

บทที่ 2

ทบทวนเอกสาร

2.1 ประเภทสีย้อม

สีที่เราเห็นจากสีย้อมนั้น เกิดจากอิเล็กตรอนในพันธะคู่ซึ่งอยู่ในโมเลกุลของสีย้อมนั้นๆ มีความสามารถดูดกลืนพลังงานในช่วงสเปกตรัมต่างกัน พลังงานแสงที่สายตามองเห็นจะมีความยาวคลื่นช่วง 380-770 นาโนเมตร สีย้อมที่มีโครงสร้างทางโมเลกุลต่างกัน ก็จะมีคุณสมบัติต่างกันในการดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ กันไป ซึ่งสายตาสามารถรับภาพได้ ทำให้โมเลกุลสีย้อมต่างโทนสีกันแสดงสีที่เราเห็นด้วยสายตาดูออกมาต่างกัน

การแบ่งประเภทสีย้อมนั้น ได้มีหน่วยงาน สถาบันหลายแห่งจัดแบ่งประเภทไว้ต่างกัน ดังนั้นอาจพบประเภทสีย้อมมีต่างกันได้ในสถาบันที่แตกต่างกันออกไป คณะกรรมการการค้าระหว่างประเทศของสหรัฐอเมริกาจัดแบ่งประเภทสีย้อมไว้ 12 ประเภท ตามลักษณะการใช้งาน และลักษณะของสีย้อม ตัวอย่างของสีย้อมประเภทที่นิยมใช้ทั่วไป ได้แก่ สีย้อมรีแอกทีฟ (reactive dye) สีย้อมดิสเพอร์ส (disperse dye) สีย้อมแวท (vat dye) เป็นต้น ตารางที่ 2.1 แสดงประเภทของสีย้อมตามวิธีใช้งาน ลักษณะสมบัติของเส้นใยที่เหมาะสมกับสีย้อม และกลไกในการติดสีของสีย้อมประเภทต่างๆ

สีย้อมรีแอกทีฟ มีหมู่รีแอกทีฟและโครโมฟอร์เป็นองค์ประกอบหลัก หมู่รีแอกทีฟในโมเลกุลสีย้อมสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล หรือทำปฏิกิริยากับหมู่อะมิโนใน โมเลกุลของเส้นใยฝ้าย เป็นต้น

สีย้อมดิสเพอร์สซึ่งเหมาะกับผ้าโพลีเอสเตอร์โดยทั่วไปจะเป็นอนุพันธ์ของแอนตราควิโนนมีมวลโมเลกุลต่ำและเนื่องจากไม่ละลายน้ำ การใช้จึงต้องมีการบดสีย้อมให้ละเอียดเป็นฝุ่นผงแล้วเติมสารเคมีช่วยในการแพร่กระจาย (ดิสเพอร์สซิงเอเจนท์) ผสมในน้ำเมื่อใช้งาน

ในกระบวนการย้อมนั้น สีย้อมบางส่วนติดไปกับเส้นใย ส่วนที่เหลือจะถูกล้างทิ้งลงไปตามระบบระบายน้ำรวมกับน้ำเสียจากส่วนการผลิตอื่น น้ำเสียจากกระบวนการย้อมจะมี

ปริมาณความปนเปื้อนอันเนื่องมาจากสี้อมแตกต่างกันไปตามประเภทของสี้อมที่ใช้ กระบวนการย้อม ประสิทธิภาพการย้อมรวม ประสิทธิภาพเครื่องจักร และอื่นๆ เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 ประเภทสี้อม (Buckley, 1992)

ประเภทสี้อม	สมบัติกายภาพและสมบัติเคมี	เส้นใยที่เหมาะสมกับสี้อม	พันธะหรือกลไกติดสี	วิธีใช้ทั่วไป
สี้อมเอซิด (acid dye)	- กระจุลบ - ละลายน้ำดี - สีติดไม่แน่น	- ไนลอน - ขนสัตว์	- พันธะไอออนิก	- แห่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 3-5 - เส้นใยซึ่งสมมติว่ามีประจุบวกติดกับสี้อมที่มีประจุลบที่อุณหภูมิ 50-110 ซ.
สี้อมเมทัลคอมเพล็กซ์เอซิด (metal complex acid dye)	- กระจุลบ - ละลายน้ำน้อย - สีติดแน่นดี	- ไนลอน - ขนสัตว์	- พันธะไอออนิก	- แห่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 5-7 - เส้นใยซึ่งสมมติว่ามีประจุบวกติดกับสี้อมที่มีประจุลบที่อุณหภูมิ 50-110 ซ.
สี้อมไดเรกต์ (direct dye)	- กระจุลบ - ละลายน้ำดี - สีติดไม่แน่น	- ฝ้าย - วิสคอส	- พันธะไอออนิก	- แห่เส้นใยในสารละลายต่างอ่อน - เดิมอิลคโตรไลท์ โซเดียมคลอไรด์ โซเดียมซัลเฟต และสี้อม ที่อุณหภูมิ 98 ซ.
สี้อมเบสิก (basic or cationic dye)	- กระจุลบ - ละลายน้ำดี	- อะคริลิก	- พันธะไอออนิก	- แห่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 4-6 - เดิมสี้อม แล้วเพิ่มอุณหภูมิให้ได้ 100-105 ซ.

(ต่อ)

ประเภทสีย้อม	สมบัติกายภาพ และสมบัติเคมี	เส้นใยที่ เหมาะสม กับสีย้อม	พันธะหรือ กลไกติดสี	วิธีใช้ทั่วไป
สีย้อมดิสเพอร์ส (disperse dye)	- ไม่ละลายน้ำ หรือละลายน้ำ ได้น้อยมาก - กระจายอยู่ใน น้ำเป็นอนุภาค คอลลอยด์ - สีดัดแน่นดี	- อะคริลิก - โพลีเอสเตอร์ - ไนลอน - เซลลูโลส - อะซิเตด	- คอลลอยด์ ของสีย้อม ดูดติดผิว กับเส้นใย	- แช่เส้นใยในสารละลายที่มี พีเอช 4.5 - เดิมสีย้อม แล้วเพิ่มอุณหภูมิ ให้ได้ 130 ซ.
สีย้อมรีแอค ทีฟ (reactive dye)	- กระจุลบ - ละลายน้ำดี - สีดัดแน่นดี	- ฝ้าย - วิสคอส - ขนสัตว์	- พันธะโค วาเลนต์	- แช่เส้นใยในสารละลายกรด - เดิมเกลือเพื่อกระจายสีสู่ เส้นใย - เดิมค่างเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา ระหว่างเส้นใยกับสีย้อม
สีย้อมซัลเฟอร์ (sulphur dye)	- เป็นคอลลอยด์ หลังจากเกิด ปฏิกิริยาในน้ำ - ไม่ละลายน้ำ - สีดัดแน่น	- ฝ้าย - วิสคอส	- ปฏิกิริยา ตกตะกอน ผลึกภายใน เส้นใย	- ละลายสีย้อมในสารละลาย ค่างที่มีโซเดียม ซัลเฟอร์ - สีย้อมจะแพร่กระจายไปสู่ เส้นใยด้วยอิเล็กโตรไลต์
สีย้อมแวท (vat dye)	- เป็นคอลลอยด์ หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำ - ไม่ละลายน้ำ - สีดัดแน่น	- ฝ้าย - วิสคอส	- ปฏิกิริยา ตกตะกอน ผลึกภายใน เส้นใย	- ละลายสีย้อมในสารละลาย ค่างที่มีโซเดียม ซัลเฟอร์ - สีย้อมจะแพร่กระจายไปสู่ เส้นใยด้วยอิเล็กโตรไลต์

(ต่อ)

ประเภทสีย้อม	สมบัติกายภาพ สมบัติและเคมี	เส้นใยที่ เหมาะสม กับสีย้อม	พันธะหรือ กลไกติดสี	วิธีใช้ทั่วไป
สีย้อมอะโซอิก (azoic dye)	- เป็นคอลลอยด์ หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำ - ไม่ละลายน้ำ - สีติดแน่น	- ฝ้าย - วิสคอส	- ปฏิกิริยา ตกตะกอน ผลึกภายในเส้นใย	- ละลายสีย้อมในสารละลาย ค่าที่มีโซเดียม ซัลเฟต - สีย้อมจะแพร่กระจายไปสู่ เส้นใยด้วยอิเล็กโตรไลต์ - ต้มเพื่อให้เกิดตะกอนผลึก
สีย้อม มอร์แดนท์ หรือ โครม (mordant or chrome)	- กระจุก - ละลายน้ำได้ - สีติดแน่นดี	- ขนสัตว์	- พันธะ เชิงซ้อน ของเส้นใย โครมและ สีย้อม	- แช่เส้นใยในสารละลายกรด - เคมีโซเดียมไดโครเมต และ สีย้อม - เพิ่มอุณหภูมิถึง 98 ซ.

สมบัติของสีย้อมมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างทางเคมีของสีย้อมและเส้นใยโดยตรงและส่งผลกับการนำไปใช้งานกล่าวคือ สีย้อมบางประเภทอาจเกิดการย่อยสลายในระหว่างการย้อม ความเหมาะสมต่อเส้นใยชนิดหนึ่งๆ จะขึ้นกับอนุมูลเส้นใยและสีย้อม แต่สีย้อมที่คั้นนั้นควรมีคุณสมบัติทั่วไปดังนี้ คือ

- ความทนต่อแสง
- ความทนต่อความชื้น
- ความทนต่อความร้อน เป็นต้น

2.2 การย้อมผ้า

2.2.1 กลไกในการย้อม

การย้อมสีในเชิงพาณิชย์จะใช้วิธีการทำสีย้อมให้เป็นสารละลาย หรืออาศัยตัวทำกระจาย เพื่อนำสีย้อมไปสู่เส้นใย เช่น ดิสเพอร์สเอเจนท์ โซเดียมคลอไรด์ โซเดียมซัลเฟตเป็นต้น แล้วตามด้วยกระบวนการทำให้สีย้อมติดแน่น คือเป็นการพยายามที่จะให้สีย้อมติดกับเส้นใยอย่างคงทน ไม่ว่าจะมีการซักล้างจากของเหลวชนิดใด ซึ่งกลไกหรือขั้นตอนต่างๆ จะเกิดขึ้นระหว่างการแช่เส้นใยด้วยสารละลาย

สรุปกลไกในการย้อมผ้าได้ดังนี้

- กลไกการแพร่กระจายของสีย้อม ไปยังผิวหน้าของเส้นใย
 - กลไกการดูดติดผิวของสีย้อมกับผิวหน้าเส้นใย
 - กลไกการแพร่กระจายของโมเลกุลสีย้อม ผ่านชั้นกั้นทางชลศาสตร์เข้าไปสู่ภายในเนื้อเส้นใย
 - กลไกการดูดติดผิวภายในเนื้อเส้นใย
 - กลไกการถ่ายเทเชิงกลและกักสีย้อมเชิงกล เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี บนเส้นใย
- : กระบวนการสร้างพันธะกับหมู่อนุมูลของเส้นใย

โดยปกติกลไกการแพร่กระจายของโมเลกุลสีย้อมผ่านชั้นกั้นทางชลศาสตร์ เข้าไปสู่ภายในเนื้อเส้นใย จะใช้เวลานานที่สุด

การสร้างสภาวะที่เหมาะสมให้กลไกเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพนี้ ต้องมีการเติมสารเคมีที่เหมาะสม เช่น อิเล็กโตรไลต์ กรด ค่าง ซึ่งจะเติมสารเคมีตัวใดนั้นขึ้นกับประเภทของสีย้อมชนิดเส้นใย และปัจจัยอื่นๆ ด้วย นอกจากการเติมสารเคมีแล้ว ระยะเวลาสัมผัส การให้ความร้อนหรือควบคุมอุณหภูมิ ลำดับการเติมสารเคมีและเส้นใย ฯลฯ ที่เหมาะสมเหล่านี้ จะเป็นการควบคุมสภาวะที่ส่งเสริมการเกิดกลไกในการย้อมด้วย เครื่องย้อมผ้ารุ่นใหม่ที่มีระบบไมโครโปรเซสเซอร์ (micro processor) จะสามารถควบคุมสภาวะการย้อมได้แม่นยำขึ้น

จากตารางที่ 2.1 ข้างต้นพบว่า ปัจจัยที่กำหนดกรรมวิธีในการย้อมนั้นมีอยู่อย่างน้อย 3 ปัจจัย คือ ประเภทของสีย้อมที่นำมาใช้ วัตถุประสงค์หรือชนิดเส้นใยที่นำมาย้อม และคุณภาพของผลิตภัณฑ์หรือคุณภาพสีย้อมที่ต้องการให้ติดไปกับเนื้อเส้นใยผ้า เหล่านี้คือ ปัจจัยหลักที่กำหนดกรรมวิธีการย้อมและการควบคุมกระบวนการย้อม

ถ้ามองไปในแต่ละปัจจัยทั้ง 3 ข้างต้นที่กำหนดกระบวนการย้อม ก็ได้พบอีกว่าในแต่ละปัจจัยหลักนั้นๆ ยังแบ่งออกไปในรายละเอียดคือ

1. สีย้อมที่เหมาะสมสำหรับการย้อมเส้นใยประเภทโปรตีน เช่น ขนสัตว์ ไหม เป็นต้น จะไม่เหมาะที่จะนำไปย้อมเส้นใยประเภทเซลลูโลส สีย้อมที่เหมาะสมกับการย้อมไหม ขนสัตว์ ฝ้าย และเรยอน (rayon) ส่วนใหญ่ไม่สามารถย้อมกับเส้นใยสังเคราะห์ได้ สีย้อมดิสเพอร์สไม่เหมาะจะนำมาย้อมกับเส้นใยฝ้ายหรือขนสัตว์ ทั้งหมดที่กล่าวมานี้เป็นเพราะลักษณะสมบัติทางเคมีของสีย้อมและเส้นใยที่เป็นตัวกำหนดความเข้ากันได้ (ดูตารางที่ 2.2)

