1.7 กลุ่มสีรีแอคทีฟ (Reactive Group)

กลุ่มรีแอคทีฟเป็นกลุ่มที่มีหน้าที่สร้างพันธะกับเส้นใยทำให้สีย้อมสามารถติดกับเส้นใยได้ การสร้างพันธะระหว่างกลุ่มรีแอคทีฟกับเส้นใยแบ่งได้ 2 ลักษณะคือ

1. เส้นใยหรือไฮดรอกไซด์ไอออนเข้าไปแทนที่อะตอมฮาโลเจนในกลุ่มรีแอคทีฟในโมเลกุลของสีย้อมทำให้เกิดเป็นพันธะระหว่างสีกับเส้นใยขึ้น ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาแบบ (Nucleophilic Substitution) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาแบบ Nucleophilic Substitution (ปรีชาวิทย์ รอดรัตน์, 2543)

2. เส้นใยหรือไฮดรอกไซด์ไอออนสร้างพันธะกับกลุ่มรีแอคทีฟในโมเลกุลของสีย้อม โดยการสลายพันธะคู่ของคาร์บอนอะตอม 2 อะตอม ในกลุ่มไวนิลซันโฟน แล้วไฮดรอกไซด์ไอออนจะเชื่อมตัวมันเข้าไปกับคาร์บอนตัวสุดท้ายของกลุ่มไวนิลซัลโฟน ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาแบบ (Nucleophilic Addition) ดังรูปที่ 3.3

1) น้ำที่ใช้ในกระบวนการ ได้แก่ น้ำที่ใช้ในขั้นตอนการเตรียมผ้าหรือเส้นใยก่อนย้อม และขั้นตอนการฟอกย้อม พิมพ์และตกแต่งสำเร็จ และน้ำในส่วนนี้อาจมีการระเหยไปบ้าง แต่ส่วนใหญ่มักจะถูกลบออกเป็นน้ำเสียออกมาเกือบทั้งหมด นอกจากนี้ น้ำที่ใช้ในกระบวนการสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ คือ

- น้ำที่ใช้ในการฟอกย้อมหรือการพิมพ์โดยตรง คือ กระบวนการต้มเป้ กระบวนการทำความสะอาด กระบวนการฟอกขาว กระบวนการชุบมัน กระบวนการย้อมสี/การตกแต่งพิเศษ และกระบวนการพิมพ์ผ้า น้ำที่ได้จากกระบวนการเหล่านี้มีปริมาณไม่มากนัก แต่มีความเข้มข้นของสารมลพิษสูง และมีลักษณะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับเส้นใยที่นำมาย้อมและกระบวนการย้อมที่ใช้

- น้ำที่ใช้ในการซักล้าง หลังจากการฟอกย้อมหรือการพิมพ์ น้ำที่ได้จากกระบวนการนี้มีปริมาณมาก แต่ความเข้มข้นของสารมลพิษต่ำกว่าน้ำที่ใช้ในการฟอกย้อมหรือการพิมพ์โดยตรง

2) น้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำ ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมมักใช้ไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่ น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต หรือให้ความร้อนแก่ตู้อบไอน้ำ ไอน้ำนี้ถ้าปล่อยให้เย็นตัวลงและทำให้เกิดการกลั่นตัวในท่อก็จะได้น้ำสะอาดซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ถ้านำไอน้ำนี้ไปให้ความร้อนแก่น้ำย้อม โดยตรงก็เท่ากับไปเพิ่มปริมาณน้ำเสียให้มากขึ้น

3) น้ำหล่อเย็น ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมจำเป็นต้องมีการลดอุณหภูมิของน้ำย้อมให้ลดลง ในระยะเวลาอันสั้น โดยการใช้น้ำหล่อเย็น ซึ่งน้ำหล่อเย็นนี้เป็นน้ำสะอาดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

4) น้ำที่ใช้ในการล้างเครื่องจักรและการทำความสะอาดโรงงาน น้ำส่วนนี้เป็นอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญ ในบางกรณีน้ำเสียชนิดนี้อาจมีความเข้มข้นของสารมลพิษต่างๆ สูง ยกตัวอย่าง เช่น น้ำที่ใช้ล้างสกรีนที่ใช้ในการพิมพ์ผ้า หรือน้ำจากการล้างถังเตรียมสี เป็นต้น

6) น้ำจากแหล่งอื่นๆ เช่น น้ำจากโรงอาหารและห้องน้ำโรงงาน เป็นต้น

2.2.2 ลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม (คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมฟอกย้อม, 2542)

ลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมเป็นดังนี้

1) มีปริมาณสารอินทรีย์สูง ปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียเกิดจากเป้ สีย้อม กรดอะซิติก เส้นใยและเส้นด้ายที่ปนออกมาจากกระบวนการย้อมและตกแต่ง นอกจากนี้แล้ว สารอินทรีย์อาจเกิดจากสบู่ ไขมัน ซึ่งจะเป็นฝ้าคลุมผิวน้ำ และสารทำความสะอาดที่มีลักษณะเป็น

ฟอง โดยทั่วไปแล้วน้ำเสียนี้นักมีค่าบีโอดีประมาณ 100-1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าซีโอดีประมาณ 500-1,200 มิลลิกรัมต่อลิตร

2) มีค่าพีเอชและสภาพด่าง (alkalinity) สูง น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมักมีค่าพีเอช ประมาณ 9-12 และมีค่าสภาพด่างประมาณ 300-900 มิลลิกรัมหินปูนต่อลิตร สารที่ทำให้ น้ำเสียฟอกย้อมมีค่าพีเอช และค่าสภาพด่างสูงได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ โซเดียมคาร์บอเนต

3) มีอุณหภูมิสูง น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมีอุณหภูมิสูงประมาณ 50 องศาเซลเซียส

4) มีปริมาณของแข็งละลายน้ำสูง ส่วนใหญ่เป็นการละลายของแข็งพวกเกลือ โซเดียมและกรดต่างๆ

5) มีความเข้มข้นสูง โดยเป็นสีที่ใช้ย้อมผ้า

6) มีโลหะหนักเจือปนอยู่ โลหะหนักเหล่านี้เจือปนอยู่ในสีย้อมผ้า โดยส่วนใหญ่แล้ว ได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว โครเมียม และสังกะสี

7) มีปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดสูง

โดยสำนักงานเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน (2542) ได้ทำการสำรวจโดยการเก็บ ตัวอย่างน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล จำนวน 100 ตัวอย่าง ซึ่ง การเก็บตัวอย่างน้ำเสียได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำแบบจ้วงตัก (Grab Sample) ที่จุดรวมน้ำเสียก่อนเข้า ระบบบำบัดน้ำเสีย โดยค่าที่ทำการตรวจวัด ได้แก่ ความสกปรกในรูปของค่าบีโอดี (BOD) ค่าซีโอดี (COD) ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ปริมาณของแข็งแขวนลอย (SS) และค่าปริมาณสี โดยใช้วิธีการ เทียบสี (Platinum Cobalt Method) ซึ่งได้ผลสรุปค่าประเมินต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 2.4 ลักษณะน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอประเภทต่างๆ

ผลิตภัณฑ์ที่ฟอกย้อม	ลักษณะของน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด ¹					จำนวนข้อมูล
	พีเอช	บีโอดี (มก./ล.)	ซีโอดี (มก./ล.)	ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	สี (หน่วย Pt Co) ²	
ฟอกย้อมผ้า	8.2	120	300	43	450	13
ฟอกย้อมผ้าตัด	9.0	110	370	50	570	16
ฟอกย้อมผ้าทอ	8.6	400	1,200	140	670	41
ฟอกย้อมผ้าและผ้า หรืออื่นๆ	9.1	230	713	65	400	30

หมายเหตุ: 1 ค่าลักษณะของน้ำเสียที่ค่าความน่าจะเป็นเท่ากับหรือน้อยกว่าร้อยละ 50

2 การวัดความเข้มข้นในหน่วย Pt Co เป็นวิธีที่ผิด เนื่องจากการวัดด้วยวิธีนี้จะวัดได้เฉพาะน้ำที่มีสีออก เหลือง

ที่มา : คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมโรงงานฟอกย้อม, 2542

2.3 การกำจัดสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม (วรรณวรรณ เทียงวรรณกานต์, 2546)

การกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานทอผ้าและฟอกย้อมมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยกระบวนการบำบัดน้ำเสียวิธีต่างๆ เพื่อบำบัดน้ำเสียให้ได้น้ำทิ้งออกปราศจากสารอินทรีย์ สี ย้อมผ้า และของแข็งต่างๆ แต่ในปัจจุบันอุตสาหกรรมสิ่งทอได้เพิ่มจำนวนมากขึ้นตามการเพิ่มประชากร อีกทั้งยังมีการพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการฟอกย้อม ทำให้น้ำเสียจากโรงงานประกอบด้วยสารเคมีและสีย้อมมากมายหลายชนิดจนไม่สามารถใช้กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพชนิดแอกทิเวตเต็ดสลัดจ์ในการกำจัดสีให้ลดลงได้ จึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีเกี่ยวกับการกำจัดสีหลายวิธี ได้แก่ กระบวนการทางกายภาพ, ทางเคมีและทางชีวภาพ

2.3.1 การบำบัดน้ำเสียทางเคมี

1) กระบวนการโคแอกกูเลชัน

เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการกำจัดสีโดยใช้สารเคมี เช่น ปูนขาว สารส้ม เหลือเฟอริก หรือสารโพลีอิเล็กโทรไลต์เติมลงในน้ำเสียที่มีสีเจือปน เพื่อให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคจนเกิดเป็นฟล็อกแล้วตามด้วยการตกตะกอนฟล็อกที่เกิดขึ้น ซึ่งสีจะถูกจับรวมอยู่ในฟล็อกด้วยจึงทำให้เกิดการลดสีได้ แต่วิธีนี้ต้องใช้สารเคมีปริมาณมากในการกำจัดสีจึงทำให้เกิดมลพิษทางเคมีขึ้นในปริมาณมากทำให้ต้องเพิ่มวิธีการกำจัดสลัดจ์อีกขั้นตอนหนึ่งและเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นด้วย และที่สำคัญคือ วิธีนี้ใช้ได้กับสีที่ไม่ละลายน้ำ (Reife และ Freeman, 1996)

2) กระบวนการดูดซับ

การกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีที่มีปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งต่ำๆ ซึ่งนิยมใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) โดยจะมีพื้นที่ผิวระหว่าง 500-1400 ตารางเมตรต่อกรัม (Reife และ Freeman, 1996) นอกจากนี้ยังมีดินเหนียวดูดซึม ชีวถ่าน ดินเหนียวทนไฟ ซิลิกาเจล ไม้ โพลีเมอร์สังเคราะห์ ฯลฯ โดยถ่านกัมมันต์จะมีประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงสำหรับสีที่ละลายน้ำได้น้อย ซึ่งได้แก่ สีดิสเพอร์ส สีแวท และสีพิกเมนต์

3) กระบวนการไฟฟ้าเคมี

จากการที่สถาบัน American Textile ได้ทำวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมทำให้ทราบต่อมว่านอกจากจะสามารถกำจัดโลหะหนักแล้วยังสามารถกำจัดสีให้ลดลงได้อีกด้วย จึงทำให้มีการใช้เทคโนโลยีนี้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมเป็นครั้งแรก (Uhrich, 1989 อ้างโดย Reife และ Freeman, 1996) โดยใช้ชื่อว่า Andco Environmental Process ซึ่งนอกจากจะสามารถกำจัดสีและโลหะหนักได้แล้วยังสามารถกำจัดบีโอดี ซีโอดี และของแข็ง

แขวนลอยได้อีกด้วย โดยจะต้องมีชั้นตอนอื่นๆ ประกอบ เช่น ถังน้ำใส ถังกรอง ตลอดจนการกำจัดสิ่งเจือปนที่เป็นพิษออกจากรน้ำทิ้ง ทำให้สามารถนำน้ำที่ผ่านชั้นตอนที่กล่าวมาแล้วข้างต้นกลับไปใช้ในกระบวนการฟอกย้อมได้อีก

4) กระบวนการเมมเบรน

เป็นวิธีการกำจัดสีที่มีประสิทธิภาพสูง ส่วนมากจะใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่มีความเข้มข้นของสีสูง และน้ำที่ได้จากการบำบัดด้วยวิธีการนี้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและบำรุงรักษาสูง

5) การแลกเปลี่ยนไอออน

วิธีการแลกเปลี่ยนไอออนเหมาะสมกับสารละลายเจือจาง โดยที่เรซินประจุลบใช้กำจัดสีย้อมที่มีประจุลบ ในขณะที่เรซินประจุบวกใช้กำจัดสีย้อมที่มีประจุบวก เรซินจะมีอัตราการแลกเปลี่ยนสูงและง่ายต่อการทำรีเจนเนอเรท โดยเรซินที่มีประจุบวกจะใช้กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟูริก หรือโซเดียมคลอไรด์ทำรีเจนเนอเรท เรซินประจุลบจะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ทำรีเจนเนอเรท ซึ่งมีการนำวิธีแลกเปลี่ยนไอออนมาใช้กำจัดสีในน้ำเสีย โดยที่ประสิทธิภาพในการลดสีแอสิด สีรีแอกทีฟ และสีดิสเพอร์สสูงถึง 90 เปอร์เซ็นต์ แต่มีประสิทธิภาพการกำจัดสีไอดีน้อย

2.3.2 การกำจัดสีโดยกระบวนการทางเคมี

1) กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation)

เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพการกำจัดสีสูง โดยให้สีทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์เพื่อลดสี สารเคมีที่ใช้ ได้แก่ คลอรีนในรูปของเหลวหรือก๊าซ ไฮโปคลอไรต์ และโอโซน รวมทั้งการใช้สารเคมีเฟนตัน ในการใช้สารเคมีเหล่านี้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมเจือปนต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงทั้งในด้านสารเคมีและอุปกรณ์ต่างๆ นอกจากนี้ ในการบำรุงรักษาต้องกระทำด้วยความระมัดระวังเนื่องจากสารเหล่านี้มีความเป็นพิษ

การใช้คลอรีนในการลดสีพบว่าประสิทธิภาพการลดสีสูง แต่เมื่อใช้ในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้มีคลอรีนเหลือตกค้างในน้ำเสีย อาจทำให้เกิดสารประกอบไตรฮาโลมีเทนซึ่งเป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม Ghosh และคณะ (1978) อ้างถึง โดย Reife และ Freeman (1996) พบว่า เมื่อใช้คลอรีน 150 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีประสิทธิภาพการลดสีจากโรงงานฟอกย้อมเท่ากับ 77 เปอร์เซ็นต์ แต่จะมีคลอรีนตกค้างในน้ำเสียประมาณ 110 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อใช้คลอรีนในปริมาณที่ต่ำกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จะไม่มีคลอรีนตกค้างแต่มีประสิทธิภาพการลดสีเหลือ 57 เปอร์เซ็นต์

ต่อมาได้มีการใช้โอโซนซึ่งเป็นสารที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์สูงกว่าคลอรีน และไม่มีสารตกค้างในน้ำเสีย จากงานวิจัยของ Horning (1978) อ้างถึง โดย Reife และ Freeman (1996)

พบว่า การใช้โอโซนปริมาณ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถลดสีรีแอกทีฟ และสีเบสิกได้ แต่มีประสิทธิผลต่ำเมื่อใช้กับสีย้อมเปอร์ส ส่วนในการกำจัดสีไครเรกซ์นั้นมีค่าไม่แน่นอน นอกจากนี้การกำจัดสีด้วยโอโซนสามารถลดปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมด (TOC) ได้เพียงเล็กน้อยและต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงในการติดตั้งระบบ

2) กระบวนการรีดักชัน (Reduction)

เป็นการเติมสารเคมีเพื่อทำปฏิกิริยากับสี โดยในปฏิกิริยาจะใช้พันธะของโครงสร้างสีเป็นตัวรับอิเล็กตรอนจนเกิดการสลายพันธะทำให้โครงสร้างสีเปลี่ยนแปลงจึงเกิดการลดสี สารเคมีที่ใช้โดยทั่วไป คือ โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ (sodium hydrosulfite) หรือ โซเดียมไดไธโอนิต (sodium dithionite) ไทโอยูเรียไดออกไซด์ (thiourea dioxide) หรือ formamidine sulfinic (FAS) acid โซเดียมฟอร์มัลดีไฮด์ซัลโฟไซด์ (sodium formaldehydesulfoxylate) และ tin (II) chloride (Reife และ Freeman, 1996)

จากการศึกษาของ Brown และ Hamburger (1987) พบว่าในสถานะแอนไอออนิก สามารถลดสีย้อมชนิดอะโซได้ โดยพบว่าการลดสีเกิดจากการสลายพันธะของกลุ่มอะตอมอะโซด้วยปฏิกิริยารีดักชัน แต่เมื่อเกิดการสลายพันธะของอะโซจะทำให้เกิดสารประกอบพวกอะโรมาติกซึ่งเป็นสารพิษ และสารเหล่านี้สามารถย่อยสลายได้ในสถานะแอนไอออนิก จึงมีการนำสารรีดิวซ์ซึ่งมาใช้ในกระบวนการบำบัดขั้นต้นและตามด้วยการบำบัดน้ำเสียแบบแอนไอออนิก นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพการลดสีของสารรีดิวซ์ซึ่งแต่ละประเภทจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชในน้ำเสีย เช่น ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4 โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์จะมีประสิทธิภาพการลดสีดีที่สุด ส่วนที่ค่าพีเอชเท่ากับ 10.7 ไทโอยูเรียไดออกไซด์จะมีประสิทธิภาพการลดสีดีที่สุด (Reife และ Freeman, 1996)

2.3.3 การกำจัดสีโดยกระบวนการทางชีวภาพ

1) กระบวนการชีวภาพแบบแอนไอออนิก

การบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการทางชีวภาพแบบแอนไอออนิกเป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่นิยมใช้กันมากในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าวิธีการอื่นแต่ปัญหาที่พบคือการบำบัดสีที่ย้อม เนื่องจากสีย้อมที่ผลิตขึ้นมาสามารถต้านทานการย่อยสลายโดยใช้ออกซิเจน และมีการเติมสารเคมีลงไปนีสีย้อมเพื่อให้ทนต่อการออกซิไดซ์โดยสารเคมีและแสง สีบางชนิดมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ อีกทั้งยังเป็นการยากที่จุลินทรีย์จะสามารถปรับตัวให้ชินกับน้ำเสียได้ เนื่องจากน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาทั้งจากกระบวนการย้อม สีที่ใช้ย้อม และสารช่วยย้อมต่างๆ

