

บทที่ 2

การทบทวนงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นโดยใช้ตัวกลางพลาสติกเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดรูโพลีเมอร์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา มีความเกี่ยวข้องกับความรู้ในด้านต่าง ๆ เพื่อการพัฒนาประสิทธิภาพระบบบำบัดน้ำเสียจากสีย้อม ซึ่งจะต้องนำข้อมูลเหล่านั้นมาประกอบการพิจารณาวิเคราะห์แนวทางการดำเนินงานวิจัย และอ้างอิงถึงเหตุผลและความเป็นมาในการจัดทำ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความเข้าใจในเรื่องต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องอย่างชัดเจนคณะผู้วิจัยได้ศึกษารวบรวมและนำเสนอข้อมูลต่างดังนี้

2.1 สีย้อม

สีย้อมเป็นสารเคมีที่สกัดจากน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหิน โดยสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว เช่น เบนซิน ไซลีน แอนทราซีน โทลูอิน แนพทาลิน และพาราฟิน จะถูกเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่าง ๆ

2.1.1 การเกิดสีย้อม

สีซึ่งปรากฏออกมาทำให้ตามนุษย์ปกติมองเห็นได้ เกิดจากการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมประเภทหนึ่งภายในโมเลกุลของสีย้อม เรียกกัว่า โครโมฟอร์ (chromophore) ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 7 กลุ่ม (ธงชัย, 2527) คือ

- 1). กลุ่มไนโตรโซ (nitroso): $-NO$ (หรือ $=N-OH$)
- 2). กลุ่มไนโตร (nitro): $-NO_2$ (หรือ $=N-OH$)
- 3). กลุ่มอะโซ (azo): $-N=N-$
- 4). กลุ่มเอทิลีน (ethylene): $C=C$
- 5). กลุ่มคาร์บอนิล (carbonyl): $C=O$
- 6). กลุ่มคาร์บอนิล-ไนโตรเจน (carbonyl-nitrogen): $C=NH$ และ $-CH=N-$
- 7). กลุ่มซัลเฟอร์ (sulphur): $C=S$ และ $C-S-S-C$

กลุ่มอะตอมต่าง ๆ เหล่านี้จะเป็นตัวเพิ่มสีให้แก่สารประกอบอะโรมาติก โดยการดูดกลืนแถบสีขาวยาวบางแถบแสงและปล่อยออกมาบางแถบแสง จะทำให้นุษย์มองเห็นสีย้อมมีโทนสีแตกต่างกันไป นอกจากกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์แล้ว สีย้อมยังจำเป็นต้องมีกลุ่มอะตอมอีกชนิดหนึ่ง ได้แก่ กลุ่มอะตอมออกโซโครม (Auxochromes) ดังแสดงในตาราง 2.1 เพื่อให้สีย้อมสามารถทำปฏิกิริยายึดติดกับเส้นใยได้ โมเลกุลใดที่ปราศจากกลุ่มอะตอมออกโซโครมจะยังแสดงคุณสมบัติของสีออกมาได้แต่จะขาดสมบัติในการยึดติดกับเส้นใย โมเลกุลดังกล่าวนี้เรียกว่าโครมาเจน (Chromagen) ทั้งกลุ่มอะตอม

โครโมฟอร์ ออกโซโครม และโครมาเจนนี้จะใช้ในการแบ่งกลุ่มของสีย้อมตามสูตรโครงสร้างทางเคมี (ปารีชาติ, 2549)

ตาราง 2.1 กลุ่มอะตอมออกโซโครม

ชื่อ	กลุ่ม
อะมิโน (Amino)	NH ₂
เมทิลอะมิโน (Methylamino)	NHCH ₃
ไดเมทิลอะมิโน (Dimethyl amino)	N(CH ₃) ₂
ซัลโฟนิกแอซิด (Sulphonic acid)	SO ₃ H
ไฮดรอกซี (Hydroxy)	OH
คาร์บอกซิลิกแอซิด (Carboxylic Acid)	COOH
คลอโร (Chloro)	Cl
เมทิล (Methyl)	CH ₃
เมทอกซี (Methoxy)	OCH ₃
ไซยาโน (Cyano)	CN
แอซิติล (Acetyl)	COCH ₃
เอไมด์ (Amide)	CONH ₂

ที่มา: Rangnekar and Singh, 1980

2.1.2 ประเภทของสี

สีที่สีย้อมสิ่งทอตามลักษณะกายภาพแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ชนิดหนึ่งละลายน้ำได้ เรียกกันว่า สีย้อม (Dyes) อีกชนิดหนึ่งไม่ละลายน้ำ เรียกว่า พิกเมนต์ (Pigments) น้ำเป็นตัวทำละลายที่มีราคาถูกที่สุด ดังนั้นแม้ว่าสีบางตัวไม่ละลายน้ำแต่ละลายได้ในสารอื่น ทางโรงงานผู้ผลิตจะต้องพยายามค้นคว้าหาวิธีมาทำให้สีตัวนั้นละลายในน้ำให้ได้ ใช้ตัวทำละลายอื่นให้น้อยที่สุด สีเมื่อละลาย น้ำแล้วจะดูดซึมเข้าไปภายในเส้นใยได้ดีพอสมควร ทนซักและขบวนการใช้น้ำอื่น ๆ บางตัวจะมีแขน (Bond) หรือโซ่ (Linkage) เชื่อมโยงอยู่ระหว่างเส้นใยกับตัวสีทำให้ติดทนนานยิ่งขึ้น สีบางตัวจะติดเส้นใยได้เอง (Substantivity) แต่ขณะเดียวกันก็หลุดออกมาได้ง่าย (ดูชัย , 2531)

การแบ่งสีตามลักษณะการใช้งาน สามารถแบ่งออกเป็นคร่าว ๆ ได้ 14 ชนิด ดังนี้

1) สีแอซิกหรือสีกรด (Acid Dyes) เป็นสีที่ใช้กับเส้นใยโปรตีน ขนสัตว์ ไหม ไนล่อน ต้องใช้ในภาวะกรด อาจใช้กรดกำมะถัน กรดน้ำส้มหรือกรดฟอร์มิก เป็นกลุ่มสีที่สดใสมาก แต่ละตัวมีความคงทนไม่เท่า ถ้ามีปริมาณกรดน้ำมาก เส้นใยจะมีแคทไอออนเพิ่มมากขึ้น ผ้าจะดูดสีได้มากขึ้น และค่อนข้างเร็ว แต่ถ้ามีมากเกินไปจะกลายเป็นทำให้สีหลุดจากเนื้อผ้า สีนี้บางสีมีสูตรโครงสร้างคล้ายสีย้อมเรกท์

2) สีเอโซอิก (Azoic Dyes) ใช้กับเส้นใยได้หลายชนิด สามารถพลิกแพลงได้หลายแบบ และสวยงามกว่าสีอื่น สีบางตัวละลายน้ำได้แต่บางตัวไม่ละลายน้ำ ตัวสีแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งเป็นตัวสีที่เรียกว่า Fast color salt ต้องนำทั้งสองส่วนนี้มาใช้ด้วยกันจึงจะเกิดสี

3) สีเบสิกหรือสีแคทไอออน (Basic / Cationic Dyes) สีกลุ่มนี้เป็นสีที่สดใสที่สุดในกลุ่มสีสังเคราะห์ ไม่ทนแสง ละลายน้ำ มีสถานะเป็นแคทไอออนหรือไอออนชนิดอื่น ถ้าใช้กับใยเซลลูโลสต้องย้อมด้วยสารช่วยติด (Mordant) เช่น กรดแทนทานิก ก่อน

4) สีไคเรกท์หรือสีย้อมตรง (Direct Dyes) เป็นสีที่ละลายได้ในน้ำเย็นธรรมดา ซึมเข้าไปในเส้นใยได้โดยไม่ทำปฏิกิริยาใด ๆ และลอกหลุดออกได้ง่ายเช่นเดียวกัน เป็นสีที่ไม่คงทนต่อการซัก เหมาะสำหรับใช้พิมพ์ผ้าที่ไม่ต้องซักล้างบ่อย ๆ สีพิมพ์ไคเรกท์จะประกอบด้วยสีแบ่งพิมพ์ Wetting agent ตัวทำละลาย สารช่วยดูดความชื้นและต่างอ่อน

