

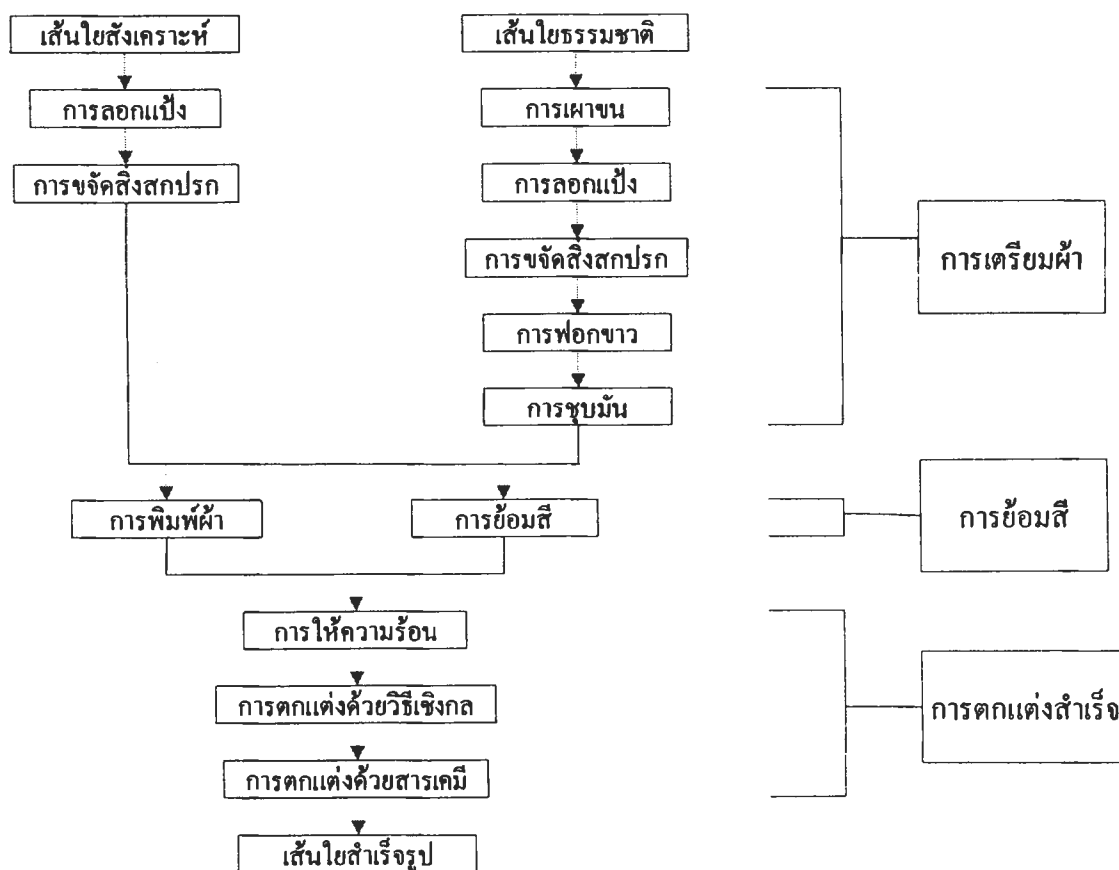
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการฟอกย้อม

อุตสาหกรรมฟอกย้อม ทำหน้าที่เปลี่ยนวัสดุสิ่งทอในรูปที่ยังเป็นวัตถุดิบ คือ เส้นด้ายดิบ หรือผ้าดิบให้เป็นวัสดุสำเร็จหรือนำไปใช้เป็นวัตถุดิบของอุตสาหกรรมขั้นปลายได้ กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่เป็นกระบวนการทางเคมีที่อาศัยการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของเส้นใย โดยการใช้สารเคมี และสีย้อมที่เหมาะสมซึ่งอาศัยน้ำเป็นตัวกลาง อุตสาหกรรมฟอกย้อมจึงเป็นอุตสาหกรรมที่มีความต้องการใช้น้ำมาก กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อมประกอบด้วย กระบวนการหลัก 3 กระบวนการ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

กระบวนการฟอกย้อม



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการผลิตเส้นใย (Mumi, 2002)

2.1.1 กระบวนการเตรียมผ้า (Preparation)

เป็นการนำเส้นด้ายหรือผ้าดิบจากโรงงานปั่นหรือทอมาผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อเตรียมเส้นด้ายหรือผ้าชิ้นให้อยู่ในสภาพที่สามารถนำไปย้อมสีหรือตกแต่งสำเร็จได้เป็นอย่างดี สำหรับกระบวนการที่ใช้ในการเตรียมสิ่งทอมีอยู่หลายกระบวนการที่สำคัญดังนี้

1. การเผาขน (Singeing) เป็นการใช้ความร้อนทำลายปลายเส้นใยที่โผล่ผิวด้าย ซึ่งเกิดจากการเสียดสีที่เกิดขึ้นระหว่างการทอ มีผลทำให้พื้นผิวด้ายไม่เรียบและเป็นการทำลายความเงามันของผ้า

2. การลอกแป้ง (Desizing) เนื่องจากในการทอจะต้องมีการลงแป้งเส้นด้ายขึ้นเพื่อให้การทอเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ แต่เมื่อนำผ้าที่ทอเสร็จแล้วไปทำการฟอกย้อม แป้งที่เคลือบอยู่บนเส้นด้ายจะมีผลต่อคุณสมบัติในการดูดซึมน้ำและสารเคมีของเส้นใย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการขจัดออกไป

3. การขจัดสิ่งสกปรก (Scouring) หมายถึง การกำจัดไขมัน และสารปนเปื้อนต่างๆ ออกไปเพื่อให้เส้นใยมีการดูดซึมน้ำได้ดี ดูดติดสีและสารเคมีได้อย่างสม่ำเสมอ

4. การฟอกขาว (Bleaching) หมายถึง การกำจัดสารมีสีในธรรมชาติที่ติดมากับวัสดุสิ่งทอ โดยใช้ปฏิกิริยาเคมีทำให้เส้นใยมีความขาวขึ้น

5. การชุบมัน (Mercerization) เพื่อเพิ่มความสดใน เงามัน ความคงทนแข็งแรง ปรับปรุงความสามารถในการดูดติดสี และเพื่อช่วยในการขจัดแป้งส่วนที่เหลือจากการลอกแป้ง

2.1.2 กระบวนการย้อมสี (Textile Dyeing)

วัสดุสิ่งทอส่วนใหญ่จะต้องมีการนำไปให้สีก่อนการใช้งาน หลักการย้อมสี คือ การใช้วิธีการที่เหมาะสมให้สารประกอบเคมีที่ละลายเป็นสารละลายหรือกระจายอยู่ในสารละลายไปทำให้เกิดสีบนวัสดุที่จะย้อม การเกิดสีบนวัสดุที่จะย้อมไม่เพียงแต่เกิดบนผิวหน้าเท่านั้น แต่จะสามารถซึมให้เกิดสีตลอดบนผิวรอบภาคตัดขวางของวัสดุที่จะย้อมด้วย ปัจจัยที่มีผลต่อการย้อม เช่น ระยะเวลาในการย้อม อุณหภูมิ ความเป็นกรด-เบส และสารเคมีช่วยย้อม จะมีผลต่อประสิทธิภาพ และความสม่ำเสมอของสีย้อมที่จะติดอยู่บนเส้นใย

2.1.3 กระบวนการตกแต่งสำเร็จ (Textile Finishing)

มักกระทำเป็นขั้นตอนสุดท้ายต่อจากการเตรียมและการให้สีสิ่งทอ เพื่อที่จะเปลี่ยนแปลง หรือเพิ่มคุณสมบัติบางอย่างให้กับผลิตภัณฑ์

กลุ่มอะตอมต่างๆ เหล่านี้ จะเป็นตัวเพิ่มสีให้แก่สารประกอบอะโรมาติก โดยการดูดกลืน แลบนแสงสีขาวไว้บางแถบแสงและปล่อยออกมาบางแถบแสง ทำให้มนุษย์มองเห็นสีข้อมมีโทนสี แตกต่างกันไป

สีข้อมโดยทั่วไปนอกจากจะต้องมีกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์แล้ว ยังจำเป็นต้องมีกลุ่มอะตอม อีกรชนิดหนึ่ง ได้แก่ กลุ่มอะตอม “ออกโซโครม” (Auxochromes) อันได้แก่ $-OH$, $-NH_2$, $-NHR$, $-NR_2$, $-SO_3$ และ $-COOH$ เพื่อให้สีข้อมสามารถทำปฏิกิริยาคัดติดกับเส้นใยได้

2.2.1 สารให้สี (Colorants)

สารให้สี สำหรับสิ่งทอ คือ สีข้อม (Dyestuffs) และพิกเมนต์ (Pigment)

สีข้อม (Dyestuffs) คือสารให้สีที่ละลายน้ำได้ หรือบางชนิดที่ละลายไม่ได้ในขณะที่ ยังไม่นำไปข้อม แต่เมื่อนำไปข้อมโมเลกุลของสีข้อมจะซึมผ่านเข้าไปในเส้นใยด้วยวิธีการใดๆ ก็ ตาม และยึดติดกับ โมเลกุลเส้นใยในลักษณะต่างๆ ได้

สารที่จะเป็นสีข้อมที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติต่อไปนี้

1. มีความเข้มของสี เมื่อใช้ในปริมาณน้อยก็ให้สีที่เข้มได้
2. ละลายน้ำได้เพื่อจะข้อมได้ง่าย อาจจะละลายในน้ำทันที หรือละลายในปฏิกิริยา

เคมีข้อม

3. ดูดซับเข้าไปในเส้นใยได้ดี และดูดติดกับเส้นใย (Substantivity) ด้วยพันธะทางเคมี

4. มีความติดทน (Fastness) เมื่อดูดติดเส้นใยแล้วจะต้องติดทน ไม่ลอกหรือซีด (Fade) ง่ายเมื่อซักน้ำซักแห้ง ถูกแดด เหงื่อ การขัดสี ควั่นหรือแก๊ส เป็นต้น (มณฑา, 2541)

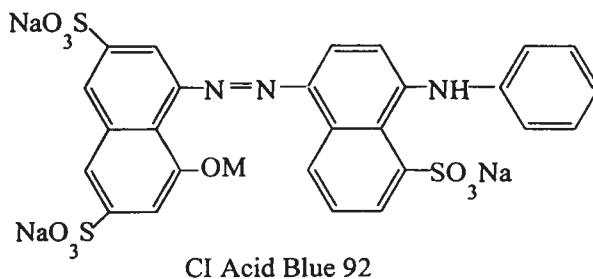
พิกเมนต์ สีพิกเมนต์ เป็นสารประกอบเคมีที่ให้สีที่ไม่ละลายน้ำ มีทั้งชนิดที่เป็น สารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ วิธีการข้อมเส้นใยจะทำได้ด้วยวิธี Solution dye หรือ Dope dye โดย ใส่สีพิกเมนต์ลงในพอลิเมอร์ขณะหลอมตัว ก่อนที่จะอัดออกเป็นเส้นใย วิธีนี้ใช้สำหรับการข้อม เส้นใยโอเลฟิน การใช้พิกเมนต์เหมาะสมสำหรับใช้ทำสีพิมพ์ผ้า โดยผสมกับสารช่วยยึดติดกับเส้นใย (Binder) สารทำให้ข้น (Thickening agent) และสารเพิ่มความคงทน (Fixer)

นอกจากนี้โมเลกุลของสีที่มีหมู่ธาตุ Solubilizer ยึดจับกับ โครโมฟอร์ จะทำหน้าที่ ช่วยให้สีละลายน้ำได้ หมู่ธาตุเหล่านี้ ได้แก่ $-SO_3^-$, $-Na^+$, $-NH_2^+HCl^-$, $-OH$, $-NH_2SO_2^-$, $-O^-$ เป็นต้น

2.2.2 สมบัติของสีข้อมชนิดเฉพาะชนิดเส้นใย (Colourway, 2544)

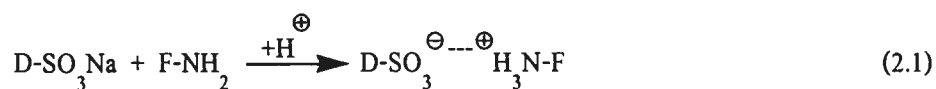
สีแอซิด (Acid dyes) คือ สีข้อมซึ่งเมื่อละลายน้ำแล้ว โมเลกุลสีจะมีประจุลบ และ มักจะใช้ข้อมในน้ำข้อมที่มีความเป็นกรด ใช้ข้อมเส้นใยโปรตีนและ ไนลอน ได้ดี การเกาะติดของ สีข้อมประเภทนี้ในเส้นใยอาศัยแรงดึงดูดระหว่างประจุลบบน โมเลกุลของสีกับประจุบวกบน โมเลกุลของเส้นใยเป็นสำคัญ สีกลุ่มนี้มักจะมีกลุ่มซัลโฟนิค (Sulphonic group) ซึ่งให้ประจุลบในน้ำ

ตัวอย่างสี



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของสี Acid Blue 92

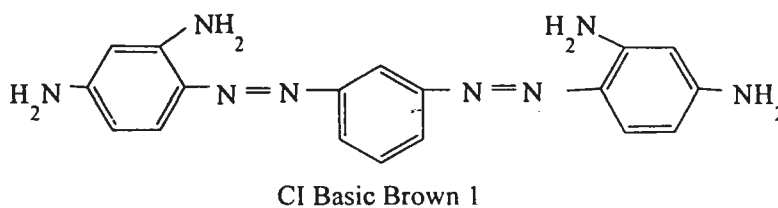
ลักษณะแรงดึงดูดกับเส้นใย



(D = Dye, F = fibre)

