

บทที่ 2

ทฤษฎีและสรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 การย้อมสี

โดยทั่วไปแล้วการย้อมสีมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติและคุณค่าของผ้าหรือเส้นใยให้สูงขึ้น ทำให้มีความสวยงามน่าใช้ยิ่งขึ้น วัตถุดิบที่ใช้ในการย้อมสีมักจะประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ

- สีย้อม
- สารช่วยย้อม
- วัสดุสิ่งทอหรือเส้นใย

ในกระบวนการย้อมสีนั้น การที่สีติดเส้นใยได้เพราะสารประกอบทั้ง 2 ชนิดรวมตัวกันเป็นสารประกอบใหม่ การรวมตัวของสีและเส้นใยนี้ไม่ได้ทำให้คุณสมบัติทางเคมีเปลี่ยนไป เพียงแต่เปลี่ยนคุณสมบัติทางกายภาพให้เห็นเป็นสีต่าง ๆ เท่านั้น และสารประกอบดังกล่าวอาจสลายตัวออกได้ด้วยกระบวนการอย่างใดอย่างหนึ่งซึ่งเปลี่ยนตัวสีให้เป็นสารประกอบเคมีที่มีโครงสร้างแตกต่างไปจากเดิม การย้อมสีที่ถูกต้อง สีจะต้องติดเข้าไปถึงภายในเส้นใย จะติดเฉพาะรอบนอกเท่านั้นไม่ได้ การย้อมสีโดยทั่วไปมักจะใช้น้ำเป็นสื่อ และใยผ้านั้นเมื่ออยู่ในน้ำจะพองตัวออกได้ตามปริมาณกลุ่ม OH ที่มีอยู่ โมเลกุลของสีจึงซึมเข้าไปได้ง่าย เส้นใยทุกชนิดมีจำนวนและขนาดของเส้นใยไม่เท่ากัน สีแต่ละชนิดก็มีขนาดโมเลกุลไม่เท่ากัน จึงเป็นสาเหตุอีกอย่างหนึ่งที่ทำให้สีย้อมบางตัวติดเส้นใยได้ดี บางตัวติดไม่ได้ ซึ่งนอกเหนือไปจากสาเหตุที่เกิดจากคุณสมบัติเคมีโดยตรงระหว่างตัวสีกับเส้นใย นอกจากนี้อำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใยต้องมีมากกว่าอำนาจการรวมตัวของน้ำและสี จึงจะย้อมได้ผลดี คุณสมบัติเช่นนี้ทำให้เกิดขึ้นได้เมื่อโมเลกุลของสีมีหมู่อะตอมที่เรียงตัวกันในลักษณะที่ทำให้เกิดภาวะคู่ติด (Substantivity) กับเส้นใยแล้วเกิดพันธะทางเคมี (Bond) ยึดกันแน่น อติชาติ ปานเจริญ (2527) ได้กล่าวถึงอิทธิพลเชิงเคมีที่ทำให้สียึดติดกับเส้นใย ว่าสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิด ได้แก่

- พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bond)
- แรงวานเดอร์วาลส์ (Van de Waals Forces)

- แรงไอออนิก (Ionic Forces)
- พันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond)

อิทธิพลเหล่านี้จะไม่ทำหน้าที่เพียงลำพัง จะต้องมียางน้อย 2 ชนิดขึ้นไป จึงจะทำให้สีกับเส้นใยรวมตัวกันได้ การยึดเกาะกันระหว่างสีกับเส้นใย นอกจากจะเกิดจากคุณสมบัติเฉพาะตัวของสีและเส้นใย รวมทั้งอิทธิพลต่าง ๆ ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังต้องอาศัยสารเคมีบางชนิดเข้าช่วย เพื่อให้โมเลกุลของสีย้อมและโมเลกุลของเส้นใยเกิดปฏิกิริยาระหว่างกันได้ดีขึ้นและรวดเร็วขึ้น สารเคมีดังกล่าวคือสารช่วยย้อม

2.2 สีย้อมและการจำแนกสีย้อม

อัญราพร ไสละสุต (2527) ได้จำแนกสีย้อมออกเป็นชนิดต่าง ๆ ตามหลักเกณฑ์ดังนี้

2.2.1 จำแนกตามลักษณะทางกายภาพ

สีย้อมจำแนกตามลักษณะทางกายภาพ ได้เป็น 2 ชนิด คือ

ก. สีย้อม (Dyes) หมายถึง สีย้อมที่ละลายน้ำได้

ข. ปิกเมนต์ (Pigments) หมายถึง สีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ

เนื่องจากปิกเมนต์ไม่ละลายน้ำ ดังนั้นในขั้นตอนการย้อมจะต้องทำให้ปิกเมนต์กระจายตัว (Disperse) หรือแขวนลอยในเรซินเสียก่อน จึงจะสามารถย้อมให้ติดเส้นใยได้ ดังนั้น เมื่อปิกเมนต์กระจายตัวอยู่ในรูปสารละลาย จึงเป็นการยากที่จะบอกว่าสีตัวใดเป็นสีย้อม (Dyes) และตัวใดเป็นปิกเมนต์ (Pigments) การจำแนกด้วยวิธีนี้จึงอาจทำให้เกิดความสับสนได้

2.2.2 จำแนกตามวิธีใช้

ก. สีเบสิก (Basic Dyes)

เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ ละลายน้ำได้ ย้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้เล็กน้อยหรือไม่ติดเลย เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวให้ไอออนบวก บางครั้งจึงเรียกสีชนิดนี้ว่า สีแคทไอออน ถ้าย้อมใยเซลลูโลส เส้นใยต้องย้อมด้วยสารประกอบที่สามารถก่อรูปเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำกับตัวสีได้ก่อนเพื่อให้ทำหน้าที่เป็นเสมือนหนึ่งสะพานเชื่อมระหว่างตัวสีกับเส้นใย สารประกอบนี้เรียกว่า สารช่วยติด (mordant) สีในกลุ่มนี้มีสีสดใสแต่ไม่ทนแสง

ข. สีแอซิด (Acid Dyes)

เป็นสีที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน เมื่อละลายน้ำแล้วจะแตกตัวเป็นไอออนที่มีประจุลบ บางครั้งจึงเรียกว่าสีแอนไอออน สีย้อมชนิดนี้ย้อมติดเส้นใยโปรตีนได้ในน้ำย้อมที่เป็นกรดเจือจาง ใช้ย้อมเซลลูโลสซึ่งมิใช่เซลลูโลสบริสุทธิ์ เช่น ปอ ป่าน และใยโพลีเอไมด์ได้

ค. สีมอแคนท์และพรีเมทัลไลซ์ (Mordant and Premetallized Dyes)

สีแอซิดหลายตัวสามารถก่อรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะบางชนิดได้ เช่น โครเมียม ละอองสีที่ก่อรูปบนหรือในเส้นใยภายหลังเมื่อย้อมทับด้วยเกลือของโลหะแล้วจะมีความคงทนต่อกระบวนการใช้น้ำได้ดีกว่าที่ไม่ย้อมทับ สารประกอบเชิงซ้อนที่ก่อรูปใหม่นี้ไม่ละลายน้ำ สามารถย้อมตัวสีก่อน พร้อมกันหรือภายหลังการย้อมด้วยเกลือของโลหะได้ทุกวิธี การพัฒนาตัวสีทำนองเดียวกันนี้อาจทำได้กับสีไคเรกท์ ตามทฤษฎีเชื่อกันว่า โครงสร้างของเส้นใยสามารถรวมตัวกับไอออนของโลหะก่อรูปเป็นสารประกอบใหม่ภายใน ทำให้สีคงทนดีขึ้น ตัวสีเหล่านี้เรียกว่าสีไคเรกท์ ส่วนที่เรียกว่าสีมอแคนท์ จะต้องเป็นกลุ่มสีซึ่งใช้ย้อมเฉพาะใยโปรตีน

ง. สีไคเรกท์ (Direct Dyes)

เป็นสีสังเคราะห์ชนิดแรกที่ถูกคิดค้นได้โดยไม่ต้องใช้สารช่วยติด บางครั้งจึงเรียกว่าสีย้อมฝ้าย ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะโซ (Azo) มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่ซัลโฟนิค ซึ่งทำให้ตัวสีละลายน้ำได้ สีย้อมชนิดนี้ใช้ย้อมใยเซลลูโลส ซึ่งไม่ต้องการความคงทนต่อการซักล้างมากนัก

จ. สีดีสเพอร์ส (Disperse Dyes)

เป็นสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ แต่เป็นละอองละเอียดลอยตัวอยู่ในน้ำเมื่อมีสารกระจายตัว (Dispersing Agent) ที่เหมาะสม ใช้ย้อมในน้ำย้อมธรรมดาโดยไม่ต้องใช้สารเคมีอย่างอื่นช่วยอีกนอกจากสารพา (Carrier) ให้ตัวสีเข้าไปใกล้เส้นใยเท่านั้น เหมาะสำหรับย้อมใยอะซิเตดและใยสังเคราะห์

ฉ. สีอะโซอิก (Azoic Dyes)

เป็นสารประกอบอะโซที่ไม่ละลายน้ำ ก่อรูปเป็นสีบนเส้นใยได้โดยการย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อน แล้วจึงนำไปย้อมทับอีกครั้งด้วยเกลือไดอะโซเนียม เกลื่อนี้จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบฟีนอล เกิดเป็นสารประกอบอะโซที่ให้สีบนเส้นใย สีในกลุ่มนี้นิยมใช้ย้อมใยเซลลูโลสเท่านั้น

ช. สีแว้ท (Vat Dyes)

เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ ต้องใช้สารรีดิวซ์ที่เหมาะสมมาทำให้ละลายจึงติดใยเซลลูโลสได้ สีในกลุ่มนี้เกิดจากสารประกอบอินดิโกหรือ Anthraquinone ทั้งหมด เป็นสีที่มีความคงทนดีที่สุดในบรรดาสีที่ใช้ย้อมใยเซลลูโลส นอกจากนี้ยังสามารถใช้ย้อมใยโปรตีนได้ด้วย

ข. สีกำมะถัน (Sulphur or Sulphide Dyes)

เป็นสีที่เตรียมได้จากการหลอมละลายกำมะถันหรือโซเดียมซัลไฟด์กับกรดอะมิโนและสารประกอบไนโตรอื่น ๆ ซึ่งเป็น Cyclic Hydrocarbon เช่น เบนซีน หรือแนฟทาลีน สีชนิดนี้จะติดใยเซลลูโลสได้ดีเมื่อละลายอยู่ในน้ำซึ่งมีสภาพเป็นด่างและมีสารรีดิวซ์ สารรีดิวซ์ที่นิยมใช้ได้แก่ โซเดียมซัลไฟด์

ฅ. สีออกซิไดซ์ (Oxidation Colorants)

เป็นสีที่เกิดจากการออกซิไดซ์โดยเกลืออะนิลีน โครงสร้างที่ให้สีหรือวิธีที่สารยึดติดกับใยเซลลูโลสนั้นยังไม่เป็นที่ทราบกันนัก แต่สีชนิดนี้เมื่อย้อมแล้วจะมีความคงทนมาก