5) สีดีสเพส (Disperse Dyes) เดิมเรียกว่า สีอะซิเตท (Acetate) ใช้พิมพ์เส้นใยอาซิเตท และเส้นใยโพลีเอสเตอร์

6) สีมอดแนนท์ (Mordant Dyes) มอดแนนท์ หมายความว่าช่วยให้เกิดสี และติดเส้นใยได้ ตัวมอดแนนท์ที่ใช้เป็นเกลือของโลหะหลายชนิด เช่น โครเมียม อลูมิเนียม และ เหล็ก สีชนิดนี้ทนต่อการซักดีมาก ใช้พิมพ์ผ้าขนสัตว์และไหม

7) สีธรรมชาติ (Natural Dyes) สีที่สกัดได้จากวัตถุดิบจากแหล่งธรรมชาติเช่น พืช สัตว์ และแร่ธาตุต่างๆ ซึ่งเกิดขึ้นมาจากกระบวนการตามธรรมชาติ มีบทบาทเกี่ยวข้องกับวิถีการดำรงชีวิตของมนุษย์มายาวนานนับตั้งแต่สมัยโบราณ มนุษย์ได้เรียนรู้ที่จะนำสีจากวัสดุธรรมชาติมาใช้ในกิจกรรมต่าง ๆ เช่น ย้อมสิ่งทอ

8) สีพิกเมนต์ (Pigment Dyes) สีพิกเมนต์ไม่ละลายน้ำ ไม่ทำปฏิกิริยากับเส้นใย เมื่อใช้พิมพ์จึงต้องใช้สารยึดติด (Binder) ทำหน้าที่เป็นตัวยึดพิกเมนต์และเส้นใยติดกันได้ มีความคงทนต่อการขัดสีดี แต่ไม่ทนทานต่อการซัก และผิวสัมผัสของผ้ามักกระด้าง

9) สีรีแอกทีฟ (Reactive Dyes) เป็นตัวสีปรับปรุงใหม่ละลายน้ำได้ เป็นสีย้อมใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด มีคุณสมบัติเป็นแอนไอออนเมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่เป็นด่าง โมเลกุลของสีจะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกไซด์ (OH^-) ในเซลลูโลส และเชื่อมโยงติดกันโดยพันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond) กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส มีคุณสมบัติละลายน้ำและดูดติดเส้นใย ทำให้สีเข้าไปอยู่ภายในเส้นใย เมื่อเกิดปฏิกิริยาตัวสีจะยึดติดกับเส้นใย สามารถทำปฏิกิริยากับเส้นใยรวมกันเป็นสารประกอบตัวใหม่ ทำให้ติดทนทานดี ทนแสงและทนการซักมีสีมากมายค่อนข้างสดใส แต่ถ้าต้องการพิมพ์สีเข้มจริง ๆ เช่น สีดำหรือสีกรมท่า จะค่อนข้างเปลืองตัวสีมากกว่าสีวัต มีชนิดที่ปรับปรุงเพื่อใช้พิมพ์โดยเฉพาะ

10) สีโซลเวนท์ (Solvent Dyes) เหมาะสมที่สุดสำหรับงานพลาสติกเพื่อที่จะทำให้เป็นสีต่าง ๆ มีความเข้มของสีมากมีความคงทนต่อความร้อน แสงกรดและด่าง ถูกนำมาใช้ในงานทั่วไป เช่น พลาสติก, สีย้อมไม้, เทียน, หมึกพิมพ์

11) สีซัลเฟอร์ (Sulfur Dyes) ใช้ย้อมเส้นใยพวกเซลลูโลสได้ทุกชนิด ปกติสีย้อมประเภทนี้ไม่ละลายน้ำหรือ ละลายได้เพียงเล็กน้อย แต่จะละลายได้ในสารละลายของสารรีดิวส์ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยกลุ่มซัลโฟนิค (sulfonic groups) สีย้อมชนิดนี้เมื่อทำให้ละลายน้ำแล้วจะแทรกซึมตัว เข้าไปในเส้นใยได้

12) สีวัต (Vat Dyes) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ ในการใช้ต้องทำให้ละลายโดยใช้สารรีดิวส์ และต่างก่อนจึงเกาะติดเส้นใย หลังจากนั้นทำการออกซิไดส์สีให้กลับเป็นสีเดิมที่ไม่ละลายน้ำจับอยู่ภายในเส้นใย สีวัตมีความคงทนต่อสภาวะต่าง ๆ ได้ดี เหมาะกับเส้นใยเซลลูโลส (Vigo, 1994)

13) สีอินเกรน เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ โดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยากับน้ำ สีย้อมชนิดนี้ใช้สำหรับย้อมฝ้าย

14) สีออกซิเดชัน (oxidation dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำโดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำโดยสีจะติดแน่น ใช้สำหรับย้อมฝ้ายและขนสัตว์ (ชนิษฐา, 2550)

2.2 น้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม

เนื่องจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีความหลากหลายอยู่มาก เพราะมีจำนวนกว่า 3,000 โรงงานทั่วทั้งประเทศไทย ดังนั้นคุณสมบัติของน้ำเสียก่อนการบำบัด และหลังการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสีย ๆ และที่ผ่านการบำบัด พบว่าคุณสมบัติของน้ำเสีย ค่าบีโอดี จะแปรเปลี่ยนไป ตั้งแต่ 80-2,000 มก./ล แล้วแต่ประเภทของอุตสาหกรรมฟอกย้อม ซึ่งอาจจะมีเฉพาะโรงทออย่างเดียว หรือมีทั้งโรงทอและโรงย้อมสี การย้อมสีบางครั้งต้องทำการลอกแบ่งที่ติดอยู่กับเนื้อผ้าเดิม ทำให้มีค่าบีโอดีสูงในน้ำเสีย ซึ่งความสกปรกที่คิดเป็นบีโอดีนี้ ก็จะหลากหลายแล้วแต่ประเภทสิ่งทอนั้น ๆ (สุจินต์, 2534)

ค่าความสกปรกของอุตสาหกรรมฟอกย้อมในประเทศไทย ตามแฟ้มข้อมูลรายงานของบริษัท แชน.อี.68 แลบ จำกัด มีอัตราส่วนของค่าบีโอดีและซีโอดี ดังแสดงในตาราง 2.2

ตาราง 2.2 อัตราส่วนบีโอดีและซีโอดี ของน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อม ๆ

ประเภทอุตสาหกรรมฟอกย้อม	บีโอดี (มก./ล.)	ซีโอดี (มก./ล.)	บีโอดี/ซีโอดี	หมายเหตุ
ฟอกย้อมผ้าฝ้ายแบบหนา	512	2,108	0.24	ส่วนใหญ่เป็นผ้าฝ้าย
ฟอกย้อมผ้าฝ้ายแบบธรรมดา	403	1,403	0.29	ส่วนใหญ่เป็นผ้าฝ้าย
ฟอกย้อมด้าย	113	423	0.27	ส่วนใหญ่เป็นผ้าฝ้าย
สารเคมีฟอกย้อมต่าง ๆ	580	1,644	0.35	
สีฟอกย้อม	1,410	7,000	0.20	

ที่มา: มั่นสิน, 2551

2.2.1 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง

มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากการประกอบกิจการโรงงานในประเทศไทย ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2560 เพื่อให้มีค่ามาตรฐานและวิธีการตรวจสอบน้ำทิ้งจากโรงงานให้เหมาะสมและเป็นไปตามมาตรฐานสากล รวมถึงเป็นการควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน อาศัยอำนาจตามในข้อ 14 แห่งกฎกระทรวงฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2535) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 ที่ระบุไว้ว่า “ห้ามระบายน้ำทิ้งออกจากโรงงาน เว้นแต่ได้ทำการอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างจนน้ำทิ้งนั้นมีลักษณะเป็นไปตามที่รัฐมนตรีกำหนดโดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา แต่ทั้งนี้ต้องไม่ใช้วิธีทำให้เจือจาง (dilution) ประกาศบังคับใช้ตั้งแต่วันที่ 7 มิถุนายน พ.ศ. 2560 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2560) มาตรฐานน้ำทิ้งต้องมีคุณภาพ ดังตาราง 2.3