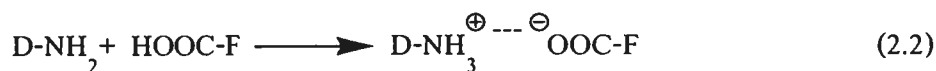
สีเบสิก (Basic dyes) คือ สีข้อมซึ่งเมื่อละลายในน้ำ โมเลกุลสีจะมีประจุบวก ใช้ข้อมเส้นใยอะคริลิก โพรตีน และไนลอนได้ดี การเกาะติดของสีข้อมประเภทนี้ในเส้นใย อาศัยแรงดึงดูดระหว่างประจุบวกบนสีข้อมกับประจุลบบนเส้นใย

ตัวอย่างสี



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของสี Basic Brown 1

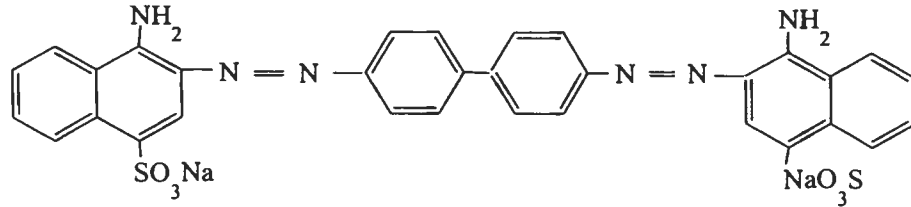
ลักษณะแรงดึงดูดกับเส้นใย



(D = Dye, F = fibre)

สีไดเรค (Direct dyes) คือ สีข้อมซึ่งเมื่อละลายในน้ำแล้ว โมเลกุลสีจะมีประจุลบ ใช้ข้อมพวกเส้นใยเซลลูโลสได้ดี และโดยปกติในการข้อมมักจะต้องการใส่สารพวกอิเล็กโทรไลต์ (โซเดียมคลอไรด์) ลงไปช่วยในการข้อมด้วย การเกาะติดบนโมเลกุลของเส้นใยอาศัยแรงดึงดูดแวนเดอวาลส์ (Van der Waals's forces)

ตัวอย่างสี

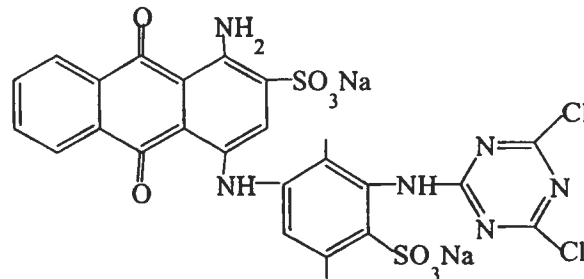


CI Direct Red 14

รูปที่ 2.5 โครงสร้างของสี Direct Red 14

สีรีแอคทีฟ (Reactive dyes) คือ สีย้อมที่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับเส้นใย ทำให้เกาะติดอยู่กับ โมเลกุลของเส้นใยได้โดยพันธะทางเคมี (covalent bonding) ส่วนใหญ่ใช้ย้อมเส้นใย เซลลูโลส

ตัวอย่างสี



CI Reactive Blue 4

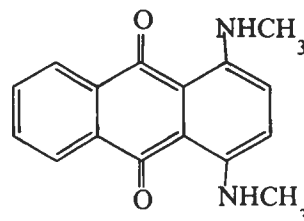
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของสี Reactive Blue 4

ลักษณะการเกิดปฏิกิริยา



สีดิสเพิร์ส (Disperse dyes) คือ สีย้อมที่มีการละลายน้ำได้ต่ำ ใช้ย้อมเส้นใยที่มีการดูดซึมน้ำน้อย (Hydrophobic fibers) โดยเฉพาะพวกเส้นใยสังเคราะห์ต่างๆ ได้ดี ในน้ำย้อมสีส่วนใหญ่จะไม่ละลายในน้ำ แต่จะอยู่ในน้ำย้อมในลักษณะของสารกระจาย (Dispersion)

ตัวอย่างสี

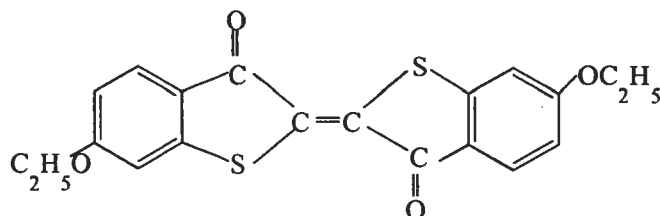


CI Disperse Blue 14

รูปที่ 2.7 โครงสร้างของสี Disperse Blue 14

สีวัต (Vat dyes) คือ สีข้อมที่ไม่ละลายน้ำที่มีกลุ่มคีโต (Keto group C=O) อยู่ ปกติใช้ข้อมเส้นใยฝ้ายเป็นส่วนใหญ่ในการข้อมจะต้องนำสีข้อมมาทำปฏิกิริยาเคมี (Chemical Reaction) ให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำที่มีความเป็นเบสเพื่อให้ดูดซึมเข้าไปในเส้นใยได้ เมื่อเข้าไปอยู่ในเส้นใยแล้วจึงทำปฏิกิริยาเคมี (Oxidation) ให้กลับไปอยู่ในรูปเดิมที่ละลายน้ำไม่ได้ ด้วยวิธีนี้สีข้อมจะมีความติดทนอยู่ในเส้นใย ไม่หลุดกลับออกมาในการซัก

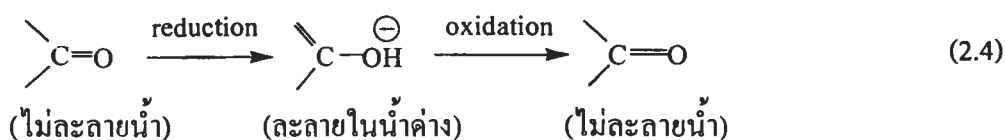
ตัวอย่างสี



CI Vat Orange 5

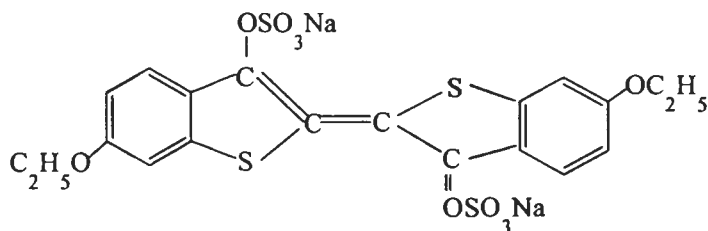
รูปที่ 2.8 โครงสร้างของสี Vat Orange 5

สมการแสดงการทำปฏิกิริยาทางเคมี



เนื่องจากสีวัตดังที่กล่าวข้างต้น มีวิธีการข้อมที่ยุ่งยากหลายขั้นตอน เพื่อเป็นการลดขั้นตอนดังกล่าว จึงได้มีการเตรียมสีวัตที่ละลายน้ำได้ (Solubilised vat dyes) ซึ่งช่วยลดขั้นตอนแรกไปได้ เพื่อสีข้อมเข้าไปอยู่ในเส้นใยแล้ว จึงทำปฏิกิริยาให้กลับไปอยู่ในรูปเดิมที่ไม่ละลายน้ำ

ตัวอย่างสี

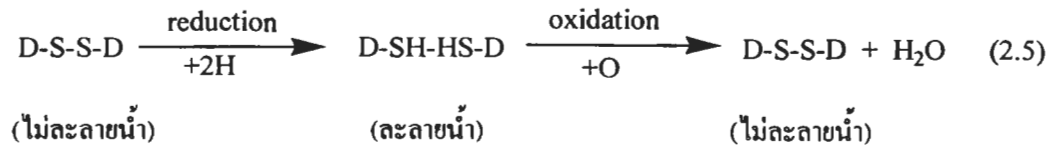


CI Solubilised Vat Orange 5

รูปที่ 2.9 โครงสร้างของสี Solubilised Vat Orange 5

สีซัลเฟอร์ (Sulphur dyes) คือ สีข้อมที่ไม่ละลายน้ำและมีซัลเฟอร์เป็นส่วนประกอบในโครงสร้างที่ทำให้เกิดสีใช้ในการข้อมเส้นใยฝ้ายเป็นส่วนใหญ่ วิธีข้อมคล้ายกับ สีวัต กล่าวคือ

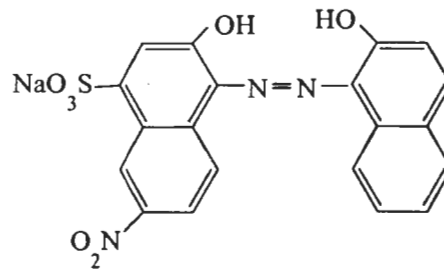
ก่อนย้อมจะต้องนำไปทำปฏิกิริยาให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ก่อน เมื่อย้อมเสร็จแล้วจึงทำปฏิกิริยาให้กลับ ไปอยู่ในรูปเดิมที่ไม่ละลายน้ำ ปฏิกิริยาที่มีดังนี้



เพื่อเป็นการลดขั้นตอนในการย้อม ได้มีการเตรียมสีซัลเฟอร์ที่ละลายน้ำได้ ในทำนองเดียวกับสีวัต สีพวกนี้สามารถนำมาละลายน้ำได้เลย และเมื่อย้อมเสร็จจึงนำไปทำปฏิกิริยาให้กลับ ไปอยู่ในรูปเดิม

สีมอร์แดนท์ (Mordant dyes) คือ สีย้อมที่เกาะติดอยู่ภายในเส้นใยในลักษณะของสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะ ส่วนใหญ่ใช้ในการย้อมเส้นใยโปรตีนและไนลอน การย้อมในขั้นตอนแรกเป็นไปอย่างธรรมดาคล้ายการย้อมด้วยสีแอซิด แต่เมื่อเสร็จแล้วจะต้องนำไปทำปฏิกิริยากับสารละลายของเกลือโลหะ เช่น เกลือของโลหะโครเมียม เพื่อให้เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนขึ้นในเส้นใย

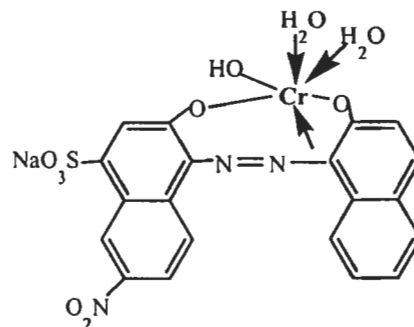
ตัวอย่างสี :-



CI Mordant Black 1

รูปที่ 2.10 โครงสร้างของสี Mordant Black 1

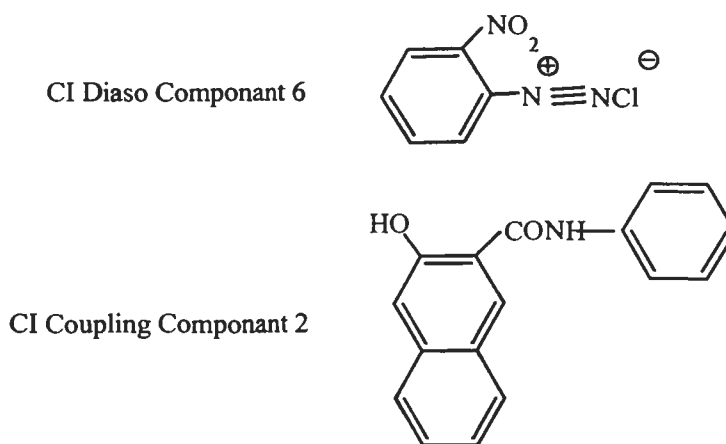
ลักษณะ โครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนในเส้นใยเมื่อทำปฏิกิริยากับเกลือของโลหะ โครเมียม การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนในเส้นใยนี้ ทำให้สีย้อมมีความติดทนอยู่ในเส้นใยได้ดีขึ้น เนื่องจาก โมเลกุลสีมีขนาดใหญ่ขึ้น



รูปที่ 2.11 ลักษณะการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับเส้นใย

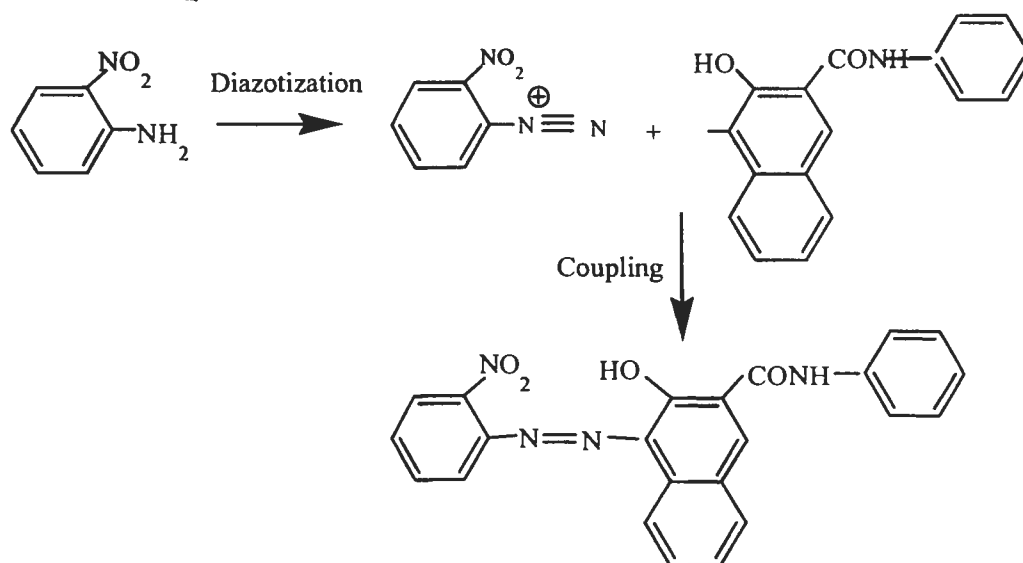
สีอะโซอิก (Azoic dyes) คือ สีย้อมที่ไม่ละลายน้ำที่ได้จากการสังเคราะห์ขึ้นภายในเส้นใยด้วยการทำปฏิกิริยาทางเคมี (Coupling reaction) ระหว่างเกลือไดอะโซเนียม (Dialo component) กับสารประกอบที่เหมาะสมเกิดเป็นสีย้อมที่มีสูตรโครงสร้างของสีอะโซอิก ในการย้อมตัวทำปฏิกิริยาทั้งสองจะถูกย้อมเข้าไปในเส้นใยก่อน แล้วจึงนำผ้าที่ย้อมแล้วไปจุ่มในสารเคมีซึ่งจะทำให้สารทั้งสองตัวทำปฏิกิริยากัน เกิดเป็นสีย้อมภายในเส้นใย สีย้อมประเภทนี้นิยมใช้กับการย้อมเส้นใยฝ้ายมากที่สุด