ตารางที่ 2.2 เส้นใยและประเภทสีย้อมที่เหมาะสม (CDG, 1993)

เส้นใย	ประเภทสีย้อมที่เหมาะสม
ฝ้าย	ไดเรคท์ ซัลเฟอร์ อะโซอิก แวท รีแอกทีฟ
ลินิน	ไดเรคท์ ซัลเฟอร์ อะโซอิก แวท รีแอกทีฟ
ขนสัตว์	เอซิค เมทัลคอมเพล็กซ์ มอร์แดนท์ รีแอกทีฟ
ไหม	ไดเรคท์ เอซิค เบสิก รีแอกทีฟ
เรยอน(rayon)	ไดเรคท์ รีแอกทีฟ
อะซิเตด	ดิสเพอร์ส
ไนลอน	เอซิค โมดิฟายด์เบสิก เมทัลคอมเพล็กซ์
โพลีเอสเตอร์	ดิสเพอร์ส
อะคริลิก	โมดิฟายด์เบสิก โมดิฟายด์เอซิค

2. ในการข้อมสีเส้นใยนั้นนอกจากสีข้อมแล้ว อาจต้องมีการเติมสารเคมีเพิ่มเติมตัวอย่างของการเติมสารเคมีเพิ่มเติม เช่น

- สารเคมีสำหรับการขยายเส้นใยจะถูกใช้กับเส้นใยโพลีเอสเตอร์ เพื่อช่วยให้การดูดซับสีข้อมดีขึ้น
- สารออกซิไดซิงเอเจนต์หรือรีดิวซิงเอเจนต์ ถูกนำมาใช้ควบคุมปริมาณการใช้ออกซิเจนในกระบวนการข้อม
- การข้อมสีให้สม่ำเสมอขึ้นขึ้นอยู่กับระบบที่ใช้ในการข้อม ซึ่งส่วนใหญ่จะพิจารณาถึงพีเอช ความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์ สารช่วยเพิ่มความสม่ำเสมอจะใช้ได้ดีในกรณีข้อมกับระบบเส้นใยหลายระบบ

3. อุณหภูมิในการข้อมจะแตกต่างกันไปขึ้นกับประเภทหรือชนิดของสีข้อม การเพิ่มอุณหภูมิจะช่วยให้สีข้อมกระจายตัวในสารละลาย หรือซึมผ่านเส้นใยได้ดี

4. ในประเภทสีข้อมเดียวกัน ซึ่งมักพบว่าแม้เป็นสีข้อมจากผู้ผลิตเดียวกันประเภทสีข้อมเดียวกัน แต่ต่างกันในเรื่องโทนสีหรือรุ่นสินค้าไม่เหมือนกันก็ยังมีเกร็ดหรือเทคนิคในการควบคุมสถานะของการข้อมต่างกัน

แม้ในการข้อมสีบนเนื้อเส้นใยชนิดเดียวกัน ประเภทสีข้อมก็อาจเลือกมาใช้ใดๆ หรือผสมกันข้ามประเภทก็ได้เช่น สีน้ำคาลใช้สีข้อมรีแอคทีฟ เมื่อเปลี่ยนเป็นสีดำอาจใช้สีข้อมเอซิคัลวันๆ หรือผสมกับสีข้อมรีแอคทีฟก็ได้ เมื่อเป็นเช่นนี้จะพบเสมอว่ากระบวนการข้อม การควบคุมสถานะการข้อมย่อมเปลี่ยนไปด้วยในรายละเอียด เช่น การเติมสารช่วยข้อม พีเอชอิเล็กโตรไลต์ อุณหภูมิ เวลาสัมผัส ฯลฯ

5. ดังได้แสดงในตารางที่ 2.1 และ 2.2 ว่าการข้อมเส้นใยประเภทฝ้ายนั้น สามารถเลือกสีข้อมได้หลายประเภท คือ สีข้อมไคเร็กซ์ สีข้อมรีแอคทีฟ สีข้อมซัลเฟอร์ สีข้อมแวก เป็นต้น ซึ่งแต่ละประเภทมีกรรมวิธีในการควบคุมสถานะการข้อมในรายละเอียดต่างกัน เช่น พีเอช อุณหภูมิ และเวลาสัมผัส เป็นต้น

หรือในความแตกต่างของสีข้อมแต่ละประเภท สารเคมีที่ใช้และการเตรียมสารละลายก็ต่างกันอย่างสิ้นเชิง ตัวอย่างเช่น สีข้อมคิสเทอร์สนั้นไม่ละลายน้ำ ต้องมีการเติมสารคิสเทอร์สเอเจนต์ช่วยในการแพร่กระจายสีข้อม ในขณะที่สีข้อมประเภทอื่นนั้นไม่จำเป็นต้องใช้เพราะลักษณะสมบัติทางเคมีต่างกัน

นอกจากนี้แนวโน้มในการผลิตผ้าที่มีส่วนผสมของฝ้ายและโพลีเอสเตอร์มีเพิ่มขึ้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องผสมสีย้อมข้ามประเภท เพื่อย้อมฝ้ายและโพลีเอสเตอร์ซึ่งที่นิยมก็คือการใช้สีย้อมดิสเพอร์สร่วมกับสีย้อมแวท

6. มักพบเสมอว่าเมื่อต้องการได้เปรียบในเรื่องการพัฒนาสินค้า โรงฟอกย้อมมักจะมีหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับฝ่ายผลิตทำหน้าที่ศึกษาทดลองพัฒนาผลิตภัณฑ์ ให้ได้สีที่คาดว่าจะถูกใจผู้บริโภค ซึ่งหน่วยงานเหล่านี้จะอยู่ในโรงย้อมนั่นเอง ทำงานในลักษณะของการผสมการใช้สีย้อมที่มีขายอยู่แล้วในท้องตลาดในสัดส่วนต่างๆ กันเพื่อให้ฝ้ายวิจัยตลาดนำไปศึกษาถึงการตอบสนองของผู้บริโภคต่อไป การผสมสีดังกล่าวมีทั้งผสมกันเองในสีประเภทเดียวกันและข้ามประเภท และมักพบว่าการควบคุมสภาวะการย้อมในรายละเอียดนั้น เปลี่ยนไปทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ ซึ่งการนำไมโครโปรเซสเซอร์มาใช้ควบคุมคุณภาพการย้อมจะทำให้เกิดความสะดวกรวดเร็วและแม่นยำขึ้น

2.2.2 การแบ่งประเภทการย้อม

แบ่งตามลักษณะผลิตภัณฑ์ได้ 5 ประเภท

- การย้อมสีเส้นใยธรรมชาติ
- การย้อมสีแบบ Top ใช้สำหรับเส้นใยขนสัตว์
- การย้อมสีแบบ Dope ใช้กับเส้นใยสังเคราะห์
- การย้อมสีลงบนด้ายดิบ
- การย้อมสีลงบนผืนผ้าทั้งชิ้นหรือบางส่วน หลังจากที่ผ้าถูกดักและทอเป็นผืนแล้ว

และการย้อมดังกล่าวยังแบ่งลงไปได้อีก 2 ประเภท ตามกระบวนการผลิต คือ การย้อมแบบต่อเนื่อง และการย้อมแบบทีละเท

การย้อมทั้งสองประเภทเมื่อนมองในแง่สารเคมีที่นำมาใช้แล้วจะคล้ายกัน แต่จะต่างกันในเรื่องประสิทธิภาพและวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้ ตัวอย่าง เช่น การย้อมแบบต่อเนื่องจะเหมาะสม

กับการข้อมเส้นใยที่ยาวหรือต่อเนื่อง ก่อนที่จะนำมาดักเป็นเส้นผ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพราะมีความสม่ำเสมอของเส้นด้าย ส่วนผ้าที่มีการตัด ดัก ทอ ออกมาเป็นชิ้นแล้วจึงมาข้อมที่หลัง เช่น ถูกรอง ถูงั่ว หรือสินค้าที่มีการเปลี่ยนแปลงความต้องการตามความนิยม รวมถึงการข้อมวัตถุดิบเส้นใยก่อนนำมาดักซึ่งพบน้อย การข้อมแบบทีละเทจะให้ความสะดวกมากกว่า

ในที่นี้จะขอกกล่าวถึงเครื่องข้อมผ้าทั้งสี่เพราะเป็นที่นิยมข้อมกันมากและผลิตกันมานานแล้ว อาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

ก) การข้อมแบบครั้งคราวหรือทีละเท

ข) การข้อมแบบต่อเนื่อง

ก) การข้อมทีแบบครั้งคราวหรือทีละเท

1. เครื่อง Hydraulic Jigger

มีใช้กันมานานแล้วและมีการพัฒนาเรื่อยมา ในปัจจุบันมีไมโครโปรเซสเซอร์เป็นตัวควบคุมอุณหภูมิ ความเร็ว ความตึงของเส้นใย การไหลเวียนสีข้อมซึ่งสามารถควบคุมคุณภาพได้ตามต้องการโดยไม่เกิดรอยย่น

2. เครื่อง Winch Dyeing

สามารถข้อมสีผ้าได้ทุกชนิด ผ้าเหล่านี้ต้องไม่ถูกดึงตามความยาว เช่น ผ้าที่ถูกดักแบบมีรู ผ้าทอด้วยขนสัตว์ ผ้าฝ้ายที่ทอแบบย่น และผ้าเปราะบางทุกชนิด เส้นใยที่มีลักษณะเหมือนเชือกและปราศจากความตึง สามารถดูดซับสีได้มากกว่า เครื่องกวนแบบปิดช่วยลดการสูญเสียความร้อนและทำให้ข้อมได้เร็วขึ้น จิมจับได้ดี

3. เครื่อง Beam Dyeing

ใช้กับการย้อมเส้นใยสังเคราะห์ ซึ่งเป็นการย้อมที่ใช้อุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดน้ำ ผ้าจะถูกยึดติดกับแท่งเจาะรูพรุนซึ่งจะถูกจุ่มในภาชนะด้านแรงดันที่ต่อกับปั๊มสีย้อมและอุปกรณ์อื่นที่จำเป็น สีย้อมที่อยู่ในสภาพของเหลวที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 130 ซ. จะถูกสูบหมุนเวียนผ่านแท่งผ้าให้ได้ระยะเวลาที่ต้องการการย้อมสี การล้างสี และการย้อมสีโดยความร้อนสามารถทำได้ในเครื่องเดียวกัน ข้อดีของเครื่องแบบนี้ คือ หลีกเหลี่ยงรอยย่น และการหดของผ้าซึ่งเกิดจากเครื่อง Jigger และ Winch

4. เครื่อง Jet Dyeing

เกิดขึ้นมาเพื่อตอบสนองความต้องการผ้าที่สามารถทำจีบได้ และแก้ไขข้อบกพร่องของเครื่อง Winch Dyeing เช่น การพันกันของเส้นใย ความต้องการอัตราส่วนของของเหลวสูง ความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิตลอดของเหลว ยิ่งไปกว่านั้นยังลดการความดึงเส้นใยและรอยย่นบนผ้า ปัจจุบันสามารถใช้ได้กับสีย้อมรีแอกทีฟ สีย้อมดิสเพอร์ส สีย้อมแวท

5. เครื่อง Padding Process

ใช้สำหรับการย้อมแบบเคลื่อนสีเป็นระยะทางยาว แบบไม่ต่อเนื่อง ราชระเอียดไม่ขอกล่าวในที่นี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข) การย้อมแบบต่อเนื่อง

ปัจจุบันวิธีการแบบ Pad-Dry-Thermofix สามารถใช้ย้อมผ้าที่มีส่วนผสมของโพลีเอสเตอร์และฝ้ายด้วยสีย้อมดิสเพอร์สและรีแอกทีฟ ในสัดส่วนที่เพิ่มฝ้ายได้มากขึ้น กระบวนการนี้ทำให้ปริมาณการใช้น้ำและค่างน้อยลง

2.3 แหล่งกำเนิด และลักษณะสมบัติน้ำเสียย้อมผ้า

ตารางที่ 2.3 ประเภทของมลพิษที่ปนเปื้อนในน้ำเสียย้อมผ้าเนื่องจากประเภทสีย้อมที่ใช้ (CDG, 1993)

เส้นใย	ประเภทสีย้อม	มลพิษที่ปนเปื้อน
ฝ้าย	- สีย้อมโคเร็คท์	- เกลือ - สีย้อม (5 - 30%) - เกลือของทองแดง (สารช่วยย้อม)
	- สีย้อมรีแอคทีฟ	- เกลือ - ค่าง - สีย้อม (10 - 40%)
	- สีย้อมแวท	- ค่าง - ออกซิไดซิงเอเจนท์ รีดิฟซิงเอเจนท์
	- สีย้อมซัลเฟอร์	- ค่าง - ออกซิไดซิงเอเจนท์ รีดิฟซิงเอเจนท์ - สีย้อม (20 - 40%)
ขนสัตว์	- สีย้อมโครม	- กรดอินทรีย์ - เกลือโลหะหนัก
	- สีย้อมเมทัลคอมเพล็กซ์ เอซิค	- กรดอินทรีย์ - กรดอนินทรีย์ - สีย้อม (5 - 20%)
โพลีเอสเตอร์	- สีย้อมดิสเพอร์ส	- กรดอินทรีย์ - รีดิฟซิงเอเจนท์

โดยทั่วไปแล้วสารละลายในถังย้อมซึ่งส่วนใหญ่มีน้ำเป็นตัวทำละลายและน้ำล้างสารที่ตกค้างในเนื้อผ้า เช่น สี แปะง โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เจลลาติน โซเดียม

คลอไรด์ โซเดียมซัลเฟต โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมคาร์บอเนต สบู่ โปรท โครเมียม แคลเมียม เป็นต้น ถือเป็นแหล่งกำเนิดน้ำเสียจากกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งปริมาณสารปนเปื้อนในน้ำเสียนั้น จะมีมากน้อยต่างกันไปตามชนิดสี้อม กรรมวิธีที่ใช้ กระบวนการผลิตก่อนหน้านี้อันมีประสิทธิภาพการย้อม