ฉ. สีโอเนียม (Onium Dyes)

เป็นสีปิกเมนต์ที่ได้รับการปรับปรุงให้มีกลุ่มเคมีที่ละลายน้ำได้ มีความคงทนต่อสารเคมีและแสง วิธีการย้อมจะดำเนินการแบบเดียวกับสีแวทที่ละลายน้ำได้ โดยให้สีดูดซึมเข้าไปในผ้าแล้วเปลี่ยนกลับมาเป็นตัวสีที่ไม่ละลายน้ำอีกครั้ง ปกตินิยมใช้พิมพ์มากกว่าย้อม

ค. สีโลหะ (Mineral Colorants)

เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ ใช้ย้อมใยเซลลูโลส ให้สีต่างๆ กัน เมื่อย้อมแล้วต้องทำให้สารนี้ตกตะกอนภายในเส้นใย

ฌ. ปิกเมนต์ที่ใช้กับเรซิน (Pigment-Resin Binder System)

กระบวนการย้อมแบบนี้ใช้กับเส้นใยได้ทุกชนิด เหมาะสำหรับย้อมผ้าทั้งผืนเท่านั้นมีลักษณะคล้ายกับการพิมพ์หรือการเขียนสี โดยอัดผ้าด้วยปิกเมนต์ผสมเรซินให้เรซินเคลือบติดผิวผ้าเป็นแผ่นบาง ๆ อบให้แห้ง แล้วนำไปอบด้วยความร้อนสูงให้เรซินรวมตัวกันเป็นโมเลกุลใหญ่ ใช้ย้อมผ้าตัดเสื้อและผ้าตกแต่งเครื่องเรือน ความคงทนต่อการซักสีดีมากแต่เรซินมักจะทำให้ผิวสัมผัสของผ้าแข็งกระด้าง

จ. สีรีแอคทีฟ (Reactive Dyes)

เป็นสีที่ละลายน้ำได้ สามารถย้อมติดใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด มีคุณสมบัติ เป็นแอนไอออนเมื่ออยู่ในน้ำย้อมซึ่งเป็นด่าง โมเลกุลของสีจะทำปฏิกิริยากับหมู่ OH ในเซลลูโลสและเชื่อมโยติดกันโดยพันธะโควาเลนต์ กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส คุณสมบัติการละลาย

และดูดติดเส้นใยของตัวสีทำให้สีเข้าไปอยู่ภายในเส้นใย เมื่อเกิดปฏิกิริยา ตัวสีจะยึดติดเส้นใย ทำให้มีความคงทนต่อการซักล้าง

2.2.3 จำแนกตามโครงสร้างเคมี

การจำแนกสีแบบนี้ ใช้โครงสร้างเคมีของตัวสีเป็นหลัก สำหรับผู้ที่ไม่มีพื้นฐานทางเคมีน้อยอาจจดจำยาก อีกประการหนึ่งตัวสีซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีในการแบ่งสีตามลักษณะการย้อม บางตัวจะอยู่ในกลุ่มเคมีหนึ่ง บางตัวก็จะไปอยู่ในกลุ่มเคมีอีกกลุ่มหนึ่งอาจทำให้เกิดความสับสนขึ้นได้ แต่ถ้าสามารถจดจำได้จะทำให้ใช้ตัวสีได้ถูกต้องยิ่งขึ้น การจำแนกสีย้อมตามโครงสร้างเคมีสามารถแบ่งได้เป็น 11 ประเภท ดังนี้

- Azo Colorants
- Phenylmethane Dyes
- Xanthene Dyes
- Indigoid Dyes
- Polycyclicquinone Dyes
- Sulphur Fusion Dyes
- Amine Oxidation Colorants
- Phthalocyanine Colorants
- Onium Dyes
- Reactive Dyes
- Pigments

2.3 วัสดุสิ่งทอ

ใยผ้าซึ่งเป็นวัตถุดิบในการทอและการย้อมสามารถแบ่งแยกตามส่วนประกอบทางเคมีได้ 4 กลุ่ม ดังนี้

2.3.1 ใยเซลลูโลส

ใยเซลลูโลส จะมีทั้งที่เป็นในเซลลูโลสธรรมชาติ เช่น ฝ้าย แฟลกซ์ หรือปอ และที่เป็นใยประดิษฐ์ โดยนำเซลลูโลสธรรมชาติมาดัดแปลงให้เป็นเส้นใย เช่น เรยอน อาซิเตด หรือ โพลีโนลิก

2.3.2 ไยโปรตีน

ไยโปรตีน ได้มาจากขน ผมและเคราของสัตว์รวมทั้งไยไหม

2.3.3 ไยสังเคราะห์

ไยสังเคราะห์ ผลิตขึ้นได้จากสารประกอบเคมีโดยตรง มีหลายชนิด เช่น โพลีเอไมด์ โพลีเอสเตอร์ และโพลีคริลิก

2.3.4 ไยแร่

ไยแร่มีปริมาณน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับไยทั้ง 3 ชนิดที่กล่าวมาแล้ว เป็นไยที่ทนความร้อนได้สูงจึงใช้เฉพาะในงานพิเศษ ได้แก่ ไยแก้วและไยหิน

2.4 สารช่วยย้อม

สารช่วยย้อมถือเป็นสิ่งจำเป็นในกระบวนการย้อม เนื่องจากเป็นตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาให้สีซึมเข้าไปภายในเส้นใยได้เร็วขึ้น และทำให้สีติดทนทานสม่ำเสมอ สารช่วยย้อมที่สำคัญและใช้มากมีอยู่ 7 ชนิด ดังนี้

2.4.1 กรด

ใช้สำหรับย้อมไยโปรตีนและไนลอนด้วยสีแอซิด ทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายสี ทำให้ประจุไฟฟ้าลบในเส้นใยน้อยลงและเพิ่มประจุไฟฟ้าบวก แอนไอออนจึงสามารถเข้าไปติดภายในเส้นใยได้ ตัวสีที่ติดซึมได้น้อยต้องเพิ่มกรดให้มากขึ้น ทำให้ตัวสีซึมกระจายตัวจากส่วนที่ติดสีมากไปยังส่วนที่ติดสีน้อยทำให้ย้อมได้สีสม่ำเสมอ สีประเภทนี้ต้องการกรดแก่เพื่อสามารถซึมเข้าไปภายในเส้นใยได้มากขึ้น

2.4.2 ด่าง

ใช้สำหรับช่วยย้อมไยเซลลูโลสด้วยสีอะโซอิก แร่ท กัมมะถันและรีแอคติฟ สีแร่ท และสีกัมมะถันต้องย้อมในน้ำย้อมที่เป็นด่างแก่และมีสารรีดิวซ์รวมอยู่ด้วย สีอะโซอิกละลายในด่างแก่(โซดาไฟ) ส่วนสีรีแอคติฟต้องใช้ด่างอ่อน(โซเดียมคาร์บอเนต)ทำหน้าที่ให้โมเลกุลของสีทำปฏิกิริยายึดติดกับโมเลกุลของไยเซลลูโลสได้ดียิ่งขึ้น

2.4.3 เกลือ

ใช้สำหรับช่วยย้อมไยขนสัตว์ด้วยสีแอซิดหรือสีแร่ท

2.4.4 สารที่ทำให้สีสม่ำเสมอ

เป็นสารที่ช่วยลดคุณสมบัติการดูดติดเส้นใยของสีให้ช้าลง ทำให้สีติดเส้นใยสม่ำเสมอ สารประกอบที่มีคุณสมบัติเช่นนี้เรียกว่า Surface Active Levelling Agent ปฏิกิริยาของสารนี้แบ่งออกเป็น 2 ชั้น สารประเภทนี้เป็นสารที่ดูดติดเส้นใยได้ง่าย ในขั้นต้นจึงแข่งขันกันซึมเข้าไปภายในเส้นใย ดังจะเห็นได้จากการย้อมขนสัตว์หรือไนลอนที่สีดูดติดเส้นใยได้เร็วมาก ขณะเดียวกันสารเคมีนี้จะไปเพิ่มพลังงานให้แก่สีย้อมเพื่อรักษาสภาพเดิมของตัวสีไว้ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำรวมตัวกันเป็นสารประกอบสมบูรณ์ชนิดใหม่ จึงทำให้สีรวมตัวกับเส้นใยได้ช้าลง

2.4.5 สารพา (Carriers)

เป็นสารที่มีคุณสมบัติทำให้สามารถย้อมสีเข้มได้แม้ใช้กระบวนการย้อมปกติ โดยมากใช้เป็นสารช่วยในการย้อมใยโพลีเอสเตอร์ ทำหน้าที่ได้โดยดูดติดอยู่ที่ผิวเส้นใยก่อน เมื่อสีเข้าไปติดตัวสีจะละลาย เส้นใยจะดูดสีไว้ได้มากขึ้น ระดับการติดสีก็จะเพิ่มขึ้น

2.4.6 สารละลายอินทรีย์

ใช้เป็นสารช่วยย้อมสำหรับย้อมขนสัตว์และไนลอนในกรณีที่ใช้สีย้อมละลายน้ำได้น้อย จะทำให้การย้อมได้ผลดีขึ้น รวดเร็วขึ้น และเส้นใยจะมีลักษณะดีกว่าการย้อมตามปกติ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารละลายอินทรีย์สามารถก่อเป็นเยื่อบาง ๆ ภายในเส้นใยได้อย่างรวดเร็ว ทำให้สีซึมผ่านเข้าไปติดเส้นใยได้เร็วขึ้น

2.4.7 สารรีดิวซ์

ใช้กับสีที่ไม่ละลายน้ำ โดยจะทำให้โมเลกุลของสีมีขนาดเล็กลงจนสามารถซึมผ่านเข้าไปในช่องว่างของเส้นใยได้ สารรีดิวซ์โดยส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบโซเดียมและใช้สารตัวอื่นช่วยให้ละลายน้ำได้ดีขึ้น เมื่อย้อมเรียบร้อยแล้ว ต้องทำให้ตัวสีนั้นกลับเป็นตัวสีที่ไม่ละลายน้ำตามเดิม

2.5 สีรีแอคทีฟ

สีรีแอคทีฟ ได้ถูกคิดค้นขึ้นและทดลองใช้เป็นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2494 โดยบริษัท อิมพีเรียลเคมีคัลอินคอปอเรชั่น (Imperial Chemical Inc.; I.C.I) ซึ่งผลการทดลองปรากฏว่า สามารถย้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้ดีและมีความคงทนสูง หลังจากนั้น จึงได้ถูกผลิตออกจำหน่ายในปี พ.ศ. 2499 และกลายเป็นสีที่ได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากเป็นสีที่ให้ความสดใส ย้อมง่าย มีความคงทนต่อการซักและแสงแดดสูง และมีหลายสีให้เลือกใช้

2.5.1 โครงสร้างทางเคมีของสีรีแอคทีฟ

Waring and Hallas (1990) ได้กล่าวถึงโครงสร้างโมเลกุลสีรีแอคทีฟว่าประกอบด้วยโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญ 2 ส่วน คือ

