

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความรู้เกี่ยวกับอุตสาหกรรมฟอกย้อม

ในอุตสาหกรรมสิ่งทอประกอบด้วยกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันหลายขั้นตอนทั้งทางกายภาพและทางเคมี ซึ่งลักษณะเฉพาะของแต่ละกระบวนการจะขึ้นอยู่กับวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ที่ได้ ซึ่งอุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมสิ่งทอที่ช่วยเพิ่มมูลค่าและความสวยงามให้แก่ผลิตภัณฑ์ กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อม ส่วนใหญ่เป็นกระบวนการทางเคมีที่อาศัยการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของเส้นใย โดยการใช้สารเคมี สีย้อมที่เหมาะสม และโดยอาศัยน้ำเป็นตัวกลาง อุตสาหกรรมฟอกย้อมจึงเป็นอุตสาหกรรมที่มีความต้องการใช้น้ำมาก ขั้นตอนการผลิตในอุตสาหกรรม ประกอบด้วยกระบวนการหลักที่สำคัญ 3 กระบวนการ คือ

2.1.1 การเตรียมสิ่งทอเพื่อการพิมพ์ย้อม โดยกระบวนการที่สำคัญในการเตรียมได้แก่

1) การเผาขน (Singing) เป็นการทำให้ผ้ามีผิวเรียบ เนื่องจากในกระบวนการทอเป็นผืนผ้าบางครั้งทำให้ปลายเส้นใยโผล่ขึ้นมาเหนือผิวมากขึ้น ปลายที่โผล่มานี้มีผลทำให้ผิวผ้าดูไม่เรียบ กรรมวิธีการเผาขนโดยทั่วไปประกอบด้วยการผ่านผ้าไปในเปลวก๊าซ หรือบนแผ่นโลหะที่ถูกเผาจนร้อนในอัตราความเร็วที่สูงพอที่ผ้าจะไม่ติดไฟ แต่ในขณะที่เดียวกันก็ฆ่าพอที่ปลายเส้นใยที่โผล่ขึ้นมาเหนือผิวจะถูกเผาทำลายไป

2) การลอกแป้ง (Desizing) แป้งที่ติดอยู่บนเนื้อผ้ามาจากการลงแป้งบนด้ายในกระบวนการทอผ้า ทำให้ด้ายแข็งตัวพอที่จะทนทานต่อการเสียดสีของเครื่องทอ เมื่อทอเป็นผ้าแล้วก่อนนำไปย้อมต้องนำไปลอกแป้งออกให้หมดเสียก่อน เพื่อให้ผ้าสามารถมีการย้อมติดสีดีและสม่ำเสมอ เนื่องจากแป้งจะมีผลกระทบต่อสมบัติในการดูดซึมน้ำและสารเคมีของเส้นใย

สารที่ใช้ในการลอกแบ่งที่สำคัญมี 2 ชนิด คือ เอนไซม์อะมิเลส และสารออกซิไดซิง เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น

3) การกำจัดสิ่งสกปรก (Scouring) เป็นขั้นตอนที่จำเป็นสำหรับสิ่งทอทุกประเภท เนื่องจากเส้นใยทุกชนิดมักจะต้องมีสิ่งสกปรกเจือปนติดมาด้วยเสมอ ไม่ว่าจะเป็นสิ่งที่ติดมาตามธรรมชาติ หรือที่ติดมาในขั้นตอนการปั่นทอ เช่น คราบน้ำมัน ขี้ดิน ขี้ผึ้ง กาว ฯลฯ ดังนั้นจึงต้องกำจัดสิ่งสกปรกเหล่านี้ให้หมดไปจากเส้นใยเพื่อให้เส้นใยมีการดูดซึมน้ำได้ดี และสามารถดูดติดสีและสารเคมีได้สม่ำเสมอ กรรมวิธีการกำจัดสิ่งสกปรกของเส้นใยแต่ละชนิดมีวิธีการที่ไม่เหมือนกัน ขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของสิ่งสกปรกในเส้นใยแต่ละชนิด

4) การฟอกขาว (Bleaching) เป็นการกำจัดสีที่มีอยู่ตามธรรมชาติในเส้นใย เช่น ฝ้ายเมื่อปั่นเป็นเส้นด้ายจะมีสีออกเหลือง การฟอกขาวจะทำให้เส้นใยมีความขาวขึ้น และสำหรับผ้าที่จะถูกนำไปย้อมสีอ่อน การฟอกขาวจะทำให้ได้สีที่สดใสและไม่ผิดไปจากสีที่ต้องการ กรรมวิธีฟอกขาวส่วนมากกระทำโดยใช้สารออกซิไดซิง ซึ่งมีให้เลือกใช้หลายชนิด แต่ที่ใช้กันมากที่สุดมีด้วยกัน 3 ชนิด คือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สารละลายเจือจางของโซเดียมไฮโปคลอไรต์ และโซเดียมคลอไรต์

5) การชุบมัน (Mercerization) เพื่อเพิ่มความมันของวัสดุสิ่งทอ และทำให้วัสดุสิ่งทอดูดซึมน้ำได้ดีมากขึ้นและได้สีที่สว่างสดใส กระบวนการชุบมันทำโดยนำผ้าไปผ่านสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น (ร้อยละ 15-30) ที่อุณหภูมิ 15-20 องศาเซลเซียส ประมาณ 30-60 นาที

2.1.2 การให้สี เป็นกระบวนการที่ทำให้เส้นด้ายหรือผ้ามีสีตามที่ต้องการ เพื่อนำไปใช้ทำผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับผ้า การใช้สีประเภทใดขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้และชนิดของเส้นใย กรรมวิธีการให้สีที่สำคัญมีอยู่ 2 วิธี คือ กระบวนการย้อม สีที่ใช้ย้อมได้แก่ สีแอซิด สีไดเรกต์ สีรีแอกทีฟ เป็นต้น และกระบวนการพิมพ์ซึ่งใช้สีพิกเมนต์

2.1.3 การตกแต่งสำเร็จ เป็นขั้นตอนการปรับปรุงหรือปรับเปลี่ยนคุณสมบัติสิ่งทอให้มีความเหมาะสมในการใช้งาน หรือสวยงาม หรือความนุ่มนวลมากยิ่งขึ้น เช่น การขัดมัน การตะกุดขน การทันทานต่อการยับ การตกแต่งไม่จับฝุ่น เป็นต้น

## 2.2 สีย้อมและการจำแนกสีย้อม

สีย้อมเป็นสารเคมีที่สกัดจากน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหิน เมื่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหินผ่านการสกัด จะได้สารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว เช่น เบนซิน ไซลีน แอนทราซีน โทลูอิน แนพทาซีน และพาราฟิน ซึ่งสารเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่าง ๆ (ธงชัย, 2527) ซึ่งสีย้อมที่ผลิตขึ้นมา มีหลายชนิด ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับเส้นใย และกระบวนการย้อมที่มีลักษณะแตกต่างกันไป

การที่จะนำสีย้อมใด ๆ มาย้อมให้ได้ผลดีนั้นขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใยซึ่งต้องมีอำนาจมากกว่าน้ำ เราจะสามารถทำให้เกิดสภาวะเช่นนี้ขึ้นได้เมื่อโมเลกุลของสีย้อมมีหมู่อะตอมซึ่งถูกจัดให้เรียงตัวกันในลักษณะที่จะทำให้เกิดการดูดติดเส้นใยได้เอง (substantivity) แล้วเกิดพันธะ (bond) ยึดติดแน่น อาจกล่าวได้อย่างกว้าง ๆ ว่าอิทธิพลเชิงเคมี 4 ชนิดที่ทำให้สีดูดติดเส้นใย คือ

- 1) พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond)
- 2) แรงแวนเดอวาลส์ (Van der Waals' force)
- 3) แรงไอออน (Ionic Force)
- 4) พันธะโควาเลนต์ (covalent bond)

กำลังแรงเหล่านี้มักไม่ทำหน้าที่เพียงลำพัง การดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับโมเลกุลของเส้นใยอย่างน้อยต้องประกอบไปด้วย 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งอาจเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน สำหรับแรงยึดติดทางเคมีที่จะให้การยึดติดที่ดีที่สุด ได้แก่ พันธะโควาเลนต์



## 2.2.1 การเกิดของสีย้อม

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

-กลุ่มไนโตรโซ (nitroso group) :  $-\text{NO}$  (or  $=\text{N}-\text{OH}$ )

-กลุ่มไนโตร (nitro group) :  $-\text{NO}_2$  (or  $=\text{NO}.\text{OH}$ )

-กลุ่มอะโซ (azo group) :  $-\text{N}=\text{N}-$

-กลุ่มเอทิลีน (ethylene group) :  $\text{>C}=\text{C}<$

-กลุ่มคาร์บอนิล (carbonyl group) :  $\text{>C}=\text{O}$

-กลุ่มคาร์บอนิล-ไนโตรเจน (carbonyl-nitrogen group) :  $\text{>C}=\text{NH}$  and  $-\text{CH}=\text{N}-$

-กลุ่มซัลเฟอร์ (sulphur group) :  $\text{>C}=\text{S}$  and  $\text{>C}-\text{S}-\text{S}-\text{C}<$

กลุ่มอะตอมต่าง ๆ เหล่านี้จะเป็นตัวเพิ่มสีให้แก่สารประกอบอะโรมาติก โดยการดูดกลืนแถบสีขาวยุ่บางแถบแสงและปล่อยออกมาบางแถบแสง ทำให้มนุษย์มองเห็นสีย้อมโทนสีแตกต่างกันไป

สีย้อมโดยทั่วไปนอกจากจะต้องมีกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์แล้ว ยังจำเป็นต้องมีกลุ่มอะตอมอีกชนิดหนึ่งได้แก่ กลุ่มอะตอม “ออกโซโครม (auxochromes)” (ตารางที่ 2.1) เพื่อให้สีย้อมสามารถทำปฏิกิริยายึดติดกับเส้นใยได้ โมเลกุลใดที่ปราศจากกลุ่มอะตอมออกโซโครมจะแสดงสมบัติของสีออกมาได้ แต่จะขาดสมบัติในการยึดติดกับเส้นใย โมเลกุลดังกล่าวนี้เรียกว่า “โครมาเจน (chromagen)” ทั้งกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์ ออกโซโครม และโครมาเจนนี้จะเป็นส่วนสำคัญในการพิจารณาแบ่งกลุ่มของสีย้อมตามสูตรโครงสร้างทางเคมี



## ตารางที่ 2.1 กลุ่มอะตอมออกซิโครม

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

ที่มา: Rangnekar และ Singh (1980)

### 2.2.2 การจำแนกสีย้อม

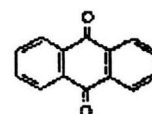
สีย้อม (Dyestuffs) คือ สารมีสีที่ละลายน้ำได้ หรืออาจทำให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ เวลาใช้มักจะถูกดูดซึมเข้าไปในวัสดุที่ถูกย้อมจากสารละลายในน้ำ ประโยชน์ที่สำคัญที่สุดของสีย้อมก็คือ การให้สีแก่วัสดุสิ่งทอ ในปัจจุบันการจำแนกประเภทสีย้อม อาจจะทำได้ 2 วิธี ดังนี้ (พิชัย, 2001)

#### 2.2.2.1 การจำแนกประเภทตามโครงการสร้างเคมี

การจำแนกประเภทโดยวิธีนี้อาจจำแนกโดยละเอียดได้ 20 ประเภท สีที่สำคัญ 5 ประเภท เรียงลำดับตามปริมาณสีที่ใช้จากมากไปหาน้อยได้ดังนี้

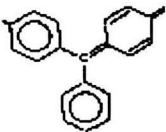
1) สียอะโซ (Azo dyes) มีกลุ่ม -N=N- เป็นโครงสร้างที่สำคัญ

2) สียแอนทราควิโนน (Anthraquinone dyes) มีกลุ่ม



เป็น

โครงสร้างที่สำคัญที่สุดในโมเลกุล

3) สีไตรฟีนิลมีเทน (Triphenylmethane dyes) มีกลุ่ม  เป็นโครงสร้างที่สำคัญในโมเลกุล

4) สีซัลเฟอร์ (Sulphur dyes) มีกลุ่ม D-S-S-D เป็นโครงสร้างที่สำคัญในโมเลกุล

5) สีอินดิโกอยด์ (Indigoids) มีกลุ่ม  $\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ -\text{C}-\text{C}=\text{C}-\text{C}- \\ | \qquad \qquad \qquad \parallel \\ \qquad \qquad \qquad \text{O} \end{array}$  เป็นโครงสร้างที่สำคัญอยู่ในโมเลกุล