เพราะเหตุว่ากระบวนการย้อมต่างกัน สี้อมต่างกัน และเส้นใยต่างกัน สารเคมีที่ใช้ร่วมกันจึงต่างกันทำให้ลักษณะสมบัติของน้ำเสียและปริมาณน้ำเสียต่างกันไปตามวิธีการผลิต (คูตารางที่ 2.3)

โดยทั่วไปแล้วสี้อมทั้งหมดยกเว้นสี้อมรีแอกทีฟ จะติดอยู่บนเส้นใยด้วยกระบวนการดูดติดผิวทางกายภาพ การสร้างพันธะโควาเลนต์ระหว่างโมเลกุลเส้นใยและสี้อม หรือการสร้างโมเลกุลโลหะหรือเกลือเชิงซ้อนกับเส้นใย

นอกจากสารเคมีที่ปนเปื้อนมาในน้ำเสียแล้ว ยังมีเรื่องอุณหภูมิของน้ำเสียที่สูงกว่าอุณหภูมิปกติคือโดยเฉลี่ยน้ำเสียฟอกย้อมจะมีอุณหภูมิสูงกว่า 50 ซ.ขึ้นอยู่กับกระบวนการย้อม

2.4 ปัญหาเนื่องจากมีสี้อมในน้ำเสีย

ผลกระทบจากการที่มีสี้อมปนเปื้อนมากับน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า พอสรุปได้ว่าผลกระทบจากสี้อมในน้ำเสียต่อแหล่งน้ำตามธรรมชาติขึ้นอยู่กับ

1. ความเข้มข้นของสี้อมในน้ำเสีย
2. อัตราการไหลของน้ำเสีย
3. ขนาดของแหล่งน้ำธรรมชาติ
4. คุณภาพแหล่งน้ำธรรมชาตินั้นๆ เช่น ออกซิเจนละลายน้ำ เป็นต้น

ปัญหาหลักของน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยสี้อม คือ สีที่ขัดขวางการเดินของแสงในน้ำแม้ว่าแหล่งน้ำธรรมชาติจะมีขนาดใหญ่เพียงใดก็ตาม เนื่องจากสี้อมสามารถสะสมได้ในน้ำ (KUO, 1992)

การทิ้งน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยสีย้อม ไม่เพียงแต่เกิดภาพไม่สวยงามในแหล่งน้ำเท่านั้นแต่สีในน้ำยังขัดขวางการส่องของแสงซึ่งมีประโยชน์ต่อการสร้างออกซิเจนในน้ำ ส่งผลกระทบต่อกระบวนการทางชีวะในน้ำโดยตรง

สีย้อมที่ถูกทิ้งลงในแหล่งน้ำบางชนิด จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีใช้ออกซิเจนในแหล่งน้ำทำให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ และสีย้อมบางชนิดเป็นพิษโดยตรงต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำด้วย (Ajmal และ Khan, 1985)

ปัญหาที่เกิดจากสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานพอสรุปได้ว่า

1. เกิดความไม่สวยงามทางด้านทัศนียภาพ
2. สีย้อมที่เป็นสารอินทรีย์ย่อยสลายได้ ทำให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำลดลง
3. ขัดขวางการเดินทางของแสง ซึ่งจำเป็นต่อการสังเคราะห์แสงของพืช
4. การผลิตออกซิเจนลดลง อันเป็นผลมาจากข้อ.3 (ต่อสัตว์น้ำ)
5. ความเป็นพิษของตัวสีย้อม
6. ทั้งหมดส่งผลให้สภาวะของแหล่งน้ำไม่เหมาะต่อการดำรงชีพของสิ่งมีชีวิต

ในแหล่งน้ำ

2.5 การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า

2.5.1 การลดปริมาณของเสีย

เป็นความจำเป็นที่การวางแผนป้องกันที่จะลดปริมาณของเสียให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด ณ แหล่งกำเนิด ต้องทำให้สำเร็จก่อนเพราะนั่นหมายถึงต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบขนถ่ายของเสียและระบบบำบัดของเสีย รวมไปถึงค่าใช้จ่ายดำเนินการและค่าบำรุงรักษาต่อระบบฯ ที่สร้างขึ้นจะเหมาะสมและประหยัดที่สุดด้วย

น้ำเสียจากโรงฟอกย้อมก็เช่นกัน ผู้ปฏิบัติการในฝ่ายผลิตต้องมีการจัดระบบการการทำงานร่วมกับเครื่องจักรและเทคโนโลยีได้อย่างเหมาะสม สามารถสร้างประสิทธิภาพในการย้อมที่เหมาะสมที่สุดที่จะลดปริมาณการใช้สีย้อมที่อาจจะรั่วไหลออกไปกับน้ำเสีย ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน และวัตถุดิบลงด้วย เช่น

- การนำน้ำหล่อเย็นกลับมาใช้อีก โดยการเลือกใช้ระบบหล่อเย็นที่ไม่มีการสัมผัสระหว่างเส้นใยและสารเคมีกับน้ำหล่อเย็นโดยตรง สามารถนำน้ำหล่อเย็นไปเข้าคูลลิ่งทาวเออร์แล้วนำกลับมาหล่อเย็นได้หลายๆ รอบ

- หลีกเลี่ยงการใช้สีย้อมที่มากเกินไป
- เลือกใช้สารเคมีหรือสีย้อมที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม หรือง่ายต่อการนำไปบำบัดเช่น ใช้สีย้อมหรือสารเคมีที่ไม่มีพิษอันส่งผลกระทบต่อการทำงานของมวลจุลชีพในระบบบำบัดฯ
- ตรวจสอบป้องกันไม่ให้เกิดรอยรั่วรอยรั่วที่ถังย้อม เส้นท่อ เป็นต้น
- เพื่อให้เกิดความสะดวกในช่วงการบำบัดน้ำเสีย ควรสร้างระบบระบายน้ำแยกในกรณีที่โรงย้อมนั้นมีกระบวนการผลิตอื่นร่วมด้วยในเส้นทางหรือปลายทาง
- ในช่วงการล้างชิ้นงานเพื่อกำจัดสีย้อมและสารเคมีส่วนเกิน พยายามใช้น้ำเท่าที่จำเป็น
- จัดแผนงานการผลิตให้เหมาะสมกับเวลา ปริมาณสีย้อม และสารเคมี ไม่ให้มีสีย้อมและสารเคมีเหลือ ควรขอให้มีผ้ามากพอสำหรับการย้อมในแต่ละครั้ง

นอกจากความร่วมมือของผู้ปฏิบัติงานในฝ่ายผลิตแล้ว การแก้ไขตรงเทคโนโลยีที่เลือกนำมาใช้ในการย้อมหรือการผลิต ไม่ว่าจะเป็นเทคโนโลยีด้านเคมีและอุปกรณ์ของเครื่องจักร ซึ่งวิธีนี้ต้องอาศัยความร่วมมือจากผู้ชำนาญการหลายส่วนที่เกี่ยวข้องทั้งในวงการและนอกวงการผลิต เช่น ผู้ผลิตเครื่องจักรอุปกรณ์ในการย้อมผ้าต้องมีการวิจัยพัฒนากระบวนการหรือวิธีการย้อมสีผ้าแบบใหม่ๆ ที่ให้ความสะดวก มีประสิทธิภาพ ประหยัดพลังงาน ใช้ร่วมกับสารเคมีที่ก่อให้เกิดมลพิษน้อยที่สุด หรือเป็นมลพิษที่สามารถกำจัดได้สะดวก และไม่สิ้นเปลือง เป็นต้น การร่วมมือแก้ไขนี้จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการผลิตทั่วโลก ตัวอย่างของการแก้ไขเปลี่ยน

แปลงและเลือกเทคโนโลยีด้านการผลิต ที่ช่วยลดปริมาณของเสียจากแยกกล่าวเป็นข้อๆ ได้ดังนี้ (CDG, 1993)

1.) ในกระบวนการย้อมผ้าโดยอาศัยปฏิกิริยาเอกซอสที่ชัน (exhaustion) ปัจจุบันได้มีการพัฒนาการย้อมสีแบบ Short Liquor สำหรับย้อมผ้าฝ้ายและผ้าผสมฝ้าย โดยเฉพาะผ้าฝ้ายผสมกับโพลีเอสเตอร์ซึ่งใช้เป็นผลสำเร็จ โดยเฉพาะกับการย้อม 2 ครั้ง และที่อัตราส่วนของเหลวต่ำ ซึ่งก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ ประหยัด และช่วยลดปริมาณของเสียที่เกิดในกระบวนการย้อม

กล่าวคือ - สามารถลดปริมาณน้ำเสียที่จะเกิดขึ้นได้ 30 %

- ลดการใช้ไอน้ำลง 40-50 %

- ลดสารเคมีได้ 40 %

- ลดปริมาณเกลือและสีย้อม โดยเฉพาะสีย้อมคิสเพอร์ส สีย้อมรีแอกทีฟสี

ย้อมแนว สีย้อมซัลเฟอร์ สีย้อมโคเรคท์ ลดได้ 15-20 % เมื่อใช้โทนสีเข้ม ในขณะที่การใช้สีย้อมเบสิก สีย้อมเอซิค สีย้อมเมทัลคอมเพล็กซ์ จะลดการใช้ได้ไม่มากนัก

การใช้อัตราส่วนของเหลวต่ำทำได้ดังนี้

1. ใช้กระบวนการเติมสารเคมีแบบอัตโนมัติ

2. ใช้ปั๊มที่สามารถควบคุมอัตราการไหลหมุนเวียน

3. ใช้วิธีย้อมแบบซิงโครไนซ์ (synchronise)

4. มีระบบควบคุมการใช้ไฟฟ้า

เครื่องจักรแบบเอกซอสที่ชัน (exhaustion) รุ่นใหม่จะใช้อากาศเป็นตัวกลางในการผ่านเส้นใย ไม่ว่าจะเป็นแบบเดี่ยวซึ่งออกแบบให้ใช้กับเส้นใยสังเคราะห์ หรือแบบผสมกับของเหลวซึ่งออกแบบสำหรับเส้นใยสังเคราะห์และเส้นใยธรรมชาติโดยมีอัตราส่วนของเหลวเท่ากับ 3:1 สำหรับเส้นใยสังเคราะห์และ 5:1 สำหรับเส้นใยเซลลูโลส

2.) การลดปริมาณการใช้เกลือและความร้อนในการย้อม

การใช้สีย้อมรีแอกทีฟในปฏิกิริยาการย้อมแบบเอกซอสซัน (exhaustion) ต้องการเกลือในปริมาณที่เหมาะสม แต่การย้อมแบบแพดแบตช์ (pad batch) ไม่ต้องการเกลือในการย้อม ยิ่งกว่านั้น การย้อมแบบโคลด์แพดแบตช์ (cold pad batch) ไม่สิ้นเปลืองพลังงานความร้อน เป็นต้น

3.) ลดการใช้ยูเรีย

การเติมสารเคมีบางชนิดสามารถลดปริมาณการใช้ยูเรียลงได้อย่างมีนัยสำคัญ เพราะเหตุว่ายูเรียนั้นเป็นสารอาหารที่สามารถก่อให้เกิดมลภาวะทางน้ำได้ถ้ามีปริมาณมากเกินไป ในปัจจุบันมีการเติมสาร ไดอะไซยานาไดอะไมด์ (diacyanadiamide) ประมาณ 15 ก./ล. เพื่อลดปริมาณการใช้ยูเรีย ซึ่งจากเดิมจะใช้ประมาณ 200 ก./ล. ให้เหลือเพียง 30-50 ก./ล. เป็นต้น

4.) เพิ่มปริมาณการใช้ไมโครโปรเซสเซอร์

การใช้ไมโครโปรเซสเซอร์จะช่วยควบคุมฟังก์ชันและปัจจัยต่างๆ ในการผลิต ให้สามารถทำได้อย่างแม่นยำและใช้ทรัพยากรเท่าที่จำเป็น เช่น ควบคุมการใช้ปริมาณสีย้อม ปริมาณสารเคมี อุณหภูมิ อัตราการไหลเวียนสีย้อมและสารเคมี การจัดโปรแกรมเวลาให้สัมพันธ์กับปริมาณ และความเร็วมอเตอร์ ฟีเอช และยังสามารถควบคุมการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ ได้อีกด้วย

5. เปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของสีย้อม

เนื่องด้วยสีย้อมแบบผงจะก่อให้เกิดปัญหาด้านฝุ่นละออง ทำให้ในช่วงไม่กี่ปีมานี้มีการพัฒนาสีย้อมที่มีลักษณะเป็นของเหลวซึ่งสามารถใช้ได้ดีกับระบบกระจายสีแบบอัตโนมัติ แต่มีข้อเสียในเรื่องค่าใช้จ่ายในการขนส่ง ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยใช้สีย้อมแบบเม็ดหรือแบบมูซึ่งไม่ก่อให้เกิดปัญหาที่ระบบกระจายสีแบบอัตโนมัติของเครื่องจักร

6. ลดปริมาณการใช้สีย้อมที่เป็นพิษ

สารอะโซคือเป็นสารก่อมะเร็ง และสีย้อมใดเรคท์ส่วนใหญ่ก็เป็นสารประกอบอะโซ สำหรับสารเบนซิดีน (benzedine) จากกระบวนการสังเคราะห์คองโกเรด (congo red) ก็ถือว่าเป็น

สารที่ก่อมะเร็งเช่นเดียวกัน ส่วนสีซ็อมซัลเฟอร์และสีซ็อมแวกก็มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แนวโน้มในอนาคตจะมุ่งไปที่การพัฒนาสีซ็อมดิสเพอร์สซึ่งขณะนี้ยังไม่ส่งผลกระทบต่อ

2.5.2 ระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า

1. ระบบบำบัดขั้นปฐมภูมิ

ในขั้นตอนนี้จะประกอบไปด้วยบ่อพักและการปรับพีเอช ส่วนตะแกรงนั้น ถ้าเป็นโรงฟอกย้อมที่ไม่มีการตัดต่อผ้าก็อาจไม่มีก็ได้ เพราะในช่วงที่น้ำเสียอยู่ที่บ่อพักของแข็งบางส่วนสามารถตกตะกอนได้ แต่ถ้ามีกระบวนการทอผ้า ถักผ้า มีการตัดขอบผ้า ตะแกรงก็มีความจำเป็น