ตัวอย่างสี



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของสี Azoic

การเกิดปฏิกิริยาอาจแสดงให้เห็นตามสมการ 2.6

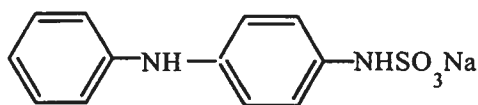


(2.6)

สีออกซิเดชัน (Oxidation dyes) คือ สีย้อมที่สามารถถูกออกซิไดส์ให้อยู่ในรูปแบบที่ไม่ละลายน้ำ ภายหลังจากที่ได้ย้อมให้เข้าไปเกาะติดในเส้นใยแล้ว ส่วนใหญ่ใช้ในการย้อมเส้นใยฝ้าย

สีพวกนี้เมื่อถูกออกซิไดส์ในเส้นใยจะทำปฏิกิริยาเกิดเป็น โมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัดว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นไปในรูปใด และโมเลกุลขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นมีสูตรทางเคมีอย่างไร

ตัวอย่างสี



CI Oxidation Base 3

รูปที่ 2.13 โครงสร้างของสี Oxidation Base 3

สีอินเกรน (Ingrain dyes) คือ สีย้อมที่ได้จากการสังเคราะห์ขึ้นในเส้นใยด้วยการทำปฏิกิริยาระหว่างสารตัวกลาง (Intermediates) ในเส้นใย นอกเหนือจากพวกที่เป็นสีอะโซอิก ตัวอย่างที่สำคัญ ได้แก่ สีธอลโลไซยานิน ซึ่งใช้ย้อมเส้นใยฝ้ายเป็นส่วนใหญ่

ตารางที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของสีย้อมประเภทต่างๆ และชนิดของเส้นใยที่เหมาะสมกับสีย้อมแต่ละประเภท (นันทยา, 2532)

ชนิดสีย้อม	โครงสร้างทางเคมี	ชนิดเส้นใย
1. สีแอซิด	Azo, Anthraquinone, Triphenylmethane, Azine, Xanthene, Nitro, Nitroso, Quinoline	ไนลอน, ขนสัตว์, ไหม, (กระดาษ, หนังสือ, อาหาร, เครื่องสำอางค์)
2. สีเบสิก	Azo, Anthraquinone, Triphenylmethane, Methine, Thiazine, Oxazine, Acridine, Quinoline	อะคริลิก, (ไนลอน, พอลิเอสเตอร์, ไหม, ขนสัตว์)
3. สีไดเรค	Azo, Stilbene, Thiazole, Oxazine	เส้นใยเซลลูโลส, (กระดาษ, หนังสือ)
4. สีรีแอคทีฟ	Azo, Anthraquinone	เส้นใยเซลลูโลส, ขนสัตว์, ไนลอน
5. สีดิสเพิร์ส	Azo, Anthraquinone, Nitro	พอลิเอสเตอร์, ไนลอน, อะซิเตด, อะคริลิก
6. สีวัต	Anthraquinone, Indigoid	เส้นใยเซลลูโลส, (พอลิเอสเตอร์, อะซิเตด)
7. สีซัลเฟอร์	Sulphur-containing	เส้นใยเซลลูโลส
8. สีเมอร์แคนท์	Azo, Anthraquinone, Nitroso	ขนสัตว์, ไหม, ไนลอน
9. สีอะโซอิก	Azo	เส้นใยเซลลูโลส, (พอลิเอสเตอร์, ไนลอน, อะซิเตด)
10. สีออกซิเคชัน	-	เส้นใยเซลลูโลส
11. สีอินเกรน	Phthalocyanine	เส้นใยเซลลูโลส

2.2.3 สมบัติ และทฤษฎีการย้อมสีแอซิด (อภิชาติ, 2545)

สมบัติของสีแอซิด

เนื่องจากสีกลุ่มนี้ต้องย้อมในน้ำย้อมที่มีภาวะที่เป็นกรด จะเป็นกรดชนิดใดก็ได้ เพราะเหตุนี้สีกลุ่มนี้เกือบทุกตัวเป็นเกลือ โซเดียมของกรดอินทรีย์ที่มีประจุลบ (Anionic) จึงเรียกสีเหล่านี้ว่าสีแอซิด (Acid Dye)

สีแอซิดสามารถย้อมกับเส้นใยโปรตีน เช่น ขนสัตว์ ไหม เป็นต้น และสามารถย้อมเส้นใยไนลอนได้ ส่วนมากสีแอซิดดูดความชื้นจากอากาศได้ง่าย การเก็บและเข้าหีบห่อจำเป็นต้องระมัดระวังเป็นอย่างดี ถ้าปรากฏว่าสีดูดความชื้นเข้าไปจะทำให้สีเสื่อมสภาพรวดเร็ว ตัวสีต้องมีความสามารถในการติดสีกับเส้นใยโปรตีนโดยตรงผลิดมาเพื่อใช้ย้อมใยขนสัตว์ และไหม แต่มีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกับสีไครเรมมาก ต่างกันที่หมู่ที่แสดงประจุลบ และสีแอซิดบางตัวมีขนาดโมเลกุลเล็กมาก ส่วนสีไครเรมก็มีโมเลกุลใหญ่เพื่อให้ยึดเหนี่ยวกับเส้นใยเซลลูโลสได้ดี

เมื่อสีแอซิดมีน้ำหนักโมเลกุลมากขึ้น จะมีความสามารถในการติดสีที่เป็นประจุลบมากขึ้น จึงต้องการกรดในน้ำย้อมเพื่อให้ดูดซึมได้พอดีไม่แฉก ฉะนั้นจึงแบ่งสีแอซิด เป็น 3 กลุ่มตามปริมาณความต้องการกรดในน้ำย้อมของสีตัวนั้นๆ

กลุ่มที่ 1 สีที่ต้องการกรดแก่ (Levelling or Equalizing acid dyes)

สีในกลุ่มนี้สามารถละลายน้ำได้ดี ย้อมสีได้สม่ำเสมอ และความคงทนต่อแสงโดยปกติจะดี แต่ความคงทนของสีต่อกระบวนการซักล้างไม่ดี เนื่องจากมีน้ำหนักโมเลกุลน้อย (ตัวเล็ก) และค่อนข้างต้องการภาวะกรดแก่ในการย้อม (ค่าความเป็นกรดเป็นเบสเท่ากับ 2-4 โดยการใช้อนุกรดซัลฟิวริก หรือกรดฟอร์มิก) เพื่อให้สีแทรกซึมได้ดี

กลุ่มที่ 2 สีที่ต้องการกรดปานกลาง (Milling acid dyes)

สีในกลุ่มนี้สามารถละลายน้ำได้ดี ย้อมสีได้สม่ำเสมอปานกลาง และความคงทนต่อการซักล้างดีขึ้น โมเลกุลของสีใหญ่กว่ากลุ่มที่ 1 (ตัวโตขึ้น) ต้องการภาวะปานกลางในการย้อม (ค่าความเป็นกรดเป็นเบสเท่ากับ 4-6 โดยการใช้อิทธิกรดอะซิติก)

กลุ่มที่ 3 สีที่ต้องการกรดอ่อน หรือภาวะเป็นกลาง (Super milling acid dyes)

สีในกลุ่มนี้สามารถละลายน้ำได้ดี ย้อมสีได้สม่ำเสมอไม่ดี และความคงทนต่อการซักล้างดีเยี่ยม โมเลกุลของสีใหญ่กว่ากลุ่มที่ 2 ต้องการภาวะกรดอ่อน หรือภาวะเป็นกลาง จนกระทั่งภาวะด่างอ่อนๆ ในการย้อม (ค่าความเป็นกรดเป็นเบสเท่ากับ 6-8 โดยการใช้อิทธิกรดอะซิติก)

หรือบางผู้ผลิตสีอาจแบ่งได้อีกแบบดังต่อไปนี้

1. สีแอซิดจริง (True acid dyes) สีกลุ่มนี้จะต้องย้อมในภาวะกรด (และบางครั้งจะต้องย้อมด้วยภาวะกรดแก่) เพื่อให้เกิดการดูดซึมสูง

2. สีแอสิดที่ข้อมในภาวะเป็นกลาง (Neutral dyeing acid dyes) สีนี้บางครั้งจะเรียกว่า สีมิลลิ่งแอสิด สีกุุ่มนี้จะต้องข้อมในภาวะเป็นกลาง โดยที่จะลดค่าความเป็นกรดเป็นเบสลง (ทำให้เป็นกรดเล็กน้อย) เมื่ออยู่ในช่วงสุดท้ายของการข้อมเพื่อทำให้มั่นใจว่าสีที่ได้รับมีความสม่ำเสมอดี

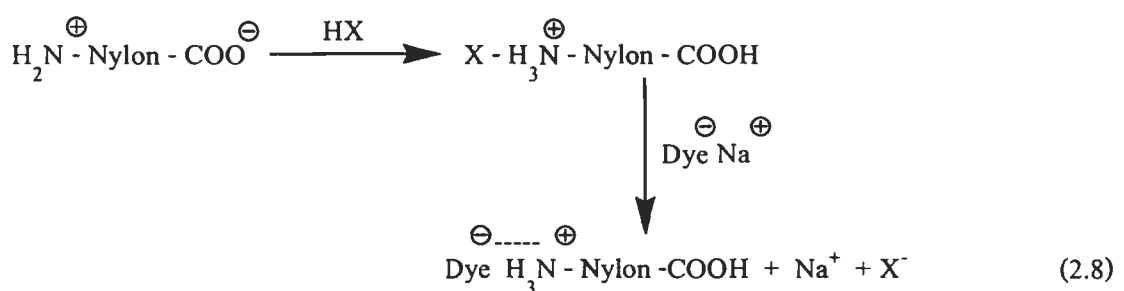
3. สีพรีเมทัลไลซ์ (Pre-metalized Dyes) หรือเรียกว่าสีมัลคอมเพล็กซ์ (Metal Complex) ชื่อของสีกุุ่มนี้ได้มาจากความจริงที่ว่าโลหะหลายตัว (โดยปกติโครเมียม) จะปรากฏอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล สีกุุ่มนี้จะแสดงให้เห็นถึงความคงทนต่างๆ ที่ดีเยี่ยม แต่กุุ่มนี้เป็นสีที่มีราคาแพง และสีกุุ่มนี้จะมีช่วงสีที่เข้มๆ และไม่ค่อยครอบคลุมการข้อมที่ไม่สม่ำเสมอบนเส้นใยในลอนได้ดีนัก กุุ่มสีนี้จะข้อมในภาวะที่เป็นภาวะเบสอ่อนๆ เพื่อควบคุมให้สีกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบนวัสดุ

ทฤษฎีการข้อมสี

เชื่อกันว่าสีแอสิดข้อมติดเส้นใยได้ โดยเกลือก่อรูปกับหมู่อะมีน (Amine group) ของโปรตีน แต่ต้องคำนึงถึงว่าโปรตีนจะมีหมู่อะมีน $-NH_3^+$ เรียงรายอยู่และสามารถรวมตัวกับประจุลบของสีได้



ส่วนเส้นใยในลอนเมื่ออยู่ในภาวะปกติอยู่ในน้ำ ในลอนจะแสดงประจุบวกที่ปลายด้านหนึ่ง และแสดงประจุลบที่ปลายอีกด้านหนึ่ง (H_2N^+ - ในลอน - COO^-) เมื่อเติมกรดลงไปปลายที่แสดงประจุลบจะกลายเป็นไม่มีประจุทำให้ในลอนแสดงประจุบวก ($X - H_3N^+$ - ในลอน - $COOH$) เมื่อเติมสีแอสิดที่มีประจุลบ ($\text{Dyes}^- Na^+$) สีกับเส้นใยมีความสารถในการติดซึ่งกันและกันเนื่องจากมีประจุต่างกันจะดูดกัน ($\text{Dyes}^- H_3N^+$ - ในลอน - $COOH$) ดังสมการข้างล่าง



ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าแรงระหว่างโมเลกุลของสีแอสิดกับเส้นใยโปรตีน หรือ ในลอนจะมีพันธะไฮออนิก แรงวันเดอวาลส์ และอาจมีพันธะไฮโดรเจนได้