2) กระบวนการแอนแอโรบิก

การศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมเจือปนด้วยระบบบำบัดแบบแอนแอโรบิก ซึ่งในอดีตได้มีการศึกษาเกี่ยวกับแบคทีเรียที่ใช้สำหรับระบบบำบัดแบบแอนแอโรบิกเพื่อบำบัดสีย้อม โดยจากผลการศึกษาพบว่าแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในลำไส้ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมมีความสามารถย่อยสลายสีย้อมอาหารชนิดอะโซได (Carliell และคณะ, 1995) ด้วยเหตุนี้จึงมีการศึกษาการสลายพันธะอะโซด้วยจุลชีพประเภทเดียวกับที่อยู่ในลำไส้ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม

การศึกษาการลดสีด้วยแบคทีเรียในลำไส้ที่กล่าวมาข้างต้น จึงเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการศึกษาการลดสีย้อมจากโรงงานฟอกย้อมภายใต้สภาวะไร้อากาศ เนื่องจากสีย้อมส่วนใหญ่จะมีกลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้างทางเคมีเป็นพันธะอะโซ ดังนั้น ถ้ามีการทำลายพันธะอะโซได้กลุ่มโครโมฟอร์ของสีย้อมเหล่านี้ก็จะไม่สามารถแสดงสีได้ต่อไป ทำให้เป็นประโยชน์ต่อการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะในระยะหลังที่มีการผลิตสีรีแอกทีฟขึ้นมาใช้ ถึงแม้จะเป็นสีที่ยึดติดกับเส้นใยได้เป็นอย่างดี แต่ก็ยังเป็นสีที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูง ทำให้น้ำเสียที่มีสีย้อมรีแอกทีฟหลงเหลืออยู่ยังบำบัดได้ยาก

3) กระบวนการแอนแอโรบิก-แอโรบิก

จากการย่อยสลายสีย้อมด้วยกระบวนการแอนแอโรบิกจะเกิดสารประกอบอะโรมาติกเอมีนขึ้น ซึ่งจำเป็นต้องมีการใช้กระบวนการแอโรบิกมาย่อยสลายสารที่เกิดขึ้น เพื่อให้ น้ำเสียที่ออกจากระบบไม่มีสารที่เป็นอันตราย

2.3.4 ข้อมูลระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม

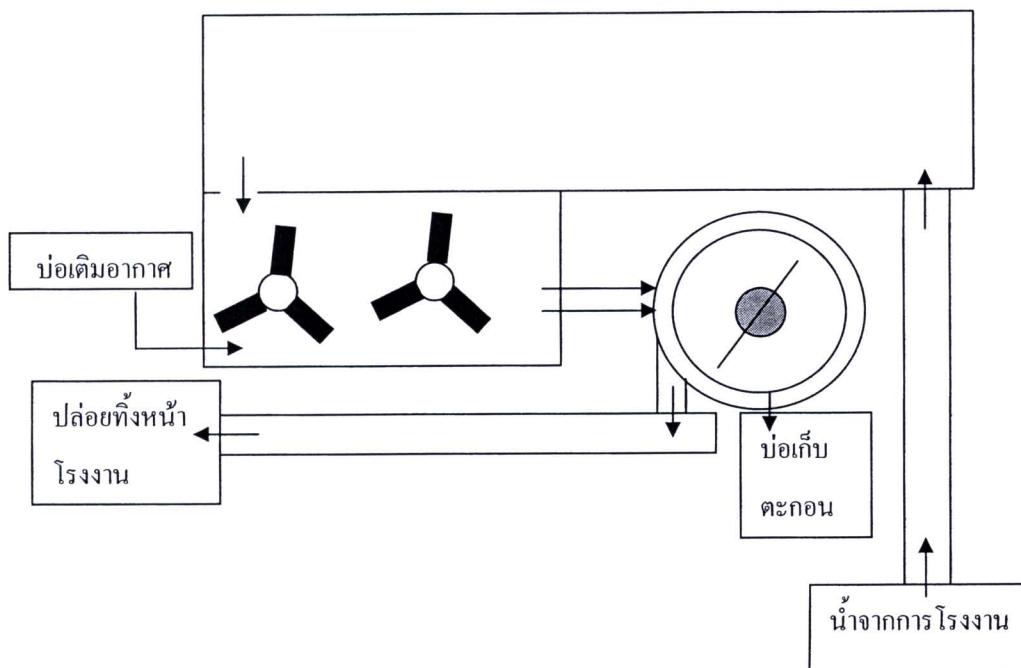
ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานบริษัทไทยอินเตอร์คอตคอนการทอ จำกัดระบบที่ใช้เป็นแบบ Activated Sludge (AS) เป็นวิธีบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการทางชีววิทยาโดยใช้แบคทีเรียพวกที่ใช้ ออกซิเจน (Aerobic Bacteria) เป็นตัวหลักในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในการบำบัดน้ำเสียดังรูปที่ 2.4

ระบบบำบัดน้ำเสียประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ถังเติมอากาศ (Aeration Tank) และ ถังตกตะกอน (sedimentation Tank) น้ำเสียจะถูกส่งเข้าถังเติมอากาศซึ่งมีสลัดจ์อยู่สภาวะภายในถังเติมอากาศจะมีสภาพที่เอื้ออำนวยต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์แบบแอโรบิก จุลินทรีย์เหล่านี้จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้อยู่ในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำในที่สุด น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจะไหลต่อไปยังถังตกตะกอนเพื่อแยกสลัดจ์ออกจากน้ำใส สลัดจ์ที่แยกตัวอยู่ที่ก้นถังตกตะกอนส่วนหนึ่งจะถูกสูบกลับเข้าไปในถังเติมอากาศใหม่เพื่อรักษาความเข้มข้นของสลัดจ์ในถัง

เติมอากาศให้ได้ตามกำหนด และอีกส่วนหนึ่งจะเป็นสลัดจ์ส่วนเกิน (Excess Sludge) ที่ต้องนำไปกำจัดต่อไป สำหรับน้ำใสส่วนบนจะเป็นน้ำทิ้งที่สามารถระบายออกสู่สิ่งแวดล้อม



แผนผังบ่อบำบัดน้ำเสีย



รูปที่ 2.4 ระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่ใช้ในการวิจัย

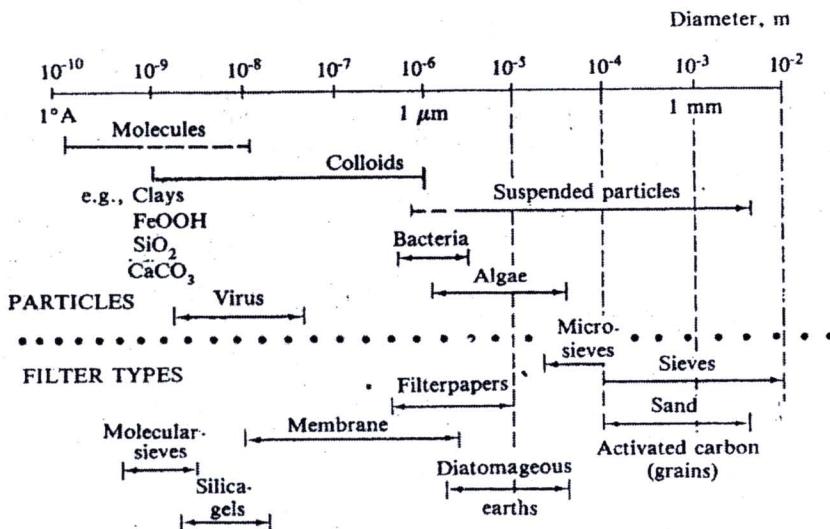
ตารางที่ 2.5 สรุปเทคโนโลยีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียทางเคมีจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมในปัจจุบัน

เทคโนโลยี	ตัวอย่าง	ข้อดี	ข้อเสีย
การตกตะกอนทางเคมี (Coagulation/Flocculation)	สารส้ม ปูนขาว เหล็ก โพลีเมอร์	-เป็นอุปกรณ์พื้นฐาน -กำจัดสีได้เร็ว -ลดซีโอดีได้ดี	-เกิดตะกอนมาก -ต้องเติมสารเคมีและ ค่าใช้จ่าย -กำจัดสีย้อมรีแอคทีฟไม่ได้ -ต้องควบคุมค่าพีเอชให้ ถูกต้อง
การใช้สารดูดซับ (Adsorbents)	ถ่าน ถ่านกัมมันต์	-กำจัดสีได้ดี -เป็นเทคโนโลยีพื้นฐาน -กำจัดสารละลายอินทรีย์ ได้	-ค่าใช้จ่ายสูง -ช้า -มีค่าใช้จ่ายในการกำจัด สารดูดซับ
การออกซิเดชัน	โอโซน	-กำจัดสีได้ดี -ใช้ได้กับน้ำเสียปริมาณ มาก	-ค่าใช้จ่ายสูง -อาจเกิดสารใหม่จากการ ออกซิเดชัน
	สารเฟนตัน(Fenton's reagent)	-ลดสีเร็ว -ควบคุมได้ง่าย	-อาจเกิดสารใหม่จากการ ออกซิเดชัน -ค่าเดินระบบแพง
	การเติมคลอรีน	-ถูก -กำจัดสีดี	-เกิดสารประกอบคลอรีน ขึ้น
การกรองด้วยเมมเบรน	รีเวอร์สออสโมซิส (RO)	-กำจัดสารปนเปื้อน รวมทั้งไอออน	-ราคาแพง
	นาโนเมมเบรน (nanofiltration)	-กำจัดสีดี	-ไม่สามารถใช้กับน้ำเสีย บางชนิด
	อัลตราเมมเบรน (ultrafiltration)	-เร็ว	-น้ำเสียต้องผ่านการบำบัด ขั้นต้นก่อน -ต้องควบคุมค่าพีเอชของ น้ำเสีย
ชีววิทยา	แบบใช้ออกซิเจน	-เหมาะสำหรับน้ำเสียสีไม่ ละลายน้ำ	-ไม่สามารถกำจัดสีย้อมรี แอคทีฟ -เกิดตะกอนแบคทีเรียมาก -ต้องการพลังงานสูง
	การใช้เพื่อการเกษตร	-ไม่แพง	-เหมาะกับน้ำเสียที่ไม่มีสี -อาจมีผลกระทบต่อดิน

(ที่มา : Waste minimization guide for the textile industry, 2549)

2.4 อนุภาคคอลลอยด์

อนุภาคคอลลอยด์ (Colloidal Particle) ขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 10^{-6} มม. (1 ไมครอน) จนถึง 10^{-3} มม. (1 ไมครอน)



รูปที่ 2.5 การจำแนกขนาดของสารต่างๆ ในน้ำ (Benefield, Judkins and Weand, 1982)

การที่อนุภาคคอลลอยด์สามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้เป็นเวลานานๆ โดยไม่ตกตะกอน เรียกว่าเป็นระบบคอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพสูง ระบบคอลลอยด์ หมายถึงระบบที่ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กๆ กระจายอยู่ทั่วไปในสารตัวกลางซึ่งมีสถานะเป็นเนื้อเดียวกัน (Continuous Medium) อนุภาคต่างๆ นั้นเรียกว่า Dispersed Phase ส่วนสารตัวกลางเรียกว่า Dispersing Phase หรือ Dispersed Medium ระบบคอลลอยด์อาจเกิดขึ้นจากการรวมตัวของสารทั้ง 3 สถานะ

ลักษณะที่สำคัญที่สุดของระบบคอลลอยด์ คือ บทบาทของผิวสัมผัสระหว่าง Dispersed Phase และ Dispersing Phase ขนาดที่เล็กมาของ Dispersed Phase ทำให้น้ำหนักไม่มีความสำคัญเทียบเท่ากับพื้นที่ผิวของสาร

ระบบคอลลอยด์ จำแนกตามแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง Dispersed Phase และ Dispersing Phase ถ้าแรงยึดเหนี่ยวมีกำลังอ่อน ระบบเรียกว่า Hydrophobic แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวมีกำลังแรง ระบบเรียกว่า Hydrophilic ในกรณีที่ Dispersing Phase เป็นน้ำ ศัพท์จะใช้ Hydrophobic และ Hydrophilic แทน คอลลอยด์แบบ Hydrophobic สามารถแยกออกจากน้ำได้ง่ายกว่าคอลลอยด์แบบ Hydrophilic เพราะคอลลอยด์แบบ Hydrophilic มีโมเลกุลของน้ำห่อหุ้มอยู่ จึงต้องใช้แรงมากในการบังคับให้อนุภาคต่างๆ เกาะจับกันเป็นกลุ่มก้อนเพราะโมเลกุลของน้ำเป็นเสมือนสิ่งกีดขวางที่ป้องกันไม่ให้อนุภาคต่างๆ เข้าใกล้และจับตัวกัน

2.4.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์

สิ่งที่ทำให้อนุภาคคอลลอยด์มีความแตกต่างจากตะกอนแขวนลอย อะตอม และ โมเลกุลขนาดเล็ก คือ ขนาดและคุณสมบัติทางไฟฟ้า อนุภาคคอลลอยด์อาจมีประจุบวกหรือลบก็ได้ แต่ที่มักพบในงานด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมมักเป็นประจุลบและเป็นอนุภาคแบบไฮโดรโฟบิก (อนุภาคที่ไม่ชอบน้ำ) ตัวอย่างของอนุภาคประจุลบในน้ำ คือ ความขุ่นในน้ำผิวดิน ซึ่งส่วนมากเป็นอนุภาคดินเหนียวชนิดต่างๆ อนุภาคประจุบวกมักเป็นสารอินทรีย์ซึ่งเป็นอนุภาคแบบไฮโดรฟิลิก

การที่อนุภาคคอลลอยด์มีประจุไฟฟ้า ทำให้มีแรงผลักระหว่างอนุภาคจึงเป็นสาเหตุทำให้อนุภาคต่างๆ กระจายอยู่ในน้ำโดยไม่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน จึงกล่าวได้ว่า ประจุไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้อนุภาคคอลลอยด์มีเสถียรภาพ

อนุภาคคอลลอยด์ได้ประจุไฟฟ้ามาจากหลายทาง ดังต่อไปนี้

1.) ความไม่บริสุทธิ์ของผลึกสาร

ประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์อาจได้มาจากการแลกเปลี่ยนอะตอมของผลึกอนุภาคกับอะตอมจากภายนอกซึ่งมีประจุไม่เท่ากัน เช่น เมื่อ Al^{3+} แลกที่กับ Si^{4+} ซึ่งอยู่ในโครงสร้างผลึกของดินเหนียว (ภาพที่ 2.3) ทำให้อนุภาคดินเหนียวมีประจุบวกลดลง จึงแสดงอำนาจของประจุลบ ประจุลบของความขุ่นในน้ำผิวดินมีกำเนิดมาจากวิธีนี้



รูปที่ 2.6 ที่มาของประจุไฟฟ้าของอนุภาคดินเหนียว (Benfield et al, 1982)

2.) ประจุไฟฟ้าของไอออนที่ถูกดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์

ฟองก๊าซ ละอองน้ำมัน หรืออนุภาคคอลลอยด์อีกหลายชนิดได้ประจุไฟฟ้าบนผิวเนื่องจากมันสามารถเลือกดูดไอออนบางชนิดมาติดบนผิวได้ ไอออนที่ถูกดูดติด เรียกว่า Peptizing Ions อนุภาคคอลลอยด์ที่กระจายอยู่ในน้ำมักชอบดูดไอออนลบมากกว่าไอออนบวก เพราะไอออนลบจะมีโมเลกุลของน้ำล้อมรอบอยู่ ทำให้ไอออนบวกไม่สามารถเข้าถึงผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ แนวคิดเท่ากับไอออนลบ โมเลกุลของน้ำเป็นเสมือนสิ่งกีดขวางการจับตัวระหว่างไอออนบวกและอนุภาคคอลลอยด์ ด้วยเหตุนี้อนุภาคคอลลอยด์ในน้ำจึงมักมีประจุลบมากกว่าประจุบวก

3.) การละลายตัวของไอออน

อนุภาคคอลลอยด์บางชนิดจะมีประจุไฟฟ้า ถ้าไอออนต่างชนิดที่ประกอบกันเป็นอนุภาคละลายน้ำได้ไม่เท่ากัน

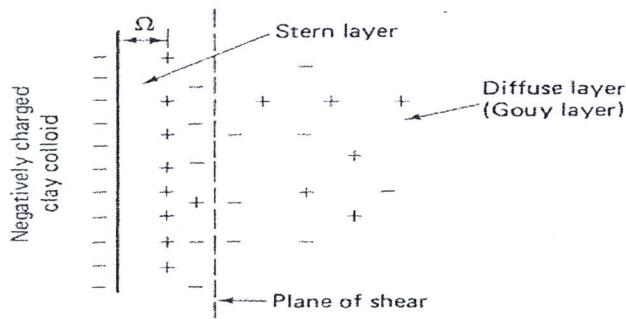
4.) การแตกตัวเป็นไอออนของ Functional Group

อนุภาคคอลลอยด์จำนวนมากได้ประจุไฟฟ้า เนื่องจากการแตกตัวเป็นไอออนของ Functional Group บนผิวอนุภาค เช่น โพรตีนได้ประจุไฟฟ้ามาจากการแตกตัวเป็นไอออนของหมู่กรดอะมิโน (Amino Group) หรือหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl Group) ซึ่งขึ้นอยู่กับพีเอชของน้ำ เมื่อน้ำมีพีเอชต่ำ โพรตีนจะมีประจุบวก และจะมีประจุลบเมื่อพีเอชสูง โพรตีนอาจไม่มีประจุไฟฟ้าเลยที่ระดับพีเอชระหว่างค่าสูงและต่ำ ระดับพีเอชนี้เรียกว่า Isoelectric pH