มักพบเสมอว่าน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมจะมีอุณหภูมิสูงกว่า 50 ซ.ก่อนเข้าบ่อพักหรือมากกว่านี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการย้อม ความยาวท่อ และลักษณะหรือประเภทท่อ(เป็นรางเปิด/ท่อปิด) บางกรณีพบว่าเวลากักเก็บน้ำในบ่อพักน้อย กอรปกับอัตราส่วนพื้นที่ผิวน้ำในบ่อพักต่อความลึกอาจไม่เพียงพอต่อการระบายความร้อนโดยอาศัยความร่อนแผ่ การมี쿨ลิ่งทาว์เออร์ช่วยในการลดอุณหภูมิน้ำเสียให้เหมาะสมกับการเติบโตของจุลินทรีย์ในถังหรือบ่อปฏิบัติการ จะเป็นระบบบำบัดที่ง่ายต่อการเดินระบบฯ และไม่ต้องพึ่งธรรมชาติอย่างเดียวในการระบายความร้อน เช่น ความชื้นสัมพัทธ์ ลม แสงแดด อุณหภูมิของอากาศ เหล่านี้ถือเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการระเหยของน้ำ ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามเส้นรุ้งเส้นแวง และเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล

น้ำเสียย้อมผ้า
- ตะแกรง
- บ่อพัก
- ปรับพีเอช
เข้าระบบบำบัดฯทุติยภูมิ

รูปที่ 2.1 ระบบบำบัดขั้นปฐมภูมิ



2. ระบบบำบัดขั้นทุติยภูมิ

เทคโนโลยีในปัจจุบันของระบบบำบัดขั้นทุติยภูมิที่นิยมคือระบบบำบัดทางชีวภาพ ซึ่งประกอบไปด้วย

- ระบบแอกติเวตเต็ดสลัดจ์
- ระบบแอโรเตคตาอาน
- ระบบทรिकลิ่งฟิลเตอร์

ส่วนการใช้กระบวนการเมมเบรนและโอโซนนั้น ปัจจุบันยังไม่เหมาะสมในเชิงเศรษฐศาสตร์แม้กระบวนการทั้งสองสามารถลดค่าบีโอดี ซีโอดี และทีโอดีก็ตาม

การใช้ระบบบำบัดทางชีวที่กล่าวมาข้างต้นนี้ สามารถกำจัดบีโอดี ซีโอดีและของแข็งแขวนลอยได้ แต่ยังไม่สามารถกำจัดซีโอดีอย่างมีประสิทธิภาพและยังพบว่าสีสังเคราะห์นั้นขัดขวางการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ (Beszedits และคณะ, 1980)

น้ำเสียจากโรงงานทอผ้าซึ่งมีกระบวนการฟอกย้อมร่วมอยู่ด้วย สามารถบำบัดด้วยอนุกรมของหน่วยกระบวนการของโคแอกกูเลชัน ฟลอคกูเลชัน การตกตะกอน แล้วตามด้วยหน่วยกระบวนการทางชีวภาพ (Dyer & Mignone, 1983)

มีการโต้เถียงกันถึงการจัดลำดับของหน่วยกระบวนการที่นำมาบำบัดน้ำเสียจากโรงงานทอผ้าที่มีกระบวนการฟอกย้อมร่วมอยู่ด้วย ระหว่างกระบวนการทางชีวภาพและกระบวนการทางเคมี รายละเอียดได้กล่าวแล้วในบทที่ 1

Grau (1991) กล่าวว่า สามารถใช้เฟอร์รัสซัลเฟตในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียย้อมผ้าด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันก่อน แล้วตามด้วยระบบแอกติเวตเต็ดสลัดจ์ที่เติมแอกติเวตเต็ดคาร์บอนแบบผงได้เป็นที่น่าพอใจ สำหรับการกำจัดลำดับหน่วยกระบวนการทางชีวจะก่อนหน่วยกระบวนการโคแอกกูเลชันก็ควรใช้สารส้มและเกลือเฟอร์ริกจะเหมาะสมกว่า และที่สำคัญคือสลัดจ์ที่ได้สามารถดูดซับสีย้อมได้บางส่วน ซึ่งช่วยลดปริมาณการใช้สารเคมีในการกำจัดสีในช่วงกระบวนการโคแอกกูเลชัน

3. การกำจัดสีขุ่นในน้ำเสียขุ่นค้ำ

วิธีที่ใช้ในการบำบัดสีน้ำเสียขุ่นค้ำที่มีในปัจจุบันคือ

- โคแอกูเลชันด้วยสารเคมี (chemical coagulation)
- โคแอกูเลชันด้วยไฟฟ้าเคมี (electrocoagulation)
- ระบบบำบัดทางชีวภาพ (biological treatment)
- การดูดซับ (adsorption)
- เติมน้ำคลอรีน (chlorination)
- โอโซนเนชัน (ozonation)
- รีเวอร์สออสโมซิส (reverse osmosis)
- อุลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration)
- การแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange)
- การฉายรังสี (radiation)
- โฟโตเคมีคอล ดีเกรเดชัน (photochemical degradation)

วิธีการบำบัดสีในน้ำเสียที่กล่าวมาข้างต้นอาจใช้ใดๆ หรือใช้ร่วมกันได้ ซึ่งให้ประสิทธิภาพแตกต่างกันไปตามสารเคมีที่นำมาใช้ในการผลิตสี บางครั้งอาจพบว่าวิธีการเดียวไม่สามารถกำจัดสีขุ่นได้อย่างเป็นที่น่าพอใจหรือประหยัด จำเป็นต้องมีวิธีอื่นร่วมด้วยเพราะเหตุว่าเมื่อมีการขุ่นค้ำด้วยการผสมสีขุ่นหลายประเภทเข้าด้วยกัน เป็นต้น

การนำแอกติเวตเต็ดคาร์บอนมาใช้กับน้ำเสียอย่างมีประสิทธิภาพนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการบำบัดเบื้องต้นเพื่อกำจัดสารแขวนลอยเสียก่อนเพื่อป้องกันการอุดตัน และเสียพื้นที่ผิวไปโดยไม่จำเป็น (Herbert, 1971)

Poots และคณะ (1976) ศึกษาการใช้ไม้ และพีทที่ล้างด้วยน้ำกลั่นแล้วนำไปอบแห้งที่ 90 ซ.ในการดูดซับสีขุ่นค้ำ พบว่าใช้ได้เป็นอย่างดี แม้ว่าจะใช้เวลาสัมผัสนานประมาณ 2

ชม.สำหรับถึงจุดสมดุล และสามารถใช้แทนแอกติเวทเต็ลคาร์บอนได้ ทั้งไม่ต้องมีกระบวนการแอกติเวทเหมือนแอกติเวทเต็ลคาร์บอน เพียงอบให้แห้งก็นำไปใช้งานได้

Beszedits และคณะ (1980) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของแอกติเวทเต็ลคาร์บอนในการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียข้อมผ้า โดยศึกษาเปรียบเทียบกับสีข้อมหลายประเภท เช่น สีข้อมดิสเพอร์ส สีข้อมไคเรคท์ สีข้อมรีแอกทีฟ สีข้อมแวนท์ ฯลฯ ให้ผลสรุปออกมาว่าแอกติเวทเต็ลคาร์บอนเหมาะสมกับสีข้อมที่อยู่ในรูปสารละลาย แต่ไม่เหมาะที่จะใช้กับสีข้อมที่ไม่ละลายหรือละลายได้น้อย เช่น สีข้อมแวนท์ สีข้อมดิสเพอร์ส เพราะหลังจากใช้ไปประมาณ 20 - 50 ชม. จะเกิดการอึดตัวเสียพื้นที่ผิวใช้งานไป ซึ่งจำเป็นต้องเปลี่ยนหรือรีเจนเนอเรต เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

สมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ (2525) ศึกษาการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันกำจัดสีข้อมประเภทต่างๆ ในน้ำเสียข้อมผ้า โดยเลือกแมกนีเซียมคาร์บอเนตไฮเดรตเบสิคกับปูนขาว สารส้มปูนขาว เป็นโคแอกกูแลนต์ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดขึ้นอยู่กับประเภทสีข้อม กล่าวคือ สีข้อมที่ไม่ละลายน้ำได้แก่ สีข้อมแวนท์ สีข้อมซัลเฟอร์ สีข้อมอะโซอิก สีข้อมเมทัลลิก จะถูกกำจัดได้ง่าย ในขณะที่สีข้อมที่ละลายน้ำได้คือนั้นกำจัดได้ยากมาก เช่น สีข้อมรีแอกทีฟ ส่วนสีข้อมไคเรคท์ซึ่งไม่เด่นชัดว่าละลายหรือไม่นั้นถูกกำจัดได้ที่ปริมาณโคแอกกูแลนต์สูงๆ นอกจากนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันนั้นยังขึ้นกับ โทนสี และชนิดโคแอกกูแลนต์อีกด้วย

Henry และคณะ (1987) ศึกษาวิธีการดูดซับเพื่อกำจัดสีข้อมในน้ำเสียฟอกข้อมด้วยแอกติเวทเต็ลคาร์บอนแบบเกรนูลาร์ ทำโดยจัดรูปแบบคล้ายกับชั้นกรองทราย เกิดกลไกที่สำคัญคือ โมเลกุลของสีข้อมจะถูกดูดซับด้วยแอกติเวทเต็ลคาร์บอนด้วยแรงทางเคมีฟิสิกส์และเมื่อพื้นที่ผิวของแอกติเวทเต็ลคาร์บอนอึดตัวหรือไม่เหลือพื้นที่สำหรับให้ใช้งานแล้ว จำเป็นต้องเปลี่ยนคาร์บอนใหม่ใหม่หรือนำไปรีเจนเนอเรต

Henry และคณะ (1987) ได้แสดงผลการทดลองการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียฟอกข้อมผสม โดยการทำจาร์เทสต์ด้วยสารส้มอย่างเดียว สารส้มกับปูนขาว เฟอร์รัสซัลเฟตอย่างเดียว เฟอร์รัสซัลเฟตกับปูนขาว ซึ่งสามารถกำจัดสีข้อมผสมดังกล่าวได้ 97.6%, 97.6%, 96.1% และ 99.1%

ตามลำดับ โดยใช้ปริมาณสารส้มอย่างเดี่ยว 600 มก./ล. สารส้ม 40 มก./ล. กับปูนขาว 5000 มก./ล. เฟอร์รัสซัลเฟตอย่างเดี่ยว 2000 มก./ล. และเฟอร์รัสซัลเฟต 2600 มก./ล. กับปูนขาว 5000 มก./ล. ตามลำดับ

Mckay และคณะ (1987) ทดลองใช้ขานอ้อยกำจัดสีข้อมเบสิกและสีข้อมเอซิดอย่างละสองโทนสีคือ สีน้ำเงิน และสีแดง โดยศึกษาผลของอุณหภูมิสีข้อมและขนาดโพรงขานอ้อยที่มีต่อประสิทธิ ภาพการดูดติดผิว

Mckay และคณะ (1987) ศึกษาสารดูดติดผิวราคาถูกมาใช้กำจัดสีข้อมในน้ำเสีย 6 สารคือ เปลือกไม้สัก แกลบข้าว เศษฝ้าย ถ่าน เส้นผม และเบนโทไนท์ ให้ผลการทดลองออกมาว่า เบนโทไนท์เกิดพันธะที่แข็งแรงในการดูดติดสีข้อม ทำให้การรีเจนเนอเรตเป็นไปได้ยาก ส่วน แกลบข้าว เปลือกไม้สัก เศษฝ้าย และเส้นผม สามารถดูดติดผิวกับสีข้อมเบสิกเท่านั้นทั้งยังเกิดปรากฏการแลกเปลี่ยนประจุและพันธะเคมีในขณะที่มีการดูดติดผิวอีกด้วย

Gupta และคณะ (1988) ทดลองการใช้วิธีดูดติดผิวเพื่อกำจัดสีส้มอันเกิดจากเมโดเมกาโครมอร์เรนจีแอต ได้ประสิทธิภาพ 99% โดยใช้ถ้ำลอยเป็นสารดูดติดผิว และพบว่า ประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับปัจจัยและกลไกต่างๆ คือ

- เวลาสัมผัส 110 นาทีจะถึงจุดสมดุล (equilibrium) สำหรับทุกความเข้มข้นสีเริ่มต้น
- ขนาดของสารดูดติดผิว ยิ่งเล็กจะให้ประสิทธิภาพสูง เพราะพื้นที่ผิวมากเมื่อสารดูดติดผิวขนาดเล็ก
- ประสิทธิภาพของกลไกการดูดติดผิว อันประกอบไปด้วย

1) ค่าคงที่ของการดูดติดผิว, Kad ซึ่งใช้สมการอัตราของ Lagergren คือ

$$\log(q_e - q) = \log(q_e) - (Kad/2.303).t$$

เมื่อ q_e และ q คือ มก./ล.สีข้อมที่ถูกดูดติดผิว ณ จุดสมดุลและเวลาใดๆ

t คือ เวลาใดๆ

และพบว่าที่ 30 องศาเซลเซียส ค่า $K_{ad} = 2.99(10^{-2})$ นาที⁻¹

40 องศาเซลเซียส ค่า $K_{ad} = 2.84(10^{-2})$ นาที⁻¹

50 องศาเซลเซียส ค่า $K_{ad} = 2.73(10^{-2})$ นาที⁻¹

กลอรี/โมล

2) พลังงานกระตุ้น, E ซึ่งใช้สมการของ Arrhenius มีค่าเท่ากับ 0.87 กิโลแคล

3) การแพร่กระจายมวลภายในสารดูดติดผิว

4) ไอโซเทอร์มของการดูดติดผิว ใช้สมการไอโซเทอร์มของ Langmuir คือ

$$C_e/q_e = 1/Q_{ob} + C_e/Q_o$$

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของสารถูกดูด, มก./ล.