2.2.2.2 การจำแนกประเภทสีย้อมตามกรรมวิธีการย้อม แบ่งได้เป็น 11 ประเภท ดังนี้คือ

1) สีแอซิด (Acid dyes) คือ สีย้อมซึ่งเมื่อละลายในน้ำแล้วโมเลกุลสีจะมีประจุเป็นลบ และมักจะให้ย้อมในน้ำย้อมที่มีความกรด ให้ย้อมเส้นใยโปรตีนและไนลอนได้ดี การเกาะติดของสีย้อมประเภทนี้ในเส้นใยอาศัยแรงดึงดูดระหว่างประจุลบบนโมเลกุลของสีกับประจุบวกบนโมเลกุลของเส้นใยเป็นสำคัญ สีย้อมนี้มักจะมีกลุ่มซัลโฟนิค (sulphonic groups) ซึ่งให้ประจุลบในน้ำ

2) สีเบสิก (Basic dyes) คือ สีย้อมซึ่งเมื่อละลายในน้ำ โมเลกุลสีจะมีประจุบวก ให้ย้อมเส้นใยอะคริลิก โปรตีน และไนลอนได้ดี การเกาะติดของสีย้อมประเภทนี้ในเส้นใยอาศัยแรงดึงดูดระหว่างประจุบวกบนสีย้อมกับประจุเส้นใยเป็นสำคัญ

3) สีไดเรกต์ (Direct dyes) คือ สีย้อมซึ่งเมื่อละลายในน้ำแล้วโมเลกุลสีจะมีประจุลบ ให้ย้อมในเซลลูโลสได้ดี และในการย้อมมักจะต้องมีการใส่สารพวกอีเล็กโตรไลต์ (เช่น พวกเกลือโซเดียมคลอไรด์) ลงไปช่วยในการย้อมด้วย การเกาะติดบนโมเลกุลของเส้นใยอาศัยแรงดึงดูดแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals's forces) เป็นสำคัญ

4) สีรีแอกทีฟ (Reactive dyes) คือ สีย้อมที่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับเส้นใย ทำให้เกาะติดอยู่กับโมเลกุลของเส้นใยได้โดยพันธะทางเคมี (covalent bond) ส่วนใหญ่ให้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส

5) สีดิสเพิร์ส (disperse dyes) คือ สีย้อมที่มีการละลายน้ำได้ต่ำ ใช้ย้อมเส้นใยที่มีการดูดซึมน้ำน้อย (hydrophobic fibers) โดยเฉพาะพวกเส้นใยสังเคราะห์ต่าง ๆ ได้ดี ในน้ำย้อมสีส่วนใหญ่จะไม่ละลายในน้ำ แต่จะอยู่ในน้ำย้อมในลักษณะของสารกระจาย

6) สีแวต (vat dyes) คือ สีย้อมที่ไม่ละลายน้ำที่มีกลุ่มคีโต ( $C=O$ ) อยู่ ปกติใช้ย้อมเส้นใยฝ้ายเป็นส่วนใหญ่ ในการย้อมจะต้องนำสี้อมมาทำปฏิกิริยารีดักชันให้อยู่ในรูปที่ละลายได้ในน้ำที่มีความเป็นด่างเพื่อให้ดูดซึมเข้าไปในเส้นใยได้ เมื่อเข้าไปอยู่ในเส้นใยแล้วจึงทำปฏิกิริยาออกซิเดชันให้กลับไปอยู่ในรูปเดิมที่ละลายน้ำไม่ได้ ด้วยวิธีนี้สี้อมจะมีความติดทนอยู่ในเส้นใย ไม่หลุดกลับออกมาในการซัก

7) สีซัลเฟอร์ (Sulphur dyes) คือ สีย้อมที่ไม่ละลายในน้ำ และมีซัลเฟอร์เป็นส่วนประกอบในโครงสร้างที่ทำให้เกิดสี ใช้ในการย้อมเส้นใยฝ้ายเป็นส่วนใหญ่ วิธีย้อมคล้ายสีแวต

8) สีเมอร์แดนต์ (Mordant dyes) คือ สีย้อมที่เกาะติดอยู่ในเส้นใยในลักษณะของสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะ ส่วนใหญ่ใช้ในการย้อมเส้นใยโปรตีนและไนลอน การย้อมในขั้นตอนแรกเป็นไปอย่างธรรมชาติด้วยการย้อมด้วยสีแอซิด แต่เมื่อเสร็จแล้วจะต้องนำไปทำปฏิกิริยากับสารละลายของเกลือโลหะ เช่น เกลือของโลหะโครเมียม เพื่อให้เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนขึ้นในเส้นใย

9) สีอะโซอิก (Azoic dyes) คือ สีย้อมที่ไม่ละลายน้ำที่ได้จากการสังเคราะห์ขึ้นภายในเส้นใยด้วยการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างเกลือไดอะโซเนียม กับสารประกอบที่เหมาะสม เกิดเป็นสี้อมที่มีสูตรโครงสร้างของสีอะโซ ในกระบวนการย้อมตัวทำปฏิกิริยาทั้งสองจะถูกย้อมเข้าไปในเส้นใยก่อน แล้วจึงนำผ้าที่ย้อมแล้วไปจุ่มในสารเคมีซึ่งจะทำให้สารทั้งสองตัวทำปฏิกิริยากัน เกิดเป็นสี้อมภายในเส้นใย สีย้อมประเภทนี้นิยมใช้กับการย้อมเส้นใยฝ้ายมากที่สุด

10) สีออกซิเดชัน (Oxidation dyes) คือ สีย้อมที่สามารถถูกออกซิไดซ์ให้อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ ภายหลังจากที่ได้ย้อมให้เข้าไปเกาะติดในเส้นใยแล้ว ส่วนใหญ่ใช้ในการย้อมเส้นใยฝ้าย สีพวกนี้เมื่อถูกออกซิไดซ์ในเส้นใยจะทำปฏิกิริยาเกิดเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัดว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นไปในรูปใด และโมเลกุลขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นมีสูตรทางเคมีอย่างไร



11) สีอินเกรน (Ingrain dyes) คือ สีย้อมที่ได้จากการสังเคราะห์ขึ้นในเส้นใย ด้วยการทำปฏิกิริยาระหว่างสารตัวกลางในเส้นใย นอกเหนือจากพวกที่เป็นสีอะโซอิก ตัวอย่างที่สำคัญได้แก่ สีทอลโลไซยานิน ซึ่งใช้ย้อมเส้นใยฝ้ายเป็นส่วนใหญ่

### 2.2.3 การเรียกชื่อสีย้อม (อังคณา, 2546)

#### 1) ชื่อทั่วไป (Trivial names)

การเรียกชื่อสีย้อมวิธีนิยมกันมากในยุคที่มีการค้นพบสีย้อมใหม่ ๆ เช่น Perkin ตั้งชื่อสีที่เขาค้นพบว่า Mauveine หรือการเรียกสีครามว่าสีอินดิโก การเรียกสีไคเร็กต์ตัวแรกที่ค้นพบในปี ค.ศ. 1884 ว่า Congo Red ในปัจจุบันการเรียกชื่อวิธีนี้ไม่ได้รับความนิยม

#### 2) ชื่อทางเคมี (Chemical names)

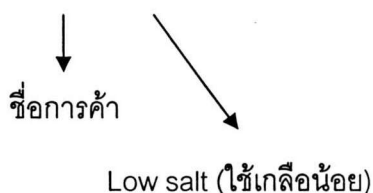
การเรียกตามโครงสร้างทางเคมีของสีนั้น เช่น Flavanthrene (Indanthrene Yellow) และ 6,15-dihydro – 5,14,18-anthrazinetetrone (Indanthrene Blue หรือ Indanthrone) วิธีการนี้ไม่ค่อยเป็นที่นิยม

#### 3) ชื่อทางการค้า (Trade names)

เป็นการเรียกชื่อที่บริษัทผลิตสีแต่ละบริษัทชื่อผลิตภัณฑ์ของตนซึ่งมักประกอบด้วย

ชื่อที่บริษัทตั้งขึ้น + ชนิดของสี/เฉดสี + ความเข้ม / สมบัติในการย้อม(ตัวเลข/ตัวอักษร)  
เช่น สี Reactive ของบริษัท Ciba Specialty Chemicals

Cibacron Ls red – 3



#### 4) ชื่อ C.I (C.I. Generic Name)

การเรียกชื่อวิธีนี้ชื่อสีจะประกอบด้วย

C.I + ชื่อประเภทสีย้อม + เฉดสี + ลำดับตัวเลข

เช่น C.I Vat Blue 1 คือ สีอินดิโก

### 2.3 ภาวะมลพิษที่เกิดจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

อุตสาหกรรมฟอกย้อมมีการใช้น้ำเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะในกระบวนการย้อมสี น้ำเสียที่ได้จะมีปริมาณสิ่งเจือปนค่อนข้างสูงไม่ว่าจะเป็นสี สารเคมีช่วยย้อม นอกจากนี้น้ำยังมีอุณหภูมิสูง หากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำโดยตรงย่อมก่อให้เกิดปัญหาต่าง ๆ ตามมา

#### 2.3.1 ลักษณะน้ำทิ้งในอุตสาหกรรมฟอกย้อม

2.3.1.1 แหล่งที่มาของน้ำทิ้งในอุตสาหกรรมฟอกย้อม มีที่มาจากแหล่งต่าง ๆ ที่

สำคัญ 4 แหล่งคือ

1) น้ำทิ้งที่ใช้ในกระบวนการ ได้แก่ น้ำที่ใช้ในขั้นตอนการดำเนินการฟอกย้อม และแต่งสำเร็จ น้ำที่ใช้ส่วนนี้อาจมีการระเหยไปบ้างบางส่วน แต่ส่วนใหญ่จะถูกปล่อยออกมาเป็นน้ำทิ้งเกือบทั้งหมด น้ำที่ใช้ในกระบวนการสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

- น้ำที่ใช้ในขั้นตอนการฟอกย้อมโดยตรง น้ำในส่วนนี้จะมีปริมาณไม่มากนักแต่ความเข้มข้นของสิ่งสกปรกเจือปนจะค่อนข้างสูง และมีลักษณะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับเส้นใยที่นำมาย้อมและกระบวนการย้อมที่ใช้

- น้ำที่ใช้ในการซักล้างภายหลังการฟอกย้อม น้ำในส่วนนี้จะมีปริมาณมากแต่ความเข้มข้นของสิ่งเจือปนจะต่ำกว่าน้ำทิ้งในขั้นตอนการฟอกย้อมโดยตรง

2) น้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำ ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอมักใช้ไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต และเป็นตัวให้ความร้อนในตู้อบไอน้ำ ถ้าไอน้ำที่ใช้ถูก

ปล่อยให้เป็นลง และกลั่นตัวในท่อน้ำก็จะได้น้ำที่สะอาด สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ถ้าไอน้ำถูกส่งไปให้ความร้อนแก่น้ำย้อมโดยตรงก็เท่ากับไปเพิ่มปริมาณของน้ำเสียให้มากขึ้น

3) น้ำหล่อเย็น ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมจำเป็นต้องลดอุณหภูมิของน้ำย้อมลง ในระยะเวลาอันสั้น ซึ่งจะทำให้โดยอาศัยการใช้น้ำหล่อเย็น น้ำหล่อเย็นนี้เป็นน้ำสะอาดสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้

4) น้ำที่ใช้ในการล้างเครื่องและทำความสะอาดโรงงาน น้ำส่วนนี้นับเป็นส่วนประกอบที่สำคัญส่วนหนึ่งของน้ำทิ้งจากโรงงาน และในบางกรณีก็เป็นน้ำทิ้งที่มีความสกปรกสูงมากด้วย เช่น น้ำจากการล้างสกรีนที่ใช้ในการพิมพ์ผ้า หรือน้ำล้างถังเตรียมสีเป็นต้น

5) น้ำจากแหล่งอื่น ๆ นอกจากน้ำทิ้งจากแหล่งต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้นแล้ว โรงงานยังอาจมีน้ำทิ้งจากแหล่งอื่น ๆ อีก เช่น น้ำใช้ของคนงาน หรือน้ำฝน เป็นต้น

2.3.1.2 ประเภทของสิ่งสกปรกเจือปนในน้ำทิ้ง สิ่งสกปรกเจือปนในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม มีอยู่มากมายหลายประเภท โดยอาจจำแนกเป็นประเภทที่สำคัญ ๆ ได้ดังนี้ คือ

- 1) สีย้อม สีที่ใช้ในการย้อม ที่สำคัญมีดังนี้ คือ
  - สีย้อมฝ้าย ได้แก่ สีไดเรกต์ สีรีแอคทีฟ สีแว็ต และสีซัลเฟอร์
  - สีย้อมพอลิเอสเตอร์ ได้แก่ สีดิสเพิร์ส
  - สีย้อมไนลอน ได้แก่ สีแอซิด และสีดิสเพิร์ส
  - สีย้อมอะครีลิก ได้แก่ สีแอซิด

ในการย้อมเส้นใยจะมีการดูดซึมสีย้อมเพียงบางส่วนเท่านั้น ที่เหลือจะคงอยู่ในน้ำย้อมและจะถูกปล่อยออกมากับน้ำทิ้งในที่สุด ปริมาณสีที่ยังคงเหลืออยู่ในน้ำย้อมแตกต่างกันไปตั้งแต่ 5-50% (ตารางที่ 2.2) ขึ้นอยู่กับประเภทของสีที่ใช้