- สารที่ทำให้เกิดสี (Coloring Substance) หรือกลุ่มเคมีที่ทำให้เกิดสีซึ่งเรียกว่าโครโมฟอร์ (Chromophore)

- ส่วนประกอบของกลุ่มไฮดรอกซิล หรือ อะมิโนในโมเลกุลของสี (Reactive Component)

โครงสร้างพื้นฐาน 2 ส่วนนี้สามารถทำปฏิกิริยาโดยตรงกับเส้นใยเซลลูโลส โดยการเกิดพันธะโควาเลนต์กับหมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใย กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่ ทำให้สีย้อมชนิดนี้มีความคงทนต่อการซักล้างได้ดี กลุ่มโครโมฟอร์ของสีย้อมรีแอคทีฟมีทั้งที่เป็น Azo Anthraquinone หรือ Phthalocyanine ตารางที่ 2.1 แสดงการจัดหมู่สีย้อมตามโครงสร้างเคมีของสีรีแอคทีฟและชื่อทางการค้าของแต่ละบริษัท

2.5.2 อิทธิพลที่สำคัญที่ทำให้สีดูดซึมเข้าไปในเส้นใย

ก. อิทธิพลของการดูดติด

โครงสร้างของสีย้อมจะเป็นตัวกำหนดความสามารถของสีในการดูดติดเส้นใย ซึ่งเป็นความสามารถเฉพาะของสีแต่ละตัว ซึ่งไม่สามารถควบคุมได้ด้วยกระบวนการย้อม การเลือกตัวสีซึ่งมีความสามารถดูดติดเส้นใยตามาใช้ สีตัวนี้ไฮโดรไลซ์ได้ในน้ำ ซึ่งถ้าไฮโดรไลซ์มากเกินไปจะซึมผ่านเข้าไปในเส้นใยได้มากแต่ไม่ได้ทำปฏิกิริยากับเส้นใย ทำให้เส้นใยที่ย้อมได้มีสีตกได้ง่ายเมื่อผ่านการซักล้างและไม่คงทนต่อการซัก

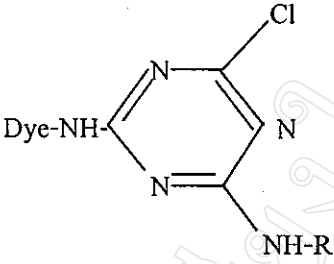
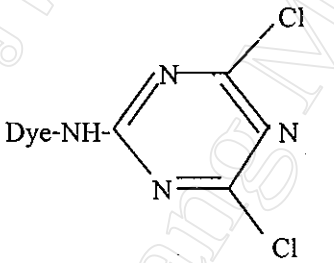
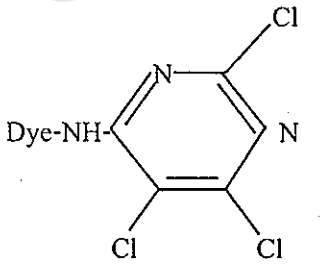
ข. อิทธิพลของปริมาณน้ำ

ถึงแม้ว่าการดูดติดของสีรีแอคทีฟจะเป็นคุณสมบัติซึ่งมีในตัวสีเอง กระบวนการย้อมที่แตกต่างกันก็ทำให้สีดูดติดไม่เท่ากัน น้ำเป็นสิ่งที่มียุทธิพลมากที่สุด กล่าวคือ ยิ่งน้ำย้อมมีน้อยเท่าไร สีรีแอคทีฟยังติดได้มากขึ้นเท่านั้น

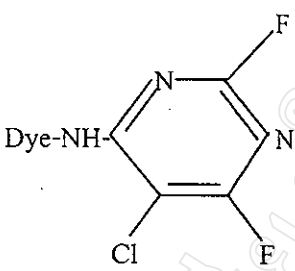
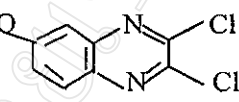
ค. อิทธิพลของอุณหภูมิ

ในกระบวนการย้อมทุกวิธี การดูดซึมสีจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่ในทางปฏิบัติบางครั้งจะพบว่า ถ้าอุณหภูมิลดลงการดูดซึมสีก็ลดลงด้วย ทั้งนี้เพราะที่อุณหภูมิต่ำสี

ตารางที่ 2.1 การจัดหมู่สีตามโครงสร้างเคมีของสีรีแอคทีฟและชื่อทางการค้าของแต่ละบริษัท

ชื่อ โมเลกุล	สูตร โมเลกุล	ชื่อทางการค้า	ชื่อบริษัท
Monochloro-triazine		Cibacron Ostazin H. Genafix Helacton D Kayaract Procion H/H-E Reacna C Xiron Youhaoactive	Cc. Pront Ciba-Geigy Struzeni , CSSR General Dyest., USA Boruta , Poland Nippon Kayaku , Jap. ICI , England Acna , Italy Wolfen , GDR Nationalist China
Dichloro-triazine		Amaryl Ostazin S Genafix Helacton Kayaract Mikacion Procion MX Reacna F Xiron Youhaoactive	Atul Dyest. India Struzeni , CSSR General Dyest., USA Boruta , Poland Nippon Kayaku , Jap. Mitsubishi , Jap. Proc. Supra (ICI) Acna , Italy Wolfen , GDR Nationalist China
Trichloro-pyrimidine		Drimaren X , Z Cibacron T	Sandoz Ciba-Geigy

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

ชื่อโมเลกุล	สูตรโมเลกุล	ชื่อทางการค้า	ชื่อบริษัท
Difluorochloropyrimidine		Drimaren K , R Levafix E-A Levafix P-A	Sandoz Bayer Bayer
Dichlorochinoxaline	Dye-NH-CO- 	Levafix E Cavalite	Bayer Du Pont , USA
Sulphatoethyl sulphone	Dye-SO ₂ -CH ₂ -CH ₂ O-SO ₃ Na	Cavalite Remazol Rhodazol Levafix E Primazin	Du Pont ,USA Hoechst Hoechst ,USA Bayer BASF
others		Basazol Calcobond Primazin P Primazin Elisiane Remazol D Levafix P Solidazol	BASF Amer. Cyanid BASF BASF Francolor Hoechst Bayer Casella/Hoechst

ที่มา : อัจฉราพร ไสยะตุต (2527)

จะดูดซึมได้ช้า กว่าจะสมดุลก็เป็นเวลานานมาก แต่สำหรับสรีรแอกติฟซึ่งมีโมเลกุลเล็กมาก สามารถซึมกระจายเข้าไปภายในเส้นใยได้เร็ว ดังนั้น จะยอมให้ได้สมดุลได้เร็วที่อุณหภูมิปกติที่พีเอช 10.3 หรือสูงกว่านี้ (อัจฉราพร ไสละสูต, 2527) สรีรแอกติฟจะทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสได้ดีภายในเวลาไม่ถึงชั่วโมง สรีรแอกติฟจึงยอมที่อุณหภูมิต่ำเสียก่อน แล้วทำให้น้ำย้อมร้อนขึ้นช้า ๆ เพื่อให้สีย้อมซึมเข้าไปได้มากขึ้น

ง. อิทธิพลของปริมาณอิเล็กโตรไลต์

ปริมาณอิเล็กโตรไลต์จะมีผลต่อปริมาณการดูดซึมของน้ำย้อม กล่าวคือ เมื่อมีอิเล็กโตรไลต์มากขึ้นเท่าไร น้ำสีย้อมจะดูดซึมเข้าไปในเส้นใยได้มากขึ้นเท่านั้น

จ. อิทธิพลของค่า pH

การเพิ่มความเป็นด่างในน้ำย้อมจะทำให้ปฏิกิริยาในการย้อมเกิดได้ดีขึ้น แต่ถ้าความเป็นด่างเพิ่มขึ้นจนกระทั่งพีเอชสูงกว่า 11 จะทำให้การดูดซึมของสีย้อมลดลง และจะลดลงมากขึ้นทุกทีเมื่อพีเอชเพิ่มสูงขึ้น ทำให้สีย้อมน้อยลง

ฉ. อิทธิพลของเส้นใย

เซลลูโลสต่างชนิดกันจะดูดซึมสีย้อมได้ไม่เท่ากันเนื่องจากมีความหนาแน่นไม่เท่ากัน วัสดุสเรยอนสามารถดูดซึมสีย้อมได้มากที่สุด และฝ้ายสามารถดูดซึมสีย้อมได้น้อยที่สุด

2.6 ขั้นตอนการผลิตและการใช้น้ำในอุตสาหกรรมสิ่งทอ

กาญจนา ครอบธรรมชาติ (2536) ได้สรุปกระบวนการหลัก ๆ ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ได้ 5 กระบวนการตามลำดับขั้นตอน ดังนี้

ก. การผลิตเส้นใย (Fiber Production)

เส้นใยที่ใช่มักเป็นเส้นใยธรรมชาติ ได้แก่ เส้นใยฝ้าย และเส้นใยประคิษฐ์ ได้แก่ เส้นใยวิสโคสเรยอน เส้นใยไนลอน เป็นต้น ในขั้นตอนนี้ ถ้าเป็นอุตสาหกรรมการทอผ้าจะไม่มีการใช้น้ำในกระบวนการผลิต แต่ในอุตสาหกรรมการผลิตเส้นใยประคิษฐ์ จะต้องมีการใช้น้ำในการทำปฏิกิริยาเคมีเพื่อสังเคราะห์สารที่นำมาอัดฉีดเป็นเส้นใย ปริมาณน้ำที่ใช้และความสกปรกของน้ำทิ้งจะแตกต่างกันไปตามชนิดของเส้นใยที่ผลิต

ข. การปั่นด้าย (Spinning)

ไม่มีการใช้น้ำในกระบวนการนี้

ค. การทอ-ถักผ้า (Weaving-Knitting)

ในกระบวนการทอผ้าจะมีการใช้น้ำในขั้นตอนการลงแป้งเส้นด้ายขึ้นก่อนการทอ แต่ปริมาณน้ำที่ใช้ไม่มากนัก

ง. การฟอกย้อม-ฟิมพ์ (Textile Finishing)

ในขั้นตอนนี้จะมีการใช้น้ำมากที่สุดเมื่อเทียบกับกระบวนการผลิตอื่น ๆ และน้ำที่ใช้ส่วนใหญ่จะถูกปล่อยออกเป็นน้ำทิ้ง ซึ่งจะมีความเข้มข้นของสีย้อมสูงและมีความสกปรกมาก

จ. การผลิตเสื้อผ้าสำเร็จรูป (Garment Manufacturing)

ไม่มีการใช้น้ำในกระบวนการนี้

จากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมสิ่งทอทั้ง 5 ขั้นตอนที่กล่าวมา จะเห็นได้ว่าน้ำที่ส่วนใหญ่ที่อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม คือน้ำทิ้งจากขั้นตอนการฟอกย้อม-ฟิมพ์

2.7 กระบวนการย้อมผ้า

กระบวนการย้อมโดยทั่วไปสามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอนใหญ่ ๆ ดังนี้