Q_o และ b คือ ค่าคงที่ ขึ้นอยู่กับความจุและพลังงานการดูดติด

- อุณหภูมิ การเพิ่มอุณหภูมิจาก 30 ถึง 50 เซลเซียส เปอร์เซนต์การกำจัดลดลง จาก 92.25% ถึง 69.77% ที่พีเอชเท่ากับ 4.5

- พีเอช ซึ่งพบว่าพีเอชช่วง 3-4 ให้ประสิทธิภาพการดูดติดสูงสุด

El-Geundi (1991) ใช้ขังข้าวโพดป่นขนาด 250-355 ไมโครเมตร 355-500 ไมโครเมตร 500-710 ไมโครเมตร และ 710-1000 ไมโครเมตร ซึ่งมีเซลลูโลสประกอบเป็นโครงสร้าง เซลลูโลสเมื่อสัมผัสกับน้ำจะให้ประจุลบซึ่งสามารถดูดติดผิวกับสีย้อมประจุบวกได้ ในการทดลอง ให้ผลออกมาว่าขังข้าวโพดป่นมีศักยภาพในการกำจัดสีย้อมในช่วงกว้าง การเพิ่มอัตราการกวน สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดติดผิว และการลดขนาดขังข้าวโพดป่นจะเพิ่มประสิทธิภาพการดูดติดผิว โดยให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเบสิกสูงกว่าสีย้อมเอซิด

Gaeta และ Fedele (1991) อธิบายระบบเมมเบรนซึ่งพัฒนาโดย Separem ชาวอิตาลีว่า การนำระบบรีเวอร์สออสโมซิสแรงดันสูงหรือแรงดันต่ำ หรือการใช้ระบบนาโนแผ่นม้วนนั้น จำเป็นต้องมีการทำความสะอาดประมาณ 1 ชั่วโมง ด้วยความถี่หนึ่งถึงสองครั้งต่อสัปดาห์

Grau (1991) แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้แอกติเวตเต็ดสลัดจ์เป็นสารดูดติดผิวสำหรับ กำจัดสีข้อมในน้ำเสียได้

Kanekar และ Sarmaik (1991) ได้ทดลองใช้ระบบแอกติเวตเต็ดสลัดจ์บำบัดน้ำเสียจาก โรงฟอกย้อมซึ่งประกอบไปด้วยฟีนอล สีข้อมเมทิลไวโอเลต สีข้อมโรคามีนบี สีข้อมอะนิไลน์ เป็นต้น ในขั้นตอนการเริ่มเลี้ยงตะกอนได้ใช้มูลสัตว์ และเมื่อเลี้ยงไประยะต่างๆ ได้แยกสายพันธุ์ที่ ตอบสนองกับน้ำเสียจากโรงฟอกย้อมเป็นอย่างดีออกมาใช้เป็นหัวเชื้อต่อไป ในที่สุดพบว่าสายพันธุ์ ซูโดโมแนสนั้นสามารถใช้เลี้ยงในระบบแอกติเวตเต็ดสลัดจ์ได้เป็นที่น่าพอใจเพราะกำจัดฟีนอลและสีข้อมในน้ำเสียได้

Kennedy (1991) แนะนำวิธีการกำจัดสีในน้ำเสียด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี ซึ่ง กระบวนการนี้ไอออนของเหล็ก 200-500 มก./ล. สามารถกำจัดสีได้ 90-98% ซึ่งโมเลกุลของสีข้อม จะถูกกำจัดด้วยกลไกของการดูดติดผิวบนเมตริกซ์ของเฟอร์รัสไอออน ด้วยแรงดึงดูดแบบไฟฟ้า สถิตยส์และการถูกล้อมแบบกายภาพ และสีข้อมยังถูกกำจัดด้วยกลไกอื่นๆ เช่น มีพันธะกับไอออน ไฮดรอกไซด์ หรือโมเลกุลของสีข้อมเกิดปฏิกิริยารีดักชันขึ้น

Li และ Zhao (1991) ได้ลองเดินระบบกำจัดสีด้วยขี้เถ้าและถ่านลอยซึ่งใช้หลักการกรอง ติดผิวโดยระบบดังกล่าวสร้างเป็นชั้นกรองของถ่าน พบว่าให้ประสิทธิภาพในกำจัดสีในน้ำเสียจาก โรงฟอกย้อมสูง และแนะนำให้ใช้ระบบดังกล่าวแทนระบบทางชีวภาพและอิเล็กโตรไลซิสสำหรับ โรงงานที่มีถ่านเพียงพอลอยู่แล้วหรือใช้ร่วมกันในกรณีที่ทำถ่านได้ไม่พอเพราะจะประหยัดค่าใช้จ่าย ก่อนสร้างระบบและค่าใช้จ่ายพลังงานกว่าการเลือกใช้แต่เฉพาะระบบชีวภาพและอิเล็กโตรไลซิส

Ahmed และ Ram (1992) พบว่าการใช้วิธีกำจัดสีข้อมในน้ำเสียด้วยวิธีดูดติดผิวสามารถใช้สารพวกซิลิกาและสารอื่นๆ ได้ สำหรับสีข้อมบางชนิด

Kuo (1992) ศึกษาการกำจัดสีข้อมด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับเฟอร์รัสซัลเฟต ซึ่งเรียกว่า "เฟนตอน รีเอเจนท์" โดยทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์จากสีข้อม 5 ประเภท คือ สีข้อมรีแอกทีฟ สีข้อมดิสเพอร์ส สีข้อม เอจิด สีข้อมโคเรคท์ และสีข้อมเบสิค ซึ่งใช้กันมากในอุตสาหกรรม ปฏิกริยาที่เกิดดังสมการ

* เมื่อ RH คือ โมเลกุลของสีข้อม



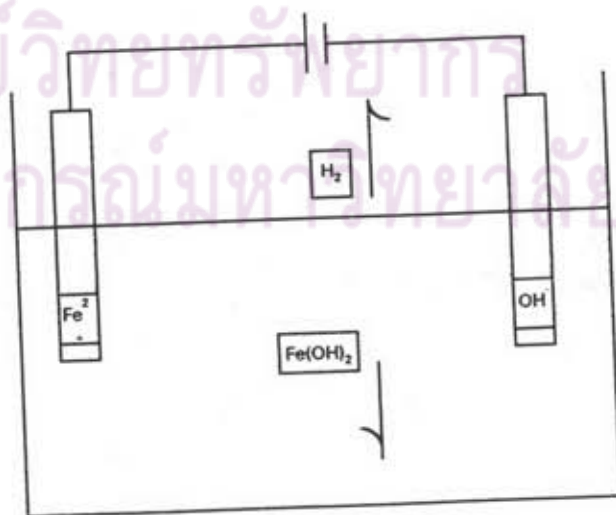
ในกรณีศึกษาดังกล่าวพบว่าให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์มากกว่า 95% โดยที่เอชที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับประเภทของสีข้อมซึ่งจะประมาณ 3.5 หรือต่ำกว่าส่วนปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเฟอร์รัสซัลเฟตขึ้นกับประเภทของสีข้อม คือ 1) 584 และ 250 มก./ล. ตามลำดับสำหรับสีข้อมรีแอกทีฟ 2) 292 และ 83 มก./ล. ตามลำดับสำหรับสีข้อมโคเรคท์ 3) 875 และ 500 มก./ล. ตามลำดับสำหรับสีข้อมเอจิด 4) 292 และ 500 มก./ล. ตามลำดับสำหรับสีข้อมเบสิค 5) 292 และ 333 มก./ล. ตามลำดับ สำหรับสีข้อมดิสเพอร์ส

การเพิ่มอุณหภูมิช่วยเร่งปฏิกริยาให้เร็วขึ้นและควรอยู่ประมาณ 50 ช. การใช้วิธีนี้กำจัดสีในน้ำเสียจากโรงฟอกย้อมหรือโรงงานย้อมผ้า พบว่าโครงสร้างของสีข้อมแต่ละประเภทมีอิทธิพลต่อการควบคุมปัจจัยต่างๆ ให้เหมาะสมต่อการกำจัดสี

Koottatep (1993) ได้ทดลองใช้โอโซนกำจัดสีข้อมในระดับห้องปฏิบัติการกับน้ำเสียจากโรงฟอกข้อม พบว่าสามารถกำจัดสีได้ประสิทธิภาพ 50% โดยใช้การออกซิไดซิงสีข้อมด้วยโอโซน การกำจัดสีด้วยโอโซนดังกล่าว เหมาะกับการบำบัดน้ำเสียขั้นปฐมภูมิก่อนเข้าระบบบำบัดทางชีวภาพ เพราะโอโซนช่วยให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำเพิ่มขึ้นเป็นประโยชน์ต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ในถังเติมอากาศ และไม่ต้องการถังตกตะกอนขั้นปฐมภูมิ เพราะการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียด้วยโอโซน ไม่ก่อให้เกิดสลัดจ์แต่อย่างไร

Koottatep (1993) ได้ทดลองใช้วิธีไฟฟ้าเคมีในการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียโรงฟอกข้อม โดยสร้างแบบจำลองของถังปฏิกริยาโคแอกทูเลชั่นด้วยไฟฟ้า ซึ่งประกอบไปด้วยแผ่นอิเล็กโตรดอยู่ในถังพลาสติกใส อิเล็กโตรดนี้ทำด้วยแผ่นเหล็กทำหน้าที่ดังรูปที่ 2.2

สีข้อมจะถูกฟลอคที่เกิดจากเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์จับให้ตกตะกอน ในขณะที่ไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีมาทำหน้าที่เป็นฟลอคคูแลนต์และโคแอกทูเลนต์เอค สลัดจ์ที่ได้จมน้ำมากเนื่องจากเป็นสลัดจ์ที่มีประจุ แต่มีข้อเสียคือ ก๊าซไฮโดรเจนที่ลอยตัวทำให้สีบางส่วนลอยขึ้นมา พบว่าที่แผ่นอะโนดจะผุกร่อนเนื่องจากการปล่อยไฮออนเฟอร์รัส และได้ค่าคือไฮดรอกไซด์จากน้ำเสีย ด้วยวิธีนี้สามารถกำจัดสีข้อมได้ประมาณ 60% มากกว่าการใช้โอโซนในสภาวะของน้ำเสียเริ่มต้นเดียวกัน



รูปที่ 2.2 แบบจำลองถังปฏิกรณโคแอกทูเลชั่นด้วยไฟฟ้า

Koprivanac และคณะ (1993) ศึกษาการใช้ฟลอคคูลแลนท์ที่เป็นสารอินทรีย์ในการกำจัด สีส้อมรี แอตกทีฟด้วยกระบวนการตกตะกอนผลึก/โคแอกกูเลชัน โดยทดลองใช้ฟลอคคูลแลนท์สาร อินทรีย์ประจุบวกเปรียบเทียบกับเฟอร์ริคลอไรด์ และใช้โซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวปรับพีเอช กวนเร็ว ($G=500$) 10 นาที กวนช้า ($G=100$) 30 นาที ด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก การใช้เฟอร์ริ คลอไรด์ดังกล่าวในการกำจัดสีส้มรีแอตกทีฟในน้ำเสีย มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีประมาณ 72% ที่พีเอช 2.5 อุณหภูมิ 20 เซลเซียส ซึ่งสรุปไว้ว่าไม่เหมาะสมในการนำมาใช้กำจัดสีส้มรีแอตก ทีฟ การใช้ฟลอคคูลแลนท์สารอินทรีย์ประจุ บวกสามารถกำจัดสีส้มรีแอตกทีฟ ให้ประสิทธิภาพ เกือบสมบูรณ์ร้อยละ 100 ที่พีเอช 7 อุณหภูมิ 20 เซลเซียส อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะลดประสิทธิภาพ การใช้กระบวนการตกตะกอนผลึก/โคแอกกูเลชัน ในการกำจัดสีส้มรีแอตกทีฟอุณหภูมิที่ใช้ไม่ควรเกิน 30 ช.