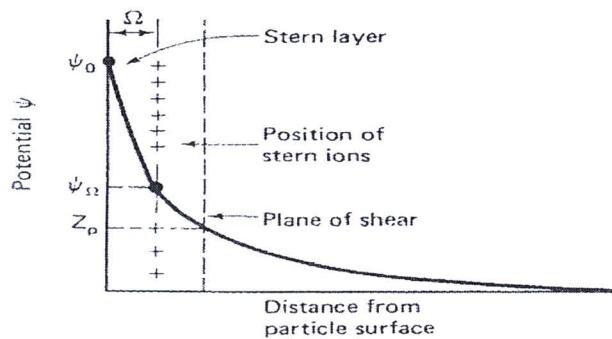
2.4.2 Electric Double Layer Theory

ความแตกต่างระหว่างอนุภาคคอลลอยด์แบบไฮโดรโฟบิกและแบบไฮโดรฟิลิก คือเสถียรภาพของคอลลอยด์แบบแรกเป็นผลมาจากแรงผลักระหว่างไอออนชนิดเดียวกัน ส่วนเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์แบบหลังเกิดขึ้นเนื่องจากแรงผลักและโมเลกุลของน้ำที่ห่อหุ้มอนุภาค ความแตกต่างดังกล่าวมีนัยสำคัญมากต่อกลไกในการทำลายเสถียรภาพ เนื่องจากวิศวกรรมประปาเกี่ยวข้องกับคอลลอยด์แบบไฮโดรโฟบิกเป็นส่วนใหญ่

ทฤษฎีที่ใช้อธิบายเกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ คือ Electric Double Layer Theory ซึ่งผู้คิดสร้างคือ Helmholtz (1853 อ้างถึงใน มั่นสิน, 2542ก) และพัฒนาให้สมบูรณ์ขึ้นโดย Gouy (1910 อ้างถึงใน มั่นสิน, 2542ก), Chapman (1913 อ้างถึงใน มั่นสิน, 2542ก) และ Stern (1924 อ้างถึงใน มั่นสิน, 2542ก) เมื่อพิจารณาอนุภาคดินเหนียวซึ่งมีประจุลบ เนื่องจากประจุลบของอนุภาคคอลลอยด์สามารถสร้างแรงดึงดูดที่ทำให้ไอออนบวกที่อยู่ในน้ำวิ่งเข้ามาหาได้ จึงทำให้ไอออนประจุบวกมาแออัดกันอยู่ใกล้ผิวอนุภาคคอลลอยด์ ไอออนบวกนี้เรียกว่า Counter Ion ความหนาแน่นของไอออนบวกจะสูงที่สุดในบริเวณที่อยู่ติดกับอนุภาคคอลลอยด์ และลดน้อยลงไปตามระยะห่างจากอนุภาค ทั้งนี้เป็นไปตามศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากประจุลบของอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ผิว (Nernst Potential) และน้อยลงเมื่อห่างออกไป (รูปที่ 2.5a) ณ ตำแหน่งที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์แสดงว่าไม่อยู่ภายใต้อำนาจไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ ทำการกระจายตัวของไอออนบวกและลบเป็นไปจามปกติตามทฤษฎี Double Layer เชื่อว่า ไอออนบวกชั้นในที่สุดไม่สามารถเข้าถึงผิวของอนุภาคคอลลอยด์ ทั้งนี้เพราะไอออนบวกมักมีโมเลกุลของน้ำห่อหุ้มอยู่ ระยะห่างระหว่างผิวอนุภาคคอลลอยด์และจุดศูนย์กลางของไอออนที่อยู่ใกล้ที่สุดคล้ายมีเปลือกทรงกลมบางซึ่งมีความหนาเท่ากับ Ω กั้นขวางอยู่ เปลือกหรือชั้นบางนี้เรียกว่า Stern Layer และถือว่าเป็นชั้นในของทฤษฎีนี้ ศักย์ไฟฟ้าที่เปลือกชั้นในมีค่าเท่ากับ Stern Potential ส่วนเปลือกชั้นนอกมีชื่อเรียกว่า Diffuse Layer (ชั้นกระจาย) ครอบคลุมจากเปลือกชั้นในไปตำแหน่งที่อนุภาคคอลลอยด์หมดอำนาจไฟฟ้าพอดี (ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์)



(a) Distribution of charges in the vicinity of a colloidal particle



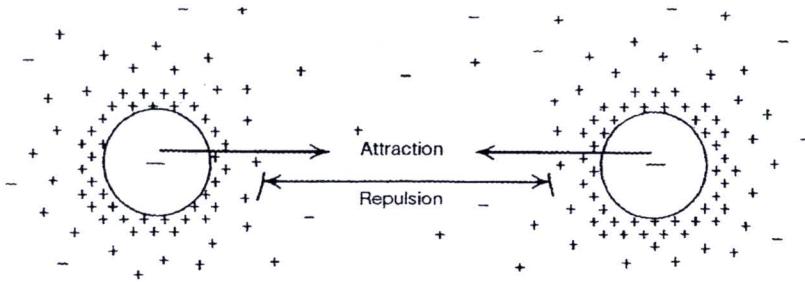
(b) Distribution of potential in the electrical double-layer

รูปที่ 2.7 โมเดลที่ใช้อธิบาย Electric Double Layer Theory (Benfield et al, 1982)

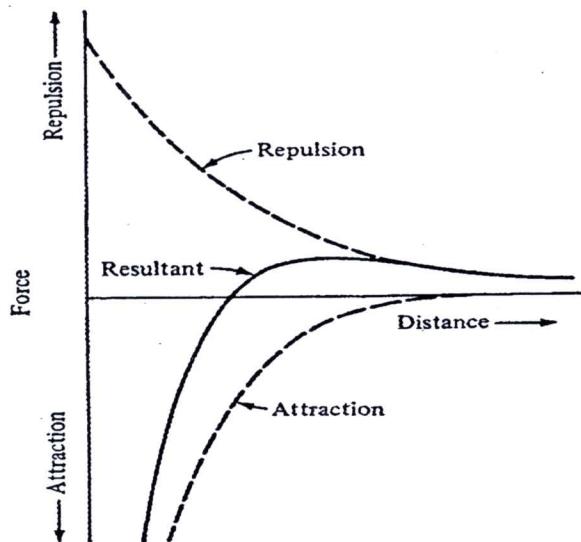
ศักย์ไฟฟ้าบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ หรือ Nernst Potential ไม่สามารถวัดได้โดยตรงแต่สามารถวัดศักย์ไฟฟ้าที่จุดอื่นซึ่งไม่ใช่ที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ ทั้งนี้ได้โดยการวัดอัตราการเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามไฟฟ้า (Electrophoretic Mobility) และคำนวณศักย์ไฟฟ้าจากค่าที่วัดได้ ศักย์ไฟฟ้าที่คำนวณได้นี้ เรียกว่า ซีตาโพเทนเชียล (Zeta Potential; Z_p) ซีตาโพเทนเชียล หมายถึง ศักย์ไฟฟ้าที่ผิววนอกสุดของน้ำที่เคลื่อนที่ไปพร้อมกับอนุภาคคอลลอยด์ผิววนอกที่สุดนี้ เรียกว่า Plane of Shear (รูปที่ 2.5) ตำแหน่งที่แน่นอนของ Plane of Shear ไม่เป็นที่ทราบแน่นอน เชื่อกันว่าอยู่นอก Stern Layer แต่ยังคงอยู่ใน Diffuse Layer อย่างแน่นอน บทบาทของซีตาโพเทนเชียลมีมากกว่า ศักย์ไฟฟ้าตัวอื่นๆ เนื่องจากซีตาโพเทนเชียล ใช้เป็นพารามิเตอร์ที่บอกระดับของเสถียรภาพของคอลลอยด์ได้ ระบบคอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพสูง (มีแรงผลักระหว่างอนุภาคสูงมาก) จะมีค่าซีตาโพเทนเชียลสูงด้วย ในทางตรงกันข้ามระบบคอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพต่ำ จะมีซีตาโพเทนเชียลต่ำ และทำให้รวมตัวกันเป็นฟล็อกได้ง่าย

2.4.3 เสถียรภาพของคอลลอยด์

ระบบคอลลอยด์อาจมีเสถียรภาพหรือไม่ก็ได้ อนุภาคคอลลอยด์มีเสถียรภาพเมื่อสามารถดำรงสถานะแขวนลอยในน้ำได้โดยไม่ตกตะกอน ภายในเวลาสั้น เมื่อทำให้อนุภาคคอลลอยด์ตกตะกอนและแยกตัวออกจากน้ำก็ถือว่า เสถียรภาพของคอลลอยด์ถูกทำลายและไม่มีเสถียรภาพอีกต่อไป ด้วยเหตุนี้เสถียรภาพของคอลลอยด์จึงขึ้นอยู่กับแรงดึงดูดและแรงผลักระหว่างอนุภาค แรงผลักระหว่างอนุภาคจะต้องสูงกว่าแรงดึงดูดจึงจะทำให้อนุภาคคอลลอยด์มีเสถียรภาพ ถ้าแรงดึงดูดมากกว่าแรงผลักระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ต่างๆ สามารถจับกันเป็นกลุ่มก้อนหรือฟล็อกได้ทำให้อนุภาคคอลลอยด์เสียเสถียรภาพได้ แรงดึงดูดระหว่างอนุภาคเรียกว่า van der Waals Force เป็นแรงอ่อนที่มีอำนาจเมื่ออนุภาคอยู่ใกล้กัน ส่วนแรงผลักระหว่างอนุภาคเป็นผลมาจากประจุไฟฟ้าของอนุภาคหรือซีตาโพเทนเชียล ผลลัพธ์ของแรงระหว่างอนุภาคทั้งสองชนิด ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอนุภาค ดังรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าแรงดึงดูดมีอำนาจเหนือกว่าแรงผลักระหว่างอนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันมากๆ โดยปกติแล้วแรงผลักระหว่างอนุภาคที่เกิดจากซีตาโพเทนเชียลไม่เปิดโอกาสให้อนุภาคต่างๆ เข้ามาใกล้จนเกิดการคูดเข้าหากัน



รูปที่ 2.8 แรงระหว่างอนุภาคทั้งสอง (Hammer and Hammer Jr., 1996)



รูปที่ 2.9 แรงระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ที่ระยะห่างต่างๆ (Rich, 1973)

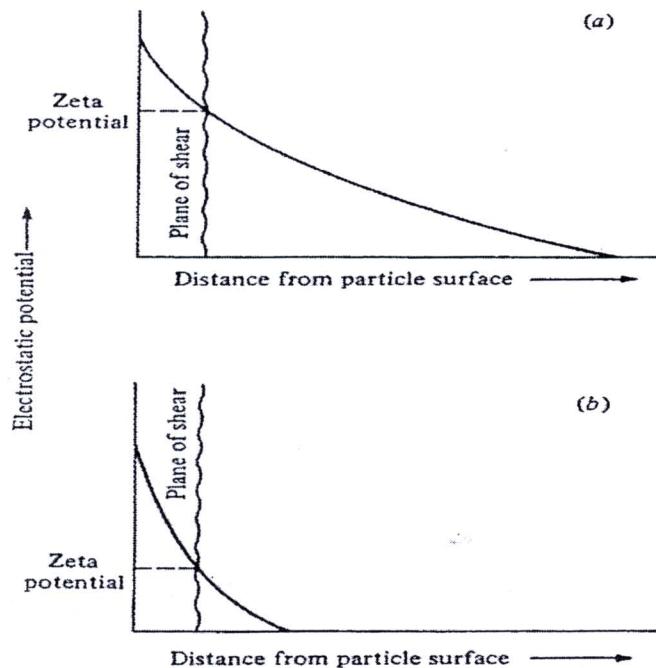
2.5 กระบวนการตกตะกอนทางเคมี (Coagulation)

กระบวนการตกตะกอนทางเคมี (Coagulation) คือ การทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆ เกิดการรวมตัวกันและจับกันเป็นฟล็อก (มันสิน, 2542ก) ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ

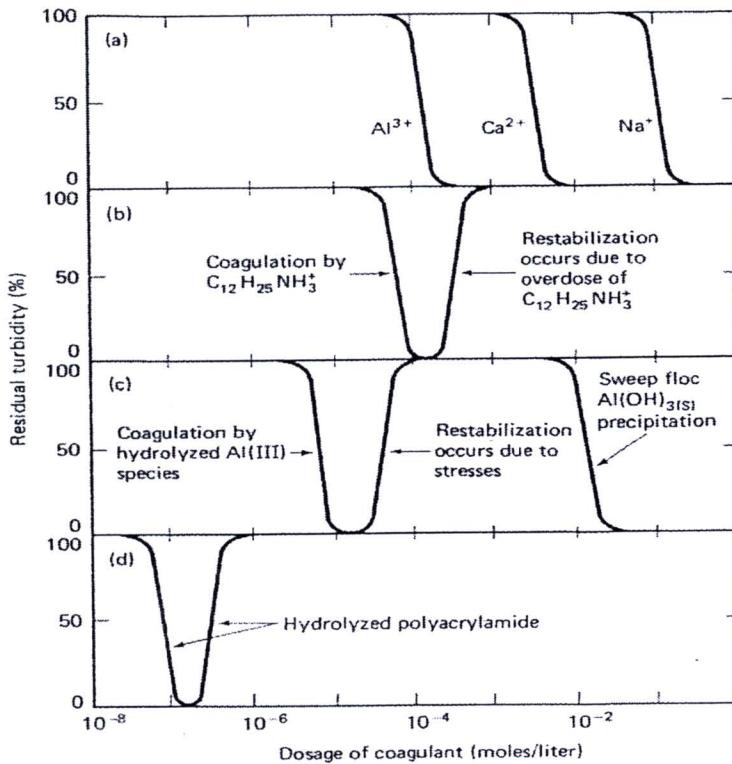
2.5.1. การทำลายเสถียรภาพ (Destabilization) ของคอลลอยด์ ขั้นตอนนี้สามารถทำได้โดยอาศัยกลไกที่สำคัญ 4 แบบ ดังนี้

2.5.1.1 โดยการลดความหนาของชั้นกระจาย

การเพิ่มจำนวนของไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามกับประจุของอนุภาค เป็นการเพิ่มจำนวน Counter Ion ในชั้นกระจาย ผลที่เกิดขึ้นคือ ชั้นกระจายมีความหนาลดลงและทำให้ซีตาโพเทนเชียลลดลงตามไปด้วย (รูปที่ 2.8) การที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากมีประจุบวกเข้าไปออกันอยู่ใกล้ผิวของอนุภาคคอลลอยด์เพิ่มขึ้นทำให้อำนาจของประจุลบของอนุภาคไม่สามารถส่งออกไปได้ไกลเท่าเดิม ไอออนต่างๆ มีอำนาจในการลดความหนาของชั้นกระจาย (ซึ่งเท่ากับลดซีตาโพเทนเชียล) ไม่เท่ากัน ปรากฏว่าไอออนที่มีวาเลนซ์ (Valence) 1, 2 และ 3 มีอำนาจดังกล่าวเป็นสัดส่วน 1: 10: 1,000 ตามลำดับ เช่น Al^{3+} จะให้ผลดีกว่า Ca^{2+} ถึง 1,000 เท่า (รูปที่ 2.9) ข้อสังเกตที่ควรตระหนักคือ



รูปที่ 2.10 ผลของการเติมไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามให้กับอนุภาคคอลลอยด์ (a) ก่อนเติมไอออน (b) หลังจากการเติมไอออนแล้ว (Rich, 1973)



รูปที่ 2.11 การเปรียบเทียบปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ (Benefield et al, 1982)

ไอออนบวกต่างๆ ดังกล่าวไม่ได้ดำรงอยู่อย่างอิสระ เนื่องจากไอออนบวกเหล่านี้ มักมีโมเลกุลของน้ำห่อหุ้มอยู่ เช่น Al^{3+} มีน้ำ 6 โมเลกุลจับกันอยู่ การที่ Al^{3+} หรือโลหะอื่นๆ มีน้ำจับรวมอยู่ด้วยเป็นข้อเสียเพราะจะทำให้ไอออนบวก (ของโลหะ) ไม่สามารถดูดติดที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ โมเลกุลของน้ำเป็นเสมือนเกาะป้องกันการสัมผัสโดยตรง ระหว่างอนุภาคคอลลอยด์กับไอออนบวก ไอออนบวกต่างๆ จึงออกันอยู่ในชั้นกระจายและไม่สามารถทำลายประจุลบของอนุภาคคอลลอยด์ได้ดีเท่าที่ควร การลดโมเลกุลของน้ำในสารประกอบคอมเพล็กซ์ช่วยให้ไอออนบวกและอนุภาคคอลลอยด์เข้าใกล้กันมากขึ้น เช่น $\text{Al}(\text{OH})(\text{H}_2\text{O})_5^{+2}$ หรือ $\text{Al}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_4^+$ สามารถเกาะติดบนผิวอนุภาคคอลลอยด์ได้ แต่ $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{+3}$ ไม่สามารถกระทำได้ด้วยเหตุนี้ รูปที่ 2.9 (c) จึงแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า $\text{Al}(\text{OH})^{+2}$ หรือ $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ หรือสารคอมเพล็กซ์อื่นๆ สลับเปลี่ยนน้อยกว่า Al^{3+} ในการทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์ การทำลายเสถียรภาพโดยการลดความหนาของชั้นกระจายด้วยการเติมสารละลายของเกลือต่างๆ มีข้อที่น่าสนใจดังนี้

(1) ปริมาณสารตัวนำไฟฟ้า (ที่มีไอออนประจุบวก) ที่เติมเพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยวิธีลดความหนาของชั้นกระจายไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคอลลอยด์

(2) ไม่ว่าจะเติมไอออนบวกมากเพียงใด จะไม่สามารถทำให้อนุภาคคอลลอยด์เปลี่ยนประจุไฟฟ้าจากลบเป็นบวกได้ (Charge Reversal) ดังรูปที่ 2.9 (a)

2.5.1.2 โดยการทำลายอำนาจประจุของอนุภาคคอลลอยด์

สารเคมีบางหมู่สามารถดูดติด (adsorbed) บนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ ถ้าสารเหล่านั้นมีประจุไฟฟ้าตรงกันข้ามกับอนุภาคคอลลอยด์ การดูดติดผิวจะมีผลในทางลดอำนาจศักย์ไฟฟ้าและทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ กลไกแบบดูดติดผิวนี้แตกต่างจากกลไกแบบแรก 3 ประการ ดังนี้