2.3 มลพิษในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่เกิดจากการทิ้งน้ำเสีย น้ำเสียจากการฟอกย้อมมีแหล่งกำเนิดในเกือบทุกขั้นตอนของการฟอกย้อม ตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมผ้า ขั้นตอนการให้สี และขั้นตอนการตกแต่งสำเร็จ โดยเฉพาะในกระบวนการชำระล้างทำความสะอาดของแต่ละขั้นตอนจะมีการใช้น้ำในอัตราที่สูงมาก ซึ่งสิ่งที่สามารถพบได้ในน้ำเสียเสมอ ได้แก่ เศษเส้นใย เศษผ้า สารเคมี กรด-เบส ไขมัน สบู่ สีย้อม และตัวทำละลาย สมบัติของน้ำเสียในโรงงานฟอกย้อมประเภทต่างๆ จะมีความแตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ และกระบวนการที่ใช้ นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำเสียในแต่ละโรงงานยังขึ้นอยู่กับเวลา และฤดูกาลอีกด้วย ดังนั้น จึงทำให้ปริมาณสารมลพิษในน้ำเสียมีปริมาณสูง ซึ่งน้ำเสียก่อให้เกิดปัญหาดังนี้

1. ผลต่อทัศนียภาพ

ในการย้อมเส้นใยจะมีการดูดซึมสีย้อมจากสารละลายสีย้อมเพียงบางส่วนเท่านั้น สีย้อมที่เหลือจะคงอยู่ในสารละลายสีย้อม และถูกปล่อยออกมากับน้ำเสีย ปริมาณสีย้อมที่ยังคงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ร้อยละ 5-50 ขึ้นอยู่กับประเภทของสีย้อมที่ใช้ สีในน้ำทิ้งเป็นสิ่งที่ให้ผลกระทบได้ง่ายต่อความรู้สึกของผู้คนที่พบเห็น แม้ว่าค่าบีโอดีของน้ำหลังจากผ่านการบำบัดจะมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานแล้ว ก็ยังคงถูกจัดว่าเป็นน้ำเสียขุ่นๆ และกลิ่นที่เกิดจากการตกตะกอนของสารอินทรีย์ยังเป็นที่รังเกียจ

2. ความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ

สารเคมีหลายชนิดที่นำมาใช้ในขั้นตอนการผลิตของการฟอกย้อม และค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำที่ถูกปล่อยออกมา ดังตารางที่ 2 สิ่งเหล่านี้จะมีผลต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำซึ่งสีย้อมบางชนิด เช่น สีย้อมที่มีองค์ประกอบของอะนิลีน (Aniline) มีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตมาก (Chaiyabut, 2003)

3. ปริมาณบีโอดี (Biological oxygen demand, BOD) และปริมาณซีโอดี (Chemical oxygen demand, COD)

แป้ง โปรตีน และกรดอินทรีย์ ที่ถูกใช้ในระหว่างกระบวนการทอผ้า จะถูกกำจัดออกจากผ้า ไปรวมกันอยู่ในน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม ทำให้ค่าบีโอดีเพิ่มขึ้น ส่วนสารซักฟอก สารช่วยย้อม และสารตกแต่งที่ใช้ในโรงงานฟอกย้อม ส่วนใหญ่มีผลทำให้ค่าซีโอดีเพิ่มขึ้น

4. ของแข็งแขวนลอย (Suspended solid)

ของแข็งแขวนลอยในน้ำ ได้แก่ เศษเส้นใยที่หลุดออกมา หากมีปริมาณมากก็อาจทำให้เกิดปัญหาการอุดตันของน้ำเสียในเครื่องข้อมได้ นอกจากนี้ ในกรณีของเส้นใยพอลิเอสเตอร์ยังมีสารโพลิโกเมอร์ที่หลุดออกมาจากเส้นใยและปะปนในน้ำเสียด้วย

5. อื่นๆ

สารตกค้างต่างๆ เช่น เกลือ โฟม และกลิ่นเหม็น เป็นต้น (นฤมล ศิริทรงธรรม, 2539)

ตารางที่ 2.2 สารเคมีที่เจือปนในน้ำเสียจากการข้อมสี (Correia et al., 1994)

ชนิด	สารเคมี	การใช้ประโยชน์
เกลือ	โซเดียมคลอไรด์ โซเดียมซัลไฟด์	สารหน่วงปฏิกิริยาการติดสี
กรด	กรดอะซิติก และกรดซัลฟิวริก	ปรับความเป็นกรด-เบส
เบส	โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมคาร์บอเนต	ปรับความเป็นกรด-เบส
บัฟเฟอร์	ฟอสเฟต	ควบคุมความเป็นกรด-เบส
Sequestering agents	EDTA	เกิดสารประกอบเชิงซ้อน และ หน่วงปฏิกิริยา
สารช่วยให้สีกระจายตัว สม่ำเสมอ	อียอนบวก อียอนลบ และ ไม่มีประจุ	การดูดซับสีในเส้นใยได้อย่าง สม่ำเสมอ
ตัวออกซิไดส์	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โซเดียมไนเตรท	สีข้อมที่ไม่ละลายน้ำ
ตัวรีดิวส์	โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ โซเดียมซัลไฟด์	สีข้อมที่ละลายน้ำ

2.4 การกำจัดสีข้อมในน้ำเสียจากการข้อมผ้า

ในปัจจุบันมีวิธีการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกข้อมหลายวิธี แต่มีประสิทธิภาพที่ไม่ดีนัก วิธีที่ใช้เป็นวิธีทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพ พบว่ากระบวนการทางกายภาพ และทางเคมี สามารถกำจัดสีได้ดี แต่บางครั้งจะทำให้น้ำทิ้งมีความเป็นพิษมากขึ้นอีกทั้งราคาของสารเคมีมีราคาแพง ส่วนวิธีทางชีวภาพ พบว่ามีราคาที่ถูกลงแต่ให้ผลในการกำจัดสีไม่ดี แต่หากมีการรวมกระบวนการเหล่านี้เข้าด้วยกันก็จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีดีขึ้น

2.4.1 วิธีทางกายภาพ (Physical Process)

กระบวนการโคแอกกูเลชัน/ฟล็อกกูเลชัน (Coagulation/flocculation)

โคแอกกูเลชันหรือการสร้างตะกอนเคมี ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนใหญ่ คือ ขั้นตอนการเติมสารเคมีพวกสารสร้างตะกอน (Coagulant) ซึ่งได้แก่ สารส้ม ปูนขาว สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ เกลือของเหล็ก เป็นต้น ผสมกับน้ำเสียที่เป็นตะกอนแขวนลอยเล็กๆ ขั้นตอนที่สอง คือ การกวนอย่างช้าๆ เพื่อให้เกิดสภาพรวมตะกอน (Flocculation) ซึ่งได้มีการเกาะกันระหว่างตะกอนแขวนลอยเล็กๆ กับสารสร้างตะกอน จนได้ตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นที่สามารถตกตะกอนได้ ในกระบวนการโคแอกกูเลชันนั้น มีสารเคมีสร้างตะกอนให้เลือกหลายชนิด การนำสารสร้างตะกอนชนิดใดไปใช้นั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสม โดยดูปัจจัยด้านประสิทธิภาพค่าใช้จ่าย วัตถุประสงค์ ข้อเสียของวิธีนี้ เกิดตะกอนจำนวนมาก ซึ่งเอาออกจากน้ำได้ยาก

กระบวนการดูดติดผิว (Adsorption)

การดูดติดผิวเป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือแก๊สให้มาเกาะจับและติดบนผิวโมเลกุลหรือคอลลอยด์ เรียกว่า สารถูกดูด (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับ เรียกว่า สารดูดติด (Adsorbent) และเรียกกลไกตั้งแต่มีโมเลกุลหรือคอลลอยด์เคลื่อนที่ไปเกาะติดกับพื้นผิวของอีกสารหนึ่งว่า การดูดติดผิว การเกาะจับโมเลกุลบนผิวของสาร อาจเกิดขึ้นด้วยแรงกายภาพ เช่น แรงแวนเดอร์วาล (Van Der Waals force) หรือด้วยแรงทางเคมีหรือทั้งสองอย่างรวมกัน สารดูดติดผิวมีหลายชนิด อาจแบ่งได้ 3 ประเภทดังนี้

1. ประเภทสารอินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ถ่าน กระดูก (Bone char) ฯลฯ สารเหล่านี้มีพื้นผิว 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม
2. ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) มีพื้นที่ผิวมากกว่าสารอินทรีย์อื่นๆ คือ 600-1,000 ตารางเมตรต่อกรัม จึงจัดแยกไว้จากสารอินทรีย์ชนิดอื่นๆ
3. สารอินทรีย์สังเคราะห์ เช่น เรซินแลกเปลี่ยนประจุ มีพื้นที่ผิว 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม

โดยทั่วไปกระบวนการดูดซับในกระบวนการกำจัดสีและกลิ่นในน้ำประปา และกระบวนการกำจัดสีในน้ำเสียจะนิยมใช้ถ่านกัมมันต์ ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงทำให้มีความสามารถในการดูดซับสูงตามไปด้วย ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดขึ้นกับค่าความจุของตัวดูดซับ และความเป็นกรด-เบสของน้ำเสีย

2.4.2 วิธีทางเคมี (Chemical Process)

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation)

- Chlorination

คลอรีนชันเป็นวิธีการกำจัดสีโดยใช้คลอรีนเป็นตัวออกซิไดซ์เชิงเอเจนท์ (Oxidizing agents) ซึ่งมีอำนาจออกซิไดซ์สูงไปทำปฏิกิริยากับสีที่อยู่ในน้ำทิ้ง ทำให้สีหายไปหรือลดปริมาณสีลง ปริมาณสีที่ลดลงขึ้นอยู่กับปริมาณและความเข้มข้นของคลอรีนที่ใช้ คลอรีนที่ใช้จะอยู่ในรูปของแก๊สคลอรีน สารประกอบไฮโปคลอไรต์ และคลอรีนไดออกไซด์ แต่แก๊สคลอรีนปริมาณมากเกินไปเป็นอันตรายต่อมนุษย์ และสิ่งแวดล้อม

- Ozonation

โอโซนถูกใช้ในการกำจัดกลิ่นในน้ำดื่ม และเป็นตัวออกซิไดซ์องค์ประกอบในสีย้อมผ้า โอโซนสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีกว่าคลอรีน พบว่า 1 มิลลิกรัมของโอโซนต่อน้ำเสีย 1 ลิตร สามารถออกซิไดซ์สีรีแอคทีฟ และสีเบสได้ดี แต่ไม่สามารถใช้กับสีดิสเพิร์สได้ และโอโซนไม่เหมาะกับการกำจัดสารอินทรีย์ อีกทั้งการติดตั้งมีราคาสูง

- Fenton's reagent

ประกอบด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และเหล็ก (Fe^{2+} และ Fe^{3+}) ซึ่งถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้เกิด ไฮดรอกซิลแรดิคัล (HO^{\cdot}) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงกว่าคลอรีนและโอโซน แต่น้อยกว่า ฟลูออรีนแรดิคัล

ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction)

เกิดปฏิกิริยาได้ดีกับสีย้อมที่มีโครงสร้างเป็นเอโซ เมื่อเกิดปฏิกิริยารีดักชันจะเกิดการแตกของพันธะทางเคมีใน โมเลกุลสี ผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้เป็นแอมโรแมติกเอมีน แต่ต้องมีการใช้ระบบชีวภาพแบบไร้อากาศเพิ่มเติมเพื่อลดความเป็นพิษของแอมโรแมติกเอมีน สารเคมีที่ใช้ได้แก่ โซเดียมไฮโครซัลไฟด์ ไทโอยูเรียไดออกไซด์หรือ ฟอรัลมาดิโนซัลฟูนิคแอซิด (FAS) โซเดียมฟอรัลมาดิไฮด์ซัลโฟนิเลท และ ทิน (II) คลอไรด์

2.4.3 วิธีเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Process)

เป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม รายละเอียดเกี่ยวกับการบำบัดจะได้กล่าวในหัวข้อ 2.5

2.4.4 วิธีทางชีวภาพ (Biological Process)

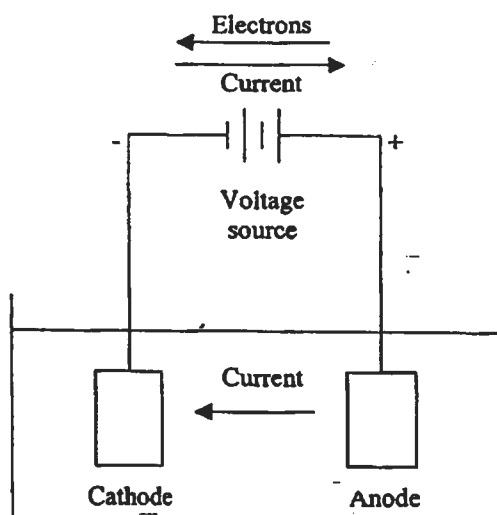
วิธีทางชีวภาพเป็นวิธีที่สามารถลดค่าบีโอดี ซีโอดี และค่าทีโอดีได้ แต่การกำจัดสีทำได้น้อยมากเนื่องจากไม่สามารถเกิดการย่อยสลายโมเลกุลของสีได้ บางครั้งการบำบัดสีด้วยวิธีทางชีวภาพจะอ้างถึงการตกตะกอนหรือการดูดซับบนตะกอน ภายใต้ภาวะที่ใช้ของแบคทีเรียที่ไม่ใช้อากาศแบคทีเรียจะสลายพันธะโครโมฟอริกในโมเลกุลสี พบว่ามีประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดี ค่าผลรวมของแอมโมเนียและสารอินทรีย์ในโตรเจน และกำจัดสี ดังนี้ 80.7-90.7, 82.0-94.6, 29.1-51.5% (Anustth, 2000)

2.5 วิธีเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Process)

เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากแหล่งต่างๆเช่น น้ำเสียชุมชน อุตสาหกรรม เชื้อกระดาษ การชุบโลหะ และโรงงานฟอกย้อม พบว่าช่วยลดการปนเปื้อน เช่น ซีโอดี บีโอดี ของแข็งละลายน้ำ ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด และโลหะหนัก