2.7.1 การเตรียมผ้า

เพื่อให้การย้อมสีและตกแต่งผ้าทำได้ง่าย และมีประสิทธิภาพดี จำเป็นต้องขจัดสิ่งเจือปน และสิ่งสกปรกที่ติดมากับเส้นใยเสียก่อน รวมทั้งต้องกำจัดแป้งที่ลงด้ายขึ้นออกด้วย ขั้นตอนนี้จะเรียกว่า “การเตรียมผ้า” (Pretreatment) โดยทั่วไปการเตรียมผ้าในโรงงานย้อมผ้าขนาดเล็กจะมี 2 ขั้นตอน คือ

ก. การทำความสะอาด (Scouring) เป็นการขจัดสิ่งสกปรก ขี้ผึ้ง และไขมันที่ติดอยู่ตามธรรมชาติบนผิวของใยผ้าให้สะอาด โดยใช้สารละลายด่าง ได้แก่ โซดาไฟ (NaOH) และ โซดาแอช (Na_2CO_3) ทำให้เส้นใยดูดซึมน้ำได้ดีขึ้น การย้อมจึงง่ายขึ้น สีดัดได้ดีและสม่ำเสมอ วิธีทำความสะอาดมีดังนี้

ก.1 สำหรับผ้าดิบหนัก 1 กิโลกรัม จะใช้ส่วนประกอบดังนี้

- น้ำสะอาด 20 ลิตร
- โซดาแอช (Na_2CO_3) 2 % ของน้ำหนักผ้า
- โซดาไฟ (NaOH) 2 % ของน้ำหนักผ้า
- สารเปียม (Wetting Agent) 2 % ของน้ำหนักผ้า

นาที่

ก.2 ต้มผ้าในสารละลายที่มีส่วนประกอบตามข้อ ก.1 ให้เดือดนาน 30-45

หรือย้อมเข้มต่อไป

ก.3 ล้างน้ำสะอาด แล้วนำไปตากให้แห้ง ผ้าที่ได้สามารถนำไปฟอกขาว

ข. การฟอกขาว (Bleaching) เป็นการขจัดสีธรรมชาติออกจากเส้นใยของผ้า โดยการนำผ้าที่ทำความสะอาดแล้วลงฟอกในสารละลายคลอรีนที่อุณหภูมิห้องประมาณ 30-45 นาที รายละเอียดของวิธีการมีดังนี้

ข.1 สำหรับผ้าที่ทำความสะอาดแล้ว 1 กิโลกรัม ใช้ส่วนประกอบดังนี้

- น้ำสะอาด 20 ลิตร

- คลอรีน 60 % 3-4 กรัมต่อลิตร

ข.2 ละลายคลอรีนแล้วทิ้งให้ตกตะกอน 5-10 นาที

ข.3 รินเอาส่วนที่เป็นน้ำใส ผสมกับน้ำที่ต้องการฟอกตามข้อ ข.1

ข.4 นำผ้าที่ทำความสะอาดแล้ว ลงฟอกในน้ำที่มีส่วนประกอบตามข้อ ข.3 ที่อุณหภูมิห้อง ประมาณ 30-45 นาที

ข.5 ล้างผ้าด้วยน้ำให้สะอาดหมดกลิ่นคลอรีน แล้วนำไปตากให้แห้ง

2.7.2 การย้อมผ้า

การย้อมผ้าโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ การย้อมร้อน และการย้อมเย็น การย้อมร้อนคือการย้อมผ้าในอ่างย้อมที่อุณหภูมิประมาณ 100 °C ส่วนการย้อมเย็นคือ การย้อมที่อุณหภูมิประมาณ 50 °C เนื่องจากสีย้อมแต่ละชนิดจะมีวิธีการย้อม รวมทั้งชนิดและปริมาณสารช่วยย้อมแตกต่างกัน ดังนั้นรายละเอียดของวิธีการย้อมจึงไม่ขอกล่าวในที่นี้

2.8 ประเภทของสิ่งเจือปนในน้ำเสียจากโรงงานย้อมสีผ้า

นนทยา บานูเมศ (2534) ได้จำแนกสิ่งสกปรกที่เจือปนอยู่ในน้ำเสียจากโรงงานย้อมสีผ้าไว้ดังนี้

2.8.1 สีย้อม

ในการย้อม เส้นใยจะมีการดูดซึมสีย้อมได้เพียงบางส่วนเท่านั้น ส่วนที่เหลือจะยังคงอยู่ในน้ำย้อม และจะถูกปล่อยออกมากับน้ำเสียในที่สุด ปริมาณสีย้อมที่ยังคงเหลืออยู่ในน้ำย้อมจะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสีย้อมที่ทำการผสมและชนิดของสีย้อมที่ใช้

2.8.2 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการย้อม

สารเคมีเหล่านี้จะมีอยู่หลายประเภท ซึ่งส่วนใหญ่จะคงเหลืออยู่ในน้ำย้อม และจะถูกปล่อยออกมาเป็นน้ำเสีย

2.8.3 เศษเส้นใย

2.9 ผ้าบาติกและขั้นตอนการผลิตผ้าบาติก

2.9.1 ลักษณะทั่วไปของผ้าบาติกและขั้นตอนการผลิตผ้าบาติก

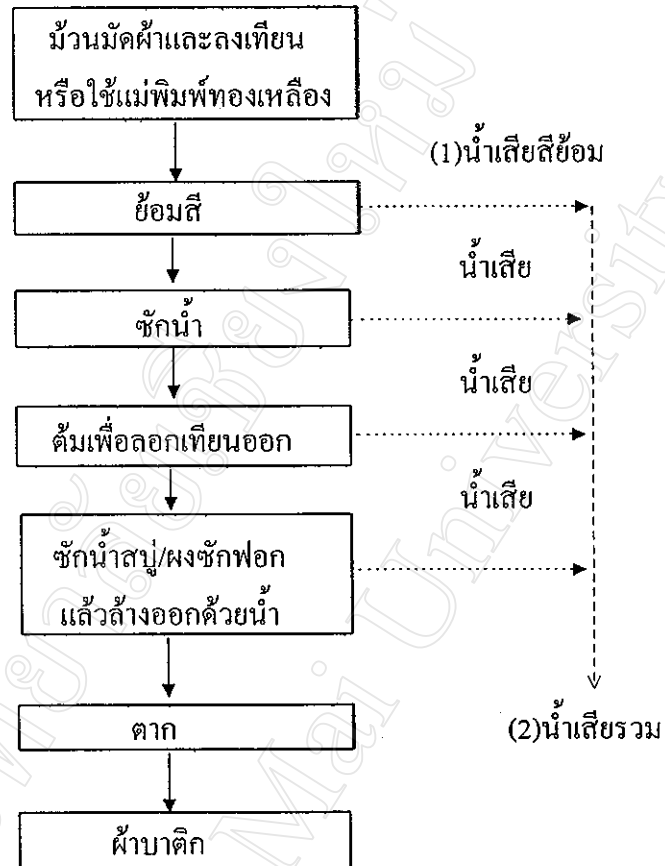
ผ้าบาติก คือ รูปแบบและวิธีการทำลวดลายลงบนผ้า โดยการใช้เทียนที่ต้มแล้วจนเหลวร้อน วาดลวดลายลงบนผืนผ้าส่วนที่ไม่ต้องการให้ติดสี แล้วจึงระบายสีทับลงไป เมื่อนำผ้าไปต้มให้เทียนละลายหลุดออก ก็จะได้ลวดลายและสีตามที่สวยงาม โดยทั่วไปวิธีการทำผ้าบาติกจะมีอยู่ 3 แบบด้วยกัน ได้แก่ แบบระบาย ซึ่งใช้ปากกาเขียนเทียนวาดลวดลายลงบนผ้าที่ละผืน แบบมัดย้อม ซึ่งใช้ทั้งการม้วนมัดผ้า เพื่อสร้างลวดลายจากการบิดเกลียวของมัดผ้า ผสมกับการใช้เทียนติดปิดส่วนที่ไม่ต้องการให้ติดสีและแบบใช้แม่พิมพ์ทองเหลืองซึ่งสามารถพิมพ์ลายได้รวดเร็วและปริมาณมาก สำหรับขั้นตอนการผลิตผ้าบาติกแบบมัดย้อมและแบบใช้แม่พิมพ์ทองเหลืองโดยทั่วไปได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.1

2.9.2 วิธีการย้อมสีรีแอกทีฟในการทำผ้าบาติก

การย้อมสีรีแอกทีฟจะเป็นการย้อมเย็น จากเอกสารการฝึกอบรมเรื่องการย้อมผ้าบาติกของศูนย์ส่งเสริมอุตสาหกรรมภาคเหนือ (2532) ได้แสดงรายละเอียดวิธีการย้อมผ้าบาติกไว้ดังนี้

ก. สำหรับผ้าที่ผ่านการทำความสะอาดและฟอกขาวแล้ว 1 กิโลกรัม จะใช้ส่วนประกอบในการย้อมดังนี้

- น้ำสะอาด 20-30 ลิตร
- สี 0.5-5 % ของน้ำหนักผ้า
- เกลือ 2-6 กรัมต่อลิตร
- โซดาแอช 8-12 % ของน้ำหนักผ้า
- สบู่เทียม 1 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการผลิตผ้าบาติกแบบมัดย้อมและแบบใช้แม่พิมพ์ทองเหลือง

ข. ละลายสีด้วยน้ำอุ่น $50-60^{\circ}\text{C}$ ละลายเกลือลงไป เติมน้ำให้ครบจำนวน ใส่สบูเทียม แล้วเอาผ้าลงย้อมนานประมาณ 15 นาที แบ่งโซดาแอสซอกเป็น 2 ส่วน เติมส่วนแรกก่อนแล้วทิ้งช่วงประมาณ 10 นาที จึงเติมส่วนที่ 2 แล้วย้อมต่ออีกประมาณ 30-60 นาที ตามความเข้มสีที่ต้องการ เสร็จแล้วจึงซักด้วยน้ำ ต้มในน้ำสบูประมาณ 20 นาที แล้วซักน้ำอีกครั้งหนึ่ง จึงนำไปตากให้แห้ง

2.10 การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเคมีคัลออกซิเดชัน (Chemical Oxidation)

2.10.1 ความสำคัญของกระบวนการเคมีคัลออกซิเดชัน

กระบวนการเคมีคัลออกซิเดชัน ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ทั้งในด้านการผลิตน้ำประปาและการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งวัตถุประสงค์ของการนำกระบวนการนี้มาใช้งานมีหลายแบบ โดย Eckenfelder (1989) ได้สรุปไว้ดังนี้

- นำมาใช้เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่เป็นพิษซึ่งมีความเข้มข้นต่ำในน้ำ
- นำมาใช้เพื่อบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณน้อยแต่ความเข้มข้นสูง เพื่อลดความเป็นพิษ และทำให้ย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวภาพได้ง่ายขึ้น
- นำมาใช้เพื่อบำบัดน้ำเสียที่ไม่สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ เช่น น้ำเสียที่มีไซยาไนด์และโลหะหนักต่าง ๆ
- นำมาใช้เพื่อลดความเป็นพิษของน้ำหลังจากที่ผ่านกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแล้ว
- นำมาใช้เพื่อนำเชื้อโรคที่เจือปนอยู่ในน้ำ