(1) กลไกแบบดูดติดผิวต้องการไอออนต่างชนิดน้อยกว่ากลไกแบบแรก เนื่องจากไอออนต่างประจุสามารถเข้าถึงผิวของอนุภาคคอลลอยด์ การทำลายศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์จึงได้ผลดีกว่าไอออนต่างประจุที่ไม่สามารถเข้าถึงผิวอนุภาคได้

(2) การทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์ด้วยกลไกแบบดูดติดผิว เป็นแบบสโตยชิโอเมตริก (Stoichiometric) กล่าวคือ ปริมาณของโคแอกกูแลนต์ที่ใช้เพิ่มหรือลดตามการเพิ่มหรือลดของปริมาณอนุภาคคอลลอยด์ แต่การทำลายเสถียรภาพแบบลดความหนาของชั้นกระจายไม่เป็นสโตยชิโอเมตริก

(3) กลไกแบบดูดติดผิวสามารถเปลี่ยนประจุของอนุภาคคอลลอยด์ให้เป็นตรงกันข้ามกับของเดิม (Charge Reversal) ทั้งนี้โดยการใช้โคแอกกูแลนต์มากเกินไปเสถียรภาพของคอลลอยด์จะฟื้นขึ้นมาใหม่เนื่องจากการเปลี่ยนประจุไฟฟ้าเกิดขึ้น กลไกแบบลดความหนาของชั้นกระจายไม่สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนประจุเป็นตรงกันข้าม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าจำนวนไอออนต่างชนิดในชั้นกระจายถูกกำจัดด้วยศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์เสมอ โคแอกกูแลนต์ที่เติมมากเกินไปจะอยู่นอกชั้นกระจาย ดังนั้น ไม่ว่าจะเติมโคแอกกูแลนต์มากเท่าใดการเปลี่ยนประจุของคอลลอยด์ให้เป็นตรงกันข้าม จะไม่สามารถเกิดขึ้นถ้าโคแอกกูแลนต์ไม่สามารถดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์ ข้อที่ควรสังเกตเกี่ยวกับ Charge Reversal ของกลไกแบบดูดติดผิวคือ การที่ไอออนต่างประจุสามารถดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์จนประจุเปลี่ยนเป็นตรงกันข้าม แสดงว่ามีปฏิกิริยาเคมีระหว่างไอออนต่างประจุกับอนุภาคคอลลอยด์จนสามารถเอาชนะแรงผลักระหว่างประจุชนิดเดียวกันได้

2.5.1.3 การห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ไว้ในผลึกสารประกอบที่สร้างขึ้น

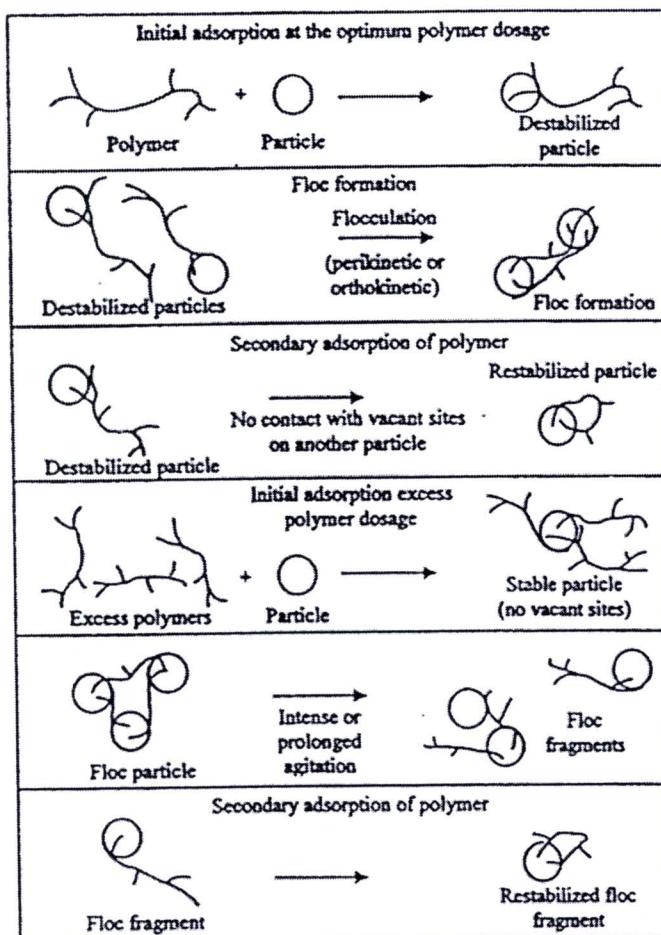
ถ้าเติมสารประกอบเกลือของโลหะบางชนิดลงไปในน้ำในปริมาณที่เพียงพอจะมีการตกผลึกเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อนุภาคคอลลอยด์อาจเป็นแกนในของผลึกดังกล่าวเพื่อทำให้ผลึกมีขนาดใหญ่หรืออาจจับตัวรวมกับผลึก ลักษณะที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ อาจถือว่าเป็นการเพิ่มขนาดหรือน้ำหนักให้กับอนุภาคคอลลอยด์ เป็นผลให้คอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพและสามารถตกตะกอนได้

กลไกที่ใช้ผลึกสารอนินทรีย์ในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์มีลักษณะที่แตกต่างจากกลไก 2 แบบแรก คือ ปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมแปรผกผันกับความเข้มข้นของคอลลอยด์ กล่าวคือ น้ำที่มีความขุ่นน้อยต้องใช้โคแอกกูแลนต์จำนวนมากจึงจะเกิดการตกตะกอนได้ดี ในทางตรงกันข้ามน้ำที่มีความขุ่นสูงอาจใช้โคแอกกูแลนต์น้อยกว่า เหตุผลคือน้ำที่มีความขุ่นต่ำจะมีโอกาสสัมผัสระหว่างอนุภาคน้อย ดังนั้นแม้ว่าการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์จะเกิดขึ้นแล้วก็ตาม การตกตะกอนอาจไม่เกิดได้ดีเท่าที่ควร การใช้โคแอกกูแลนต์ปริมาณสูงก็เพื่อสร้างผลึกจำนวนมากๆ สำหรับเป็นเป้าสัมผัสให้กับอนุภาคคอลลอยด์ แต่ในกรณีที่น้ำมีความขุ่นสูงโอกาสสัมผัสย่อมมีมากจึงไม่จำเป็นต้องอาศัยเป้าสัมผัสจากภายนอกมากเท่าในกรณีแรก

เนื่องจากกลไกแบบนี้ไม่จำเป็นต้องทำลายประจุที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ การตกตะกอนจึงไม่จำเป็นต้องเกิดขึ้นในขณะที่ซีตาโพเทนเชียลมีค่าต่ำที่สุด อย่างไรก็ตามพีเอชมีบทบาทสำคัญมากต่อกลไกแบบนี้ เนื่องจากมีความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและความสามารถในการตกผลึกของสารต่างๆ โคแอกกูแลนต์แต่ละตัวจะมีระดับพีเอชที่เหมาะสมที่สุดแตกต่างกัน

2.5.1.4 การใช้สารอินทรีย์โพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์

กลไกลักษณะนี้อธิบายได้โดยโมเดลที่เรียกว่า Polymer Bridging (รูปที่ 2.10) กล่าวคือ สารโพลีเมอร์สามารถเกาะติดบนอนุภาคคอลลอยด์ได้หลายตำแหน่ง ซึ่งการเกาะติดนี้อาจเป็นผลมาจากประจุที่ต่างกันของโพลีเมอร์และอนุภาคคอลลอยด์ หรือเป็นแรงทางปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างประจุต่างกันของโพลีเมอร์และอนุภาคคอลลอยด์ อนุภาคที่มีโพลีเมอร์เกาะติด โดยมีปลายอิสระสำหรับเกาะบนอนุภาคอื่นๆ ถือได้ว่าเป็นอนุภาคที่สูญเสียเสถียรภาพแล้ว (Destabilized particle) อนุภาคนี้สามารถจับกับอนุภาคอื่นๆ ได้ โดยอาศัยโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม ในกรณีที่ปลายอิสระของโพลีเมอร์ไม่มีที่เกาะจับอนุภาคอื่นๆ ปลายอิสระจะจับอนุภาคเดิมทำให้ไม่มีปลายอิสระจับอนุภาคอื่นและตำแหน่งว่างบนพื้นผิวลดลง เรียกว่า อนุภาคมีเสถียรภาพกลับคืน (Restabilized particle) กรณีใช้สารโพลีเมอร์มากเกินไปจะเกิดผลเสียเพราะโพลีเมอร์หลายโมเลกุลจะไปเกาะบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์จนกระทั่งไม่มีตำแหน่งว่างบนพื้นผิวอนุภาคสำหรับเป็นที่จับของปลายอิสระของโพลีเมอร์ที่อยู่บนอนุภาคๆ การกวนที่รุนแรงหรือนานเกินไปจะทำให้ฟล็อกที่เกิดขึ้นแล้วกลับแตกออกเป็นส่วนๆ และทำให้ปลายอิสระของโพลีเมอร์เกาะจับบนอนุภาคเดิม อนุภาคคอลลอยด์จึงคืนเสถียรภาพอีกครั้ง

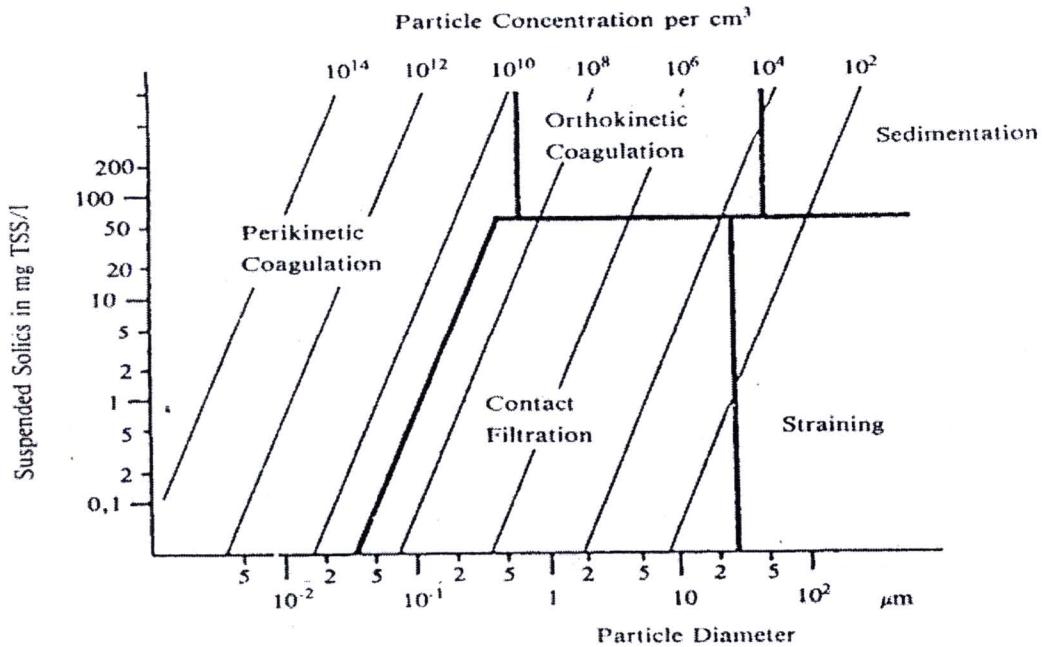


รูปที่ 2.12 กลไกของการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์แบบเชื่อมด้วยโพลิเมอร์

(Benefield et al, 1982)

2.5.2 ทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆ เคลื่อนที่มาสัมผัสหรือกระทบกัน (Transport of colloidal particles) เมื่ออนุภาคถูกทำลายเสถียรภาพแล้วการสร้างโอกาสสัมผัสระหว่างอนุภาคย่อมเกิดได้ง่ายขึ้น และหลังการสัมผัสควรเกาะติดกันแน่นเป็นกลุ่มก้อน เรียกว่า ฟล็อก (Floc) วิธีการสร้างสัมผัสให้อนุภาคมีวิธีดังนี้

2.5.2.1 ทำให้อนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่ไปมาในน้ำจนกว่าจะมีการสร้างสัมผัสเกิดขึ้น วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมมากที่สุด คือ กวนน้ำให้เคลื่อนที่ในลักษณะที่ส่วนต่างๆ ของน้ำมีอัตราการเร็วในการไหลแตกต่างกัน เป็นเหตุให้อนุภาคต่างๆ มีอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ไม่เท่ากันจึงมีการสัมผัสเกิดขึ้น การเคลื่อนที่ของน้ำต้องไม่เร็วจนเกินไป เพราะจะทำให้ฟล็อกที่เกิดขึ้นอาจแตกหรือหลุดออกจากกันได้ ซึ่งอุปกรณ์ในการสร้างสัมผัสหรือฟล็อกกู่เลชัน เรียกว่า ถังกวนช้า และเทคนิคการสร้างสัมผัสเรียกว่า Orthokinetic Flocculation อนุภาคคอลลอยด์ที่มีฟล็อกแบบนี้ควรมีขนาดใหญ่กว่า 0.1 – 1 ไมครอนและมีความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 50 มก./ล.



รูปที่ 2.13 เชนท์ที่เหมาะสมสำหรับการสร้างสัมผักระหว่างอนุภาคต่างๆ (มันสิน, 2542ก)

2.5.2.2 การสัมผัของอนุภาคคอลลอยด์ อาจเกิดขึ้นได้เองโดยอาศัยการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์กระทบกันเองหรือถูกชนโดยโมเลกุลของน้ำ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของน้ำขึ้นกับอุณหภูมิ การสัมผัสแบบนี้จึงขึ้นกับอุณหภูมิด้วย เทคนิคนี้เรียกว่า Perikinetic Flocculation

2.5.2.3 การสัมผัระหว่างอนุภาคเกิดขึ้นเนื่องจากการตกตะกอนที่มีอัตราไม่เท่ากันของอนุภาคต่างๆ ฟล็อกกุเลชันด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นพร้อมๆ กับการตกตะกอน ทำให้สามารถกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ออกจากน้ำได้เลย อนุภาคที่สามารถสร้างฟล็อกกุเลชันแบบนี้ได้ต้องมีขนาดใหญ่กว่า 5 ไมครอน และมีความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 50 มก./ล. ในทางปฏิบัติอนุภาคที่มีขนาดดังกล่าวอาจเกิดฟล็อกกุเลชันมาก่อนแล้วครั้งหนึ่ง เมื่อมาถึงการตกตะกอนจึงเกิดฟล็อกกุเลชันอีกในขณะที่มีการตกตะกอน

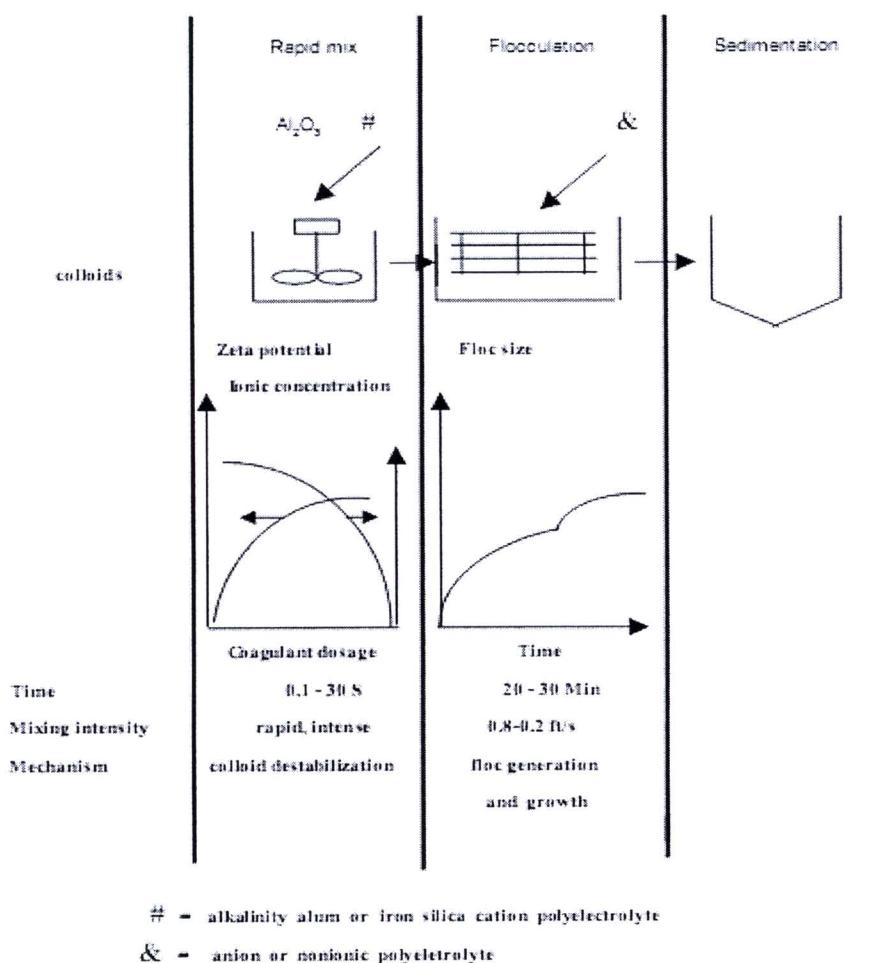
2.5.2.4 ในกรณีที่อนุภาคคอลลอยด์มีขนาดใหญ่กว่า 0.1 – 1 ไมครอน แต่เล็กกว่า 5 ไมครอน และมีความเข้มข้นน้อยกว่า 50 มก./ล. ฟล็อกกุเลชันอาจเกิดขึ้นโดยการสร้างสัมผัสแบบ Orthokinetic Flocculation แต่อาจเกิดขึ้นช้าเนื่องจากโอกาสสัมผัสน้อย วิธีแก้ไขกระทำได้ดังนี้

