

บทที่ 2

ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำเสีย (รัชนิย์ รุกขชาติ, 2544)

น้ำเสีย หมายถึง น้ำที่มีสารใดๆ หรือสิ่งปฏิกูลที่ไม่พึงปรารถนาปนอยู่ การปนเปื้อนของสิ่งสกปรกเหล่านี้ ทำให้คุณสมบัติของน้ำเปลี่ยนแปลงไปจนอยู่ในสภาพที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ สิ่งปนเปื้อนที่อยู่ในน้ำเสีย ได้แก่ น้ำมัน ไขมัน ผงซักฟอก สบู่ ยาฆ่าแมลง สารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเหม็น และเชื้อโรคต่างๆ สำหรับแหล่งที่มาของน้ำเสียแบ่งได้เป็น 2 แหล่ง คือ น้ำเสียจากแหล่งชุมชน มาจากกิจกรรมสำหรับการดำรงชีวิต เช่น อาคารบ้านเรือน และน้ำเสียจากกิจกรรมอุตสาหกรรม เช่น น้ำเสียจากกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม น้ำเสียประเภทนี้มีประมาณ 25% จากปริมาณน้ำเสียทั้งหมดที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม แม้จะมีปริมาณไม่มากนัก แต่สิ่งสกปรกในน้ำเสียจะเป็นพวกสารเคมีที่เป็นพิษและพวกโลหะหนัก รวมทั้งพวกสารอินทรีย์ต่างๆ ที่มีความเข้มข้นสูงด้วย

2.1.1 ลักษณะของน้ำเสีย

ลักษณะของน้ำเสีย จำแนกออกเป็น 3 ลักษณะ คือ

1. ลักษณะน้ำเสียทางกายภาพ เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของน้ำเสียทางกายภาพ ประกอบไปด้วย

1) ปริมาณของแข็งทั้งหมด ประกอบด้วย ปริมาณของแข็งที่แขวนลอย (TSS, Total Suspended Solids) และปริมาณของแข็งละลาย (TDS, Total Dissolved Solids) ค่าปริมาณของแข็งจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสกปรก ความหนาแน่นของน้ำเสียได้ และยังสามารถบอกถึงประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียต่างๆ ที่เลือกใช้ในการบำบัด

2) กลิ่น ส่วนมากจะมาจากก๊าซที่เกิดจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย เช่น ก๊าซไข่เน่า (H_2S) เกิดจากจุลินทรีย์ชนิดที่ไม่ต้องการออกซิเจน โดยทำการเปลี่ยนสภาพของซัลเฟตไปเป็นซัลไฟด์ ในการกำจัดกลิ่นในน้ำเสียอาจใช้สารเคมีที่สามารถออกซิไดซ์สารที่ทำให้เกิดกลิ่นได้ เช่น คลอรีนหรือผงถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

3) อุณหภูมิของน้ำ เมื่อน้ำมีอุณหภูมิสูงมากกว่าปกติจะมีผลทำให้ปฏิกิริยาชีวเคมีของพวกจุลินทรีย์สูงขึ้นตามไปด้วย ทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำถูกใช้มากขึ้น และทำให้การเจริญเติบโตของพืชสูงมากกว่าปกติ ก่อให้เกิดปัญหาหมอกพิษทางน้ำ นอกจากนี้ยังมีผลให้การละลายของออกซิเจนในน้ำลดลง เนื่องจากค่าอิ่มตัวของออกซิเจนในน้ำจะลดลงเมื่อน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น

4) สี สีของน้ำเสียเป็นปัญหาเนื่องจากโรงงานหลายแห่ง เช่น โรงงานทอผ้า โรงงานสีย้อม และโรงงานอื่นๆ ปล่อยน้ำเสียออกมา หรือสีเขียวซึ่งเกิดจากการเกิดสาหร่ายมากๆ ในแหล่งน้ำ ทำให้เกิดผลเสียคือ จะเป็นตัวกั้นขวางแสงแดดไม่ให้ส่องลงได้น้ำ ทำให้แหล่งน้ำมีสีไม่น่าดู เนื่องจากสามารถมองเห็นสีของน้ำเสียได้ด้วยตาเปล่า

5) ความขุ่น เกิดจากการมีสารแขวนลอยที่ลอยอยู่ในน้ำ จะกั้นหรือขวางแสงแดดไม่ให้ส่องลงใต้น้ำ ได้มากกว่า 100% เช่นเดียวกันกับสี น้ำที่มีความขุ่นมากจะทำให้ยากต่อการกรองน้ำ

2. ลักษณะน้ำเสียทางเคมี จะประกอบด้วยสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ น้ำเสียที่มาจากบ้านเรือนจะประกอบด้วย 50% ของสารอินทรีย์และ 50% ของสารอนินทรีย์

1) สารอินทรีย์ ส่วนประกอบที่สำคัญของสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากชุมชน คือ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน น้ำมัน และปริมาณเล็กน้อยของผงซักฟอก สารประเภทฟีนอล และยาปราบศัตรูพืช

2) สารอนินทรีย์ ได้แก่ คลอไรด์ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ โลหะหนัก ก๊าซ และสภาพความเป็นกรดและเบสของน้ำเสีย เป็นต้น

3) คลอไรด์ ค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ในน้ำเสีย ถ้าไม่มากจนเกินไป จะไม่อันตรายต่อมนุษย์ แต่จะมีผลทำให้น้ำมีรสเค็ม แต่ไม่ควรเกิน 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

4) พีเอช (pH) เป็นค่าที่แสดงปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคไฮโดรเจน $[H^+]$ ในน้ำ ใช้บอกความเป็นกรดหรือด่างของน้ำทิ้ง เป็นค่าที่มีความสำคัญในการบำบัดด้วยวิธีการทางเคมี ฟิสิกส์และชีววิทยา และจำเป็นต้องควบคุมค่าพีเอชของน้ำทิ้งให้คงที่หรือควบคุมให้อยู่ในช่วงที่จำกัดไว้

5) สภาพกรดและสภาพด่าง (Acidity and Alkalinity) สภาพกรดของสารละลายใดๆ คือความสามารถของสารละลายนั้นในการแตกตัวให้โปรตอน น้ำทิ้งที่มีสภาพกรด คำนวณเป็นมิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตรของแคลเซียมคาร์บอเนต จะมีค่าพีเอชต่ำกว่า 8.2 สภาพด่างของสารละลายใดๆ คือความสามารถของสารละลายนั้นในการรับโปรตอน น้ำทิ้งที่มีสภาพด่าง คำนวณเป็นมิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตรของแคลเซียมคาร์บอเนต จะมีพีเอชสูงกว่า 4

6) โลหะหนัก เป็นสารซึ่งมีพิษต่อสิ่งมีชีวิต แต่มีโลหะหนักบางชนิดที่มีความจำเป็นสำหรับสิ่งมีชีวิต แต่ต้องได้รับในปริมาณที่เหมาะสม ถ้ามากเกินไปจะเป็นพิษ ได้แก่ โครเมียม ทองแดง เหล็ก แมงกานีสและสังกะสี เป็นต้น สำหรับโลหะหนักบางชนิดที่ไม่เป็นที่ต้องการและเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ได้แก่ แคดเมียม ตะกั่วปรอท และนิเกิล เป็นต้น

7) ซัลเฟอร์ มีอยู่ในน้ำธรรมชาติและในสิ่งมีชีวิตทุกชนิด ซัลเฟอร์ที่มีอยู่ในน้ำเสียจะอยู่ในรูปของ Organic Sulfur เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นต้น ซึ่งสารเหล่านี้ก่อให้เกิดปัญหากลิ่นเหม็นจากการย่อยสลายน้ำเสียและการกัดกร่อนต่อสภาพแวดล้อม

8) ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO, Dissolved Oxygen) ออกซิเจนเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ น้ำธรรมชาติที่มีคุณสมบัติดีจะมีค่า DO ประมาณ 5-7 ppm แต่ถ้าน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้การละลายของออกซิเจนลดลง

9) ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส เป็นธาตุอาหารที่สำคัญธาตุหนึ่งต่อการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ

3. ลักษณะน้ำเสียทางชีววิทยา ประกอบด้วยจุลินทรีย์มากมายหลายชนิดเจือปนอยู่ จุลินทรีย์ที่พบในน้ำเสียทั่วไป ได้แก่ แบคทีเรีย สาหร่าย ฟังไจ โปรโตซัว โรติเฟอร์ คัสตาเซียน และไวรัส เป็นต้น

2.1.2 สีของน้ำเสีย (ปรางศิริ ศรีศุภพชร, 2551)

สีของน้ำที่ปรากฏให้เห็นโดยทั่วไปมี 2 แบบ คือ

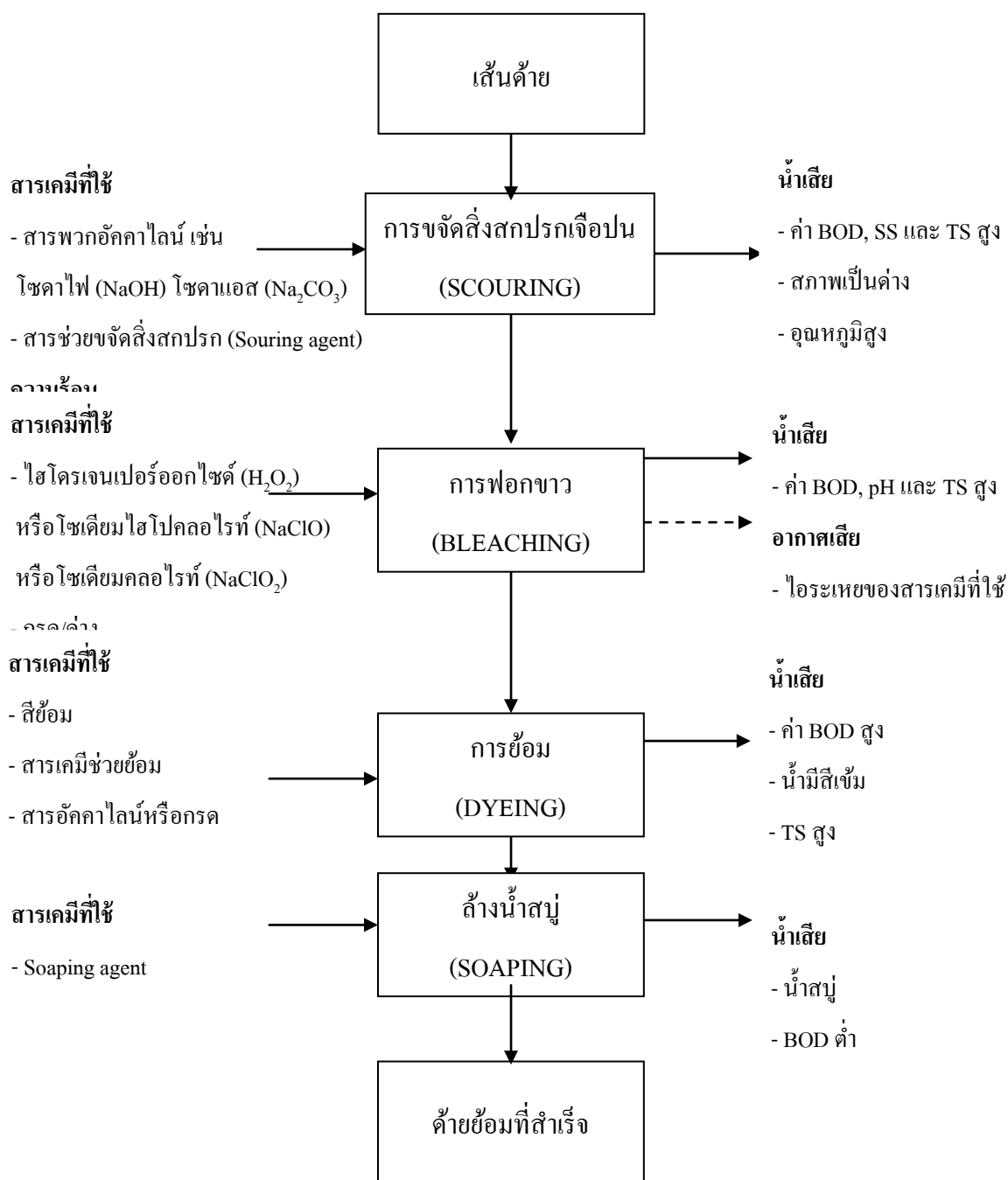
1. สีแท้หรือสีจริง (True color) หมายถึง สีที่ละลายจนกลายเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำ เกิดจากการละลายของสารประกอบที่มีอยู่ในน้ำ ซึ่งสารที่ทำให้เกิดสีแท้ ได้แก่ โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และสารประกอบของสารประกอบทั้งสามดังกล่าว เช่น สารอินทรีย์ต่างๆ

2. สีปรากฏ (Apparent color) หมายถึง สีของน้ำที่สามารถกำจัดออกได้โดยวิธีกายภาพ เกิดจากการสะท้อนของสิ่งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ได้แก่ พืชเล็กๆ ในน้ำ เช่น แพลงก์ตอนพืช (Phytoplankton) และแพลงก์ตอนสัตว์ (Zooplankton) รวมทั้งสิ่งที่ไม่มีชีวิตบางประเภท เช่น ซากพืชซากสัตว์ ตะกอนของดินและทราย

สีทั้งสองรูปแบบนี้อาจจะแยกจากกัน โดยวิธีหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) ซึ่งสีปรากฏจะตกตะกอน ส่วนสีแท้จะไม่ตกตะกอน และเมื่อสามารถกำจัดสีปรากฏออกไปได้จะทำให้เห็นสีแท้ของน้ำได้ สำหรับสีของน้ำเสียจากโรงงานข้อมผ้าเกิดจากการใช้สีข้อมในกระบวนการฟอกข้อม ซึ่งอนุภาคของสีข้อมเหล่านี้จะละลายเจือปนและแขวนลอยอยู่ในน้ำ เป็นสาเหตุที่ทำให้น้ำเสียเกิดสีขึ้น อนุภาคของสีข้อมที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเสียจัดเป็นอนุภาคที่ไม่สามารถถูกกำจัดออกไปด้วยวิธีตกตะกอนทางธรรมชาติ ซึ่งโดยทั่วไปการเกิดสีในน้ำเสียที่เกิดจากอนุภาคของสีข้อมจะทำให้เกิดสีแท้ในน้ำเสีย

2.2 กระบวนการฟอกข้อม

กระบวนการฟอกข้อมเป็นขั้นตอนสำคัญในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เพื่อให้ผ้าและเส้นด้ายมีสีสันสวยงาม คงทนต่อสภาวะแวดล้อมและให้ความรู้สึกสบายต่อผู้สวมใส่ ซึ่งกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกข้อมส่วนใหญ่เป็นกระบวนการที่ใช้สารเคมีและสีข้อมเพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของเส้นใย กระบวนการเหล่านี้อาศัยน้ำเป็นตัวกลางเกือบทุกขั้นตอน อุตสาหกรรมฟอกข้อมจึงเป็นอุตสาหกรรมที่ต้องใช้น้ำปริมาณมาก นอกจากนี้ในน้ำทิ้งหลังผ่านกระบวนการฟอกข้อมแล้วจะมีสารเคมีปนเปื้อนอยู่ เนื่องจากการใช้สารเคมีต่างๆ ในกระบวนการผลิต เช่น สารทำความสะอาด สีข้อม สารช่วยข้อม ซึ่งสมบัติของน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมฟอกข้อมจะมีความแตกต่างของลักษณะน้ำเสียอย่างเห็นได้ชัด ขึ้นอยู่ประเภทของการผลิตและการเลือกใช้สารเคมี กระบวนการฟอกข้อมผ้าเป็นกระบวนการผลิตที่มีความสำคัญทั้งในขั้นตอนการซักล้าง ฟอก ข้อม พิมพ์ และตกแต่งสำเร็จ สิ่งที่แตกต่างกันระหว่างผ้าทอกับผ้าถักก็คือ การฟอกข้อมผ้าถักจะไม่มีขั้นตอนการลอกแป้ง ดังนั้นกระบวนการเตรียมผ้าถักที่สำคัญ คือ การซักล้างทำความสะอาดก่อนทำขั้นตอนต่อไป โดยน้ำเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการฟอกข้อมแสดงดังรูปที่



รูปที่ 2-1 สารเคมีที่ใช้และของเสียที่ออกมาในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการฟอกย้อม

2.2.1 น้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อม

จากข้อมูลของระบบเครือข่ายสารสนเทศด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย (2553) พบว่า ลักษณะน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อมโดยทั่วไป มีดังต่อไปนี้

1. มีปริมาณสารอินทรีย์สูง ซึ่งมีสาเหตุจากแป้ง สีย้อม กรดอะซิติก เส้นใย และเส้นด้ายที่ปนออกมาจากกระบวนการย้อมและตกแต่ง นอกจากนี้แล้วยังอาจเกิดจากสบู่ ไขมัน น้ำมัน ซึ่งจะเป็นฟlocs ผิวน้ำและสารทำความสะอาดซึ่งมีลักษณะเป็นฟอง โดยทั่วไปแล้วน้ำเสียมักมีค่าบีโอดีประมาณ 100-1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรและค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD) ประมาณ 500-1,200 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. มีค่าความเป็นกรดและด่าง (pH) และค่าสภาพด่าง (Alkalinity) สูง โดยมีค่า pH ประมาณ 9-12 และมีค่าสภาพความเป็นด่างประมาณ 300-900 มิลลิกรัมหินปูนต่อลิตร สารที่ทำให้น้ำเสียฟอกย้อมมีค่า pH และค่าสภาพด่างสูง ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมคาร์บอเนต ซึ่งมีการใช้ในขั้นตอนการจัดตั้งสกปรกเจือปน (Scouring)

3. มีอุณหภูมิสูง โดยทั่วไปน้ำเสียในกระบวนการฟอกย้อมจะมีอุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะในขั้นตอนที่มีการใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ขั้นตอนการจัดตั้งสกปรกเจือปน ขั้นตอนการย้อมและขั้นตอนการตกแต่งสำเร็จ

4. มีปริมาณทีเอส (ของแข็งละลายน้ำ) สูง ส่วนใหญ่เป็นการละลายของแข็งพวกเกลือโซเดียมและกรดต่างๆ

5. มีความเข้มข้นสูง เนื่องจากในการย้อมสีของเส้นใย เส้นใยจะมีการดูดซึมสีย้อมเพียงบางส่วนเท่านั้น ดังนั้นจึงมีสีย้อมหลงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมและจะถูกปล่อยออกมากับน้ำเสียในที่สุด ปริมาณของสีย้อมจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ร้อยละ 5-50 ขึ้นอยู่กับประเภทของสีย้อมที่ใช้

6. มีโลหะหนักเจือปน เนื่องจากการเจือปนอยู่ในสีย้อมผ้า ได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว โครเมียมและสังกะสี

7. มีปริมาณทีเอสเอส (ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด) สูง โดยเฉพาะเศษเส้นใยที่หลุดออกมา ซึ่งเศษเส้นใยนี้หากมีปริมาณมาก อาจทำให้เกิดปัญหาการอุดตันของน้ำเสียในเครื่องย้อมได้

8. มีการปนเปื้อนของสารเคมี ซึ่งมีอยู่หลายประเภทตามชนิดที่เลือกใช้ ส่วนใหญ่จะมีหลงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมหรือน้ำซักล้างและจะถูกปล่อยปนออกมาในน้ำเสีย

จากการสำรวจโดยการเก็บตัวอย่างในน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลจำนวน 100 ตัวอย่าง ซึ่งการเก็บตัวอย่างน้ำเสียได้ทำการเก็บแบบจ้วงดัก (Grab sampling) ที่จุดรวมน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสียสามารถสรุปค่าต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 ลักษณะสมบัติน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมแบ่งตามชนิดของผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ที่ฟอกย้อม	ลักษณะสมบัติน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด					จำนวนข้อมูล
	pH	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	SS (mg/L)	สี หน่วย Pt Co	
ฟอกย้อมด้าย	8.2	120	300	43	450	13
ฟอกย้อมผ้าถัก	9.0	110	370	150	570	16
ฟอกย้อมผ้าทอ	8.6	400	1200	40	670	41
ฟอกย้อมด้ายและผ้าอื่น	9.1	230	713	65	400	30

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม 2542, คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมโรงงานฟอกย้อม

หมายเหตุ: ค่าลักษณะของน้ำเสียที่แสดงเป็นค่าความน่าจะเป็นร้อยละเท่ากับหรือน้อยกว่า 50

2.2.2 มาตรฐานน้ำทิ้งที่เหมาะสมสำหรับโรงงานฟอกย้อม

ปัจจุบันกรมโรงงานอุตสาหกรรมและกรมควบคุมมลพิษยังไม่ได้กำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งโดยระบุเพียงว่าน้ำทิ้งต้องไม่เป็นสีที่พึงรังเกียจ ต่างประเทศจะมีความเข้มงวดเรื่องการรักษาสีสิ่งแวดล้อม เช่น เยอรมัน ญี่ปุ่น และสิงคโปร์ก็ยังไม่มีความมาตรฐานน้ำทิ้งเช่นเดียวกัน สาเหตุที่สีในน้ำทิ้งไม่เป็นที่เข้มงวดในต่างประเทศนั้นเนื่องมาจากสีย้อมเป็นสารเคมีที่มีความเป็นพิษต่ำ ปริมาณสีในน้ำทิ้งซึ่งผ่านการบำบัดแล้วไม่มีความสัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นของ BOD ดังนั้นหากมีการกำหนดมาตรฐานสีในน้ำทิ้งขึ้นมาในขณะที่โรงงานสามารถบำบัดค่า BOD ให้ได้มาตรฐานอาจไม่สามารถบำบัดสีให้ได้ตามมาตรฐาน สำหรับประเทศไทยกรมควบคุมมลพิษได้กำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมแสดงดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม (กรมควบคุมมลพิษ)

ดัชนีวิเคราะห์	มาตรฐานน้ำทิ้ง			
	กรมโรงงานอุตสาหกรรม	กรมควบคุมมลพิษ	กรมชลประทาน	กรมเจ้าท่า
พีเอช	5.5-9.0	5.5-9.0	6.5-8.5	5-9
บีโอดี (มก./ล.)	<60	<60	<20	<20-60
ซีโอดี (มก./ล.)	<400	<400	-	-
ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	<50	<50	<30	-
ทีเคเอ็น (มก./ล.)	<100	<100	-	-
ปริมาณสี	ไม่พึงรังเกียจ	ไม่พึงรังเกียจ	ไม่พึงรังเกียจ	ไม่พึงรังเกียจ

2.3 สีย้อม (Dyes) (รัชนิย์ รุกขชาติ, 2544)

สีย้อมเป็นสารเคมีที่สกัดจากน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหิน เมื่อผ่านการสกัดจะได้สารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว เช่น เบนซีน ไชลีน แอนทราซีน โทลูอินและพาราฟิน ซึ่งสารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่างๆ ซึ่งสีย้อมที่ผลิตขึ้นมามีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด สีย้อมบางชนิดละลายน้ำได้ บางชนิดไม่สามารถละลายน้ำแต่จะละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ เมื่อนำสีย้อมไปใช้ในกระบวนการย้อมจะทำให้โมเลกุลของสีย้อมซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุลของเส้นใย โดยจะทำลายโครงสร้างผลึกของวัตถุนั้นชั่วคราว ซึ่งอาจเกิดพันธะไอออนิก (Ionic bond) หรือพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) กับวัตถุที่ต้องการย้อมโดยตรง การที่จะนำสีย้อมใดๆ มาย้อมให้ได้ผลดีนั้นขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใยซึ่งต้องมีอำนาจมากกว่าน้ำ เราจะสามารถทำให้เกิดสถานะเช่นนี้ขึ้นได้เมื่อโมเลกุลสีย้อมมีหมู่อะตอมซึ่งถูกจัดให้เรียงตัวกันในลักษณะที่จะทำให้เกิดการดูดติดเส้นใยได้เอง (Substantivity) กับเส้นใยแล้วเกิดพันธะ (Bond) ยึดกันแน่น อาจกล่าวได้ว่าอิทธิพลเชิงเคมี 4 ชนิดที่ทำให้สีดูดติดเส้นใย คือ พันธะ

ไฮโดรเจน (Hydrogen bond) แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals'force) แรงไอออนิก (Ionic force) และพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) กำลังแรงเหล่านี้ไม่ได้ทำหน้าที่เพียงลำพัง การดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับโมเลกุลของเส้นใยอย่างน้อยต้องประกอบไปด้วย 2 ชนิดขึ้นไป การดูดติดกับเส้นใยแล้วเกิดพันธะยึดกันแน่นเกิดจากอิทธิพลเชิงเคมี 4 ชนิดที่ทำให้สีดูดติดกับเส้นใยคือ พันธะไฮโดรเจน แรงแวนเดอร์วาลส์ พันธะไอออนิก และพันธะโควาเลนต์

1. พันธะไฮโดรเจน ไฮโดรเจนในกลุ่มไฮดรอกซี (Hydroxy) จะยึดอย่างหลวมๆ กับอะตอมอื่นๆ ได้เป็นวาเลนซ์ที่สอง (Secondary valency) เช่น การยึดตัวของไฮโดรเจนกับออกซิเจนในโมเลกุลของน้ำ เส้นใยและสีเกือบทุกชนิดจะมีกลุ่มไฮดรอกซี

2. แรงแวนเดอร์วาลส์ แรงนี้เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติเป็นแรงที่ทำให้อะตอมและโมเลกุลเข้ามาชิดกันได้เอง โดยเฉพาะระหว่างตัวสีกับเส้นใย จะเกิดแรงนี้ยึดให้ติดกันได้ เมื่อโมเลกุลของทั้งสองมีเอกลักษณ์พิเศษ คือ มีโมเลกุลยาวและแบน ดังเช่น โมเลกุลของเซลลูโลส สีแว็ตหรือสีไคเรทท์ หรือระหว่างเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตตกับสียึดสเปอร์ส

3. พันธะไอออนิก เกิดขึ้นได้เนื่องจากการให้และรับอิเล็กตรอนระหว่างอะตอมของธาตุ 2 ชนิดที่แตกต่างกัน อะตอมของธาตุที่เป็นฝ่ายให้อิเล็กตรอนออกไป ทำให้ตัวของมันเองมีจำนวนอิเล็กตรอนน้อยลงจึงแสดงอำนาจไฟฟ้าบวกออกมา ส่วนอะตอมของธาตุที่เป็นฝ่ายได้รับอิเล็กตรอนก็จะกลายเป็นประจุลบ ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วที่แตกต่างกันจึงเรียกว่าไอออนิก พันธะไอออนิกเป็นพันธะที่แข็งแรง (Strong) แต่เปราะ (Brittle) จุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูง การยึดรวมตัวระหว่างเส้นใยและสีแบบนี้เกิดขึ้นโดยไฟฟ้าต่างศักย์ เส้นใยเมื่ออยู่ในน้ำจะมีปฏิกิริยาไฟฟ้าเป็นลบ ส่วนใหญ่สีซึ่งละลายน้ำจะมีไอออนของสีเป็นลบการดูดซึมจึงไม่อาจเกิดขึ้นได้ ดังนั้นจำเป็นต้องเปลี่ยนไอออนของเส้นใยก่อนที่ไอออนของสีจะเข้ามาใกล้พอที่แรงแวนเดอร์วาลส์จะทำหน้าที่ได้ แต่ถ้าใช้ตัวสีที่มีไอออนเป็นบวกก็ไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนไอออนของเส้นใย ตัวอย่างเช่นสีที่ใช้ย้อมเส้นใยอะคริลิก

4. พันธะโควาเลนต์ เป็นพันธะทางเคมีซึ่งอะตอมสองอะตอมหรือมากกว่าเกาะกันด้วยการใช้อิเล็กตรอนวงนอกสุดร่วมกัน เป็นพันธะที่มีความแข็งแรงกว่าแรงที่กล่าวมาแล้วทั้งสิ้น เช่น สีรีแอทีฟจะยึดกับเส้นใยได้โดยพันธะโควาเลนต์ ซึ่งสามารถยึดได้หนาแน่นและทำให้แยกตัวออกจากกันได้ยาก

2.3.1 การเกิดสีของสีย้อม

สีซึ่งปรากฏออกมาทำให้ตามนุษย์ปกติมองเห็นได้ เกิดจากการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมประเภทหนึ่งภายในโมเลกุลของสีย้อม กลุ่มอะตอมที่กล่าวนี้เรียกว่า “โครโมฟอร์ (Chromophor)” ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 7 กลุ่มแสดงดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 กลุ่มอะตอมที่เรียกว่า “โครโมฟอร์” และโครงสร้างหลัก

กลุ่มอะตอมที่เรียกว่า “โครโมฟอร์”	โครงสร้าง
กลุ่มไนโตรโซ (Nitroso group)	: -NO (หรือ =N-OH)
กลุ่มไนโตร (Nitro group)	: -NO ₂ (หรือ =NO.OH)
กลุ่มอะโซ (Azo group)	: -N=N-
กลุ่มเอทิลีน (Ethylene group)	: >C=O
กลุ่มคาร์บอนิล-ไนโตรเจน (Carbonyl-nitrogen group)	: >C=NH และ -CH=N-
กลุ่มซัลเฟอร์ (Sulphur group)	: >C=S และ $\equiv C-S-S-C\equiv$

กลุ่มอะตอมต่างๆ เหล่านี้จะเป็นตัวเพิ่มสีให้แก่สารประกอบอะโรมาติกโดยการดูดกลืนแถบสีขาวยาวไปบางแถบแสงและปล่อยออกมาบางแถบแสง ทำให้มนุษย์มองเห็นสีข้อมีโทนสีที่แตกต่างกันไป สีข้อมโดยทั่วไปนอกจากจะต้องมีกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์แล้วยังจำเป็นต้องมีกลุ่มอะตอมอีกชนิดหนึ่งได้แก่ กลุ่มอะตอม “ออกโซโครม (Auxochromes)” แสดงดังตารางที่ 2-4 เพื่อให้สีข้อมสามารถทำปฏิกิริยาคัดติดกับเส้นใยได้ โมเลกุลใดที่ปราศจากกลุ่มอะตอมออกโซโครมจะแสดงคุณสมบัติของสีออกมาได้ แต่จะขาดสมบัติในการยึดติดกับเส้นใย โมเลกุลดังกล่าวนี้เรียกว่า “โครมาเจน (Chromagen)” ทั้งกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์ ออกโซโครมและโครมาเจนนี้จะเป็นส่วนสำคัญในการพิจารณาแบ่งกลุ่มของสีข้อมตามสูตรโครงสร้างทางเคมีซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

ตารางที่ 2-4 กลุ่มอะตอมออกโซโครม

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

2.3.2 ประเภทสีข้อม

1. จำแนกตามแหล่งกำเนิดแบ่งสีข้อมออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1.1 สีข้อมธรรมชาติ เป็นสีข้อมที่มาจากแหล่งธรรมชาติโดยเฉพาะพืชและสัตว์ สีข้อมที่มาจากส่วนประกอบพืช เช่น ส่วนลำต้น ส่วนดอก ส่วนที่เป็นเปลือก ส่วนที่เป็นใบ เป็นต้น ตัวอย่างเช่น สีดำจากถั่ว

มะเกลือ สีน้ำเงินจากต้นคราม ส่วนสีย้อมที่มาจากสัตว์ เช่น สีม่วงแดงของครั่ง สีม่วงจากหอยสังข์หนาม เป็นต้น

2.2 สีย้อมสังเคราะห์ เป็นสีย้อมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทางเคมี

2. จำแนกตามลักษณะทางกายภาพออกได้เป็น 2 ชนิด

2.1 สีย้อม (Dyes) สามารถละลายน้ำ

2.2 พิกเมนต์ (Pigments) ไม่สามารถละลายน้ำ อาจใช้ละลายในเรซิน ยึดติดเส้นใยได้โดยเชิงกล มีบางตัวเหมือนกันที่ติดเส้นใยได้โดยเชิงเคมี

3. จำแนกตามวิธีใช้

การจำแนกสีย้อมที่นิยมกันมากที่สุด กลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมได้จำแนกสีย้อมตามวิธีใช้ออกเป็น 10 ประเภท โดยที่สีย้อมแต่ละประเภทจะมีสูตรโครงสร้างทางเคมี สมบัติของสีย้อม ตลอดจนวิธีใช้ที่แตกต่างกันไป ดังแสดงในตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-5 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน

ประเภทสีย้อม	สมบัติทางกายภาพเคมี	พันธะหรือกลไกการติดสี
1. สีย้อมเอซิด	ประจุลบ ละลายน้ำดี สีติดไม่แน่น	พันธะไอออนิก
2. สีย้อมเมทัลคอมเพล็กซ์ เอซิด	ประจุลบ ละลายน้ำน้อย สีติดแน่นดี	พันธะไอออนิก
3. สีย้อมไคเรทท์	ประจุลบ ละลายน้ำได้ดี สีติดไม่แน่น	พันธะไอออนิก
4. สีย้อมเบสิก	ประจุบวก ละลายน้ำได้	พันธะไอออนิก
5. สีย้อมรีแอกทีฟ	ประจุลบ ละลายน้ำได้ดี สีติดแน่น	พันธะโควาเลนต์
6. สีย้อมดิสเพิร์ส	ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยมาก กระจายอยู่ในน้ำเป็นอนุภาคคอลลอยด์ สีติดแน่นดี	คอลลอยด์ของสีย้อมดูดซับ เส้นใย

2.3.3 เคมีของสีย้อม

โครงสร้างของโมเลกุลสีนั้นประกอบด้วย 3 ส่วนคือ

1. พันธะคู่สลับ (Conjugated double bonds) ทั้งโครโมฟอร์และออกโซโครมต่างเชื่อมกับพันธะคู่สลับ ซึ่งเรียกส่วนนี้ว่า โครโมเจน (Chromogen)

2. โครโมฟอร์ เป็นกลุ่มอะตอมของสารประกอบอินทรีย์ที่มีสีในกลุ่มไม่อิ่มตัวยกเว้น $-NR^{3+}$ หน้าที่ของโครโมฟอร์คือเป็นตัวรับอิเล็กตรอนให้สีแก่โมเลกุลของสีย้อม

3. ออกโซโครม (Auxochromes) เป็นกลุ่มข้างเคียงที่เกาะอยู่บนโครโมฟอร์ที่สร้างลักษณะของความเข้มขึ้นสี (Intensity) และปรับปรุงคุณสมบัติในการดูดติดกับเส้นใยให้กับสีย้อม

เมื่อมีหมู่อื่นๆ มาเกาะแทนไฮโดรเจนอะตอมบนออกซิโครม เช่น หมู่อัลคิล (Alkyl group) หมู่เอไมด์ (Amide group) หรือหมู่อัลคอกซี (Alkoxy group) พบว่า จะทำให้สีเข้มขึ้นกว่าเดิมหรือในทางตรงกันข้ามทำให้สีอ่อนลงกว่าเดิม เพราะฉะนั้นสีที่มีโครงสร้างโครโมฟอร์เหมือนกันสามารถดัดแปรให้มีความหลากหลายของเฉดสีได้

2.3.4 ความเป็นพิษของสีย้อมต่อสิ่งแวดล้อม

สีย้อมเป็นสารที่สลายตัวทางชีวภาพได้ยากมีความเป็นพิษต่อปลาค่อนข้างต่ำ ดังนั้น ปัญหาสำคัญของสีย้อมในน้ำทิ้งปัจจุบันจึงไม่ได้อยู่ที่ความเป็นพิษของสีย้อม แต่อยู่ที่สีของน้ำทิ้ง สีย้อมเป็นสารที่มีสีเข้ม แม้จะมีสีอยู่ในแหล่งน้ำเพียงปริมาณเล็กน้อยก็ทำให้มีสีเป็นที่รังเกียจต่อผู้พบเห็นโดยทั่วไปแล้วปริมาณของสีที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำแล้วสังเกตเห็นได้จะอยู่ในช่วง 0.1-1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตาม ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ชนิดสี สภาพแสงและระดับความใสของน้ำ จากการศึกษาพบว่าสีย้อมที่ปล่อยจากโรงงานย้อมสิ่งทอมีความเข้มข้นประมาณ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้โลหะเจือปนที่ปนเปื้อนอยู่ในสีย้อมผ้า ได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว โครเมียมและสังกะสี จะยับยั้งการทำงานของเอนไซม์บางชนิดแทนที่โลหะสำคัญของเอนไซม์ทำให้เอนไซม์ทำงานได้น้อยลงหรือไม่ได้เลย ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่โรงงานจะต้องกำจัดสีจากน้ำทิ้งแม้ว่ามีความเป็นพิษต่ำก็ตาม (ปรานศิริ ศรีสุภพัชร, 2551) โดยทั่วไปสีย้อมเป็นสารที่จัดได้ว่ามีความเป็นพิษต่ำ ไม่พบรายงานว่ามีอัตราการตายหรือเจ็บป่วยของผู้ที่ทำงานในโรงงานฟอกย้อมสูงกว่าบุคคลอาชีพอื่นแต่อย่างใด สีย้อมอาจเข้าสู่ร่างกายของผู้ใช้ได้ 3 ทาง คือ ทางจมูกโดยการสูดดม ทางผิวหนังโดยสัมผัสและทางระบบทางเดินอาหาร โดยปนเข้าไปกับอาหารแต่ก็เป็นที่น่ารำคาญคิดว่าสารวัตถุเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์สีย้อมมีจำนวนไม่น้อยที่มีความเป็นพิษสูงมากและมีหลายตัวที่เป็นสารก่อมะเร็ง

ผลกระทบของสีย้อมต่อสิ่งแวดล้อมหรือสมบัติด้านมลพิษของสีย้อม สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ก่อให้เกิดความไม่สวยงามทางด้านทัศนียภาพ
2. สีย้อมที่เป็นสารอินทรีย์ย่อยสลายได้ ทำให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำลดลง
3. ขัดขวางการเดินทางของแสง ซึ่งจำเป็นต่อการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำ
4. การผลิตออกซิเจนลดลง เนื่องจากผลกระทบจากการขัดขวางการเดินทางของแสง ซึ่งส่งผลต่อพืชน้ำและสัตว์น้ำ
5. ความเป็นพิษของสารที่เป็นองค์ประกอบในสีย้อม บางชนิดเป็นสารก่อมะเร็ง ทั้งหมดข้างต้นจะส่งผลให้สภาวะของแหล่งน้ำไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ

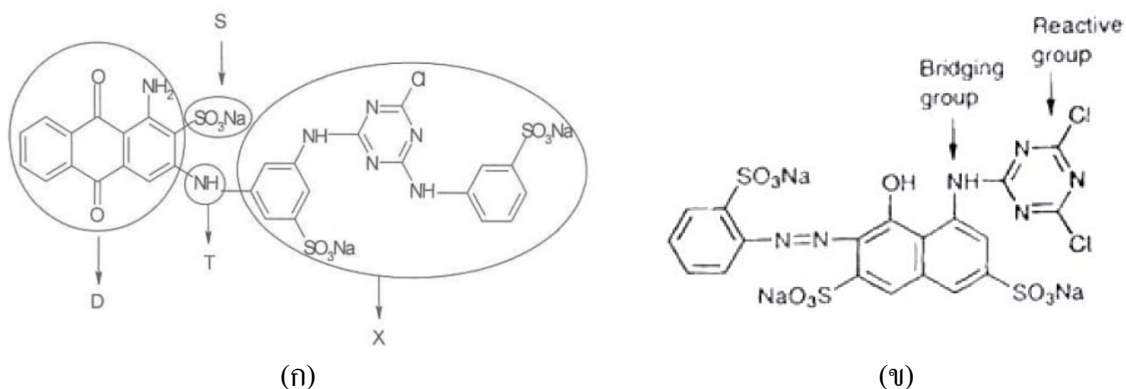
2.4 สีย้อมรีแอกทีฟ (Reactive Dyes) (วรรณวรรณ เทียงวรรณกานต์, 2546)

สีย้อมรีแอกทีฟเป็นสีที่ใช้มากในอุตสาหกรรมฟอกย้อม เป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน ละลายน้ำได้ดี และย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดี โดยจะมีคุณสมบัติเป็นไอออนลบเมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่มีฤทธิ์เป็นด่าง ในขณะที่ย้อมโมเลกุลของสีจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซี (OH^-) ของเส้นใยเซลลูโลสแล้วเชื่อมโยงติดกัน

โดยพันธะโควาเลนต์แบบครอสลิงค์ (Cross link) กับเซลลูโลสได้สารประกอบชนิดใหม่ ทำให้ได้สีที่มีความทนทานต่อการซักฟอก

โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมรีแอกทีฟประกอบด้วย 4 กลุ่ม และสามารถเขียนได้เป็นสัญลักษณ์ของโครงสร้างอย่างง่าย คือ S-D-T-X เมื่อ D = Chromophoric group เป็นกลุ่มที่ทำให้เกิดสี (Chromophore) และสร้างการยึดเกาะ (Substantivity) กับเส้นใยเซลลูโลส X = Reactive system เป็นกลุ่มที่ทำให้สีย้อมเกิดปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซี (OH) ของเส้นใย T = Bridging group เป็นกลุ่มที่ทำหน้าที่เชื่อมระหว่าง Reactive system กับ Chromophore ยกตัวอย่างเช่น หมู่ $-NH$, $-NHCO$, $-SO_2$, $-NHSO_3$ และ $-NCH_3$ เป็นต้น S = Solubilising group คือ กลุ่มที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูงและเป็นกลุ่มที่ติดอยู่กับโครโมฟอร์ (Chromophoric group) โดยทั่วไปเป็นพวกกรดซัลโฟนิค ($-SO_3Na$) ซึ่งอาจมีกลุ่มเดียวหรือมากกว่า 1 กลุ่ม

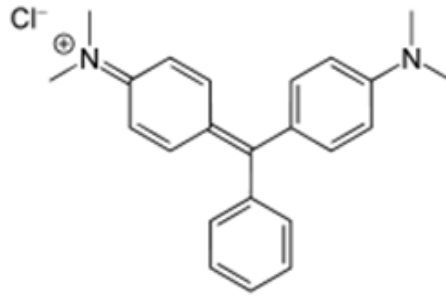
ในบางกรณีกลุ่มรีแอกทีฟอาจต่ออยู่กับโครโมฟอร์โดยตรง โดยที่ไม่มี Bridging group ก็ได้และกลุ่มรีแอกทีฟส่วนใหญ่จะเป็นสาร Heterocyclic ring ซึ่งมีอิทธิพลอย่างมากต่อความสามารถในการทำปฏิกิริยาและคุณสมบัติอื่นๆ ของสี จากส่วนประกอบที่กล่าวมานี้ พบว่ามีสองส่วนที่สำคัญ คือ สารที่ทำให้เกิดสีและกลุ่มรีแอกทีฟซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้สารแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ตัวอย่างสีย้อมรีแอกทีฟแสดงดังรูปที่ 2-2 และรูปที่ 2-3.



รูปที่ 2-2 โครงสร้างสีย้อม Reactive Blue 5 (ก) โครงสร้างสีย้อม Reactive red 1 (ข)

2.5 สีย้อมเบสิก (Basic or Cationic dyes)

สีย้อมชนิดนี้เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (Organic base) ให้ประจุบวกละลายน้ำได้ โครงสร้างส่วนใหญ่ของสีย้อมเบสิกจะมีสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็นพวกกลุ่มของสารประกอบไตรเอริลมีเทน (Triaryl methane) หรือแซนทีนส์ (Xanthenes) นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอน และ โยอะคริลิกได้ดี ในขณะที่ย้อมโมเลกุลของสีส่วนที่มีประจุลบจะยึดจับกับโมเลกุลของเส้นใยเป็นสีที่ติดทน ไม่ควรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติเพราะจะไม่ทนการซักและแสง ตัวอย่างสีย้อมเบสิกแสดงดังรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3 โครงสร้างสีย้อม Malachite green

2.6 การวัดสีในน้ำเสีย (ปรางศิริ ศรีสุภพัชร, 2551)

1. วิธีเปรียบเทียบกับแพลทินัมโคบอลต์มาตรฐาน (Platinum cobalt standard) วิธีนี้กำหนดโดย American Public Health Association (APHA) โดยแพลทินัมโคบอลต์มาตรฐาน จะเป็นการเตรียมสารละลายมาตรฐานสีเหลืองๆ คล้ายน้ำตามแหล่งน้ำธรรมชาติทำให้การใช้งานจำกัดเฉพาะในเรื่องเกี่ยวกับแหล่งน้ำธรรมชาติ สำหรับเครื่องมือที่ใช้ในหลักการนี้คือ หลอดเปรียบเทียบสีมาตรฐาน (Standard color comparison tubes) หรือที่เรียกว่า หลอดเนสเตอร์ ซึ่งเป็นเครื่องมือมาตรฐานในการวัดสีมานานแล้ว ข้อดีคือ ราคาถูก แต่มีข้อเสียคือ จะต้องมีการเตรียมมาตรฐานใหม่ทุกครั้งที่มีการใช้งานทุกครั้ง

2. วิธีวัดด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) เป็นการวัดสีโดยการหาความยาวคลื่น (Wavelength) ที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงมากที่สุด (Absorption maxima) แล้วใช้ความยาวคลื่นนี้ในการวัดค่าสีของน้ำตัวอย่าง ในรูปการวัดการดูดกลืนแสง (Absorbance) โดยมีหลักการที่ว่า สีเข้มจะดูดกลืนแสงมาก หรืออัตราการทะลุผ่าน ของแสงน้อย สำหรับการอ่านค่าความเข้มข้นของสีอ่านได้จากกราฟมาตรฐาน ที่ทำขึ้นมา

2.7 เทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดสีในน้ำเสีย

สิ่งเจือปนในน้ำทิ้งเนื่องจากการย้อมผ้าในโรงงานฟอกย้อมส่วนใหญ่จะเป็นสีย้อมและสารเคมีซึ่งเป็นส่วนที่เหลือตกค้างอยู่ในน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตและจะถูกปล่อยลงแหล่งน้ำทิ้ง แม้จะมีการได้เอียงกันว่าสีย้อมไม่ควรถูกจัดให้เป็นสารก่อมลภาวะในน้ำ แต่เนื่องจากทำให้เกิดความรู้สึกน่ารังเกียจต่อคนทั่วไป ตามความในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม กำหนดให้สีในน้ำทิ้งไม่เป็นที่น่ารังเกียจ ดังนั้น น้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมก่อนปล่อยออกจากโรงงาน ต้องผ่านระบบบำบัดน้ำเสีย เพื่อทำการกำจัดสารต่างๆ รวมทั้งสีที่ตกค้างก่อน

2.7.1 วิธีการบำบัดสีย้อมในน้ำเสีย

1. การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical coagulation) เป็นกระบวนการกำจัดสีที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยมักใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรด ด่าง สามารถใช้เป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้น ก่อนกระบวนการบำบัดทางชีววิทยา สารตกตะกอนที่นิยมใช้ คือ ปูนขาว และสารส้ม ซึ่งจะทำให้เกิดตะกอนของ

สีจมตัวลงในน้ำทิ้ง จากนั้นทำให้น้ำทิ้งเป็นกลางก่อนปล่อยลงท่อน้ำทิ้ง เทคนิคนี้สามารถกำจัดสีออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากน้ำทิ้งจะมีลักษณะแตกต่างไปตามชนิดของโมเลกุลสีย้อม ถ้าสีย้อมมีโมเลกุลเล็ก เช่น สีประเภทสีแอซิด สีรีแอคทีฟ การเกิดตะกอนของสีโดยใช้สารส้มจะไม่สามารถทำได้

2. กระบวนการบำบัดทางชีววิทยา (Biological treatment) กระบวนการนี้อาศัยจุลินทรีย์ในการลดสี โดยจุลินทรีย์ที่เติบโตขึ้นมาใหม่ จะมีการดูดซับสีไปด้วย โดยแบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ ระบบตะกอนเร่ง (Activated sludge) และระบบที่ 2 คือระบบบ่อเติมอากาศ (Aerated lagoon)

3. การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นกระบวนการที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย สามารถใช้กำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่มีข้อจำกัดที่น้ำหนักโมเลกุลของของเสียที่จะถูกดูดซับ ต้องมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 400 ดังนั้น ก่อนการกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับบนถ่านกัมมันต์ จะต้องมีการปรับขนาดโมเลกุลของของเสียให้เหมาะสมก่อน โดยการไฮโดรไลซิสด้วยปูนขาว ประสิทธิภาพการดูดซับสีจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์

4. การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน (Ozone treatment) โดยทั่วไปโมเลกุลสีย้อมจะมีหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นสารประกอบอินทรีย์เป็นพวกวงแหวน กับพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยว ดังนั้นการที่จะทำลายโมเลกุลของสีต้องทำลายหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยวก่อน กระบวนการกำจัดสีโดยใช้โอโซน เป็นการออกซิไดซ์พันธะคู่ที่เป็นพันธะเคมีของหมู่โครโมฟอร์ของโมเลกุลด้วยโอโซน แต่เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมากจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบในน้ำทิ้งอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโมเลกุลของสีย้อม ซึ่งส่วนใหญ่มักประกอบด้วยไนโตรเจนคลอรีนหรือซัลเฟอร์ เกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารเริ่มต้นเดิม

5. เทคโนโลยีเยื่อแผ่น (Membrane technology) กระบวนการกำจัดสีด้วยเยื่อแผ่น (Membrane) สามารถใช้ในการกำจัดสี นำเอาสารเคมีที่ใช้ในการย้อมสี และสีย้อมบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ได้ แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration) ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse osmosis) และไดนามิก เมมเบรน (Dynamic membrane)

2.7.2 การตรวจเอกสารเกี่ยวกับการกำจัดสีย้อมในน้ำเสีย

Jiasheng *et al.*, 1999 ศึกษาการกำจัดสีย้อม 5 ชนิด ได้แก่ Acid Orange II, Acid Orange IV, Acid Orange GG, Acid Orange 3B และ Acid Orange I โดยการใช้ Fe^0 ซึ่งได้จาก ผงเหล็ก จากผลการศึกษาพบว่า ความเป็นกรดของสารละลายและพื้นที่ผิวของผงเหล็กมีผลต่อการกำจัดสีย้อม เมื่อความเป็นกรดของสารละลายเพิ่มจาก pH 5 เป็น pH 9 และพื้นที่ผิวของผงเหล็กเพิ่มขึ้นจาก 0.178 เป็น 0.058 มิลลิกรัมโมลต่อลิตรน้ำเสีย ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมจะเพิ่มขึ้น

Muruganandham and Swaminathan, 2000 ศึกษาการใช้ Photooxidation ในการกำจัดสีย้อม Reactive Orange 4 โดยการใช้ $H_2O_2/UV-A$ ซึ่งทำการศึกษาผลของ พีเอช ปริมาณของ H_2O_2 และกำลังของแสง UV พารามิเตอร์ดังกล่าวนี้จะส่งผลต่อการกำจัดสีย้อมอย่างมาก จากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดจะลดลง อัตราการกำจัดสีย้อมเป็นแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม

(Pseudo first order reaction) เมื่อเปรียบเทียบการกำจัดสีแบบ Solar- H_2O_2 กับ UV- H_2O_2 พบว่าสิ่งที่มีผลต่อการกำจัดสีคือ สารเคมี เช่น NaOH, NaCl และ Na_2SO_3 ซึ่งสารเคมีเหล่านี้จะไปยับยั้งในการกำจัดสี

วรรณวิภา ผลาหาญ (2547) ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอกทีฟที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ผงเหล็ก โดยใช้การทดลองแบบเบทซ์และคอลัมน์ การทดลองนี้ใช้สีรีแอกทีฟ 5 ชนิดคือ Reactive Blue 5, Reactive Blue, Reactive Black, Reactive Red และ Reactive Yellow ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสี จากผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีคือ พีเอช 3 ในการสัมผัส 30 นาที ความเร็วรอบในการเขย่า 150 รอบต่อนาที ขนาดของเศษผงเหล็ก 12-100 เมช ความเข้มข้นสี 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณของเศษผงเหล็ก 20 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดสี Reactive Blue 5, Reactive Blue, Reactive Black, Reactive Red และ Reactive Yellow คือ 99.61, 98.61, 97.04, 99.00, 98.82 และ 94.89% ตามลำดับ

วรรณวรรณ เทียงวรรณกานต์ (2546) ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียสีรีแอกทีฟ โดยใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการตกตะกอนทางเคมีเพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าในการกำจัดสีในน้ำเสียสีแดง CI Reactive Red 180 ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า สภาวะที่เหมาะสม คือ ใช้ขั้วเหล็กขนาด 3×6.5 เซนติเมตรขึ้นไปใช้ความต่างศักย์ที่ 30 โวลต์ โดยใช้เวลา 1.5 ชั่วโมง การปรับค่าการนำไฟฟ้า แต่ถ้ามีการปรับค่าการนำไฟฟ้าเป็น 7.2 ms/cm ใช้ความต่างศักย์ที่ 6.4 โวลต์ และใช้เวลาเหลือเพียง 30 นาที และพบว่าวิธีการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวก็สามารถกำจัดสีได้มีประสิทธิภาพเป็นอย่างดีไม่จำเป็นต้องใช้กระบวนการตกตะกอนทางเคมีร่วม โดยสามารถกำจัดสีได้สูงถึง 96%

บุษรา ประทุมญาติ (2545) ได้ทำการศึกษาการใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (Sodium Borohydride: NaBH_4) ในรูปของสารละลายที่เป็นด่างในการกำจัดสี จากผลการทดลองใช้ NaBH_4 ความเข้มข้น 1.2% ใน 4% ของ NaOH เพื่อกำจัดสีรีแอกทีฟที่มีหมู่อะโซ 3 ชนิด ได้แก่ Reactive Black 5, Reactive Red 180 และ Reactive Blue 171 น้ำเสียที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 50, 70, 90, 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยสภาวะที่ทำการศึกษา ได้แก่ พีเอช ระยะเวลาทวนเร็ว และปริมาณของ NaBH_4 เป็น 1, 3, 5 และ 7 เท่าของค่า Stoichiometric จากผลการศึกษาพบว่า ระยะเวลาทวนเร็วสำหรับสี Reactive Black 5, Reactive Red 180 และ Reactive Blue 171 เป็น 30, 10 และ 25 นาที ตามลำดับ พีเอชที่เหมาะสมในการบำบัด คือ พีเอช 10 และปริมาณ NaBH_4 เป็น 7 เท่าของ Stoichiometric โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสี Reactive Black 5, Reactive Red 180 และ Reactive Blue 171 ที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเท่ากับ 94.08, 93.85 และ 99.03% ตามลำดับ

ปวีณา ณะสังข์ (2539) ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสีจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอโดยวิธีออกซิเดชันและวิธีรีดักชัน สารออกซิไดซ์ที่ทำการศึกษาคือ เพนตอนรีเอเจนต์ และสารรีดิวซ์ที่ทำการศึกษาคือ โซเดียมไฮโดรซัลไฟท์ ศึกษาผลของพีเอชและปริมาณสารต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำเสียสังเคราะห์ หาสภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีจาร์เจสท์ ซึ่งน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ทดลองแบ่งตามประเภท

ของสีย้อมออกเป็น 4 ประเภท คือ ไคเรคทีรีแอคทีฟ แอซิด และเบสิก พบว่าผลของ พีเอช ปริมาณสาร และ เวลาในการเกิดปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพในการลดสี และ COD ของน้ำ ที่จริงจากโรงงานฟอกย้อม พีเอชที่เหมาะสมสำหรับสีไคเรคทีและสีแอซิด คือ 4.0 สำหรับน้ำสีไคเรคทีรีแอคทีฟ แอซิด และเบสิก มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีเท่ากับ 99.5%, 98.4%, 96.0% และ 99.2% ตามลำดับ

2.8 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออน

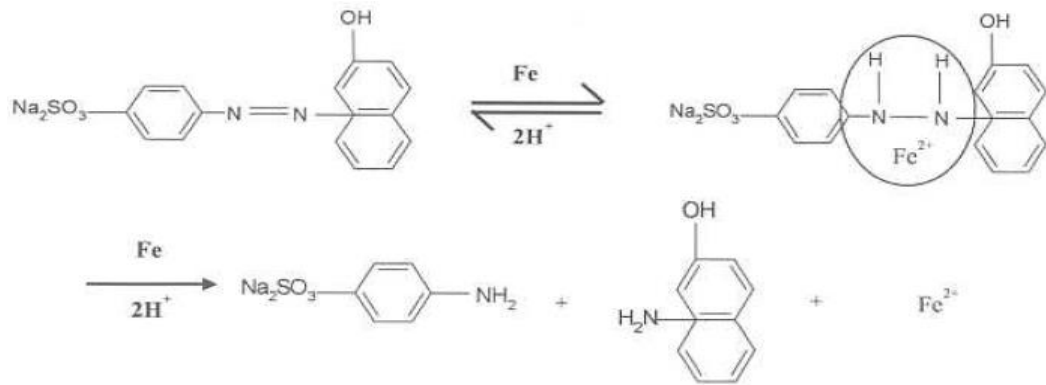
ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) คือ สารที่ช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยไม่สูญหายไปในช่วงการเกิดปฏิกิริยาและจะได้กลับคืนมาเมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดลง ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยามี 2 ประเภท

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (Homogeneous catalysis) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีวัฏภาค (Phase) เหมือนกับสารที่เข้าทำปฏิกิริยา เช่น ปฏิกิริยาในวัฏภาคของแก๊ส ตัวเร่งปฏิกิริยาก็ต้องอยู่ในวัฏภาคของแก๊ส ด้วย

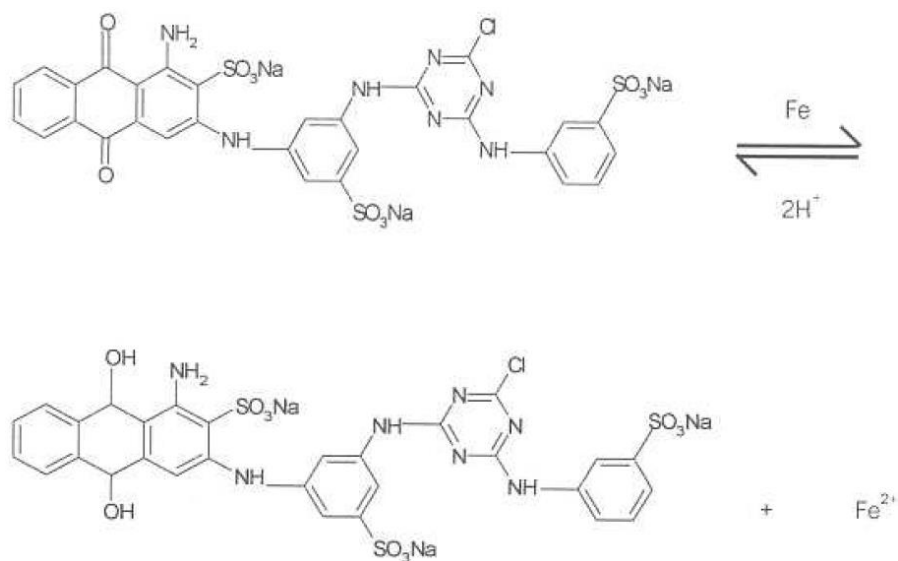
2. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalysis) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีวัฏภาคแตกต่างกับสารที่เข้าทำปฏิกิริยา โดยทั่วไปตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทนี้มักเป็นของแข็งโดยที่ปฏิกิริยาจะเกิดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดพื้นฟูสภาพได้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาประเภท Heterogeneous Catalysis ที่ถูกสังเคราะห์ขึ้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออน สามารถสังเคราะห์ได้ด้วยวิธีการโซลเจลเคลือบที่พื้นผิวของตัวกลางเซรามิก คุณสมบัติของ Fe^{3+} ที่เคลือบบนผิวของเซรามิกจะทำปฏิกิริยากับหมู่โครโมฟอร์ของโครงสร้างสีย้อมโดยเข้าไปทำลายพันธะโครโมฟอร์ ทำให้สีถูกกำจัด ซึ่งโครงสร้างของสีย้อมจะมี Azo chromophore ($\text{N}=\text{N}$) ทำให้เกิดสี เหล็ก Fe^0 ซึ่งเป็นตัวรีดิวซ์ที่ดีในสารละลายที่เป็นกรด ตัวอย่างเช่นปฏิกิริยาการกำจัดสีย้อม Acid Orange 2 โดยใช้ Fe^0 จะเกิดปฏิกิริยาดังแสดงในสมการที่ (2-1) และดังแสดงในรูปที่ 2-4 ได้เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) เฟอร์รัสไอออนจะเข้าไปทำลายพันธะคู่ทำให้สีถูกกำจัด นอกจากนี้ผลการบำบัดสีด้วยผงเหล็กในงานวิจัยของ วรณวิภา, 2547 จะเห็นว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังการบำบัดมีหมู่ OH เข้าแทนที่หมู่โครโมฟอร์ในโครงสร้างสีย้อม Reactive blue ทำให้โครงสร้างสีย้อมมีความเป็นเบสเพิ่มมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 2-5





รูปที่ 2-4 ปฏิกริยาการกำจัดสีของ Acid Orange 2 โดยใช้ Fe^0



รูปที่ 2-5 ปฏิกริยาการกำจัดสีของ Reactive blue โดยใช้ผงเหล็ก

(วรรณวิภา พลาหาญ, 2547)

นอกจากปฏิกิริยาข้างต้นดังที่กล่าวมาการกำจัดสีของสารสามารถทำได้ด้วยปฏิกิริยาฟenton โดยการผสมกันระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และเหล็ก (Fe^{2+} , Fe^{3+}) โดยเหล็กทำหน้าที่เป็นคะตะลิสต์เกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดไฮดรอกซิลแรดดิคัล (Hydroxyl radical; $\text{OH}\cdot$) ซึ่งมีค่าศักย์ออกซิเดชัน (Oxidation potential) สูงโดยสูงกว่าโอโซน 25% และสูงกว่าคลอรีนถึง 200% โดยมีค่ารองจากอนุมูลฟลูรีน (Flurine radical) เท่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 2.6

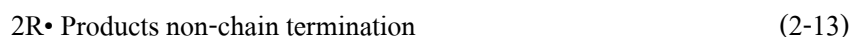
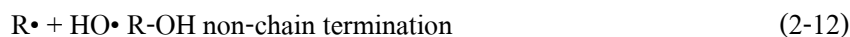
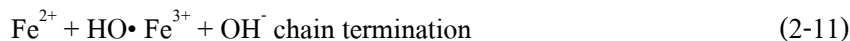
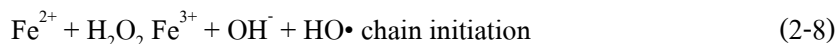
ตารางที่ 2-6 แสดงลำดับศักย์ออกซิเดชัน

Oxidant		Potential (Volts)
$F_2 + 2e^-$	$\longrightarrow$	$2F^-$ 2.87
$HO\bullet + H^+ + e^-$	$\longrightarrow$	H_2O 2.33
$MnO_4^- + 4H^+ + 3e^-$	$\longrightarrow$	$MnO_2 + 2H_2O$ 1.68
$O_3 + 2H^+ + 2e^-$	$\longrightarrow$	$O_2 + H_2O$ 2.07
$H_2O_2 + 2H^+ + 2e^-$	$\longrightarrow$	$2H_2O$ 1.77
$Cl_2 + 2e^-$	$\longrightarrow$	$2Cl^-$ 1.39
$ClO_2 (g) + e^-$	$\longrightarrow$	ClO_2^- 0.95
$ClO_2^- + 2 H_2O + 2e^-$	$\longrightarrow$	$Cl^- + 2OH^-$ 0.90

ความสามารถในการออกซิไดซ์ที่สูงของอนุมูลไฮดรอกซิลที่ได้จากสารละลายเฟนตัน ทำให้มีการนำสารละลายเฟนตันไปใช้กันอย่างกว้างขวางในด้านการบำบัดของเสียที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งทางด้านน้ำ ดิน อากาศ และของเสียอันตราย โดยการศึกษาของสารละลายเฟนตันใช้สมการของ Pure system คือ แสดงเฉพาะปฏิกิริยาที่จะเกิดสำหรับสารละลายเฟนตันเท่านั้น ซึ่งได้มีการพิสูจน์ และได้รับการยอมรับ (Flaherty, 1992)



โดยสมการทั้งหมดจะไม่ได้เกิดขึ้นทุกสมการ แต่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของเหล็ก (Fe^{2+}) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) โดยถ้ามีปริมาณเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) มากเกินไป การเกิดปฏิกิริยาจะเป็นไปตามสมการที่ (2-2) และ (2-3) หากมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) มากเกินไปในสถานะที่เป็นกรด การเกิดปฏิกิริยาตามสมการ (2-6) และ (2-7) จะไม่เกิดขึ้น แต่จะเกิดปฏิกิริยาตามสมการ (2-2), (2-4) และ (2-5) แทน โดยปฏิกิริยาของสารละลายเฟนตันกับสารอินทรีย์นั้น สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งด้วยกลไกแบบลูกโซ่ (Chain) หรือไม่ใช่ลูกโซ่ (Non-chain) ซึ่งกลไกเหล่านี้ได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวาง (Flaherty, 1992) แสดงดังสมการต่อไปนี้

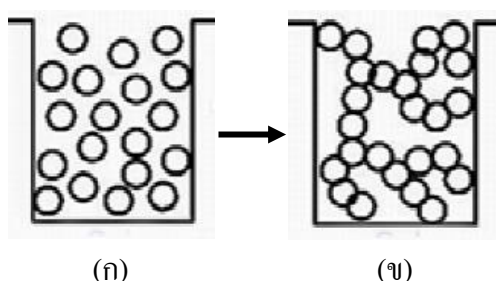


นอกจากนั้น Flaherty (1992) ยังได้อ้างคำกล่าวของ Walling (1975) ที่ได้มีการคาดการณ์ว่าอนุมูลของสารอินทรีย์ (Organic radical) 3 รูปแบบที่เกิดขึ้น จะสามารถปรีดิษฐ์ Fe^{3+} ให้กลับมาเป็น Fe^{2+} ได้อีก และทำให้เกิดปฏิกิริยาถูกโซ่ยาวออกไปอีก จึงทำให้เกิดปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ได้อย่างสมบูรณ์ยิ่งขึ้น โดยปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาของสารละลายเฟนตัน ได้แก่ พีเอช อุณหภูมิ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา อัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเหล็ก ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเหล็ก แม้ว่าปฏิกิริยาเฟนตันจะสามารถใช้ประโยชน์ได้แต่ยังมีจุดด้อย เนื่องจากไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ทำให้เกิดการสิ้นเปลือง มีต้นทุนสูง

2.8.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวกลางของแข็ง

1. กระบวนการโซล-เจล (Sol-gel technology)

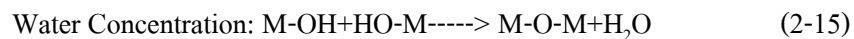
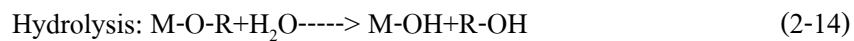
กระบวนการโซล-เจล (Sol-gel process) เป็นวิธีการที่ใช้เตรียมสารละลายในการเคลือบวัสดุจำพวกเซรามิกและแก้ว กระบวนการโซล-เจล เกิดจากการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกันระหว่างสารประกอบตั้งต้น (Precursor) กับตัวทำละลายที่เหมาะสม ซึ่งส่วนใหญ่มักเป็นแอลกอฮอล์ เกิดเป็นสารแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคเล็กๆ ในของเหลวที่เรียกว่า “โซล” เมื่อโซลเกาะตัวกันเป็นร่างแหอย่างไม่เป็นระเบียบจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของของเหลวเป็นสารที่เรียกว่า “เจล” ที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.1-1 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 2-6



รูปที่ 2-6 การเปลี่ยนแปลงจากสารละลายโซล (ก) เป็นสารละลายเจล (ข)

ที่มา <http://phys.suwon.ac.kr>

ปฏิกิริยาที่สำคัญในกระบวนการโซล-เจลมี 3 ปฏิกิริยา คือ Hydrolysis, Water Condensation และ Alcohol condensation ดังสมการที่ (2-14) ถึงสมการที่ (2-16) เมื่อ M แทน โลหะ ได้แก่ Si, Zr, Ti, Al, Sn, Ce และ OR แทน Alkoxy group โดยปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ พีเอช ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโมลของตัวทำละลายและโลหะ และอุณหภูมิ ดังนั้นการควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ในสภาวะที่ต่างกันจะทำให้โซลและเจลที่ได้มีสมบัติและโครงสร้างต่างกัน



โดยกระบวนการโซลเจลประกอบไปด้วยหลายขั้นตอนดังนี้

1) การเตรียมสารละลายตั้งต้นในตัวทำละลายที่เหมาะสม ซึ่งส่วนใหญ่มักเป็นแอลกอฮอล์ จากนั้นจะปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ตามด้วยปฏิกิริยาการรวมตัว ปฏิกิริยาการรวมตัวจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดเป็นสารที่มีโมเลกุลใหญ่ขึ้นกลายเป็นโซล ทั้งนี้ความเข้มข้นของสารประกอบตั้งต้นมีผลต่อความหนืดของโซล

2) จากสารละลายที่เรียกว่า โซล เกิดการเจลเลชัน (Gelation) ซึ่งเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหลวเป็นเจลที่มีความหนืด (Viscosity) เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดโครงตาข่าย โดยปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ พีเอช ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อโลหะ และอุณหภูมิ

3) การเคลือบ (Coat) เมื่อได้สารละลายที่เรียกว่า โซล ก็ทำการเคลือบโซลลงบนตัวกลางเซรามิกโดยการจุ่มชิ้นเซรามิกลงไป หลังจากนั้นนำมาอบให้แห้ง

4) การเผา (Calcined) หลังจากผ่านกระบวนการโซลเจล สารละลายของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เรียกว่าโซล (Sol) จะเคลือบอยู่บนตัวกลาง แล้วจึงนำไปเผาในบรรยากาศที่อุณหภูมิที่กำหนดเพื่อให้สารละลายและสารเคมีอื่นๆสลายไปเหลือเพียง โลหะบริสุทธิ์ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดปฏิกิริยาคาร์โบเทอร์มอลรีดักชันขึ้น ทำให้ได้ผลของปฏิกิริยาเป็นของแข็ง

โดยทั่วไปนั้นมีการนำเทคโนโลยีโซลเจล มาใช้ประโยชน์สามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น พงลະເຍີຍດ, ฟิล์มบาง, เส้นใย และวัสดุก๊อจ ซึ่งเป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ ต่อไป เช่น แก้วซีก, ภาชนะเคลือบป้องกันสารสีกร่อน, การสะท้อนแสง และการเกาะติดผิวของน้ำเป็นต้น เทคโนโลยีโซลเจลจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการผลิตสารหรือวัสดุที่มีสมบัติเฉพาะตัวหรือต้องการความบริสุทธิ์สูง หรือแม้แต่การผลิตสารหรือวัสดุทดแทนการใช้แร่หรือทรัพยากรธรรมชาติหายากและมีอยู่จำกัดเป็นวัตถุดิบ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการโซล-เจลจะมีความบริสุทธิ์สูง เนื่องจากการเตรียมสารหรือวัสดุในระดับโมเลกุลทำให้สามารถกำหนดสมบัติต่างๆ ที่ต้องการได้ง่ายนับเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมสารเคมี, เทคโนโลยีพลังงาน, อุตสาหกรรมเซรามิก เป็นต้น ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการโซลเจล เป็นวิธีการที่ง่ายสามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิห้องได้สารที่มีความบริสุทธิ์และ

เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) มากกว่าวิธี Conventional process ซึ่งใช้อุณหภูมิสูงกว่า สามารถเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาบนชิ้นเซรามิกโดยการจุ่มชิ้นลงไปในส่วนละลาย และสามารถกำหนดความหนาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เคลือบบนชิ้นเซรามิกได้จากจำนวนครั้งการจุ่ม ที่สำคัญวิธีการโซลเจล เป็นวิธีประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

2.8.2 การตรวจเอกสารเกี่ยวกับกระบวนการโซลเจล

Rakmak *et al.*, 2010 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้องเริ่มจากสารละลาย A โดยการละลาย 0.1 M ของ $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ในเอทานอล 80 มิลลิลิตร สารละลาย B ละลาย 0.1 M ของ $(\text{COOH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ในเอทานอล 80 มิลลิลิตร และสารละลาย C ละลายของ 0.1 M $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในเอทานอล 80 มิลลิลิตร กวนเป็นเวลา 10 นาที โดยใส่สารละลาย B ผสมในสารละลาย A กวนเป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นผสมสารละลาย C ลงไป และกวนอีก 10 นาที ได้สารละลายที่เป็นโซลเจล นำชิ้นเซรามิกจุ่มลงในสารละลาย อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เผาที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้ชิ้นเซรามิกที่มีการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Fe (III)

Kumar and Kumar, 2008 เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์แมกนีเซียมออกไซด์อนุภาคนาโนโดยแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) อนุภาคนาโนขนาดสามารถสังเคราะห์ได้โดยใช้แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และกรดออกซาลิก $(\text{COOH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ เป็นสารตั้งต้น โดยใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย ได้สารที่เป็นโซล นำมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้อยู่ในฟอร์มของแมกนีเซียมออกซาลาเตไฮดรต ($\alpha\text{-MgC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และทำการเผาที่อุณหภูมิ 500, 600, 800 และ 1000°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้ได้ผง MgO มีอนุภาคนาโน (ค่าเฉลี่ยของผลึกขนาด 6.5-73.5 nm) ผง MgO ที่ได้มีโครงสร้างแบบ f.c.c. การดูดซึมรังสีอินฟราเรดของ MgO จะสูงเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ นอกจากนี้ระดับพลังงานภายใน MgO อยู่ที่ (7.8 eV) น่าสนใจสำหรับการประยุกต์ใช้ในการแสดงผลพลาสมาสำหรับการปล่อยอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้น

Huang *et al.*, 2003 เป็นการศึกษาการใช้กระบวนการโซล-เจล ในการผลิตของ $\alpha\text{-Fe-Al}_2\text{O}_3$ อนุภาคนาโนบริสุทธิ์จากสารตั้งต้น อลูมิเนียมไอโซโพรพอกไซด์ และเฟอริกไนเตรด อธิบายและวิเคราะห์ ปฏิกิริยาการย่อย การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ และการรีดิวซ์ของไฮโดรเจนในบรรยากาศ มีการควบคุม pH และอุณหภูมิเพื่อให้ได้เจล และไม่มีการตกตะกอน มีการทดสอบคุณสมบัติโครงสร้างของ $\alpha\text{-Fe-Al}_2\text{O}_3$ โดยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) และ Transmission Electron Microscopy (TEM) FeAl_2O_4 พบว่า สามารถเห็นได้ในระหว่างการอบในบรรยากาศออกซิไดซ์ที่ 300°C องค์ประกอบ $\alpha\text{-Fe-Al}_2\text{O}_3$ มีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน

Ikeda *et al.*, 2001 สังเคราะห์ $\text{Pt/Al}_2\text{O}_3$ ด้วยวิธีการต่างๆ กัน คือ Micro-Emulsion, Sol-gel และ Impregnation เพื่อปรับปรุงสมบัติของความต้านทานในการเกิด Sintering ของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการจุ่มด้วย Pt พบว่าเมื่อให้ความดันแก่ตัวเร่งปฏิกิริยา 156 MPa ภายใต้อัตราการไหลที่อุณหภูมิ 700°C เป็นเวลานาน 12

ข้าวโม่ง Pt/Al₂O₃ ที่เตรียมโดยวิธี Impregnation และเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมข้างต้นไปเร่งปฏิกิริยา NO-CO พบว่า Pt/Al₂O₃ ที่เตรียมโดยวิธี Micro-Emulsion มีค่า Catalytic activity สูงกว่าเช่นกัน

Wang *et al.*, 2000 สังเคราะห์ Co/Al₂O₃ ด้วยวิธี Impregnation และ Sol-gel โดยศึกษาสมบัติทางเคมีและคุณภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ โดยเทคนิค XRD, FTIR, DRIFT, N₂-BET, XPS และ TPR พบว่าที่อัตราส่วนโดยอะตอมของ Al/Co มีค่าสูงๆ แล้วจะพบพันธะ (=Al-O-H) เป็นจำนวนมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยานี้มีความเป็นเบสสูง จากการศึกษาการดูดซับของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) บน Co/Al₂O₃ พบว่า สามารถดูดซับได้บนตำแหน่งที่เป็นประจุบวก (Cationic sites) และ Metallic sites และเมื่อนำไปใช้ในปฏิกิริยา Ethanol stream reforming ปรากฏว่ามีค่า Selectivity ต่อแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 67%

West *et al.*, 2001 ศึกษาของการจุ่มโลหะ 3% ลงบน γ -Al₂O₃ โดยโลหะที่ใช้จุ่มมีดังนี้คือ Na, Fe, Co, Cu และ Zn พบว่า ภายหลังจากจุ่มนั้นค่าพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าลดลงในขณะที่ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 2 nm และจาก XRD แสดงให้เห็นว่าผลของการจุ่มด้วยโลหะนี้ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง Al₂O₃ จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่จุ่มแล้วนี้ไปใช้เร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของ Carbonyl sulphide โดยเปรียบเทียบตั้งแต่เริ่มปฏิกิริยาจนกระทั่งปฏิกิริยาดำเนินไป 5 ชั่วโมง พบว่า Specific activity ของ Zn/Al₂O₃ และ Ni/Al₂O₃ มีค่าคงเดิม ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่จุ่มประกอบด้วย Na, Fe, Co และ Cu มีค่า Specific Activity ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป

2.8.3 วัสดุตัวกลาง

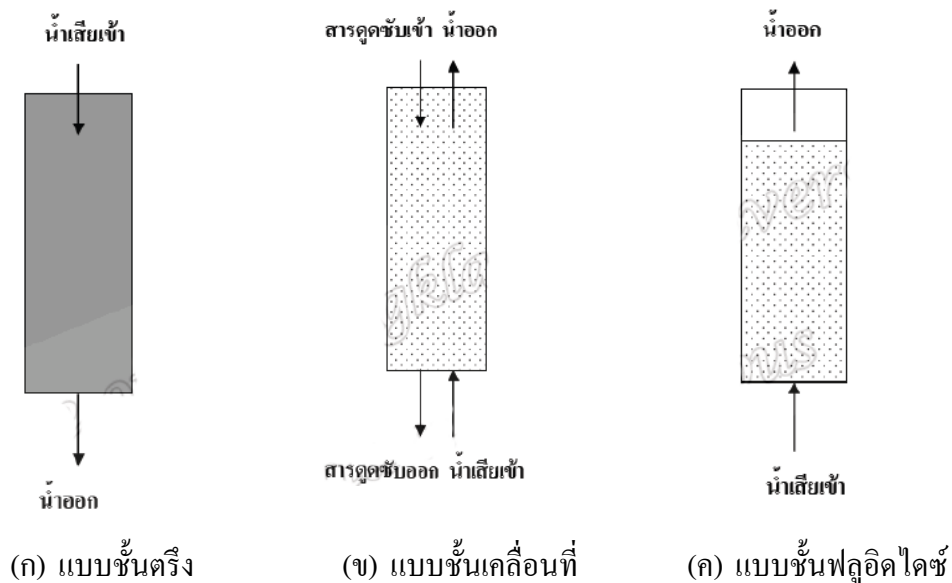
วัสดุทุกประเภทไม่ว่าจะเป็นวัสดุที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ วัสดุที่ได้จากการแปรรูป วัสดุธรรมชาติหรือวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้น จะมีสมบัติที่แตกต่างกันออกไป แม้กระทั่งวัสดุประเภทเดียวกันยังมีสมบัติต่างกัน เช่น ไม่มีหลายชนิด โลหะมีหลายประเภท มีเหล็กหลายจำพวกและเซรามิกซึ่งมีชนิดและสมบัติที่แตกต่างกัน สมบัติต่างๆ ของวัสดุเป็นสิ่งที่ผู้ใช้งานจำเป็นต้องศึกษาเพื่อให้สามารถจำแนกลักษณะเฉพาะ สามารถเลือกวัสดุที่มีสมบัติเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ การผลิตและการใช้งาน โดยสมบัติของวัสดุแบ่งเป็นหลายประเภท หลายลักษณะ รวมทั้งมีหลักการพื้นฐานที่จำเป็นต้องศึกษาก่อนการทดสอบ เพื่อให้เกิดทั้งความถูกต้องและแม่นยำมากที่สุดโดยตัวกลางหรือวัสดุตัวกลางที่นำมาใช้สำหรับการเคลือบสารละลายหรือตัวเร่งปฏิกิริยามีหลายชนิด งานวิจัยนี้เลือกใช้เซรามิกชนิดรังผึ้ง (Honey comb) ในการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงที่สำคัญเซรามิกเป็นวัสดุทนความร้อนมีค่าการขยายตัวเนื่องจากความร้อนและความต้านทานต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิอย่างฉับพลัน (Thermal shock resistance) ต่ำ และมีค่าความแข็งแรงของพันธะในโครงสร้างสูงมากส่งผลให้เซรามิกมีจุดหลอมเหลวสูงกว่าโลหะและพอลิเมอร์ นอกจากนี้เซรามิกยังสามารถทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมีได้ดีมาก ตัวอย่างวัสดุตัวกลางที่นิยมนำมาใช้ในการเคลือบผิวแสดงดังรูปที่ 2-7



รูปที่ 2-7 แสดงวัสดุตัวกลางชนิดเซรามิกโฟมชิ้นวงกลม (ก) เซรามิกโฟมชิ้นสี่เหลี่ยม (ข) เซรามิกโฟมชิ้นวงแหวน (ค) ใยแก้ว (ง) และหลอดแก้ว (จ)

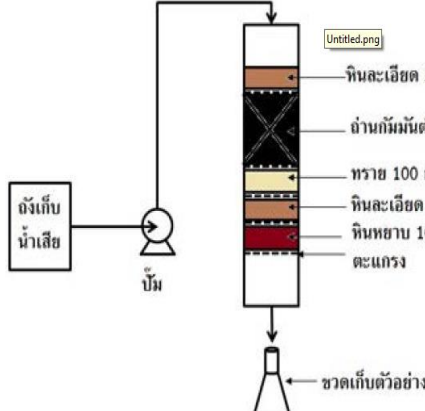
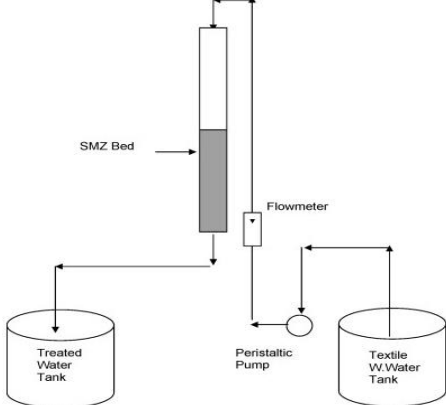
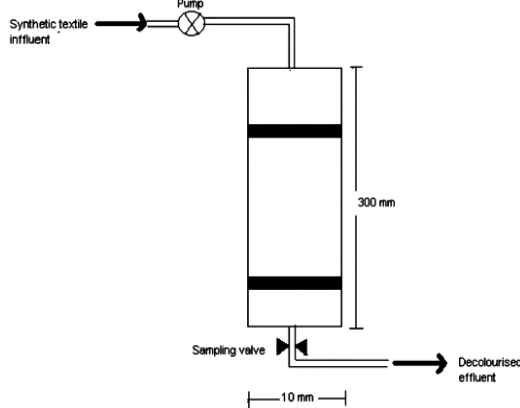
2.9 คอลัมน์บรรจุ Packed column

คอลัมน์บรรจุ (Packed column) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันมากที่สุดสำหรับการแยกแก๊สหนึ่งหรือหลายองค์ประกอบออกจากของผสมที่เป็นแก๊ส มีหลักการทำงาน คือ ใช้ของเหลวสัมผัสกับแก๊สที่ไหลสวนทางกัน โดยป้อนอากาศไหลเข้าระบบทางด้านล่างและของเหลวไหลเข้าทางด้านบนของ Packed column สัมผัสกันที่พื้นผิวของวัสดุบรรจุ (Packing media) นอกจากนี้มีการใช้ Packed column ในกระบวนการดูดซับแบบต่อเนื่องซึ่งเป็นระบบที่นิยมใช้กันมากกว่าระบบแบบเบตซ์ ซึ่งกระบวนการดูดซับแบบต่อเนื่องสามารถแยกออกได้เป็น 3 ประเภท คือ แบบตรง แบบขึ้นเคลื่อนที่ และแบบฟลูอิดไดซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2-9



รูปที่ 2-8 แสดงการใช้ Column ในกระบวนการดูดซับแบบต่อเนื่อง

2.9.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดสีในน้ำเสียด้วย Packed column

Reference	ภาพประกอบ	ลักษณะการใช้งาน
พรนิภา เอี่ยมคำรงค์ และ โสธดา ชะโน, 2554		ศึกษาการบำบัดสีของน้ำเสียโดยกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ ได้ทำการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดสี ทั้งในกระบวนการดูดซับแบบกะและแบบหอดูดซับ
Ozdenir <i>et al</i> , 2009		ศึกษาการใช้ zeolite ในการกำจัดสีจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม โดยใช้คอลัมน์บรรจุ ที่อัตราการไหลของน้ำเสียต่างๆ เพื่อดูประสิทธิภาพในการกำจัดสี
Robinson <i>et al</i> , 2002		ศึกษาการดูดซับสีย้อม โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ 5 ชนิดที่มีการไหลของน้ำเสียต่อเนื่องในคอลัมน์นี้ พิจารณาผลของ Retention time และประสิทธิภาพการบำบัด

2.10 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE)

การออกแบบการทดลองเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเหมาะสม โดยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งอาศัยแบบจำลองหรือสมการทางคณิตศาสตร์มาอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ สามารถศึกษาผลของหลายๆ ปัจจัยในเวลาเดียวกันด้วยวิธีใช้จำนวนการทดลองน้อยกว่าการศึกษาทีละปัจจัย การออกแบบการทดลองจึงเป็นวิธีการเก็บข้อมูลที่มีประสิทธิภาพโดยการเปลี่ยนแปลงหรือปรับค่าของ Input (Factor) อย่างมีจุดมุ่งหมายที่จะสังเกตการเปลี่ยนแปลงของ Output

(Response) ที่เกิดขึ้นในการออกแบบการทดลองเราต้องทำการทดลองอย่างเป็นระบบเพื่อที่จะหาความสัมพันธ์เชิงสถิติของ Y และ X ต่างๆ โดยใช้ทรัพยากรในการทดลองให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งกระบวนการต้องมีปัจจัยหรือ Input (X_1, X_2, X_3, X_4) ต่างๆ ที่ส่งผลต่อค่า Y ซึ่งเป็นคุณลักษณะด้านคุณภาพ (Quality characteristic) ของกระบวนการ โดยความสัมพันธ์เชิงสถิติที่ได้จะทำให้เกิดพื้นผิวผลตอบแทน (Response Surface Methodology, RSM) งานวิจัยนี้ได้นำเทคนิค RSM มาใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อการศึกษาตัวแปรดำเนินการต่างๆ ตามหลักสถิติ โดยรายละเอียดและประโยชน์ของเทคนิค RSM ดังนี้

2.10.1 พื้นผิวผลตอบแทน (Response Surface Design, RSM) (สุดารัตน์ ถิ่นจะนะ, 2554)

วิธีการพื้นผิวผลตอบแทน RSM เป็นการรวบรวมข้อมูลทางสถิติและเทคนิคทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ปัญหาเพื่อพัฒนาการเพิ่มประสิทธิภาพและการหาจุดที่เหมาะสมของกระบวนการ RSM ประกอบด้วย กลุ่มของตัวแปรตามหลักการทางคณิตศาสตร์และสถิติ โดยจะใช้หลักการเหล่านี้ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบแทนและตัวแปรอิสระ โดย RSM ประกอบขึ้นมาจากผลของตัวแปรอิสระซึ่งอาจมีเพียงตัวเดียวหรือหลายตัวสำหรับการวิเคราะห์ของตัวแปรอิสระที่ได้จากการทดลองนั้นจะถูกนำมาสร้างเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งจะอยู่ในรูปแบบของผลตอบแทนในรูปแบบของพื้นผิวผลตอบแทน โดยความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบแทนที่ได้กับข้อมูลดิบแสดงดังสมการที่ 2-17

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \varepsilon \quad (2-17)$$

เมื่อ y คือ ผลตอบแทนที่เกิดขึ้น

f คือ ฟังก์ชันการทำงานที่ตัวแปรที่ยังไม่ทราบต่อผลตอบแทน

$x_1, x_2, \dots, x_n$ คือ ตัวแปรอิสระ ซึ่งจะถูกรเรียกว่า ตัวแปรธรรมชาติด้วย

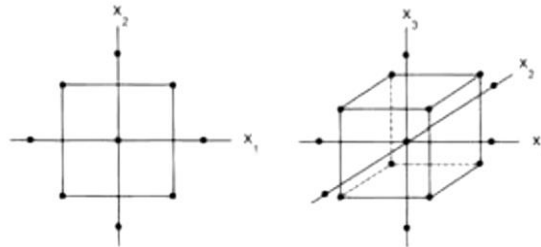
n คือ จำนวนของตัวแปรอิสระ

ε คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น

ε เป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นซึ่งเกิดมาจากแหล่งต่างๆ ซึ่งไม่สามารถถูกรวบรวมเอาไว้ใน f ได้ ซึ่งแหล่งที่ว่านี้ก่อให้เกิดผลกระทบ เช่น ค่าการวัดผิดพลาด โดยที่จะถูกคาดคะเนด้วยค่า ε มีการกระจายตัวด้วยค่าเฉลี่ยศูนย์และค่าความแปรปรวน

การออกแบบสำหรับพิดแบบจำลองอันดับที่หนึ่ง และการออกแบบสำหรับพิดแบบจำลองอันดับที่สอง ซึ่งการออกแบบสำหรับพิดแบบจำลองอันดับที่สองนี้เป็นการเน้นไปที่การสร้างแบบจำลองควอดราติกของผลตอบแทน วิธีการที่น่าสนใจ คือ การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD) เป็นหนึ่งในวิธีการหาพื้นผิวผลตอบแทน ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้เพื่อหากระบวนการที่เหมาะสม โดยทั่วไป

CCD จะประกอบด้วย 2^k แฟกทอเรียลที่มี nc รัน ซึ่ง 2^k รันในแนวแกนหรือแนวรูปดาวและ nc รันที่จุดศูนย์กลาง รูปที่ 2-9 แสดง CCD สำหรับ $k = 2$ และ $k = 3$ บ้าง