สารเคมีที่นิยมใช้เป็นตัวออกซิเดนต์ในกระบวนการเคมีคัลออกซิเดชันในงานของวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ได้แก่ คลอรีน โอโซน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และโปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต

2.10.2 กระบวนการเคมีคัลออกซิเดชันกับการกำจัดสีย้อม

ในโมเลกุลของสีย้อม โครงสร้างส่วนที่ทำให้เกิดสี คือกลุ่มเคมีที่เรียกว่า โครโมฟอร์ ซึ่งมีอยู่หลายกลุ่มด้วยกัน Shreve and Brink (1977) ได้สรุปไว้ดังนี้

- กลุ่มไนโตรโซ (Nitroso Group)
- กลุ่มไนโตร (Nitro Group)
- กลุ่มเอโซ (Azo Group)
- กลุ่มเอทีลีน (Ethylene Group)
- กลุ่มคาร์บอนิล (Carbonyl Group)
- กลุ่มคาร์บอน-ไนโตรเจน (Carbon-Nitrogen Group)
- กลุ่มซัลเฟอร์ (Sulfur Group)

กลุ่มอะตอมต่าง ๆ เหล่านี้จะเป็นตัวดูดกลืนคลื่นแสงสีขาวบางแถบแสงและปล่อยออกมาบางแถบแสง ทำให้เรามองเห็นสีย้อมมีโทนสีที่แตกต่างกัน

การกำจัดสีหรือการลดสีของน้ำเสียด้วยกระบวนการเคมีคัลออกซิเดชัน จึงเป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลโดยการออกซิไดซ์กลุ่มที่ทำให้เกิดสี คือ กลุ่มโครโมฟอร์ดังกล่าวไปอยู่ในอีกรูปหนึ่งซึ่งมองไม่เห็นสี และโมเลกุลที่ถูกกำจัดสีแล้วอาจถูกออกซิไดซ์ต่อไปได้อีก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการออกซิไดซ์ของสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการนี้ว่ามีมากน้อยเพียงใด โดยปกติสีย้อมแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างโมเลกุลและกลุ่มแสดงสี (โครโมฟอร์) ที่แตกต่างกันไป ทำให้ความยากง่ายในการถูกออกซิไดซ์แตกต่างกันด้วย ดังนั้น สารเคมีที่จะนำมาใช้ในกระบวนการเคมีคัลออกซิเดชัน จึงต้องมีค่าศักย์ออกซิเดชัน (Oxidation Potential) สูงพอที่จะออกซิไดซ์ โมเลกุลสีย้อมที่มีโครงสร้างต่าง ๆ กันได้ดีและควรจะเป็นสารเคมีที่หาได้ง่ายในท้องตลาดและราคาไม่แพง

2.11 รีเอเจนท์ของเฟนตอน

2.11.1 ประวัติความเป็นมาของรีเอเจนท์ของเฟนตอน

Flaherty and Huang (1992) ได้กล่าวถึงประวัติความเป็นมาของรีเอเจนท์ของเฟนตอนพอสรุปได้ดังนี้

ในปี ค.ศ. 1876 เรื่องราวเกี่ยวกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ได้ถูกนำเสนอและเผยแพร่เป็นครั้งแรก โดย H.J.H. Fenton ต่อมา ช่วงระหว่างปี ค.ศ. 1876-1900 H.J.H. Fenton ก็ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมและได้แสดงให้เห็นว่า สารละลายที่ผสมกันระหว่างเฟอร์รัสไอออนกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะมีความสามารถในการออกซิไดซ์สูงมากเป็นพิเศษ และในช่วงเวลาใกล้เคียงกันนี้ Cross and Beven, Morrell and Crofts, Bredig and Bernek, Bertelan และ Duclaux ได้ทำการศึกษาและเสนอผลงานในเรื่องนี้ในทำนองเดียวกัน หลังจากนั้น กลไกของปฏิกิริยาของเฟนตอนรีเอเจนท์ จึงได้ถูกเสนอขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Able และ Bray and Livingston

ในปี ค.ศ. 1934 Haber and Weiss ได้เสนอผลงานวิจัยที่แสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาของเฟนตอนรีเอเจนท์ เกิดขึ้นเนื่องจาก ปฏิกิริยาการเกิดอนุมูลอิสระแบบลูกโซ่ ซึ่งปฏิกิริยานี้จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ต่อมา Mertz and Waters และ Barb ได้ศึกษาและเสนอเรื่องราวของรีเอเจนท์ของเฟนตอน ทั้งในส่วนของกลไก จลนศาสตร์ และอื่น ๆ ของปฏิกิริยา ทำให้ความรู้เกี่ยวกับสารเคมีตัวนี้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

และในปี ค.ศ.1971 Metelisa ก็ได้เสนอสมการและกลไกการเกิดปฏิกิริยาของรีเอเจนต์ของเฟนตอน ซึ่งต่อมาได้รับการพิสูจน์และเป็นที่ยอมรับ

2.11.2 คุณสมบัติและปฏิกิริยาเคมีของรีเอเจนต์ของเฟนตอน

รีเอเจนต์ของเฟนตอน เป็นสารเคมีที่เกิดจากการผสมกันระหว่าง ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) กับเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ซึ่งทำหน้าที่เป็นคะตะลิสต์ แล้วทำให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล ($OH^\bullet$) ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาลูกโซ่ที่เกิดขึ้นระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับเฟอร์รัสไอออน อนุมูลไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นนี้ มีความสามารถในการออกซิไดซ์สูงมาก ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบให้เห็นถึงศักยภาพออกซิเดชันของอนุมูลและสารเคมีชนิดต่าง ๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่า อนุมูลไฮดรอกซิล มีค่าศักยภาพออกซิเดชันสูงเป็นอันดับ 2 รองจาก ฟลูออรีน และจะเห็นได้ว่า สารเคมีที่นิยมใช้เป็นตัว ออกซิเดนต์ เช่น โอโซน (O_3) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และ คลอรีน (Cl_2) ล้วนแต่มีค่าศักยภาพออกซิเดชันต่ำกว่าอนุมูลไฮดรอกซิลทั้งสิ้น

จากการที่อนุมูลไฮดรอกซิลมีค่าศักยภาพออกซิเดชันสูงมากเช่นนี้เอง ทำให้ รีเอเจนต์ของเฟนตอนสามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้หลากหลาย ทั้งสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากและสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ จึงมีการนำมาใช้ประโยชน์ในด้านการบำบัดน้ำเสียกันอย่างกว้างขวาง

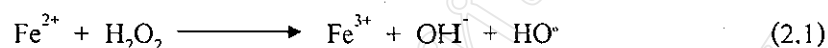
ตารางที่ 2.2 ศักยภาพออกซิเดชัน (Oxidation Potentials) ของออกซิเดนต์ชนิดต่าง ๆ

Oxidant	Potential (Volts)
F_2	3.06
$HO^\bullet$	2.80
O_3	2.07
H_2O_2	1.77
$HOO^\bullet$	1.70
$HOCl$	1.49
Cl_2	1.39

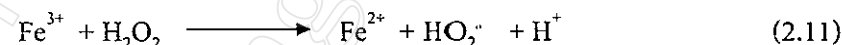
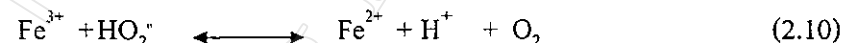
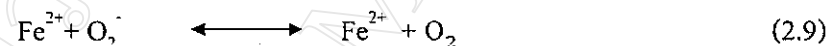
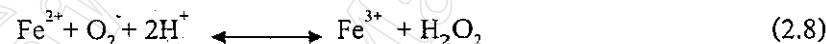
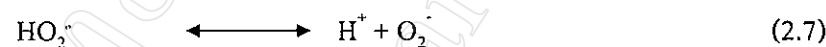
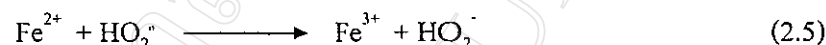
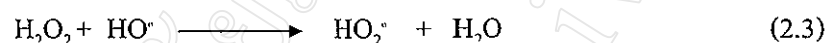
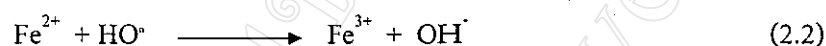
ที่มา : Bull and Zeff (1992)

Kochany (1992) ได้แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาของรีเอเจนท์ของเฟนตอนไว้ดังสมการที่

(2.1)



นอกจากปฏิกิริยาหลักตามสมการที่(2.1)แล้ว ในสารละลายยังเกิดปฏิกิริยาอื่น ๆ ขึ้นด้วย ดังสมการที่ (2.2)-(2.11)



ในกรณีที่ไม่มีตัวรีดิวซ์อื่น ๆ ในปฏิกิริยา กลไกของปฏิกิริยาจะเป็นไปตามสมการที่ (2.1)-(2.11) ดังกล่าว ซึ่งเรียกระบบนี้ว่า “Pure System” อนุมูลไฮดรอกซิลจะเกิดจากการออกซิไดซ์เฟอร์รัสไอออน(Fe^{2+}) โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นแบบอันดับที่ 2 (Second Order) ตามสมการที่ (2.12)

$$r = \frac{d}{dt} [\text{HO}^\bullet] = k[\text{Fe}^{2+}] [\text{H}_2\text{O}_2] \quad (2.12)$$

โดยที่ r = อัตราการเกิดปฏิกิริยา

$[\text{HO}^\bullet]$ = ความเข้มข้นของอนุมูลไฮดรอกซิลในสารละลาย

$[\text{Fe}^{2+}]$ = ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนในสารละลาย

$[\text{H}_2\text{O}_2]$ = ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในสารละลาย

k = ค่าคงที่ของปฏิกิริยา มีหน่วยเป็น $\text{M}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

สำหรับค่าคงที่ของปฏิกิริยาของสมการที่ (2.1)-(2.6) (2.8) และ (2.9) ได้แสดงไว้ในตารางที่

2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าคงที่ของปฏิกิริยาของสมการที่ (2.1)-(2.6) (2.8) และ (2.9)

สมการที่	ค่าคงที่ของปฏิกิริยา (Rate Constant); $k \text{ (M}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$
(2.1)	76.0
(2.2)	$3.0 \cdot 10^8$
(2.3)	$1.2 \cdot 10^7$
(2.4)	$5.3 \cdot 10^9$
(2.5)+(2.6)	$1.2 \cdot 10^6$
(2.8)	$1.0 \cdot 10^7$
(2.9)	$1.5 \cdot 10^8$

ที่มา : Kochany (1992)