(1) ใช้ถังกรองทรายแบบกรองเร็วหรือถังกรองแบบ 2 ชั้น ชั้นกรองช่วยเพิ่มอัตราการสัมผัสให้และยังบังคับให้อนุภาคต่างๆ เคลื่อนที่เข้ามาชิดกันด้วย การใช้ถังกรองช่วยสร้างฟล็อกกุเลชันเช่นนี้ เรียกว่า กรองสัมผัส (Contract Filtration) แต่เนื่องจากช่องว่างในชั้นกรองมีจำกัด วิธีนี้จึงใช้ได้กับอนุภาคที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 50 มก./ล. การใช้กรวดขนาดเล็กแทนทราย

อาจเพิ่มปริมาตรช่องว่างได้แต่เป็นการลดพื้นที่สัมผัส ดังนั้นจึงอาจได้ผลในทางฟล็อกกูเลชันไม่ดีเท่าชั้นทราย

(2) ใช้อนุภาคที่จับตัวกันเป็นฟล็อกแล้วเป่าสัมผัสให้กับอนุภาคใหม่ ในทางปฏิบัติสามารถกระทำได้ 2 วิธี คือ ทำให้ฟล็อกจับตัวกันเป็นชั้นสลัดจ์ (Sludge Blanket) และบังคับให้อนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่ผ่านชั้นสลัดจ์ อีกวิธีหนึ่งคือ เอาฟล็อกกลับคืนมาผสมกับอนุภาคคอลลอยด์จากนั้นจึงสร้างสัมผัสแบบ Orthokinetic Flocculation ไปตามปกติ

2.5.2.5 ในกรณีที่อนุภาคคอลลอยด์มีขนาดใหญ่กว่า 3 ไมครอนแต่มีความเข้มข้นต่ำ การสร้างสัมผัสอาจใช้วิธีการองได้เช่นกัน แต่สารกรองที่ใช้ควรมีขนาดใหญ่กว่าทราย



รูปที่ 2.14 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของการเกิดกระบวนการตกตะกอน (โอภาส, 2546)

2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการสร้างและรวมตัวกันตกตะกอน

ในกระบวนการสร้างและรวมตะกอนจะดำเนินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ดังนี้

2.6.1 ชนิดของคอลลอยด์ในน้ำ

เนื่องจากคอลลอยด์ในน้ำเป็นสารอินทรีย์ หรืออนินทรีย์ที่มีสภาพเป็นประจุบวกหรือลบ หรือเป็นคอลลอยด์ประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) จะมีโอกาสถูกกำจัดออกจากน้ำได้ง่ายกว่า ประเภทที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) หากทราบชนิดของคอลลอยด์ จะช่วยในการตัดสินใจเลือกใช้สาร ที่ช่วยในการตกตะกอนได้อย่างเหมาะสม

2.6.2 อุณหภูมิ

อุณหภูมิจะมีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้น ที่อุณหภูมิลดลง ความหนืด (Viscosity) ของน้ำจะเพิ่มขึ้น เพราะมีแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นเนื่องจากความหนืดของน้ำเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ค่า พีเอชก็จะเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะมีผลมากในกรณีที่ใช้สารเคมีสร้างตะกอนในปริมาณต่ำ และเมื่อ อุณหภูมิลดลง การเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ของสารเคมีในน้ำย่อมลดลงไปด้วย

2.6.3 ส่วนประกอบทางเคมีของน้ำ

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการสร้างตะกอนจะสมบูรณ์ ต้องอาศัยส่วนประกอบทางเคมี ที่มีอยู่ในน้ำที่สำคัญ ได้แก่ สภาพความเป็นด่างในน้ำ (Alkalinity) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ ด้านทานการเปลี่ยนแปลงพีเอช เพื่อให้ปฏิกิริยาในการกำจัดอนุภาคคอลลอยด์มีประสิทธิภาพมากขึ้น

2.6.4 พีเอชที่เหมาะสม

สารที่ใช้ในการตกตะกอนแต่ละชนิดให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดที่พีเอชต่างๆ กัน การเติมสาร สร้างตะกอนลงในน้ำที่ไม่อยู่ในช่วงพีเอชที่เหมาะสม นอกจากจะทำให้เปลืองสารเคมีที่ใช้แล้ว ยัง จะทำให้คุณภาพน้ำไม่ดีเท่าที่ควรและการตกตะกอนจะเกิดขึ้นได้ไม่มีประสิทธิภาพ

2.6.5 ชนิดและปริมาณของสารสร้างตะกอนและรวมตะกอน

สารสร้างตะกอนแต่ละชนิดจะมีความเหมาะสมสำหรับทำลายอนุภาคคอลลอยด์แต่ละชนิด ได้แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงปริมาณที่ใช้ ลักษณะของกลุ่มตะกอนที่เกิดขึ้น ความเร็ว ของการตกตะกอน ความยากง่ายในการใช้งาน รวมทั้งราคาด้วย

2.6.6 เกลือของสารละลาย

ในน้ำเสียมักจะพบเกลืออนินทรีย์ ซึ่งจะมีผลต่อช่วงพีเอชที่เหมาะสม คือจะทำให้ ช่วงกว้างขึ้น และปริมาณสารช่วยสร้างตะกอนจะใช้มากขึ้น

2.6.7 ระดับความขุ่นในน้ำ

หมายถึงปริมาณอนุภาคคอลลอยด์ที่มีอยู่ในน้ำ โดยน้ำที่มีอนุภาคคอลลอยด์จำนวนมากจะ ใช้สารสร้างตะกอนในปริมาณมีน้อยกว่า อีกทั้งยังตกตะกอนได้ดีกว่าเนื่องจากมีเป่าสัมผัสมากกว่า น้ำที่มีอนุภาคคอลลอยด์น้อยกว่า

2.6.8 เวลาและความแรงในการผสมเพื่อให้สารเคมีกระจายตัว

การทำให้สารเคมีละลายน้ำอย่างทั่วถึงเพื่อให้เกิดการสร้างตะกอน จำเป็นต้องกวนน้ำเพื่อให้เกิดการปั่นป่วนอย่างรวดเร็วด้วยเวลาอันสั้น เพื่อให้สารเคมีกระจายตัวออกไปทำปฏิกิริยากับอนุภาคคอลลอยด์ได้ทั่วถึงและยังเป็นการช่วยประหยัดเวลาอีกด้วย เพราะปฏิกิริยาดังกล่าวนี้ใช้เวลา น้อยกว่ากระบวนการรวมตะกอน ดังนั้นถ้าใช้การกวนที่รุนแรงมากเท่าใดก็จะช่วยประหยัดเวลามากขึ้นเท่านั้น ในทางตรงกันข้ามเมื่อต้องการให้เกิดการรวมตัวของตะกอนที่เกิดขึ้น เพื่อให้มีโอกาสดอยมาสัมผัสซึ่งกันและกันได้มากที่สุด โดยทั่วไปการกวนเร็วใช้เวลา 30 – 90 วินาที ส่วนการกวนช้าใช้เวลาประมาณ 30 – 60 นาที

2.7 การเลือกใช้สารเคมีในการตกตะกอน

สารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนมีด้วยกันหลายชนิด ได้แก่ สารส้ม เพอริคลอไรด์ (FeCl_3) อะลูมินัมคลอไรด์ไฮดรอกไซด์ (ACH) โพลีอะลูมินัมคลอไรด์ (PACl) เป็นต้น ซึ่งสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนแต่ละชนิดจะมีความเหมาะสม สำหรับการทำให้เสียเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำ แต่ละชนิดได้แตกต่างกัน ดังนั้นในการเลือกสารเคมีในการตกตะกอน จึงต้องมีการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของสารเคมีแต่ละชนิด โดยวิธีจาร์เทสต์ (Jar test) หรือโดยวิธีวัดศักย์ไฟฟ้าซีตาโพเทนเชียล (Zeta potential) ซึ่งวิธีจาร์เทสต์จะเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดและใช้กันมานานแล้ว ในการศึกษาจะคำนึงถึงปริมาณสารเคมีที่ใช้ ลักษณะของกลุ่มตะกอนที่เกิดขึ้น ความเร็วของการตกตะกอน ความยากง่ายในการใช้งานและค่าใช้จ่ายในการเลือกใช้สารเคมีแต่ละชนิด

2.7.1 การใช้สารส้มเป็นสารตกตะกอน

สารส้ม (Alum) หรืออะลูมิเนียมซัลเฟต เป็นเกลืออะลูมิเนียม ซึ่งเป็นสารเคมีที่นิยมใช้มากที่สุดในการผลิตน้ำประปา มีขายทั้งแบบเป็นสารละลาย เป็นผงและเป็นเม็ด มีสีเขียวอ่อนจนถึงสีครีม สารส้มละลายน้ำได้ดีเมื่ออยู่ในรูปสารละลายจะมีฤทธิ์เป็นกรดและกัดกร่อนเหล็กหรือคอนกรีตได้ ถ้าที่ใช้ละลายสารก่อนเติมลงในน้ำควรใช้ถังพลาสติก หรือสแตนเลส เมื่อเกลืออะลูมิเนียมอยู่ในน้ำจะไฮโดรไลซ์อย่างรวดเร็วไปเป็นอะลูมิเนียมเชิงซ้อนต่างๆ พิเศษของสารละลายในขณะเริ่มต้นมีความสำคัญมากเพราะจะเป็นตัวกำหนดว่าอะลูมิเนียมเชิงซ้อนตัวใดจะเกิดขึ้นเป็นส่วนใหญ่ในน้ำนั้น

สารส้มมีสูตรโมเลกุลคือ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{XH}_2\text{O}$ ซึ่งโดยปกติ X มีค่าเท่ากับ 14.3 หรือ 18 เมื่อเติมสารส้มลงในน้ำจะแตกตัวให้อิออนบวกและลบ ดังปฏิกิริยา



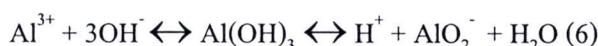
อะลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) จะถูกล้อมรอบด้วย 6 โมเลกุลของน้ำได้ $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ ไฮโดรไลซิสของอะลูมิเนียมไอออนจะเกิดขึ้นทันที ตามสมการดังนี้



ในกรณีที่มีความเข้มข้นของสารสัมพันธ์สูงกว่าความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัว (Saturation point) ไฮโดรไลซิสจะดำเนินต่อไป จนได้ผลของปฏิกิริยาสุดท้ายเป็นผลึกของ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ดังปฏิกิริยา



$\text{Al}(\text{OH})_3$ มีคุณสมบัติในการเป็น amphoteric คือ สามารถละลายได้ทั้งในสภาวะที่เป็นกรด และด่าง ดังปฏิกิริยา

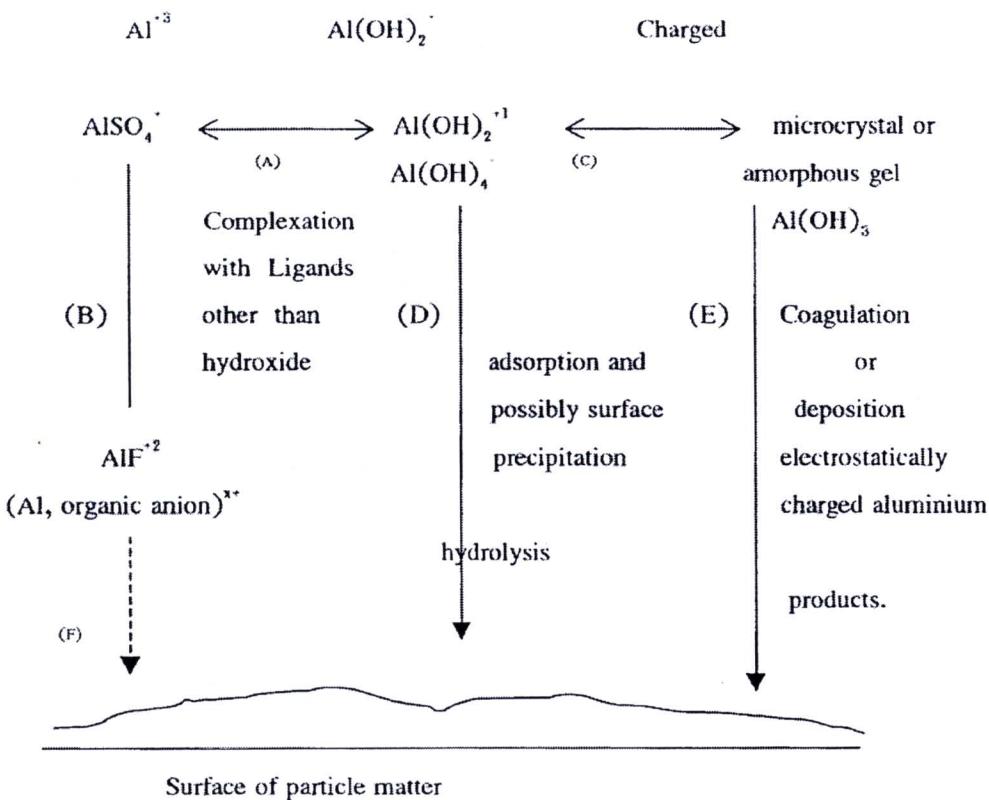


Insoluble $\text{Al}(\text{OH})_3$ สามารถอยู่ในสมดุลกับ Al^{3+} กับ OH^- หรือ H^+ กับ AlO_2^- (meta-aluminate ion) และในสภาวะสารละลายอิ่มตัว ผลคูณของความเข้มข้นของ Al^{3+} และ OH^- ($[\text{Al}^{3+}][\text{OH}^-]^3$) จะมีค่าเท่ากับค่าคงที่ผลคูณการละลาย (K_{sp}) ของ $\text{Al}(\text{OH})_3$ และผลคูณของความเข้มข้นของ H^+ และ AlO_2^- ($[\text{H}^+][\text{AlO}_2^-]$) จะมีค่าเท่ากับค่าคงที่ผลคูณการละลาย (K_{sp}) ของ $\text{HAl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$

การเติมกรดแก่จะทำให้ H^+ ซึ่งจะรวมกับ OH^- ได้เป็น H_2O ทำให้ $[\text{Al}^{3+}][\text{OH}^-]^3$ น้อยกว่าค่า K_{sp} ของ $\text{Al}(\text{OH})_3$ และ $\text{Al}(\text{OH})_3$ จะละลาย

ถ้าเติมด่างแก่จะทำให้ OH^- ซึ่งจะรวมกับ H^+ ได้เป็น $[\text{H}^+][\text{AlO}_2^-]$ น้อยกว่าค่า K_{sp} ของ $\text{HAl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ (meta-aluminate acid) และ $\text{Al}(\text{OH})_3$ จะละลาย

ผลของปฏิกิริยาที่จะเกิดการดูดซับผิวอนุภาคคอลลอยด์ คือ สารประกอบเชิงซ้อนซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างไฮโดรไลซิสจากอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์กับตะกอนของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ซึ่ง Driscoll และ Letterman (1988) ได้เสนอแบบจำลองในการเกิดสารประกอบอะลูมิเนียม ดังในรูปที่ 2.11 เมื่อเติมสารส้มลงในน้ำ ชนิดของสารประกอบอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับสภาพของสารละลาย เช่น ความเข้มข้นของเกลืออะลูมิเนียมที่ใส่ลงไป อุณหภูมิ ชนิดและความเข้มข้นของสารละลายในน้ำ รวมทั้งพื้นที่ผิวอนุภาค



รูปที่ 2.15 แสดงแบบจำลองวิถีทางอะลูมิเนียมในน้ำ (วิโรจน์, 2544)

สารประกอบเชิงซ้อนอาจจะมีประจุลบหรือบวกก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพีเอชของน้ำดังกล่าวคือ ถ้าพีเอชของน้ำสูงกว่าจุดสะเทินทางไฟฟ้า (zero point of charge) ของตะกอนอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนประจุลบ เช่น $Al(OH)_4^-$, $Al(OH)_5^{2-}$ ถ้าพีเอชของน้ำต่ำกว่าจุดสะเทินทางไฟฟ้าของตะกอนอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปในกระบวนการตกตะกอนจะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนประจุบวก เช่น $Al(OH)^{2+}$, $Al(OH)_2^+$, $Al(OH)_{17}^{4+}$, $Al_{13}(OH)_{34}^{5+}$

สารส้มที่เติมลงในน้ำ ทำให้เกิดกลไกของการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยกลไก ดังนี้

1.) กลไกการดูดติดผิวและการทำลายประจุ (Adsorption and charge neutralization)

กลไกการทำลายเสถียรภาพแบบดูดติดผิวและทำลายประจุเกิดจากสารประกอบเชิงซ้อนสารส้มที่มีประจุบวกทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์ซึ่งมักมีประจุลบให้เป็นกลาง (Neutralization) เป็นการสร้างโอกาสสัมผัสให้กับอนุภาครวมตัวจนมีขนาดใหญ่และสามารถตกตะกอนด้วยน้ำหนักของอนุภาคเพียงลำพัง กลไกนี้มีช่วงความเหมาะสมที่แคบ ซึ่งจะควบคุมการทำงานได้ดีนั้นยาก เพราะสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะต้องพอเหมาะเท่านั้น ถ้าหากมีปริมาณต่ำไปการตกตะกอนจะไม่เกิด แต่ถ้ามีปริมาณสูงเกินไปสารประกอบเชิงซ้อนจะดูดติดผิวอนุภาคมากทำให้อนุภาค

เปลี่ยนเป็นประจุบวกและเกิดเสถียรภาพขึ้นอีก แต่ตะกอนที่เกิดจากกลไกนี้สามารถแยกออกจากน้ำได้ง่าย

2.) กลไกแบบกวาด (Sweep coagulation)

กลไกการทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์แบบกวาดของสารส้มเกิดขึ้นในกรณีความเข้มข้นของสารส้มมากเกินไปจนปฏิกิริยาดำเนินไปได้ผลึกของ $\text{Al}(\text{OH})_3$ กลไกแบบนี้จะเกิดขึ้นที่สุดเมื่อใช้ปริมาณสารส้มมากเกินไปจนทำให้ผลคูณของ Al^{3+} และ OH^- ($[\text{Al}^{3+}][\text{OH}^-]^3$) มีค่าเกินกว่า K_{sp} และพีเอชของน้ำควรอยู่ในช่วง 6 – 7.5 ซึ่งทำให้ผลึก $\text{Al}(\text{OH})_3$ มีลักษณะเหนียวสามารถห่อหุ้มอนุภาคและทำให้ผิวของอนุภาคมีความเหนียว ไม่แสดงอิทธิพลทางประจุไฟฟ้าในลักษณะดังกล่าว $\text{Al}(\text{OH})_3$ และอนุภาคคอลลอยด์จะรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่และสามารถตกตะกอนได้เพียงลำพัง

