
เทคโนโลยีการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม

Color Removal Technology in Industrial Wastewater

วนิดา ชูอักษร*

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

Wanida Chooaksorn*

Environmental Science Department, Faculty of Science and Technology, Thammasat University .

บทคัดย่อ

เทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม มีหลายวิธีได้แก่วิธีทางกายภาพ เคมีและชีวภาพ ซึ่งแต่ละวิธีก็จะมีข้อจำกัดที่ต่างกันได้แก่ การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง แต่มีข้อจำกัดคือการนำกลับมาใช้ใหม่จะต้องฟื้นฟูสภาพด้วยการเผาที่ความร้อนสูงซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง การใช้กระบวนการกรองด้วยเยื่อแผ่น ก็จะต้องควบคุมระดับความดันน้ำ อัตราการไหลของน้ำ ค่าความเป็นกรดต่างและอุณหภูมิ การสร้างตะกอนและการรวมตะกอนโดยใช้สารส้มปูนขาว และสารประกอบเหล็ก ก็เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง แต่จะมีกากตะกอนเกิดขึ้นในปริมาณมากซึ่งยุ่งยากในการนำไปกำจัด กระบวนการเฟ้นต้น ก็ต้องควบคุมความเข้มข้นของเหล็ก ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ค่าอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรดต่าง และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา การใช้โอโซน ก็ต้องควบคุมอุณหภูมิ ความดัน ความเป็นกรดต่าง และความเสี่ยงพลังงานไฟฟ้า รวมทั้งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ เนื่องจากโอโซนจะทำปฏิกิริยากับสารบางชนิดทำให้เกิดเป็นสารก่อมะเร็ง ในการใช้เทคโนโลยีทางกายภาพและเคมีมีข้อจำกัด เนื่องจากมีการใช้สารเคมีในการกำจัดนอกจากจะสิ้นเปลืองแล้วตะกอนที่เกิดขึ้นมีปริมาณมาก และเป็นการเพิ่มสารเคมีในสิ่งแวดล้อมด้วย การใช้เทคโนโลยีทางชีวภาพ ได้แก่ การดูดซับสีด้วยสาหร่าย การย่อยสลายสีโดยใช้เชื้อราบางชนิด มีข้อจำกัดในเรื่องความสะดวกในการใช้งาน การเก็บรักษา การขนส่ง รวมถึงการควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับและการย่อยสลาย การเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับน้ำเสียของอุตสาหกรรมแต่ละประเภท ต้องคำนึงถึงลักษณะน้ำเสีย ปริมาณน้ำเสีย ประสิทธิภาพ ค่าใช้จ่าย ฯลฯ ในทางปฏิบัติควรมีการนำน้ำเสียมาทดสอบก่อนเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสม

คำสำคัญ : กำจัดสี ถ่านกัมมันต์ เยื่อแผ่น การรวมตะกอนและตกตะกอน กระบวนการเฟ้นต้น

*E-mail: chooaksorn@hotmail.com

The technology used in the removal of color in industrial wastewater. There are several ways that include the physical chemical and biological process. Each approach has limitations that are different. The color adsorption with activated carbon is an effective way. The limitation is that regeneration need to ignite at high temperature, which is costly. Using a membrane filtration process need to control pressure, flow rate, pH and temperature of water. The coagulation and flocculation process using alum, lime and iron compounds is highly effective. But It has a large amount of sludge which is difficult to disposal. Fenton process need to control the concentration of iron, hydrogen peroxide, temperature, pH and duration of the reaction. Ozone need to control temperature, pressure, acidity and consumption of electricity. It may also affect the organisms in the water. Ozone reacts with certain substances that are carcinogen. Using physical and chemical technology have limitations. There are the cost of chemical treatments, the high volume of sludge and adding chemicals into the environment. The use of biotechnology are the color adsorption by algae and degradation by a fungus. There are limitations in the ease of use, storage, transportation, as well as the factors that influence the adsorption and degradation. Choosing the appropriate technology for each type of industrial wastewater. Regardless of the wastewater characteristic, flow-rate, treatment efficiency, cost, etc. In practice, the water should be tested prior to guide the selection of appropriate technology.