Koprivanac และคณะ (1993) กล่าวว่าการใช้โคแอกกูแลนท์ที่เป็นสารอนินทรีย์ ในการ กำจัดสีส้มรีในน้ำเสียทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านฟิสิกส์เคมีค่อน้ำ ดังตัวอย่างการใช้เฟอร์ริ คลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนท์จะทำให้พีเอชของน้ำเสียน้ำต่ำลง และการใช้โคแอกกูแลนท์อนินทรีย์ดัง กว่านั้น ยังก่อให้เกิดปริมาณสลัดจ์ที่ไม่เหมาะสมในการนำไปรีค่น้ำออกอย่างมีประสิทธิภาพ

Dai (1994) ศึกษาอิทธิพลของศักย์ซีต้าของแอตกติเวทเต็ดคาร์บอนที่มีต่อการดูดติดผิว ของสีส้มรีประจุบวก ผลออกมาว่าไฟฟ้าสถิตย์ที่กระทำต่อกันระหว่างโมเลกุลสีส้มรีประจุบวกกับ ผิวของแอตกติเวทเต็ดคาร์บอนส่งผลต่อความสามารถในการดูดติดผิว กล่าวคือ เมื่อศักย์ซีต้าของ แอตกติเวทเต็ดคาร์บอนต่ำกว่า -30 มล.โวลท์ ความสามารถในการดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นและความ สามารถในการดูดติดผิวของแอตกติเวทเต็ดคาร์บอนกับสีส้มรีประจุบวก จะลดต่ำลงไม่มากนักใน ช่วงหว่าง -30 และ +60 มล.โวลท์ แต่เมื่อศักย์ซีต้ามากกว่า +60 มล.โวลท์แล้วความสามารถในการ ดูดติดผิวจะลดลงมากอย่างมีนัยสำคัญ

Lin และ Liu (1994) ศึกษาการใช้กระบวนการร่วมระหว่างโอโซนและโคแอกกูเลชันใน การกำจัดสีส้มรีในน้ำเสียด้วยระบบไหลต่อเนื่อง พบว่าการใช้โอโซนสามารถกำจัดสีส้มรีได้

สมบูรณ์ในเวลาไม่เกิน 10 นาที ในขณะที่การใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียได้ไม่เกิน 66%

2.5.3 โคแอกกูเลชัน

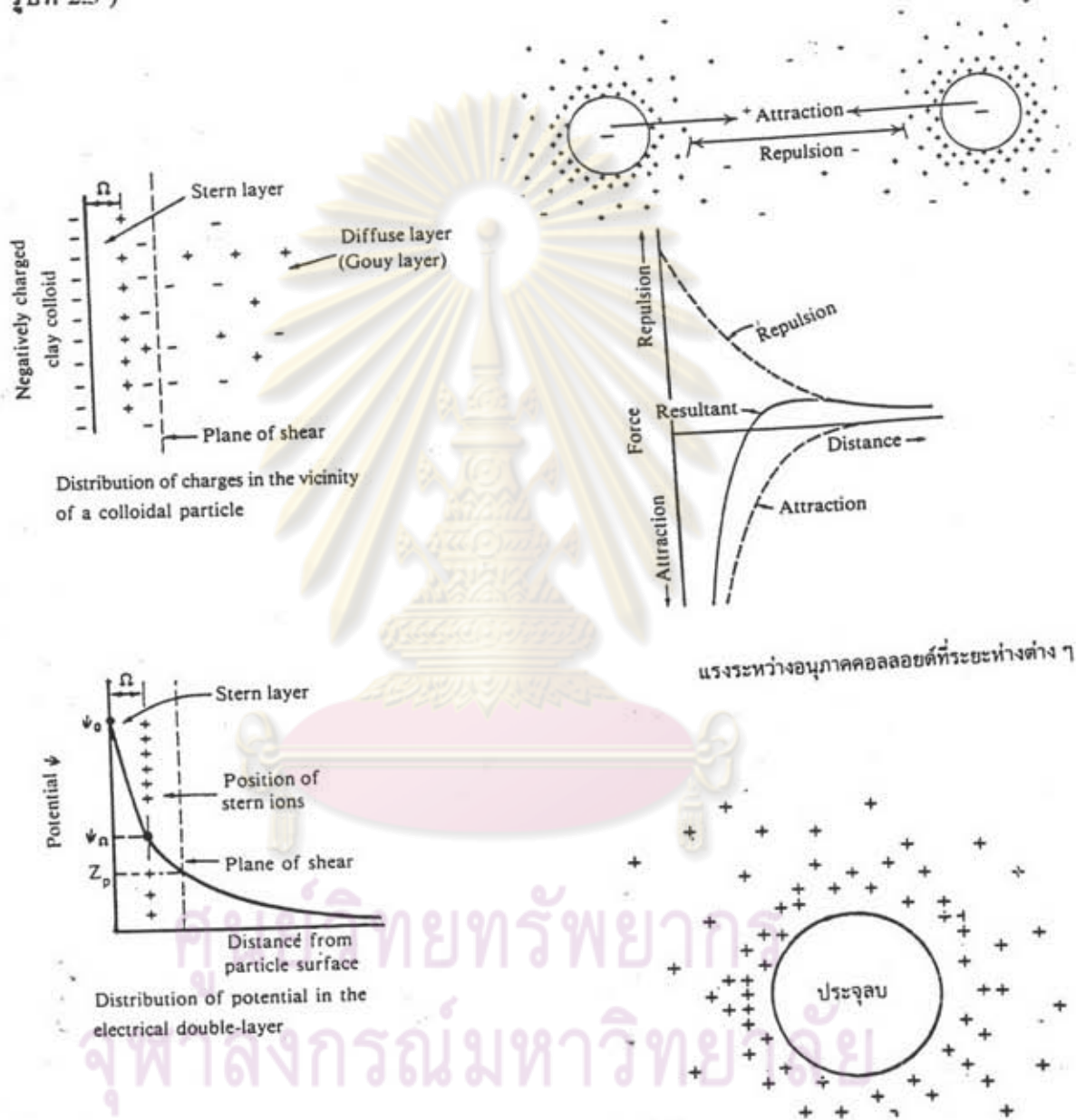
1. คอลลอยด์

ก่อนจะกล่าวถึงโคแอกกูเลชันขอเอ่ยถึงเรื่องคอลลอยด์ก่อน กล่าวคือ คอลลอยด์หรืออนุภาคคอลลอยด์ ได้กำหนดขนาดไว้ต่างๆ กันแต่โดยทั่วไปถือว่าอยู่ในช่วง 1 นาโนเมตร ถึง 1 ไมโครเมตรประเภทหรือระบบคอลลอยด์มีอยู่หลายแบบตามการจำแนก แต่ระบบคอลลอยด์ที่ได้รับความนิยมสนใจขณะนี้ คือ ระบบที่มีอนุภาคเป็นของแข็งอาศัยอยู่ในน้ำ เราอาจจำแนกระบบคอลลอยด์ตามแรงยึดเหนี่ยวที่น้ำมีต่ออนุภาคๆ เป็นแบบไฮโดรโฟบิก เมื่อมีแรงยึดเหนี่ยวอ่อนๆ และแบบไฮโดรฟิลิก เมื่อแรงยึดเหนี่ยวแข็งแรง

1.1 เสถียรภาพของคอลลอยด์

ระบบคอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพสูงคือ ระบบคอลลอยด์ที่อนุภาคตกตะกอนได้ด้วยตัวเองตามธรรมชาติยาก หรือยิ่งใช้เวลาในการตกตะกอนนานเท่าไรระบบคอลลอยด์ก็ยิ่งมีความเสถียรภาพมากเท่านั้น การที่ระบบคอลลอยด์มีเสถียรภาพอยู่ได้นั้น เนื่องจากมีแรงที่กระทำระหว่างอนุภาค กล่าวคือ มีทั้งแรงดึงดูดและแรงผลักระหว่างอนุภาคกระทำต่อกันตลอดเวลา แรงดึงดูดเกิดจากน้ำหนักมวลของ อนุภาคซึ่งเป็นแรงอ่อน เรียกว่า “แรงแวนเดอร์วาลส์” ส่วนแรงผลักรเป็นแรงทางไฟฟ้า แรงใดจะชนะนั้นขึ้นกับระยะห่างระหว่างอนุภาค ซึ่งแรงดูดมีอิทธิพลมากกว่าแรงผลักรเมื่ออนุภาคอยู่ใกล้กันมากๆ ซึ่งโดยปกติแรงผลักรทางไฟฟ้าไม่เปิดโอกาสให้มีการเคลื่อนที่เข้าใกล้กัน การวัดระดับเสถียรภาพระบบคอลลอยด์ทำได้โดยวัดค่าศักย์ไฟฟ้าบนผิวอนุภาคคอลลอยด์ ซึ่งไม่สามารถวัดได้โดยตรง แต่สามารถวัดอัตราการเคลื่อนที่ของอนุภาคแล้วนำมาคำนวณได้ค่าศักย์ซีตา (Z_p) ซึ่งหมายถึงศักย์ที่ผิวหรือเปลือกนอกสุดของชั้นน้ำที่เคลื่อนที่ไปพร้อมอนุภาคคอลลอยด์ ศักย์ซีตารมีประโยชน์ตรงที่เป็นตัววัดระดับเสถียรภาพของระบบคอลลอยด์

ระบบคอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพมากเท่าไรค่าศักย์ซีตาก็ยิ่งสูงและตกตะกอนยาก กลับกันระบบคอลลอยด์ที่มีศักย์ซีตาดำเท่าไรก็มีแนวโน้มที่อนุภาคจะรวมกันเป็นฟล็อกและตกตะกอนได้ง่ายขึ้น (ดูรูปที่ 2.3)



Electrical Double Layer Theory

รูปที่ 2.3 แสดงชั้นต่างๆ ที่ล้อมอนุภาคและอิทธิพลของระยะห่างระหว่างอนุภาคที่มีผลต่อแรง (มันสิน ดันจุลเวศม์, 2537)



1.2 การทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์ ทำได้ 4 แบบ คือ

(1) การลดความหนาของชั้นกระจาย (diffuse layer)

เป็นการเพิ่มจำนวนประจุตรงข้ามกับประจุของอนุภาคในชั้นกระจาย ผลคือชั้นกระจายมีความหนาลดลง ทำให้ศักย์ซีตาลดลงด้วย โดยวิธีนี้ปริมาณการใช้สารเคมีไม่เป็นสโตยชิโอเมตริก และไม่เกิดการกลายกลับของประจุ (charge reversal)

(2) การดูดติดและทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาค (adsorption/ charge neutralization)

ใช้สารเคมีที่ประจุตรงข้ามกับอนุภาคคอลลอยด์ไปดูดติดบนผิวอนุภาคแล้วเปลี่ยนหรือทำลายอำนาจไฟฟ้าของอนุภาค โดยวิธีนี้ต้องการไอออนที่สามารถเข้าถึงผิวอนุภาค ซึ่งน้อยชนิดที่สามารถทำได้ตัวอย่าง เช่น ไอออนอลูมิเนียม และเฟอร์ริก เป็นต้น วิธีนี้สามารถเกิดการกลายกลับของประจุได้ เนื่องด้วยเป็นกลไกแบบสโตยชิโอเมตริก

(3) ใช้ตะกอนผลึกสารอนินทรีย์เพิ่มน้ำหนักและขนาดของอนุภาค

ทำโดยการเติมสารประกอบเกลือของโลหะบางชนิด แล้วอนุภาคจะถูกห้อมล้อมด้วยตะกอน (precipitate) เช่น อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ เฟอร์ริกไฮดรอกไซด์แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น ทำให้มีน้ำหนักมากขึ้นและมีผลทำให้ทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ลงได้ และกลไกนี้ไม่ต้องเกี่ยวข้องกับการทำลายประจุ จึงไม่ต้องเกิดขึ้นที่สภาวะศักย์ซีตาค่าที่สุด ซึ่งต่างจากกลไก 2 แบบแรกตรงที่ปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เติมแปรผกผันกับอนุภาคคอลลอยด์หรือสารแขวนลอยในน้ำ บางครั้งอาจพบว่าการเพิ่มเป่าสัมผัสก็เป็นเรื่องจำเป็นเพื่อลดปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่ใช้

(4) โดยใช้โพลิเมอร์เชื่อมเป็นสะพาน

วิธีนี้ทำโดยการเติมสารที่มีมวลโมเลกุลสูง เช่น โพลิเมอร์ โดยมีกลไกที่สำคัญคือเมื่อสารมีขนาดโมเลกุลสูงเหล่านี้สัมผัสและยึดติดกับที่ว่างบนอนุภาคต่อๆ กันไป น้ำหนักของสารที่จับติดกันเหล่านี้ก็จะเพิ่มขึ้นจนเอาชนะแรงต่างๆ ได้ ดังนั้นการกวนน้ำที่แรงเกินไปจะทำให้สายสัมพันธ์นี้ขาดได้

2. โคนอกเลขัน

ดังได้กล่าวไว้แล้วว่าการทำลายเสถียรภาพของระบบคอลลอยด์มีกลไกอยู่ 4 แบบ การเติมสาร โคนอกเลขันที่ใสในน้ำก็เพื่อวัตถุประสงค์ในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ ตามกลไกที่กล่าวมากลไกใดกลไกหนึ่ง เช่น การเติมสารส้มสามารถเกิดกลไกแบบคอลลิดผิวหรือแบบห่อหุ้มอนุภาคก็ได้ ซึ่งการทำลายประจุตามวิธีคอลลิดผิวต้องมีการควบคุมการเกิดปฏิกิริยาที่ดี คือต้องพยายามให้เกิดปฏิกิริยาให้เสร็จสมบูรณ์ภายใน 1 วินาที เพราะหลังจากนั้นปฏิกิริยาจะเกิดแบบห่อหุ้มประจุ ซึ่งวิธีนี้ใช้ปริมาณสารส้มมาก และมีความเป็นไปได้สูงที่จะเกิดปฏิกิริยาแบบนี้ มากกว่าแบบคอลลิดผิวซึ่งใช้ปริมาณสารส้มน้อยกว่ามาก อีกทั้งผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีความแน่นดีกว่า ดึงน้ำออกง่ายกว่า

หลังจากที่สามารถทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ได้แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการทำให้อนุภาคที่ถูกทำลายประจุเหล่านี้มารวมกันเป็นกลุ่มหรือฟล็อกเรียกขั้นตอนนี้ว่า "ฟล็อกคูเลขัน" ขั้นตอนนี้เกิดประโยชน์ตรงที่การเพิ่มน้ำหนักอนุภาคด้วยวิธีการทำให้อนุภาครวมกันเป็นฟล็อก ซึ่งมีวิธีการปฏิบัติได้หลายวิธีดังนี้ (มันสิน ตันจุลเวศม์, 2537)

- 1) การกวนช้าในถังกวนช้า วิธีนี้เป็นการเพิ่มโอกาสให้อนุภาคมาสัมผัสกัน รวมเป็นฟล็อกขนาดใหญ่พอที่จะตกตะกอนได้เองตามธรรมชาติ โดยวิธีนี้อนุภาคควรมีขนาด 0.1-1.0 ไมครอน หรือใหญ่กว่าและมีความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 50 มก./ล.
- 2) การสัมผัสอาจเกิดเองตามธรรมชาติ โดยวิธีนี้อาศัยการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนซึ่งเกิดเนื่องจากมีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในน้ำ ทำให้น้ำเกิดการกระแสน้ำไหล ดังนั้นในทางปฏิบัติเป็นการยากและไม่สะดวกที่จะควบคุมการเคลื่อนที่โดยอาศัยอุณหภูมิ
- 3) ขณะที่มีการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วงอยู่นั้น อัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของฟล็อกแต่ละตัวไม่เท่ากัน เปิดโอกาสในการสัมผัสได้อีกในขณะที่เคลื่อนที่ด้วยแรงโน้มถ่วงอยู่นั้น อนุภาคที่สามารถสร้างฟล็อกแบบนี้ได้ต้องมีขนาดใหญ่กว่า 5 ไมครอน และมีความเข้มข้นไม่ต่ำกว่า 50 มก./ล.