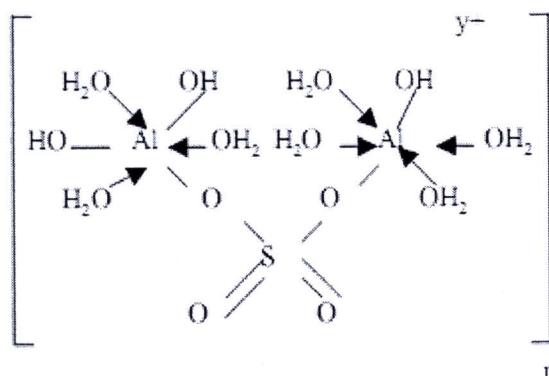
3.) กลไกการตกตะกอนแบบรวม (Combination coagulation)

กลไกการตกตะกอนแบบรวมเป็นการทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์ร่วมระหว่างกลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุและแบบกวาด โดยที่ความแตกต่างระหว่างอิทธิพลของกลไกทั้งสองมีไม่เด่นชัดสภาวะดังกล่าวจัดเป็นกลไกแบบรวมซึ่งจะเกิดขึ้น เมื่อมีการใช้ปริมาณสารส้มเพิ่มสูงขึ้นกว่ากลไกการทำลายเสถียรภาพแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ แต่จะใช้ปริมาณสารส้มต่ำกว่ากลไกแบบกวาด

2.7.2 การใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารตกตะกอน

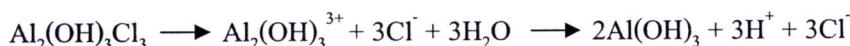
โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminium chloride; PACl) เป็นสารสร้างตะกอนที่นิยมใช้กันมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 โดยเป็นที่นิยมใช้ในประเทศญี่ปุ่นและบางประเทศในทวีปยุโรป โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ถูกเตรียมขึ้นโดยอะลูมิเนียมที่เป็น Al_2O_3 ทำปฏิกิริยากับ HCl ที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้รวมตัวเป็น AlCl_3

เมื่อโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์แตกตัวจะได้อะลูมิเนียมที่มีความสามารถในการให้ไฮโดรเจนไอออน จึงเกิดการไฮโดรไลซิสของอะลูมิเนียมได้สารต่างๆ เช่น $\text{Al}_3(\text{OH})_3^{+5}$, $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{+4}$, $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{+3}$ เป็นต้น ซึ่งมีอะลูมิเนียมหลายอะตอมที่เรียกว่า polymeric hydroxo complex อันมีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับคอลลอยด์ ทำให้คอลลอยด์เสียเสถียรภาพแล้วทำให้เกิดการรวมกลุ่มกันเป็นอนุภาคนานาที่ใหญ่ขึ้นแล้วตกตะกอนลงมา ในกระบวนการฟล็อกนั้น พีเอชของน้ำมีความสำคัญต่อประจุที่เกิดขึ้นจากการไฮโดรไลซิส เนื่องจากถ้าพีเอชต่ำสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุบวกเกิดขึ้นมากจะให้ผลในการเพิ่มทั้งปริมาณและอัตราเร็วในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ นอกจากอะลูมิเนียมจะจับกับอนุภาคคอลลอยด์ อะลูมิเนียมยังทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลไอออนในน้ำกลายเป็น $\text{Al}(\text{OH})_3$



รูปที่ 2.16 โครงสร้างทางเคมีของ lapofloc PACI (วิโรจน์, 2544)

เมื่อ PACI ละลายน้ำจะไฮโดรไลซ์ทันทีเป็นอะลูมิเนียมเชิงซ้อนหลายชนิด ซึ่งตัวที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด คือ $[Al_3O_4(OH)_{24}]^{7-}$ หรือ Al^{3+} ซึ่งการรวมตัวเป็นอะลูมิเนียมเชิงซ้อนตัวนี้ขึ้นอยู่กับระดับการรวมตัวของค่ากับสารละลายอะลูมิเนียม ชนิดและความเข้มข้นของค่า ความเข้มข้นของสารละลายอะลูมิเนียมคลอไรด์และอุณหภูมิ ซึ่งปัจจัยที่สำคัญที่สุดคือ ปริมาณของค่าที่เติมลงไปและระดับความเป็นกลาง (Kaeding, 1992)



เมื่อนำโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์มาใช้เป็นสารตกตะกอนแทนสารส้มพบว่า

- 1.) ใช้ได้กับน้ำในช่วงพีเอชที่กว้างกว่าการใช้สารส้ม โดยเฉพาะที่พีเอชน้อยกว่า 5.5 หรือที่พีเอชมากกว่า 7 (Dempsey, 1985 ; Kaeding, 1992 ; Packham และ Ratnayaka 1992 ; Povillot และ Sutty, 1992)
- 2.) น้ำที่ผ่านการตกตะกอนแล้วจะมีความขุ่นอยู่ในระดับที่ต่ำ ซึ่งจะทำให้ head loss ของระบบการกรองอยู่ในระดับที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับสารส้ม (Kaeding, 1992)
- 3.) ใช้ได้กับน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำได้ (Simson และคณะ, 1988 ; Povillot และ Sutty, 1992)
- 4.) ทำให้เกิดการรวมตัวกับอนุภาคคอลลอยด์เกิดเป็นกลุ่มตะกอนได้เร็ว และมีความแข็งแรงกว่าและตกตะกอนได้เร็วกว่าการใช้สารส้ม (Nilsson, 1992 ; Packham และ Ratnayaka 1992)
- 5.) เมื่อใช้ PACI เป็นสารสร้างตะกอนจะไม่มีจำเป็นต้องใช้สารช่วยตกตะกอน (Coagulant aid) (Packham และ Ratnayaka 1992 ; Povillot และ Sutty, 1992)
- 6.) ภายหลังจากการบำบัดแล้วน้ำที่ได้จะมีพีเอชไม่ต่ำมากเหมือนกับการใช้สารส้มเป็นสารตกตะกอน (Simson และคณะ, 1988)

7.) การนำ PACI มาใช้เป็นสารตกตะกอนในกระบวนการบำบัดนั้นไม่ต้องทำการเปลี่ยนแปลงเครื่องมือหรืออุปกรณ์อื่นๆ (Viraraghavan และ Wimmer, 1988) รวมทั้งไม่ต้องเปลี่ยนแปลงจุดที่จะใส่สารตกตะกอนเข้าไปทำปฏิกิริยากับน้ำเลย (Kaeding, 1992)

8.) ทำให้อะลูมิเนียมตกค้างในน้ำ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารส้มแล้วพบว่า PACI จะทำให้อะลูมิเนียมตกค้างในปริมาณที่น้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องจากอะลูมิเนียมละลายกลับออกมาจาก PACI ในปริมาณน้อยกว่านั่นเอง (Simson และคณะ, 1988 ; Kaeding, 1992 ; Povillot และ Suty, 1992)

9.) ทำให้ปริมาตรของ sludge ในปริมาณมากกว่าการใช้สารส้ม แต่เมื่อคิดในน้ำหนักแห้ง (dry weight) แล้วจะมีน้ำหนักน้อยกว่าการใช้สารส้ม (Kaeding, 1992) และในประเทศญี่ปุ่นได้นำเอา sludge ที่แห้งแล้วไปถมที่ (land fill) หรือใช้เป็นตัวช่วยบำรุงดิน (soil conditioner) และอาจนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการทำผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ (Kawamura และ Trussell, 1991)

10.) สามารถนำมาใช้กับน้ำที่มีค่าความเป็นด่างต่ำและความขุ่นสูงได้ อีกทั้งยังใช้ PACI ในปริมาณที่น้อยกว่าสารส้ม (Kawamura และ Trussell, 1991)

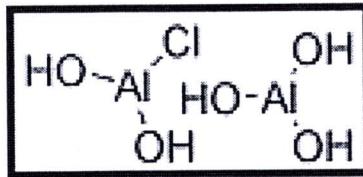
11.) Dempsey และคณะ (1985) ทำการทดลองและรายงานว่าที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอยต่ำๆ ถึงปานกลางพบว่า PACI เป็นสารตกตะกอนที่ดีกว่าสารส้ม (โดยเฉพาะที่พีเอชน้อยกว่า 5 หรือพีเอชมากกว่า 7)

12.) Viraraghavan และ Wimmer (1988) ได้ทำการทดลองหาปริมาณสารตกตะกอนที่เหมาะสมของสารส้ม และ PACI ที่อุณหภูมิ 7, 10 และ 20 องศาเซลเซียส พบว่าในการกำจัดความขุ่นนั้น PACI มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นที่ 1/3 ถึง 2/3 ของปริมาณสารส้ม และ PACI สามารถกำจัดความขุ่นได้มากกว่าการใช้สารส้มร้อยละ 20 ในทุกๆ อุณหภูมิที่ทดสอบซึ่งประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นนี้ไม่ได้มีการเพิ่มสารโพลีเมอร์เพื่อใช้เป็นตัวช่วยตกตะกอนและสามารถใช้ PACI ได้ในช่วงของอุณหภูมิที่กว้างกว่าการใช้สารส้ม จึงทำให้ไม่จำเป็นต้องปรับพีเอชของน้ำในภายหลังด้วย

13.) Hundt และ O'Melia (1988) ทำการทดลองพบว่า PACI สามารถกำจัด fulvic acid ที่มีความเข้มข้นและพีเอชต่ำได้ดีกว่าการใช้สารส้มและ PACI มีความเหมาะสมที่จะใช้กับน้ำที่มีสารอินทรีย์และพีเอชต่ำ เพราะทำให้ใช้ PACI ในปริมาณที่น้อยกว่าสารตกตะกอนที่เป็นอะลูมิเนียมอื่นๆ

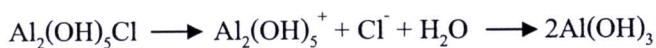
14.) แม้ว่า PACI จะมีประสิทธิภาพในการเป็นสารตกตะกอน แต่ก็ยังมีราคาแพงกว่าสารส้มถึง 2.5 – 3 เท่า แม้ว่าจะช่วยประหยัดในเรื่องของการปรับพีเอชและโพลีเมอร์ที่จะต้องเติมลงไปก็ตาม (Viraraghavan และ Wimmer, 1988)

2.7.3 การใช้อะลูมิเนียมคลอโรไฮเดรตเป็นสารตกตะกอน



รูปที่ 2.17 โครงสร้างของอะลูมิเนียมคลอโรไฮเดรต (ChemicalBook Inc, 2008)

อะลูมิเนียมคลอโรไฮเดรต (Aluminum Chlorohydrate; ACH) เป็นเกลือชนิดหนึ่งที่มีสูตรทางเคมีว่า $\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}$ น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 174.45 การสังเคราะห์ทำได้โดยการทำปฏิกิริยาของอะลูมิเนียมกับกรดไฮโดรคลอริก อะลูมิเนียมที่ใช้ได้แก่ aluminium metal, alumina trihydrate, aluminium chloride, aluminium sulfate คุณสมบัติที่สำคัญของอะลูมิเนียมคลอโรไฮเดรต คือ ในโครงสร้างของอะลูมิเนียมคลอโรไฮเดรตมีอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) 23% พีเอชของสารละลายประมาณ 3.5 – 4.5 และมีค่า basicity (ค่าเฉลี่ยของ $\text{OH}^-/\text{Al}^{3+}$) เท่ากับ 83% จึงทำให้ในโครงสร้างมีประจุบวกมากกว่าสารส้มหรือสารตกตะกอนชนิดอื่นๆ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของอะลูมิเนียมคลอโรไฮเดรต แสดงดังนี้



เนื่องจากในโครงสร้างของอะลูมิเนียมคลอโรไฮเดรตมีประจุบวกมากกว่า (เพราะมีค่าเฉลี่ยของ $\text{OH}^-/\text{Al}^{3+}$ สูง 83%) สารตกตะกอนชนิดอื่นๆ จึงทำให้มีคุณสมบัติที่ดีกว่าสารชนิดอื่น คือ ปริมาณการใช้ในการตกตะกอนจะใช้ปริมาณสารน้อยกว่า หลังตกตะกอนด้วยอะลูมิเนียมคลอโรไฮเดรตจะทำให้พีเอชของน้ำเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย นอกจากนั้นช่วงพีเอชของน้ำสำหรับการบำบัดยังสามารถใช้ได้ในช่วงกว้าง คือ 5 - 9

ในทางอุตสาหกรรมอะลูมิเนียมคลอโรไฮเดรตนอกจากจะมีคุณสมบัติเป็นสารตกตะกอนแล้วยังมีคุณสมบัติสามารถบำบัดสารปนเปื้อนในน้ำได้ทั้งของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids) โลหะ (Metal) ฟอสเฟต (Phosphate) ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand; COD) บีโอดี (Biological Oxygen Demand; BOD) และทีโอซี (total organic carbon; TOC) ได้อีกด้วย

2.7.4 สารตกตะกอนอื่นๆ ได้แก่

1. เฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric chloride) มีสูตรทางเคมีว่า $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ หรือ FeCl_3 anhydrous มีลักษณะผลึกสีน้ำตาลหรือเหลือง และเป็นเม็ดยาวหรือค้ำและยังมีในรูปสารละลายสีน้ำตาลแกมเหลือง ปกติละลายน้ำได้ดีและเติมน้ำดิบในรูปสารละลาย สารละลายจะมีฤทธิ์เป็นกรดและกัดกร่อน ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะได้ตะกอนเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$)

เฟอริกคลอไรด์จะเป็นสารเคมีที่แตกตัวในน้ำ รูปแบบของสารประกอบเหล็ก เมื่อละลายน้ำนั้นจะมีประจุบวก สามารถทำให้เป็นกลางได้โดยใช้ประจุลบที่เกิดจากของแข็งในน้ำ ตะกอน ด้วยเหตุนี้จึงเป็นสาเหตุของการรวมกลุ่มของตะกอนเฟอริกคลอไรด์จะทำปฏิกิริยากับ Bicarbonate alkalinity ในน้ำตะกอนและเปลี่ยนรูปเป็นเหล็กไฮดรอกไซด์กับ bicarbonate alkalinity



กระบวนการตกตะกอนด้วยสารส้มไม่อาจได้ผลดีนักกับน้ำอ่อนที่มีสีเข้ม กรณีเช่นนี้เฟอริกคลอไรด์ให้ผลดีกว่า เมื่อเติมเฟอริกคลอไรด์ให้กับน้ำจะมีผลึกเฟอริกไฮดรอกไซด์เกิดขึ้น ดังนี้ (มันสิน, 2542ก)



ข้อดีอีกประการของเฟอริกคลอไรด์คือ สามารถตกตะกอนกับน้ำที่มี H_2S ได้ดี

2. เฟอรัสซัลเฟต (Ferrous sulfate) มีสูตรทางเคมีคือ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า copperas ในการใช้งานต้องการน้ำที่มีความเป็นด่างไบคาร์บอเนต เพราะน้ำทั่วไปจะมีความเป็นด่างไม่เพียงพอ สำหรับทำปฏิกิริยากับเฟอรัสซัลเฟตให้เกิดเฟอรัสออกไซด์ ไม่เหมาะที่จะใช้กับน้ำที่มีความกระด้างต่ำหรือมีสี ไม่ควรใช้สารตัวนี้เพียงตัวเดียวในการผลิตน้ำประปา ในการใช้งานเฟอรัสซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับความเป็นด่างที่มีอยู่ในน้ำหรือโดยการเติมด่างลงไป ในน้ำ เพื่อให้เกิดเป็นเฟอรัสไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) แต่เนื่องจากเฟอรัสไฮดรอกไซด์ละลายน้ำได้ดี จึงต้องออกซิไดซ์เพื่อเปลี่ยนเป็นเฟอริกไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) ซึ่งละลายน้ำได้น้อย เพื่อจะได้ใช้ประโยชน์ได้ การออกซิไดซ์จะเกิดขึ้นที่พีเอชของน้ำก่อนข้างสูงกว่า 8.4 เท่านั้น โดยการเติมอากาศเพื่อเพิ่มออกซิเจนให้กับน้ำ หรือการเติมคลอรีน

3. เฟอริกซัลเฟต (Ferric sulfate) มีสูตรทางเคมีว่า $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ใช้ตกตะกอนได้ในช่วงพีเอชที่กว้างตั้งแต่ 4 - 11 ใช้ในการกำจัดสีที่ช่วงพีเอช 5.6 ได้และยังเหมาะสำหรับการกำจัดเหล็กและแมงกานีสที่พีเอชสูงอีกด้วย ในการใช้งานเฟอริกซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับความเป็นด่างที่มีอยู่ในน้ำหรือด่างที่เติมลงไป เช่น ปูนขาว หรือ โซดาแอช ดังสมการ



2.8 การใช้สารช่วยสร้างตะกอน (Coagulant Aid)

สารช่วยสร้างตะกอน (Coagulant aid) หมายถึงสารที่ช่วยทำให้สารสร้างตะกอนมีประสิทธิภาพในการตกตะกอนมากยิ่งขึ้น ตัวอย่างของสารช่วยสร้างตะกอน ได้แก่ สารอินทรีย์ธรรมชาติหรือสังเคราะห์ แอ็คติเวตเต็ดซิลิกา (Activated Silica) ดินเหนียวชนิดต่างๆ ปูนขาว เป็นต้น ในปัจจุบันสารช่วยสร้างตะกอนที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ สารอินทรีย์สังเคราะห์แบบต่างๆ ซึ่งเรียกว่า โพลีเมอร์ (Polymer) หรือโพลีอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) เมื่อเติมลงไปโพลีเมอร์จะทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมให้กลุ่มตะกอนมาสัมผัสและยึดเกาะ