รูปที่ 2-9 การออกแบบส่วนประสมกลาง (CCD) สำหรับ $k = 2$ และ $k = 3$

ข้อดีของแผนการทดลอง CCD คือ เหมาะในการศึกษาสมการโพลิโนเมียลดีกรี 2 (Second-order model) กรณีการศึกษาเชิงปริมาณ (Quantitative factors) และมีความยืดหยุ่นในการใช้สูง เนื่องจากมีค่า Resolution ให้เลือกได้ครอบคลุมทุกค่า เนื่องจากสามารถเลือกใช้ได้ทั้งส่วนที่เป็นการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูป 2 ระดับ (2^k Full factorial) และการทดลองแฟกทอเรียลบางส่วน นอกจากนี้ การออกแบบแบบ CCD สามารถแยกทดลองได้เป็นส่วนๆ ตามลำดับ คือ ทำการทดลองส่วนของ Factorial (Factorial portion) และจุดศูนย์กลาง (Center point) ก่อน จากนั้นทำการสร้างสมการแบบเชิงเส้นตรง สำหรับกรณีศึกษาปัจจัยที่ 2 ระดับ และพยากรณ์ส่วนของจุดศูนย์กลาง ถ้าสมการในรูปเส้นตรงไม่เหมาะสมจึงทำการทดลองเพิ่มในส่วนของจุดแกน (Axial portion) จะได้สมการโพลิโนเมียลดีกรี 2 หรือ Quadratic model ข้อเสียของแผนการทดลอง CCD คือ ไม่เหมาะสำหรับการศึกษาปัจจัยเชิงคุณภาพ (Qualitative factors)

1. การออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิค RSM

1) กำหนดตัวแปรที่จะศึกษา ซึ่งประกอบไปด้วย ตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม กระบวนการทางเคมีและชีวเคมีสามารถรับผลกระทบจากกระบวนการต่างๆ มากมาย เพราะเป็นไปไม่ได้ที่จะระบุผลกระทบต่างๆ ที่เกิดขึ้นได้จากทุกตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ดังนั้น จึงมีความจำเป็นในการเลือกตัวแปรบางตัวที่สร้างผลกระทบได้โดยตรงออกมา การคัดเลือกโดยการทดลองนั้นมีความสำคัญในการระบุตัวแปรอิสระ โดยหลังจากทำการระบุตัวแปรสำคัญต่างๆ แล้วจะสามารถกำหนดทิศทางในการพัฒนารูปแบบขึ้นซึ่งจะสามารถระบุระดับความสำคัญของตัวแปรต่างๆ ขึ้นมาได้ การระบุความสำคัญของตัวแปรต่างๆ นั้นมีความสำคัญเพราะความสำเร็จของการหาจุดที่เหมาะสมนั้นเกี่ยวข้องกับสิ่งนี้โดยตรง ความผิดพลาดในการระบุระดับความสำคัญอาจส่งผลถึงความผิดพลาดในการระบุจุดที่เหมาะสมได้

2) กำหนดรหัส (Code) ของตัวแปรอิสระที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการออกแบบสถานะที่ใช้ในการทดลองโดยวิธีการ CCD และทำการแปลงค่ารหัสตัวแปรอิสระ (Coded variables) ที่ได้ออกแบบไว้เป็นตัวแปรเดิมทำได้โดยใช้สมการที่ 2-18

$$X = \left[\frac{x - \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}}{\frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}} \right] \quad (2-18)$$

โดยที่ $X = \text{Coded Variables}$

$X = \text{ตัวแปรอิสระ}$

$X_{\max} = \text{ค่าสูงสุดของตัวแปรอิสระ}$

$X_{\min} = \text{ค่าต่ำสุดของตัวแปรอิสระ}$

3) ทำการทดลองตามสภาวะการทดลองที่ได้ออกแบบไว้

4) แสดงผลของตัวแปรอิสระต่างๆ ที่ได้จากการทดลองในรูปแบบของ Surface Plot โดยใช้โปรแกรม Regression analysis แบบจำลองที่ได้จะอยู่ในรูปสมการกำลังสอง (Quadratic equation) ดังแสดงในสมการที่ 2-19

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \left[\sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j \right]_{i < j} \quad (2-19)$$

โดยที่ $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}$ และ β_{ij} คือ สัมประสิทธิ์ถดถอยทั้งแบบเชิงเส้นและแบบกำลังสอง และสัมประสิทธิ์เชิงซ้อน ตามลำดับ

2. การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA)

วิธีการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างตั้งแต่ 3 กลุ่มขึ้นไป ซึ่งจะเป็นการวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Between-group variance) และความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Within-group variance) ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม เป็นค่าที่เกิดจากความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มต่างๆ ถ้าค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มแตกต่างกันมาก ค่าความแปรปรวนระหว่างกลุ่มก็จะมากตามไปด้วย สำหรับความแปรปรวนภายในกลุ่มเป็นค่าที่แสดงให้เห็นว่า คะแนนแต่ละตัวที่รวบรวมมาภายในแต่ละกลุ่มนั้นมีการกระจายมากหรือน้อย ค่าที่คำนวณได้เรียกว่าความคลาดเคลื่อน

3. แบบจำลองการถดถอย (Regression model)

แบบจำลองการถดถอย (Regression model) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับการหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย เพื่อนำไปสร้างสมการทำนายค่าของผลตอบสนอง ซึ่งจะทำได้หาผลตอบสนองที่จุดใดๆ ในแต่ละช่วงของปัจจัยได้ โดยวิธีการที่ใช้ในการประมาณค่าตัวแปรต่างๆ ในแบบจำลองนี้ส่วนใหญ่คือ วิธีกำลังสองน้อยสุด (Least square method) ซึ่งเป็นการประมาณค่าตัวแปรที่ไม่

ทราบค่า (β) เพื่อให้ผลรวมของกำลังสองของความผิดพลาด ($2E$) มีค่าน้อยที่สุด บางครั้งเราเรียก β เหล่านี้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย โดยมีขั้นตอนในการประมาณค่าดังนี้

- 1) สร้างผลรวมของกำลังสองของความผิดพลาด โดยการพิชผลตอบสนอง
- 2) ประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยในเทอมต่างๆ ที่ทำให้ผลรวมของกำลังสองของความผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด
- 3) นำค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ได้ไปเขียนสมการทำนายค่าของผลตอบสนองเนื่องจากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี CCD มีการทดลองไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิด Cubic model ได้ ดังนั้นแบบจำลองการถดถอยจึงมีลักษณะทั้งหมด 3 แบบ คือ แบบ Linear Model แบบ 2FI (Two-factor Interaction) และ แบบ Model Quadratic Model ดังแสดงในสมการที่ (2-20) ถึง (2-22)

$$E(y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^P \beta_i X_i \quad (2-20)$$

$$E(y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^P \beta_i X_i + \sum_{i < j}^P \beta_{ij} X_i X_j \quad (2-21)$$

$$E(y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^P \beta_i X_i + \sum_{i < j}^P \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^P \beta_{ii} X_i^2 \quad (2-22)$$

2.10.2 วิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับผลตอบสนอง

1. ทดสอบความมีนัยสำคัญของความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและเซตของตัวแปรถดถอยที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยพิจารณาสมมติฐานที่เหมาะสมของแต่ละแบบ โดยพิจารณาจากค่า P-value
2. การทดสอบ Lack of fit เป็นการทดสอบว่าฟังก์ชันถดถอยหรือ แบบจำลองการถดถอยที่ใช้มีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยพิจารณาจากค่า P-value
3. วิเคราะห์ผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลอง ซึ่งพิจารณาจากค่าดังต่อไปนี้
 - 1) Standard Deviation (Std. Dev.) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่าหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Y รอบเส้นถดถอย คำนวณได้จากสมการที่ (2-23)

$$\text{Std. Dev.} = \sqrt{\text{MSE}} ; (\text{Mean Squared Error, MSE}) \quad (2-23)$$

- 2) R-squared (R^2) คือ ค่าที่แสดงสัดส่วนหรือร้อยละของความแปรผันทั้งหมดใน Y อธิบายโดยความแปรผันใน X หรืออธิบายโดยความสัมพันธ์ระหว่าง X กับ Y ดังนั้น จึงเป็นค่าที่ใช้วัดว่าสมการที่ประมาณเหมาะสมกับข้อมูลเพียงไร ถ้า R^2 มีค่ามากขึ้น แสดงว่าสมการถดถอยที่ประมาณเหมาะสมกับข้อมูลมากขึ้น คำนวณได้จากสมการที่ (2-24)

$$R^2 = 1 - \frac{\text{SSE}}{\text{SST}}, 0 \leq R^2 \leq 1 \quad (2-24)$$

SSE คือ ค่าผลรวมของกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Sum of Square for Error, SSE) ($SSE = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$)

SST คือ ค่าความแปรปรวนทั้งหมด (Sum of Square Total, SST) ($SST = \sum (y_i - \bar{y})^2$)

3) Adjusted R-squared ($Adj-R^2$) คือ ค่าที่แสดงสัดส่วนหรือร้อยละที่ตัวแปรอิสระ X มีส่วนในการอธิบายความผันแปรทั้งหมดของ Y ซึ่งเป็นค่าที่วัดว่ารูปแบบเหมาะสมกับข้อมูลอย่างไร โดยการนำ Degree of Freedom มาพิจารณาด้วย คำนวณได้จากสมการที่ (2-25)

$$Adj - R^2 = 1 - \frac{SSE / (n - k - 1)}{SST / (n - 1)}, 0 \leq Adj - R^2 \leq 1 \quad (2-25)$$

4) Predicted R-squared ($Pred-R^2$) คือ ค่าที่แสดงสัดส่วนหรือร้อยละที่ตัวแปรอิสระ X มีส่วนในการอธิบายความผันแปรทั้งหมดของ Y ที่ได้จากการทำนาย คำนวณได้จากสมการที่ (2-26)

$$Pred - R^2 = 1 - \frac{PRESS}{SS_{total}} \quad (2-26)$$

5) Predicted Residual Error Sum of Square (PRESS) คือ ค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อนตัดออก เป็นการวัดว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมกับจุดที่ทำการออกแบบไว้หรือไม่ แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมจะเป็นแบบจำลองที่มีค่า PRESS ต่ำ คำนวณได้จากสมการที่ (2-27)

$$PRESS = \sum \left(\frac{e_i}{1 - h_{ii}} \right)^2 \quad (2-27)$$

2.10.3 ประโยชน์ของเทคนิค RSM

เทคนิค RSM มีประโยชน์ที่สำคัญ คือ จำนวนชุดการทดลองที่ออกแบบโดยใช้ RSM นั้นมีจำนวนที่น้อยกว่า เพราะ RSM จะนำเสนอข้อมูลจำนวนมากจากการทดลองเพียงไม่กี่ครั้ง ซึ่งต่างจากการทดลองในแบบดั้งเดิมที่จะใช้จำนวนการทดลองที่มากกว่าเพื่ออธิบายถึงพฤติกรรมของระบบ และ RSM มีความเป็นไปได้ที่จะเจอผลกระทบที่มีลักษณะเป็นผลกระทบภายใน (Interactive effect) จากตัวแปรอิสระ โดยเฉพาะกระบวนการทางชีวเคมี นอกจากนี้ โมเดลสมการอย่างง่ายของ RSM จะเพิ่มความเข้าใจต่อผลที่เกิดจากการผสมกันของตัวแปรอิสระต่างๆ เมื่อสังเกตสมการนั้นผ่านการทดลองต่างๆ จะพบว่า ข้อมูลของตัวแปรอิสระที่ได้กับผลตอบสนองมีความสอดคล้องกัน จึงกล่าวได้ว่า RSM เป็นเครื่องมือที่เป็นประโยชน์สำหรับการหาจุดที่เหมาะสมของกระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางชีวเคมี

2.10.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคของ RSM (ปรางศิริ ศรีสุภพพร, 2551)

Garcia *et al.* 2011 ศึกษาการดักจับก๊าซ CO_2 ด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ในหอดูดซับแบบ Packed bed โดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) ทำการออกแบบการ

ทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการดักจับก๊าซ CO_2 (Y_1) และความสามารถในการดักจับก๊าซ CO_2 (Y_2) โดยปัจจัยที่ทำการศึกษามี 2 ปัจจัย ได้แก่ ความดันส่วนก๊าซ CO_2 (1-3 บาร์) และอุณหภูมิ (25-65 °C) ผลจากการวิเคราะห์พบว่า ปัจจัยทั้งสองไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน และยังพบว่าความดันส่วนก๊าซ CO_2 เป็นปัจจัยมีผลมากที่สุด เมื่อค่าความดันส่วนก๊าซ CO_2 มีค่าสูงขึ้นส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการดักจับและความสามารถในการดักจับก๊าซ CO_2 สูงขึ้นเช่นกัน แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นกลับส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการดักจับและความสามารถในการดักจับก๊าซ CO_2 ลดลงซึ่งจะได้สภาวะเหมาะสมที่สุด คือที่อุณหภูมิ 25°C และความดันส่วนก๊าซ CO_2 3 บาร์ เวลาที่ใช้ในการดักจับก๊าซ CO_2 เป็น 10.50 นาที และความสามารถในการดักจับก๊าซ CO_2 เป็น 3.96 โมล/กิโลกรัม

Adsorbent

Tan *et al.* 2007 ศึกษาวิธีการออกแบบการทดลองด้วย CCD เพื่อทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเตรียม Activated carbon ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิสำหรับการกระตุ้น ระยะเวลาการกระตุ้น และอัตราส่วน KOH: char ต่อการดูดซับ Methyl Blue แต่ผู้ทำการวิจัยต้องการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเตรียม Activated carbon จึงนำไปสู่การวิเคราะห์การทดลองโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Method of Process Optimization) พบว่าสภาวะเหมาะสมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ คือ สภาวะอุณหภูมิประมาณ 816°C ระยะเวลาในการกระตุ้นประมาณ 1 ชั่วโมง และต้องใช้อัตราส่วน KOH : char เท่ากับ 3.9