ตาราง 2.3 ควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2560

ดัชนีคุณภาพน้ำ	มาตรฐานคุณภาพน้ำ
ความเป็นกรดและด่าง (pH)	ตั้งแต่ 5.5 ถึง 9.0
อุณหภูมิ (Temperature)	ไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส
สี (Color)	ไม่เกิน 300 เอทีเอ็มไอ
ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total Dissolved Solids หรือ TDS)	(1) กรณีระบายลงแหล่งน้ำ ต้องไม่เกิน 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (2) กรณีระบายลงแหล่งน้ำที่มีค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดเกินกว่า 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดในน้ำทิ้งที่จะระบายได้ต้องมีค่าเกินกว่าค่าของแข็งละลายน้ำ ทั้งหมดที่มีอยู่ในแหล่งน้ำนั้นไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids)	ไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand)	ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร
ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand)	ไม่เกิน 120 มิลลิกรัมต่อลิตร
ซัลไฟด์ (Sulfide)	ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
ไซยาไนด์ (Cyanides CN)	ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
น้ำมันและไขมัน (Oil and Grease)	ไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร
ฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde)	ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
สารประกอบฟีนอล (Phenols)	ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
สารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์ (Pesticide)	ต้องตรวจไม่พบ

ตาราง 2.3 (ต่อ)

ดัชนีคุณภาพน้ำ	มาตรฐานคุณภาพน้ำ
ทีเคเอ็น (Total Kjeldahl Nitrogen)	ไม่เกิน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium)	ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
โครเมียมไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium)	ไม่เกิน 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร
สารหนู (As)	ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
ทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
ปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร
แคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร
แบเรียม (Ba)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
ซีลีเนียม (Se)	ไม่เกิน 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร
ตะกั่ว (Pb)	ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
นิกเกิล (Ni)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
แมงกานีส (Mn)	ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

ที่มา: กระทรวงอุตสาหกรรม, 2560

2.2.2 พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์

2.2.2.1 ค่ากรด-ด่าง (pH) เป็นค่าที่บอกลักษณะความเป็นกรดเป็นเบส ของสารเคมีจากปฏิกิริยาของไอออนของไฮโดรเจน (H^+) โดยทั่วไปสิ่งมีชีวิตในน้ำหรือจุลินทรีย์จะดำรงชีพได้ดีในสภาวะที่เป็นกลาง ถ้ามี pH สูงหรือต่ำเกินไปจะทำให้ระบบนิเวศน้ำเสียหาย น้ำที่ควรมีค่า pH อยู่ระหว่าง 6-9 เพื่อไม่ให้เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำและการนำไปใช้ประโยชน์

2.2.2.2 ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) ปริมาณของออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการเพื่อใช้ในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ในน้ำให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ

2.2.2.3 บีโอดี (Biological Oxygen Demand) ปริมาณของออกซิเจนที่แบคทีเรียต้องการใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส BOD เป็นค่าที่บ่งบอกถึงผลกระทบของน้ำเสียที่มีต่อออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ โดยทั่วไปจะวัดในรูปของ BOD_5 ซึ่งหมายถึงปริมาณของออกซิเจนที่แบคทีเรียต้องการใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในเวลา 5 วัน (มณฑล และ สุทธิพงศ์, 2546)

2.2.2.4 สี (Color unit) เป็นวิธีการวัดสีโดยการเปรียบเทียบแพลทตินัมโคบอลต์ โดยการวัดสีของแพลทตินัมโคบอลต์มาตรฐาน ด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 475 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ หน่วยสีที่วัดได้เป็น ADMI

2.3 วิธีการกำจัดสีย้อมผ้า

การบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าสามารถกระทำได้หลายวิธี ทั้งการบำบัดทางชีวภาพ การบำบัดทางเคมี ในอดีตมีการใช้วิธีการบำบัดโดยกระบวนการทางฟิสิกโคเคมีคอล (Physicochemical) เช่น กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) การดูดติดผิว (Adsorption) กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพโดยใช้ออกซิเจน และไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งวิธีใดจะมีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใด ขึ้นกับชนิดและคุณสมบัติของสีนั้น ๆ (Fox and Dulay, 1993)

2.3.1. เทคโนโลยีทางกายภาพ (Physical technology)

เป็นการบำบัดน้ำเสียอย่างง่ายซึ่งจะแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำออก วิธีนี้จะแยกตะกอนได้ประมาณ 50-65% ด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น การดักด้วยตะแกรง (screening) การทำให้ลอย (floating) การดูดซับ (adsorption) และการกรอง (filtration) เป็นต้น ซึ่งเป็นการแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำต่าง ๆ ที่มากับน้ำเสีย

2.3.1.1 การดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่มีรูพรุนสูงและมีคุณสมบัติในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในของเหลว หรือก๊าซเอาไว้ได้ในปริมาณสูง เนื่องจากมีรูขนาดเล็ก (Microporosity) (Duygu and Van, 2010) ทำให้สามารถกำจัดสีแท้และสีปรากฏได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยนำวัสดุดิบพวกสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ไม้ ถ่านหิน พิโตรเลียม กะลามะพร้าว เปลือกถั่วเมล็ดแข็ง กากขานอ้อย ชี้อ้อย กระดูกสัตว์ เป็นต้น นำมาเผาด้วยความร้อนในเตาอับอากาศ และเผาเร่งที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้เกิดความพรุน (Porosity) แล้วอัดด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่อุณหภูมิประมาณ 200-1,600 องศาเซลเซียส (Roop and Meenakshi, 2005) เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับให้มากที่สุดความพรุนมีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อมวล (Surface area per mass ratio) ระหว่าง 500-1,600 ตารางเมตรต่อกรัม (ไพศาล, 2549) จากนั้นนำไปบดเป็นเม็ดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1-2 มิลลิเมตร เรียกว่า ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular activated carbon) ส่วนถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powered activated carbon) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10-50 ไมครอน ในการกำจัดสีนิยมใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด โดยบรรจุในถังรูปทรงกระบอก (Fixedbed system) แล้วปล่อยให้สีไหลผ่านชั้นถ่านด้วยอัตราเร็วที่เหมาะสม คือ ระหว่าง 5-25 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงต่อหนึ่งตารางเมตรของพื้นที่หน้าตัดถัง และมีระยะเวลาสัมผัส (Contact time) ประมาณ 10-15 นาที (อัคร, จารุรัตน์ และศักดิ์ชัย, 2542) ซึ่งจะเกิดกลไกการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ โดยโครงสร้างมีความพรุนสูงทำให้เกิดผิวสัมผัสโมเลกุลภายในจะถูกกระทำด้วยแรงเท่าๆ กันทุกทิศทาง การกำจัดสีด้วยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ เป็นเพียงวิธีการเคลื่อนย้ายสารอินทรีย์ออกจากน้ำโดยโมเลกุลของสิ่งสกปรกจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของเม็ดถ่านกัมมันต์ โมเลกุลของสีจะพุ่งกระจายเข้าไปในรูของเม็ดถ่านจนเต็มถ่านกัมมันต์จะเสื่อมสภาพแต่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่โดยการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) ซึ่งมีต้นทุนสูง เพราะการเผาและการกำจัดกากทำให้ไม่เป็นที่นิยม (พวงรัตน์, 2548; ธนภฤต, 2552)

2.3.1.2 การกรองด้วยเยื่อแผ่น (Membrane)