สารช่วยสร้างตะกอนมักไม่ใช่สิ่งจำเป็นในกระบวนการตกตะกอนของระบบผลิตน้ำประปา ทั้งนี้เพราะถ้าพึ่งเพียงสารส้มหรือสารประกอบเหล็ก สามารถตกตะกอนให้กับน้ำดิบตามธรรมชาติได้โดยไม่ยาก อย่างไรก็ตามในบางครั้งการใช้สารตกตะกอนเพียงอย่างเดียวอาจสิ้นเปลืองมากในกรณีที่น้ำที่มีความขุ่นสูงการใช้สารช่วยสร้างตะกอนเพียงเล็กน้อยอาจช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายสารตกตะกอนได้ โพลีเมอร์สามารถแบ่งได้อย่างกว้างๆ 2 ชนิด คือ

1.) โพลีเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำมีหลายชนิด เช่น เซลลูโลส (Cellulose) เจลาติน (Gelatin) และแป้ง (Starch)

2.) โพลีเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ สังเคราะห์ขึ้นจากโมโนเมอร์หลายๆ โมโนเมอร์รวมกันหรือสามารถทำได้จากการเพิ่มสารเคมีลงไปเพื่อเพิ่มหน้าที่ของโมโนเมอร์ องค์ประกอบและรูปแบบทางด้านกายภาพของโพลีเมอร์มีรูปร่างเป็นโซ่ยาว

ประเภทของโพลีเมอร์สามารถแบ่งได้ตามชนิดของโมโนเมอร์ ดังนี้

1.) โพลีเมอร์ประจุบวก (Cationic Polymer) มีประจุบวกบนส่วนของสารอินทรีย์ ระดับของประจุบวกขึ้นอยู่กับจำนวนไอออนของ Nitrogen groups มีประสิทธิภาพในการปรับสภาพตะกอนซึ่งมีประจุลบ ตัวอย่าง Cationic Polymer ได้แก่ Polydiallyldimethyl ammonium เป็นต้น

2.) โพลีเมอร์ประจุลบ (Anionic Polymer) มีประจุลบบนส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ จำนวนประจุลบขึ้นอยู่กับจำนวนกลุ่มของ acrylamide ที่ละลายอยู่ใน acrylic acid ตัวอย่าง Anionic Polymer ได้แก่ Polyacrylamide acid (PAA) hydrolyzed polyacrylamide (HPAM) และ polystyrene sulfate (PSS) สารรวมตะกอน Anionic Polymer มีประจุไฟฟ้าเป็นลบเมื่อละลายน้ำและทำให้เกิดกลุ่ม amide group (NH_2) หรือเกิดจากการรวมกลุ่มของ anionic monomer จนเป็น acrylamide polymer

3.) โพลีเมอร์ไม่มีประจุ (Nonionic Polymer) ไม่ละลายน้ำแต่มีประสิทธิภาพในการเชื่อมอนุภาคของตะกอนให้เกิดการรวมกลุ่มกันได้ดี ในทางปฏิบัติ nonionic polymer อาจเกิดจากการ

รวมกันของสารอนินทรีย์โพลิเมอร์ inorganic polymer และสารอินทรีย์โพลิเมอร์ (organic polymer) ซึ่งจะเพิ่มความแข็งแรงของฟล็ก

Kawamura (1976) รายงานว่าการนำโพลิเมอร์มาใช้เป็นสารสร้างตะกอนหรือสารช่วยสร้างตะกอนให้ตกตะกอนกันอย่างง่าย เนื่องจาก

- การใช้โพลิเมอร์จะช่วยลดปริมาตรตะกอนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการบำบัดได้
- ทำให้ได้ตะกอนที่มีขนาดเล็กและแน่น
- ตะกอนที่เกิดขึ้นจะมีน้ำเป็นองค์ประกอบน้อยเมื่อเทียบกับสารตกตะกอนที่เกิดจากการใช้สารส้มหรือเกลือของเหล็ก
- ทำให้เกิดกลุ่มตะกอนรวดเร็วกว่าการใช้สารส้มหรือเกลือของเหล็กเป็นสารสร้างตะกอน
- สะดวกในการใช้งาน
- ไม่มีความเป็นพิษและอันตรายต่อผู้ใช้
- โพลิเมอร์จะทำลายหรือลดสภาพความเป็นด่างน้อยกว่าการใช้สารส้มหรือเกลือของเหล็ก

เป็นสารสร้างตะกอน

- ทำให้สารเคมีบางชนิด เช่น ซัลเฟตตกค้างในน้ำในปริมาณที่น้อย

2.9 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการตกตะกอน

ในกระบวนการตกตะกอนจะดำเนินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการดังต่อไปนี้

- 1.) ชนิดของคอลลอยด์ในน้ำ ถ้าหากทราบชนิดของคอลลอยด์จะได้เลือกสารที่ช่วยในการตกตะกอนได้อย่างเหมาะสม
- 2.) ชนิดของสารที่ใช้ในการตกตะกอน สารเคมีแต่ละชนิดจะมีความเหมาะสมกับคอลลอยด์ต่างชนิดไม่เหมือนกัน จึงต้องมีการเลือกใช้งานให้เหมาะสมระหว่างชนิดของคอลลอยด์และสารที่ใช้ในการตกตะกอน
- 3.) พีเอชที่เหมาะสมกับการตกตะกอน สารที่ใช้ในการตกตะกอนแต่ละชนิดจะให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดพีเอชหนึ่งเท่านั้น
- 4.) ปริมาณของสารที่ช่วยให้ตกตะกอน มีความสำคัญเกี่ยวกับความสามารถในการตกตะกอน ปริมาณสารที่ช่วยในการตกตะกอนจะต้องเหมาะสมต่อการตกตะกอนในแต่ละครั้ง ถ้ามากเกินไปจะทำให้อนุภาคกลับมีเสถียรภาพใหม่ (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2526)
- 5.) เวลาและความแรงของการผสม การทำให้สารเคมีละลายน้ำอย่างทั่วถึงและเกิดการสร้างตะกอน ในทางตรงกันข้าม เมื่อต้องการให้เกิดการรวมตัวของตะกอน จำเป็นต้องให้การกวนอย่างช้าๆ เพื่อไม่ให้ตะกอนแตก (สุภฤกษ์ สิ้นสุวรรณ, 2528)

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.10.1 Aluminium chlorohydrate (ACH)

เกศรินทร์ วรเดชวิทยา (2552) ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและ สาทห่าย เซลล์เดียวในน้ำดิบจากคลองประปา โดยใช้สารสร้างตะกอน 3 ชนิด คือ โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (Modified Polyaluminium Chloride, PACI) และอะลูมิเนียมคลอโรไฮเดรต (Aluminum Chlorohydrate, ACH) และสารส้ม เป็นสารสร้างตะกอนในการผลิตน้ำประปา และใช้สารช่วยสร้างตะกอน คือ โพลีเมอร์ประจุลบ และโพลีเมอร์ประจุบวก ทำการทดลองด้วยวิธีการทดสอบ เพื่อหาค่า ปริมาณสร้างตะกอนและสารช่วยสร้างตะกอนที่เหมาะสม โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณสารสร้าง ตะกอนทั้ง 3 ชนิด รวมทั้งชนิดและปริมาณของสารช่วยสร้างตะกอน ผลการศึกษาพบว่าสารสร้าง ตะกอนทั้ง 3 ชนิดสามารถกำจัดความขุ่นน้ำดิบจากคลอง ประปาที่มีค่าความขุ่นต่ำ (น้อยกว่า 50 เอ็นทียู) ได้ตามมาตรฐานการผลิตน้ำประปา (ต่ำกว่า 5 เอ็นทียู) ซึ่งใช้ปริมาณสารส้มมากที่สุด รองลงมาคือ อะลูมิเนียมคลอโรไฮเดรต และโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ เท่ากับ 25.0 1.6 และ 1.0 มก./ล. มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นร้อยละ 88.54 88.61 และ 88.90 ตามลำดับ มีค่าใช้จ่ายด้าน สารเคมีเท่ากับ 0.100 0.032 และ 0.014 บาทต่อน้ำดิบ 1 ลบ.ม. และพบว่าโพลีเมอร์สามารถช่วยลด ปริมาณการใช้สารสร้างตะกอนทั้ง 3 ชนิดลงได้ และยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น สำหรับผลการทดลองเปรียบเทียบสารสร้างตะกอนในการตกตะกอนสาหร่ายในน้ำดิบ พบว่า อะลูมิเนียมคลอโรไฮเดรตสามารถกำจัดสาหร่ายได้ดีที่สุด รองลงมาคือสารส้ม และโพลีอะลูมิเนียม คลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 2.2 30.0 และ 1.6 มก./ล. ตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพในการ กำจัดสาหร่ายร้อยละ 77.94 68.18 และ 66.82 ตามลำดับ มีค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีเท่ากับ 0.044 0.120 และ 0.022 บาทต่อน้ำดิบ 1 ลบ.ม.

สาวิตรี ตาสุดิน (2552) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นจากน้ำ สังกะหร่ายและน้ำดิบจากคลองประปาโดยใช้สารอะลูมิเนียมคลอโรไฮเดรต (Aluminum Chlorohydrate; ACH) เป็นสารตกตะกอนในการผลิตน้ำประปาด้วยวิธีการทดสอบ โดยทดลองหาค่า เกรเดียนต์ความเร็วของการกวนที่เหมาะสม ปรับเปลี่ยนพีเอชเริ่มต้น ปริมาณอะลูมิเนียมคลอโรไฮ เดรต รวมทั้งชนิดและปริมาณของสารช่วยตกตะกอน จากการศึกษาพบว่าค่าเกรเดียนต์ความเร็ว ของการกวนที่เหมาะสม คือ ค่าเกรเดียนต์ความเร็วของการกวนเร็วที่ 469 วินาที⁻¹ เป็นเวลา 1 นาที ค่าเกรเดียนต์ของกวนช้าที่ 112 วินาที⁻¹ เป็นเวลา 15 นาที และทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที การใช้อะลูมิเนียมคลอโรไฮเดรตเป็นสารตกตะกอนเพียงอย่างเดียวก็สามารถกำจัดความขุ่นจากน้ำ จากคลองประปาที่ความขุ่นเริ่มต้น 26.6 และ 86.65 เอ็นทียู ให้ได้ตามมาตรฐานน้ำประปา (ต่ำกว่า 5 เอ็นทียู) ที่ความเข้มข้นเพียง 2 และ 4 มก./ล. ให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นร้อยละ 85.51 -

94.73 ตามลำดับ โดยไม่ต้องปรับพีเอชของน้ำและไม่ต้องใช้โพลิเมอร์ร่วมด้วย และตะกอนหนักที่เกิดขึ้นมีปริมาณต่ำมากเพียง 0.1 และ 3.5 มล./ล. เมื่อนำน้ำใสส่วนบนไปวิเคราะห์หาอะลูมิเนียมในน้ำพบว่ามีความต่ำกว่ามาตรฐานน้ำดื่มเท่ากับ 10 และ 20 ไมโครกรัม/ล. และมีค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี 0.06 และ 0.12 บาทต่อน้ำดิบ 1 ลบ.ม. ผลการทดลองเปรียบเทียบสารตกตะกอนชนิดต่างๆ ได้แก่ สารส้ม อะลูมิเนียมคลอไรด์ไฮดรอกไซด์ และ โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์แบบปรับแต่ง (modified PACl) เป็นสารตกตะกอนที่ความขุ่นน้ำดิบจากคลองประปา 65.5 - 86.8 เอ็นทียู พบว่าสารตกตะกอนทั้ง 3 ชนิดสามารถกำจัดความขุ่นได้ตามมาตรฐานน้ำประปา ซึ่งปริมาณการใช้สารส้มมากที่สุด รองลงมาคือ อะลูมิเนียมคลอไรด์ไฮดรอกไซด์ และ โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์แบบปรับแต่ง ที่ 35, 4 และ 1.4 มก./ล. ให้ประสิทธิภาพการกำจัดขุ่น ร้อยละ 94.05, 94.73 และ 93.66 ตามลำดับ ข้อดีของการใช้อะลูมิเนียมคลอไรด์ไฮดรอกไซด์และโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์แบบปรับแต่ง คือน้ำหลังตกตะกอนมีโลหะอะลูมิเนียมเหลือต่ำมากเท่ากับ 0.02 และ 0.055 มก./ล. ตามลำดับ ส่วนสารส้มพบว่ามีอะลูมิเนียมในน้ำสูงถึง 0.115 มก./ล.

Bachand และคณะ (2006) ศึกษาการบำบัดความขุ่นและฟอสฟอรัสในน้ำจากทะเลสาบ Tahoe ช่วงฤดูฝนความขุ่นประมาณ 65-90 NTU โดยใช้ ACH เป็นสารตกตะกอน ทำการกวนเร็วที่ 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที กวนช้าที่ 30 รอบต่อนาที เป็นเวลา 4 นาที และทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที พบว่า ที่ความเข้มข้น 3.8 mgAl³⁺/L สามารถลดความขุ่นเหลือ 2.36 NTU และสามารถกำจัดฟอสฟอรัสเหลือ 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร

Lindqvist และคณะ (2002) ศึกษาการกำจัด natural organic matter จากทะเลสาบ Roine ประเทศฟินแลนด์โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารโคแอกกูแลนต์ 4 ชนิด ได้แก่ สารส้ม อะลูมิเนียมคลอไรด์ไฮดรอกไซด์ เฟอริกคลอไรด์ และเฟอริกซัลเฟต และสารช่วยตกตะกอน (Polymeric Flocculant Aids) พบว่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำของ ACH อยู่ในช่วง 6.6 - 6.8 ปริมาณที่เหมาะสมของ mg ACH/mg ของสารอินทรีย์ละลายน้ำเท่ากับ 1.3 mg Al/mg ของสารอินทรีย์ละลายน้ำ และเมื่อใช้ Polyacrylamide ร่วมกับ ACH สามารถกำจัดความขุ่นได้ดีที่สุด

Tran และคณะ (2006) ศึกษาการกำจัด natural organic matter จากแม่น้ำ Ouyen และ แม่น้ำ Meredith ประเทศออสเตรเลียโดยวิธีจาร์เทสต์ ใช้ ACH เป็นสารตกตะกอน กวนเร็วที่ความเร็ว 130 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที กวนช้าที่ความเร็ว 50 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาทีและทิ้งให้ตกตะกอน 60 นาที พบว่า ACH ที่ความเข้มข้น 322 µmol/L สามารถกำจัดความขุ่นของแม่น้ำ

Ouyen ได้ 87-93 % และที่ความเข้มข้น 351 $\mu\text{mol/L}$ สามารถกำจัดความขุ่นของแม่น้ำ Meredith ได้ 85-89 %

2.10.2 PACI

วาริท เจาะจิตต์ (2541) ศึกษาการใช้โพลีลูมิเนียมคลอไรด์ เพอร์ริกคลอไรด์และเบนโทไนท์ ในการกำจัดสีในน้ำทิ้งจากโรงงานสิ่งทอด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมีและวิเคราะห์ค่าซีโอดี ความขุ่นร่วมด้วย โดยศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีในรูปของการลดการดูดกลืนแสงและศึกษาเพิ่มเติมการใช้สาร โพลีเมอร์ประจุบวก คือ Zetang-63 เป็นสารช่วยสร้างตะกอนร่วมกับสารสร้างตะกอน พบว่า สารสร้างตะกอนที่เหมาะสมที่สุดจะใช้ในการกำจัดสีจากโรงงานสิ่งทอ คือ เพอร์ริกคลอไรด์ กำจัดสีได้เฉลี่ย 70.88% กำจัดความขุ่นได้เฉลี่ย 89.62% กำจัดซีโอดีได้เฉลี่ย 36.74% ช่วงปริมาณของเพอร์ริกคลอไรด์ที่เหมาะสมคือ 750-1000 มก./ล. ช่วงพีเอชที่เหมาะสมคือ 8.5-9 ค่าใช้จ่ายของสารเคมีอยู่ในช่วง 8.25-14.75 บาท/ลบ.ม. สำหรับการใส่สารโพลีเมอร์ช่วยในการตกตะกอนพบว่าไม่มีความจำเป็น เพราะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสีได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ชนิษฐา เจริญลาภ (2545) ศึกษาการกำจัดสีดิสเพิร์ส สีไคเร็กซ์ และสีรีแอคทีฟ จากน้ำย้อมผ้าโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี ซึ่งใช้สารตกตะกอน 5 ชนิด คือ อะลูมิเนียมซัลเฟต โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ เพอร์ริกซัลเฟต และเพอร์รัสซัลเฟต พบว่าสีไคเร็กซ์ สารตกตะกอนทั้ง 5 ชนิด มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน โดยสีไคเร็กซ์ตกตะกอนได้เกือบ 100% ส่วนสีดิสเพิร์ส พบว่าโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์มีประสิทธิภาพสูงสุดในการตกตะกอนสี คือ 97% และเพอร์รัสซัลเฟตมีประสิทธิภาพต่ำสุด คือ ประมาณ 41% สำหรับสีรีแอคทีฟ พบว่าสารตกตะกอนทั้ง 5 ชนิดนี้ไม่สามารถตกตะกอนสีรีแอคทีฟได้เลย ต้องอาศัยสารช่วยในการตกตะกอน

โอภาส (2546) ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยกระบวนการตกตะกอน โดยใช้สารเคมี 3 ชนิด คือ สารส้ม ปูนขาว และโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ พบว่า สารสร้างตะกอนทั้ง 3 ชนิด สามารถบำบัดน้ำเสียชุมชนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีปริมาณที่เหมาะสม คือ 280, 1,100 และ 100 มก./ล. ตามลำดับ พีเอชที่เหมาะสมของสารส้มและโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ไม่จำเป็นต้องปรับพีเอชก่อนการบำบัด แต่ปูนขาวจำเป็นต้องปรับพีเอชของน้ำเสียก่อนการบำบัด เมื่อเปรียบเทียบสารสร้างตะกอนทั้งสามชนิดพบว่า โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์มีความเหมาะสมจะใช้เป็นสารสร้างตะกอนมากที่สุด โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นได้ร้อยละ 99.54 บำบัดบีโอดีได้ร้อยละ 88.21 บำบัด

ซีโอดีได้อ้อยละ 87.63 บำบัดสารแขวนลอยได้อ้อยละ 91.60 บำบัดที่เคเอ็นได้อ้อยละ 24.92 บำบัดฟอสเฟตทั้งหมดได้อ้อยละ 94.14 ค่าใช้จ่ายของสารเคมีในการบำบัดคือ 10.24 บาท/ลบ.ม.