ในกรณีที่สารละลายมีปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากเกินไป และสารละลายมีสภาพเป็นกรด ปฏิกิริยาการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลจะเปลี่ยนเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (First Order) ตามสมการที่ (2.13)

$$r = \frac{d}{dt} [\text{HO}^\bullet] = k_1 [\text{Fe}^{2+}] \quad (2.13)$$

$$\text{โดยที่ } k_1 = k[\text{H}_2\text{O}_2]$$

ถ้ามีการเติม HCO_3^- หรือ CO_3^{2-} ลงในสารละลายโดยควบคุมให้พีเอชคงที่ จะทำให้อัตราการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลเกิดได้เร็วขึ้น ค่าคงที่ของปฏิกิริยาจะเปลี่ยนไปตามสมการที่ (2.14)

$$\log (k/k_2) = 7.3 [\text{HCO}_3^-] \quad (2.14)$$

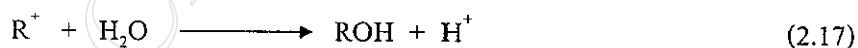
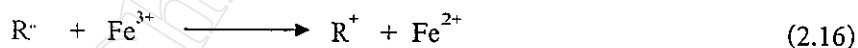
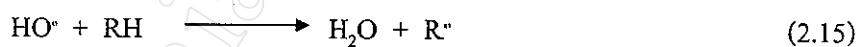
โดยที่ k_2 = ค่าคงที่ของปฏิกิริยาเมื่อปราศจาก HCO_3^-

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการออกซิไดซ์เฟอร์รัสไอออนโดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะเกิดได้ดีขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิลมากขึ้น แต่เนื่องจาก HCO_3^- และ CO_3^{2-} ที่เติมลงในสารละลายส่วนหนึ่งจะทำปฏิกิริยากับอนุมูลไฮดรอกซิลด้วย ทำให้อนุมูลไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นลดน้อยลงกว่ากรณีที่เติม HCO_3^- หรือ CO_3^{2-} ดังนั้น ถ้าต้องการให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิลมาก ๆ ในสารละลายจึงไม่ควรเติม HCO_3^- หรือ CO_3^{2-}

Kuo (1992) ได้กล่าวถึงกลไกการกำจัดสารอินทรีย์และสีย้อมของรีเอเจนท์ของเฟนตอน ว่าประกอบด้วยกระบวนการหลัก 2 กระบวนการดังนี้

ก. ปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox Reaction)

เมื่อสารละลายของรีเอเจนท์ของเฟนตอนมีสภาพเป็นกรดและในสารละลายมีสารอินทรีย์อยู่ด้วย จะเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ขึ้นต่อเนื่องกัน โดยเริ่มจากปฏิกิริยาที่ (2.1) แล้วตามด้วยปฏิกิริยาดังนี้



ปฏิกิริยาการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ (RH) โดยอนุมูลไฮดรอกซิล จะเป็นปฏิกิริยาแบบอันดับที่ 2 ซึ่งสามารถเขียนสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ดังสมการที่ (2.18)

$$r = -\frac{d[RH]}{dt} = k[HO^\bullet][RH] \quad (2.18)$$

โดยที่ $[RH]$ = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์

สำหรับค่าคงที่ของปฏิกิริยาการออกซิไดซ์สารอินทรีย์บางชนิดของอนุมูลไฮดรอกซิลได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าคงที่ของปฏิกิริยาของอนุมูลไฮดรอกซิลในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์บางชนิด

สารอินทรีย์	ค่าคงที่ของปฏิกิริยา ; $k \text{ (M}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$
Benzene	$7.8 \cdot 10^9$
Toluene	$7.8 \cdot 10^9$
Chlorobenzene	$4.0 \cdot 10^9$
Trichloroethylene	$4.0 \cdot 10^9$
Tetrachloroethylene	$1.7 \cdot 10^9$
n-butanol	$4.6 \cdot 10^9$
t-butanol	$0.4 \cdot 10^9$

ที่มา : Bull and Zeff (1992)

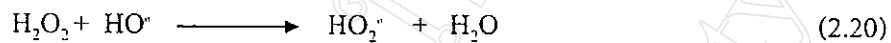
จากสมการ เมื่อมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากเกินไป นั่นคือ มีอนุมูลไฮดรอกซิล ($HO^\bullet$) มากเกินไปด้วย สมการที่ (2.18) อาจเขียนได้เป็น

$$r = -\frac{d[RH]}{dt} = k_3[RH] \quad (2.19)$$

โดยที่ $k_3 = k[HO^\bullet]$

อนุมูลไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้น จะทำการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ (RH) ทำให้โครงสร้างโมเลกุลของสารอินทรีย์เปลี่ยนแปลงไป ในกรณีที่สารอินทรีย์เป็นสีย้อม กลุ่มแสดงสี (โครโมฟอร์) ใน

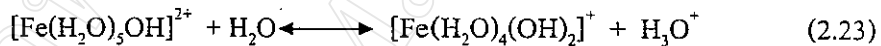
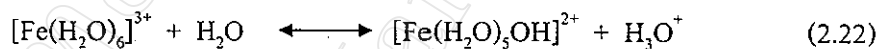
โมเลกุลของสีย้อม จะถูกทำลาย ทำให้สีจางหายไป นอกจากปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นตามสมการที่ (2.1) และ(2.15)-(2.17) แล้ว อาจมีปฏิกิริยาข้างเคียง (Side Reaction) อื่น ๆ เกิดขึ้นด้วย ดังสมการที่ (2.20) และ (2.21)



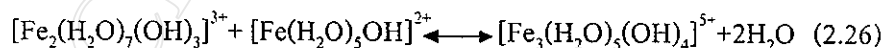
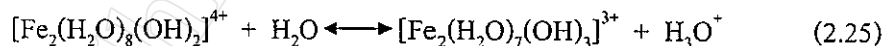
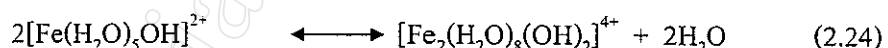
ปฏิกิริยาในสมการที่ (2.21) เรียกว่า Dimerization ซึ่งในกรณีของการบำบัดสีย้อม ปฏิกิริยาข้างเคียงนี้ถือว่าเป็นข้อดี เนื่องจากมีส่วนช่วยในการกำจัดสีได้อีกทางหนึ่ง

ข. โคแอกกูเลชัน(Coagulation)

เฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยารีดอกซ์ บางส่วนจะรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ไอออน(OH^-) เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งเรียกว่า “Ferric Hydroxo Complexes” ดังสมการที่ (2.22) และ (2.23)

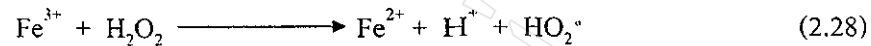
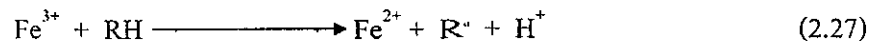


ที่พีเอช 3.5-7 สารประกอบเชิงซ้อนจากสมการที่ (2.22) และ (2.23) มีแนวโน้มที่จะรวมตัวกันเกิดเป็น โมเลกุลที่มีความซับซ้อนมากขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังสมการที่ (2.24)-(2.26)



สารประกอบเชิงซ้อนในสมการที่ (2.24)-(2.26) จะจับตัวกับโมเลกุลของสารอินทรีย์รวมทั้งโมเลกุลของสีย้อมที่ถูกกำจัดสีแล้ว ทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ และเกิดการตกตะกอนได้ในที่สุด

การเกิดปฏิกิริยาเคมีของรีเอเจนต์ของเฟนทอนเพื่อให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิลนั้น นอกจากจะใช้ Fe^{2+} เป็นคะตะลิสต์แล้ว ยังสามารถใช้ Fe^{3+} ได้ด้วย ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นดังสมการที่(2.27) และ (2.28)



Fe^{2+} ที่เกิดขึ้นจากสมการ (2.27) และ (2.28) จะทำปฏิกิริยากับ H_2O_2 เกิด $\text{HO}^{\cdot}$ ได้ตามสมการที่(2.1)

2.12 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

Bowers et al. (1992) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบความสามารถของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โพแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4) และ โอโซน (O_3) ในการบำบัดสารประกอบอโรมาติก 15 ชนิด ในลักษณะแบบทีละเท (Batch) โดยใช้สภาวะในการบำบัด คือพีเอช 3.5 เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง ยกเว้นในกรณีของโอโซน ได้ใช้เวลา 4 ชั่วโมง เนื่องจากจากการทดลองพบว่า หลังจากเวลาผ่านไป 4 ชั่วโมง โอโซนที่เติมลงไปจะไม่หลงเหลืออยู่ในน้ำ ดังนั้น การใช้เวลามากกว่านี้จึงไม่เกิดผลใด ๆ ในกรณีของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ใช้เฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) เป็นคะตะลิสต์ด้วย ซึ่งสารประกอบนี้ก็คือรีเอเจนท์ของเฟนตอน ผลการทดลองของการศึกษานี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.5

จากผลการทดลองดังกล่าว ทำให้สรุปได้ว่า ในบรรดาออกซิแดนท์ทั้ง 3 ชนิด ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ($\text{H}_2\text{O}_2 + \text{FeSO}_4$) สามารถออกซิไดซ์สารประกอบอโรมาติกได้หลากหลายมากที่สุด คือสามารถออกซิไดซ์สารอโรมาติกดังกล่าวได้ทั้ง 15 ชนิด และสามารถลดทีโอซี และซีไอดี ได้โดยเฉลี่ย 45.9 และ 77.1 % ตามลำดับ โอโซนมีความสามารถรองลงมาคือ ออกซิไดซ์ได้ 14 ชนิด จาก 15 ชนิด และสามารถลดทีโอซีและซีไอดี ได้โดยเฉลี่ย 36.8 และ 55.9 % ตามลำดับ ส่วนโพแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต สามารถออกซิไดซ์ได้ 8 ชนิดจาก 15 ชนิด และสามารถลดทีโอซี และ ซีไอดี ได้โดยเฉลี่ย 42.8 และ 70.5 % ตามลำดับ

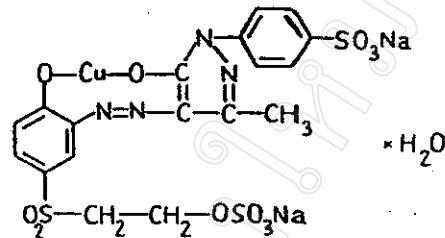
Solozhenko et al. (1995) ได้ทำการทดลองบำบัดสีย้อมโดยใช้รีเอเจนท์ของเฟนตอน โดยทำการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งเตรียมได้จากสีย้อม Azo dye Active Yellow Lightfast 2KT (AYL) ซึ่งมีสูตรโครงสร้างโมเลกุลดังรูปที่ 2.2

ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสารอโรมาติกชนิดต่าง ๆ ด้วย H_2O_2 (รีเอเจนท์ของเฟนตอน) KMnO_4 และ O_3