ตารางที่ 2.2 แสดงปริมาณสีย้อมชนิดต่าง ๆ ที่ติดมากับน้ำเสีย

ชนิดของสีย้อม	%การผนึกของสีกับเส้นใย	%สีในน้ำเสีย
Direct dyes	70-95	5-30
Sulfur dyes	60-70	30-40
Vat dyes	80-95	5-20
Azoic dyes	90-95	5-10
Reactive dyes	50-80	20-50
Acid dyes	80-93	7-20
Metal complex dyes	95-98	2-5
Cationic dyes	97-98	2-3
Disperse dyes	85-95	5-10

ที่มา: O' Neill (1999)

## 2) สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อม

สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมมีอยู่หลายประเภท (ตารางที่ 2.3) สารเคมีเหล่านี้ส่วนใหญ่จะคงเหลืออยู่ในน้ำย้อมหรือน้ำซักล้าง และจะถูกปล่อยปนออกมาในน้ำทิ้ง

## 3) สิ่งสกปรกเจือปนในเส้นใย

วัสดุสิ่งทอที่ถูกนำมาผ่านกระบวนการฟอกย้อมด้วยเคมีสิ่งสกปรกเจือปนมาบ้างไม่มากนัก โดยทั่วไปเส้นใยธรรมชาติจะมีสิ่งสกปรกเจือปนสูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์ นอกจากจะมีสิ่งสกปรกเจือปนที่ติดมาในระหว่างขั้นตอนการผลิตแล้ว ยังมีสิ่งสกปรกเจือปนที่มากับธรรมชาติที่ต้องขจัดออกไปในขั้นตอนการเตรียมถึง 40% ของน้ำหนักเส้นใย ในขณะที่ผ้ายังมีสิ่งสกปรกเจือปนที่ติดมากับธรรมชาติโดยเฉลี่ยประมาณ 10% สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้มีทั้งที่

เป็นสารขี้ผึ้ง ไชมัน โปรตีน ตลอดจนสารประกอบโลหะต่าง ๆ นอกจากนี้ในขั้นตอนการผลิตก็ยังมี การเติมสารต่าง ๆ ลงไปในเส้นใยด้วย เช่น พวกสารหล่อลื่น และแบ่งที่ใช้ในการลงแป้งเส้นด้ายยืน เป็นต้น สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้ จะถูกกำจัดออกจากเส้นใยในขั้นตอนการเตรียมก่อนการพิมพ์ ย้อม และจะหลุดติดตามในน้ำทิ้งจากขั้นตอนการเตรียม

### ตารางที่ 2.3 แสดงสารเคมีที่พบในน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

กระบวนการ	สารเคมีที่ใช้
1. การซักผ้า	สารหล่อลื่น
2. การทอผ้า	สารลงแป้งชนิดต่าง ๆ เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งพีวีเอ แป้งอะคริลิก สารเอนไซม์ สารออกซิไดซิงส์ สารช่วยการเปียก
3. การลอกแป้ง	ด่างโซดาไฟ สารน้ำสบู่
4. การขจัดไขมันและ สิ่งสกปรก	สารออกซิไดซิงส์ (ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โซเดียมคลอไรด์) โซเดียมซัลเฟต สารจับอนุภาคโลหะ
5. การฟอกขาว	ด่างโซดาไฟ
6. การชุบมัน	กรดซัลฟูริก
7. การทำ burn-out	กรด (ซัลฟูริก อะซิติก) ด่าง (โซดาไฟ โซเดียมคาร์บอเนต) สารแคโรเจอร์
8. การย้อม	สารรีดิวซิงส์ (โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ โซเดียมซัลไฟด์) เกลือ (โซเดียมคลอไรด์ โซเดียมซัลเฟต) สารกันต่าง (levelling agent) สารชะลอการติดของสี (retarders) สารผนึกสี (fixing agent)
9. การพิมพ์	แป้งพิมพ์ (thickening agent) ได้แก่ พวกอัลจินเตต สารรีดิวซิงส์ (ใช้ในการ พิมพ์แบบดีสซาร์จ) ได้แก่ โซเดียมฟอร์มมันดีไฮด์ซัลฟอก น้ำมันก๊าด (ใช้ในการ พิมพ์สีฟักเมนต์)
10. การตกแต่งสำเร็จ	สารตกแตงนุ่ม กันยับ กันไฟ ตกแตงขาว (Fluorescent brightening agent)

ที่มา: นันทนา (2539)

## 4) เศษเส้นใย

ในน้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกย้อม-พิมพ์สิ่งทอ องค์ประกอบอันหนึ่งที่จะหลีกเลี่ยงไม่ได้คือเศษเส้นใยที่หลุดออกมา เศษเส้นใยนี้หากมีปริมาณมากก็อาจทำให้เกิดปัญหาอุดตันของน้ำทิ้งในเครื่องย้อมได้ นอกจากนี้ ในกรณีของเส้นใยโพลีเอสเตอร์ยังมีสารโอลิโกเมอร์ที่อาจหลุดออกมาจากเส้นใยมาปะปนในน้ำทิ้งด้วย

## 5) สิ่งสกปรกเจือปนอื่น ๆ

นอกจากสิ่งสกปรกเจือปนต่าง ๆ ดังกล่าวมาข้างต้นแล้วน้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกย้อม-พิมพ์สิ่งทอ จะมีน้ำทิ้งซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีที่มีความหลากหลายอย่างยิ่ง แต่อุตสาหกรรมประเภทนี้ยังมีข้อดีอยู่บ้าง คือสารส่วนใหญ่เป็นสารที่ง่ายต่อการบำบัด และมีค่าบีโอดี ตลอดจนมีความเป็นพิษต่ำ

## 2.3.1.3 น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมีลักษณะดังต่อไปนี้

1) มีปริมาณสารอินทรีย์สูง โดยสารอินทรีย์จากกระบวนการฟอกย้อมได้แก่ แป้ง สีย้อม เส้นใย และเส้นด้ายที่ปนออกมาจากกระบวนการย้อมและตกแต่ง ไชมัน และตัวทำละลายต่าง ๆ ซึ่งทำให้น้ำเสียที่เกิดขึ้นมีปริมาณซีโอดี บีโอดีสูง

2) มีค่าพีเอชและสภาพความเป็นด่างสูง เนื่องจากในน้ำเสียมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคาร์บอเนตปนอยู่

3) มีอุณหภูมิสูง

4) มีปริมาณของแข็งละลายน้ำสูง ส่วนใหญ่เป็นการละลายของแข็งพวกเกลือโซเดียมและกรดต่าง ๆ ปนอยู่

5) มีสีเข้มมาก จากกระบวนการย้อมผ้า

6) มีโลหะหนักเจือปน เนื่องจากสีที่ใช้ในการย้อมผ้า ส่วนใหญ่มีโลหะพวกทองแดง โครเมียม ตะกั่ว และสังกะสีปนอยู่

7) มีปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดสูง



ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ควรทำการวิเคราะห์ของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม สิ่งทอทั้งก่อนและหลังการบำบัด ได้แก่ พีเอช, ซี, เอสเอส, ซัลไฟด์, ทีเคเอ็น, บีโอดี, ซีโอดี, ฟีนอล, โครเมียม, ทีดีเอส, ฟอสเฟต, ซัลไฟด์ (มันซิน, 2542) ซึ่งลักษณะสมบัติโดยทั่วไปที่พบ ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ ดังแสดงในตารางที่ 2.4 และค่าลักษณะของน้ำเสียที่ ผ่านการบำบัดแล้วของกลุ่มอุตสาหกรรมฟอกย้อม จะต้องไม่เกินมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งสำหรับ โรงงานอุตสาหกรรม

ตารางที่ 2.4 ลักษณะสมบัติโดยทั่วไปที่พบในน้ำเสียจากโรงฟอกย้อม

พารามิเตอร์	ช่วงที่พบ
อุณหภูมิ (°C)	10-90
COD (มก./ล.)	80-4000
BOD (มก./ล.)	50-2000
TSS (มก./ล.)	20-500
SS (มก./ล.)	80-120
TDS (มก./ล.)	1700-2100
Color	สังเกตเห็น
NH <sub>3</sub> (มก./ล.)	0-50
Phenol (มก./ล.)	0-12
pH	2-12

ที่มา: กองอุตสาหกรรมสิ่งทอ (2535)

### 2.3.2 ผลกระทบที่เกิดจากสีย้อมและสารเคมีในน้ำทิ้งจากโรงงาน มีดังนี้

- 1) ทำให้แหล่งน้ำนั้นเกิดความไม่สวยงามทางด้านทัศนียภาพ เป็นที่รังเกียจแก่ผู้พบเห็น
- 2) สีย้อมและสารเคมีที่เป็นสารอินทรีย์ย่อยสลายได้ ทำให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำลดลง ซึ่งส่งผลกระทบต่อสัตว์น้ำได้
- 3) ขัดขวางการเดินทางของแสง ซึ่งจำเป็นต่อการสังเคราะห์แสงของพืช ทำให้สมดุลทางระบบนิเวศวิทยาเปลี่ยนแปลงไปได้ เกิดเป็นผลเสียต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำ ทั้งทางตรงและทางอ้อม
- 4) สารเคมีบางชนิดอาจทำให้คุณลักษณะของแหล่งน้ำเปลี่ยนแปลงไป เช่น พีเอชเพิ่มขึ้น มีความกระด้างมากขึ้น เป็นต้น
- 5) ความเป็นพิษของตัวสีย้อมบางชนิดอาจเป็นสารก่อมะเร็งได้

### 2.4 กระบวนการตกตะกอนทางเคมี หรือโคแอกกูเลชัน (Chemical Coagulation)

กระบวนการโคแอกกูเลชัน หมายถึง กระบวนการทั้งหมดในการทำให้อนุภาคคอลลอยด์มารวมกันเป็นกลุ่มก้อน (floc) ซึ่งมี 2 ขั้นตอน คือ

- 1) การทำลายเสถียรภาพ (Destabilization) ของคอลลอยด์ เช่น ลดแรงผลักระหว่างอนุภาคโดยทางใดทางหนึ่ง เป็นต้น
- 2) การทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆ เคลื่อนที่มากกระทบสัมผัสกันให้มากที่สุด (Transport of Colloidal Particles) เมื่ออนุภาคถูกทำลายเสถียรภาพแล้ว การสร้างโอกาสสัมผัสระหว่างอนุภาคย่อมเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าเดิม เมื่ออนุภาคต่าง ๆ สัมผัสกันแล้วควรเกาะติดกันแน่นและหลุดน้อยที่สุด

ความสำคัญของทั้ง 2 ขั้นตอนมีความเท่าเทียมกัน และต้องมีทั้ง 2 ขั้นตอนจึงจะเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันที่สมบูรณ์ โดยในขั้นตอนแรกจะเกิดตะกอนขนาดเล็กและรวมตัวกัน

ใหญ่ขึ้น เนื่องจากเกิดการลดประจุไฟฟ้าของอนุภาค และ Brownian movement จากนั้นจึงส่งเข้ากระบวนการ flocculation เพื่อทวนซ้ำ ๆ ให้อนุภาคมาชนกันและมีขนาดใหญ่ขึ้น จนสามารถแยกออกได้ง่าย

#### 2.4.1 เสถียรภาพและการทำลายเสถียรภาพ

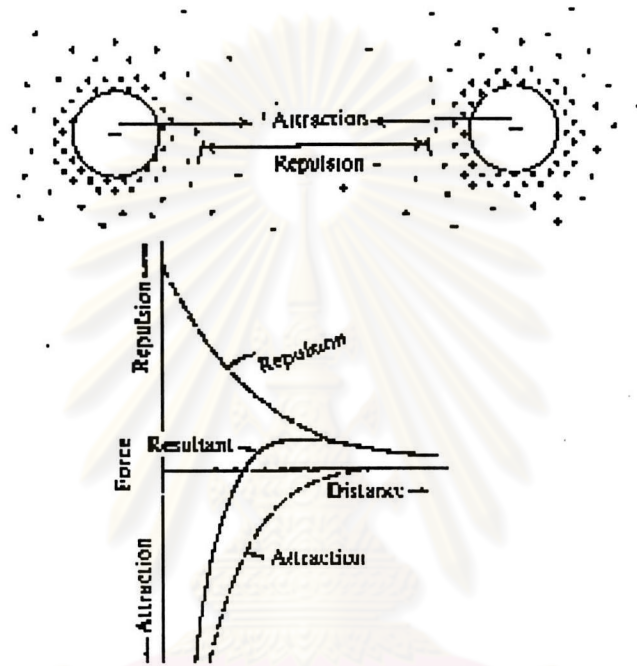
มันลิน (2537) ได้กล่าวถึงเสถียรภาพของคอลลอยด์ และการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ไว้ว่า การที่อนุภาคคอลลอยด์สามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้โดยไม่ตกตะกอน เนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์มีประจุไฟฟ้า ซึ่งอาจมีประจุบวกหรือลบก็ได้ ทำให้มีแรงผลักระหว่างอนุภาคจึงเป็นสาเหตุให้อนุภาคต่าง ๆ กระจายอยู่ในน้ำโดยไม่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ซึ่งเรียกว่าฟลอค ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าประจุไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้คอลลอยด์มีเสถียรภาพ ในน้ำอนุภาคคอลลอยด์จะมีแรงกระทำซึ่งกันและกันอยู่ 2 ชนิด คือแรงดูดระหว่างอนุภาค (van der waal force) และแรงผลัทางไฟฟ้า (electrical repulsive force) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการที่ผิวของอนุภาคมีประจุชนิดเดียวกัน จึงเกิดการผลักัน บทบาทของแรงทั้งสองมีผลต่อเสถียรภาพของคอลลอยด์ แรงผลัจะต้องสูงกว่าแรงดึงดูด จึงจะทำให้คอลลอยด์มีเสถียรภาพ ถ้าแรงดูดมากกว่าแรงผลัอนุภาคคอลลอยด์ต่าง ๆ สามารถจับกันเป็นกลุ่มก้อน หรือฟลอคได้ ทำให้คอลลอยด์ไม่มีเสถียรภาพ ผลลัพธ์ของแรงระหว่างอนุภาคทั้ง 2 ชนิดขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอนุภาค แรงดึงดูดมีอำนาจเหนือกว่าแรงผลัก็ต่อเมื่ออนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันมาก ๆ แต่ถ้าหากอนุภาคคอลลอยด์มีประจุไฟฟ้าสูง หรือมีชั้นกระจายหนาจะทำให้เกิดแรงผลัสูงกว่าแรงดูด