2.5.1 ทฤษฎีของไฟฟ้าเคมี (ปรีชา, 2544)

ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีนั้นเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (ปฏิกิริยารีดอกซ์) ซึ่งเกิดขึ้นทั้งๆ ที่สารซึ่งทำปฏิกิริยากันมิได้สัมผัสกันทั้งนี้เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากสารที่เกิดออกซิเดชันไปยังสารที่เกิดรีดักชัน การเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานเคมี เรียกว่า อิเล็กโทรลิซิส (Electrolysis) จะเกิดเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าลงในสารละลาย แล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ซึ่งเกิดการนำไฟฟ้าด้วยอิเล็กโทรไลต์ โดยกระแสไฟฟ้าถูกนำไปโดยไอออน การที่กระแสไฟฟ้าผ่านเข้าไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ต้องมีโลหะอย่างน้อย 2 อันจุ่มอยู่ในสารละลาย เรียกว่า อิเล็กโทรด (Electrode) และต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากภายนอก อิเล็กโทรดที่ต่อกับขั้วบวก เรียก แอโนด อิเล็กโทรดที่ต่อกับขั้วลบ เรียก แคโทด



รูปที่ 2.14 เซลล์ไฟฟ้าเคมี

เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าตรงเข้าไป ไอออนที่มีประจุบวกจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแคโทด เรียกว่า แคทไอออน (Cation) หรือไอออนบวก ไอออนที่มีประจุลบจะเคลื่อนที่เข้าหาแอโนด เรียกว่า แอนไอออน (Anion) หรือไอออนลบ เมื่อไอออนบวกเคลื่อนที่ถึงแคโทด ปฏิกิริยาเคมีจะเกิดขึ้น โดยที่แคโทดมีอิเล็กตรอนเหลือ ไอออนบวกจะรับอิเล็กตรอนจากแคโทด ดังนั้นแคโทดจึงเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่รับอิเล็กตรอน เช่นเดียวกันที่แอโนดจะมีการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากไอออนลบให้แก่แอโนด เพราะฉะนั้นที่แอโนดจึงเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน คือปฏิกิริยาให้อิเล็กตรอน นั่นคือในสารละลายอิเล็กโตรไลต์จะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง และสารละลายจะนำไฟฟ้าไปเรื่อยๆ ตรวจจับที่ เกิดปฏิกิริยาเคมีอยู่ เห็นได้ว่าการนำไฟฟ้าจะมีอิเล็กตรอนไหลผ่านเส้นลวดที่ต่ออยู่ภายนอก แต่ภายในสารละลาย การนำไฟฟ้าจะอาศัยการเคลื่อนที่ของไอออนบวก และไอออนลบ

2.5.2 กฎของฟาราเดย์เกี่ยวกับอิเล็กโตรลิซิส (Faraday's laws of electrolysis)

ในการศึกษาปรากฏการณ์ของอิเล็กโตรลิซิส ไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) พบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในสารละลายอิเล็กโตรไลต์กับปริมาณสารที่เปลี่ยนแปลงที่ขั้วไฟฟ้า และสรุปเป็นกฎได้ 2 ข้อ คือ

- 1.) มวลของสารที่เกิดขึ้นที่แอโนดหรือแคโทดในขณะที่เกิดอิเล็กโตรลิซิสเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในเซลล์
- 2.) มวลของสารต่างกัน ที่เกิดขึ้นในระหว่างการอิเล็กโตรลิซิสที่ใช้ปริมาณไฟฟ้าเท่ากัน จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักสมมูลของสารนั้นๆ

$$W = \frac{MIT}{ZF} \quad (2.9)$$

W = จำนวนสารที่แยกออกมาได้ (กรัม)

M = มวลโมเลกุล

I = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

T = เวลา (วินาที)

Z = จำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์

F = ค่าคงที่ฟาราเดย์ 96,485 คูลอมป์

2.5.3 การจัดเรียงอิเล็กโทรด

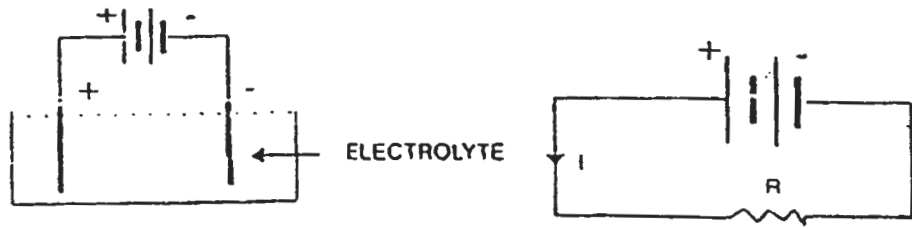
การจัดเรียงอิเล็กโทรดที่ง่ายที่สุดคือ มีแผ่นอิเล็กโทรดเพียง 1 คู่ โดยขั้วหนึ่งเป็นแอโนด และอีกขั้วเป็นแคโทด ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งแบบนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้เนื่องจากการนำไปประยุกต์ใช้นั้นต้องการขนาดใหญ่ พื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยามาก ทำให้ต้องมีการจัดเรียงตัวของแผ่นอิเล็กโทรดแบบต่างๆ ขึ้น ในกรณีที่ต้องใช้อิเล็กโทรดมากกว่า 1 คู่ สามารถเลือกวิธีต่อทางไฟฟ้าได้ 2 แบบ คือ

1. มอนอโพลาร์ มีจุดเชื่อมอิเล็กโทรดในแต่ละแผ่นทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นระหว่างขั้วแคโทดและแอโนด ซึ่งสลับกันขั้วละแผ่น โดยที่ผิวหน้าทั้งสองด้านของอิเล็กโทรดแผ่นเดียวกันจะมีขั้วเดียวกัน ในทางไฟฟ้านั้นแผ่นอิเล็กโทรดจะมีการจัดเรียงเซลล์ได้ 2 แบบ คือ

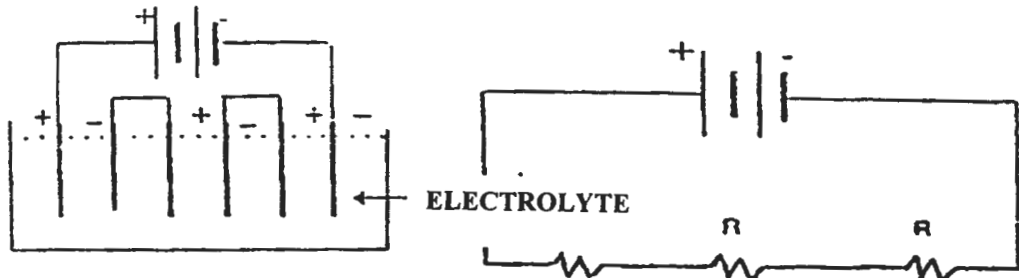
- แบบขนาน กระแสไฟฟ้าจะถูกแบ่งไปในแต่ละเซลล์ขึ้นอยู่กับความต้านทานภายในของเซลล์นั้นๆ โดยที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าของระบบจะเท่ากัน

- แบบอนุกรม มีการจัดเรียงอิเล็กโทรดคล้ายเซลล์เดี่ยวหลายๆ เซลล์ต่อกัน โดยมีจุดเชื่อมอิเล็กโทรด

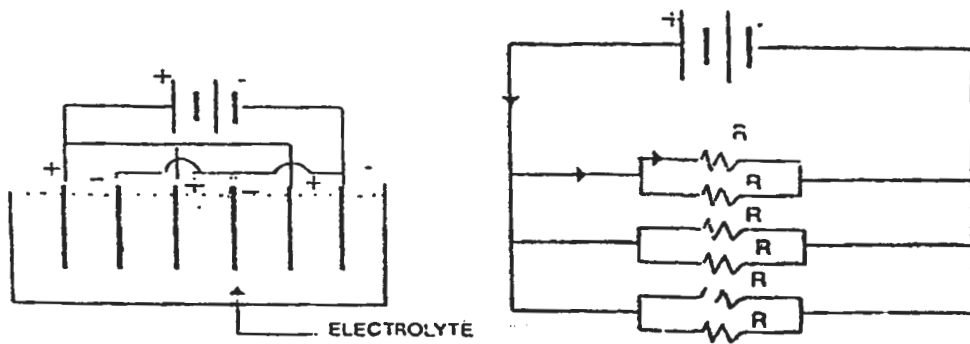
2. ไบโพลาร์ มีจุดเชื่อมอิเล็กโทรดเพียง 2 จุดเท่านั้น เฉพาะแผ่นอิเล็กโทรดที่อยู่ปลายนอกสุด แต่ละแผ่นของอิเล็กโทรดมีด้านหนึ่งเป็นแอโนดซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วลบ และอีกด้านหนึ่งเป็นแคโทดซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วบวก ในทางไฟฟ้านั้นแผ่นอิเล็กโทรดจะมีการจัดเรียงเซลล์แบบอนุกรม โดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านต้องการความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงกว่า เนื่องจากความต้านทานที่สูงกว่าของเซลล์ซึ่งต่อกันแบบอนุกรม แต่จะมีกระแสไฟฟ้าของระบบเท่ากัน นั่นคือมีกระแสไฟฟ้าเดียวกันไหลผ่านอิเล็กโทรดทั้งหมด ซึ่งการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบนี้ทำให้ง่ายต่อการติดตั้งและบำรุงรักษาในขณะที่ทำการใช้งาน



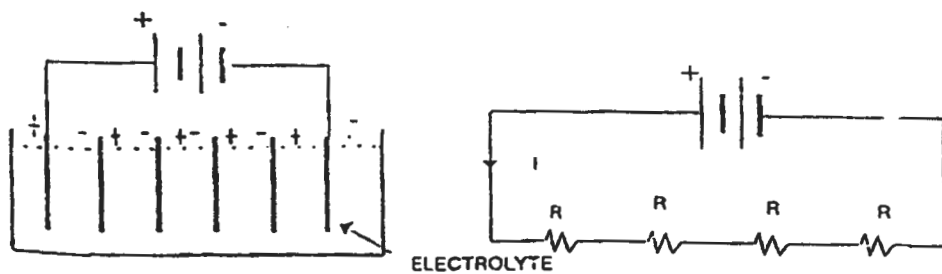
(ก) การจัดเรียงอิเล็กโทรดอย่างง่าย



(ข) การจัดเรียงอิเล็กโทรดเป็นมอนอโพลาร์แบบอนุกรม



(ค) การจัดเรียงอิเล็กโทรดเป็นมอนอโพลาร์แบบขนาน



(ง) การจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์

รูปที่ 2.15 การจัดเรียงอิเล็กโทรดในแบบต่างๆ

2.5.4 วัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรด (Electrode Materials)

อิเล็กโทรดประกอบด้วยครึ่งเซลล์ ที่ต่ออยู่กับแหล่งไฟฟ้าภายนอก และจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์

- อะลูมิเนียม เป็น โลหะหมู่เดียวกับแกลเลียม อินเดียม และเทลลูเรียม อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีมากที่สุดบนผิวโลก อะลูมิเนียมจัดว่าว่องไวสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะอื่นๆ ได้ อะลูมิเนียมมีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +3 เมื่อโลหะให้อิเล็กตรอนออกไป 3 อิเล็กตรอน Al^{3+} มีขนาดเล็กมาก สารประกอบของโลหะที่มีเลขออกซิเดชัน +3 มักจะเป็นประกอบโคเวเลนต์ อย่งไรก็ดี เมื่ออยู่ในน้ำ Al^{3+} จะเกิดไฮดรอกไซด์และไฮโดรไลซิส กลีโอสัลเฟต ไนเตรต และเฮไลต์ของอะลูมิเนียม ละลายน้ำได้ดี แต่ไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียมไม่ละลายในน้ำ ออกไซด์และไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียมมีสมบัติเป็นแอมโฟเทอริก

- เหล็ก เป็นโลหะแข็ง มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูง มีความว่องไวปานกลางทำปฏิกิริยา สารประกอบของธาตุเหล็กมีเลขออกซิเดชัน +2 และ +3 เลขออกซิเดชันสูงๆ มีบ้างแต่ไม่เสถียร และเป็นตัวออกซิไดซ์อย่างแรง ถ้าทิ้งไว้ในอากาศที่มีความชื้นมักจะกลายเป็นสนิมที่ผิว เรียกว่า สนิมเหล็ก เนื่องจากเกิดออกไซด์ที่มีน้ำผลึก $Fe_2O_3 \cdot X \cdot H_2O$ เครื่องมือเครื่องใช้ที่ทำด้วยเหล็ก จึงต้องหาวิธีป้องกัน เช่น ทาสีกันสนิม เคลือบด้วยโลหะที่เหมาะสม (ดีบุก สังกะสี โครเมียม หรือผสมโลหะบางชนิดลงไปเพื่อให้ได้เหล็กปลอดสนิม) เมื่อเผาไหม้ในอากาศจะได้ออกไซด์ผสม $FeO \cdot Fe_2O_3$ หรือ Fe_3O_4 ซึ่งมีประโยชน์ใช้ฉาบผิวเหล็กเพื่อป้องกันสนิมได้ เหล็กสามารถเกิดสารประกอบกับโลหะได้หลายชนิดเมื่อให้ความร้อน แต่ไม่ทำปฏิกิริยากับไนโตรเจน เมื่ออยู่ในสารละลายเหล็กมักอยู่ในรูปของ Fe^{2+} และ Fe^{3+} ปนกัน เนื่องจาก $Fe(II)$ ถูกออกซิไดซ์โดยอากาศได้ง่าย โดยเฉพาะในภาวะเป็นกลางเป็นเบส ดังจะเห็นจากค่า E^0