สารประกอบ	TOC Removal (%)			COD Removal (%)		
	H_2O_2	KMnO_4	O_3	H_2O_2	KMnO_4	O_3
1. Pyrrolidine	34.9	NR	32.1	72.1	NR	58.5
2. Sulfanilic Acid	46.3	NR	57.5	74.9	NR	57.4
3. Naphthalene	46.2	NR	0.0	80.4	NR	>99.0
4. Diphenylamine	69.4	NR	30.6	87.7	NR	90.0
5. Skatole	0.0	NR	0.0	39.0	NR	38.1
6. Benzaldehyde	78.6	67.6	74.4	93.5	79.1	74.2
7. Indole	62.3	60.3	60.9	95.5	91.0	77.2
8. Catechol	57.0	52.2	22.0	80.5	66.3	30.7
9. Hydroquinone	30.7	27.3	17.2	78.5	71.2	45.0
10. Resorcinol	56.5	27.8	29.1	79.8	73.1	50.1
11. Vanillin	70.3	53.4	63.6	87.8	55.2	63.6
12. Pyrogallol	45.4	22.1	28.5	75.1	78.2	48.5
13. Salicylic Acid	28.6	31.6	31.2	74.6	49.8	41.6
14. Coumarin	25.9	NR	NR	65.3	NR	NR
15. Phthalic Acid	37.0	NR	31.1	71.2	NR	52.0
Average	45.9	42.8	36.8	77.1	70.5	55.9

หมายเหตุ NR หมายถึง สารประกอบดังกล่าวไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิแดนซ์

ที่มา : Bowers et al. (1992)

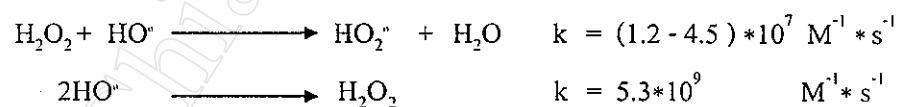


รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของสีย้อม Azo dye Active Yellow Lightfast 2KT

ที่มา : Solozhenko et al. (1995)

การทดลองนี้ จะใช้ค่าพีเอชในการบำบัดเท่ากับ 3 และทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ซึ่งสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อม (AYL) 40 มิลลิกรัมต่อลิตร และเฟอร์รัสซัลเฟต 13.9 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วแปรผันความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ระหว่าง 17-5100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า เมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพิ่มขึ้น ความสามารถในการลดสีจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนมีค่าสูงสุดที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เท่ากับ 587 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากนั้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นให้มากขึ้นไปอีก ประสิทธิภาพในการลดสีกลับลดลงเรื่อย ๆ ทั้งนี้ เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สูงกว่า เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) มาก ๆ จะมีปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้นดังสมการ



ปฏิกิริยาข้างเคียงดังกล่าวจะทำให้ $\text{HO}^\bullet$ ที่เกิดขึ้น มีปริมาณลดลง ส่งผลให้ความสามารถในการออกซิไดซ์สี ลดลงด้วย

- ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น
- เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำเสีย จะทำให้เวลาที่ต้องใช้ในการทำปฏิกิริยาลดลง เช่น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 25°C เป็น 65°C จะทำให้เวลาในการทำปฏิกิริยาลดลงจาก 80 นาที เป็น 17 นาที โดยที่ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดสี 95 % เท่ากัน

- การบำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วยรีเอเจนท์ของเฟนตอนร่วมกับการใช้แสงแดด พบว่า แสงแดด จะทำให้ปฏิกิริยาการกำจัดสีเกิดเร็วขึ้น
- ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในการศึกษาทดลองครั้งนี้ จะอยู่ในช่วง 93.0-97.5 %

Kang and Chang (1997) ได้ทดลองบำบัดน้ำเสียสีย้อมโดยใช้เฟอร์รัสซัลเฟต (กระบวนการโคแอกกูเลชัน) อย่างเดียว เปรียบเทียบกับการใช้รีเอเจนท์ของเฟนตอน (กระบวนการออกซิเดชัน-โคแอกกูเลชัน) ซึ่งทั้ง 2 แบบ จะใช้ Anionic Polymer (Kuri, Diafloc AP-120) เป็นโคแอกกูแลนต์เอ็ด (Coagulant Aid) น้ำเสียสีย้อมที่ใช้จะเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมได้จากการผสม Polyvinyl Alcohol (PVA) 125 มิลลิกรัมต่อลิตร และสีย้อมแอคทีฟ R94H 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำกลั่น โดยมีค่าซีไอดี และความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 1050 ADMI ตามลำดับ และใช้น้ำเสียจริงที่มีส่วนผสมของ PVA และสีย้อมแอคทีฟ R94H เช่นกัน โดยมีค่าซีไอดี ความเข้มข้น และพีเอช เท่ากับ 608 มิลลิกรัมต่อลิตร 960 ADMI และ 7.7 ตามลำดับ ซึ่งพอจะสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- ในการใช้เฟอร์รัสซัลเฟต (Fe^{2+}) อย่างเดียว ช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมที่สุดที่ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมได้ดีที่สุดอยู่ระหว่าง 8-10 โดยช่วงค่าดังกล่าวจะให้ประสิทธิภาพในการลดสีและซีไอดีของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 83-86 และ 30-33 % ตามลำดับ และให้ประสิทธิภาพในการลดสีและซีไอดี ของน้ำเสียจริงประมาณ 90 และ 85 % ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าหากเติม เฟอร์รัสซัลเฟตมากเกินไป (มากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ในกรณีของน้ำเสียสังเคราะห์ และมากกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ในกรณีของน้ำเสียจริง) จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีลดลง ทั้งนี้เนื่องจาก Fe^{2+} ส่วนเกินจะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีขึ้นในน้ำ

- ช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของรีเอเจนท์ของเฟนตอนอยู่ระหว่าง 3-5 การใช้เฟอร์รัสซัลเฟตอย่างเดียวนั้น ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีไอดีต่ำกว่าการใช้รีเอเจนท์ของเฟนตอน เช่น ที่พีเอช 4 จะได้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีไอดีของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 59 และ 12 % ตามลำดับ แต่ถ้าใช้ รีเอเจนท์ของเฟนตอน จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มขึ้นเป็น 96 และ 71 % ตามลำดับ

- เมื่อเปรียบเทียบปริมาณซีไอดี และสี ที่ถูกกำจัดต่อมิลลิกรัมของ Fe^{2+} ทั้งในกรณีของการใช้ Fe^{2+} อย่างเดียว และการใช้รีเอเจนท์ของเฟนตอน จะได้ผลดังตารางที่ 2.6 ซึ่งสรุปได้ว่า ความสามารถในการกำจัดซีไอดีด้วยรีเอเจนท์ของเฟนตอนจะสูงกว่าการใช้เฟอร์รัสซัลเฟตอย่างเดียวนั้น 1.4-2.3 เท่า และประสิทธิภาพในการกำจัดสีก็สูงกว่าเช่นกัน คือ อยู่ในช่วง 1.1-1.9 เท่า

ตารางที่ 2.6 ปริมาณซีไอดี และซีไอที ที่ถูกกำจัดต่อมิลลิกรัมของ Fe^{2+} เมื่อใช้เฟอร์รัสซัลเฟต
เปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้รีเอเจนท์ของเฟนตอน

ลักษณะน้ำเสีย	mg COD ที่ถูกกำจัด/ mg Fe^{2+}		ADMI ที่ถูกกำจัด/ mg Fe^{2+}	
	Ferrous	Fenton's	Ferrous	Fenton's
น้ำเสียสังเคราะห์	0.8	1.8	9.3	10.2
น้ำเสียจริง	4.0	5.5	4.9	9.2

หมายเหตุ Ferrous หมายถึง ใช้ Fe^{2+} อย่างเดียว

Fenton's หมายถึง ใช้รีเอเจนท์ของเฟนตอน ($\text{H}_2\text{O}_2 + \text{Fe}^{2+}$)

ความเข้มข้นของ $\text{Fe}^{2+} = 100$ มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของ $\text{H}_2\text{O}_2 = 100$
มิลลิกรัมต่อลิตร

ที่มา : Kang and Chang (1997)

Lin and Chen (1997) ได้ทำการศึกษาทดลองบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมผ้าเพื่อวัตถุประสงค์ในการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้กระบวนการบำบัด 3 แบบ ร่วมกัน เริ่มต้นด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี ต่อด้วยกระบวนการ เคมีคัลโคแอกกูเลชัน และกระบวนการสุดท้ายคือ กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งการบำบัดแต่ละกระบวนการจะเป็นแบบทีละเท ทั้งหมด

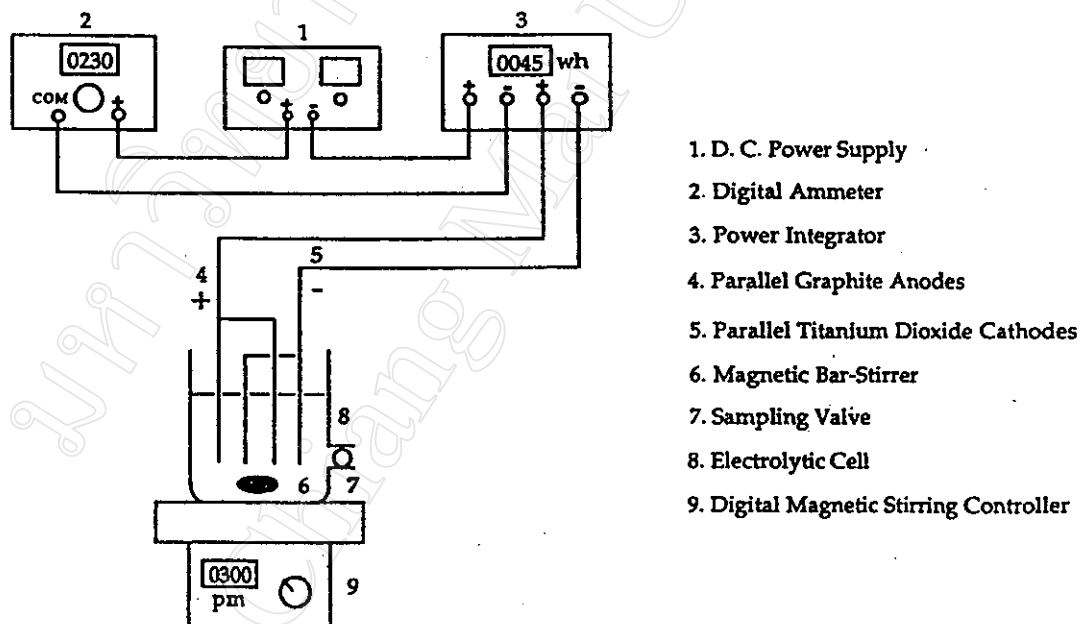
อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการไฟฟ้าเคมี ประกอบด้วยแผ่นอิเล็กโทรดซึ่งทำด้วยเหล็กเป็นขั้วบวกและลบ 2 คู่ แต่ละแผ่นวางห่างกันประมาณ 1.5 ซม. จุ่มอยู่ในน้ำเสีย รายละเอียด ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และในกระบวนการนี้ได้มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงในน้ำเสียด้วย

สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการเคมีคัลโคแอกกูเลชัน คือ Polyaluminum Chloride (PAC) และ Polymer ส่วนกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน ได้ใช้ Cationic Resin (Ambersep 132) กับ Anionic Resin (Ambersep 900) ผลการทดลองจากทั้ง 3 กระบวนการ สรุปได้ดังนี้