4) กรณีที่อนุภาคมีขนาดอยู่ระหว่าง 1-5 ไมครอน และความเข้มข้นน้อยกว่า 50 มก./ล. ฟล็อกสามารถเกิดขึ้นเองได้ช้า สามารถแก้ไขโดยการ:

- ใช้เครื่องกรองทรายเร็ว หรือเครื่องกรองแบบสองชั้น (ทราย และแอนทราไซด์) เป็นวิธีที่บังคับให้อนุภาคเคลื่อนที่เข้าไปในช่องจำกัด เพิ่มโอกาสสัมผัสได้ทางหนึ่ง
- ใช้ฟล็อกเป็นเป้าสัมผัสหรือจับอนุภาค เช่น บังคับอนุภาคให้เคลื่อนที่ผ่านชั้นสลัดจ์ (sludge blanket) หรืออีกวิธีหนึ่งทำโดยนำฟล็อกมาผสมกับอนุภาคที่ความเข้มข้นน้อยนั้น เพื่อเพิ่มเป้าสัมผัส ซึ่งพบได้ในถังตกตะกอนแบบโซลิดคอนแทค (solids contact)

3. โคนอกูแลนท์

ในกระบวนการกำจัดสีข้อมด้วยโคนอกูแลนท์นั้น มีโคนอกูแลนท์ให้เลือกหลายชนิด การนำโคนอกูแลนท์ตัวใดไปใช้นั้นขึ้นกับความเหมาะสม โดยดูจากปัจจัยด้านประสิทธิภาพ ค่าใช้จ่าย วัตถุประสงค์ และอื่นๆ ที่ผ่านมามีการนำโคนอกูแลนท์อนินทรีย์มาใช้กันอย่างแพร่หลาย ปัจจุบันโคนอกูแลนท์อนินทรีย์ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารโพลีอิเล็กโตรไลต์ นับว่ามีบทบาทเพิ่มขึ้น เพราะบางชนิดสามารถใช้เป็นโคนอกูแลนท์และโคนอกูแลนท์เอดไปในตัว ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้โคนอกูแลนท์อนินทรีย์เพียงอย่างเดียว ตะกอนจับตัวแน่นกว่า (มันสิน ตันจุลเวศม์, 2537) ตารางที่ 2.2 แสดงสารเคมีที่ใช้เป็นโคนอกูแลนท์

ตารางที่ 2.4 สารเคมีที่ใช้เป็นโคนอกูแลนท์

โคนอกูแลนท์	ที่มา
สารส้ม	มันสิน ตันจุลเวศม์ (2537)
สารส้มและปูนขาว	
สารส้มและโซเดียมคาร์บอเนต	

(ต่อ)

โคแอกูแลนต์	ที่มา
เฟอร์ริสซัลเฟตและปูนขาว	มันสิน ดัชนีอุตสาหกรรม (2537)
เฟอร์ริกคลอไรด์	"
เฟอร์ริสซัลเฟตร่วมกับคลอรีน	"
แมกนีเซียมคาร์บอเนตและปูนขาว	"
โพลีเมอร์	"
แมกนีเซียมคาร์บอเนตไฮดรอกไซด์	สมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ (2525)
ผงเมล็ดมะขาม	เบ็ญจา ไสร้งจากินันท์ (2535)
ผงเมล็ดอัลมอนต์	Koprivanac และคณะ (1993)
ผงเมล็ดถั่ว	"
ผงเมล็ด hazelnut	"

2.5.4 การดูดติดผิว

เมื่อมีการสัมผัสของสารที่อยู่ต่างสภาวะ (phase) เช่น สารละลายสัมผัสกับของแข็ง หรือกาซ สัมผัสกับของแข็ง มีพื้นที่ผิวชั้นอยู่ระหว่างการสัมผัสนั้น และมีแนวโน้มของการเพิ่มความเข้มข้นของสารที่หน้าสัมผัสนั้นแสดงว่าเกิดการเกาะของสารหรือการดูดติดผิวของสารชั้นที่หน้าสัมผัส สารที่มาเกาะหรือติดอยู่ที่หน้าสัมผัสนี้เรียกว่า "สารถูกดูด (adsorbate)" เรียกสารที่มีพื้นที่ผิวดังกล่าวว่า "สารดูดติด (adsorbent)" และเรียกกลไกตั้งแต่มีสารหรืออนุภาคเคลื่อนที่ไปเกาะติดกับพื้นที่ผิวของอีกสารหนึ่งว่า "การดูดติดผิว (adsorption)" ตัวอย่างเช่น ก๊าซไฮโดรเจนไปเกาะติดกับผิวของถ่าน หรือกลืนในตู้เย็นไปเกาะติดอยู่บนผิวถ่าน คำว่าพื้นที่ผิวนี้ไม่ได้หมายความว่าพื้นที่ผิวรอบรูปทรงของสารดูดติด แต่รวมพื้นที่ส่วนในรู หรือโพรงที่อยู่ในสารดูดติดทั้งหมดที่มีความสามารถในการเป็นที่ยึดเกาะของสารถูกดูด

แรงที่ทำให้เกิดการดูดติดที่หน้าสัมผัสนี้มีทั้งแรงทางกายภาพและแรงทางเคมี แรงทางกายภาพเรียกว่าแรงแวนเดอร์วาล (van der waals) ซึ่งกรณีนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติทางเคมีของสารถูกดูด ส่วนแรงทางเคมีเกิดขึ้นเมื่อมีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนหรือมีการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน

ระหว่างสารดูดซับและพื้นที่ผิวสัมผัสนั้นๆ การดูดซับไม่ว่าจะเกิดด้วยแรงชนิดใดถือว่าเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน (exothermic) ตามกระบวนการแบบไอโซเทอร์มอล (isothermal) นั่นคือ ทุกครั้งที่โมเลกุลหรืออนุภาคของสารจากสภาวะใดๆ ซึ่งส่วนใหญ่กำลังเคลื่อนที่อยู่ในสถานะของเหลวหรือก๊าซ เมื่อจะหยุดนิ่งหรือเกาะต้องมีการคายพลังงานจลน์นั้นออกมาในรูปความร้อน (Smisek และ Cerny, 1970)

โดยทั่วไปกระบวนการดูดซับในงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมนั้นสารดูดซับจะอยู่ในรูปสารละลายหรือก๊าซเป็นส่วนใหญ่ เช่น ในกระบวนการกำจัดสีและกลิ่นในน้ำประปานั้นสามารถใช้แอคติเวทเต็ดคาร์บอนซึ่งมีพื้นที่ผิวมาก (600-1000 ตร.ม./ก.) กำจัดได้ สารดูดซับ (adsorbent) มีหลายประเภท เช่น 1) ประเภทสารอนินทรีย์อันได้แก่ ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ถ่านกระดูก (bone char) แอคติเวทเต็ดซิลิกา เป็นต้น สารเหล่านี้มีพื้นที่ผิว 50-200 ตร.ม./ก. ถ้าเป็นสารจากธรรมชาติ 2) แอคติเวทเต็ดคาร์บอน ซึ่งมีพื้นที่ผิวมากกว่าสารอนินทรีย์อื่นมากอย่างมีนัยสำคัญคือ 600-1000 ตร.ม./ก. จึงจัดแยกไว้จากสารอนินทรีย์อื่น 3) สารอินทรีย์สังเคราะห์ เช่น เรซินแลกเปลี่ยนประจุ ซึ่งมีพื้นที่ผิว 300-500 ตร.ม./ก. สามารถรีเจนเนอเรตได้ง่ายด้วยเกลือแกงกลไกการที่เกิดขึ้นระหว่างการดูดซับมีดังนี้ (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2532)

1. การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวดูดซับเข้าไปสู่สารดูดซับ โดยอาศัยการปั่นป่วนของน้ำ ซึ่งปกติจะมีชั้นของน้ำขวางกลางอยู่ โมเลกุลต้องแทรกผ่านชั้นน้ำที่ขวางอยู่ไปให้ได้
2. เมื่อโมเลกุลของสารดูดซับเข้าไปถึงสารดูดซับ ต้องพยายามแทรกตัวเข้าไปหาพื้นที่ผิวเกาะซึ่งพื้นที่ผิวนี้อาจอยู่ในโพรงหรือรูและโมเลกุลต้องเกาะให้ติด จะด้วยแรงทางกายภาพหรือแรงทางเคมีนั้นแล้วแต่ลักษณะสมบัติของสารที่อยู่ระหว่างหน้าสัมผัสทั้งสอง

อัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับนั้นขึ้นอยู่กับ

- ก. ความปั่นป่วนเนื่องมาจากชั้นน้ำที่ล้อมรอบสารดูดซับอยู่จะมีความหนามากถ้ามีความปั่นป่วนน้อย เป็นอุปสรรคของโมเลกุลจะเคลื่อนที่เข้าไปหาพื้นที่ผิว หรือเคลื่อนที่ได้ช้าดังนั้นการลดชั้นหนา ซึ่งเป็นอุปสรรคในการเคลื่อนที่เข้าไปหานี้จะช่วยให้อัตราเร็วในการดูดซับให้เร็ว

ขึ้นซึ่งทำได้โดยไม่เปิดโอกาสให้มีการสะสมความหนาของชั้นน้ำด้วยการกวนน้ำให้มีการปั่นป่วนมาก ๆ

ข. ขนาดของสารดูดติดผิว การลดขนาดสารที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสนี้สามารถลดเวลาในการดูดติดผิวได้ หรือกล่าวอีกอย่างคือ สารดูดติดผิวที่มีขนาดใหญ่จะใช้เวลาในการดูดติดโมเลกุลสารที่มีความเข้มข้นเท่ากัน นานกว่าสารดูดติดผิวที่มีขนาดเล็กกว่า

ค. ขนาดของสารถูกดูดเทียบกับขนาดโพรง ขนาดโพรงควรใหญ่กว่าขนาดสารถูกดูดเล็กน้อย คือ เข้ากันได้พอดี ทั้งนี้เนื่องจากแรงดึงดูดจะมากที่สุด เพราะมีพื้นที่สัมผัสล้อมหลายด้าน ไม้ว่าแรงจะเกิดเนื่องจากแรงกายภาพหรือแรงทางเคมีก็ตาม

ง. พีเอช เนื่องจากพีเอชมีผลต่อการแตกตัวเป็น ไอออนในน้ำของสารต่างๆ จึงส่งผลกับแรงที่เกี่ยวข้อง เช่น แรงระหว่างน้ำและสารถูกดูด ซึ่งถือว่าขบวนการย้ายมวลไปสู่ผิวสัมผัส

จ. อุณหภูมิ มีความน่าสนใจในเรื่องอิทธิพลของอุณหภูมิเนื่องด้วยการดูดติดผิวเป็นกลไกคลายความร้อน ส่วนความร้อนช่วยให้ชั้นความหนาของน้ำลดลงและเพิ่มการปั่นป่วนเนื่องจากการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน จึงทำให้อัตราเร็วในการดูดติดสูงตามอุณหภูมิ แต่ในทางกลับกันสำหรับความจุหรือความสามารถในการดูดติดนั้นจะต่ำลงมาเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

การทดสอบความสามารถในการดูดติดของสารดูดติดนั้นสามารถทำได้ด้วยการทดสอบไอโซเทอร์ม (isotherm test) ซึ่งใช้อุปกรณ์สำคัญ คือ เครื่องเขย่า แต่ใช้สามารถเครื่องจาร์เทสต์แทนได้ (มันสิน ตันจุลเวศม์, 2532) ในที่นี้จะกล่าววิธีหาไอโซเทอร์มโดยใช้เครื่องจาร์เทสต์ ซึ่งมีลักษณะคล้ายการทำแอกูเลชัน ขั้นตอนโดยย่อมีดังนี้

ก. เตรียมอุปกรณ์จาร์เทสต์

ข. วัดสีในน้ำตัวอย่าง

ค. ใส่น้ำลงในปิกเกอร์ทั้ง 6 ใบๆ ละ 750 มล.