กระบวนการกรองด้วยเยื่อแผ่น สามารถแบ่งได้ 3 วิธี คือ ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse osmosis) อัลตราฟิวเตรชัน (Ultrafiltration) และนาโนฟิวเตรชัน (Nanofiltration) แต่วิธีอัลตราฟิวเตรชันไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากมีขนาดรูเปิดของเยื่อกรองใหญ่ ไม่สามารถกรองอนุภาคของสีออกจากน้ำเสียได้ (กัลยา, 2547; ศุภลักษณ์, 2552) ส่วนวิธีออสโมซิสย้อนกลับเหมาะสำหรับการกำจัดสีที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ได้แก่ สีแท้ เป็นการกรองแยกน้ำออกจากของแข็งแขวนลอยหรือของแข็งที่ละลายน้ำ โดยผ่านรูพรุนขนาดเล็กและใช้ความดันเป็นแรงขับเคลื่อนให้น้ำไหลผ่านตัวกรอง เป็นกระบวนการที่ต้องผ่านเยื่อแผ่น 2 ชั้นตอน คือ เยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำกร่อย และเยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำทะเล ซึ่งเยื่อแผ่นแรกสามารถกำจัดสีปรากฏซึ่งมาจากโรงฟอกย้อมได้ถึงร้อยละ 90 ความเข้มข้นของสีที่เหลือจะถูกส่งผ่านไปยังเยื่อแผ่นที่สอง และสามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 94 (ชนกฤต, 2552) สำหรับกระบวนการกำจัดสีโดยใช้แผ่นกรองนาโนใช้หลักการเหมือนออสโมซิสผกกลับ แต่การกรองผ่านแผ่นนาโนมีประสิทธิภาพมากกว่าเนื่องจากมีรูขนาดเล็กกว่า ทำให้แยกสีออกจากน้ำได้ดีกว่าโดยสามารถแยกสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำออกจากสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น สารอนินทรีย์เชื้อจุลินทรีย์กรดอินทรีย์ต่าง ๆ ซึ่งขนาดของแผ่นกรองส่วนใหญ่เป็นแบบเชิงประกอบที่มีรูพรุนประมาณ 1.5-2.5 นาโนเมตรและมีช่วงความดันที่ใช้ประมาณ 10-34 บาร์ (Van et al, 1995; Seungkwan and Menachem, 1997; Yacubowicz, 2005)

2.3.2 เทคโนโลยีการกำจัดสีทางเคมี (Chemical Technology)

เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยการแยกสารต่าง ๆ หรือสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียด้วยการเติมสารเคมีต่าง ๆ ลงไปเพื่อให้เข้าไปทำปฏิกิริยาซึ่งจะมีประโยชน์ในการแยกสาร แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือเมื่อเติมสารเคมีลงในน้ำเสียแล้ว ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและวิธีนี้จะมีค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีค่อนข้างสูง

2.3.2.1 การสร้างรวมตะกอน (Coagulation-flocculation) การรวมตะกอนด้วยสารเคมี เป็นกระบวนการกำจัดสีแท้และสีปรากฏในน้ำเสียโดยใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรดต่างสารที่ นิยมใช้เป็นสารเคมีสร้างตะกอน (Coagulant) คือ สารส้ม (Aluminium Sulfate; Alum) ปูนขาว (Calcium oxide) และเหล็กในรูปเฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4$) หรือเฟอร์รัสคลอไรด์ ($FeCl_2$) โดยถ้า โมเลกุลของสีมีขนาดเล็ก ละลายน้ำได้ดี การเกิดตะกอนของสีจะไม่สามารถทำได้แต่ต้องปรับปรุงประสิทธิภาพของการรวมตะกอนให้เป็นอย่างสมบูรณ์ โดยใช้สารช่วยให้เกิดการรวมตัวของตะกอน เช่น โพลีอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) (ชนกฤต, 2552)

การกำจัดสีโดยการสร้างและรวมตะกอนเป็นการทำให้ตะกอนหรือสารแขวนลอยขนาดเล็ก (Colloid) รวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ขึ้น และสามารถตกตะกอน เนื่องจากอนุภาคของสารแขวนลอยมีประจุไฟฟ้าลบเป็นส่วนใหญ่ เมื่ออนุภาคเหล่านั้นมาพบกันก็จะผลัดกันไม่สามารถรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงทำลายประจุของอนุภาคหรือทำให้อนุภาคเป็นกลางโดยการ

เติมสารเคมีสร้างตะกอนเรียกว่า กระบวนการสร้างตะกอน (Coagulation) หลังจากนั้นเกิดกระบวนการรวมกัน (Flocculation) ได้มากขึ้นโดยการเติมสารเคมีรวมตะกอน (Flocculants) ลงไปช่วยยึดหรือจับให้กลุ่มตะกอนที่รวมตัวกันเข้ามาจับเป็นกลุ่มตะกอนใหญ่ขึ้น เรียกว่า ฟล็อก (Floc) เมื่อตะกอนกลุ่มใหญ่ขึ้นก็มีน้ำหนักมากขึ้นก็จะสามารถตกตะกอนออกจากน้ำเสียได้

2.3.2.2 การออกซิเดชันทางเคมี (Chemical Oxidation)

กระบวนการออกซิเดชันทางเคมี ใช้สารเคมีเป็นปัจจัยสำคัญในการออกซิไดส์สารประกอบต่าง ๆ ในน้ำเสีย โดยสารเคมีที่นิยมใช้เป็นตัวออกซิแดนซ์อย่างแพร่หลายมี 2 วิธี ได้แก่ สารเคมีเฟนต์ัน (Fenton's reagent) และโอโซน (O_3)

1) กระบวนการเฟนต์ัน (Fenton process) คือ การออกซิเดชันขั้นสูงโดยใช้สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ทำปฏิกิริยากับเฟอร์รัสไอออนไดไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^\bullet) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์สารอินทรีย์ (สุทธิณี, 2551) ซึ่งไอออนบวกของเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยอาศัยอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH^\bullet) ที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาเป็นตัวกลาง สำคัญ ซึ่งอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลมีค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชันสูง แสดงถึงความสามารถในการในการรับอิเล็กตรอนถ้าตัวออกซิไดส์ที่แรงจะรับอิเล็กตรอนได้ง่ายมาก (เกรียงศักดิ์, 2546) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถออกซิไดส์สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยากจนเปลี่ยนเป็นรูปคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (Yang and James, 2006) มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสีของโรงงานย้อมสิ่งทอ

2) กระบวนการโอโซนออกซิเดชัน (Ozone oxidation) การกำจัดสีด้วยโอโซนทำให้พันธะของโมเลกุลที่ทำให้เกิดสี (Chromophores) แตกออกกลายเป็นโมเลกุลเล็กและสีหายไปโดยสามารถแยกสลายโมเลกุลของสีที่มีความยาวมากให้มีขนาดสั้นลง ทำให้สีของน้ำเสีลดลงซึ่งโอโซนเป็นตัวออกซิไดส์ที่รุนแรงมีประสิทธิภาพสูงในการทำลายสีในน้ำได้ประมาณ 20 เท่าของการละลายในน้ำของออกซิเจน สามารถกำจัดสีแท้จริง ทำลายโครงสร้างโมเลกุลแบบโครงสร้างแบบโซ่ของสารอินทรีย์ (Rice et al, 1980) ความสามารถในการกำจัดสีมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัสกับโอโซนให้นานขึ้น และสีของน้ำลดลงมากที่สุด เมื่อผ่านน้ำทิ้งเข้าระบบเป็นเวลา 60 นาที ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำเสียเป็นปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโอโซนออกซิเดชันในการกำจัดสีโดยความเป็นกรดต่างเท่ากับ 12 ± 0.1 เป็นสภาวะที่สามารถกำจัดสีด้วยกระบวนการโอโซนออกซิเดชันได้ดีที่สุด (วราภรณ์, ต่อพงศ์ และพิลาณี, 2550)

2.3.3 เทคโนโลยีทางชีวภาพ (Biological technology)

เทคโนโลยีทางชีวภาพสามารถนำมากำจัดสีแท้และสีปรากฏจากจากน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อม เยื่อกระดาษ และอุตสาหกรรมอื่น ๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.3.3.1 การดูดซับด้วยสาหร่าย (Algae absorption)

สาหร่ายสามารถกำจัดสีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมโดยการดูดซับสีเหล่านั้นภายใต้สภาวะที่มีแสงโดยเปลี่ยนโมเลกุลที่มีสีเป็นโมเลกุลที่ไม่มีสี (Dilek á F. B., Taplamacioglu á H. M. and Tarlan E. , 1999) ซึ่งสาหร่ายช่อพริกไทย (*Caulerpa lentillifera*) สามารถดูดซับสีเบสิคจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมได้ (พิมล, 2549) นอกจากนี้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน และกลุ่มสาหร่ายสีเขียวมีประสิทธิภาพกำจัดสีของโรงงานผลิตสุราที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ โดยมีปัจจัยด้านปริมาณความเข้มข้นของอาหาร ปริมาณความเข้มข้นแสง ปริมาณความเข้มข้นของเซลล์ตั้งต้น รวมทั้งค่าความเป็นกรดต่าง และเมื่อนำปฏิกิริยาเฟนตันและโอโซนมาบำบัดร่วมกับการใช้สาหร่ายทั้งสองสายพันธุ์ พบว่าสาหร่ายทั้งสองสามารถกำจัดสีได้เพิ่มขึ้น (ชินจิต, 2542)