สารประกอบที่ปราศจากน้ำของ $Fe(II)$ ไม่มีสี แต่ถ้ามีน้ำหรืออยู่ในสารละลายจะมีสีเขียวอ่อนของอิกอน $(Fe(H_2O)_6)^{2+}$ สารประกอบ $Fe(III)$ มักมีสมบัติเป็นกรดมากกว่าของ $Fe(II)$ ทั้งนี้ปรากฏว่า $Fe(III)$ ในสารละลายจะอยู่ในรูปของ $(Fe(H_2O)_6)^{3+}$ ซึ่งมีสีม่วงจางเมื่อความเป็นกรด-เบสต่ำมากๆ เท่านั้น มิฉะนั้นจะถูกไฮโดรไลต์กลายเป็น $(Fe(H_2O)_5(OH))^{2+}$ หรือไอออนเชิงซ้อนคล้ายๆ กันนี้ทำให้ได้สารละลายสีเหลือง

- ไทเทเนียม เป็นธาตุหมู่เดียวกับเซอร์โคเนียม และแฮฟเนียม ไทเทเนียมมีเลขออกซิเดชันได้ทั้ง +2, +3 และ +4 ไทเทเนียมเป็นโลหะแทรนสิชัน คือ มีลักษณะขาวคล้ายเงิน จุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูง แข็ง เหนียว ดึงให้เป็นเส้นได้ เป็นโลหะแทรนสิชันที่มีความหนาแน่นต่ำที่สุด ที่ภาวะปกติไทเทเนียมค่อนข้างเฉื่อยมาก ทนได้แม้แต่แก๊สคลอรีนแห้ง แต่ถ้าอุณหภูมิสูงมากๆ (สูงกว่า 500 องศาเซลเซียส) จะสามารถทำปฏิกิริยาอย่างรุนแรงกับโลหะได้สารประกอบโคเวเลนต์ เช่น TiO_2 TiO_4 เป็นต้น สารประกอบไทเทเนียมที่มีเลขออกซิเดชัน +2 และ +3 ถึงแม้

ไทเทเนียมจะมีข้อดีหลายประการ แต่ไม่นิยมใช้เป็นวัสดุโครงสร้างแทนเหล็ก ทั้งนี้เพราะความไวต่อปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงคงได้กล่าวมาแล้ว

- แพลทินัม มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูงมาก คือ มีจุดเดือด 3,847 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 1,770 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงถึงความแข็งแรงของพันธะโลหะ และยังเป็นเหตุให้ไม่ไวต่อปฏิกิริยา นอกจากนี้สารประกอบของแพลทินัมมักไม่ค่อยเสถียรเมื่อให้ความร้อนสูงขึ้นจะสลายตัวเป็นโลหะ ดังนั้นจึงพบโลหะพวกเจือแล้วและยังปรากฏรวมอยู่กับพวกทองแดง เงิน และทองคำด้วย แพลทินัมมีน้อยมากจึงมีราคาแพงมาก แพลทินัมมีสีขาวและอ่อน มีเลขออกซิเดชันได้หลายค่าตั้งแต่ +2 ถึง +8 แต่ที่สำคัญคือ +2 ถึง +4 เท่านั้น เนื่องจากมีสมบัติในการนำความร้อนและไฟฟ้าดีมาก เนื้อต่อปฏิกิริยาจึงมีประโยชน์ในการทำอิเล็กโทรด เบ้าทนไฟ และภาชนะสำหรับงานที่อุณหภูมิสูงและต้องการความต้านทานการกัดกร่อนสูง

- ทองแดง เป็นธาตุในหมู่เดียวกับ เงิน และทอง โลหะนี้ค่อนข้างอ่อนสามารถตีแผ่เป็นแผ่นบางๆ คึงเป็นเส้น และทำให้เป็นรูปต่างๆ ได้ นอกจากนี้ยังเป็นตัวนำไฟฟ้าและความร้อนดีเยี่ยม มีความหนาแน่นมาก ธาตุในหมู่นี้มีลักษณะคล้ายคลึงกับโลหะแอลคาไลน์บ้างเล็กน้อย มีจุดหลอมเหลว และจุดเดือดค่อนข้างสูง ทองแดงเกิดขึ้นในธรรมชาติเป็นซัลไฟด์ และออกไซด์ โดยทั่วไปจะพบว่าทองแดงมีสถานะออกซิเดชัน +1 และ +2 ออกไซด์ของ Cu(I) เช่น Cu_2O เป็นสารประกอบที่มีสีแดงหรือสีเหลือง นอกจากนี้สารประกอบของ Cu(I) ที่รู้จักกันดี คือ Cu_2S สารประกอบทั้งสองนี้ไม่ละลายน้ำ Cu(II) มีสมบัติคล้ายคลึงกับโลหะแทรนซิชันอื่นๆ ที่มีสถานะออกซิเดชัน +2 คิวปริกไอออน (Cu^{2+}) นั้นมีสีสารละลายของ Cu(II) ในน้ำมีสีน้ำเงินอ่อน หรือสีฟ้าของ $[Cu(H_2O)_6]^{2+}$

2.5.5 กลไกการบำบัดด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีแบบการตกตะกอน (Yousuf et al., 2001)

เชื่อว่าวิธีไฟฟ้าเคมีแบบตกตะกอนจะเกิด 3 กลไก คือ

1. การสร้างตัวตกตะกอน โดยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ของขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งต้องเป็นขั้วที่สามารถเกิดการหลุดออกมาเป็นไอออนได้ (Sacrificial electrode)
2. เกิดการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ หรือสารปนเปื้อนในสารละลาย
3. การรวมตัวระหว่างตัวตกตะกอนที่ถูกสร้างขึ้นกับอนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกทำลายเสถียรภาพ

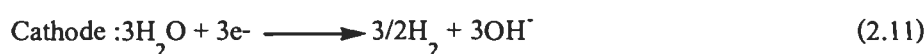
ซึ่งการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์สามารถทำได้ดังนี้ คือ

1. การลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse layer)
2. การดูดติดผิว และทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ (Adsorption/Charge neutralization)
3. โดยใช้ผลึกสารอินทรีย์เพิ่มน้ำหนัก และขนาดอนุภาคคอลลอยด์ (ห่อหุ้มอนุภาค)

(1) การเกิดปฏิกิริยาเมื่อใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วอิเล็กโทรด (Mollah et al., 2001)

การใช้ขั้วอะลูมิเนียมในการบำบัดด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีแบบตกตะกอนนั้น เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าไปยังขั้วอะลูมิเนียม ที่ขั้วแอโนดอะลูมิเนียมจะผลิตแคโทไอออนที่เป็นชนิด Monomeric เช่น Al^{3+} , $Al(OH)^{2+}$, $Al(OH)_2^+$, $Al_2(OH)_2^{4+}$, $Al(OH)_4^-$, หรือ polymeric เช่น $Al_6(OH)_{15}^{3+}$, $Al_7(OH)_{17}^{4+}$, $Al_8(OH)_{20}^{4+}$, $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$, $Al_{13}(OH)_{34}^{5+}$, ซึ่งขึ้นกับที่ค่าความเป็นกรด-เบส ซึ่งพบว่า ค่าความเป็นกรด-เบสที่ต่ำกว่า 7 ทำให้สามารถเปลี่ยนรูปเป็น $Al(OH)_3$ (Mehmet et al., 2003) ดังสมการที่ 2.10-2.12

ปฏิกิริยาหลักที่เกิดที่ขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นอะลูมิเนียม



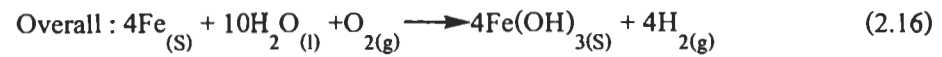
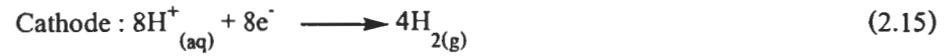
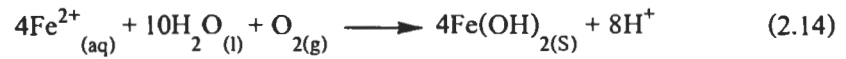
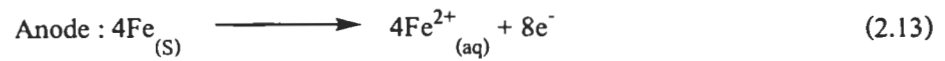
(2) การเกิดปฏิกิริยาเมื่อใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด (Mollah et al., 2001)

ส่วนเหล็กจะเกิดเป็น Monomeric และ Polymeric เช่นเดียวกับอะลูมิเนียม ขึ้นอยู่กับช่วงความเป็นกรด-เบส ตัวอย่างเช่น $FeOH^{2+}$, $Fe(OH)_2^+$, $Fe_2(OH)_2^{4+}$, $Fe(OH)_4^-$, $Fe(H_2O)_2^+$, $Fe(H_2O)_5^+OH^{2+}$, $Fe(H_2O)_4(OH)_2^+$, $Fe(H_2O)_8^+(OH)_2^{4+}$, $Fe_2(H_2O)_6(OH)_4^{2+}$, และสุดท้ายจะอยู่ในรูป $Fe(OH)_3$ เป็นตัวตกตะกอนเช่นกัน (Mehmet et al., 2003)

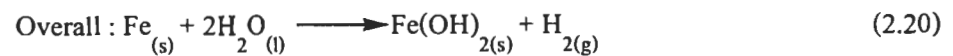
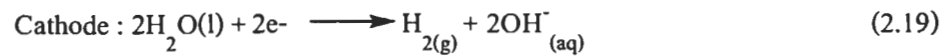
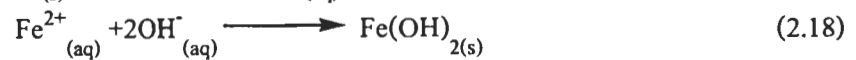
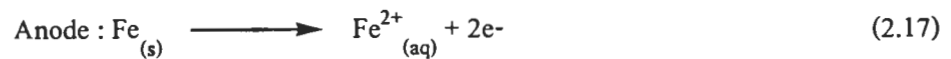
ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของขั้วเหล็ก เพื่อผลิต Iron hydroxide $[Fe(OH)_n]$ โดยที่ n = 2 หรือ 3 จึงมีกลไกในการผลิต $Fe(OH)_n$ 2 แบบคือ

ปฏิกิริยาหลักที่เกิดที่ขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นเหล็ก

กลไกแบบที่ 1



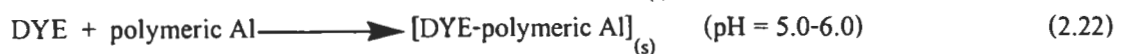
กลไกแบบที่ 2



(3) การดูดซับอนุภาคคอลลอยด์บนตัวตกตะกอน และกำจัดโดยการตกตะกอน หรือการลอยขึ้น (Mehmet et al., 2003)

กลไกที่เกิดระหว่างโมเลกุลสีข้อม และปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะขึ้นอยู่กับช่วงความเป็นกรด-เบสของสารละลาย และชนิดของไอออนที่เกิดขึ้น กลไกที่เกิดมี 2 แบบคือ การตกตะกอน และ การดูดซับ กลไกทั้งสองขึ้นกับความเป็นกรด-เบส โดยการรวมตัวเป็น絮ที่ช่วงความเป็นกรดจะอธิบายโดยการตกตะกอน และที่ช่วงความเป็นด่างอธิบายโดยการดูดซับ

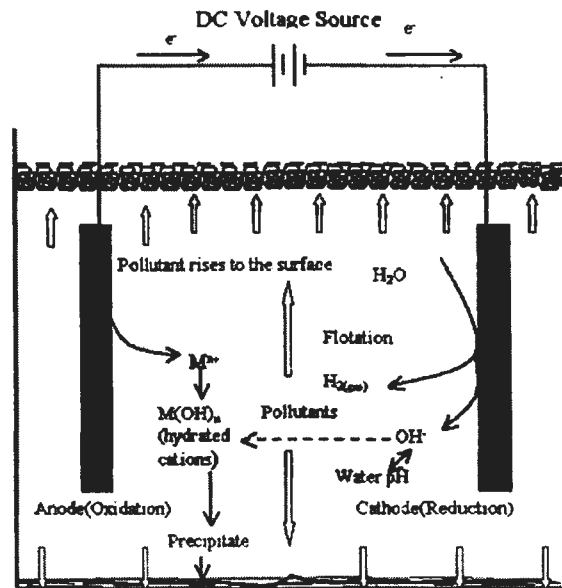
การตกตะกอน



การดูดซับ



Al(OH)_3 เป็นอสังฐาน เกิดการรวมตะกอนแบบห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ ซึ่งเป็นตัวดูดซับอนุภาคคอลลอยด์ได้ดี



รูปที่ 2.16 กระบวนการในการเกิดการตกตะกอนด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี (Holt et al., 1999)

2.6 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

หมายถึง การออกแบบการทดลองเพื่อตรวจสอบดูว่า ปัจจัย (Factor) ใด หรือตัวแปร (Input variable) ใดมีผลต่อสิ่งที่ให้ความสำคัญในผลิตภัณฑ์ที่ออกมา โดยมีจุดมุ่งหมายดังนี้

1. เพื่อยืนยันข้อเท็จจริง (Confirmation) คือ การพิสูจน์ถึงข้อเท็จจริง หรือความเชื่อจากประสบการณ์ หรือทฤษฎีบางอย่างที่อธิบายเกี่ยวกับกระบวนการผลิต
2. เพื่อค้นหาข้อเท็จจริง (Exploration) คือ การศึกษาถึงอิทธิพลของเงื่อนไขใหม่ที่มีผลต่อกระบวนการ

2.6.1 การทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Experiment) (กฤษฎดา อัสวรุ่งแสงกุล, 2542)