- พีเอชที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการไฟฟ้าเคมี มีค่าประมาณ 3 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าพีเอชที่เหมาะสมของการบำบัดสีย้อมโดยใช้รีเอเจนท์ของเฟนตอน ทั้งนี้เนื่องจาก ในกระบวนการไฟฟ้าเคมีจะมี Fe^{2+} ละลายออกมาจากแผ่นอิเล็กโทรด แล้วทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เติมลงไป เกิดเป็น $\text{HO}^\cdot$ เหมือนกับการใช้รีเอเจนท์ของเฟนตอน ดังนั้น การใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีร่วมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี และความเข้มข้น สูงกว่าการใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีแต่เพียงลำพังมาก

- ในน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี มีฟล็อกเล็ก ๆ เกิดขึ้นจำนวนมาก การใช้ Polyaluminum Chloride (PAC) 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับ Polymer 1 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถทำให้ฟลอคตกตะกอนได้ดี และจากการทดลองพบว่า การใช้ Polyaluminum Chloride (PAC) มากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่ได้ทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนดีขึ้น

- น้ำเสียที่ผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี และกระบวนการเคมีคัลโคเอกกุลชัน ยังมีค่าความกระด้าง Conductivity เหล็ก และไอออนต่าง ๆ เช่น Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} เกินมาตรฐานอยู่ ไม่เหมาะที่จะนำน้ำนี้กลับมาใช้ใหม่ ดังนั้น จึงต้องนำไปผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งจากการทดลองพบว่า สามารถลดสิ่งเจือปนต่าง ๆ ในน้ำ จนทำให้มีคุณภาพใกล้เคียงกับน้ำที่ผ่านกระบวนการ Deionization



รูปที่ 2.3 การจัดอุปกรณ์สำหรับกระบวนการไฟฟ้าเคมี ในการศึกษาของ Lin and Chen
ที่มา : Lin and Chen (1997)

Kuo (1992) ได้ทำการทดลองบำบัดน้ำเสียสีย้อม โดยใช้สารละลายรีเอเจนท์ของเฟนตอน น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีส่วนประกอบของสีย้อมแตกต่างกัน 5 ชนิด คือ สีรีแอกตีฟ สี คิสเพอร์ส สีไคเร็ก สีเบสิก และสีแอซิด (สีแต่ละชนิดบำบัดแยกกัน) น้ำเสียสังเคราะห์แต่ละชนิดมีความเข้มข้นของสีเท่ากับ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร และการทดลองทั้งหมดเป็นแบบทีละเท ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

- การลดสีและซีโอดี ในน้ำเสียเกิดได้ดีเมื่อน้ำเสียมีค่าพีเอชเท่ากับ 3.5 หรือต่ำกว่านี้ หากพีเอชสูงกว่า 3.5 ประสิทธิภาพการลดสีและซีโอดี จะต่ำ และจะต่ำลงเรื่อย ๆ ตามค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้น

- ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เติมลงในน้ำเสีย มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีโอดีของน้ำเสีย โดยที่จะมีค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมอยู่ค่าหนึ่ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสีย้อมในน้ำเสีย โดยเมื่อทดลองบำบัดสีย้อมที่อุณหภูมิ 50 °C พบว่า ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับสีย้อมชนิดต่าง ๆ เป็นดังนี้ คือ 584 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับสีย้อมรีแอกตีฟ 875 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับสีย้อมแอซิด และ 292 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับสีย้อมชนิดอื่น ๆ ที่เหลือ

- ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตที่เติมลงในน้ำเสีย มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีโอดีในน้ำเสีย โดยเมื่อใช้ในปริมาณมากขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีโอดี ในน้ำเสียจะยิ่งดีขึ้นด้วย โดยปริมาณที่เหมาะสมสำหรับสีย้อมชนิดต่าง ๆ เป็นดังนี้ คือ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับสีย้อมรีแอกตีฟ 83 มิลลิกรัมต่อลิตรสำหรับสีย้อมไคเร็ก 500 มิลลิกรัมต่อลิตรสำหรับสีย้อมแอซิดและเบสิก และ 333 มิลลิกรัมต่อลิตรสำหรับสีย้อมคิสเพอร์ส

- อุณหภูมิมีผลต่อการบำบัดคือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำเสีย จะสามารถช่วยลดเวลาที่ต้องใช้ในการกำจัดสีและซีโอดี ลงได้

- สารช่วยย้อมมีผลต่อปริมาณที่เหมาะสมของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเฟอร์รัสซัลเฟตที่ต้องใช้ในการบำบัดสีย้อม

- ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี ของน้ำเสียสังเคราะห์ทั้ง 5 ชนิด มีค่าเฉลี่ยประมาณ 88 % และประสิทธิภาพในการกำจัดความเข้มสี มีค่ามากกว่า 97 %

- เมื่อใช้วิธีการเดียวกันมาบำบัดน้ำเสียจริงที่ได้จากโรงงานย้อมผ้า ปรากฏว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี สำหรับสีย้อม 5 ชนิด มีค่าเฉลี่ยประมาณ 90 % และประสิทธิภาพในการกำจัดความเข้มสีมีค่ามากกว่า 97 %

Flaherty and Huang (1992) ได้ทดลองบำบัดน้ำเสียสีย้อมโดยใช้รีเอเจนท์ของเฟนตอน น้ำเสียสีย้อมที่ใช้เป็นน้ำเสียสีรีแอคทีฟ(Reactive Blue # 15)จากโรงงานย้อมผ้า การทดลองจะเป็นแบบที่ละเทและแบบต่อเนื่อง โดยใช้ค่าพีเอช 3.5 ความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน คงที่ เท่ากับ 0.02 โมลต่อลิตร แล้วแปรผันอัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์:เฟอร์รัสไอออน ระหว่าง 1:1- 30:1 และทำการทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

- ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดี เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์:เฟอร์รัสไอออน เพิ่มขึ้น

- เมื่อใช้เวลาทำปฏิกิริยาเท่ากัน การเพิ่มอุณหภูมิของน้ำเสียมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีไอดี ดีขึ้น

วุฒิ วิพันธุ์พงษ์ (2540) ได้ทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพของรีเอเจนท์ของเฟนตอนในการกำจัดสีและสารอินทรีย์จากน้ำเสียจริงที่มีสีรีแอคทีฟจากโรงงานฟอกย้อมผ้า การทดลองนี้มี 2 ขั้นตอน คือ การบำบัดน้ำเสียทางเคมีตามด้วยการย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

ในการศึกษาการบำบัดน้ำเสียทางเคมี พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา ได้แก่ ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 ระดับ คือ 0(ชุดควบคุม) 200 500 800 และ 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราส่วนโดยโมลระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับเหล็ก (Fe^{2+}) 3 ระดับ คือ 5:1 10:1 และ 20:1 และเวลาสัมผัส 3 ระดับ คือ 60 120 และ 180 นาที น้ำเสียที่นำมาใช้ในการทดลองมี 4 โทนี คือ โทนีดำ ม่วง แดง และน้ำตาลอ่อน ซึ่งได้ปรับให้มีค่าซีไอดี ประมาณ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่ากันทุกโทนี

จากการทดลองพบว่า เมื่อใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับเหล็ก 5:1 ในการบำบัดน้ำเสียโทนีดำ แดง น้ำตาลอ่อน และที่อัตราส่วน 10:1 ในการบำบัดน้ำเสียโทนีม่วง สามารถกำจัดสีได้สูงกว่า 80 % และพบว่าเวลา 1 ชั่วโมงเพียงพอสำหรับการเกิดปฏิกิริยา

นอกจากนี้ ปรากฏว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่า โออาร์พี (Oxidation-Reduction Potential) ที่วัดได้อย่างเห็นได้ชัด เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีถึง 80 % หรือมากกว่า ค่าโออาร์พี ต้องอยู่ในระดับสูง คือ ในช่วงประมาณ 583-614 มิลลิโวลต์ ความแตกต่างของค่าโออาร์พี ในช่วงดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับโทนีของน้ำเสียที่ใช้ อย่างไรก็ตาม การใช้รีเอเจนท์ของเฟนตอนปริมาณดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดี เพียง 12-42 %

จากการศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยรีเอเจนท์ของเฟนตอนแล้ว โดยใช้ระบบเอสบีอาร์ (Sequencing Batch Reactor) ซึ่งมีรอบวัฏจักร 24 ชั่วโมง ต่อ 1 วงจร และไม่มีการทิ้งตะกอนสลัดจ์ พบว่าน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดทางเคมีแล้วดังกล่าว ไม่เป็นอันตรายต่อระบบเอสบีอาร์ แต่ระบบเอสบีอาร์นี้ไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียดังกล่าวได้อย่างมีนัยสำคัญ

สรุปปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของรีเอเจนท์ของเฟนตอน

จากเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวข้างต้น สามารถสรุปปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาของรีเอเจนท์ของเฟนตอนได้ดังนี้

2.12.1 พีเอช

จากการศึกษาทดลองบำบัดน้ำเสียสีขี้มของ Kuo (1992) พบว่า รีเอเจนท์ของเฟนตอนจะทำงานได้ดีที่สุดที่สภาพเป็นกรดและมีค่าพีเอช ประมาณ 3.5 หรือต่ำกว่านี้

2.12.2 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเฟอร์รัสไอออน

Solozhenko et al. (1995) พบว่าเมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นความสามารถในการกำจัดสีขี้ม Monoazodye AYL จะเพิ่มขึ้น และจากการทดลองแปรผันความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ของ Kuo (1992) และ Kang and Chang (1997) พบว่าประสิทธิภาพการลดสีและซีโอดี จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) เพิ่มขึ้น

2.12.3 อุณหภูมิ

Kuo (1992) และ Solozhenko et al. (1995) พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อการบำบัดคือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำเสีย จะสามารถช่วยลดเวลาที่ต้องการสำหรับการลดสีและซีโอดี ลงได้

2.12.4 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

Solozhenko et al. (1995) พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีขี้มจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น

2.12.5 อัตราส่วนโดยโมลของ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์:เฟอร์รัสไอออน

จากการทดลองบำบัดน้ำเสียสีขี้มของ Flaherty and Huang (1992) พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีโอดีจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์:เฟอร์รัสไอออน เพิ่มขึ้น

2.12.6 แสงแดด

จากการทดลองบำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วยรีเอเจนท์ของฟีนตอนร่วมกับการใช้แสงแดดของ Solozhenko et al. (1995) พบว่า แสงแดดจะทำให้ปฏิกิริยาการกำจัดสีเกิดเร็วขึ้น

2.12.7 ชนิดของสีย้อม

จากการทดลองบำบัดน้ำเสียสีย้อมชนิดต่าง ๆ ของ Kuo (1992) พบว่า สีย้อมต่างชนิดกันจะต้องการปริมาณสารเคมีในการบำบัดแตกต่างกัน