ง. แปรผันสารดูดติดผิวลงในปิกเกอร์ 5 ใบๆ สุดท้ายไม่ต้องเติม

จ. เปิดเครื่องจาร์เทสต์ให้หมุนที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที นาน 15 นาที หรือนานเท่าไรก็ได้ขึ้นกับเวลาสัมผัสที่ต้องการศึกษา

ฉ. ปิดเครื่อง กรอง แล้ววัดค่าสีในน้ำที่กรองได้

จากนั้นนำข้อมูลปริมาณการใช้สารดูดติด และปริมาณสีที่กำจัดได้มาเขียนกราฟซึ่งจะได้ปริมาณสารดูดติดที่สามารถกำจัดจนถึงในระดับที่ยอมรับได้จากกราฟ

2.6 สีและการเห็นสี

2.6.1 สีและการเห็นสี

การเห็นสีจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีองค์ประกอบสี่ประการ คือ 1.แสง 2.วัตถุ(สี) 3.นัยตาของผู้มองเห็น และ 4.สมองที่วิเคราะห์หรือตีความสีที่เห็น (ชงชัย พรรณสวัสดิ์ และสมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, 2526)

1. แสง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง คั้นกำเนิดแสงอาจมาจากดวงอาทิตย์หรือแหล่งกำเนิดแสงอื่นที่มนุษย์เป็นผู้สร้างขึ้นก็ได้ และช่วงความยาวคลื่นที่ตามนุษย์สามารถรับภาพได้อยู่ในช่วงประมาณ 400-700 นาโนเมตร

ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมามากมาย ในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ กัน เช่น รังสีแกมมา รังสีเอ็กซ์ รูดตราไวโอเล็ต อินฟราเรด คลื่นวิทยุ โทรทัศน์ วิทยุ เรดาร์ เป็นต้น และช่วงคลื่นที่ตามองเห็นเป็นแสงสีขาวนั้นจะประกอบไปด้วยแถบแสงสี 6 แสงสี คือ ม่วง น้ำเงิน เขียว เหลือง แสด และแดง ดังนั้นเมื่อนำแถบแสงสีทั้งหกนี้มาผสมกลับ ด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมก็จะได้แสงสีขาวเช่นกัน

2. วัตถุ (สี)

วัตถุใดๆ สามารถสะท้อนแสงที่ตกกระทบออกมาได้ทุกความยาวคลื่นในแถบแสงสีขาว โดยที่ไม่ดูดกลืนแถบแสงในช่วงความยาวคลื่นใดไว้เลย วัตถุนั้นก็จะได้รับการเห็นเป็นสีขาว แต่ในทางตรงข้ามถ้าวัตถุไม่สะท้อนแถบแสงที่ความยาวคลื่นใดออกมาเลยหรือดูดกลืนไว้ทั้งหมด วัตถุนั้นก็ได้รับการเห็นเป็นสีดำ ส่วนในกรณีที่วัตถุมีสีให้เห็นต่างกันไปนั้นเพราะวัตถุเลือกดูด

กลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นช่วงหนึ่งๆ ได้ต่างกัน และสะท้อนแสงบางช่วงความยาวคลื่นออกมา เช่น วัตถุที่ได้รับการเห็นเป็นสีแดงเพราะวัตถุนั้นสะท้อนแสงช่วงความยาวคลื่นยาวๆ ออกมา และดูดกลืนช่วงความยาวคลื่นที่เหลือไว้ ดังนั้นเมื่อวัตถุออกมาเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแดนท์ก็ได้ค่าสูงที่ความยาวคลื่นยาวๆ และให้ค่าแอบซอบแบนท์สูงที่ความยาวคลื่นสั้นๆ ขึ้นกับสัดส่วนโทนสี(จะกล่าวต่อไป) วัตถุที่ได้รับการเห็นเป็นสีน้ำเงินจะสะท้อนแสงออกมาที่ความยาวคลื่นสั้นๆ เมื่อวัดในรูปแอบซอบแบนท์จะให้ค่าสูงในช่วงความยาวคลื่นยาวๆ และ ให้ค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแดนท์สูงในช่วงความยาวคลื่นสั้นๆ เป็นต้น

3. นัยน์ตา

ลูกนัยน์ตาจะมีจอร์รับภาพที่เรียกว่า “เรตินา” ซึ่งประกอบไปด้วยเซลล์รูปร่างเป็นแท่งและกรวย ที่มีความรู้สึกไวต่อแสงมาก ทั้งเซลล์แท่งและเซลล์กรวยจะร่วมกันทำหน้าที่วิเคราะห์แสงที่ผ่านเข้ามาในนัยน์ตาและส่งสัญญาณไปยังสมองต่อไป และทางด้านหน้าของลูกนัยน์ตาจะมี “ม่านตา (iris)” ที่ทำหน้าที่ปรับปริมาณแสงที่เข้าสู่ตาให้เหมาะกับการเห็น กล่าวคือเมื่อแสงน้อยเกินม่านตาก็ขยายเปิดกว้าง กลับกันถ้าแสงมากเกินไปม่านตาก็จะหุบเล็กลง

4. สมอง

แม้ว่าภาพจะก่อรูปขึ้นที่เรตินา เราจะเรียกได้ว่าเห็นภาพแล้วก็ต่อเมื่อ สมองได้รับสัญญาณการเห็นจากตา และสัญญาณที่ถูกส่งมาจากตานี้ต้องได้รับการถอดรหัสและเปรียบเทียบกับประสบการณ์หรือความจำเดิมที่มีอยู่ในสมอง ก่อนที่สมองจะรับรู้ว่าได้เห็นภาพหรือแล้ว

2.6.2 ทฤษฎีแม่สี

สีใดๆ ที่ตาเรามองเห็นในโลกนี้สามารถสร้างเลียนแบบให้เหมือนได้ด้วยการผสมแม่สีทั้ง 3 เข้าด้วยกันในอัตราส่วนที่เหมาะสม การผสมสีนี้แบ่งคร่าวๆ ได้ 2 วิธี คือ

1. การผสมแสงสีเชิงบวกของแสงสี (additive mixture of lights)

เป็นหลักการผสมแสงสีเพื่อสร้างสีซึ่งพบหลักการนี้โดยทั่วไปในโทรทัศน์สี กล่าวคือ ตาของมนุษย์จะไวเป็นพิเศษต่อแถบแสงสี 3 สี คือ แสงสีแดง แสงสีเขียว และแสงสีคราม(น้ำเงินเข้ม) ซึ่งเรียกว่า แม่สีเชิงบวก (additive primary color)

2. การผสมเชิงลบของสารสี (subtractive mixture of pigments)

เป็นหลักการผสมสารสี(pigments) หรือ แม่สีเชิงลบ(subtractive primary color) อันประกอบไปด้วย 3 สี คือ สีแดง สีนํ้าเงิน และสีเหลือง ซึ่งจะพบในกิจกรรมของศิลปิน การพ่นสี อุดสาหกรรม ย้อมหรือพิมพ์ผ้า เป็นต้น โดยสารสีอาจอยู่ในรูป สีย้อม(dye) สารสี(pigment) และอื่นๆ

2.6.3 การบรรยายสี

การบ่งบอกความรู้สึกเกี่ยวกับการเห็นสีเป็นเรื่องที่สลับซับซ้อน เพราะสีเป็นรูปธรรมที่คลุมเคลือ เป็นเนตรสำนึก(visual consciousness) การที่จะบรรยายว่ากำลังกล่าวถึงสีอะไรอย่างเด่นชัดจำเป็นต้องมีหน่วยวัดที่ชัดเจน สามารถบ่งออกมาเป็นกฎเกณฑ์ทางวิทยาศาสตร์ ด้วยเหตุนี้เราสามารถบรรยายลักษณะของสีได้ด้วย

1. โทนสี (hue)

2. ความอิ่มสี (color saturation)

3. ความจ้าของสี (brightness)

4. ความหนาแน่นทางสายตา (visual density)

5. ความยาวคลื่นเด่น

1. โทนสี

การแบ่งสีออกเป็น สีแดง สีเขียว สีเหลือง สีนํ้าเงิน สีม่วง ฯลฯ เหล่านี้เรียกว่าแบ่งออก

ตามโทนสี แมกซ์เวลล์ได้ให้หลักการบรรยายสีโดยอาศัยสามรูปเหลี่ยมซึ่งเรียกว่า“สามเหลี่ยมแมกซ์เวลล์” (ดูรูปที่ 2.4) ในสามเหลี่ยมรูปนี้ได้กำหนดให้แม่สีเชิงบวกอยู่ที่มุมทั้งสามมุมของรูปมุมละโทนสี และแม่สีเชิงลบอยู่ที่ด้านทั้งสามด้าน ด้านละโทนสีเช่นกัน โดยแม่สีเชิงลบที่ปรากฏในด้านใดๆ จะเกิดจากการผสมแม่สีเชิงบวก 2 โทนสีที่ประกบด้านนั้นอยู่ ทั้งนี้ความเข้มของสีในสามเหลี่ยมจะสูงสุด ณ จุดใดๆบนเส้นรอบรูป และจะค่อยๆ ลดลงเมื่อวิ่งเข้าสู่ศูนย์กลางของสามเหลี่ยม ซึ่งเป็นสีขาว การลดลงของความเข้มเกิดจากการเจือจางด้วยความเข้มสีขาว(การผสมแสงสีเขียว, คราม และแดง) ที่มากขึ้นตามลำดับ เมื่อวิ่งเข้าสู่ศูนย์กลาง และจุดใดๆ บนเส้นตรงที่ลากจากจุดศูนย์กลาง(สีขาว)ไปยังขอบของรูปสามเหลี่ยม จะให้ค่าโทนสีเดียวกัน ต่างกันที่ความเข้มหรือความอิ่มสี



รูปที่ 2.4 สามเหลี่ยมแมกซ์เวลล์

2. ความอิ่มสี

ความอิ่มสีเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า“ความเต็มสี (colorfulness)” เป็นหน่วยที่ให้ความหมายในการบรรยายสีมากกว่าเดิม กล่าวคือเป็นหน่วยที่บ่งให้เห็นความบริสุทธิ์หรือความเข้มข้นของสีในโทนหนึ่งๆ โดยค่าความอิ่มสีจะคำนวณได้จาก



$$\text{ความอึมสี (\%)} = \frac{\text{(ความยาวจากศูนย์กลางสามเหลี่ยมไปยังจุดสี)}}{\text{(ความยาวจากศูนย์กลางไปยังขอบสามเหลี่ยมบนทิศทางเดียวกัน)}} \times 100$$

ดังนั้นถ้าโทนสีใดๆ ที่มีตำแหน่งอยู่บนเส้นรอบรูปสามเหลี่ยมแมกซ์เวลล์ ก็สามารถวัดความอึมสีได้ค่าเท่ากับ 100% ทุกครั้ง และลดลงเมื่อจุดบนขอบนั้นๆ ได้เคลื่อนที่เข้าหาจุดศูนย์กลางในทิศทางที่ยังรักษาโทนสีเดิมไว้

3. ความจ้า

ความจ้าของสีบ่งชี้ให้เห็นรูปทศน์ของสีขาวและสีดำ กล่าวคือสีขาวนั้นถือว่ามีความจ้ามากที่สุด และสีดำถือว่าไม่มีความจ้า ซึ่งวัดโดยเทียบกับผิวสีขาวที่ให้ความจ้าต่อเซลล์แสงไฟฟ้า โดยกำหนดว่าผิวสีขาวมีความจ้าเท่ากับ 100 %

4. ความหนาแน่นทางสายตา

เป็นค่าที่แสดงให้เห็นความหนาแน่นของสีที่ประสาทตาหรือเนตรสำนึกตีความออกมา ยกตัวอย่างสีโทนเหลืองที่มีความอึมสูงเท่ากับ 100% (ความเข้มสีสูง อยู่ที่ขอบรูปสามเหลี่ยม) อาจมีค่าหนาแน่นทางสายตาน้อยกว่าสีน้ำเงินที่มีความอึมไม่ถึง 100% ทั้งนี้เพราะความหนาแน่นทางสายตามีความสัมพันธ์กับความจ้า ซึ่งหาได้จาก

$$\text{ความหนาแน่นทางสายตา} = -\log \frac{\text{แฟกเตอร์ความจ้า (\%)}}{100}$$

5. ความยาวคลื่นเด่น

ดังได้กล่าวแล้วว่ามนุษย์สามารถเห็นสีได้ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 400-700 นาโนเมตร ดังนั้นถ้าเราสามารถระบุความยาวคลื่นเด่นได้ เราก็สามารถบรรยายสีนั้นในทัศนวิทยาศาสตร์ได้อย่างคร่าวๆ เช่น ตัวอย่างที่วัดให้ค่าความยาวคลื่นเด่นเป็น 500 นาโนเมตร ก็จะทำให้ค่าสีเขียว

เป็นต้น การบรรยายสีในลักษณะนี้มีประโยชน์กว่าการบรรยายว่าเป็นสีเขียวเฉยๆ ซึ่งไม่สามารถอ้างอิงหรือทำซ้ำได้

2.6.4 การวัดสี

การวัดสีน้ำเสียแบ่งออกได้ 4 ประเภทตามลักษณะการวัด คือ

1. เทียบกับสีมาตรฐานที่ยอมให้เป็นสีอ้างอิง เช่น สีมาตรฐานตาม APHA, DIN
2. วัดค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแดนซ์
3. วัดค่าแอบซอบแบนซ์
4. วัดด้วยการผสมแม่สีมาตรฐาน 3 สี

1. เทียบกับสีมาตรฐานที่ยอมให้เป็นสีอ้างอิง

ในงานวิศวกรรมประปาหรือแหล่งน้ำซึ่งตัวอย่างน้ำมักมีสีออกเหลืองน้ำตาล สีมาตรฐานตามที่ APHA (american public health association) กำหนดให้ใช้ เตรียมจากสารละลายมาตรฐานของแพลตินัมโคบอล ($K_2PtCl_6 \cdot CoCl_2 \cdot 6H_2O$) การวัดสีทำโดยเทียบตัวอย่างน้ำกับสารละลายมาตรฐานดังกล่าวที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังนั้นการวัดสีโดยวิธีนี้จึงเหมาะกับน้ำที่มีโทนสีเหมือนแหล่งน้ำเท่านั้น

2. วัดค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแดนซ์

ทำโดยวัดค่าแสงผ่านด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร ด้วยหลักการที่ว่าถ้าวัตถุใดไม่ดูดกลืนแสงไว้เลยสะท้อนแสงออกมาหมดก็จะเห็นเป็นสีขาว ส่วนวัตถุสีค่าก็จะดูดกลืนแสงไว้หมด แต่ถ้าวัตถุใดสะท้อนแสงออกมามากในช่วงความยาวคลื่นใดๆแล้ว วัตถุนั้นก็จะเห็นเป็นโทนสีที่สะท้อนออกมา เพราะฉะนั้นการวัดด้วยวิธีนี้ต้องกระทำการวัดค่าแสงผ่านที่ความยาวคลื่นตลอดช่วง 400-700 นาโนเมตร เสียก่อนเพื่อหาโทนสีออกมาเป็นค่าความยาวคลื่น (นาโนเมตร)

3. วัดค่าแอบชอบแบนท์

หลักการและเครื่องมือวัดเกี่ยวกับการวัดด้วยค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแตนซ์ แต่ให้วัดออกมาเป็นค่าแอบชอบแบนท์

4. วัดด้วยการผสมแม่สีมาตรฐาน 3 สี

จากหลักการผสมสีของแม่สี 3 สี ซึ่งมี 2 วิธีคือ 1.) ผสมแม่แสงสีแดง แสงสีน้ำเงิน แสงสีเขียว และ 2.) ผสมสารสีแดง เหลือง น้ำเงิน โดยใช้เครื่องทึบโทมิเตอร์วัดสีโดยใช้การผสมแม่สี 2 ใน 3 สีร่วมกับการปรับความสว่างในการมอง เพื่อเลือกแสงสีให้เหมือนกับตัวอย่างที่ต้องการวัด



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย