

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงสร้างอุตสาหกรรมสิ่งทอ

อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของไทยเป็นอย่างมากเนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมที่มีขนาดใหญ่ที่ประกอบไปด้วยอุตสาหกรรมย่อยๆ และอุตสาหกรรมสิ่งทอยังถือว่าเป็นอุตสาหกรรมที่มีมูลค่ามวลรวมที่สูงมากอุตสาหกรรมหนึ่งของประเทศไทย และยังเป็นอุตสาหกรรมส่งออกที่มีบทบาทสำคัญในการนำเงินตราเข้าประเทศอย่างต่อเนื่อง อุตสาหกรรมสิ่งทอประกอบไปด้วยอุตสาหกรรมต้นน้ำ อุตสาหกรรมกลางน้ำ และอุตสาหกรรมปลายน้ำ [1, 2]

2.1.1 อุตสาหกรรมต้นน้ำ

คือ อุตสาหกรรมการผลิตเส้นใย สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภทตามกระบวนการผลิต คือ อุตสาหกรรมผลิตเส้นใยธรรมชาติ และอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยสังเคราะห์ การผลิตเส้นใยสังเคราะห์เป็นการนำพอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ของสารเคมีอันเป็นผลจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีมาใช้ ซึ่งในปี 2552 ประเทศไทยมีโรงงานผลิตเส้นใยสังเคราะห์รวมทั้งสิ้น 16 โรงงาน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการร่วมทุนกับนักลงทุนต่างชาติเนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้เทคโนโลยีสูงและเงินลงทุนสูง

2.1.2 อุตสาหกรรมกลางน้ำ

ประกอบด้วยอุตสาหกรรมปั่นด้าย อุตสาหกรรมผ้าทอและผ้าถัก อุตสาหกรรมพอกย้อม พิมพ์ลายและแต่งสำเร็จ นอกจากนี้ยังถือว่าเป็นอุตสาหกรรมของผลิตภัณฑ์นอนวูฟเวน (nonwoven) ซึ่งเป็นขั้นตอนการผลิตผ้าผืนโดยตรงจากเส้นใยโดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนการทำให้เป็นเส้นด้ายและไม่ผ่านกระบวนการถักทอ เป็นส่วนหนึ่งของอุตสาหกรรมกลางน้ำเช่นกัน โดยในส่วนของอุตสาหกรรมกลางน้ำนี้ เป็นส่วนของอุตสาหกรรมที่ใช้เงินลงทุนและเทคโนโลยีระดับปานกลางถึงสูง

อุตสาหกรรมปั่นด้าย เป็นอุตสาหกรรมที่รับเอาวัตถุดิบเส้นใยธรรมชาติ เช่น ฝ้าย หรือเส้นใยประดิษฐ์เข้ามาตีเกลียวหรือปั่นให้เป็นเส้นด้าย กระบวนการในการปั่นด้ายนั้นยังจำเป็นต้องมีการลงทุนมากและใช้เทคโนโลยีระดับปานกลาง สำหรับเทคโนโลยีสมัยใหม่ของวงการปั่นด้าย คือ การปั่นด้ายระบบปลายเปิด (Open End Spinning หรือ O.E.) ซึ่งเป็นระบบที่สามารถปั่นด้ายได้เร็วขึ้นมากแต่มีต้นทุนที่สูงขึ้น นอกจากนี้แล้วอุตสาหกรรมปั่นด้าย ยังมีอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่ทำารตกแต่งผิวเส้นด้ายใยยาวให้มีสมบัติเฉพาะที่ดีขึ้นเหมาะแก่การใช้งาน เช่น การทำให้มีความนุ่มนวลในการสัมผัส ดูดซึมน้ำได้ดีขึ้น ซึ่งเป็นเป็นการทำเส้นด้ายเท็กซ์เจอร์ (textured yarn)

อุตสาหกรรมทอผ้า พัฒนาการของเทคโนโลยีการทอผ้านั้นได้ส่งผลอย่างมากต่อภาคอุตสาหกรรมในปัจจุบัน เครื่องทอผ้าระบบกระสวย (shuttle loom) มีข้อเสียอยู่มาก ไม่ว่าจะเป็น



เป็นเรื่องของการสิ้นเปลืองพลังงาน อันตรายจากกระสวย เสียงดัง และประสิทธิภาพการทำงานต่ำ จึงมีระบบไร้กระสวย (shuttle less loom) เข้ามาทดแทนซึ่งใช้หลักการในการทอเหมือนเดิม เพียงแต่เปลี่ยนรูปแบบการพาเส้นด้ายพุ่งจากการใช้กระสวยเป็นอย่างอื่นที่ไม่ใช่กระสวย ที่ช่วยเพิ่มความเร็วในการผลิตให้สูงขึ้นและลดข้อเสียต่างๆ ของระบบการทอผ้าแบบเก่าได้อย่างมากมาย เช่น เครื่องทอด้วยลม (air jet) และเครื่องทอด้วยน้ำ (water jet) เป็นต้น

อุตสาหกรรมฟอก ย้อม พิมพ์ และแต่งสำเร็จ เป็นอุตสาหกรรมที่สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลิตภัณฑ์ได้อย่างมากมาย แต่มักประสบกับปัญหาในเรื่องการจัดการน้ำซึ่งเป็นหัวใจของกระบวนการฟอกย้อมและตกแต่งสำเร็จสิ่งทอ รวมทั้งปัญหาของการปล่อยน้ำเสียที่มีปริมาณสารเคมีจำนวนมาก ซึ่งต้องการวิธีการบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพสูง

2.1.3 อุตสาหกรรมปลายน้ำ

คือ อุตสาหกรรมเสื้อผ้าสำเร็จรูป ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้เงินลงทุน เทคโนโลยี และเครื่องจักรในระดับไม่สูงมากนัก ในขณะที่ต้องใช้แรงงานเป็นจำนวนมากในกระบวนการผลิต เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมในส่วนอื่นๆ โดยคุณลักษณะของแรงงานในอุตสาหกรรมเสื้อผ้าสำเร็จรูป จะต้องมีความอดทนและประสบการณ์ด้านงานฝีมือและการตัดเย็บที่ประณีตมีคุณภาพสม่ำเสมอ โดยในปัจจุบันประเทศไทยมีโรงงานตัดเย็บเสื้อผ้า ที่มีขนาดและมาตรฐานที่หลากหลายกระจายอยู่ทั่วทุกพื้นที่

2.2 ปัญหามลพิษจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ [3]

อุตสาหกรรมสิ่งทอแต่ละประเภทก่อให้เกิดปัญหาพิษที่ระดับความรุนแรงแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตและวัตถุดิบที่ใช้แต่ละประเภท เช่น หากเป็นอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยอาจจะก่อให้เกิดปัญหาด้านสารเคมีและกลิ่นเหม็น ในขณะที่อุตสาหกรรมทอผ้าจะก่อให้เกิดปัญหาด้านเสียงและอากาศ ส่วนอุตสาหกรรมผลิตเสื้อผ้าสำเร็จรูปจะก่อให้เกิดปัญหากากของเสีย เช่น เศษผ้า เศษด้าย แกนกระดาษ เป็นต้น เมื่อพิจารณาโครงสร้างอุตสาหกรรมสิ่งทอทั้งระบบแล้ว จะเห็นได้ชัดว่าปัญหาการใช้น้ำและการบำบัดน้ำเสียในโรงงานฟอกย้อม พิมพ์ และตกแต่งสำเร็จ เป็นปัญหาหลักในด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจากในกระบวนการผลิตจำเป็นต้องใช้น้ำปริมาณมากตลอดทุกขั้นตอนของกระบวนการ ตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมผ้าไปจนถึงการย้อมสีและการตกแต่งสำเร็จ การที่อุตสาหกรรมฟอกย้อมมีการใช้น้ำเป็นปริมาณมากก็เป็นสาเหตุทำให้เกิดน้ำเสียในปริมาณมากตามมาด้วย นอกจากนี้ น้ำเสียที่มาจากกระบวนการฟอกย้อมและพิมพ์ผ้ายังประกอบไปด้วยสารเคมีต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิต เช่น สีย้อม กรด ด่าง และสารตกแต่งอื่นๆ ซึ่งน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนสารเคมีเหล่านี้ในปริมาณสูงจะส่งผลกระทบต่อภาวะแวดล้อมทางน้ำมากยิ่งขึ้น นอกจากน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตเหล่านี้ ยังมีน้ำที่ใช้ในการล้างเครื่องจักร และน้ำเสียจากแหล่งอื่นๆ เช่น น้ำใช้ของคนงาน น้ำจากโรงอาหารและห้องน้ำ เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 น้ำเสียที่ได้จากแต่ละขั้นตอนของอุตสาหกรรมสิ่งทอ [4]

กระบวนการ	น้ำเสีย	ของเสียเหลือทิ้ง
การปั่นเส้นด้าย	น้อย หรือไม่มีน้ำเสียปล่อย ออกมาจากกระบวนการ	ปริมาณเส้นด้ายและเส้นใยที่ เหลือทิ้งจากการปั่นด้าย บรรจุภัณฑ์เหลือทิ้ง
การลงแปรง	น้ำเสียจากการทำความสะอาด	ปริมาณแปรงที่ใช้ ด้ายเหลือทิ้ง และบรรจุภัณฑ์เหลือทิ้ง
การกำจัดแปรง	สารหล่อลื่น ยาฆ่าแมลงและ สารประกอบของยาฆ่า เชื้อจุลินทรีย์	ปริมาณเส้นด้ายและ เส้นใยที่เหลือ บรรจุภัณฑ์เหลือ ทิ้ง
การกำจัดไขมันและสิ่ง สกปรก	ยาฆ่าเชื้อ ยาฆ่าแมลง ซีฟี่งสาร หล่อลื่นที่เป็นตัวช่วยในการถัก และปั่น ผงซักฟอก ไขมันน้ำมัน	เล็กน้อย หรือ ไม่มีของเสียเหลือทิ้ง
การเผาขน	เล็กน้อย หรือ ไม่มีน้ำเสียปล่อยออกมา	เล็กน้อย หรือ ไม่มีของเสียเหลือทิ้ง
การฟอกขาว	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โซเดียมซัลไฟด์ สารอินทรีย์ที่มี ค่าพีเอชสูง	เล็กน้อย หรือ ไม่มีของเสียเหลือทิ้ง
การทำเมอร์เซอไรส์	สารที่มีค่าพีเอชสูง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์	เล็กน้อย หรือ ไม่มีของเสียเหลือทิ้ง
การเซทด้วยความร้อน	เล็กน้อย หรือ ไม่มีน้ำเสียปล่อยออกมา	เล็กน้อย หรือ ไม่มีของเสียเหลือทิ้ง
การย้อมสี	โลหะ เกลือ สารลดแรงตึงผิว ของสารอินทรีย์ สารที่มีประจุ บวก ผงสีย้อมประเภทต่างๆ เช่น สีซัลไฟด์ ตัวทำละลาย อินทรีย์ที่เป็นกรดและด่าง	เล็กน้อย หรือ ไม่มีของเสียเหลือทิ้ง
การพิมพ์	ของแข็งแขวนลอยจากการย้อม ตัวทำละลาย ยูเรีย สี โลหะ โพลีเมอร์	เล็กน้อย หรือ ไม่มีของเสียเหลือทิ้ง
การตกแต่งสำเร็จ	ของแข็งแขวนลอย จากตัวทำละลายที่เป็นพิษ	เส้นด้ายและเส้นใยที่ หลุดออกมา



655535597

2.2.1 ลักษณะของน้ำเสียและผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมต่อสิ่งแวดล้อมทางน้ำ

[3, 5]

2.2.1.1) มีปริมาณสารอินทรีย์สูง ซึ่งมีสาเหตุมาจากแป้ง สีย้อม กรดแอสซิดิก เส้นใยและเส้นด้ายที่ปนออกมาจากกระบวนการย้อมและตกแต่งสำเร็จ นอกจากนี้ยังอาจเกิดจากสบู่ ไขมัน น้ำมัน ซึ่งจะเป็นฝ้าปกคลุมผิวน้ำ และสารทำความสะอาดซึ่งมีลักษณะเป็นฟอง

ผลกระทบ ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO) ลดลง มีผลทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำตายได้ เนื่องจากการขาดออกซิเจน และยังทำให้แหล่งน้ำไม่สามารถเกิดการบำบัดได้ด้วยตัวเอง ทำให้เกิดกลิ่นเหม็นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาแบบไม่ใช้ออกซิเจน นอกจากนี้สารอินทรีย์บางชนิดยังเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำและเป็นอันตรายต่อมนุษย์ได้

2.2.1.2) มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูง สารที่ทำให้น้ำเสียจากการฟอกย้อมมีค่าความเป็นด่างสูง (pH 9-12) ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคาร์บอเนต ซึ่งนำมาใช้ในขั้นตอนการขจัดสิ่งสกปรกเจือปนและในการย้อม

ผลกระทบ เมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยตรงจะก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วสิ่งมีชีวิตในน้ำจะดำรงชีพอยู่ได้ในภาวะที่เป็นกลาง ในช่วงความเป็นกรด-ด่างประมาณ 6-9

2.2.1.3) ของเสียที่มีอุณหภูมิสูง โดยทั่วไปจะมีอุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะในขั้นตอนที่มีการใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ขั้นตอนการขจัดสิ่งสกปรกเจือปน ขั้นตอนการย้อม และขั้นตอนการตกแต่งสำเร็จ

ผลกระทบ ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลง

2.2.1.4) มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำสูง เช่น เกลือโซเดียมและกรดต่างๆ

ผลกระทบ สัตว์น้ำอาจเกิดโรคร้ายแรงและอาจทำให้แหล่งน้ำไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้

2.2.1.5) มีความเข้มข้นสูง เนื่องจากในการย้อมสีของเส้นใย เส้นใยจะมีการดูดซึมสีย้อมเพียงบางส่วนเท่านั้น ดังนั้นจึงทำให้มีสีย้อมหลงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อม ที่ถูกปล่อยออกมากับน้ำเสียค่อนข้างมาก

ผลกระทบ ทำให้การส่องผ่านของแสงอาทิตย์ลงสู่แหล่งน้ำลดลง ส่งผลทำให้พืชไม่สามารถทำการสังเคราะห์แสงได้ ออกซิเจนในน้ำจึงลดลง และยังก่อให้เกิดความไม่สวยงามต่อทัศนียภาพของแหล่งน้ำ

2.2.1.6) มีโลหะหนักเจือปน โลหะหนักจะเจือปนอยู่ในสีย้อมผ้า ได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว โครเมียม และสังกะสี

ผลกระทบ ทำให้เกิดโรคร้ายแรงในสัตว์น้ำ และยังมีการสะสมอยู่ตามระบบนิเวศ ทำให้เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตต่างๆรวมถึงมนุษย์

2.2.1.7) มีปริมาณของแข็งแขวนลอยสูง โดยเฉพาะเศษเส้นใยที่หลุดออกมา



ผลกระทบ มีผลทำให้สารอินทรีย์ในน้ำเพิ่มมากขึ้น และหากมีการตกตะกอนลงบนแหล่งน้ำตื้นเขินจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศทางน้ำและยังทำลายทัศนียภาพแหล่งน้ำอีกด้วย

ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ พบว่า น้ำเสียที่ได้จากกระบวนการย้อมสีเป็นปัญหาหลักที่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมทางน้ำ ทำให้แหล่งน้ำเน่าเสียและมีสีที่ไม่พึงประสงค์ ซึ่งจากตารางที่ 2.2 แสดงความเข้มข้นของน้ำเสียที่ได้จากกระบวนการย้อมสี พบว่า เส้นใยจำพวกเส้นใยฝ้ายซึ่งเป็นเซลลูโลสที่สามารถใช้สีย้อมประเภทต่างๆในการย้อมได้ แต่สีย้อมรีแอคทีฟเป็นที่นิยมมากและจะมีการปลดปล่อยหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการย้อมลงสู่บ่อบำบัดในปริมาณมากที่สุด นอกจากนี้ในตารางที่ 2.3 ยังพบว่า สีย้อมรีแอคทีฟมีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียสู่สิ่งแวดล้อมมากที่สุดถึง 10-50 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากระดับการติดแน่น (degree of fixation) ค่อนข้างต่ำเพียง 50-90 เปอร์เซ็นต์ จากข้อมูลข้างต้นจึงเป็นสาเหตุให้ในงานวิจัยนี้เลือกที่จะศึกษาการดูดซับสีย้อมประเภทสีรีแอคทีฟ

ตารางที่ 2.2 ความเข้มข้นของน้ำเสียที่ได้จากกระบวนการย้อมสี [6]

ประเภทเส้นใย	ประเภทสีย้อม	สีย้อมที่สูญเสีย (g/kg fiber)	ปริมาณน้ำที่ใช้ทั้งหมด (l/kg fiber)	ความเข้มข้นสีย้อมที่ปล่อยออกมา (mg/l)
เซลลูโลส	สีรีแอคทีฟ	3-20	50-250	30-200
	สีไดเร็กต์	1-5	40-150	10-50
	สีแวต	1-5	20-80	20-100
	สีซัลเฟอร์	1-10	50-250	10-100
ไนลอน	สีแอซิด	0.5-2.5	30-200	5-50
พอลิเอสเตอร์	สีดิสเพิร์ส	1-5	50-200	10-50

ตารางที่ 2.3 ระดับการติดแน่นของสีย้อมต่างๆและการปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม [7]

ประเภทของสีย้อม	เส้นใย	ระดับการติดแน่น (%)	การสูญเสียสู่สิ่งแวดล้อม (%)
สีรีแอคทีฟ	เซลลูโลส	50-90	10-50
สีไดเร็กต์	เซลลูโลส	70-95	5-30
สีแอซิด	โพลีเอไมด์	80-95	5-20
สีดิสเพิร์ส	โพลีเอสเตอร์	90-100	0-10
สีเบสิก	อะคริลิก	95-100	0-5
โลหะเชิงซ้อน	ขนสัตว์	90-98	2-10

2.3 สีย้อม (Dyes)

สีย้อมที่ใช้โดยทั่วไปในอุตสาหกรรมเป็นสารเคมีที่ได้มาจากน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหิน ซึ่งเมื่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหินผ่านการสกัดจะได้สารไฮโดรคาร์บอนชนิดไม่อิ่มตัว เช่น เบนซิน ไชลีน แอนทราซีน โทลูอีน แนพทาซีน และพาราฟิน ซึ่งสารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนเป็น สีย้อมด้วยเทคนิคต่างๆ [8] โดยในอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยทั่วไปจะนิยมใช้สีย้อมที่ได้จากการสังเคราะห์ มากกว่าการใช้สีย้อมธรรมชาติ เนื่องจากข้อเสียบางประการของสีย้อมธรรมชาติดังแสดงใน ตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงข้อเปรียบเทียบระหว่างสีย้อมธรรมชาติและสีย้อมสังเคราะห์ [9]

สีย้อมธรรมชาติ	สีย้อมสังเคราะห์
1. มีความสดใสน้อย	1. มีความสดใสของสีดี
2. ปริมาณสารสีในวัตถุดิบย้อมสีมีน้อย ทำให้ย้อมได้สีไม่เข้ม หรือต้องใช้วัตถุดิบ ปริมาณมาก	2. มีความเข้มของสีดี
3. สีซีดจางและมีความคงทนต่อแสงต่ำ	3. สีซีดจางช้าและมีความทนต่อแสงสูง
4. มีจำนวนสีให้เลือกน้อย	4. มีจำนวนสีให้เลือกมากกว่า
5. คุณภาพการย้อมสีธรรมชาติขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ซึ่งควบคุมได้ยาก การย้อมสีให้เหมือนเดิมจึงทำได้ยาก	5. การควบคุมคุณภาพในการย้อมสีแต่ละ ครั้งให้เหมือนเดิมจึงทำได้ง่าย

2.3.1 ปัจจัยที่ทำให้โมเลกุลของสารมีสี [8, 10] การที่โมเลกุลของสารจะมีสีปรากฏออกมาให้มองเห็นได้ต้องประกอบด้วย

2.3.1.1 **หมู่โครโมฟอร์ (chromophore)** เป็นหมู่ที่อยู่ในโครงสร้างโมเลกุลของ สารอินทรีย์ซึ่งสามารถดูดกลืนแสงในช่วง 200-800 นาโนเมตร ส่วนมากเป็นหมู่ฟังก์ชันชนิดไม่อิ่มตัว เช่น ไนโตรโซ (nitroso) ไนโตร (nitro) แอโซ (azo) เอทิลีน (ethylene) คาร์บอนิล (carbonyl) คาร์บอนิล-ไนโตรเจน (carbonyl-nitrogen) ซัลเฟอร์ (sulphur) เป็นต้น

กลุ่มอะตอมต่างๆนี้จะเป็นตัวเพิ่มสีให้แก่สารประกอบแอโรมาติก โดยการเลือกดูดกลืนแถบ แสงในแสงสีขาวไว้บางแถบและปล่อยออกมาบางแถบ ทำให้มนุษย์มองเห็นสีย้อมที่มีโทนสีแตกต่างกัน ออกไป

2.3.1.2 **หมู่ออกโซโครม (auxochrome)** เป็นหมู่ฟังก์ชันชนิดอิ่มตัว สารอินทรีย์ที่มี เฉพาะหมู่ออกโซโครมจะดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นน้อยกว่า 200 นาโนเมตร แต่หาก สารอินทรีย์ที่มีทั้งหมู่โครโมฟอร์และออกโซโครม จะทำให้ดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มากขึ้น

เรียกว่า เกิดการเลื่อนแบบบาโทโครมิก (bathochromic shift) ซึ่งทำให้มีสีเข้มขึ้น นอกจากนี้หมู่ ออกซิโคโรมบางตัวยังช่วยเพิ่มความสามารถในการละลาย เช่น หมู่ซัลโฟเนต (sulfonate) ช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดติดกับเส้นใย (fiber affinity) หรือเพิ่มความสดใส เช่น หมู่ไตรฟลูออโรคาร์บอน (trifluoro carbon) เป็นต้น

2.3.2 การจำแนกสีย้อม [11, 12]

การจำแนกประเภทของสีย้อมมีหลายวิธี เช่น

1. การจำแนกตามประจุ เช่น ประจุบวก ประจุลบ
2. การจำแนกตามความสามารถในการละลายน้ำ
3. การจำแนกตามเส้นใยที่สามารถย้อมได้ เช่น สีย้อมเส้นใยเซลลูโลส สีย้อมเส้นใยพอลิเอสเตอร์ สีย้อมเส้นใยพอลิเอไมด์ สีย้อมเส้นใยอะคริลิก เป็นต้น
4. การจำแนกตามข้อสี เช่น สีแอซิด สีไดเรกต์ สีดิสเพิร์ส สีมอร์แดนท์ เป็นต้น
5. การจำแนกตามโครงสร้างทางเคมี เช่น มีโครงสร้างทางเคมีชนิดแอโซ มีโครงสร้างทางเคมีชนิดแอนทราควิโนน มีโครงสร้างทางเคมีชนิดไตรฟีนิลมีเทน เป็นต้น
6. การจำแนกตามแหล่งกำเนิดสี เช่น สีจากแหล่งธรรมชาติ และสีที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้น
7. การจำแนกตามสีที่มองเห็นได้ เช่น สีแดง สีเหลือง สีเขียว สีดำ เป็นต้น

2.4 สมบัติของสีย้อมแต่ละชนิด

2.4.1 สีย้อมรีแอกทีฟ (reactive dyes)

สีย้อมรีแอกทีฟเป็นสีย้อมที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้มากที่สุด ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ซึ่งเป็นสีย้อมที่มีขนาดโมเลกุลที่เล็กกว่าสีไดเรกต์ ทำให้สีสามารถแทรกซึมเข้าสู่เส้นใยได้ดีกว่า ย้อมได้สม่ำเสมอมากกว่า สามารถละลายน้ำได้ดีเนื่องจากมีหมู่ซัลโฟเนต ($-\text{SO}_3 \text{Na}^+$) ในโครงสร้างโมเลกุลของสี สามารถย้อมได้ง่ายและย้อมได้หลากหลายวิธี มีความคงทนต่อการซักสูงแต่ไม่ทนต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน และยังเป็นสีที่มีข้อพิเศษ คือ มีช่วงของเฉดสีกว้าง มีสีสันทให้เลือกหลากหลาย ได้สีที่มีความสว่างสดใสมาก โดยเฉพาะเมื่อเทียบกับสีไดเรกต์หรือสีแวต แต่อย่างไรก็ตามสีย้อมรีแอกทีฟก็นับเป็นสีย้อมที่ก่อให้เกิดมลพิษมากที่สุดในบรรดาสีย้อมทั้งหมด เนื่องจากมีปริมาณของเกลือมาก และยังมีประสิทธิภาพในการยึดเกาะไม่ดีเพียงพอ จึงทำให้มีสีย้อมบางส่วนที่หลุดถูกปล่อยทิ้งไปกับน้ำทิ้ง

โครงสร้างของสีย้อมรีแอกทีฟ ประกอบด้วย 3 ส่วนคือ

หมู่ที่ทำให้เกิดสี (chromophore) คือ หมู่ฟังก์ชันที่ทำให้เกิดสี ซึ่งอยู่ติดกับหมู่ที่ว่องไว (reactive group) เช่น หมู่แอโซ หมู่แอนทราควิโนน เป็นต้น

หมู่ที่ละลายน้ำ (solubilizing group) คือ หมู่ซัลโฟเนต

หมู่เชื่อม (bridge) จะเป็นส่วนที่เชื่อมระหว่างหมู่ที่ทำปฏิกิริยาเคมีกับเส้นใยกับหมู่ที่ทำให้เกิดสี

หมู่รีแอกทีฟ (reactive group) คือ หมู่ที่ทำปฏิกิริยาเคมีกับเส้นใย โดยเป็นส่วนที่สำคัญของ สิริแอกทีฟ ซึ่งสามารถยึดจับกับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะ โคเวเลนต์ที่มีความแข็งแรงสูง ทำให้มีความทนทานต่อการซักดีกว่าสีไดเร็กท์มาก

ข้อเสียของสีย้อมรีแอกทีฟ คือ มีราคาแพงเนื่องจากหมู่รีแอกทีฟยังคงมีราคาสูงอยู่ และ สีย้อมรีแอกทีฟยังสามารถทำปฏิกิริยากับด่างเกิดเป็นสีไฮโดรไลซ์ ซึ่งเมื่อเกิดไฮโดรไลซ์แล้วจะไม่สามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับเส้นใยเซลลูโลสได้อีก จึงจำเป็นต้องกำจัดออกโดยการซักล้างเพื่อป้องกัน ปัญหาสีตก ซึ่งในการกำจัดสีไฮโดรไลซ์นั้นต้องใช้ปริมาณน้ำและพลังงานสูง และต้องมีการบำบัดก่อน การปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ

2.4.2 สีย้อมไดเร็กท์ (direct dyes)

เป็นสารประกอบไอออนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีโมเลกุลและมีขนาดใหญ่ มีเฉดสีให้เลือกมาก ครอบคลุมเฉดสีแต่เฉดสีมีสีส้มไม่สดใส สามารถละลายน้ำได้ดีเนื่องจากมีหมู่ซัลโฟเนต ($-SO_3 Na$) ใน โครงสร้างโมเลกุลของสี โดยจัดเป็นสีย้อมชนิดประจุลบเนื่องจากหมู่ซัลโฟเนตเมื่อละลายน้ำจะแสดง ประจุที่เป็นลบ สีย้อมไดเร็กท์นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสที่ไม่ต้องการความคงทนของสีมากนัก

ข้อเสียของสีย้อมไดเร็กท์ คือ มีความคงทนต่อการซักต่ำ เนื่องจากโมเลกุลของสียึดกับ เส้นใยด้วยแรงทางกายภาพ เช่น พันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waals force) ซึ่ง มีความแข็งแรงไม่มาก จึงทำให้โมเลกุลของสีไดเร็กท์หลุดออกได้ง่ายเมื่อผ่านการซักหรือการทำ ความ สะอาด

2.4.3 สีย้อมแอซิด (acid dyes)

เป็นสีชนิดประจุลบ ละลายน้ำได้ดี เนื่องจากมีหมู่ซัลโฟเนต ($-SO_3 Na$) ในโครงสร้าง โมเลกุล มีลักษณะคล้ายกับสีไดเร็กท์แต่มีขนาดโมเลกุลที่เล็กกว่า โดยมีกลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะ ไอออนิก ส่วนมากใช้ในการย้อมเส้นใยโปรตีน มีเฉดสีตั้งแต่เฉดเหลือง แดง ม่วง น้ำเงิน น้ำตาล เป็นต้น

ข้อเสียของสีย้อมแอซิด คือ ดูดความชื้นจากอากาศได้ง่าย จึงต้องเก็บรักษาอย่างดี เนื่องจากความชื้นจะทำให้สีเสื่อมสภาพได้เร็ว

2.4.4 สีย้อมเบสิก (basic dyes)

เป็นสีที่เมื่อละลายน้ำแล้วจะแสดงประจุบวก ในโครงสร้างโมเลกุลของสี และใช้ส่วน ประจุบวกนี้จะเกิดพันธะกับเส้นใยที่แสดงประจุลบด้วยพันธะไอออนิก เริ่มแรกใช้ในการย้อมเส้นใย โปรตีน แต่ให้ความคงทนของสีต่อแสงในระดับที่ต่ำมาก สามารถย้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้เพียง เล็กน้อยหรือไม่ติดเลย ต่อมาจึงใช้ในการย้อมเส้นใยอะคริลิกเป็นหลัก เนื่องจากให้เฉดสีที่สดใส มีครบ ทุกเฉดสี และยังคงมีความคงทนของสีต่อแสงในระดับที่ดีมาก

ข้อเสียของสีย้อมเบสิก คือ เมื่อใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติจะไม่คงทนต่อการซักและแสง



2.4.5 สีย้อมดิสเพิร์ส (disperse dyes)

สีย้อมดิสเพิร์สเป็นสีที่ละลายน้ำได้น้อยมาก จะดูดซึมติดกับเส้นใยที่ไม่ชอบน้ำเท่านั้น โดยเริ่มแรกเป็นสีที่ผลิตขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสแอซีเทต ซึ่งเป็นเส้นใยสังเคราะห์ที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) เนื่องจากพบว่าสีย้อมสังเคราะห์ที่มีอยู่เดิมไม่สามารถนำมาย้อมเส้นใยชนิดนี้ได้ เพราะสีย้อมที่ละลายน้ำได้ดีจะไม่สามารถยึดติดกับเส้นใยที่ไม่ชอบน้ำ สีย้อมดิสเพิร์สในสมัยก่อนจึงถูกเรียกว่า สีแอซีเทต เนื่องจากใช้ย้อมเส้นใยแอซีเทตนั่นเอง สำหรับในกระบวนการผลิตสีย้อมดิสเพิร์ส นั้น จะมีการผสมสารช่วยกระจายตัว (dispersing agent) และบดสีให้เป็นผงละเอียด เพื่อให้สีสามารถกระจายตัวของสีในน้ำได้ดี ไม่ตกตะกอน สีย้อมดิสเพิร์สมีสมบัติคือ เป็นสีชนิดไม่มีประจุ มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อย (ต่ำกว่า 0.1%) สามารถระเหิดได้ มีเฉดสีที่สดใส และมีความคงทนต่อการซักฟอกในระดับดีถึงดีมาก ส่วนความคงทนของสีต่อแสงขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมี โดยสีย้อมดิสเพิร์สที่มีโครงสร้างแบบแอนทราควิโนนจะมีความคงทนของสีต่อแสงดีมากกว่า สีที่มีโครงสร้างแบบแอโซ เส้นใยที่สามารถย้อมได้ด้วยสีย้อมดิสเพิร์ส ได้แก่ เส้นใยแอซีเทต เส้นใยพอลิเอสเทอร์ เส้นใยไนลอน และเส้นใยอะคริลิก เป็นต้น

ข้อเสียของสีย้อมดิสเพิร์ส คือ สีจะซีดเมื่อถูกควั่นหรือแก๊สบางชนิด เช่น แก๊สไนโตรสออกไซด์

2.4.6 สีย้อมแวต (vat dyes)

เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ มีความคงทนดีที่สุดในบรรดาสีที่ใช้ในการย้อมเส้นใยเซลลูโลส โครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยหมู่คาร์บอนิลอย่างน้อย 2 หมู่ และระหว่างหมู่คาร์บอนิลต้องประกอบด้วยพันธะคู่ระบบคอนจูเกต (conjugated double bonds) ซึ่งในกระบวนการย้อมจะต้องเปลี่ยนโมเลกุลของสีแวตให้อยู่ในรูปของสารประกอบที่ละลายน้ำก่อนด้วยกระบวนการรีดักชัน (reduction) ซึ่งเรียกว่า สารประกอบลิวโค (leuco) จากนั้นเมื่อสีแวตที่อยู่ในรูปของลิวโคถูกดูดซึมสู่เส้นใยแล้วต้องถูกออกซิไดซ์ (oxidize) เพื่อเปลี่ยนกลับมาให้อยู่ในรูปเดิมที่ไม่ละลายน้ำ สีแวตเป็นสีย้อมที่มีความคงทนต่อแสงและการซักในระดับที่ดีมาก

2.4.7 สีย้อมซัลเฟอร์ (sulfur dyes)

เป็นสีที่มีโครงสร้างทางเคมีขนาดใหญ่และสลับซับซ้อนมาก จึงไม่ทราบโครงสร้างทางเคมีที่แน่นอน แต่มีลักษณะสำคัญคือ จะประกอบด้วยพันธะซัลไฟด์หรือพอลิซัลไฟด์ในโครงสร้างโมเลกุล สีซัลไฟด์เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ มีความคงทนต่อแสง นำมาใช้ในการย้อมเส้นใยเซลลูโลส โดยมีวิธีการย้อมคล้ายกับสีแวต คือต้องมีการผ่านกระบวนการรีดักชันเพื่อเปลี่ยนสีซัลเฟอร์ให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ และเมื่อสีเข้าสู่เส้นใยอย่างทั่วถึงแล้ว จึงเปลี่ยนสีซัลเฟอร์ให้กลับมาอยู่ในรูปเดิมที่ไม่ละลายน้ำโดยใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ข้อเสียของสีซัลเฟอร์ คือ มีสีไม่สดใส และมีความทนทานต่อสารซักฟอกประเภทคลอรีนได้ไม่ค่อยดีนัก



2.5 ระบบการบำบัดน้ำเสียในโรงงาน [13, 14]

2.5.1 ประเภทของน้ำเสีย น้ำเสียสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ น้ำเสียจากชุมชน และ น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

2.5.1.1) **น้ำเสียจากชุมชน** คือ น้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมในชีวิตประจำวันของประชาชนที่อาศัยอยู่ในชุมชนต่างๆ อาจกล่าวได้ว่าเป็นน้ำเสียสาธารณะที่หน่วยงานราชการควรเป็นผู้รับผิดชอบในการดำเนินการบำบัดน้ำเสียเหล่านี้ให้กลายเป็นน้ำสะอาดพอเพียงที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะได้

2.5.1.2) **น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม** คือ น้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมต่างๆ ของโรงงานอุตสาหกรรมทุกประเภท ซึ่งน้ำเสียโดยส่วนใหญ่มักเป็นน้ำล้างจากกระบวนการผลิตต่างๆ หรือภาชนะที่ใช้ในกระบวนการผลิต จึงทำให้น้ำเสียมีสิ่งเจือปนจากสารเคมีด้วยเสมอ

2.5.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย

วิธีการบำบัดน้ำเสียแต่ละประเภทขึ้นอยู่กับสิ่งเจือปนที่ปะปนอยู่ในน้ำเสียนั้นๆ ซึ่งกระบวนการบำบัดน้ำเสียจำแนกออกได้เป็นประเภท 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ กระบวนการทางกายภาพ กระบวนการทางเคมี และกระบวนการทางชีวภาพ โดยการจะเลือกใช้ระบบใดนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำเสีย ระดับการบำบัด และสภาพท้องถิ่น ซึ่งไม่ว่าจะเลือกใช้ระบบใดก็ตามควรเลือกระบบที่มีประสิทธิภาพที่สามารถบำบัดน้ำให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของน้ำที่สามารถปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะได้

2.5.2.1) **วิธีการบำบัดน้ำเสียทางกายภาพ (physical treatment)** เป็นวิธีการแยกสิ่งเจือปนออกจากน้ำเสีย ซึ่งสิ่งเจือปนที่สามารถบำบัดออกจากน้ำเสียได้โดยวิธีทางกายภาพ ได้แก่ ของแข็งขนาดใหญ่ เช่น เศษผ้า กระดาษ พลาสติก และเศษอาหาร เป็นต้น ของแข็งจำพวกกรวดและทราย หรือ ไขมันและน้ำมัน (ที่ไม่ละลายน้ำ) อุปกรณ์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียทางกายภาพ ได้แก่

ตะแกรงดักขยะ ใช้ในการแยกสารแขวนลอยออกจากน้ำเสีย แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ตะแกรงหยาบ และตะแกรงละเอียด ซึ่งตะแกรงทั้งสองนี้จะช่วยป้องกันไม่ให้เครื่องสูบน้ำเกิดการอุดตัน

ถังดักกรวดทราย เป็นถังขนาดเล็กที่ออกแบบให้สามารถดักจับกรวดทรายในน้ำเสียที่ไหลผ่าน ถังดักกรวดทรายเป็นสิ่งจำเป็นเนื่องจากสามารถช่วยป้องกันไม่ให้เครื่องสูบน้ำสึกกร่อนและเสียหาย จากการถูกการขัดสีจากกรวดหรือทราย ซึ่งถังดักกรวดทรายจะแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ถังแบบไหลแนวราบ และถังแบบเติมอากาศ

ถังดักไขมันและน้ำมัน ไขมันหรือน้ำมันที่ปนอยู่ในน้ำเสียจะลอยตัวอยู่เหนือน้ำ เนื่องจากเบากว่าน้ำ ซึ่งทางออกของถังดักไขมันจะจมอยู่ใต้น้ำ (ต่ำกว่าชั้นไขมันหรือน้ำมัน) สามารถดึงเฉพาะส่วนที่เป็นน้ำออกจากถังดักด้วยท่อรูปตัวที ส่วนไขมันหรือน้ำมันจะสะสมอยู่ในถังดักและสามารถถูกออกไปได้

2.5.2.2) การบำบัดทางเคมี (chemical treatment) เป็นวิธีการบำบัดโดยใช้กระบวนการทางเคมี เพื่อทำปฏิกิริยากับสิ่งเจือปนในน้ำ ซึ่งวิธีการนี้ใช้สำหรับน้ำเสียที่มีส่วนประกอบอย่างใดอย่างหนึ่ง ดังต่อไปนี้

มีกรดหรือด่างสูงเกินไป (ค่าพีเอชสูงหรือต่ำเกินไป)

มีโลหะหนักที่เป็นพิษ เช่น สังกะสี ดีบุก เป็นต้น

มีของแข็งแขวนลอยขนาดเล็กที่ตกตะกอนยาก

มีไขมันและน้ำมันที่ละลายน้ำ

มีไนโตรเจนหรือฟอสฟอรัสสูงเกินไป และมีเชื้อโรค

กระบวนการทางเคมีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียมียหลายประเภท ดังนี้

การปรับพีเอช พีเอชเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการควบคุมการบำบัดน้ำเสียเกือบทุกชนิด ซึ่งเป็นการเติมกรดหรือด่าง เพื่อปรับให้อยู่ในภาวะเหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียในขั้นตอนต่อไป น้ำเสียที่มีพีเอชต่ำ (เป็นกรด) สามารถทำให้เป็นกลางโดยใช้ปูนขาวหรือโซดาไฟ ส่วนน้ำที่มีค่าพีเอชสูง (เป็นด่าง) ทำให้เป็นกลางได้โดยการใส่กรด เช่น กรดกำมะถัน กรดเกลือ เป็นต้น

การตกตะกอน (coagulation) เป็นการเติมสารเคมีลงไปลงในน้ำเสีย เพื่อให้ตะกอนแขวนลอยขนาดเล็กที่ตกตะกอนได้ช้ามาก และไม่สามารถแยกตัวออกจากน้ำได้โดยวิธีการตกตะกอนตามธรรมชาติ เรียกว่า คอลลอยด์ (colloid) มาจับรวมตัวกันเป็นกลุ่มจนมีน้ำหนักมากและสามารถตกตะกอนได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งสารเคมีที่เติมลงไปนี้จะทำหน้าที่เสมือนตัวประสานให้อนุภาคมารวมตัวกัน โดยอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในกระบวนการนี้มี 2 ส่วน คือ ถังกวนเร็วและถังกวนช้า

1. ถังกวนเร็ว ถังอาจทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมหรือพลาสติกหรือวัสดุอื่นๆที่ทนต่อสารเคมีได้ ซึ่งขนาดของถังกวนจะขึ้นอยู่กับกระบวนการที่ใช้
2. ถังกวนช้า จะใช้ในกรณีต้องการสร้างตะกอนเม็ดใหญ่ ซึ่งถังกวนช้ามักมีเวลากักเก็บน้ำประมาณ 30-60 นาที ดังนั้นถังกวนช้าจึงมีขนาดใหญ่กว่าถังกวนเร็วเสมอ

การตกผลึก (precipitation) โลหะหนักที่พบในน้ำเสียมักอยู่ในรูปของสารละลาย ทำให้ไม่สามารถบำบัดออกจากน้ำได้ด้วยวิธีการตกตะกอนหรือการกรองเพียงลำพัง จึงต้องทำการเติมสารเคมีลงไปลงในน้ำเสีย เพื่อทำให้เกิดการตกผลึกของของแข็งที่มีความเป็นพิษเสียก่อน ซึ่งโลหะหนัก เช่น ทองแดง โครเมียม สังกะสี ที่ละลายอยู่ในน้ำเสียมักทำให้เกิดการตกผลึกได้โดยการเพิ่มค่าพีเอช ดังนั้นการเติมน้ำปูนขาวให้กับน้ำเสียจนมีพีเอชเพิ่มขึ้นถึงระดับที่เหมาะสม จะทำให้โลหะหนักเกิดการตกผลึกได้

การกำจัดไขมันหรือน้ำมันที่ละลายน้ำ ไขมันหรือน้ำมันที่ละลายในน้ำจนเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่สามารถกำจัดได้ด้วยวิธีทางกายภาพ จึงจำเป็นต้องแยกไขมันหรือน้ำมันออกจากน้ำด้วยวิธีทางเคมีเสียก่อน โดยสารเคมีที่ใช้อาจเป็นสารอนินทรีย์หรือสารอินทรีย์สังเคราะห์

ออกซิเดชัน-รีดักชัน (oxidation-reduction) ในกรณีที่ต้องการกำจัดมลพิษที่ละลายอยู่ในน้ำแต่ไม่สามารถใช้วิธีการตกผลึกได้ ก็อาจใช้กระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชันเพื่อเปลี่ยนมลพิษให้เป็นสารที่ไม่มีพิษ โดยการเติมสารเคมีซึ่งอาจเป็น สารออกซิแดนท์ (oxidant) หรือสารรีดักแตนท์ (reductant) อย่างใดอย่างหนึ่งไปทำปฏิกิริยากับสารมลพิษ

การฆ่าเชื้อโรค นิยมใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ต โอโซน และการเติมสารเคมีที่สามารถฆ่าเชื้อโรคได้

2.5.2.3) การบำบัดโดยกระบวนการทางชีวภาพ (biological treatment) เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีชีวภาพหรือโดยจุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรีย มาใช้กำจัดหรือลดสารอินทรีย์ต่างๆ ในน้ำเสียลงให้ได้มากที่สุด โดยอาศัยหลักการใช้จุลินทรีย์มาย่อยสลายแปรเปลี่ยนสภาพสารอินทรีย์ต่างๆ ให้กลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (ในระบบเติมอากาศ) หรือเป็นแก๊สมีเทน (ในระบบไม่เติมอากาศ) ความสกปรกเหล่านี้จะถูกใช้เป็นอาหารและเป็นแหล่งพลังงานของจุลินทรีย์ในถังเลี้ยงเชื้อ ทำให้น้ำเสียมีค่าความสกปรกตกลง

ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการใหญ่ คือ

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบใช้อากาศ (Aerobic Process) เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียที่ต้องมีการเติมออกซิเจนลงไป ในน้ำ เพื่อให้จุลินทรีย์ได้ใช้ออกซิเจนในการทำปฏิกิริยาทางชีวเคมีแล้วเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้ได้เป็น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ เซลล์ของจุลินทรีย์ และแอมโมเนีย

ข้อดี มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ (BOD) สูง สามารถบำบัดน้ำเสียให้มีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ ไม่มีกลิ่นเหม็น สามารถกำจัดไนโตรเจนได้ดีและมีหน่วยบำบัดขนาดเล็กกว่าระบบไม่ใช้อากาศ

ข้อเสีย มีราคาแพงและต้องมีการควบคุมดูแลรักษาระบบมากกว่าระบบไม่ใช้อากาศต้องเสียค่าใช้จ่ายสำหรับพลังงานไฟฟ้า ต้องใช้เครื่องจักรและอุปกรณ์มาก และยังก่อให้เกิดเสียงรบกวนรวมทั้งยังไม่ได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic process) เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียที่ไม่ต้องเติมออกซิเจนลงไป ในน้ำ อาจเรียกกระบวนการนี้ว่าระบบไร้อากาศหรือถังหมักสารอินทรีย์ในน้ำเสียจะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์กลุ่มที่ไม่ใช้ออกซิเจน จนได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สมีเทน

ข้อดี บำบัดน้ำเสียให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ มีตะกอนที่ต้องนำไปบำบัดและกำจัดน้อยได้ผลพลอยได้เป็นแก๊สมีเทนซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น ใช้เป็นแก๊สหุงต้ม ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น อีกทั้งยังใช้พลังงานน้อย

ข้อเสีย ต้องมีการควบคุมพีเอชในระบบให้ดี เริ่มต้นเดินระบบยากและใช้เวลานานคุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัดส่วนมากจะไม่ได้มาตรฐาน ($BOD \leq 20$ มก./ล) ไม่สามารถปล่อยออกสู่แหล่งน้ำได้ อาจมีกลิ่นเหม็นเนื่องจากแก๊สที่เกิดจากการย่อยสลาย เช่น แก๊สไข่เน่า



6555555555

2.6 วิธีการกำจัดสีข้อม [5, 15]

จากวิธีการบำบัดน้ำเสียข้างต้นถึงแม้จะสามารถลดสารอินทรีย์ได้ แต่ไม่สามารถกำจัดสีข้อมในน้ำเสียได้หมดจึงต้องมีกระบวนการกำจัดสีข้อม ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 วิธีหลัก คือ

2.6.1 การกำจัดสีข้อมด้วยเทคโนโลยีทางเคมี (chemical technology)

2.6.1.1) การตกตะกอนด้วยสารเคมี (chemical coagulation) เป็นการกำจัดสีข้อมด้วยการสร้างและรวมตะกอน โดยการทำให้สารแขวนลอยขนาดเล็ก (colloid) รวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ขึ้น และสามารถตกตะกอนได้ ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนใหญ่ๆ คือ การเติมสารก่อการจับก้อน (coagulant) และขั้นตอนการกวนอย่างช้าๆ เพื่อให้ตะกอนเกิดการรวมตัวกัน (flocculation) ซึ่งสารที่นิยมนำมาใช้เป็นสารเคมีสร้างตะกอน คือ สารส้ม ปูนขาว เป็นต้น

2.6.1.2) กระบวนการคลอรีนชัน (chlorination) เป็นการกำจัดสีข้อมด้วยการใช้คลอรีนเป็นสารออกซิไดซ์ ไปทำปฏิกิริยากับสีข้อมทำให้ปริมาณสีลดลงหรือสีหายไป ซึ่งคลอรีนที่ใช้จะอยู่ในรูปของก๊าซคลอรีน สารประกอบไฮโปคลอไรท์ และคลอรีนไดออกไซด์

2.6.1.3) กระบวนการโอโซนออกซิเดชัน (ozone oxidation) เป็นการกำจัดสีข้อมด้วยการใช้ออกซิเจน (O_3) เป็นสารออกซิไดซ์ ไปทำปฏิกิริยากับสีข้อม ทำให้พันธะของโมเลกุลที่ทำให้เกิดสี (chromophores) แตกออกกลายเป็นโมเลกุลเล็กและสีหายไป จึงทำให้สีของน้ำเสียลดลง ซึ่งโอโซนจะมีความสามารถในการออกซิไดซ์สูงกว่าคลอรีน แต่มีข้อเสีย คือ โอโซนเป็นแก๊ซพิษที่ก่อให้เกิดการระคายเคืองอย่างรุนแรง และโอโซนยังสามารถทำปฏิกิริยากับสารบางชนิดในน้ำ และเกิดสารบางชนิดขึ้นโดยสารเหล่านั้นเป็นสารก่อมะเร็ง

2.6.1.4) กระบวนการทางเคมีไฟฟ้า (electrochemical) เป็นการกำจัดสีข้อมด้วยการทำให้เลขออกซิเดชันของไอออนของโลหะที่ทำให้เกิดสีมีค่าเปลี่ยนไป และสามารถดูดซับกับสารแขวนลอยต่างๆที่อาจก่อให้เกิดสีด้วยตะกอนเบาในรูปของออกไซด์ ที่ได้จากการแตกตัวของอิเล็กโตรดให้เกิดการตกตะกอนขึ้น

2.6.2 การกำจัดสีข้อมด้วยเทคโนโลยีทางชีวภาพ (biological technology)

2.6.2.1) การดูดซับด้วยสาหร่าย (algae absorption) สาหร่ายสามารถกำจัดสีข้อมโดยการดูดซับสีเหล่านั้นภายใต้ภาวะที่มีแสง โดยจะเปลี่ยนโมเลกุลที่มีสีให้กลายเป็นโมเลกุลที่ไม่มีสี [16]

2.6.2.2) การย่อยสลายโดยเชื้อรา (fungi decomposition) การใช้อาหารในการกำจัดสีข้อมไม่ค่อยเป็นที่นิยม เนื่องจากมีข้อเสียในเรื่องความสะดวกในการใช้งาน การเก็บรักษา รวมถึงการขนส่ง

2.6.2.3) การย่อยสลายด้วยแบคทีเรีย (bacteria decomposition) แบคทีเรียที่มีความสามารถในการย่อยสลายสีข้อมมี 3 สกุล คือ *Pseudomonas sp.*, *Proteus sp.* และ



Klebsiella sp. [17] ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายสีย้อมมีหลายอย่าง เช่น ค่าความเป็นกรดต่าง ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม สารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย

2.6.3 การกำจัดสีย้อมด้วยเทคโนโลยีทางกายภาพ (physical technology)

2.6.3.1) การกรองด้วยเยื่อแผ่น (membrane technology) สามารถแบ่งได้ 3 วิธี คือ

ออสโมซิสผันกลับ เหมาะสำหรับการกำจัดสีย้อมที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งจะเป็นการนำน้ำออกจากของแข็งแขวนลอย หรือของแข็งที่ละลายน้ำ โดยให้ไหลผ่านรูพรุนขนาดเล็กและใช้ความดันเป็นแรงขับเคลื่อนให้ไหลผ่านตัวกรอง

อัลตราฟิวเตรชัน ซึ่งวิธีอัลตราฟิวเตรชันไม่นิยมใช้เนื่องจากมีขนาดรูของเยื่อกรองใหญ่จึงไม่สามารถกรองอนุภาคสีย้อมออกจากน้ำเสียได้

นาโนฟิวเตรชัน ใช้หลักการเดียวกันกับการออสโมซิสผันกลับ แต่การกรองผ่านแผ่นนาโนจะมีประสิทธิภาพมากกว่า เนื่องจากมีรูขนาดที่เล็กกว่า จึงสามารถแยกสีย้อมออกจากน้ำได้ดีกว่าโดยสามารถแยกสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำออกจากสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงได้

2.6.3.2) การดูดซับ (adsorption) [18] เป็นกระบวนการกักสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กที่ละลายอยู่ในน้ำให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่งซึ่งสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กเรียกว่า adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารที่ถูกดูดติด เรียกว่า adsorbent การเกาะจับของโมเลกุลสารบนตัวดูดซับนั้นอาจจะเกิดจากแรงทางกายภาพ เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waals force) หรือด้วยแรงทางเคมี หรืออาจจะเกิดจากทั้งสองอย่างรวมกัน ซึ่งสารดูดซับอาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

สารอินทรีย์ เช่น ดินเหนียว ถ่านกระดูก แมกนีเซียมออกไซด์ เป็นต้น

ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เป็นวัสดุที่มีความเป็นรูพรุนสูง และมีสมบัติในการดูดซับสารอินทรีย์ต่างๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในของเหลวหรือก๊าซได้ในปริมาณสูง เนื่องจากมีรูพรุนขนาดเล็ก (microporosity)

สารอินทรีย์สังเคราะห์ เช่น คาร์บอนกัมมันต์

2.6.3.2.1) ลักษณะการดูดซับ [19, 20]

การดูดซับเชิงกายภาพ เกิดเนื่องมาจากแรงภายในโมเลกุลที่ทำปฏิกิริยาระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ ซึ่งแรงดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอนที่เกี่ยวกับฟิสิกส์นั้น ยังรวมไปถึงแรงแวนเดอร์วาลส์ซึ่งเป็นแรงขับเชิงฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับเป็นแรงแรก ตลอดจนปฏิกิริยาจากการแพร่ (dispersing interactions) ปฏิกิริยาไดโพล-ไดโพล (dipole-dipole interactions) และพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonding) การดูดซับแบบนี้เป็นแบบหลายชั้น (multilayers) โดยทั่วไปจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำซึ่งการดูดซับมีพลังงานต่ำ การคายซับขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างสารดูดซับและสารถูกดูดซับถ้าแรงดึงดูดมีค่าน้อยการหลุดของสารถูกดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้ง่าย

ปฏิกิริยาไดโพล-ไดโพล (dipole-dipole interactions) เกิดในสารประกอบที่มีขั้ว ดังนั้นประจุของมันเกิดจากการรวมตัวของพลังงานอิสระของตัวที่ต่ำกว่า



ปฏิกริยาการแพร่ (dispersing interactions) เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอนและนิวเคลียสของโมเลกุลในระบบ

พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonding) เป็นกรณีพิเศษของปฏิกริยาไดโพล-ไดโพล ซึ่งอะตอมของไฮโดรเจนที่มีประจุบวก จึงสามารถดึงดูดกับอะตอมที่มีประจุลบได้

การดูดซับเชิงเคมี มีกลไกการดูดซับคล้ายกับการดูดซับเชิงกายภาพ แต่มีความแข็งแรงมากกว่าเนื่องจากเป็นพลังงานการดูดซับของพันธะเคมี ซึ่งการดูดซับเชิงเคมีเกิดจากการถ่ายโอนอิเล็กตรอนและการสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ อาจจะเป็นปฏิกริยาที่ไม่สามารถเกิดปฏิกริยาย้อนกลับได้เอง และมีค่าพลังงานการดูดซับสูง กระบวนการนี้มีความหนาของโมเลกุลเพียงชั้นเดียว (monolayer) และบริเวณที่เกิดปฏิกริยาเป็นบริเวณที่มีความจำเพาะเจาะจง ซึ่งการดูดซับทางเคมีที่อุณหภูมิสูงจะเกิดเร็วกว่าอุณหภูมิต่ำ

ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับเชิงฟิสิกส์และการดูดซับเชิงเคมีได้แสดงเอาไว้ในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับเชิงกายภาพและการดูดซับเชิงเคมี [19, 20]

การดูดซับเชิงกายภาพ	การดูดซับเชิงเคมี
โมโนเลเยอร์ หรือ มัลติเลเยอร์	โมโนเลเยอร์เท่านั้น
ไม่มีความจำเพาะเจาะจง	มีความจำเพาะเจาะจงสูง
มีความร้อนของการดูดซับต่ำ	มีความร้อนของการดูดซับสูง
มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิต่ำเท่านั้น	เกิดขึ้นได้ในช่วงอุณหภูมิกว้าง
ไม่มีการแตกตัวของชนิดของสารที่ถูกดูดซับ	อาจเกี่ยวข้องกับการแตกตัว
เกิดอย่างรวดเร็ว ไม่ก่อให้เกิดการกระตุ้น และเกิดการผันกลับได้	อาจเกิดได้ช้า เกิดการกระตุ้น และไม่เกิดการผันกลับ
ไม่มีการถ่ายเทของอิเล็กตรอน	มีการถ่ายเทของอิเล็กตรอนเหนี่ยวนำให้เกิดการสร้างพันธะ

2.6.3.2.2) ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ [21]

พื้นที่ผิว (surface area) พื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วในการดูดซับ และยังมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (adsorption capacity) คือ ตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กจะมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าขนาดใหญ่ นั่นคือ ยังมีพื้นที่ผิวในการดูดซับมาก ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มมากขึ้น ยกเว้นในกรณีที่ไม่เลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของตัวดูดซับ

ขนาดและการกระจายตัวของรูพรุน (pore size distribution) เป็นการวัดเปอร์เซ็นต์ที่ว่างของอนุภาค ซึ่งรูพรุนมี 3 ชนิด คือ

รูพรุนขนาดเล็ก (micropores) จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 อังสตรอม

รูพรุนขนาดกลาง (mesopores) จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 20-500 อังสตรอม

รูพรุนขนาดใหญ่ (macropores) จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 500 อังสตรอม

ซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคตัวถูกดูดซับที่มีขนาดเล็กที่สุด

โครงสร้างของรูพรุน (pore structure) โครงสร้างของรูพรุนมีส่วนช่วยเพิ่มพื้นที่ผิว ทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในกรณีตัวดูดซับไม่มีรูพรุน ความสามารถในการดูดซับจะขึ้นกับขนาดของวัตถุ คือ พื้นที่ผิวจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อขนาดลดลง ซึ่งจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้นด้วย แต่หากตัวดูดซับมีรูพรุนมากๆ พื้นที่ผิวในการดูดซับนั้นจะอยู่ในรูพรุน กรณีนี้ความสามารถในการดูดซับจะไม่ขึ้นกับขนาดของวัตถุ

ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดซับ (solubility) การดูดซับเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับถูกดึงออกจากรูพรุนแล้วไปเกาะติดบนผิวของตัวดูดซับ หากสารมีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี จะมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำมากกว่าสารที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อย การดูดซับจึงยากกว่าของสารที่ละลายน้ำได้น้อยหรือไม่ละลายน้ำ

น้ำหนักและขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (weight and molecular weight) มีผลต่อความสามารถในการดูดซับเมื่อน้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลจะทำให้ความสามารถในการละลายของสารที่ถูกดูดซับลดลง [22]

อุณหภูมิของสารละลาย (temperature) ขึ้นกับประเภทของการดูดซับ หากเป็นการดูดซับเชิงฟิสิกส์ ผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการดูดซับเป็นไปในทิศทางที่น้อยลงหรือคงที่แต่หากเป็นการดูดซับเชิงเคมี อุณหภูมิที่เพิ่มมากขึ้นจะมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้นด้วย เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนทำให้ช่วยเร่งการสร้างพันธะเคมีให้เร็วยิ่งขึ้น

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) เนื่องจากที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ จะมีไฮโดรเนียมไอออนในปริมาณมากกว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูง เช่น หากตัวดูดซับมีตำแหน่งที่มีประจุบวกและตัวถูกดูดซับมีประจุลบแล้วสารละลายมีความเป็นกรด-ด่างต่ำ มีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากตัวดูดซับสามารถแตกตัวเป็นไฮโดรเนียมไอออนได้ในปริมาณมาก และสามารถเกิดแรงดึงดูดกับประจุลบของตัวถูกดูดซับได้ดี เป็นต้น

2.7 ไอโซเทิร์มการดูดซับ (adsorption isotherm) [21, 23]

ไอโซเทิร์มการดูดซับ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับที่พื้นผิวต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลายที่ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ โดยทั่วไปสมการที่ใช้ในการอธิบายไอโซเทิร์มของการดูดซับมีหลายชนิด แต่ที่นิยมใช้กันมากในการศึกษา คือ

2.7.1 สมการแลงเมียร์ (langmuir isotherm)

แบบจำลองนี้ขึ้นอยู่กับสมมุติฐานที่ว่า ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนแน่นอนและมีตำแหน่งการดูดซับที่แน่นอน ในแต่ละโมเลกุลของตัวดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของตัวถูกละลายได้หนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ และต้องไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน

แบบจำลองไอโซเทิร์มการดูดซับของแลงเมียร์ที่ภาวะสมดุล สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Q_e = [(C_i - C_e)V]/W \quad (1)$$

เมื่อ	Q_e	=	ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับเมื่อเข้าสู่สมดุล (mg/g)
	C_i	=	ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมก่อนถูกดูดซับ (mg/l)
	C_e	=	ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมที่เหลือเมื่อเข้าสู่สมดุล (mg/l)
	V	=	ปริมาตรของสารละลายสีย้อม (l)
	W	=	น้ำหนักตัวดูดซับ (g)

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/Q_e กับ C_e เพื่อให้ได้กราฟเส้นตรงที่มีจุดตัดแกนเป็น $1/K_L Q_m$ และมีความชันเท่ากับ $1/Q_m$ ตามลำดับ

$$C_e/Q_e = C_e/Q_m + 1/K_L Q_m \quad (2)$$

เมื่อ	Q_m	=	ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับสูงสุด (mg/g)
	K_L	=	ค่าคงที่ของแลงเมียร์ (l/mg)

2.7.2 สมการฟรอนด์ลิชไอโซเทอรัม (freundlich isotherm)

คือ สมการที่ใช้อธิบายระบบที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งปัจจัยที่แสดงความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneity factor : $1/n$) สมการฟรอนด์ลิชแสดงได้ดังนี้

$$Q_e = x/m = K_f C_e^{1/n} \quad (3)$$

เมื่อ	C_e	=	ความเข้มข้นของสารละลายที่ย้อมที่เหลือหลังการดูดซับที่สมดุล (mg/l)
	x/m	=	ปริมาณของสีย้อมที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (g)
	K_f	=	ค่าคงที่ของฟรอนด์ลิช แสดงถึงความสามารถในการดูดซับ (l/g)
	n	=	ค่าคงที่สมดุลในการดูดซับ

จากสมการของฟรอนด์ลิช เมื่อใส่ลอการิทึม (logarithm) จะได้สมการ

$$\log Q_e = \log x/m = \log K_f + (1/n) \log C_e \quad (4)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log Q_e$ กับ $\log C_e$ ที่อุณหภูมิคงที่ จะได้กราฟเส้นตรงจุดตัดแกน สามารถนำมาหาค่า K_f ได้ และความชันของกราฟเป็น $1/n$

2.8 ไคติน-ไคโตซาน (chitin-chitosan) [24]

2.8.1 ลักษณะทั่วไปของไคโตซาน

ไคติน (chitin) เป็นสารชีวพอลิเมอร์พวกพอลิแซคคาไรด์ (polysaccharide) ที่พบมากเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส (cellulose) ซึ่งพบในองค์ประกอบของ เซลล์เชื้อรา สาหร่ายทะเล โปรโตซัว หอย ปลาหมึก และพวกอาร์โทรพอด ไคตินจะพบมากในผนังเซลล์ของเปลือกพวก อาร์โทรพอด ได้แก่ เปลือกปู เปลือกกุ้งฝอย และเปลือกกุ้งก้ามกราม ซึ่งไคตินมีโครงสร้างทางเคมี คล้ายเซลลูโลส แต่แตกต่างกันที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ของไคตินจะมีหมู่แอสตาไมด์ (acetamide group, NH-CO-CH_3) เกาะอยู่ แต่เซลลูโลสจะเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group, $-\text{OH}$) โดยทั่วไป ไคตินที่ได้จากแต่ละแหล่ง มีโครงสร้างและสมบัติแตกต่างกันโดยแบ่งตามลักษณะการเรียงตัวของเส้นใยได้ 3 ประเภท คือ

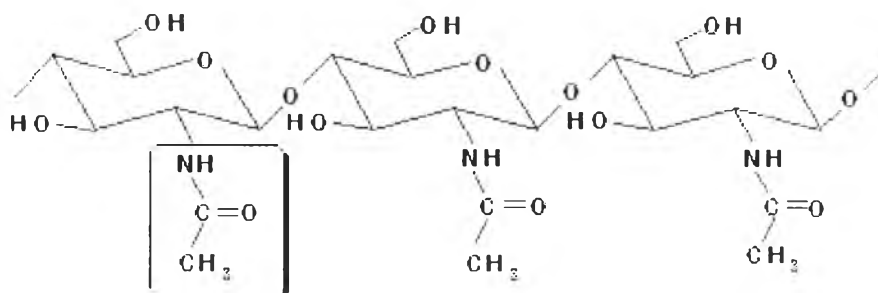
แบบอัลฟา มีการเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลในลักษณะสวนทางกัน มีความแข็งแรงสูง พบได้ในเปลือกหอยและแกนปลาหมึก

แบบเบตา มีการเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลในทิศทางเดียวกัน จึงจับกันได้ไม่ค่อยแข็งแรง มีความไวต่อปฏิกิริยาเคมีมากกว่าแบบอัลฟา พบมากในเปลือกปูและเปลือกกุ้งฝอย

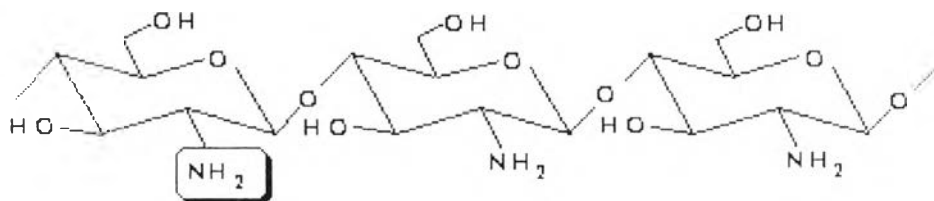
แบบแกมมา มีการเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลในลักษณะไม่เป็นระเบียบ พบยากในธรรมชาติ มีความแข็งแรงรองจากแบบอัลฟา พบในเห็ด รา และพืชชั้นต่ำ

ไคตินในธรรมชาติอยู่ร่วมกับโปรตีนและเกลือแร่ จึงจำเป็นต้องนำมากำจัดเกลือแร่ออกก่อน (deminerlization) โดยใช้กรดไฮโดรคลอริก จากนั้นนำไปกำจัดโปรตีนออก (deproteinization) โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือเอนไซม์โปรตีเอส จะได้ไคตินออกมา ซึ่งหากเป็นไคตินที่ได้จากเปลือกกุ้งหรือปูจะมีสีส้มปนอยู่ จึงต้องทำการละลายสีออกโดยนำไปแช่ในเอทานอล ซึ่งไคตินนั้นสามารถละลายได้ในกรดเข้มข้น เช่น กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟิวริก กรดฟอสฟอริก เป็นต้น แต่ไม่สามารถละลายได้ในตัวทำละลาย เช่น น้ำ กรดเจือจาง สารละลายต่างที่เข้มข้นหรือเจือจาง แอลกอฮอล์ และตัวทำละลายอินทรีย์อื่นๆ

ไคโตซาน (chitosan) [25, 26] อนุพันธ์ของไคตินที่เกิดจากปฏิกิริยากำจัดหมู่แอซิติล (degree of deacetylation, DD) ของไคตินด้วยต่างเข้มข้น ซึ่งในการกำจัดหมู่แอซิติลจะใช้วิธีทางเคมี ทำให้โครงสร้างทางเคมีของสารไคตินเปลี่ยนไปจากหมู่แอเซทาไมด์ (NH-CO-CH_3) เปลี่ยนเป็นหมู่แอมิโน ($-\text{NH}_2$) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 โดยโมโนเมอร์ของไคโตซานคือพอลิเมอร์ของ D-glucosamine (2-amino-deoxy-D-glucose) โดยทั่วไปหากหมู่แอซิติลถูกตัดหรือหลุดออกไปประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์จึงจะเรียกว่าไคโตซาน และหากหมู่แอซิติลถูกตัดหรือหลุดไปประมาณ 90-100 เปอร์เซ็นต์ จะเรียกว่า fully deacetylated chitosan [27] ซึ่งระดับการกำจัดหมู่แอซิติลสามารถบอกถึงปริมาณของหมู่แอมิโนที่เกิดขึ้นทั้งหมดได้ โดยหมู่แอมิโนเหล่านี้เป็นส่วนสำคัญของไคโตซานในการนำมาใช้ประโยชน์ เนื่องจากการมีหมู่แอมิโนในโครงสร้างของไคโตซาน ทำให้ไคโตซานสามารถเกิดประจุบวกบนหมู่แอมิโน และอาจพิจารณาได้ว่าเป็นพอลิเมอร์ที่มีประจุบวก (cationic polymer) จึงทำให้สามารถแตกตัวให้โปรตอนไปอยู่ในรูปของ $-\text{NH}_3^+$ มีผลเปลี่ยนแปลงทำให้ไคโตซานเป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุเป็นบวก ไคโตซานจึงสามารถละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างน้อยกว่า 6 ซึ่งส่วนมากจะนิยมใช้กรดแอซติก (acetic acid) และกรดฟอร์มิก (formic acid) ซึ่งการเป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุเป็นบวกของไคโตซาน ทำให้ไคโตซานมีสมบัติในการดูดซับสารจำพวกสารอินทรีย์รวมถึงไอออนของโลหะ และเนื่องจากสมบัติการดูดซับที่ดีนี้ จึงมีการนำไคโตซานมาใช้เป็นสารช่วยตกตะกอน



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของไคติน [24]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน [24]

2.8.2 สมบัติของไคโตซาน [28]

ความสามารถในการละลาย (solubility) จากการที่ไคโตซานมีหมู่เอมิโนอิสระในโครงสร้าง จึงช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายให้เพิ่มมากขึ้น โดยทั่วไปจะเตรียมได้ในสารละลายอินทรีย์ที่มีฤทธิ์เป็นกรด ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างน้อยกว่า 6 เช่น กรดแอสซิติค และกรดฟอร์มิก ซึ่งเป็นกรดที่นิยมใช้มากที่สุด นอกจากนี้ยังมีตัวทำละลายกรดอินทรีย์เจือจางบางชนิดที่สามารถนำมาใช้ เช่น กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก กรดเปอร์คลอริก และกรดฟอสฟอริก เป็นต้น

ความหนืด (viscosity) ปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดของไคโตซาน เช่น ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าความเข้มข้น ระดับการกำจัดหมู่แอสซิติล น้ำหนักโมเลกุล และอุณหภูมิ โดยทั่วไปแล้วเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น ค่าความหนืดของสารละลายไคโตซานจะมีค่าลดลง ส่วนค่าความเป็นกรด-ด่างที่เปลี่ยนไป มีผลต่อความหนืดของสารละลายไคโตซานขึ้นกับชนิดของกรดที่ใช้

น้ำหนักโมเลกุล (molecular weight) ความยาวของสายโซ่โมเลกุลไคโตซาน มีผลต่อความหนืด เช่น ไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จะมีสายโซ่โมเลกุลที่ยาวและสารละลายจะมีความหนืดมากกว่าไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งน้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานสามารถหาได้โดยวิธี เช่น การวัดความหนืด (viscometry) เทคนิคเจลเพอเมชันโครมาโทกราฟี (gel permeation chromatography) และการวัดการกระเจิงของแสง (light-scattering spectroscopy) เป็นต้น

ระดับการกำจัดหมู่แอสซิติล (degree of deacetylation : DD) เป็นตัวบ่งบอกถึงคุณภาพของไคโตซาน ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่สำคัญมากที่สุดเพื่อพิจารณาถึงการนำมาใช้งาน โดยระดับการกำจัดหมู่แอสซิติลเป็นการหาปริมาณหมู่เอมิโนอิสระที่มีอยู่ในไคโตซาน สามารถใช้ในการบ่งบอกถึงคุณลักษณะของไคโตซาน เช่น ความสามารถในการละลาย การย่อยสลายด้วยวิธีทางชีวภาพ และการทำปฏิกิริยากับสารเคมีต่างๆ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยหลายวิธี เช่น อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (infrared spectroscopy) อัลตราไวโอเลตสเปกโตรสโคปี (ultraviolet spectroscopy) การไทเทรต (titration) และการวิเคราะห์ธาตุ (elemental spectroscopy) เป็นต้น

2.8.3 การประยุกต์ใช้โคโตซานในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ [24, 29]

อุตสาหกรรมอาหาร โคโตซานมีสมบัติในการต่อต้านจุลินทรีย์และเชื้อราบางชนิด โดยมีกลไก คือ ประจุบวกของโคโตซานสามารถจับกับประจุลบของเซลล์เมมเบรนของจุลินทรีย์ได้ ทำให้เกิดการรั่วไหลของโปรตีนและสารอื่นๆของเซลล์ ทำให้เกิดความไม่สมดุลของเซลล์ จึงสามารถทำลายเซลล์จุลินทรีย์ต่างๆได้ ซึ่งในหลายประเทศได้ขึ้นทะเบียนให้โคตินและโคโตซานเป็นสารที่ใช้เติมในอาหารได้ โดยนำไปใช้เป็นสารกักตุน สารช่วยรักษากลิ่นและรส สารเคลือบอาหาร ผัก และผลไม้ เพื่อรักษาความสดหรือผลิตในรูปแบบฟิล์มที่รับประทานได้ (edible film) สำหรับบรรจุอาหาร

อุตสาหกรรมกำจัดของเสีย โคโตซานซึ่งมีประจุบวกจึงสามารถจับกับโปรตีนและไขมันได้ดี ซึ่งโปรตีนที่ได้สามารถนำมาแยกเอาไปใช้เป็นอาหารสัตว์ได้ต่อไป นอกจากนี้โคโตซานยังสามารถดูดซับไอออนของโลหะหนักและโมเลกุลของสีย้อมได้ จึงได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียอย่างแพร่หลาย

ด้านอาหารเสริม โคโตซานสามารถช่วยลดคอเลสเตอรอลและไขมันในเส้นเลือดได้ โดยโคโตซานจะเข้าไปจับกับคอเลสเตอรอล ทำให้ร่างกายไม่สามารถดูดซึมไปใช้ได้ หรือดูดซึมได้น้อยลง และเนื่องจากมูเซอีนนั้นไม่สามารถย่อยโคตินและโคโตซานออกได้ทั้งหมด จึงทำให้โคตินและโคโตซานถูกขับออกมาพร้อมกับอุจจาระ รวมทั้งคอเลสเตอรอลและไขมันส่วนเกินก็จะถูกขับออกมาด้วยเช่นกัน แต่มีข้อเสียคือ โคโตซานยังสามารถจับวิตามินที่ละลายได้ดีในไขมัน คือ วิตามินเอ วิตามินดี วิตามินอี และวิตามินเค ซึ่งอาจทำให้ร่างกายขาดวิตามินเหล่านี้ได้

ด้านอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง โคโตซานถูกนำไปผสมในเครื่องสำอางสำหรับผิวแห้งและเส้นผม ซึ่งประจุบวกของโคโตซานสามารถเกาะกับประจุลบของผิวแห้งและเส้นผมได้เป็นอย่างดี จึงได้มีการนำไปใช้ในเครื่องสำอางที่มีส่วนผสมของกรดผลไม้ธรรมชาติ ที่เรียกว่า กรดแอลฟาไฮดรอกซี (alpha hydroxyl acid, AHA) ซึ่งกรดเหล่านี้จะกระตุ้นให้ผิวแห้งเก่าหลุดลอกเพื่อสร้างเซลล์ผิวใหม่ ทำให้ผิวดูอ่อนเยาว์ขึ้น ส่วนในการบำรุงเส้นผมนั้น โคโตซานจะก่อตัวเป็นฟิล์มเคลือบเส้นผมเอาไว้ทำให้เส้นผมคงสภาพนุ่มสลวยไม่เสียง่าย

ด้านทางการแพทย์ โคตินและโคโตซานได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในทางการแพทย์และเภสัชภัณฑ์ ซึ่งมีงานวิจัยพบว่า โคตินและโคโตซานมีสมบัติในการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (antimicrobial activity) และยังเป็นสารแอนติออกซิแดนซ์ (antioxidant activity) นอกจากนี้ยังมีสมบัติเป็นสารก่อฟิล์ม (film forming agent) ซึ่งสามารถนำมาเตรียมเป็นแผ่นฟิล์มที่มีลักษณะบางและใส เพื่อใช้ในการปิดบาดแผลเพื่อรักษา เช่น แผลผ่าตัด แผลไฟไหม้ แผลน้ำร้อนลวก เป็นต้น ซึ่งจะช่วยป้องกันการติดเชื้อของแผล และกระตุ้นให้มีการผลิตและสร้างเซลล์ใหม่ ซึ่งมีสมบัติที่พิเศษมากกว่าพลาสติกปิดแผลโดยทั่วไป นอกจากนี้ยังนำมาใช้ในการผลิตหนังเทียม ผลิตภัณฑ์ไขมันในเลือด ใช้เคลือบยาเม็ดแคปซูล ใช้เป็นสารตัวกลางในการปลดปล่อยยาออกมาอย่างช้าๆ ใช้ในการควบคุมคอเลสเตอรอล ใช้ในการยับยั้งการเกิดมะเร็งหรือต้านไวรัส และการทำคอนแทคเลนส์ เป็นต้น

ด้านอุตสาหกรรมเกษตร เนื่องจากโคโคซานมีสมบัติเป็นสารก่อฟิล์ม และเจลใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น สามารถนำมาฉีดพ่นเคลือบผิวเพื่อรักษาอายุของผลผลิตทางการเกษตรและมีสมบัติในการยับยั้งเชื้อราและแบคทีเรียบางชนิดที่ก่อโรคแก่พืชได้ด้วย

2.9 สารกึ่งตัวนำไฟฟ้า [30, 31]

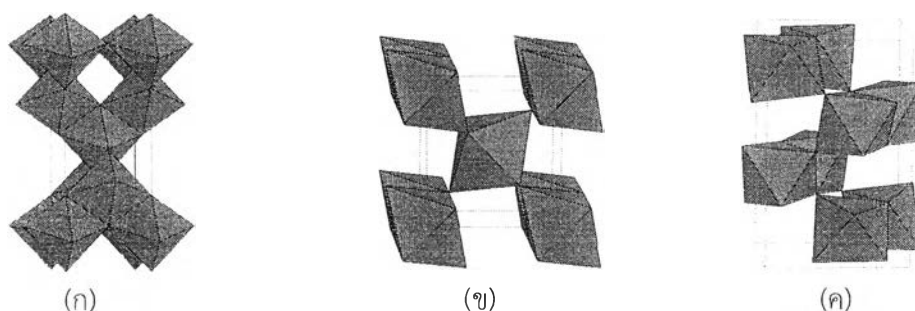
สารกึ่งตัวนำเป็นสารที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้า โดยมีสมบัติอยู่ระหว่างตัวนำและฉนวนไฟฟ้า โดยจะมีอิเล็กตรอนวงนอก 4 ตัว เช่น ซิลิกอน เยอรมันเนียม และเทลลูเรียม เป็นต้น ซึ่งสารกึ่งตัวนำที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงจะอยู่ในรูปของโลหะออกไซด์หรือซัลไฟด์ เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide, TiO_2) แคดเมียมซัลไฟด์ (cadmium sulfide, CdS) และซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide, ZnO) โดยสารกึ่งตัวนำจะมีแถบพลังงานที่น่าสนใจอยู่สองแถบ คือ แถบวาเลนซ์ (valence band, VB) และแถบการนำไฟฟ้า (conduction band, CB) แถบพลังงานทั้งสองนี้จะถูกแยกจากกันโดยมีแถบช่องว่างพลังงาน (band gap) กั้นอยู่ ซึ่งปริมาณพลังงานที่ใช้กระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำไฟฟ้า เรียกว่า พลังงานช่องว่างของแถบอิเล็กตรอน (band gap energy, E_g) มีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ (ev) ซึ่งเมื่ออิเล็กตรอน (electron, e^-) ที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ได้รับพลังงานโฟตอนจากแสง ($h\nu$) ที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสมและมีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานช่องว่างของแถบ จะทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ถูกกระตุ้นไปยังแถบการนำไฟฟ้า ในขณะที่เดียวกันที่บริเวณแถบวาเลนซ์ก็จะเกิดโฮล (hole, h^+) ซึ่งมีประจุบวกขึ้นซึ่งปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮล (electron-hole pair, e^-/h^+) ที่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระไปมาระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบการนำไฟฟ้า

2.10 ไทเทเนีย (titanium dioxide, TiO_2)

ไทเทเนียเป็นสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า (semiconductor) ประเภท N-type ที่อยู่ในรูปออกไซด์ของโลหะทรานซิชัน มีลักษณะโดยทั่วไป คือ มีสีขาว มีความทึบแสง และเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ จัดเป็นสารมีสีที่ปลอดภัย ไม่ใช่สารที่อยู่ในกลุ่มของสารก่อมะเร็งหรือเป็นสารพิษ จึงทำให้มีประโยชน์สำหรับการใช้งานได้หลากหลาย เนื่องจากมีความเสถียรสูง ไม่มีกลิ่น ราคาถูก มีพื้นที่ผิวสูง มีความสามารถในการดูดซับ มีความคงตัวไม่เปลี่ยนรูป มีความสามารถในการละลายต่ำ อีกทั้งยังไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติ และยังมีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (photocatalyst) ที่มีประสิทธิภาพ จึงนิยมใช้ไทเทเนียในกระบวนการโฟโตแคตาไลติกส์ (photocatalytic) และเนื่องจากไทเทเนียมีแถบช่องว่างพลังงาน (band gap) ประมาณ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมากกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆโดยส่วนใหญ่ ทำให้ต้องใช้พลังงานแสงในช่วงของแสงยูวี ($\lambda \leq 400$ นาโนเมตร) ที่มีความยาวคลื่นที่ให้พลังงานมากกว่าแถบช่องว่างพลังงาน (band gap) ในการกระตุ้นให้เกิดเป็นอิเล็กตรอนและโฮล (hole)

2.10.1 โครงสร้างผลึกและสมบัติ

ไทเทเนียมจะมีเฟสของผลึกอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ คือ แบบแอนาเทส (anatase) และแบบรูไทล์ (rutile) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนอล (tetragonal) และแบบบรูคไคท์ (brookite) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (orthorhombic) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยโครงสร้างผลึกทั้งแอนาเทส รูไทล์ และบรูคไคท์ สามารถแสดงได้ในรูปของออกตะฮีดรอล (octahedral) (TiO_2) ที่เป็นปริมิตฐานสี่เหลี่ยมสองอันประกบกัน โดยโครงสร้างผลึกทั้ง 3 ชนิดนี้ มีความแตกต่างกันเนื่องมาจากการบิดตัวของแต่ละออกตะฮีดรอลที่เรียงต่อกัน และจากรูปแบบการเรียงตัวของออกตะฮีดรอล ซึ่งโครงสร้างผลึกแบบแอนาเทสเกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ส่วน ยอดของแต่ละออกตะฮีดรอล ในขณะที่โครงสร้างผลึกแบบรูไทล์เกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ส่วนขอบของแต่ละออกตะฮีดรอล และโครงสร้างผลึกบรูคไคท์เกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ทั้งส่วนยอดและส่วนขอบของแต่ละออกตะฮีดรอล



รูปที่ 2.3 เฟสของผลึกไทเทเนียม [32]

(ก) แบบแอนาเทส (anatase) (ข) แบบรูไทล์ (rutile) และ (ค) แบบบรูคไคท์ (brookite)

ตารางที่ 2.6 สมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ในเฟสผลึกต่างๆ [33]

สมบัติ	แอนาเทส	รูไทล์	บรูคไคท์
น้ำหนักโมเลกุล	79.890	79.890	79.890
ความหนาแน่น (g/cm^3)	3.895	4.2743	4.123
ความถ่วงจำเพาะ	3.90-4.10	3.90-4.10	3.90-4.10
จุดหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)	1,835	1,800-1,900	1,800-1,900
จุดเดือด ($^{\circ}\text{C}$)	2,500-3000	2,500-3000	2,500-3000
โครงสร้างผลึก	เทตระโกนอล	เทตระโกนอล	ออร์โธโรมบิก

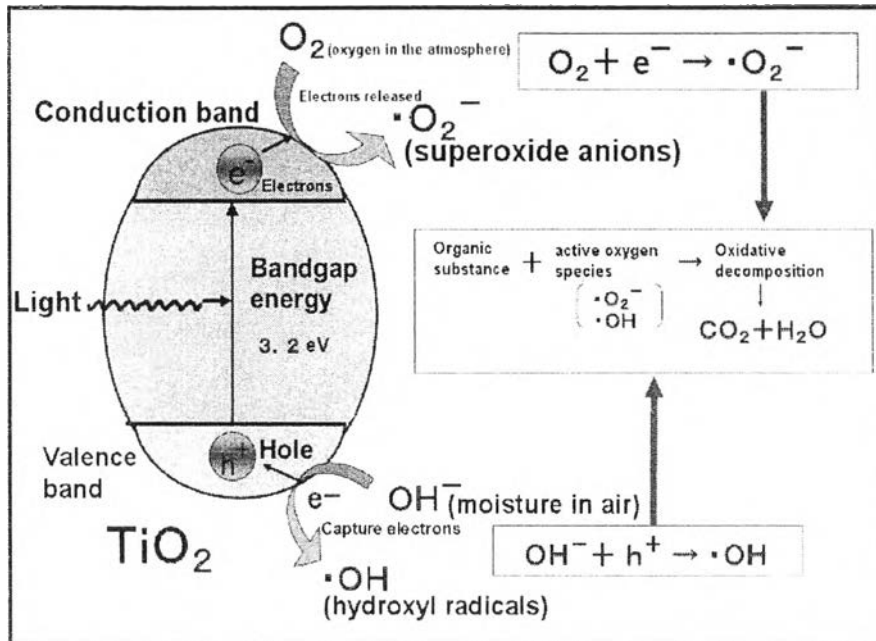
จากการที่ไทเทเนียมมีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน ส่งผลให้มีสมบัติและการนำไปใช้งานที่แตกต่างกัน โดยไทเทเนียมที่มีเฟสแบบแอนาเทสนั้น มีพลังงานของแถบช่องว่างพลังงาน (band gap) เท่ากับ 3.23 อิเล็กตรอนโวลต์ ในขณะที่แบบรูไทล์มีค่าเท่ากับ 3.02 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ โดย

โครงสร้างผลึกแบบแอนาเทส สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 384 นาโนเมตร ในขณะที่โครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 410 นาโนเมตร จึงมีผลทำให้ไทเทเนียที่มีโครงสร้างผลึกแบบแอนาเทส มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่า มีความสามารถในการดูดติดผิวได้ดี และมีการรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮลที่อัตราต่ำกว่า ไทเทเนียที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์และผลึกแบบบรูคไคท์ จึงนิยมใช้ไทเทเนียที่มีผลึกแบบแอนาเทสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงมากกว่าแบบอื่น ในขณะที่โครงสร้างแบบรูไทล์มีค่ารีแฟรคทีฟ (refractive Index) สูงกว่าโครงสร้างแบบแอนาเทส และยังมีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง จึงเหมาะที่จะใช้เป็นตัวเติมเพื่อสะท้อนแสง ส่วนโครงสร้างแบบบรูคไคท์นั้นการทำให้บริสุทธิ์ทำได้ยาก จึงยังไม่มี การศึกษากันมากนัก โดยโครงสร้างของไทเทเนียทั้ง 3 เฟสนี้ จำเป็นต้องผ่านกระบวนการทางเคมี เพื่อที่จะนำเอาสารปนเปื้อนออกก่อน ให้เหลือไว้เพียงแคไทเทเนียเท่านั้น

2.10.2 กลไกการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนีย [34]

กลไกการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเริ่มจากสารกึ่งตัวนำไทเทเนียถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีพลังงานมากกว่าแถบช่องว่าง ทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ไปยังแถบการนำไฟฟ้า เกิดเป็นอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบ และโฮลซึ่งมีประจุบวก กระจายอยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำไทเทเนีย โดยโฮล (h^+) จะเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำและหมู่ไฮดรอกซิล (OH) เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) ได้เป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (hydroxyl radical, OH^{\cdot}) ซึ่งเป็นตัวออกซิแดนท์ (oxidant) ที่แรงในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ส่วนอีกทางด้านหนึ่งจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (reduction) ที่แถบการนำไฟฟ้า (conduction band) โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากแถบการนำไฟฟ้าไปทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (O_2) ที่ถูกทำให้เกิดเป็นไอออนของซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล ($O_2^{\cdot-}$) ซึ่งเป็นตัวออกซิแดนท์ ที่แรงมาก สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆได้ และเมื่อซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลแอนไอออน ($O_2^{\cdot-}$) ทำปฏิกิริยากับโฮล (h^+) จะได้เป็นเปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล (HO_2^{\cdot}) ในน้ำ และเมื่อเปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล (HO_2^{\cdot}) รวมกันจะได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และออกซิเจน (O_2) ซึ่งไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นี้ยังสามารถรับอิเล็กตรอนจากแถบการนำ หรือจากซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลแอนไอออน เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลได้ ดังนั้นไฮดรอกซิลเรดิคัลอาจจะถูกสร้างขึ้นโดยปฏิกิริยารีดักชันได้เช่นเดียวกัน และผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำนั้น จะได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งสามารถระเหยและสลายไปได้ในอากาศ และน้ำออกมา ซึ่งในกระบวนการนี้สามารถย่อยสลายเชื้อแบคทีเรีย เชื้อรา และเชื้อไวรัสได้ ดังนั้นจึงได้มีการนำอนุภาคไทเทเนียมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย กระบวนการบำบัดอากาศเสีย และการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย เป็นต้น





รูปที่ 2.4 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกส์ของตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงไทเทเนีย [35]

2.10.3 การสังเคราะห์ไทเทเนีย

ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถสังเคราะห์ได้จากหลายวิธี เช่น วิธีโซลเจล (sol-gel) วิธีไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal) การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (electrospinning) และการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วไฟฟ้าแอโนด (anodic oxidation) เป็นต้น ซึ่งการสังเคราะห์ที่หลากหลายวิธีนั้นนำไปสู่โครงสร้างไทเทเนียแบบต่างๆ [36] ซึ่งวิธีโซลเจลเป็นวิธีการสังเคราะห์ชนิดหนึ่งที่ได้รับคามนิยมอย่างมาก

วิธีโซลเจล (sol-gel method) [37]

เป็นวิธีการสังเคราะห์ทางเคมีแบบเปียก (wet process) เนื่องจากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่ำ มีราคาถูก และสารที่ได้มีความบริสุทธิ์สูงมาก โดยไทเทเนียที่เตรียมได้จากวิธีโซลเจลจะมีขนาดอนุภาคในระดับนาโน ในการสังเคราะห์สารด้วยวิธีนี้จะเริ่มจากการใช้สารตั้งต้นที่อยู่ในสภาพของสารละลายมาผสมเข้ากัน แล้วสามารถทำปฏิกิริยากันในระดับโมเลกุล ทำให้เกิดโมเลกุลที่เป็นสายโซ่ยาวหรือเกิดอนุภาคที่มีขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ในของเหลวที่เรียกว่า โซล (sol) และเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มมากขึ้น ความหนืดของสารละลายก็จะสูงขึ้นทำให้กลายเป็นสารกึ่งของเหลวที่เรียกว่า เจล (gel) โดยปฏิกิริยาที่สำคัญในกระบวนการเกิดโซลเจล ประกอบด้วย 3 ปฏิกิริยาได้แก่ ไฮโดรไลซิส (hydrolysis) การควบแน่นด้วยน้ำ (water condensation) และการควบแน่นด้วยแอลกอฮอล์ (alcohol condensation) ซึ่งปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่ออัตราการ

เกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโซลเจล ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโมลของน้ำและโลหะ และอุณหภูมิ โดยสารตั้งต้นที่นิยมใช้ในกระบวนการโซลเจล เป็นสารประกอบโลหะและกึ่งโลหะที่ล้อมรอบด้วยลิแกนด์ที่วงโคจรเกิดการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งวิธีโซลเจลเมื่อเข้าสู่กระบวนการทำให้แห้งจะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายรูปแบบ ตัวอย่างเช่น รูปของผงละเอียดฟิล์มบาง เส้นใยและวัสดุที่เป็นก้อน เป็นต้น

2.10.4 ประโยชน์ของไทเทเนีย [38]