##### 2.4.1.1 เสถียรภาพของคอลลอยด์

เมื่อคอลลอยด์ยังคงมีเสถียรภาพ จะสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้โดยไม่ตกตะกอนในระยะเวลาสั้น ๆ แต่เมื่อทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ทำให้เกิดการตกตะกอนแยกตัวออกจากน้ำ ดังนั้นเสถียรภาพของคอลลอยด์ จึงขึ้นอยู่กับแรงดูดและแรงผลัระหว่างอนุภาค ถ้าคอลลอยด์มีเสถียรภาพแสดงว่ามีแรงผลัสูงกว่าแรงดูด แต่ถ้าอนุภาคมีแรงดูด



มากกว่าแรงผลักร ทำให้สามารถจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนได้ ทำให้คอลลอยด์ไม่มีเสถียรภาพ แรงดูดระหว่างอนุภาค เรียกว่า แรงวันเดอร์วาลส์ (Van Der Waals Force) เป็นแรงอ่อนที่มีอำนาจเมื่ออนุภาคอยู่ใกล้กัน ส่วนแรงผลักระหว่างอนุภาคเป็นผลมาจากประจุไฟฟ้าของอนุภาคหรือซีตาโพเทนเชียล ผลลัพธ์ของแรงระหว่างอนุภาคทั้งสองชนิดขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แรงระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ที่ระยะห่างต่าง ๆ

จะเห็นได้ว่าแรงดูดมีอำนาจเหนือแรงผลักรก็ต่อเมื่ออนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันมาก ๆ โดยปกติแรงผลักรซึ่งเกิดจากซีตาโพเทนเชียลจะไม่ยอมให้อนุภาคต่าง ๆ เข้ามาใกล้กันจนเกิดการดูดเข้าหากัน

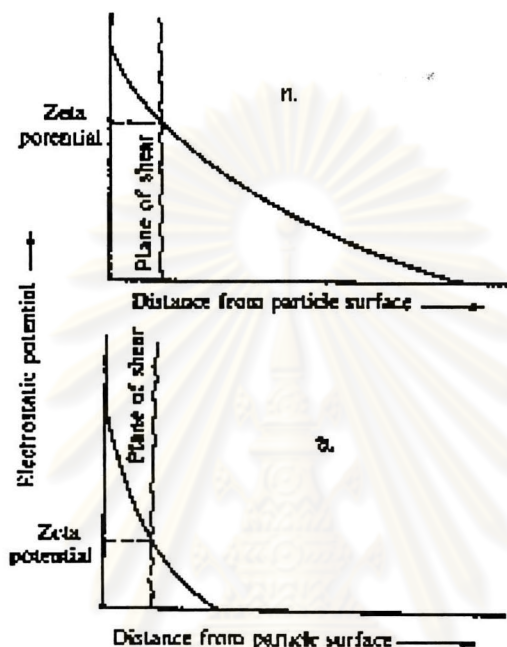
#### 2.4.1.2 การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์

การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์สามารถกระทำได้โดยอาศัยกลไก 4

แบบ คือ

### 1) การลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse Layer)

การเพิ่มจำนวนของไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามกับประจุของอนุภาคเป็นการเพิ่มความหนาของ Counter Ion ในชั้นกระจาย ผลที่เกิดขึ้นคือ ชั้นกระจายมีความหนาลดลง ทำให้ซีตาโพเทนเชียลลดลงตามไปด้วย ดังแสดงในรูป 2.2



รูปที่ 2.2 ผลของการเติมไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามให้กับคอลลอยด์

ก. ก่อนเติมไอออน      ข. หลังจากเติมไอออนแล้ว

ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากมีประจุบวกเข้าไปออกันอยู่ใกล้ผิวของอนุภาคคอลลอยด์เพิ่มขึ้น ทำให้อำนาจของประจุลบของอนุภาคไม่สามารถส่งออกไปได้ไกลเท่าเดิม ไอออนต่าง ๆ มีอำนาจในการลดความหนาของชั้นกระจายได้ไม่เท่ากัน ไอออนที่มีวาเลนซ์ (Valence) 1, 2, 3 มีอำนาจในการลดความหนาของชั้นกระจายเป็นสัดส่วน 1:10:1000 ตามลำดับ ยกตัวอย่างเช่น  $Al^{+3}$  จะให้ผลดีกว่า  $Ca^{+2}$  การทำลายเสถียรภาพโดยการลดความหนาของชั้นกระจายด้วยการเติมสารละลายของเกลือต่าง ๆ มีข้อที่น่าสนใจดังนี้

ก) ปริมาณสารตัวนำไฟฟ้า (ที่มีไอออนประจุบวก) ที่เติมเพื่อทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยวิธีการลดความหนาของชั้นกระจายไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคอลลอยด์

ข) อนุภาคของคอลลอยด์ไม่สามารถเปลี่ยนสภาพจากประจุลบไปเป็นประจุบวกได้ (Charge Reversal) ไม่ว่าจะเติมอิออนบวกมากเพียงใดก็ตาม

2) การดูดติดและการทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ (Adsorption/ Charge Neutralization)

อนุภาคคอลลอยด์สามารถดูดติด (Adsorp) สารเคมีบางชนิดไว้ที่ผิวได้ ถ้าสารเคมีนั้นมีประจุไฟฟ้าตรงกันข้ามกับคอลลอยด์ การดูดติดผิวนี้แตกต่างจากกลไกแบบแรกที่กล่าวไว้ในข้อข้างบน (ซึ่งอิออนต่างประจุหรือ Counter Ion อยู่ในชั้นกระจายโดยไม่ดูดติดผิวอนุภาคคอลลอยด์) 3 ประการดังนี้

2.1) กลไกแบบดูดติดผิวต้องการอิออนที่ต่างชนิดน้อยกว่าแบบแรก เนื่องจากอิออนต่างประจุสามารถเข้าถึงผิวอนุภาคคอลลอยด์ การทำลายศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์จึงได้ผลดีกว่า อิออนต่างประจุที่ไม่สามารถเข้าถึงผิวของอนุภาคได้

2.2) การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยกลไกแบบดูดติดผิวนั้นเป็นแบบสโตยชิโอเมตริก (Stoichiometric) ปริมาณสารสร้างตะกอนที่ใช้จะมากหรือน้อยตามปริมาณของอนุภาคคอลลอยด์ แต่การทำลายเสถียรภาพแบบลดความหนาของชั้นกระจายไม่เป็นที่ไปตามสโตยชิโอเมตริก

2.3) กลไกแบบดูดติดผิวสามารถเปลี่ยนประจุอนุภาคคอลลอยด์ให้เป็นตรงกันข้ามกับของเดิมโดยการใช้สารสร้างตะกอนที่มากเกินไป โดยกลไกแบบลดความหนาของชั้นกระจายไม่สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนประจุเป็นตรงกันข้าม อาจเป็นเพราะจำนวนอิออนต่างชนิดในชั้นกระจายถูกจำกัดด้วยศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์ อิออนต่างประจุ (สารสร้างตะกอน) ส่วนที่เติมเกินพอจะอยู่นอกชั้นกระจาย ดังนั้น ไม่ว่าจะใช้สารสร้างตะกอนมากเท่าใดก็ไม่สามารถเปลี่ยนประจุคอลลอยด์ให้เป็นตรงกันข้ามได้ ข้อควรสังเกตเกี่ยวกับการเปลี่ยนประจุคอลลอยด์ของกลไกแบบดูดติดผิว ก็คือ การที่อิออนต่างประจุสามารถดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์จนประจุเปลี่ยนเป็นตรงกันข้ามย่อมแสดงว่ามีปฏิกิริยาเคมีระหว่างอิออนต่างประจุกับอนุภาคคอลลอยด์ จนเอาชนะแรงผลักระหว่างประจุชนิดเดียวกันได้



### 3) การจับอนุภาคคอลลอยด์ไว้ในผลึกสารประกอบที่สร้างขึ้น

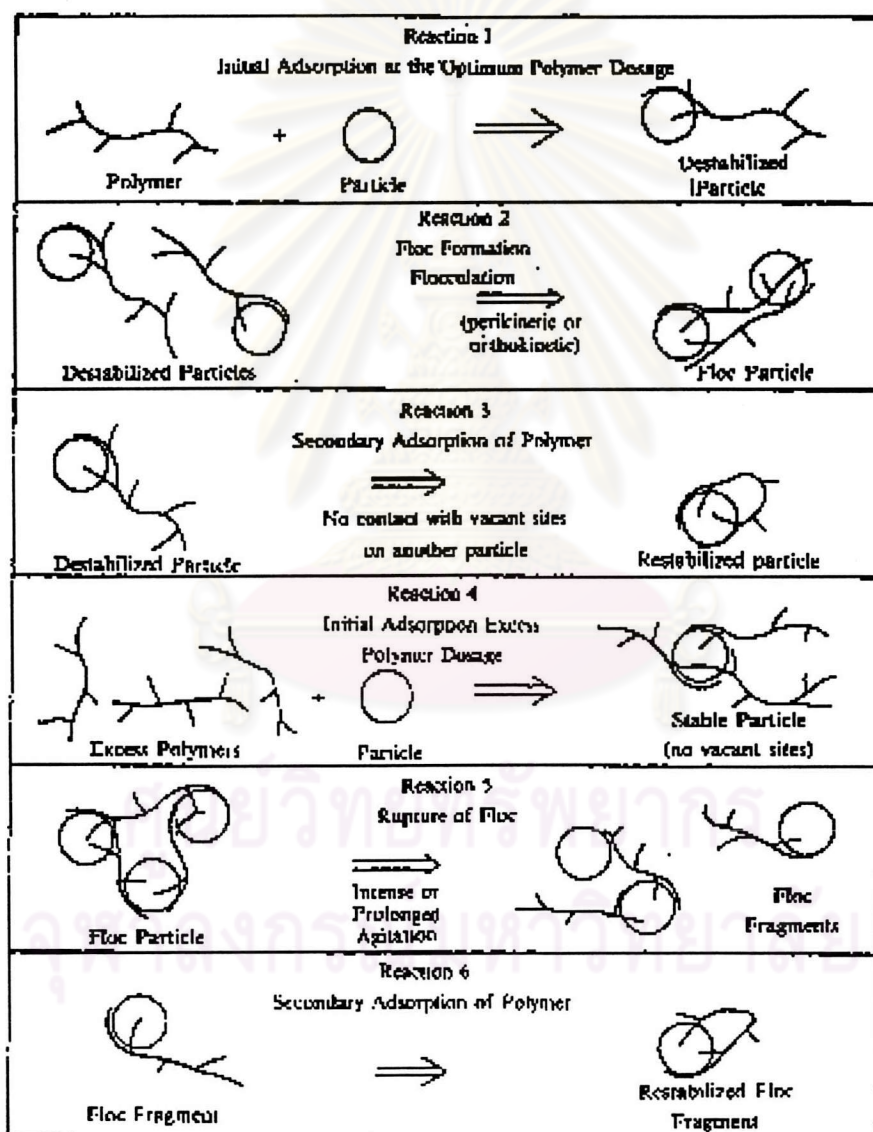
ถ้าเติมสารประกอบเกลือของโลหะบางชนิดลงไปในน้ำในปริมาณที่เพียงพอ จะเกิดการตกผลึกลงมาอย่างรวดเร็ว อนุภาคคอลลอยด์อาจเป็นแกนในของผลึกดังกล่าวนี้ ซึ่งถือได้ว่าเป็นการเพิ่มขนาดหรือน้ำหนักให้กับอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้อนุภาคคอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพและเกิดการตกตะกอนได้ สารสร้างตะกอนดังกล่าว เช่น สารส้ม เฟริกคลอไรด์ แมกนีเซียมคาร์บอเนต และปูนขาว สามารถทำให้เกิดการโคแอกกูเลชันได้โดยการสร้าง  $Al(OH)_3$ ,  $Fe(OH)_3$ ,  $Mg(OH)_2$ ,  $CaCO_3$  ซึ่งล้วนแต่เป็นผลึกสาร (Precipitation) ที่ไม่ละลายน้ำ การกำจัดคอลลอยด์โดยกลไกแบบนี้มักเรียกว่าเป็น Sweep Flocculation

กลไกที่ใช้ผลึกสารอนินทรีย์ในการทำละลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ มีลักษณะที่แตกต่างจากกลไก 2 แบบแรก คือ ปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสม (Optimum Dosage) แปรผกผันกับความเข้มข้นของคอลลอยด์ กล่าวคือ น้ำที่มีปริมาณมลสารน้อยต้องใช้สารสร้างตะกอนจำนวนมาก จึงจะเกิดการระบวณการโคแอกกูเลชันได้ดี ในทางตรงกันข้าม น้ำที่มีปริมาณสารมากอาจใช้ปริมาณสารสร้างตะกอนน้อยกว่า เพราะน้ำที่มีปริมาณมลสารน้อยจะมีโอกาสที่จะสัมผัสระหว่างอนุภาคน้อย ดังนั้นแม้ว่าจะเกิดการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์แล้ว แต่การระบวณการโคแอกกูเลชันอาจเกิดได้ไม่ดีเท่าที่ควร จึงต้องใช้ปริมาณสารสร้างตะกอนสูงเพื่อสร้างผลึกจำนวนมากสำหรับเป็นเป้าสัมผัสให้กับอนุภาคคอลลอยด์ แต่ในกรณีที่น้ำมีปริมาณมลสารอยู่มาก โอกาสสัมผัสย่อมมีมาก จึงไม่จำเป็นต้องอาศัยเป้าสัมผัสจากภายนอกมากเท่าในกรณีแรก

เนื่องจากกลไกแบบนี้ไม่จำเป็นต้องทำลายประจุที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ การระบวณการโคแอกกูเลชันจึงไม่จำเป็นต้องเกิดในขณะที่ค่าซีตาโพเทนเชียลมีค่าต่ำที่สุด แต่ค่าที่มีบทบาทสำคัญมากต่อกลไกนี้คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง เนื่องจากความสามารถในการตกผลึกของสารต่าง ๆ จะมีความสัมพันธ์กับค่าความเป็นกรด-ด่าง ดังนั้นสารสร้างตะกอนแต่ละชนิดจะมีระดับค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมที่สุดแตกต่างกัน

4) การใช้สารอินทรีย์พอลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์ (Polymer Bridging)

การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยสารอินทรีย์ ทั้งที่เป็นสารประกอบตามธรรมชาติหลายชนิด เช่น แป้ง เซลลูโลส น้ำตาลบางชนิด และโปรตีนบางชนิด รวมทั้งสารอินทรีย์พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้น สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองที่เรียกว่า Polymer Bridging ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กลไกของการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ แบบต่อเชื่อมด้วยพอลิเมอร์

ตามทฤษฎีนี้ โมเลกุลของสารพอลิเมอร์สามารถเกาะติดบนอนุภาคคอลลอยด์ได้หลายตำแหน่ง (ปฏิกิริยาที่ 1) การเกาะติดอาจเป็นผลเนื่องจากประจุที่ต่างกันของพอลิเมอร์และอนุภาคคอลลอยด์ อนุภาคที่มีพอลิเมอร์เกาะติดอยู่โดยมีปลายอิสระสำหรับเกาะบนอนุภาคอื่น ถือได้ว่าเป็นอนุภาคที่สูญเสียเสถียรภาพแล้ว (Destabilized Particle) อนุภาคดังกล่าวนี้สามารถจับกับอนุภาคตัวอื่น ๆ โดยมีพอลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อม (ปฏิกิริยาที่ 2) การเชื่อมต่อนี้พอลิเมอร์เกิดขึ้นได้ตลอดเท่าที่มีพอลิเมอร์และตำแหน่งว่างที่ผิวอนุภาค ถ้าปลายอิสระของพอลิเมอร์ไม่มีที่สำหรับเกาะจับอนุภาคอื่น (ไม่ว่าจะเหตุผลใดก็ตาม) ปลายอิสระก็จะเกาะจับบนอนุภาคเดิม (ปฏิกิริยาที่ 3) ซึ่งทำให้เสียประโยชน์ 2 ประการ คือ ทำให้ไม่มีปลายอิสระไว้จับอนุภาคอื่น และทำให้ตำแหน่งว่างบนอนุภาคสำหรับยึดเกาะมีน้อยลง อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกสารพอลิเมอร์ยึดเกาะหลายตำแหน่งจนไม่มีปลายอิสระและไม่มีที่ว่างเรียกว่า อนุภาคที่มีเสถียรภาพกลับคืนมาใหม่ (Restabilized Particle) การใช้สารพอลิเมอร์มากเกินไป ทำให้พอลิเมอร์หลายโมเลกุลไปเกาะอยู่บนอนุภาคคอลลอยด์ จนกระทั่งไม่มีที่ว่างบนอนุภาคสำหรับเป็นที่จับของปลายอิสระของพอลิเมอร์ที่อยู่บนอนุภาคอื่น (ปฏิกิริยาที่ 4) การกวนน้ำที่แรงเกินไปหรือนานเกินไปทำให้ฟลอคที่เกิดขึ้นมาแล้วแตกออกเป็นสวน ๆ (ปฏิกิริยาที่ 5) และอาจทำให้ปลายอิสระของพอลิเมอร์เกาะจับบนอนุภาคอันเดิม (ปฏิกิริยาที่ 6) เสถียรภาพของคอลลอยด์จึงกลับคืนมาใหม่

#### 2.4.2 ประเภทของสารสร้างตะกอน

##### 1) สารสร้างตะกอนประเภทอนินทรีย์

สารสร้างตะกอนอนินทรีย์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีการตกตะกอนในปัจจุบันมีหลายประเภท เช่น กลุ่มที่มีอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ เช่น อะลูมิเนียมซัลเฟต หรือ สารส้มซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันทั่วไปในการตกตะกอนเนื่องจากราคาถูก กลุ่มที่เหล็กเป็นองค์ประกอบ เช่น เฟอร์ริกซัลเฟต ซึ่งสามารถตกตะกอนได้ดีที่พีเอช 4-9 ตะกอนเคมีของเฟอร์ริกมีน้ำหนักมากพอสมควรทำให้ตกตะกอนได้ดี และการใช้ปูนขาว เพื่อทำให้เกิดผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนต



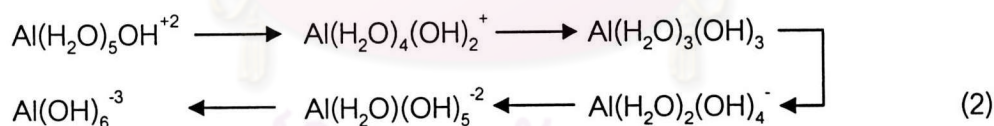
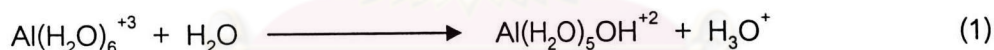
ซึ่งวิธีนี้ปกติจะใช้ในการกำจัดฟอสเฟตเท่านั้น แต่ก็สามารถใช้บำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์เพื่อลดค่าบีโอดี ซีโอดี ของแข็งแขวนลอยได้ด้วย

ในปัจจุบันสารสร้างตะกอนจะแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

1.1) กลุ่มที่มีอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ หรือ อะลูมิเนียมโคแอกกูแลนต์

เมื่อเติมสารสร้างตะกอนในกลุ่มที่มีอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ หรือ อะลูมิเนียมโคแอกกูแลนต์ลงในน้ำโมเลกุลของมันจะแตกตัวเป็น อะลูมิเนียมไอออน ( $Al^{3+}$ ) และสารประกอบเชิงซ้อนจำนวนมาก (Complex ion) อะลูมิเนียมโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ยังมีหลายชนิด เช่น

1.1.1) aluminium sulphate ( $Al(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ ) หรือสารส้ม (alum) เป็นสารสร้างตะกอนที่นิยมใช้ ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป Filter alum ( $Al(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$ ) ซึ่งเมื่อละลายน้ำได้  $Al(H_2O)_6^{+3}$  หรือเขียนในรูป  $Al^{3+}$  ไอออนที่ประกอบด้วยโลหะและน้ำเรียกว่า Aqua metal Ion เนื่องจาก  $Al^{3+}$  มีอำนาจเป็นกรดซึ่งสามารถให้ไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) จึงพร้อมที่จะไฮโดรไลซ์ให้เป็นไอออนต่าง ๆ ของอะลูมิเนียม โดยมีหมู่ไฮดรอกซิล ( $OH$ ) เป็นลิแกนด์ ดังสมการ (1) และ (2)



ไอออนดังกล่าวซึ่งมีอะลูมิเนียมเพียงอะตอมเดียวเป็นองค์ประกอบ เรียกว่า Monomeric Hydroxo Complex นอกจากนี้ไอออนต่าง ๆ ยังมีความสามารถในการรวมตัวกันเป็นสารประกอบที่มีอะลูมิเนียมมากกว่า 1 อะตอม เรียกว่า Polymeric Hydroxo Complex เช่น  $Al_{13}(OH)_{34}^{+5}$ ,  $Al_8(OH)_{20}^{+4}$  และ  $Al_6(OH)_{15}^{+3}$  เป็นต้น โดยพีเอชจะเป็นตัวกำหนดชนิดของไอออน ถ้าพีเอชต่ำจะมี  $Al^{3+}$  มากที่สุด เมื่อพีเอชเข้าใกล้ความเป็นกลาง  $Al(OH)_3$  ซึ่งเป็นของแข็งจะเกิดขึ้นมากกว่าไอออนอื่น ๆ และเมื่อพีเอชอยู่ในช่วงความเป็นด่าง ไอออนคอมเพล็กซ์จะมีประจุลบ

กลไกการแตกตัวให้  $Al^{3+}$  และคอมเพล็กซ์ไฮดรอกไซด์อื่น ๆ จะรวมกับอนุภาคคอลลอยด์และทำลายประจุลบของอนุภาคคอลลอยด์จนสามารถจับกันกลายเป็นอนุภาคใหญ่ได้นอกจากนี้  $Al(OH)_3$  ซึ่งเป็นตะกอนเล็ก ๆ สามารถรวมตัวกับอนุภาคอื่นที่มีประจุบวก เกิดเป็นตะกอนที่มีประจุบวกไปจับกับอนุภาคคอลลอยด์กลายเป็นตะกอนใหญ่ได้เช่นกัน ดังนั้นพีเอชของน้ำจะมีความสำคัญมากในการเกิดกลไกในการตกตะกอน

1.1.2) liquid alum จะมี water-soluble alumina ( $Al_2O_3$ ) อยู่ 5.8-8.5 % ราคาถูกกว่าชนิดแรก

1.1.3) sodium aluminate ประกอบด้วย  $Al_2O_3$  ซึ่งทำให้อยู่ตัวด้วย NaOH สารตัวนี้ไม่ใช่โคต ๆ มักใช้คู่กับสารส้ม เพื่อให้ได้ผลที่ดี

1.1.4) activated silica มักใช้ร่วมกับ alum ทำให้การตกตะกอนเกิดเร็วขึ้น

1.1.5) PACI เป็นโคแอกกูแลนต์ที่ได้รับการพัฒนาขึ้น ช่วงพีเอชในการเกิดปฏิกิริยาที่กว้างกว่าโคแอกกูแลนต์ตัวอื่น ๆ สร้างตะกอนได้เร็วกว่าสารส้ม ใช้เวลาในการกวนเร็วน้อยกว่า เป็นสารโมเลกุลใหญ่ มีสูตรโมเลกุลเป็น  $[Al_n(OH)_mCl_{3n-m}]$  ( $n=2,2.7$   $m=3.9,1.0$ )

1.2) กลุ่มที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบหรือไฮดรอกไซด์โคแอกกูแลนต์

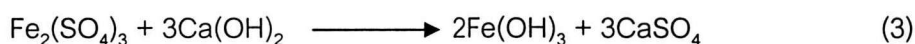
ไฮดรอกไซด์โคแอกกูแลนต์จะทำงานในสภาวะที่มีพีเอชต่ำกว่าอะลูมิเนียมโคแอกกูแลนต์และสามารถทำงานในช่วงพีเอชที่กว้างกว่า คือ 4-11 นอกจากนี้  $Fe(OH)_3$  floc ยังหนักกว่า  $Al(OH)_3$  floc ทำให้ตกตะกอนได้เร็วกว่า ไฮดรอกไซด์โคแอกกูแลนต์ที่นิยมใช้กัน ได้แก่

1.2.1) Ferrous Sulphate ( $FeSO_4$ )  $FeSO_4$  จะทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดเป็น  $Fe(OH)_3$  ในสภาวะที่พีเอชสูงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ถ้าพีเอชต่ำกว่า 8.5 ดังนั้นจึงมักเติมปูนขาวลงไป

1.2.2) Ferric Sulfate ( $Fe_2(SO_4)_3$ ) ละลายได้ดีในน้ำอุ่น และจะทำปฏิกิริยากับความเป็นด่างในน้ำหรือกับปูนขาวที่เติมลงไป เกิดเป็น  $Fe(OH)_3$  floc ในกรณีของ  $Fe_2(SO_4)_3$  ไม่จำเป็นต้องใช้ออกซิเจนในน้ำเพื่อออกซิไดส์ ตามทฤษฎี

1 ppm ของ  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  จะทำปฏิกิริยากับ 0.75 ppm alkalinity as  $\text{CaCO}_3$   
0.58 ppm 95% hydrate lime

ดังสมการ (3)



โดยทั่ว ๆ ไป Ferric coagulant จะทำงานที่พีเอชต่ำกว่าเกลือของอะลูมิเนียมและสามารถใช้ในช่วงพีเอชที่กว้างกว่าคือ ตั้งแต่ 4-11 ที่พีเอชต่ำ Ferric coagulant ใช้ได้ดีในการกำจัดสีและที่พีเอชสูง ๆ Ferric coagulant ก็ใช้ได้ดีในการกำจัดเหล็ก แมงกานีส ซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดสี นอกจากนี้  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  floc ยังหนักกว่า  $\text{Al}(\text{OH})_3$  floc และตกตะกอนได้เร็วกว่า

ข้อดีของ Ferric coagulant เปรียบเทียบกับ Aluminum coagulant คือ  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  floc จะไม่กลับมาละลายที่ค่าความเป็นด่างสูง ๆ อย่างไรก็ตามเนื่องจากต้องใช้ที่พีเอชสูงทำให้เปลืองค่า จึงมักใช้กับน้ำที่ผ่านการกำจัดความกระด้างด้วยปูนขาวเท่านั้น

1.2.3) Ferric Chloride ( $\text{FeCl}_3$ ) มีฤทธิ์กัดกร่อน ถ้ามีความเข้มข้นอยู่ด้วย  $\text{FeCl}_3$  จะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ในน้ำ เกิดเป็น  $\text{Fe}(\text{OH})_3$

การที่เกลือของเหล็กและอะลูมิเนียมเหมาะที่จะใช้เป็นตัวตกตะกอน เพราะมีคุณสมบัติในการตกตะกอนคอลลอยด์ได้มากกว่าตัวอื่น ทั้งนี้เพราะการตกตะกอนของคอลลอยด์จะมีผลโดยอิออนอิเล็กโตรไลต์ที่เติมลงไปมีประจุตรงข้ามกับอนุภาคคอลลอยด์ และผลที่เกิดจากอินเหล่านี้นะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนประจุบนตัวของมัน

1.3) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )

แคลเซียมไฮดรอกไซด์ หรือปูนขาวผึ่งน้ำ เป็นสารเคมีที่ใช้กันมากในการตกตะกอนผลึก ความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยทำให้เกิดตกตะกอนผลึกในรูปหินปูน การเก็บรักษาจึงค่อนข้างยุ่งยาก การบ่อนปูนขาวผึ่งน้ำ จะต้องให้ในลักษณะกึ่งแข็งกึ่งเหลว (slurry) ข้อดีในการใช้ปูนขาวผึ่งน้ำคือมีราคาถูก เมื่อเติมลงไปน้ำ จะทำปฏิกิริยากับด่างและฟอสฟอรัสที่มีอยู่กลายเป็นสารตัวใหม่ ตกตะกอนชะพาเอาสารแขวนลอยตกลงมาด้วย ดังสมการ (4) และ (5)



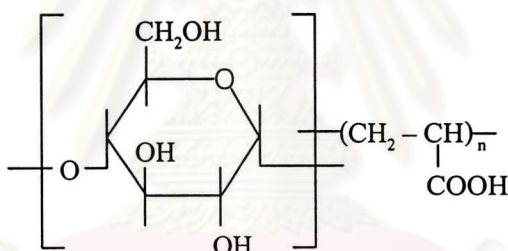


## 2) สารสร้างตะกอนประเภทอินทรีย์

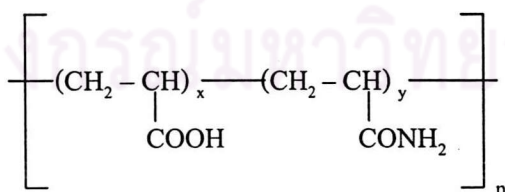
ในบางครั้งการใช้สารสร้างตะกอนเพียงอย่างเดียวอาจได้ผลไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นจึงมีการเติมการช่วยตกตะกอนร่วมด้วยเพื่อให้การตกตะกอนดียิ่งขึ้น โดยพอลิเมอร์เป็นสารที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน อาจมีประจุบวก หรือลบ หรือไม่มีประจุก็ได้ การนำพอลิเมอร์มาใช้นั้นอาจเติมพอลิเมอร์ก่อนที่จะใช้สารตกตะกอนอนินทรีย์เพื่อให้พอลิเมอร์นั้นเป็นเป้าสัมผัสในกรณีที่มีน้ำมีคอลลอยด์ต่ำ หรือเติมภายหลังการเติมสารตกตะกอนอนินทรีย์เพื่อช่วยให้ฟล็อกมีน้ำหนักและตกตะกอนได้ง่ายโดยกลไกในการตกตะกอนเกิดได้ 2 วิธี คือ การใช้พอลิเมอร์ประจุบวกทำลายประจุลบบนอนุภาคคอลลอยด์ กรณีนี้อาจใช้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำก็ได้ และการใช้พอลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อม ในกรณีนี้พอลิเมอร์ต้องมีขนาดใหญ่เพื่อให้สามารถใช้เป็นสะพานเชื่อมระหว่างอนุภาคต่าง ๆ ได้อย่างกว้างขวาง แข็งแรง พอลิเมอร์ที่ใช้จะต้องมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ๆ และมักเป็นพอลิเมอร์ชนิดประจุลบหรือไม่มีประจุ ในการศึกษาครั้งนี้ใช้แป้งมันสำปะหลัง กราฟต์พอลิอะคริลิกแอซิด และพอลิ(อะคริลิกแอซิด-โค-อะคริลาไมด์)

2.1) แป้งมันสำปะหลังกราฟต์พอลิอะคริลิกแอซิด เป็นพอลิเมอร์ที่มีประจุลบเนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิล และหมู่กรดคาร์บอกซิลิก มีสูตรโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.4 การเตรียมกราฟต์พอลิเมอร์ชนิดนี้ทำโดยใช้แป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 10% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับกรดอะคริลิกแอซิด 8 ลิตร โดยมีเอ็น, เอ็น-เมทิลีนบิสอะคริลาไมด์ 0.4% โดยน้ำหนักมอนอเมอร์ เป็นสารเชื่อมขวาง และมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และกรดแอสคอร์บิก เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาแบบบริดจิง หลังจากนั้นนำแป้งมันสำปะหลังกราฟต์พอลิอะคริลิกแอซิดที่ได้มาสะพอนิไฟด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งจะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับน้ำ จากนั้นทำการตกตะกอนเป็นก้อนแข็ง (Faullimmel และคณะ, 1988) ข้อดีของพอลิเมอร์ชนิดนี้คือสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายเนื่องจากมีโมเลกุลของแป้งมันสำปะหลัง จึงทำให้การกำจัดทำได้ง่าย

2.2) พอลิ(อะคริลิกแอซิด-โค-อะคริลาไมด์) เป็นพอลิเมอร์ที่มีประจุลบเนื่องจากหมู่คาร์บอกซิลิก มีสูตรโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.5 การเตรียมโคพอลิเมอร์ชนิดนี้ทำโดยใช้กรดอะคริลิก 5.5 มล. (สะเทินร้อยละ 40 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์) กับอะคริลาไมด์ 1.42 กรัม โดยเชื่อมขวางโซ่พอลิเมอร์ด้วยเอ็น, เอ็น-เมทิลีนบิสอะคริลาไมด์ และมีแอมโมเนียมเพอร์ซัลเฟต/เอ็น, เอ็น, เอ็น, เอ็น-เทตระเมทิลเอทีลีนไดเอมีนเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา สังเคราะห์ผ่านกระบวนการฟองแก๊สโดยใช้โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเป็นสารช่วยใช้เกิดฟองแก๊สเพื่อให้เกิดรูพรุน และทำให้เสถียรด้วยสารละลายแอลเอฟ 127 จากนั้นนำพอลิเมอร์ที่ได้มาทำตกตะกอนด้วยเมทานอล (Kiatkamjornwong และคณะ, 2004) ปัจจุบันมีการนำพอลิ(อะคริลิกแอซิด-โค-อะคริลาไมด์) มาผลิตในเชิงพาณิชย์เพื่อใช้เป็นสารช่วยในการตกตะกอน เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เตรียมง่าย และมีราคาถูก



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของแป้งมันสำปะหลังกราฟต์พอลิอะคริลิกแอซิด



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของพอลิ(อะคริลิกแอซิด-โค-อะคริลาไมด์)

ตัวอย่างของพอลิเมอร์ทางการค้าที่ถูกนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เช่น Magnafloc-2025 ของบริษัท MC Industrial Chemical เป็นพอลิเมอร์ชนิดแอนไอออนของพอลิ (ไฮเดียมอะคริเลต-โค-อะคริลาไมด์) มีลักษณะเป็นผงสีขาว เมื่อนำมาใช้จำเป็นต้องเตรียมในรูป สารละลายเข้มข้น 0.05 – 0.1% โดยความเข้มข้นที่เหมาะสมในการนำไปใช้เป็นสารช่วยตกตะกอน คือ 1-4 ppm นอกจากนี้ยังมีพอลิเมอร์ทางการค้าอีกหลายชนิดที่ถูกนำมาใช้ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 พอลิเมอร์ที่ผลิตในเชิงพาณิชย์

ชื่อทางพาณิชย์	สารพอลิเมอร์ในผลิตภัณฑ์
SUNWET	HSPAA, PAA
SUMIKAGEL	PVA-b-PAA
AQUAPLEN P 840	PEO
KI gel	MA-co-IB
LANSIL	HPAN
WATER-LOCK	HSPAN
AQUALON	CMC

ที่มา: Kim และคณะ (1989)



### 2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการตกตะกอน

ในกระบวนการตกตะกอนจะดำเนินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการดังต่อไปนี้

- 1) ชนิดของคอลลอยด์ในน้ำ ถ้าหากทราบชนิดของคอลลอยด์จะได้เลือกใช้สารที่ช่วยในการตกตะกอนได้อย่างเหมาะสม
- 2) ชนิดของสารที่ใช้ในการตกตะกอน สารเคมีแต่ละชนิดจะมีความเหมาะสมกับคอลลอยด์ต่างชนิดไม่เหมือนกัน ตลอดจนคุณสมบัติในการตกตะกอนและปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในน้ำ ลักษณะของฟล็อก ความเร็วในการตกตะกอน ราคา ความยากง่ายในการใช้งาน ดังนั้นจะต้องมีการเลือกใช้งานให้เหมาะสมระหว่างชนิดคอลลอยด์และสารที่ใช้ในการตกตะกอน
- 3) พีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอน สารที่ใช้ในการตกตะกอนแต่ละชนิดจะให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดพีเอชหนึ่งเท่านั้น ถ้าปฏิกิริยาที่เกิดไม่อยู่ในช่วงพีเอชนี้ ผลการตกตะกอนจะเกิดขึ้นไม่ดี จึงต้องมีการปรับพีเอชให้ได้ตามต้องการของสารเคมี
- 4) ปริมาณของสารที่ช่วยให้ตกตะกอน มีความสำคัญเกี่ยวกับความสามารถในการตกตะกอน เพราะธรรมชาติสารใดก็ตามถ้าค่าผลคูณไอออนโปรดัก (ion product) ไม่เกินค่า  $K_{sp}$  (หรือค่าคงที่ในการละลาย) ของสารนั้นแล้ว สารนั้นจะไม่ตกผลึกตะกอนออกมาในน้ำ แต่ถ้าเกินค่า  $K_{sp}$  มันจะตกผลึกตะกอนทันที ดังนั้น ปริมาณสารที่ช่วยในการตกตะกอนจะต้องเหมาะสมต่อการตกตะกอนในแต่ละครั้ง ถ้ามากเกินไปก็จะทำให้อนุภาคกลับมีเสถียรภาพใหม่
- 5) เวลาและความแรงของการผสม การทำให้สารเคมีละลายน้ำอย่างทั่วถึงและเกิดการสร้างตะกอน จำเป็นต้องกวนน้ำอย่างรวดเร็วด้วยเวลาที่สั้น เพื่อให้สารเคมีกระจายตัวออกไปทำปฏิกิริยาแขวนลอยได้ดี ปฏิกิริยากังกล่าวนี้ใช้เวลาน้อยกว่ากระบวนการรวมตะกอน ดังนั้น ถ้าการใช้การกวนที่รุนแรงมากเท่าใดก็จะช่วยประหยัดเวลามากขึ้นเท่านั้น ในทางตรงข้าม เมื่อต้องการให้เกิดการรวมตัวของตะกอน จำเป็นต้องใช้การกวนอย่างช้า ๆ เพื่อไม่ให้ตะกอนแตก แต่จะใช้เวลาที่นานขึ้นเพื่อให้ตะกอนที่เกิดขึ้นมีโอกาสมาสัมผัสกันได้มากที่สุด