เป็นการทดลองที่มุ่งศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยมากกว่าหนึ่งปัจจัยพร้อมๆ กัน โดยให้ความสนใจที่อิทธิพลร่วมของปัจจัยซึ่งเป็นอิทธิพลที่ส่งผลให้กับตัวแปรตอบสนอง

โดยทั่วไปแล้วอาจกล่าวได้ว่าการทดลองแบบแฟกทอเรียล เป็นแผนการทดลองที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดใน การตรวจสอบอิทธิพลของหลายๆ ปัจจัยพร้อมกัน คำว่า แฟกทอเรียล หมายถึง การทดลองที่สมบูรณ์ในแต่ละครั้ง หรือแต่ละซ้ำของการทดลองนั้น กล่าวคือมีการใช้ระดับของปัจจัยต่างๆ ร่วมกัน จึงสามารถตรวจสอบอิทธิพลต่างๆ ในการทดลองครั้งหนึ่งๆ ได้พร้อมกัน เช่น ถ้าปัจจัย A มี a ระดับ ปัจจัย B มี b ระดับ แต่ละซ้ำจะมี ab treatment combination แบ่งได้ 2 ประเภท คือ

1. อิทธิพลหลัก (Main effect) คือ อิทธิพลของปัจจัยที่แสดงต่อตัวแปรตอบสนองด้วยตัวของมันเองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยเกิดขึ้น

2. อิทธิพลร่วม (Interaction effect) คือ อิทธิพลของปัจจัยหนึ่งที่จะเปลี่ยนไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยร่วมกัน

การทดลองแบบแฟกทอเรียลนั้น เป็นการประกอบกันของทริทเมนต์ ไม่ใช่ชนิดของแผนการทดลอง การประกอบกันของทริทเมนต์นี้อาจใช้ในแผนการทดลองแบบใดๆ ก็ได้ เช่น การทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete Randomization) แบบสุ่มบล็อก (Block) หรือจัตุรัสลาติน (Latin Square) ก็ได้

ข้อดีและข้อเสีย

ข้อดี

1. เป็นการใช้หน่วยทดลองทั้งหมดเพื่อตรวจสอบอิทธิพลของทริทเมนต์หลายๆ ทริทเมนต์พร้อมกัน ได้ จึงเป็นการประหยัดและเสียเวลาน้อยลงกว่าการทดสอบครั้งละ 1 ปัจจัย
2. ทำให้สามารถตรวจสอบอิทธิพลของอันตรกิริยาร่วมระหว่างปัจจัยได้ จึงช่วยในการสรุปผลได้กว้างขวางกว่าการทดลองครั้งละ 1 ปัจจัย

ข้อเสีย

1. เนื่องจากมี treatment combination จึงต้องใช้หน่วยทดลองมากขึ้นจึงอาจมีข้อจำกัดเกี่ยวกับจำนวนหน่วยทดลอง
2. ในกรณีที่มีอันตรกิริยาร่วมเกิดขึ้น อาจทำให้การสรุปผลเป็นภาษาที่เข้าใจงายได้ยาก
3. ถ้าจำนวนปัจจัยมีมาก ขนาดของการทดลองก็จะใหญ่ขึ้น ซึ่งเป็นการเสียค่าใช้จ่ายสูง และการหาวัตถุทดลองที่มีความสม่ำเสมอจำนวนมากก็เป็นไปได้ยาก

แผนการทดลองแบบแฟกทอเรียลทั่วไปมีรูปแบบ คือ $A \times B \times C \dots$ แฟกทอเรียล เช่น แฟกทอเรียล $3 \times 2 \times 3$ รูปแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลที่สำคัญ ได้แก่

1. 2^k แฟกทอเรียล ใช้กับการทดลองหลายปัจจัย ที่กำหนดระดับของปัจจัยไว้ 2 ระดับ ในปัจจัยทั้งหมด k ปัจจัย เป็นการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลเบื้องต้นจะช่วยในการทำการทดลองที่เจาะลึกต่อไป

2. 3^k แฟกทอเรียล ใช้กับการทดลองหลายปัจจัย ที่กำหนดระดับของปัจจัยไว้ 3 ระดับ ใน k ปัจจัย เช่น 3^3 แฟกทอเรียล หมายถึง เป็นการทดลองที่มี 3 ปัจจัย ๆ ละ 3 ทริทเมนต์

2.6.2 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k (ปรารเมศ, 2535)

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลใช้มากในการทดลองที่เกี่ยวกับหลายปัจจัย ที่ต้องการศึกษาถึงผลร่วมที่มีต่อผลตอบซึ่งเกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้น การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่มีความสำคัญมากที่สุดคือ กรณีที่มีปัจจัย k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้ อาจเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือเวลา เป็นต้น หรืออาจเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพก็ได้ เช่น เครื่องจักร หรือคนงาน และใน 2 ระดับที่กล่าวถึงนี้จะแทนระดับ “สูง” หรือ “ต่ำ” ของปัจจัยหนึ่งๆ หรือการ “มี” หรือ “ไม่มี” ของปัจจัยนั้นๆ ก็ได้ ใน 1 เวกเตอร์ปริมาตรสำหรับการออกแบบ จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ ข้อมูล เรียกการออกแบบลักษณะนี้ว่า การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

การเพิ่มจุดศูนย์กลางให้แก่การออกแบบ 2^k

ประการสำคัญในการใช้งานการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ คือ สมมติฐานเกี่ยวกับความเป็นเชิงเส้น (Linearity) ของผลที่เกิดขึ้นจากปัจจัยต่างๆ ในความเป็นจริง ถ้าพจน์ของอันตรกิริยาถูกเติมเข้าไปในผลหลักหรือแบบจำลองขั้นแรก (First-order model) นั่นคือ

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.25)$$

โดยที่

y = ตัวแปรตอบสนอง

β_0 = ผลเฉลี่ยทั้งหมด

β_j = ผลที่เกิดจากระดับที่ j ของคอลลิมน์

β_{ij} = ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง β_i และ β_j

ε = องค์ประกอบความผิดพลาดแบบสุ่ม

ดังนั้น จะมีแบบจำลองที่สามารถแสดงส่วนโค้งบางประการในฟังก์ชันของผลตอบ ส่วนโค้งนี้เกิดจากการบิดเบี้ยวของระนาบ (Plane) ที่ถูกทำให้เกิดขึ้นจากผลของอันตรกิริยา $\beta_{ij} x_i x_j$ นั่นเอง

มีบางกรณีเช่นกันที่ส่วนโค้งในฟังก์ชันผลตอบ ไม่เพียงพอที่จะสร้างสมการของแบบจำลองตามสมการ 2.25 นี้ได้ ในกรณีเช่นนี้แบบจำลองที่เหมาะสมกว่า คือ

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \varepsilon \quad (2.26)$$

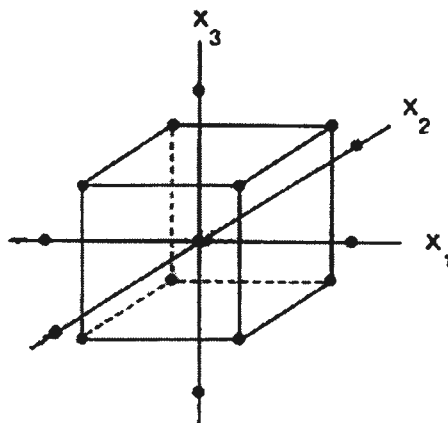
โดยที่ β_{ij} = ผลคูณที่สองที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง β_j และ β_j

โดยที่ β_{jj} จะแสดงถึงผลคูณที่สอง (Second-order effect) หรือผลแบบควอดรติก (Quadratic effect) และสมการ 2.26 นี้เรียกว่า แบบจำลองพื้นผิวของผลคูณที่สอง (Second-Order Response Surface Model) ค่าผลรวมกำลังสองสำหรับส่วน โค้งแบบกำลังสองบริสุทธิ์ (Pure quadratic curvature, $SS_{\text{pure quadratic}}$) ซึ่งมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 1 หาได้จาก

$$SS_{\text{pure quadratic}} = \frac{n_F n_C (\bar{y}_F - \bar{y}_C)^2}{n_F + n_C} \quad (2.27)$$

โดยที่ $SS_{\text{pure quadratic}}$ = ค่าผลรวมของกำลังสองสำหรับส่วน โค้งแบบบริสุทธิ์
 n_F = จำนวนของจุดในการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล
 n_C = จำนวนของจุดที่กึ่งกลาง
 \bar{y}_F = ค่าเฉลี่ยของการทดลอง n_F
 \bar{y}_C = ค่าเฉลี่ยของข้อมูล n_C

จากสมการที่ 2.27 ทำให้ทราบว่าพจน์ของกำลังสองจะมีผลต่อค่าผลตอบหรือไม่ ถ้าพจน์ของกำลังสองมีผลต่อค่าผลตอบจึงจำเป็นที่จะต้องประมาณค่าของพารามิเตอร์ β_{jj} แต่ในการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k แบบเพิ่มจุดศูนย์กลางจะไม่สามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ตัวนี้ได้ เนื่องจากมีข้อมูลไม่เพียงพอที่จะใช้ในการประมาณ วิธีการง่ายๆ ในการแก้ไขปัญหานี้ก็คือ การเติมการทดลองตามแนวแกน (Axial run) ลงไป ในการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ ดังในรูปที่ 2.17 ซึ่งผลของการออกแบบเช่นนี้เรียกว่า การออกแบบรูปผสมจุดศูนย์กลาง (Central composite design, CCD)



รูปที่ 2.17 การออกแบบรูปผสมจุดศูนย์กลาง

2.6.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

1. การวิเคราะห์ทางสถิติ

(1) การแจกแจงแบบ F

การแจกแจงแบบ F เป็นการแจกแจงที่มีตัวแปรสุ่มอิสระ 2 ตัวที่มีระดับชั้นความเสรีเท่ากับ U_1 และ U_2 ตามลำดับ การแจกแจงประเภทนี้มีความสำคัญอย่างมากในการวิเคราะห์สถิติเกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง

(2) การวิเคราะห์ความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวน มาจากความหมายของการแบ่งความแปรปรวนทั้งหมดออกเป็นส่วนประกอบย่อยๆ จะได้ว่า คือ

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 \quad (2.28)$$

โดยที่ y_{ij} คือ ค่าผลตอบสนองที่ได้จากการสังเกต

$\bar{y}_{..}$ คือ ค่าเฉลี่ยทั้งหมดของค่าผลตอบสนอง

จากสมการที่ 2.28 ค่าของ SS_T สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 = n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{.i} - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{.i})^2 \quad (2.29)$$

โดยที่ \bar{y}_i คือ ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองในแถวที่ i

a คือ จำนวนระดับการทดลอง

n คือ จำนวนการทดลองในแต่ละระดับ

จากสมการที่ 2.29 จะเห็นว่าความแปรปรวนทั้งหมดของข้อมูล (SS_T) สามารถแบ่งออกเป็นส่วนของผลรวมกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับกับค่าเฉลี่ยรวม กับผลรวมของกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าสังเกตภายในระดับกับค่าเฉลี่ยของระดับนั้นๆ ค่าของความแตกต่างระหว่างค่าสังเกตเฉลี่ยของแต่ละระดับกับค่าเฉลี่ยรวม คือ ตัววัดความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของระดับ ในขณะที่ความแตกต่างระหว่างค่าสังเกตภายในระดับกับค่าเฉลี่ยของระดับ คือ ความผิดพลาดแบบสุ่ม (Random error) ดังนั้นสามารถเขียนสมการที่ 2.29 ใหม่ได้เป็นสมการที่ 2.30 ซึ่งค่า $SS_{Treatment}$ เรียกว่า ผลรวมของกำลังสองที่เกิดเนื่องจากระดับต่างๆ และ SS_E เรียกว่าผลรวมของกำลังสองที่เกิดเนื่องจากการผิดพลาด เนื่องจากมีค่าสังเกตทั้งหมด $an = N$ ค่า ดังนั้น SS_T จะมี $N - 1$ ระดับขั้นความเสรีเท่ากับ $a - 1$ และภายในทุกๆระดับจะมี n เพลกิต ทำให้มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ $n - 1$ สำหรับการประมาณความผิดพลาดในการทดลอง ดังนั้น ถ้าปัจจัยมี a ระดับ จะมีระดับขั้นความเสรีสำหรับความประมาณ $a(n - 1) = an - a = N - a$

$$SS_T = SS_{Treatment} + SS_E \quad (2.30)$$

ส่วนค่ากำลังสองเฉลี่ย ของแต่ละส่วนคำนวณโดยการนำค่าผลรวมของกำลังสองของทั้ง 2 ส่วนหารด้วยระดับขั้นความเสรี แสดงดังสมการที่ 2.31 และ 2.32 การวิเคราะห์ความแปรปรวนได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.4

$$MS_{Treatment} = SS_{Treatment} / (a - 1) \quad (2.31)$$

และ $MS_E = SS_E / (N - a) \quad (2.32)$

ตารางที่ 2.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับปัจจัยเดียว แบบจำลองผลกระทบคงที่

Source of Variation	Sum of Square	Degrees of Freedom	Mean Square
Between treatment	$SS_{treatment}$	$a - 1$	$MS_{treatment}$
Error (within treatments)	SS_E	$N - a$	MS_E
Total	SS_T	$N - 1$	

2. แบบจำลองการถดถอย (Regression model)

แบบจำลองการถดถอยแสดงได้ดังสมการ ซึ่งพจน์ต่างๆในสมการจะได้อามาจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยตัวแปรหรืออันตรกิริยาระหว่างตัวแปรที่มีผลกระทบมากกับค่าจากการทดลองจะถูกนำมาเขียนในสมการ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ β_0 คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด และค่าสัมประสิทธิ์ $\beta_{i..k}$ จะเท่ากับครึ่งหนึ่งของค่าประมาณผลกระทบ (Effect estimate) เนื่องจากว่าสัมประสิทธิ์ของการถดถอยจะเป็นตัววัดผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของ x หนึ่งหน่วยต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยของ y และผลที่ประมาณได้นี้ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลง 2 หน่วย (จาก -1 ไป +1)