2.3.3.2 การย่อยสลายโดยเชื้อรา (Fungi decomposition)

กระบวนการกำจัดสีในน้ำทิ้งโดยเชื้อราเป็นการสร้างเอนไซม์นอกเซลล์กลุ่ม ลิกนินโไลติก (Ligninolytic enzyme) (Iimura Y., Hartikainen P. and Tatsumi K. 1996; Leontievsky A. et al, 2001) ย่อยสลายเนื้อไม้โดยเฉพาะเห็ดราในกลุ่มเชื้อราขาวหรือเห็ดราขาวหรือเห็ดราสีน้ำตาล (White or brown rot fungi) ซึ่งสามารถเจริญเติบโตได้ดีบนขอนไม้ โดยในเนื้อไม้มีองค์ประกอบที่สำคัญ คือ ลิกนินเซลลูโลส ทำให้สามารถกำจัดสีในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษได้ (พิมพชนก, 2546) นอกจากนี้เชื้อรา *Aspergillus fumigates* สามารถผลิตสารแลคเคสเปอร์แมงกานีส และไซลาเนสซึ่งมีประสิทธิภาพกำจัดสีโดยย่อยสลายลิกนินในช่วงความเป็นกรดต่าง 6.0-9.0 (Debendra K. Sahoo and Rimpay Gupta, 2005)

2.3.3.3 การย่อยสลายด้วยแบคทีเรีย (Bacteria decomposition)

การย่อยสลายสีด้วยแบคทีเรียสามารถลดสีหลายประเภทโดย (Walker and Weatherley, 2000) ศึกษาการดูดซับสีกลุ่มแอนทราควิโนนโดยเชื้อ *Bacillus gordonae*, *B. benzeovorans* และ *Ps. putida* ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีเท่ากับร้อยละ 13, 19 และ 18 ตามลำดับ และการย่อยสลายสีรีแอกทีฟ Red 2 พบว่า สามารถกำจัดได้ดีโดยกระบวนการเอสปีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก แบคทีเรียที่มีความสำคัญในการกำจัดสี 3 สกุล คือ *Pseudomonas* sp., *Proteus* sp. และ *Klebsiella* sp. (ตาลีศา, 2542)

นอกจากนี้ วีรานูช, ธนสิริ และ วิชชุพร, (2551) ศึกษาประสิทธิภาพของแบคทีเรียสายพันธุ์ *Burkholderia glumae* ในการย่อยสลายสีรีแอกทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่ากระบวนการบำบัดแบบไม่เติมอากาศให้ผลเร่งการกำจัดสีได้ดีกว่าการบำบัดแบบเติมอากาศ โดยสามารถกำจัดสีในน้ำทิ้งได้ร้อยละ 76 ในเวลา 7 วัน โดยปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลาย คือ ค่าความเป็นกรดต่างความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม สารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญรวมถึงความต้องการอากาศในการเจริญของเชื้อแบคทีเรียและการย่อยสลายสี

2.4 ทฤษฎีเกี่ยวกับกระบวนการโอโซนเนชั่น

กระบวนการโอโซนเนชั่นปัจจุบันถูกนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งกระบวนการนี้ไม่ก่อให้เกิดผลผลิตที่เป็นพิษต่อน้ำที่บำบัด กระบวนการโอโซนเนชั่นโดยโอโซน เป็นการกำจัดสิ่งสกปรกในรูปสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากทางชีวภาพด้วยกระบวนการทางเคมีที่ใช้โอโซน เนื่องจากโอโซนเป็นสารออกซิไดซ์ซึ่งเอเจนต์ที่รุนแรง ซึ่งมีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนได้ ผลของการใช้โอโซนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ ทำให้สามารถลดความเป็นพิษของสารอินทรีย์ และเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพได้

2.4.1 คุณสมบัติของโอโซน

คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของโอโซน โอโซน (Ozone) มีสูตรโมเลกุล คือ O_3 และมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 48 อยู่ในสถานะก๊าซอุณหภูมิและความดันปกติ มีจุดเดือดเท่ากับ $111.9\text{ }^{\circ}C$ ที่ความดันบรรยากาศและไม่เสถียร โอโซนเป็นตัวออกซิแดนท์ (Oxidant/oxidizing agent) ที่รุนแรง มีประสิทธิภาพสูงในการทำลายกลิ่น สี และรสในน้ำ และสามารถละลายในน้ำได้ประมาณ 20 เท่าของสารละลายในน้ำของออกซิเจนแต่จะไม่เสถียรในน้ำ โอโซนมีความเสถียรในอากาศมากกว่าในน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอากาศที่เย็นและแห้ง (Weber, 1972; Chermisinoff and Chereminoff, 1993) ความสามารถในการละลายน้ำของโอโซนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันของโอโซนในฐานก๊าซ

โอโซนมีสีอ่อนมาก อาจมีแววสีน้ำเงินให้เห็นบ้าง ความหนาแน่นประมาณ 1.6 เท่าของอากาศ ที่ความเข้มข้นน้อย ๆ อาจกล่าวได้ว่าเป็นก๊าซไร้สี และไม่เผาไหม้ที่ความเข้มข้นต่ำ แต่ที่ระดับความเข้มข้นสูง โอโซนจะมีกลิ่นฉุนค่อนข้างรุนแรง (มันสิน, 2539)

โอโซนเป็นก๊าซที่มีโมเลกุลที่เคลื่อนไหวคล่องแคล่วว่องไว เกิดจากการรวมตัวของออกซิเจน 3 ตัว ในสภาวะไม่เสถียรในช่วงอุณหภูมิปกติ $18-30\text{ }^{\circ}C$ โอโซนจะแยกตัวกลายเป็นอะตอมของออกซิเจน ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Majumdar and Sproul, 1974) เครื่องผลิตโอโซนแบบ Commercial จะสามารถผลิตโอโซนจากอากาศได้เข้มข้นประมาณ 1-3 % แต่ถ้าผลิตจากออกซิเจนบริสุทธิ์จะมีความเข้มข้นสูงถึง 2-6 % (Chermisinoff and Chereminoff, 1993) ภาชนะบรรจุหรืออุปกรณ์สัมผัสโอโซนต้องเป็นวัสดุที่ทนต่อการกัดกร่อน เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิแดนท์ที่รุนแรงมาก และปฏิกิริยาออกซิเดชันของโอโซนจะปล่อยความร้อนออกมา (มันสิน, 2539)

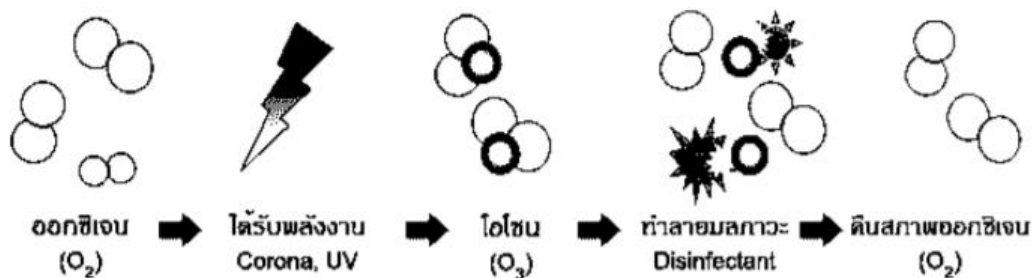
โอโซนเป็นก๊าซที่ก่อให้เกิดความระคายเคืองอย่างรุนแรงถ้าได้รับโดยตรงและในปริมาณเข้มข้นที่สูง (เป็นอันตรายโดยตรงต่อปอดและตา ทำให้เยื่อหุ้มเซลล์อักเสบ) ผู้ที่อยู่ในบรรยากาศของโอโซนที่เข้มข้นอาจถึงแก่ความตายได้ อย่างไรก็ตามโอโซนความเข้มข้นเพียง 0.01-0.02 ppm โดยปริมาตร (Chermisinoff and Chereminoff, 1993; สุรพล, 2545) ก็มีกลิ่นให้เหม็นให้คนรู้ตัว คนสามารถทนโอโซนได้ถึง 0.1 ppm โดยไม่เป็นอันตราย แต่ถ้าความเข้มข้นสูงถึง 1 และ 4 ppm คนจะทนได้ 8 และ 1 นาทีตามลำดับ โดยไม่มีอาการผิดปกติ แต่ถ้านานกว่านี้จะเกิดอาการ