## 2.5 ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

บริษัท นันยางการทออุตสาหกรรม จำกัด ตั้งอยู่เลขที่ 19 หมู่ 5 ถ. เศรษฐกิจ 1 ตำบลท่าใหม่ อำเภอกระทุ่มแบน จังหวัดสมุทรสาคร ดำเนินธุรกิจในการย้อมเส้นใยและผืนผ้า รวมถึงการทอผ้าตามความต้องการของลูกค้า ซึ่งทางบริษัทส่งออกผลิตภัณฑ์ไปยังต่างประเทศ 85% และที่เหลือผลิตเพื่อจำหน่ายภายในประเทศ โดยมีกำลังผลิต 1800 ตัน/เดือน สำหรับการย้อมสีผืนผ้า และ 500 ตัน/เดือน สำหรับการย้อมเส้นด้าย น้ำเสียที่เกิดขึ้นจากการย้อมจะถูกรวบรวมลงสู่บ่อรับน้ำเสียรวมเพื่อทำการปรับสภาพน้ำเสียให้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยมีปริมาณน้ำเสียเข้าสู่บ่อรับน้ำเสียรวมประมาณ 6,500-7,500 ลบ.ม./วัน หลังจากนั้นน้ำเสียจากบ่อน้ำเสียรวมจะผ่านเข้าสู่ระบบบำบัดแบบ Activated Sludge ซึ่งมี 2 หน่วยบำบัด ซึ่งน้ำเสียก่อนและภายหลังการบำบัดจะทำการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ดังนี้

- อุณหภูมิ ดีไอ เอสวี 30 พีเอช ทำการตรวจวัดทุกวัน
- บีโอดี ซีโอดี เอสเอส ดีเอส ทำการตรวจตรวจวัดทุกสัปดาห์
- ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส กรีน/ออย ทำการตรวจวัดทุก 6 เดือน

โดยข้อมูลลักษณะน้ำเสียทั้งก่อนและภายหลังการบำบัด แสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ลักษณะน้ำเสียก่อนและหลังการบำบัด ในช่วงเดือนมกราคม ถึง มีนาคม พ.ศ. 2547

ว/ด/ป	น้ำเข้า					น้ำออกบ่อ 1					น้ำออกบ่อ 2				
	pH	BOD	COD	SS	DS	pH	BOD	COD	SS	DS	pH	BOD	COD	SS	DS
05/1/47	10.0	395	771	76	7170	8.50	48	270	88	6520	8.50	58	301	118	6540
13/1/47	9.50	432	845	70	5830	8.00	43	241	50	4690	8.00	47	287	88	4800
26/1/47	9.00	484	1066	186	3960	8.00	125	354	182	4150	8.00	131	378	192	4360
02/2/47	9.67	293	500	140	6520	8.03	63	375	158	5400	8.07	72	355	140	5580
09/2/47	9.66	652	1027	158	7750	8.36	53	373	130	6300	8.36	47	389	142	6090
16/2/47	7.32	277	667	184	3340	8.39	28	292	244	6620	8.10	23	315	196	6700
23/2/47	9.21	400	478	174	2080	8.50	51	199	186	3600	8.34	60	266	138	3440
01/3/47	8.18	414	426	166	3740	7.79	40	250	190	6260	7.78	38	245	234	6120
04/3/47	-	-	-	310	7480	-	-	-	256	5790	-	-	-	258	5940
08/3/47	9.53	320	750	230	5860	8.51	26	295	196	6150	8.60	26	295	220	6080
15/3/47	9.20	331	850	156	4690	8.36	50	380	294	6470	8.78	51	461	268	6320
	ค่ามาตรฐาน					5.5-9.0	60	400	50	3000	5.5-9.0	60	400	50	3000

หมายเหตุ: BOD, COD, SS และ DS มีหน่วยเป็น mg/l







มก./ลบ.ตม. ค่าพีเอช 7 ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสี ความขุ่น ของแข็งแขวนลอย ซีโอดีและปรอท เท่ากับ ร้อยละ 99.8, 99.6, 99.7, 84.8 และ 85.1 ตามลำดับ และเมื่อทดลองบำบัดน้ำเสียจริงประสิทธิภาพการบำบัดสี ความขุ่น ของแข็งแขวนลอย ซีโอดีและปรอท เท่ากับร้อยละ 99.8, 99.7, 99.8, 76.8 และ 72.4 ตามลำดับ ส่วนการใช้เฟิร์สซัลเฟตในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าเมื่อใช้สาร 250 มก./ลบ.ตม. ค่าพีเอช 9 ให้ประสิทธิภาพการบำบัดเฉลี่ยร้อยละ 99.9, 99.8, 99.8, 93.7 และ 88.6 ตามลำดับ และเมื่อนำมาบำบัดน้ำเสียจริงประสิทธิภาพการบำบัดสี ความขุ่น ของแข็งแขวนลอย ซีโอดีและปรอท เท่ากับร้อยละ 99.9, 99.8, 99.8, 77.6 และ 75.8 ตามลำดับ และเมื่อคำนวณค่าใช้จ่ายในการดำเนินการบำบัดน้ำเสียโดยใช้สารส้มและเฟิร์สซัลเฟต พบว่ามีค่าใช้จ่ายใกล้เคียงกันคือ 11 และ 10 บาท/ลบ.ม. ตามลำดับ

อริศรา (2539) ศึกษาสารดูดซับร่วมกับสารส้มในการกำจัดสีจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ โดยในส่วนของ การทดลองด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าสารส้มสามารถกำจัดสีได้ค่อนข้างดีสำหรับสีแอซิดทั้ง 2 ชนิด คือ Telon Blue AFN และ Nylosan Blue NGL สีไดเรกต์ทั้ง 2 ชนิด คือ Sirirus Supra Blue FBGLN และ Indosal Grey SF-BL และสีรีแอกทีฟ Drim Blue-3LR ประสิทธิภาพในการกำจัดสีอยู่ในช่วงร้อยละ 80.0-96.00 ส่วนสีรีแอกทีฟชนิด Levafix Navy Blue E-150 และสีเบสิกทั้ง 2 ชนิด คือ Maxilon Blue GRL-300 และ Maxilon Red GRL-150 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีอยู่ในช่วงร้อยละ 1.0 - 11.0 ส่วนการใช้ถ่านกัมมันต์ พบว่าสามารถดูดซับสีประเภทแคทไอออนิกได้ดีกว่าสีแอนไอออนิก และซีเถ้าลอยสามารถดูดซับสีได้ทุกชนิดในประสิทธิภาพที่ค่อนข้างสูงยกเว้นสี Levafix Navy Blue E-150 และเมื่อนำสารส้มมาใช้ร่วมกับถ่านกัมมันต์ในการลดสีแอซิด สีไดเรกต์ และสีรีแอกทีฟ ซึ่งเป็นสีที่มีประจุลบ พบว่าเมื่อตกตะกอนด้วยสารส้มมีประสิทธิภาพที่สูงแต่เมื่อใส่ถ่านกัมมันต์ลงไปกลับทำให้ประสิทธิภาพลดลงเล็กน้อย ยกเว้น Nylosan Blue NGL และ Drim Blue-3LR ในขณะที่สีเบสิกซึ่งเป็นสีในกลุ่มประจุบวก การใช้สารส้มร่วมกับถ่านกัมมันต์จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้สารส้มเพียงอย่างเดียว

พัชราภรณ์ (2541) ศึกษาการกำจัดสีน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีด้วยพอลิเมอร์ประจุบวก 2 ชนิด ได้แก่ Lamfloc 1525 และ Zentrifloc 95 โดยทำการกำจัดสารละลายสีย้อม 3 ชนิด ได้แก่ สีแคว้ต YELLOW 5GF สีแคว้ต BLUE RS และ สีรีแอกทีฟ BLUE GNE พบว่า Lamfloc 1525 ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีดีกว่า Zentrifloc 95 โดยสามารถกำจัดสีย้อมได้ถึง 99.01, 98.06 และ 96.42% ตามลำดับ และเมื่อนำ Lamfloc 1525 มาใช้ในการกำจัดสีในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยเปรียบเทียบกับการใช้สารส้ม โดยน้ำทิ้งที่ใช้ได้แก่ น้ำทิ้งเว้ตโทนสีเหลือง น้ำทิ้งเว้ตโทนสีน้ำเงิน และน้ำทิ้งรีแอกทีฟโทนสีน้ำเงิน พบว่า Lamfloc 1525 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีน้ำทิ้งได้ 97.61, 91.91 และ 96.77% ตามลำดับ ส่วนสารส้มมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีน้ำทิ้งได้ 82.70, 80.95 และ 40.06% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า Lamfloc 1525 ให้ผลในการกำจัดสีทุกชนิดได้ดีกว่าสารส้ม

ศิริอุมา (2541) ศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมีและกระบวนการดูดซับด้วยคาร์บอน พบว่าอะลูมิเนียมซัลเฟตเป็นสารสร้างตะกอนให้ประสิทธิภาพการกำจัดสี ซีไอดี ความขุ่น และของแข็งแขวนลอยเป็น 66.42, 64.09, 94.78 และ 52.07% ตามลำดับ ขณะที่กระบวนการดูดซับด้วยคาร์บอนมีประสิทธิภาพการกำจัดสี ซีไอดี ความขุ่น และของแข็งแขวนลอยเป็น 60.03-83.31, 68.15-84.91, 44.4-70.3, และ 58.34-83.32% ตามลำดับ เมื่อใช้กระบวนการตกตะกอนทางเคมีร่วมกับกระบวนการดูดซับคาร์บอนพบว่ากำจัดสี ซีไอดี ความขุ่น และของแข็งแขวนลอยเป็น 98.73-99.94, 79.99-89.44, 99.16-99.54 และ 73.81-82.74% ตามลำดับ ดังนั้นจึงควรเลือกกระบวนการตกตะกอนทางเคมีร่วมกับกระบวนการดูดซับด้วยคาร์บอนในการบำบัดน้ำเสียจึงจะเหมาะสมที่สุด แต่การใช้กระบวนการดูดซับด้วยคาร์บอนควรคำนึงถึงความเป็นไปได้ทางด้านการลงทุน เนื่องจากค่าใช้จ่ายการบำบัดอยู่ในช่วง 198.76-257.21 บาท/ลบ.ม.

รัตนา (2543) ได้สังเคราะห์พอลิ(อะครีลิกแอซิด-โค-อะครีลาไมด์) ขึ้นในตัวเองปฏิกิริยาไรตอกซ์ พบว่า ค่าการดูดซึมน้ำที่สูงสุดที่วัดได้จากการสังเคราะห์พอลิเมอร์คือ  $2,196 \pm 14$  เท่า ของน้ำหนักแห้ง และเมื่อนำมาทำเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างพอลิเมอร์กับอะลูมิเนียม



ซัลเฟต พบว่า สารประกอบเชิงซ้อนนี้มีความสามารถในการลดความขุ่นได้ดีกว่าการใช้ อะลูมิเนียมเพียงอย่างเดียว

สวีณา (2543) ศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี พบว่าการใช้พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์มีประสิทธิภาพในการลดค่าซีไอดี บีไอดี และของแข็งแขวนลอยได้ 51.9, 79.39, และ 74.48% ตามลำดับ ให้ค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแตนซ์เพิ่มขึ้น 47.05% และพีเอชหลังการบำบัดมีค่า 5.48 เมื่อใช้เฟอริกซัลเฟต ประสิทธิภาพในการลดค่าซีไอดี บีไอดี และของแข็งแขวนลอยเป็น 57.8, 77.01% และ 62.06% ตามลำดับ ให้ค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแตนซ์เพิ่มขึ้น 3.30% และพีเอชหลังการบำบัดมีค่า 4.11 ส่วนพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์มีประสิทธิภาพในการลดค่าซีไอดี บีไอดี และของแข็งแขวนลอยได้ 48.3, 74.11% และ 63.49% ตามลำดับ ให้ค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแตนซ์เพิ่มขึ้น 39.76% และพีเอชหลังการบำบัดมีค่า 12.01 แสดงให้เห็นว่าพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์มีประสิทธิภาพในการลดค่า บีไอดี ของแข็งแขวนลอย และสีได้ดีกว่าสารสร้างตะกอนอีก 2 ชนิด แต่การลดค่าซีไอดีด้วยเฟอริกซัลเฟตจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า

ชนิษฐา (2544) ได้ศึกษาการกำจัดสีดีสเพิร์ส สีไดเร็กต์ และสีรีแอกทีฟ จากน้ำทิ้งย้อมผ้า 2 แห่ง ได้แก่น้ำทิ้งสังเคราะห์จากการย้อมผ้าจริงในห้องปฏิบัติการ โดยใช้สารตกตะกอน 5 ชนิดคือ อะลูมิเนียมซัลเฟต พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ เฟอริกคลอไรด์ เฟอริกซัลเฟต และเฟอริกซัลเฟต พบว่า พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์สามารถกำจัดสีดีสเพิร์ส Dianix Blue FRL-E 150 ได้ดีที่สุด โดยสามารถลดสีได้ 97.47% ลดซีไอดีได้ 69.23% เฟอริกซัลเฟตสามารถกำจัดสีไดเร็กต์ Solophenyl Blue BL ได้ดีที่สุด โดยสามารถลดสีได้ 100.00% ลดซีไอดีได้ 71.19% และเฟอริกคลอไรด์สามารถกำจัดสีรีแอกทีฟ Levafix Navy Blue ได้ดีที่สุด โดยสามารถลดสีได้ 98.76% ลดซีไอดีได้ 66.66%

Kuo (1992) ศึกษาการกำจัดสีย้อม โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับเฟอริกซัลเฟต ซึ่งเรียกว่า ฟেন্টอน รีเอเจนต์ (Fenton's reagent) โดยทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์จากสีย้อม 5 ประเภท คือ สีย้อมดีสเพิร์ส สีย้อมรีแอกทีฟ สีย้อมไดเร็กต์ สีย้อมแอซิด และสีย้อมเบสิก ซึ่งใช้มากในอุตสาหกรรม ในการศึกษาดังกล่าวพบว่า พีเอชมีผลต่อการกำจัดสี โดยพีเอชที่เหมาะสม



คือ พีเอชต่ำกว่าหรือเทียบเท่ากับ 3.5 ส่วนปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเพอร์ซัลเฟต ขึ้นกับประเภทของสีย้อม คือ 584 และ 250 มก./ล. ตามลำดับสำหรับสีย้อมรีแอกทีฟ 292 และ 83 มก./ล. ตามลำดับสำหรับสีย้อมไดเรกต์ 875 และ 500 มก./ล. ตามลำดับสำหรับสีย้อมแอซิด 292 และ 500 มก./ล. ตามลำดับสำหรับสีย้อมเบสิก 292 และ 333 มก./ล. ตามลำดับสำหรับสีย้อมดิสเพิร์ส นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เร็วขึ้น และควรอยู่ประมาณ 50 องศาเซลเซียส วิธีนี้สามารถกำจัดสีแต่ละประเภทได้ประมาณ 95-99% และกำจัดซีโอดีได้ประมาณ 82-96%

Judkin และคณะ (1978) ได้ทดลองการกำจัดสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมีโดยการใช้ปูนขาว แมกนีเซียมคาร์บอเนต และแมกนีเซียมคาร์บอเนตร่วมกับปูนขาว โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์จากสีย้อม 3 ชนิด คือ สีย้อมแวกซ์ สีย้อมดิสเพิร์ส และสีย้อมซัลเฟอร์ จากการทดลองดังกล่าวพบว่า การใช้แมกนีเซียมคาร์บอเนตร่วมกับปูนขาวจะได้ผลดีกว่าการใช้สารเคมีชนิดเดียวในการกำจัดสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ทั้ง 3 ประเภท ยกเว้นสีประเภทซัลเฟอร์ การใช้ปูนขาวเพียงอย่างเดียวก็สามารถกำจัดสีได้

Henry และคณะ (1987) ได้แสดงผลการทดลองการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียฟอกย้อมผสม โดยการทำการทดสอบด้วยสารส้มอย่างเดียว สารส้มกับปูนขาว เพอร์ซัลเฟตอย่างเดียว เพอร์ซัลเฟตกับปูนขาว ซึ่งสามารถกำจัดสีย้อมผสมดังกล่าวได้ 97.6, 97.6, 96.1 และ 99.1% ตามลำดับ โดยใช้ปริมาณสารส้มอย่างเดียว 600 มก./ล. สารส้ม 40 มก./ล. กับปูนขาว 5,000 มก./ล. เพอร์ซัลเฟตอย่างเดียว 2,000 มก./ล. และเพอร์ซัลเฟต 2,600 มก./ล. กับปูนขาว 5,000 มก./ล. ตามลำดับ

Koprivanac และคณะ (1993) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสีน้ำเสียจากโรงงานผลิตสีด้วยกระบวนการตกตะกอนโดยใช้ตัวตกตะกอนอนินทรีย์คือ  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  และพอลิเมอร์ชนิดประจุบวก ซึ่งมีชื่อทางการค้าว่า Levafloc R และ Colfloc 3915 สำหรับตัวอย่างน้ำเสียเป็นสีประเภทรีแอกทีฟ ซึ่งมีทั้งหมด 6 ตัวอย่างคือ Yellow 143, Red 183, Red 120, Brown 37, Blue 182 และ Blue 204 โดยทำการศึกษาอิทธิพลของพีเอช ชนิดของตัวตกตะกอนและอุณหภูมิ ผลการศึกษาพบว่า ช่วงพีเอชที่เหมาะสมสำหรับพอลิเมอร์คือช่วง 6.0-7.0 และสำหรับ

ตัวตกตะกอนอินทรีย์อยู่ในช่วง 2.4-4.0 ปริมาณของพอลิเมอร์ที่เหมาะสมคือ 0.5-0.8% และสำหรับตัวตกตะกอนอินทรีย์คือ 0.14-0.18 M เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวตกตะกอนทั้ง 3 ชนิดพบว่าพอลิเมอร์ 2 ชนิดมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีใกล้เคียงกันคือสามารถลดสีได้เกือบ 100% และมีประสิทธิภาพดีกว่าตัวตกตะกอนอินทรีย์ และเมื่อศึกษาถึงผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการตกตะกอนโดยศึกษาในช่วง 20-80 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดสีจะลดลง ดังนั้นในการกำจัดสีด้วยตัวตกตะกอนอุณหภูมิไม่ควรเกิน 30 องศาเซลเซียส และเมื่อนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมาทำการวัดค่า ทีไอซี บีไอดี และซีไอดี พบว่าตัวตกตะกอนอินทรีย์สามารถลดทีไอซี และซีไอดีได้มากกว่าพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด

Altinbas และคณะ (1995) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ ซึ่งน้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียรวม โดยสีที่ใช้ส่วนมากจะเป็นประเภทรีแอคทีฟ และไดเรกต์ การบำบัดใช้กระบวนการทางเคมีและระบบแอกติเวตเตดสลัดจ์ ตามลำดับ โดยตัวตกตะกอนที่ใช้คือสารส้ม เฟริกคลอไรด์ ปูนขาว และแคลเซียมคาร์บอเนต จากผลการทดลองพบว่าที่พีเอช 6.0 การใช้ปูนขาวเพียงอย่างเดียวลดซีไอดีได้ 25-35% และเมื่อมีการใช้เฟริกคลอไรด์ 15 ml/L ร่วมกับปูนขาวจะลดซีไอดีได้เพิ่มขึ้นเป็น 32-45% และเมื่อเปลี่ยนมาใช้สารส้มร่วมกับปูนขาวจะให้ผลในการลดซีไอดีได้ดีกว่าการใช้เฟริกคลอไรด์ร่วมกับปูนขาว ส่วนการใช้เฟริกคลอไรด์ร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตพบว่า ลดซีไอดีได้เพียง 20-35% แต่เมื่อเปลี่ยนจากแคลเซียมคาร์บอเนตมาเป็นปูนขาวพบว่าสามารถลดซีไอดีได้สูงถึง 40% สรุปได้ว่าสารส้มร่วมกับปูนขาวสามารถลดซีไอดีได้ดีที่สุด และเมื่อนำน้ำเสียขั้นแรกมาบำบัดด้วยระบบแอกติเวตเตดสลัดจ์สามารถที่จะลดซีไอดีได้ 60-90% ซึ่งจากการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าการใช้สารส้มร่วมกับปูนขาวในการตกตะกอนแล้วตามด้วยการบำบัดด้วยระบบแอกติเวตเตดสลัดจ์สามารถกำจัดซีไอดีได้ถึง 94%

Lin และคณะ (1997) ศึกษาการใช้กระบวนการเฟนตอนร่วมกับกระบวนการตกตะกอนทางเคมีในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ 2 ชนิด คือ สีย้อมไดเรกต์ สีนํ้าเงินและสีรีแอคทีฟ สีดำ ซึ่งมีพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เป็นองค์ประกอบรวมอยู่ด้วยในปริมาณน้อยกว่า 2% จากการศึกษาพบว่าพีเอชที่เหมาะสมคือพีเอช 3.0 และอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 30 องศาเซลเซียส สำหรับปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเพอร์ซัลเฟตคือ 1,000 มก./ล. และ 200 มก./ล.



ตามลำดับ ซึ่งสามารถกำจัดสีไดเร็คต์ได้ 60% และกำจัดสีรีแอกทีฟได้มากกว่า 90% การกำจัดซีโอดีได้ 80% สำหรับสีทั้ง 2 ชนิด และเมื่อใช้กระบวนการตกตะกอนทางเคมีโดยใช้พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ 100 มก./ล. ร่วมกับพอลิเมอร์ 1 มก./ล. พบว่าช่วยลดเวลาในการตกตะกอนให้เร็วขึ้น และสามารถเพิ่มการกำจัดสีไดเร็คต์จาก 60% เป็น 90% ส่วนสีรีแอกทีฟจะมีผลเล็กน้อย เนื่องจากสามารถกำจัดสีได้ดีอยู่แล้ว และทำให้ปริมาณเหล็กในน้ำเสียลดลง

Rivas และคณะ (1998) ได้สังเคราะห์พอลิคีเลตของพอลิอะคริลิกแอซิด-โค-อะคริลาไมด์กับ Cu(II), Co(II), และ Ni(II) โดยศึกษาการเกิดพอลิคีเลตด้วย FT-IR พบว่าพอลิคีเลตเหล่านี้เป็นของแข็งมีสี ไม่ละลายในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ทั่วไป และเมื่อตรวจพอลิคีเลตด้วย FT-IR พบว่า พอลิคีเลตกับทองแดงเกิดสัญญาณที่ 1726 (C=O ของ carboxylic group) 1660 (C=O of amide) และ 1600 (N-H deformation)  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งสัญญาณสุดท้ายจะไม่มีในพอลิเมอร์ และสัญญาณสุดท้ายเกิดเนื่องจากเกิดโคออดิเนชัน นอกจากนี้ C-N ของหมู่เอไมด์ถูกแบ่งเป็น 2 แบนด์ที่ 1461 และ 1408  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งจะเห็นได้ว่าทองแดงเกิดโคออดิเนชันกับไนโตรเจนของหมู่เอไมด์ ส่วนพอลิคีเลตกับนิกเกิลและโคบอลต์ จะพบสัญญาณที่ 1550 และ 1407  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นอสมมาตรและสมมาตรของหมู่คาร์บอกซิลเลต นั้นแสดงให้เห็นว่ามีการเกิดโคออดิเนตผ่านหมู่คาร์บอกซิลิก

Liu และคณะ (2000) ได้ทดลองสังเคราะห์ Complex Polymeric Flocculant และนำมาประยุกต์ใช้ในการทำให้น้ำสะอาด โดยใช้พอลิอะคริลาไมด์-โค-อะคริลิกแอซิดทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารตกตะกอนอินทรีย์ได้แก่ อะลูมิเนียมซัลเฟต พบว่าในสารประกอบเชิงซ้อนจะมีหมู่คาร์บอกซิลอย่างอ่อน ๆ กว่าในพอลิเมอร์ และปรากฏ O-C-O ทั้งแบบไม่สมมาตรและสมมาตรที่ 1610 และ 1525  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงให้เห็นว่า หมู่คาร์บอกซิลถูกไฮดรอกซิไปเป็น carboxyl root ion นอกจากนี้ยังพบว่า C=O, C-N ในหมู่เอไมด์มีการเลื่อนจาก 1645 และ 1367  $\text{cm}^{-1}$  ไปเป็น 1690 และ 1390  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดโคออดิเนตชั้นระหว่างหมู่เอไมด์กับโลหะไอออน และเมื่อนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานกระดาษ พบว่า เมื่อใช้สารประกอบเชิงซ้อน 0.2 g/l จะทำให้เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านและลดค่าซีโอดีได้มากกว่าร้อยละ 80-90