ความสามารถในการต้านแบคทีเรีย นอกจากไทเทเนียถูกเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจะสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้แล้ว ยังสามารถช่วยในการย่อยสลายซากของแบคทีเรียอีกด้วย ซึ่งไทเทเนียเป็นสารเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าสารต้านแบคทีเรียชนิดอื่นๆ และจะเกิดปฏิกิริยาเมื่อมีเซลล์แบคทีเรียมาสัมผัสกับพื้นผิวของสารตัวเร่ง หรือเมื่อมีแบคทีเรียแพร่กระจายไปบนพื้นผิวนอกจากนี้สารพิษที่เกิดจากการตายเซลล์ก็จะถูกทำลายจากการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียด้วย และที่สำคัญไทเทเนียจะไม่เกิดการเสื่อมประสิทธิภาพหลังจากที่ทำลายเชื้อแบคทีเรียทำให้มีประสิทธิภาพการใช้งานที่ยาวนาน โดยทั่วไปเมื่อก้าวถึงประสิทธิภาพต้านยับยั้งหรือการต่อต้านการติดเชื้อ ไทเทเนียจะมีความสามารถมากกว่าคลอรีน 3 เท่าและมากกว่าไอโอดีน 1.5 เท่า

ความสามารถด้านการกำจัดกลิ่น ไฮดรอกซิลเรดิคอลที่เกิดจากปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงของไทเทเนียสามารถกำจัดโมเลกุลของสารอินทรีย์ ที่ระเหยอยู่ในอากาศ (volatile Organic compounds หรือ VOCs) ซึ่งเป็นสาเหตุของกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ได้ โดยการทำลายพันธะระหว่างโมเลกุลของสารเหล่านั้น ทำให้สารอินทรีย์ที่ระเหยอยู่ในอากาศแตกออกเป็นโมเลกุลเดี่ยว จึงไม่สามารถทำอันตรายหรือส่งผลต่อร่างกายมนุษย์ได้ นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพในการฟอกอากาศให้สะอาด โดยการกำจัดโมเลกุลของสารที่ทำให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ ตัวอย่างเช่น กลิ่นบุหรี กลิ่นยาสูบ สารประเภทฟอร์มาลดีไฮด์ ไนโตรเจนไดออกไซด์ กลิ่นอูจจาระ น้ำมันเชื้อเพลิง และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอีกหลายชนิด

ความสามารถในการฟอกอากาศ ไทเทเนียที่ถูกเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจะสามารถกำจัดสารที่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศได้ เช่น สารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ ควันบุหรี รวมถึงสารระเหยต่างๆที่ออกมาจากอาคาร รวมทั้งโครงสร้างของตึกได้ นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันเขม่า และคราบดำต่างๆที่จะเกาะผนังบ้าน รวมถึงช่วยกำจัดสารประเภทที่ทำลายชั้นบรรยากาศ เช่น แก๊ซคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) และแก๊ซเรื้อนกระจกประเภทอื่น รวมถึงแก๊ซไนโตรเจนไดออกไซด์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ทั้งทางตรงและทางอ้อมเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสง ในบริเวณที่มีมลภาวะสูง ไทเทเนียจะช่วยลดสารก่อมลภาวะเหล่านี้ได้

มีสมบัติในการทำความสะอาดตัว ป้องกันการเกิดหยดน้ำและคราบ โดยเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงไทเทเนียจะสามารถทำลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอน รวมทั้งฝุ่นผงต่างๆได้ ซึ่งเมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับผนัง ทำให้ผนังที่มีการเคลือบด้วยไทเทเนียมีสมบัติในการทำความสะอาดตัวเอง เมื่อฝน



ตกลงมาคราบสกปรกและฝุ่นละอองต่างๆ จะถูกชะล้างออกจากผนังได้อย่างง่ายดาย ทำให้ผนังตึกดูสะอาดและใหม่อยู่เสมอ

ความสามารถในการทำน้ำสะอาด สารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (ไทเทเนีย) ร่วมกับการกระตุ้นด้วยรังสียูวี สามารถกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ ที่ก่อให้เกิดมลภาวะให้กลายเป็นสารที่ไม่เป็นอันตราย เช่น เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้ รวมถึงยังมีสมบัติในการต้านทานแบคทีเรีย และช่วยฆ่าแบคทีเรียหลายชนิดรวมถึงไวรัส ในขั้นตอนที่สองของการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งเทคโนโลยีนี้เป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์อันตรายต่างๆ

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.11.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสลายตัวของสีย้อมโดยใช้ไทเทเนีย

Saquib และคณะ [39] ได้ทำการศึกษาการสลายตัวของสีย้อม 2 ชนิด คือ Fast Green FCF และ Patent Blue VF โดยใช้สารแขวนลอยของไทเทเนียที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ Degussa P-25 (75% anatase 25% rutile) ขนาด 20 nm Hombikat UV-100 (100% anatase) ขนาด 5 nm และ PC 500 (100% anatase) ขนาด 5-10 nm จากผลการศึกษาที่ได้พบว่า สีย้อมชนิด Fast Green FCF สลายตัวได้ดีที่สุดเมื่อใช้ไทเทเนียประเภท Hombikat UV-100 ส่วนสีย้อมชนิด Patent Blue VF สลายตัวได้ดีที่สุดเมื่อใช้ไทเทเนียประเภท Degussa P-25 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงแต่ละชนิด มีความสามารถในการสลายตัวของสีเฉพาะตัวแตกต่างกัน และการเพิ่มปริมาณของสารตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงมีผลต่ออัตราการสลายตัวของสีย้อมที่เพิ่มมากขึ้นด้วย

Bizani และคณะ [40] ได้ศึกษาการสลายตัวของสีย้อมทางการค้า 2 ชนิด คือ Cibacron Red FNR และ Cibacron Yellow FN2R โดยใช้สารแขวนลอยไทเทเนีย ซึ่งการสลายตัวของสีย้อมเป็นไปตามแบบจำลองของแลงเมียร์ โดยใช้ไทเทเนียที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ Degussa P-25 และ Hombikat UV-100 จากผลการทดลอง พบว่าไทเทเนียแบบ Degussa P-25 สามารถสลายตัวสีย้อมภายใน 100 นาที ในขณะที่ Hombikat UV-100 สามารถสลายตัวสีย้อมอย่างสมบูรณ์ในเวลาอย่างน้อยกว่าคือ 50 นาที ของการให้แสงทั้งนี้เพราะ Hombikat UV-100 มีพื้นที่ผิวที่สูงกว่า Degussa P-25 จึงทำให้มีการสลายตัวของสีย้อมได้เร็วกว่านอกจากนี้ยังพบว่า อัตราการสลายตัวของสีย้อมเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไทเทเนียถึงขีดหนึ่ง หลังจากนั้นอัตราการสลายตัวของสีจะลดลง ประสิทธิภาพการสลายตัวของสีลดลงเพราะมีอนุภาคแขวนลอยของ ไทเทเนียที่มากเกินไป จึงมีผลทำให้เกิดความทึบแสงขึ้น มีผลทำให้เกิดการสะท้อนของแสงมากขึ้น นอกจากนี้การศึกษาผลของ pH ของสารละลายสีย้อมต่อการสลายตัวของสีย้อม พบว่า ไทเทเนียมีการดูดซับสีย้อมได้ดีที่ค่า pH ต่ำ เนื่องจากพื้นผิวของอนุภาคไทเทเนียจะแสดงประจุบวกในภาวะสารแขวนลอยที่เป็นกรด และโมเลกุลของสีย้อมทั้งสองชนิดแสดงประจุที่เป็นลบ จึงทำให้เกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตระหว่าง ประจุบวก

บริเวณผิวโทเทเนียและประจุลบของสีย้อมได้ดี มีผลทำให้การสลายตัวของสีย้อมที่ภาวะกรดดีกว่าที่ภาวะต่างหรือเป็นกลาง

Iamamornphan และคณะ [41] ได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์การสลายสีย้อมแอซิดผสม 3 สี (สีเหลือง สีแดง สีนํ้าเงิน) ด้วยปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยแสงโดยใช้โทเทเนียเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้แสงยูวี โดยการทดลองที่ภาวะความเข้มข้นของสีย้อมในอัตราส่วนเท่ากัน (1:1:1) โดยวัดปริมาณสีย้อมผสมด้วยเครื่องยูวีวิสสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ จากผลการทดลอง พบว่า เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นสามารถย่อยสลายสีได้เพิ่มขึ้น โดยที่เวลา 180 นาทีเป็นเวลาที่สามารถสลายสีย้อมได้ดีที่สุด และเมื่อความเข้มข้นของสีผสมเพิ่มขึ้นจะมีผลให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีลดลง เนื่องจากความเข้มข้นของสีที่เพิ่มขึ้นเป็นอุปสรรคต่อการส่องผ่านของแสงยูวีและมีปริมาณโมเลกุลของสีเพิ่มมากขึ้น อัตราการสลายตัวของสีจากมากไปหาน้อย คือ สีนํ้าเงิน สีแดง และสีเหลือง ตามลำดับ และพบว่าปฏิกิริยาการสลายตัวของสีย้อมผสมเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ตามแบบจำลองของแลงเมียร์

2.11.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับสีย้อมโดยการใช่ไคโตซาน

Mahmoodi และคณะ [42] ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมแอนไอออนิก 2 ชนิดคือ acid green 25 (AG25) และ direct red 23 (DR23) จากท่อนํ้าทิ้งอุตสาหกรรมสิงทอโดยใช้ไคโตซานเป็นตัวดูดซับ พบว่า เเปอร์เซ็นต์การลดลงของสีย้อมมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของตัวดูดซับไคโตซาน โดยปริมาณตัวดูดซับสูงสุดที่ใช้ในการดูดซับ สีย้อม AG25 และ DR23 คือ 0.5 กรัม นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลของค่า pH พบว่าไคโตซานมีการดูดซับสีย้อมสูงสุดที่ pH = 2 เนื่องจากในภาวะที่เป็นกรด ไคโตซานซึ่งประกอบด้วยหมู่แอมิโน (-NH₂) จะง่ายต่อการถูกโปรโตเนทด้วยโปรตอนกลายเป็น -NH⁺ ซึ่งจะช่วยเพิ่มแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตกับแอนไอออนของสีย้อม ทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเพิ่มมากขึ้น

Annadurai และคณะ [43] ศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟด้วยการใช้สารละลายไคโตซาน จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายสีย้อมมากขึ้นความสามารถในการดูดซับสีย้อมจะสูงขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากการเพิ่มของอุณหภูมิจะช่วยเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนไหวของไอออนในสีย้อม ตลอดจนทำให้เกิดการบวมตัวของโครงสร้างภายในของไคโตซาน ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่โมเลกุลสีย้อมจะมีการแทรกผ่านเข้าไปภายในโครงสร้างไคโตซานได้ และนอกจากนี้เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า หลังจากการดูดซับสีย้อมมีการยึดติดอย่างหนาแน่นและมีความเป็นเนื้อเดียวกันบนผิวของไคโตซาน เนื่องมาจากการดูดซับทางกายภาพโดยแรงทางไฟฟ้าสถิตหรือแรงยึดเหนี่ยวโควาเลนต์ระหว่างโมเลกุลของไคโตซานและโมเลกุลสีย้อม



2.11.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับสีย้อมโดยใช้วัสดุเชิงประกอบ

Zubieta และคณะ [44] ศึกษาการดูดซับและการสลายตัวของสีย้อม 2 ชนิด คือ methylene blue (MB) ซึ่งเป็นสีย้อมแคตไอออนิก และ benzopurpurin (BP) ซึ่งเป็นสีย้อมแอนไอออนิก โดยใช้วัสดุไมโครพอร์สไทเทเนีย-โคโคซานที่แตกต่างกัน 2 แบบคือ $\text{TiO}_2\text{chit A}$ (โคโคซาน 280 มิลลิกรัม) และ $\text{TiO}_2\text{chit B}$ (โคโคซาน 46.76 มิลลิกรัม) ซึ่งวัสดุไมโครพอร์สไทเทเนีย-โคโคซานสามารถเตรียมโดยใช้ผงไทเทเนียที่เตรียมได้จาก Ti (IV) Isopropoxide และสารลดแรงตึงผิวที่ผ่านการทำไฮโดรเทอร์มอลทริตเมนต์ (hydrothermal treatment) แล้วจึงนำผงไทเทเนียที่ได้มาผสมกับโคโคซานที่ละลายในกรดแอสติค ทำการกวนอย่างต่อเนื่อง 48 ชั่วโมง แล้วเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอนของแข็งที่มีไทเทเนียผสมกับตัวดูดซับโคโคซานออก จากนั้นทำการกรองและอบภายใต้ภาวะสุญญากาศเพื่อให้มีน้ำหนักคงที่แล้วนำไปใช้งานต่อไป จากการทดสอบการสลายตัวของสีย้อม MB ในภาวะที่มีแสงยูวีพบว่า $\text{TiO}_2\text{chit A}$ ซึ่งมีปริมาณโคโคซานที่มากกว่าสามารถดูดซับสีย้อมได้ดีกว่า $\text{TiO}_2\text{chit B}$ เนื่องจากแสงยูวีมีผลทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ของโคโคซานเกิดการขาดออกจากกัน ทำให้ชั้นของโคโคซานมีหมู่คาร์บอนิลเพิ่มมากขึ้น ซึ่งประจุลบของหมู่คาร์บอนิลสามารถจับกับประจุบวกของโมเลกุลสี MB ได้ดี ส่วนความสามารถในการดูดซับสีย้อม BP โดยใช้ $\text{TiO}_2\text{chit A}$ พบว่าในภาวะมืดมีประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมได้ดีกว่าในภาวะที่มีแสงยูวี เนื่องจากเมื่อให้แสงยูวีชั้นของโคโคซานจะมีหมู่คาร์บอนิลเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดแรงผลักระหว่างประจุลบของหมู่คาร์บอนิลกับประจุลบของโมเลกุลสีย้อม