2.10.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดสีข้อมโดยวิธีอื่น

ปิ่นสยาม ภูมิพาณิชย์ (2546) การวิจัยครั้งนี้มุ่งศึกษาการบำบัดสีข้อมรีแอกทีฟด้วยวิธีตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมี โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปริมาณอ็อกซิเจนของเหล็กที่ละลายจากขั้วแอโนดและความนำไฟฟ้าที่มีผลต่อการบำบัดสีข้อมรีแอกทีฟในน้ำเสียซึ่งสังเคราะห์ขึ้นจากสีข้อมรีแอกทีฟ 4 โทนสี ได้แก่ สีดำ สีน้ำเงิน สีแดงและสีเหลือง การทดลองทำในถังปฏิกรณ์แบบเท ซึ่งภายในบรรจุขั้วไฟฟ้าไบโพลาร์ที่ทำจากแผ่นเหล็กต่อกันแบบอนุกรม โดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5 แอมแปร์ 50 โวลต์ การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ช่วง โดยช่วงแรกทำการศึกษาและเปรียบเทียบผลของปริมาณอ็อกซิเจนของเหล็กที่ละลายจากขั้วแอโนดต่อการบำบัดสีข้อมรีแอกทีฟ โทนสีต่างๆ ที่พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 5 7 9 และ 11 ช่วงที่สองทำการศึกษาและเปรียบเทียบผลของความนำไฟฟ้า ต่อการบำบัดสีข้อมรีแอกทีฟ โทนสีต่างๆ ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 5 10 15 20 และ 30 กรัมต่อลิตร จากการศึกษาพบว่าปริมาณอ็อกซิเจนของเหล็กที่เหมาะสมในการบำบัดสีดำ สีน้ำเงิน สีแดง และสีเหลือง เมื่อใช้ความเข้มข้นสี 250 มิลลิกรัมต่อลิตร อยู่ในช่วง 120-187 177-186 95 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีโดยเฉลี่ยร้อยละ 92 97.5 89.5 และ 87.5 ตามลำดับ ค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 7-9 และใช้เวลาในการบำบัดโดยประมาณ 3-4 ชั่วโมง ในทุกโทนสี ความนำไฟฟ้าที่เหมาะสมในการบำบัดสีคือ 8.56 9.36 24.20 และ 24.60 มิลลิซีเมนต่อเซนติเมตร สำหรับสีดำ สีน้ำเงิน สีแดงและสีเหลืองตามลำดับ หรือที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 5 กรัมต่อลิตร สำหรับสีดำและสีน้ำเงินและ 15 กรัมต่อลิตร สำหรับสีแดงและสีเหลือง ปริมาณอ็อกซิเจนของเหล็กที่ผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด โดยจะแปรผันตามกัน โดยการเพิ่มความนำไฟฟ้าให้แก่ น้ำเสียส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการบำบัดสั้นลง โดยใช้เวลารวมไม่เกิน 1 ชั่วโมง

ทิตยา (2549) ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียคลองแสนแสบด้วยวิธีการรวมกลุ่มตะกอน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย ด้วยสารสร้างตะกอน ได้แก่ สารส้ม ไคโตซาน เฟอร์ริคคลอไรด์และโพอลิเอคโตรไลต์ พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยสารส้ม คือ ที่ความเข้มข้น 500 มก./ล. พีเอช 8 บำบัดซีโอดี สี และความขุ่นได้อ้อยละ 88.89, 85.60 และ 86.23 ตามลำดับ การบำบัดด้วยเฟอร์ริคคลอไรด์มีสภาวะที่เหมาะสมคือ ที่ความเข้มข้น 500 มก./ล. พีเอช 10 สามารถบำบัดซีดี สี และความขุ่นได้อ้อยละ 100, 84.23 และ 60.29 ตามลำดับ การ

บำบัดด้วยโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่มีสถานะที่เหมาะสมคือ ที่ความเข้มข้น 0.7 มก./ล. พีเอช 6 สามารถบำบัดซีโอดี สี และความขุ่นได้ร้อยละ 52.78, 50.72 และ 77.09 ตามลำดับ ส่วนการบำบัดด้วยโคโคซานไม่สามารถบำบัดซีโอดีได้ สถานะที่เหมาะสมในการบำบัดสีและความขุ่น คือ ที่ความเข้มข้น 80 มก./ล. พีเอช 6 สามารถบำบัดสีและความขุ่นได้ร้อยละ 59.10 และ 69.13 ตามลำดับ สารเคมีที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการทดลองครั้งนี้คือ สารส้ม เพอร์คลอไรด์ และโพลีอิเล็กโทรไลต์ ตามลำดับ

สิรินันท์ กัณสิริ (2550) ศึกษาการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน พบว่าปริมาณซีโอไลต์สังเคราะห์ที่เหมาะสมในการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม คือ 20 กรัม พีเอชน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมเท่ากับ 7 ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมคือ 120 นาที นำไปทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวสามารถอธิบายได้โดย ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช ซึ่งสมการไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิชของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้คือ $x/m = 5.27 \times 10^{-23} Ce^{10.705}$ พบว่า ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ด้วยถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline 1 กรัม สามารถดูดติดผิวสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดซีโอดีสูงสุดเท่ากับ 24.71 มิลลิกรัม

Luangdilok และ Panswad (2000) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการลดสี ภายใต้สรีแอกทีฟที่มีโครงสร้างทางเคมีที่ต่างกัน ด้วยแบบจำลองขนาดโต๊ะทดลองระบบเอสปีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิกที่มีเวลารู้อัจกรเท่ากับ 24 ชั่วโมง โดยมีเวลา แอนแอโรบิก + แอโรบิก เท่ากับ 18+5 ชั่วโมง และมีอายุสัปดาห์เท่ากับ 8 วัน การศึกษานี้ใช้น้ำเสียสีสังเคราะห์ที่มีซีโอดีเท่ากับ 1,000 มก./ลิตร และสีที่ใช้ในการทดลองนี้ใช้สรีแอกทีฟที่มีโครงสร้างต่างๆ ดังนี้

- สี (1) C.I.Reactive Black 5 มีโครงสร้าง Diazo Vinyl Sulphonyl
- สี (2) C.I.Reactive Blue R มีโครงสร้าง Anthraquinone Visul Sulphonyl
- สี (3) C.I.Reactive Blue CR มีโครงสร้าง Anthraquinone Monochlorotrizinyl
- สี (4) C.I.Reactive Blue H-EGN มีโครงสร้าง Oxazine

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาประสิทธิภาพการลดสีเมื่อความเข้มข้นต่างกันในแต่ละโครงสร้างสี โดยใช้ความเข้มข้นที่ 20 และ 100 มก./ล. และสามารถสรุปได้ดังนี้

- เมื่อความเข้มข้นของสี (1) ต่างกันจะเห็นว่าประสิทธิภาพของการลดสีในหน่วย SU มีความแตกต่างกันไม่มากนัก ส่วนในหน่วยของ ADMI จะมีความแตกต่างกันมาก ทั้งนี้เป็นเพราะหน่วย ADMI เป็นการวัดสีที่คิดขึ้นมาเพื่อใช้เปรียบเทียบค่าของสีที่มีปริมาณน้อยๆ (ประมาณ 300-500 ADMI) ดังนั้นเมื่อใช้หน่วยนี้วัดสีที่เข้มข้นมากอาจทำให้ได้ค่าวัดสีที่คลาดเคลื่อนได้ ส่วนสีที่มีโครงสร้างเอนทราควิโนนทั้งสองชนิด สี (2) และสี (3) เมื่อมีความเข้มข้นสูงทำให้ประสิทธิภาพ

ลดลงอย่างเห็นได้ชัด สำหรับสีที่มีโครงสร้าง Oxazine สี (4) พบว่าสีที่ปรากฏและเห็นด้วยตาในถังปฏิบัติการช่วงแอนแอโรบิกมีการลดของสีจนแทบจะไม่มีสี แต่เมื่อเติมน้ำเพื่อนำไปวิเคราะห์กลับปรากฏว่ามีสีเข้มขึ้นมามากซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ไม่สามารถหาสาเหตุได้

- ผู้วิจัยกล่าวว่าจากการสังเกตกราฟแอบซอร์เบ้นซ์ที่เกิดขึ้นจากการสแกนความเข้มสีด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่มีความยาวคลื่นในช่วง 400-700 นาโนเมตร การลดของสี (1) จะมีการเปลี่ยนความยาวคลื่นเด่น (dominant wavelength) และมีการลดของค่าแอบซอร์เบ้นซ์ด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการลดสีของสีอะโซจะเกิดจากการเปลี่ยนโครงสร้างสี ส่วนสีที่มีโครงสร้างแอนทราควิโนนทั้งสองนั้นเมื่อมีการลดสีจะไม่มีการเปลี่ยนความยาวคลื่นเด่น แต่มีค่าแอบซอร์เบ้นซ์ลดลง แสดงว่ามีการลดสีแต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างสี ซึ่งอาจกล่าวได้ว่ากลไกการลดสีของสีแอนทราควิโนนน่าจะเกิดจากการดูดซับไวบนฟล็อก ดังนั้นเมื่อความเข้มสีเพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการลดสีต่ำลงเพราะการจำกัดของการดูดซับสีของฟล็อก สำหรับสีออกซาซินยังไม่สามารถสรุปกลไกหลักในการลดสีได้

- ผู้วิจัยติดตามการเปลี่ยนแปลงของสี (1) ด้วยเทคนิคทาง High Performance Liquid Chromatography (HPLC) โดยสรุปว่าสีเปลี่ยนโครงสร้างในกระบวนการแอนแอโรบิก ซึ่งทำให้เกิดการลดสี

Kim และคณะ (2004) ศึกษาการกำจัดสีย้อมดิสเพอร์สและสีย้อมรีแอกทีฟโดยใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ (Decolorization of disperse and reactive dye solutions using ferric chloride) งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการกำจัดสีย้อมดิสเพอร์สและสีย้อมรีแอกทีฟโดยใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ ซึ่งผลการทดลองสรุปได้ดังตารางที่ 3.6 ทั้งนี้ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าเฟอร์ริกคลอไรด์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟค่อนข้างดี และมีความสามารถในการกำจัดสีย้อมดิสเพอร์สดีมาก

Kumar และคณะ (2007) ศึกษากระบวนการกำจัดสีและลดซีโอดีในน้ำเสียฟอกย้อมจากโรงงานทอผ้าฝ้ายโดยใช้กระบวนการสลายตัวด้วยความร้อนและการตกตะกอน พบว่าสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมคือ สารส้มและใช้ copper sulphate เป็นตัวกระตุ้นในปฏิบัติการใช้ความร้อนสามารถกำจัดสีได้เฉลี่ย 94.4% กำจัดซีโอดีได้เฉลี่ย 89.91% ปริมาณของสารส้มที่เหมาะสมคือ 2 กก./ลบ.ม. ช่วงพีเอชที่เหมาะสมคือ 4

ตารางที่ 3.6 ความเข้มข้นของเฟอร์ริกคลอไรด์ที่ใช้ในการกำจัดสีและซีไอดี

ผู้วิจัย	ความเข้มข้นของ เฟอร์ริกคลอไรด์ (mM)	TCOD			SCOD			สี		
		น้ำเสีย (mg/l)	น้ำทิ้ง (mg/l)	%การ กำจัด	น้ำเสีย (mg/l)	น้ำทิ้ง (mg/l)	%การ กำจัด	น้ำเสีย (ADMI)	น้ำทิ้ง (ADMI)	%การ กำจัด
Kim และคณะ (2004) -Disperse dye										
-D.B. 106	0.93	685	121	82.3	542	114	79.0	500	11.14	97.7
- D.Y. 54	0.74	864	104	88.0	443	90	79.7	500	2.21	99.6
- Reactive dye - R.B. 49	2.78	336	274	26.5	333	229	31.2	500	195.57	60.9
- R.Y. 84	1.85	245	82	66.5	237	77	67.5	500	143.56	71.3

Wang และคณะ (2006) ศึกษาการใช้วิธีทางกายภาพและทางเคมีในการฟื้นฟูสภาพซีไอไลต์เพื่อนำไปใช้ในการกำจัดสีย้อมในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย พบว่า ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 2.7×10^{-5} โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส MCM-22 มีสมมูลของการดูดซับเท่ากับ 1.7×10^{-4} โมลต่อกรัม การฟื้นฟูสภาพ MCM-22 โดยเผาที่อุณหภูมิสูงจะให้ตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพดีกว่าการฟื้นฟูโดยวิธี Fenton oxidation อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการเผา คือ เผาที่อุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง MCM-22 ที่ฟื้นฟูสภาพมีความสามารถในการดูดซับมากกว่า 88 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่วิธี Fenton oxidation ความสามารถในการดูดซับ 60 เปอร์เซ็นต์

Frijters และคณะ (2006) ศึกษาการกำจัดสีและความเป็นพิษของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอที่มีการปนเปื้อนของสีย้อมที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ โดยใช้ระบบแอนแอโรบิกควบคู่กับแอโรบิก (Decolorizing and detoxifying textile wastewater containing both soluble and insoluble dyes, in a full scale combined anaerobic/aerobic system)

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของระบบ sequential anaerobic/aerobic ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยระบบ sequential anaerobic/aerobic ประกอบด้วยถึงปฏิกิริยาแบบฟลูอิดไคซ์เบดที่เดินระบบแบบแอนแอโรบิก ขนาด 70 ลูกบาศก์เมตร และถึงเติมอากาศที่มีการติดตั้งแผ่นเอียงขนาด 450 ลูกบาศก์เมตร โดยน้ำที่ส่งเข้าสู่ถึงปฏิกิริยาแบบฟลูอิดไคซ์เบดจะต้องปรับค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 6.9 ถึง 7.4 และควบคุมอุณหภูมิของระบบให้อยู่ที่

35-40 องศาเซลเซียส ส่วนในระบบแอโรบิกจะควบคุมเวลากักน้ำที่ 43 ชั่วโมง และอายุตะกอนที่ 12 วัน โดยมีการเติมอากาศที่ผิวน้ำที่อัตรา 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจากผลการวิจัยนี้พบว่า ระบบแอนแอโรบิกมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีอยู่ในช่วงร้อยละ 80-95 และระบบแอโรบิกแทบจะไม่มีนัยสำคัญสำหรับการกำจัดสี แต่เป็นที่น่าสนใจว่าสีประเภทสีย้อมแวท แอนทราควิโนน และอินดิโก จะถูกกำจัดโดยระบบแอโรบิกเป็นหลัก ทั้งนี้การทดลองนี้ยังแสดงให้เห็นว่าระบบ sequential anaerobic/aerobic สามารถกำจัดสีย้อมได้ทั้งชนิดที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ นอกจากนี้ระบบ sequential anaerobic/aerobic ยังสามารถกำจัดความเป็นพิษได้อย่างสมบูรณ์ด้วยเมื่อวัดความเป็นพิษตามวิธี Microtox™® ซึ่งในการทดลองนี้เมื่อวัดค่าความเป็นพิษของน้ำที่ออกจากระบบแอนแอโรบิกพบว่ายังมีความเป็นพิษสูง แต่เมื่อวัดค่าความเป็นพิษของน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ผ่านทั้งระบบแอนแอโรบิกและแอโรบิกจะไม่พบความเป็นพิษ อย่างไรก็ตาม เมื่อทดลองโดยให้น้ำผ่านการบำบัดโดยระบบแอโรบิกเพียงอย่างเดียวก็พบว่ายังมีความเป็นพิษอยู่ ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าการกำจัดความเป็นพิษจะต้องมีการบำบัดทั้งแบบแอนแอโรบิกและแอโรบิกจึงจะสามารถกำจัดความเป็นพิษได้

Phisit และคณะ (2007) ศึกษาความสามารถในการกำจัดสีย้อมเอโซโดยใช้ *Lactobacillus casei* สายพันธุ์ TISTR 1500 และปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการกำจัดสี (Metabolism of azo dyes by *Lactobacillus casei* TISTR 1500 and effects of various factors on decolorization)

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการกำจัดสีย้อมประเภทเอโซ (Methyl Orange) ด้วย *Lactobacillus casei* สายพันธุ์ TISTR 1500 โดยนำเชื้อจุลินทรีย์มาจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานนมและโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า *Lactobacillus casei* สายพันธุ์ TISTR 1500 จะเจริญเติบโตได้ดีภายใต้สภาวะ Microaerophilic ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และในการกำจัดสีนี้ *Lactobacillus casei* สายพันธุ์ TISTR 1500 จะเปลี่ยน sulfonated azo dye (Methyl Orange) เป็นผลิตภัณฑ์ 2 ชนิด คือ N,N-dimethyl-p-phenylenediamine และ 4-aminobenzenesulfonic acid ซึ่งทำให้พันธะของสีย้อมเอโซแตกออกจากกัน นอกจากนี้ค่าพีเอชก็เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการกำจัดสี โดยในการทดลองนี้พบว่าที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6 จะทำให้เกิดประสิทธิภาพการกำจัดสีไฮดรอกซีไอดีสูงสุด (มากกว่าร้อยละ 90) อีกทั้งในกระบวนการกำจัดสีนี้ต้องการคาร์บอน (ซูโครส) เป็นแหล่งพลังงานด้วย การเติมสารให้อิเล็กตรอนในระบบสามารถช่วยให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ลักษณะการสลายตัวของสีย้อมเป็นการสลายโครงสร้างสีทำให้การแสดงสีลดลงไม่ใช่ว่าเปลี่ยนเป็นสีอื่นแล้วเห็นว่าสีเดิมหายไป เห็นได้จากการดูคลิ่นคลิ่นแสงลดลงทุกความยาวคลื่น คาดว่าสีเอโซทำหน้าที่เป็นสารรับอิเล็กตรอนแล้วเกิดการสลายโครโมฟอร์ที่เป็นส่วนแสดงสี และสารให้อิเล็กตรอนกับสีย้อมโมเลกุลอื่นทำให้มีการกำจัดสีได้