แบบจำลองของการถดถอยสามารถใช้ในการหาค่าจากการทำนายได้ และค่าส่วนตกค้างของการออกแบบจะเท่ากับผลต่างของค่าจากการทำนายกับค่าที่ได้จากการทดลอง ซึ่งค่าส่วนตกค้างนี้จะสามารถนำไปวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของแบบจำลอง โดยการเขียนกราฟความน่าจะเป็นปกติ (Normal probability plot) ต่อไปได้

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (2.33)$$

3. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

(1) การทดสอบการแจกแจงปกติ

การทดสอบการแจกแจงปกติโดยการคำนวณค่าส่วนตกค้าง (Residual) และค่าความน่าจะเป็น (Probability) ของการทดลอง ถ้าหากการแจกแจงของความผิดพลาดเป็นแบบปกติ กล่าวคือ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และมีความแปรปรวนคงที่ค่าหนึ่ง กราฟที่สร้างขึ้นจะเป็นเส้นตรง

(2) การทดสอบความสม่ำเสมอของความคลาดเคลื่อน

การทดสอบความสม่ำเสมอของความคลาดเคลื่อน โดยการนำค่าประมาณของข้อมูลกับ ค่าส่วนตกค้างของข้อมูลจากการทดลองไปเขียนกราฟแสดงลักษณะของความคลาดเคลื่อน ส่วนตกค้างที่เกิดขึ้นไม่ควรมีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆทั้งสิ้น

(3) การทดสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square)

ข้อมูลที่ได้ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองจากการออกแบบนั้น จะต้องได้รับการตรวจสอบความเชื่อถือได้โดยการวิเคราะห์ค่า R^2

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชนิษฐา เจริญลาภ (2545) ศึกษาการกำจัดสปีดเพิร์ส สีไครเรค และสีรีแอคทีฟ จากน้ำย้อมผ้า โดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี ซึ่งใช้สารตกตะกอน 5 ชนิด คือ อะลูมิเนียมซัลเฟต พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ เฟอร์ริกซัลเฟต และเฟอร์รัสซัลเฟต พบว่าสีไครเรค สารตกตะกอนทั้ง 5 ชนิดมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน โดยสีไครเรคตกตะกอนได้เกือบร้อยละ 100 ส่วนสปีดเพิร์ส พบว่า

พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์มีประสิทธิภาพสูงสุดในการตกตะกอนสี ได้ร้อยละ 97 และ เฟอร์รัสซัลเฟตมีประสิทธิภาพต่ำสุด คือ ประมาณ ร้อยละ 41 สำหรับสีรีแอกทีฟ พบว่าสารตกตะกอนทั้ง 5 ชนิดนี้ไม่สามารถตกตะกอนสีรีแอกทีฟได้เลย ต้องอาศัยสารช่วยในการตกตะกอน

วรรณวรรณ เทียงวรรณกานต์ (2546) ศึกษาการกำจัดสีชนิด Reactive โดยใช้วิธีไฟฟ้าเคมี และการตกตะกอนทางเคมี พบว่าภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีไฟฟ้าเคมี คือ ใช้ขั้วเหล็กขนาด 3 x 6.5 เซนติเมตรขึ้นไป ความต่างศักย์ 30 โวลต์ เวลา 1.5 ชั่วโมง ความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นที่ 5.85 และความนำไฟฟ้าที่ 7.2 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร จากนั้นนำมาเปรียบเทียบระหว่างการใช้อิทธิพลไฟฟ้าเคมี ก่อนแล้วทำการตกตะกอนทางเคมีต่อการรวมตะกอนทางเคมีเพียงอย่างเดียว พบว่าวิธีการตกตะกอนทางเคมี ให้ประสิทธิภาพการกำจัดเพียงร้อยละ 28.35 ซึ่งใช้พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (PACL) ถึง 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนการใช้อิทธิพลไฟฟ้าให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงถึงร้อยละ 97 และเมื่อทำการตกตะกอนทางเคมีต่อพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีไม่แตกต่างกันมาก และเมื่อศึกษากับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม พบว่าการใช้อิทธิพลไฟฟ้าเคมีร่วมกับการตกตะกอนทางเคมี ให้ผลในการกำจัดสี และค่าซีไอดี ไม่ต่างกับการใช้อิทธิพลไฟฟ้าเคมีเพียงอย่างเดียว

ปิ่นสยาม ภูมิพาณิชย์ (2546) ศึกษาการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟ 4 สี คือ สีดำ สีน้ำเงิน สีแดง และสีเหลือง ด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี การทดลองแบ่งเป็น 2 ช่วง ช่วงแรกทำการศึกษา และเปรียบเทียบผลของปริมาณไอออนของเหล็กที่ละลายจากขั้วแอโนดต่อการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีต่างๆ พบว่าปริมาณที่เหมาะสมกับโทนสีดำ สีน้ำเงิน สีแดง และสีเหลือง อยู่ในช่วง 120-187 177-186 95 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ช่วงที่สองทำการศึกษาและเปรียบเทียบผลของความนำไฟฟ้า ช่วงที่เหมาะสมคือ 8.56 9.36 24.20 และ 24.60 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร สำหรับสีดำ สีน้ำเงิน สีแดง และสีเหลือง ตามลำดับ ปริมาณไอออนของเหล็กมีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด โดยจะแปรผันตามกัน โดยการเพิ่มความนำไฟฟ้าให้แก่น้ำเสียส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการบำบัดสั้นลง

Daneshvar et al (2004) ศึกษาการบำบัดสีย้อมผ้าชนิด Acid Red 14 ซึ่งมีโครงสร้างหลักเป็นหมู่เอโซ ด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ความเป็นกรด-เบส ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด เวลาในการเกิดปฏิกิริยา จากผลการทดลองพบว่า ความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 6-9 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 80 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 1 เซนติเมตร สามารถกำจัดสี และลดค่าซีไอดีได้ ร้อยละ 93 และ ร้อยละ 85 ตามลำดับ และศึกษาเปรียบเทียบการจัดเรียงอิเล็กโทรดเพื่อดูประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมผ้า พบว่า การจัดเรียงอิเล็กโทรดในลักษณะขั้วเดียวแบบอนุกรม ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีดีกว่าการจัดเรียงแบบขั้วเดียว เซลล์เดี่ยว การจัดเรียงลักษณะขั้วเดียว

แบบอนุกรม ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีดีกว่าการจัดเรียงแบบขั้วเดียว แบบขนาน และการจัดเรียงแบบขั้วเดียวทั้ง 2 แบบ ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีดีกว่าการจัดเรียงแบบสองขั้ว

Kim et al (2002) ศึกษาการบำบัดสีชนิดรีแอกทีฟ และชนิดดิสเพิร์ส โดยขั้นแรก ศึกษาหาค่าความเหมาะสมของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีชนิด Disperse Blue 106 ค่าที่เหมาะสมเป็นดังนี้ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 3.5-4.5 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร อิเล็กโทรด 7 คู่ ความเข้มข้นอิเล็กโทรไลต์ 1 กรัมต่อลิตร ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 1 เซนติเมตร ความเข้มข้นสีข้อม 200-500 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรด-เบสในช่วง 4-9 และอัตราการไหลเข้าของน้ำ 100 มิลลิลิตรต่อนาที การทดลองสุดท้าย เป็นการนำเอาค่าที่ได้จากการทดลองแรก มาทำการหาประสิทธิภาพการบำบัดสี และค่าซีไอดี โดยใช้สีข้อม 5 ชนิดด้วยกัน คือ Reactive Blue 49 Reactive Yellow 84 Disperse Blue 106 Disperse Yellow 54 และ น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมพบว่าสีชนิดดิสเพิร์ส ทั้งสองสีสามารถถูกบำบัดได้มากกว่าสีชนิดรีแอกทีฟ ส่วนสีข้อมจากโรงงานอุตสาหกรรม สามารถบำบัดสี และค่าซีไอดีได้ร้อยละ 41.4 และร้อยละ 51.4 ตามลำดับ

Lin and Chen (1997) ศึกษาการกำจัดสีจากโรงงานฟอกย้อมด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีซึ่งใช้แกรไฟต์เป็นขั้วอะโนด การจัดเรียงแบบขั้วเดียว พบว่าการกำจัดสี ร้อยละ 90 ลดค่าซีไอดี ร้อยละ 79 และประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มมากขึ้นถึง ร้อยละ 100 เมื่อเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

Lidia et al (2001) เปรียบเทียบวิธีการในการกำจัดสีชนิดดิสเพิร์สด้วยวิธี 4 วิธี คือ วิธีไฟฟ้าเคมี โอโซนเซนชัน ไฮโปคลอไรด์ และเฟนทอน รีเอเจนท์ พบว่าวิธีที่ดีที่สุด คือ เฟนทอน รีเอเจนท์ ที่ความเป็นกรด-เบส 3 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร และเฟอร์รัสซัลไฟด์ 550 มิลลิกรัมต่อลิตร วิธีที่มีประสิทธิภาพรองลงมาคือวิธีไฟฟ้าเคมี โดยใช้ไทเทเนียมแพลทินัม-เออร์เดียม พบว่าลดค่าซีไอดี และกำจัดสีได้ ร้อยละ 39 และร้อยละ 90 ตามลำดับ ที่ความเป็นกรด-เบส ที่ช่วงเป็นกลาง ถ้าความเป็นกรด-เบสที่ 4.5 ค่าซีไอดี 1,452 มิลลิกรัมต่อลิตร บำบัดโดยวิธีไฟฟ้าเคมีสามารถลดค่าซีไอดีได้ 293 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ ร้อยละ 79

Lin and Peng (1994) ศึกษาการกำจัดสี และลดค่าซีไอดีจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยวิธีไฟฟ้าเคมี การจัดเรียงอิเล็กโทรดเป็นขั้วเดียว (monopolar) ทั้งหมด 4 คู่ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 1.5 เซนติเมตร พื้นที่หน้าตัดเป็น 324 ตารางเซนติเมตร ผลการทดลอง เวลาที่เหมาะสม 10 นาที ความเป็นกรด-เบสช่วง 5 ถึง 10 ซึ่งไม่มีผลต่อค่าซีไอดี กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการลดค่าซีไอดี 3แอมแปร์ หรือ 92.5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และการเติมพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จะช่วยให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสี และค่าซีไอดีเพิ่มขึ้น

McGarrahan and Yang (2005) ศึกษาการกำจัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าสังเคราะห์ ที่ความเข้มข้น 2 กรัมต่อลิตร ด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี โดยศึกษาสีย้อมผ้า 3 ชนิด คือ ชนิด Reactive Blue 19 มีโครงสร้างหลักเป็นแอนธราควิโนน ชนิด Acid Red 266 และชนิด Disperse Yellow 218 ทั้งสองชนิดมีโครงสร้างหลักเป็นเอโซ ศึกษาประสิทธิภาพของอิเล็กโทรดระหว่าง อะลูมิเนียม และเหล็ก โดยให้เป็นขั้วแอโนด ส่วนแคโทดเป็นแกรไฟต์ พบว่าการใช้ขั้วเหล็กที่เวลา 6 นาที ความเข้มข้นอิเล็กโทรไลต์ 2 กรัมต่อลิตร สามารถกำจัดสีชนิด Reactive Blue 19 ได้ดีที่สุด รองมาคือชนิด Disperse Yellow 218 และ Acid Red 266 ส่วนขั้วอะลูมิเนียมที่เวลา 6 นาที ความเข้มข้นอิเล็กโทรไลต์ 1 กรัมต่อลิตร สามารถกำจัดสีชนิด Disperse Yellow 218 ได้ดีเท่ากับชนิด Acid Red 266 ส่วนชนิด Reactive Blue 19 กำจัดได้ยากที่สุด

Sanroman et al (2005) ศึกษาชนิดอิเล็กโทรไลต์ และ 3^3 factorial experimental design กับสีชนิด Indigo ใช้ขั้วเป็นแกรไฟต์ การทดลองแรก ศึกษาชนิดอิเล็กโทรไลต์ ที่เวลา 30 นาที พบว่า โพลีเอทเธนโบรไมด์สามารถกำจัดสีได้ดีที่สุด รองมาเป็นโซเดียมคลอไรด์ โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ และ โพลีเอทเธนไอโอไดด์ ประสิทธิภาพการกำจัดสีเป็น ร้อยละ 98 93 90 และ 81 ตามลำดับ ส่วนการทดลองที่สอง เป็นการทดลองที่ใช้ 3^3 factorial experimental design ประกอบด้วย 3 ระดับ คือ -1, 0, +1 กับ 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของเกลือ ความเข้มข้นสีย้อม และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา พบว่าผลกระทบหลักทั้ง 3 มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี

Vlyssides et al (1999) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียชนิดรีแอกทีฟซึ่งมีโครงสร้างเป็นเอโซ โดยวิธีไฟฟ้าเคมี ซึ่งใช้ไทเทเนียม/แพลทินัมเป็นขั้วแอโนด และเหล็กกล้าเป็นขั้วแคโทด เมื่อเติม 2 มิลลิลิตรของกรดไฮโดรคลอริก ร้อยละ 36 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 18 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.89 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร สามารถลดค่าซีโอดีได้ร้อยละ 86 ลดค่าบีโอดีได้ร้อยละ 71 กำจัดสีได้ร้อยละ 100 และลดค่าทีเคเอ็นได้ร้อยละ 35