ผิปกติ เช่น ไอ คอแห้ง หายใจลำบาก เคืองตา มีน้ำตาไหล ปวดหัว และแสบเยื่อจมูก ถ้าให้คนดม โอโซนเข้มข้นประมาณ 1 % (ที่ผลิตได้จากเครื่องโดยตรง) จนถึงแก่ความตายภายใน 1 นาที (มันสิน, 2539)

การผลิตโอโซน ในการผลิตโอโซนกระทำได้โดยผ่านอากาศแห้งหรือออกซิเจนบริสุทธิ์ (O_2) ไปยังช่องแคบระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ที่มีความต่างศักย์ประมาณ 15,000-20,000 โวลต์ (สภาวะนี้เรียกว่า Corona discharge หรือ Cold plasma discharge) ซึ่งโมเลกุลของออกซิเจนบางส่วนจะแตกตัวเป็นอะตอมของออกซิเจน (O) โดยการวิ่งชนของอิเล็กตรอน (e^-) จากนั้นอะตอมของออกซิเจนจะรวมตัวกับโมเลกุลของออกซิเจนกลายเป็นโอโซน (O_3) (Chermisinoff and Chereminoff, 1993; วราภรณ์, 2540)

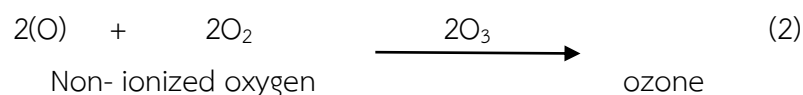
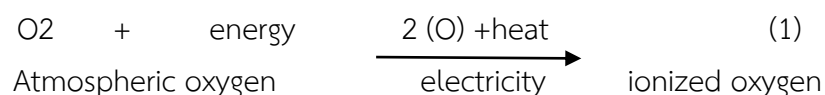
2.4.2 การผลิตโอโซน

การผลิตโอโซนสามารถผลิตได้ทั้งจากอากาศแห้งและออกซิเจนบริสุทธิ์ โดยให้อากาศแห้งหรือออกซิเจนบริสุทธิ์ผ่านช่องแคบระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ที่ความต่างศักย์สูงประมาณ 15,000 – 20,000 โวลต์ (สภาวะนี้เรียกว่า Corona discharge หรือ Cold plasma discharge) ซึ่งโมเลกุลของออกซิเจนบางส่วนจะแตกตัวเป็นอะตอมของออกซิเจนโดยการวิ่งชนของอิเล็กตรอน (e^-) จากนั้นอะตอมของออกซิเจนจะรวมตัวกับโมเลกุลของออกซิเจน (O_2) กลายเป็นโอโซน (O_3) ดังแสดงในภาพที่ 2.1 (Chermisinoff and Chereminoff, 1993; มันสิน, 2540; วราภรณ์, 2540)



ภาพที่ 2.1 กระบวนการผลิตโอโซน
ที่มา : สุพิชฌาย, 2550

ปฏิกิริยาการผลิตโอโซนอธิบายได้ดังสมการ



ในสมการที่ 1 โมเลกุลออกซิเจน (O_2 ; atmospheric oxygen) จะแตกตัวเป็นอะตอมของออกซิเจน (O) และให้พลังงานความร้อน จากนั้นอะตอมของออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับของโมเลกุลของออกซิเจน (O_2) เกิดเป็นโอโซน (O_3) ดังสมการที่ 2

2.4.3 การสลายตัวของโอโซนในน้ำ

โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียร สามารถสลายตัวเป็นออกซิเจน โดยแตกตัวให้ radical ต่าง ๆ ได้แก่ Hydroxyl radical (OH^\cdot), OH_3 , OH_4 และ Super oxide (O_2^\cdot) ซึ่ง radical ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจะมีความว่องไวมากในการทำปฏิกิริยากับสารต่าง ๆ (strong oxidant) ตาราง 2.4 แสดงความสามารถของโอโซนในการออกซิไดส์สูงกว่าคลอรีนถึง 1.52 เท่า และสูงกว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)

ตาราง 2.4 การเปรียบเทียบขอความสามารถในการออกซิไดส์ของสารออกซิแดนต์ต่างๆ

Compound	Oxidation potential (volts)	Relative power of chlorine
Fluorine	3.06	2.25
Hydroxyl radical (OH^\cdot)*	2.80	2.05
Atomic oxygen	2.42	1.78
Ozone	2.07	1.52
Hydrogen peroxide	1.77	1.30
Perhydroxyl radical	1.70	1.25
Permanganate	1.67	1.23
Chlorine oxide	1.50	1.10
Hypochlorous acid	1.49	1.10
Bromine	1.09	0.80
Hydrogen oxide	0.87	0.64
Iodine	0.54	0.40
Oxygen	0.40	0.29

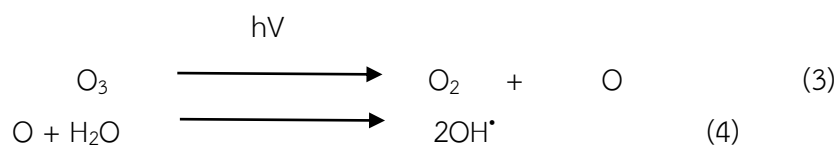
หมายเหตุ * เป็นรูปแบบเมื่อโอโซนแตกตัว

ที่มา : Lin and Yeh (1993)

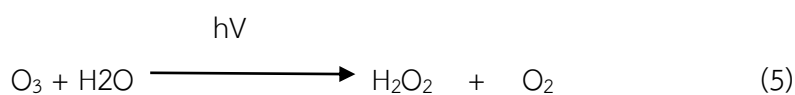
การสลายตัวของโอโซนในน้ำเป็นลักษณะที่สำคัญที่นำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการโอโซนเนชั่นเนื่องจากโอโซนสามารถออกซิไดส์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความแน่นอนสูงปัจจัยที่มีผลต่อการสลายตัวของโอโซน (Tomiyaso, Fukutomi and Gordon, 1985) คือ pH ของสารละลาย แสง UV ความเข้มข้นของโอโซนและ free radical ที่มีอยู่ในสารละลาย

การสลายตัวของโอโซนจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเป็นด่าง (alkalinity) เพิ่มขึ้นทำให้โอโซนทำปฏิกิริยากับน้ำและไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ได้ hydroxyl radical (OH^\bullet) เป็นผลิตภัณฑ์ซึ่งกระบวนการนี้จะมีไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เป็นตัว promoter ของปฏิกิริยาการสลายตัวของโอโซน ดังนั้นครึ่งชีวิตของโอโซนจึงค่อนข้างสั้นในสภาพที่เป็นด่างโดยที่ pH 10 ครึ่งชีวิตของโอโซนในน้ำบริสุทธิ์มีค่าประมาณ 30 นาที สารประกอบอินทรีย์ในธรรมชาติเป็นทั้งตัว inhibitor และตัว promoter ของปฏิกิริยาการสลายตัวของโอโซน (Langlais, Reckhow and Brink, 1991; Ku, Su and Shen, 1996; Gottschalk, Libra and Saupe, 2000)

การสลายตัวของโอโซนในสภาวะก๊าซภายใต้อิทธิพลของแสง UV จะได้โมเลกุลของออกซิเจนและอะตอมของออกซิเจน (McGrath and Norrish, 1960) หลังจากนั้นออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับน้ำได้เป็น hydroxyl radical เป็นผลิตภัณฑ์ดังสมการ



ส่วนการสลายตัวของโอโซนในสารละลายที่เป็นน้ำ เมื่อกระตุ้นด้วยแสง UV จะได้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และออกซิเจนเป็นผลิตภัณฑ์ หลังจากเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่อกัน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) จะแยกได้เป็น hydroxyl radical (OH^\bullet) 2 โมเลกุลดังสมการที่ 5 และ 6 โดยที่แสง UV มีอิทธิพลต่อการสลายตัวของโอโซนเมื่อสารละลายเป็นกรด (pH ต่ำสุดเท่ากับ 2) และอิทธิพลของแสง UV ต่อการสลายตัวของโอโซนจะลดลงเมื่อ pH ของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น (Ku, Su and Shen, 1996)

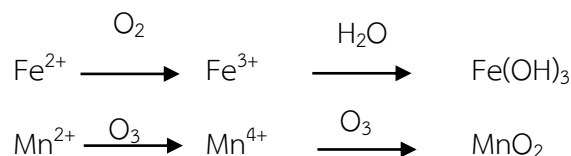


2.4.4 การนำโอโซนมาประยุกต์ใช้

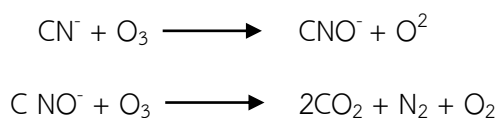
โอโซนถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในการทำน้ำดื่มให้ปราศจากจุลินทรีย์ (Disinfection) นอกจากนี้โอโซนยังสามารถนำมาใช้ประยุกต์ด้านต่าง ๆ คือ

2.4.4.1 การออกซิไดซ์สารอินทรีย์ (Oxidation of Organics) ดังกล่าวมาแล้วโอโซนเป็นสารที่ไม่เสถียร สามารถแตกตัวได้เรดดิคัลต่าง ๆ ซึ่งมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ต่าง ๆ การออกซิไดซ์สารอินทรีย์โดยโอโซนอาจสมบูรณ์หรือไม่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างสารเคมีของสารอินทรีย์นั้น ๆ

2.4.4.2 การออกซิไดซ์สารอนินทรีย์ (Oxidation of Inorganics) โอโซนสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดเหล็กและแมงกานีสในน้ำ โดยเปลี่ยนวาเลนซ์จากสองเป็นสามสำหรับเหล็ก ซึ่งทำให้เหล็กและแมงกานีสตกตะกอนได้ ดังแสดงในสมการเคมี



โอโซนสามารถออกซิไดซ์ไซยาไนด์เป็นไซยาเนตจะถูกออกซิไดซ์ไดโนโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ดังสมการเคมี



การใช้โอโซนร่วมกับต่างในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย สามารถลดค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ที่ต้องการในการตกตะกอนให้ต่ำลงได้ ซึ่งจะช่วยให้ประหยัดการใช้กรดในการปรับให้เป็นกลางลงได้

2.4.4.3 การกำจัดสี (Colour Removal) สารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดสี สามารถใช้โอโซนออกซิไดซ์สารอินทรีย์เหล่านี้ ซึ่งจะทำให้สีของน้ำเสียลดต่ำลงโดยโมเลกุลโอโซนจะทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารอินทรีย์ก่อให้เกิดสี ประสิทธิภาพการกำจัดอาจเพิ่มสูงขึ้นได้ โดยการประยุกต์ใช้ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ (สุเมธ, 2539)

2.4.5 การวัดปริมาณโอโซนในอากาศ

วิธีนี้จะวัดปริมาณความเข้มข้นของสารที่มีความสามารถออกซิไดซ์ทั้งหมด (total oxidant concentration) ในก๊าซตัวอย่างโดยใช้สารละลายเป็นตัวดูดซึมและทำปฏิกิริยาสารละลายที่ใช้ได้แก่ สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ ในการวิเคราะห์ก๊าซตัวอย่างจะผ่าน เข้าไปสัมผัสกับสารละลายด้วยอัตราคงที่ จากนั้นจะวัดปริมาณไอโอไดด์ (iodide) ที่เหลือในสารละลายเพื่อนำไปหาปริมาณสารที่ถูกออกซิไดซ์ได้ทั้งหมดในก๊าซตัวอย่าง (รวีศ, 2548)

2.5 ทฤษฎีเกี่ยวกับไทเทเนียมไดออกไซด์

2.5.1 ลักษณะทั่วไปของไทเทเนียมไดออกไซด์

ลักษณะของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO_2) เป็นผงสีขาว ไม่ละลายน้ำ ซึ่งประกอบด้วยไทเทเนียม 59.95 โดยโมล และออกซิเจนร้อยละ 40.05 โดยโมล มีมวลโมเลกุล 79.90 กรัมต่อโมล มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1,850 องศาเซลเซียส และมีความหนาแน่นประมาณ 4.0 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีโครงสร้างผลึก 3 รูปแบบ ได้แก่ ชนิดอะนาทาส (anatase) ชนิดรูไทล์

(rutile) (Wang *et al.*, 2004) และชนิดบรูไคท์ (brookite) ซึ่งชนิดอะนาเทส และรูไทล์มีโครงสร้างผลึกแบบเททระโกนัล (tetragonal) ที่ประกอบด้วยอะตอมของไทเทเนียม ล้อมรอบด้วยอะตอมของไทเทเนียมจำนวน 6 อะตอม โดยชนิดรูไทล์มีโครงสร้างผลึกคล้ายปริซึม โปรงบางและมักจะอยู่กันเป็นคู่ ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารประกอบของไทเทเนียม (Ti) ที่มีสถานะออกซิเดชัน +4 และไม่มีไอออน Ti^{4+} ไทเทเนียมไดออกไซด์จัดเป็นสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในกระบวนการบำบัดทางสิ่งแวดล้อม มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสี ซึ่งมีความเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดสีจากสีย้อมผ้าร่วมกับโอโซน (O_3) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสี

2.5.2 ประเภทของไทเทเนียมไดออกไซด์

ชนิดของไทเทเนียมไดออกไซด์ แบ่งตามโครงสร้างของผลึกได้ 3 แบบ แสดงดังภาพที่ 2.2 ได้แก่

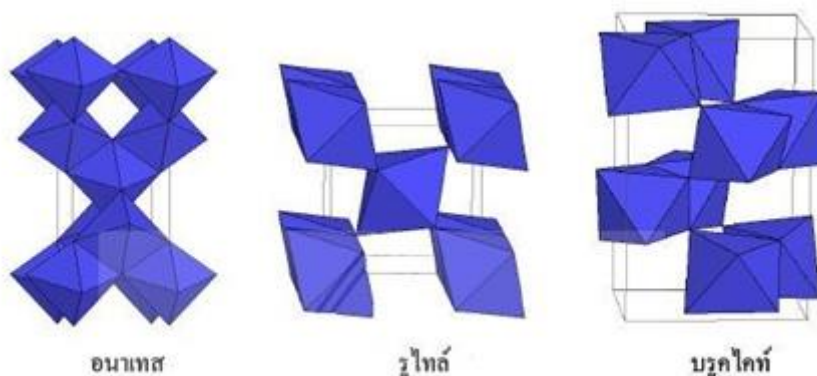
2.5.2.1 รูไทต์ (Rutile) สามารถโน้มน้าวให้มีเสถียรภาพมากได้ที่อุณหภูมิสูง ๆ ชนิดของไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ใช้ในอุตสาหกรรม ส่วนมากจะเป็นรูไทต์ เกือบทุกโรงงาน เช่น โรงงานสี โรงงานทำเครื่องสำอาง โรงงานทำอาหาร และบางครั้งพบในหินอัคนี

2.5.2.2 อะนาเทส (Anatase) สามารถโน้มน้าวให้มีเสถียรภาพมากได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่ารูไทต์ ผลึกประเภทนี้นิยมใช้ในกระบวนการใช้แสงขั้นสูง

2.5.2.3 บรูไคท์ (Brookite) เป็นผลึกที่พบในแร่เท่านั้น และมีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธรมบิก (Orthorhombic) (พิสิคส์, 2555)

โดยปกติโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทสสามารถเปลี่ยนเป็นแบบรูไทต์ได้ที่อุณหภูมิสูง โครงสร้างผลึกทั้งแบบอะนาเทสและแบบรูไทต์เป็นที่นิยมนำมาศึกษาสำหรับการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ซึ่งโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทสให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้สูงกว่า เนื่องจากโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทสเกิดจากการรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นและโฮลในอัตราที่ต่ำกว่าเพราะแถบช่องว่างพลังงานของโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทสมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับโครงสร้างผลึกแบบรูไทต์ ยิ่งไปกว่านั้นโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทส สามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิต่ำ

อย่างไรก็ตามในบางปฏิกิริยา โครงสร้างผลึกแบบอะนาเทส และแบบรูไทต์ให้ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทสเพียงอย่างเดียว เพราะในระหว่างการเร่งปฏิกิริยาอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจะถูกส่งผ่านจากโครงสร้างผลึกแบบรูไทต์ไปยังแบบอะนาเทส ซึ่งช่วยลดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น (Li, F. B., and Li, X. Z., 2002)



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์แต่ละแบบ
ที่มา : ฟิสิกส์, 2555

2.5.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสีของไทเทเนียมไดออกไซด์

ปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสีของไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้แก่ ค่าพีเอช (pH) ปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2 dosage) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม (initial dye concentration) อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen, DO) ความเข้มข้นของแสง (light intensity) และปริมาณไอออนบวก-ลบในสารละลาย (dissolved anions-cations) (วุทธิพันธ์, 2544)

2.5.3.1 ค่าพีเอช ประสิทธิภาพในการโฟโตออกซิเดชัน ขึ้นอยู่กับค่าพีเอชในสารละลาย ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ค่าพีเอชมีผลต่อความสามารถในการดูดเกาะของสีย้อมที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ เพราะประจุไฟฟ้าที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์เปลี่ยนแปลงเมื่อค่าพีเอชสูงหรือต่ำ โดยประจุที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์จะเป็นบวกที่ค่าพีเอชต่ำ และจะเป็นลบเมื่อค่าพีเอชสูง อีกทั้งยังทำให้ช่องว่างพลังงาน (E_g) ของไทเทเนียมไดออกไซด์เปลี่ยนแปลงได้ด้วย นอกจากนี้สีย้อมผ้าต่างชนิดกันยังมีความสามารถในการสลายตัวได้ในสภาวะค่าพีเอชต่างกัน ซึ่งการสลายตัวนี้มีผลมาจากความสามารถในการดูดเกาะของสีย้อมผ้าที่ผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วย

2.5.3.2 ความเข้มข้นของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารละลายทำหน้าที่ให้ไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^\cdot) ทำปฏิกิริยาและเร่งให้เกิดปฏิกิริยาและเร่งให้เกิดปฏิกิริยาการกำจัดสี และไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่เพียงแต่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางให้สีย้อมในการละลายยึดเกาะ การยึดเกาะของสีย้อมขึ้นอยู่กับปริมาณและขนาดอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังนั้นพื้นที่ผิวจึงเป็นหนึ่งในปัจจัยควบคุมการเกิดปฏิกิริยา ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มากเกินไปในสารละลายจะทำให้ปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันลดลง เพราะจะไปขัดขวางแสงยูวีที่ส่องผ่านลงไปโดยสารละลาย ทำให้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยอนุภาคของแสงและปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^\cdot) ลดลง

2.5.3.3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม เมื่อแสงยูวีถูกดูดกลืนโดยอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กระจายอยู่ในสารละลาย และสีย้อมในสารละลาย หากความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมต่ำ จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง เมื่อเทียบกับความเข้มข้นสีที่มีค่าสูงจะลดการส่องผ่านของแสงยูวี แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับโครงสร้างเริ่มต้นโมเลกุลของสีย้อมด้วยเช่นกัน ถ้าหากโครงสร้างโมเลกุลมีความซับซ้อนต่ำความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมก็จะมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัด แต่ถ้าหากโครงสร้างโมเลกุลมีความซับซ้อนมาก ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมก็จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการกำจัดด้วย

2.5.3.4 อุณหภูมิ จากทฤษฎีทางจลนพลศาสตร์ (kinetic theory) อุณหภูมิมีนัยเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างมากต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความถี่ในการชนกันของโมเลกุลมีมากขึ้น อัตราการกำจัดสีย้อมในสารละลายจะเพิ่มขึ้น โดยค่าคงที่อัตราการทำปฏิกิริยาจากสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius)

2.5.3.5 ปริมาณออกซิเจนละลาย อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำเพิ่มขึ้น ออกซิเจนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในปฏิกิริยาโฟโตแคทาลิซิส เพราะออกซิเจนจะยึดเกาะบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำหน้าที่ยึดจับอิเล็กตรอนที่แถบการนำไฟฟ้าทำให้เกิด O_2^- และหลังจากนั้น O_2^- ก็สามารถทำปฏิกิริยากับโปรตอน (H^+) ในสารละลาย แล้วเกิดเป็นเปอร์ออกไซด์แรดิคัล (peroxide radical, HO_2^{\cdot}) ซึ่งมีความว่องไวสูงในการทำปฏิกิริยากับสารอื่นเช่นเดียวกับ O_2^- จึงสามารถย่อยสลายสีย้อมได้

2.5.3.6 ปริมาณไอออนบวก-ลบ ในสารละลาย โดยปกติแล้วน้ำเสียชุมชนและน้ำเสียอุตสาหกรรมจะมีไอออนที่มีประจุลบ (anions) และประจุบวก (cations) ประกอบอยู่ด้วย เช่น คลอไรด์ (Cl^-) คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) ไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) ซัลเฟต (SO_4^{2-}) ไนเตรต (NO_3^-) และฟอสเฟต (PO_4^{3-}) เป็นต้น ซึ่งไอออนบางชนิดจะเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาในขณะที่บางชนิดจะขัดขวางการเกิดปฏิกิริยา เช่น เหล็ก (Fe^{3+} และ Fe^{2+}) แมงกานีส (Mn^{2+}) และสังกะสี (Zn^{2+}) หากมีปริมาณความเข้มข้นของไอออนโลหะสูง อาจจะต้องทำการบำบัดขั้นต้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสลายตัวของสารอินทรีย์ในปฏิกิริยาโฟโตแคทาลิซิส (ปารีชาติ, 2549)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วรารณณ์, ต่อพงศ์ และพิลาณี (2550) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสีด้วยโอโซนความสามารถในการกำจัดสีมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัสกับโอโซนให้นานขึ้น และสีของน้ำลดลงมากที่สุด เมื่อผ่านน้ำทิ้งเข้าระบบเป็นเวลา 60 นาที ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำเสียเป็นปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโอโซนออกซิเดชันในการกำจัดสีโดยความเป็นกรดต่างเท่ากับ 12 ± 0.1 เป็นสภาวะที่สามารถกำจัดสีด้วยกระบวนการโอโซนออกซิเดชันได้ดีที่สุด

Lin and Yeh (1993) ได้ทำการศึกษาถึงการใช้โอโซนในการกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม และผลของโอโซนต่อการกำจัดค่า COD ในการทดลองใช้เวลาทดลองแต่ละครั้งเป็นเวลา

6 ชั่วโมง สามารถกำจัดสีได้เกือบทั้งหมด และสามารถลดค่า COD ได้มากกว่า 50 % นอกจากนี้ยังพบว่าโอโซนยังทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์แตกออกจากกัน ทำให้ง่ายต่อการย่อยสลายต่อไปในระบบ activated sludge และการใช้โอโซนร่วมกับ activated sludge ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงขึ้น

อลิสตา (2544) ได้ทำการศึกษาการวิจัยการกำจัดสีจากน้ำทิ้งโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษโดยใช้สารไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับ การออกซิเดชันด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสี ซีไอดี และค่าของแข็งแขวนลอย อยู่ในช่วง 52.44% - 87.91%, 50% - 78.57% และ 84.54% - 99.51% ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ทางสถิติระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาและปริมาณสารเคมี ในขณะที่ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารเคมี แต่ประสิทธิภาพมีค่าที่ไม่แตกต่างกันในทุกระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสีมีค่าไม่แตกต่างกันมากในทุกระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และในทุกปริมาณสารเคมี และสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการออกซิเดชันด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต ร่วมกับ สารไทเทเนียมไดออกไซด์ คือระดับความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2 ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที และปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 9 g/L โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสี ซีไอดี และของแข็งแขวนลอย 85.04%, 74.14% และ 98.06% ตามลำดับ

Paillard ,Dorel and Bourbogot (1991) ได้ทำการศึกษาการกำจัดกรดออกซาลิก (Oxalic acid) โดยใช้โอโซนร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เปรียบเทียบกับระบบโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ผลการทดลองพบว่า การใช้โอโซนร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดโดยวัดในรูป TOC สูงถึง 95% ในขณะที่ระบบโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และระบบโอโซนอย่างเดียวให้ประสิทธิภาพการลดค่า TOC เท่ากับ 50% และ 30% ตามลำดับ