Keywords : color removal, activated carbon, membrane, coagulation and flocculation, Fenton process

บทนำ

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ กระดาษ ย้อมผ้า-พิมพ์ผ้า สกัดน้ำมันปาล์ม ฯลฯ มักมีปัญหาสีของน้ำ (Radha K.V., 2009; Mahesh S. *et al*, 2006 ; Süreyya Meriç *et al*, 2005) ถึงแม้สีบางชนิดจะไม่ใช่พิษ แต่ส่งผลต่อแหล่งน้ำที่รองรับน้ำเสีย โดยทำให้แหล่งน้ำเกิดสภาพไม่น่าดู และกั้นขวางแสงปริมาณแสงส่องผ่านสู่แหล่งน้ำลดลง ลดการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำการผลิตออกซิเจนลดลง แหล่งน้ำมีออกซิเจนไม่เพียงพอและไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ (กัณฐิรีย์ ศรีพงษ์พันธุ์, 2547; Chulhwan *et al*, 2007; Shaobin, 2008) นอกจากนี้สีที่เป็นสารอินทรีย์ละลายหรือคอลลอยด์ สามารถย่อยสลายได้ส่งผลให้ออกซิเจนละลายน้ำลดลง (สันทัต ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2549) อย่างไรก็ตามปัจจุบันมีเทคโนโลยีการกำจัดสีทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ซึ่งมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ทำให้ต้องมีการเลือกใช้ให้เหมาะสมสำหรับน้ำเสียของแต่ละอุตสาหกรรม

ประเภทของสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม (Types of color in industrial wastewater)

สีในแหล่งน้ำแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

(1) สีแท้หรือสีจริง (True color) หมายถึง สีที่เกิดจากสารต่างๆ ในน้ำ และละลายกลายเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ โดยสารที่มีผลต่อการเกิดสีแท้ส่วนใหญ่ ได้แก่ สารอินทรีย์ซึ่งย่อยสลายยากประเภทกรดฮิวมิก และฟัลวิก (Humic acid and fulvic acid) ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายของสิ่งมีชีวิต และผลผลิตจากกระบวนการเมทาบอลิซึมของสิ่งมีชีวิต ซึ่งมีความคงตัวสูงมากจนไม่สามารถย่อยสลายและแยกออกโดยการกรองได้ การกำจัดสีแท้จึงทำได้ยาก (George *et al*, 2003 ; กัณฐิรีย์ ศรีพงษ์พันธุ์, 2547 ; สันทัต ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2549)

(2) สีปรากฏ (Apparent color) หมายถึง สีที่เกิดจากสารแขวนลอยในน้ำที่สะท้อนแสงปรากฏให้เห็นแก่สายตา เช่น แพลงก์ตอนพืช และแพลงก์ตอนสัตว์ เกล็ดของซากพืชซากสัตว์ ตะกอนของดินและทราย สามารถกำจัดออกได้โดยวิธีทางกายภาพ เช่น การกรอง หรือการตกตะกอน (George *et al*, 2003 ; กัณฐิรีย์ ศรีพงษ์พันธุ์, 2547)

สำหรับสีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมมีทั้งสีแท้และสีปรากฏ โดยสีแท้มักเป็นน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มและอบไม้ยางพารา ส่วนสีปรากฏเกิดจากสารแขวนลอยในน้ำจาก 2 กรณี คือ สีของน้ำเสียเองเนื่องจากการปนเปื้อนมาแต่แรกในน้ำเสีย เช่น สีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมทอผ้า ฟอกย้อม

เยื่อกระดาษ ซึ่งสีที่เกิดขึ้นเป็นสีปรากฏจากสารเคมีในกระบวนการผลิต รวมทั้งลิกนินและแทนนิน (มงคล ดำรงค์ศรี และต่อพงศ์ ภิรัชชาติ, 2546; วราภรณ์ อภิวัฒนาภิวัด และคณะ, 2550) โดยอาจแบ่งประเภทตามการแตกตัวให้ประจุ เส้นใยที่ใช้ย้อม หมูช่วยละลาย รวมทั้งโครงสร้างทางเคมีของสี นอกจากนี้สีที่เกิดขึ้นในน้ำเสียหลังจากการเก็บกัก หรือหลังจากผ่านการบำบัด เช่น ในระบบบำบัดแบบบ่อฝัง (Oxidation pond) ที่อาศัยสาหร่ายให้ออกซิเจน แต่สาหร่ายทำให้น้ำมีสีเขียว เป็นต้น (สันทัต ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2549)

เทคโนโลยีการกำจัดสี (Color Removal Technology)

1. เทคโนโลยีทางกายภาพ (Physical technology)

1.1 การดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่มีรูพรุนสูงและมีคุณสมบัติในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในของเหลวหรือก๊าซเอาไว้ได้ในปริมาณสูง เนื่องจากมีรูขนาดเล็ก (Microporosity) (Duygu & Van, 2010) ทำให้สามารถกำจัดสีแท้และสีปรากฏได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยนำวัตถุดิบพวกสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ไม้ ถ่านหิน ปีโตรเลียม กะลามะพร้าว เปลือกถั่วเมล็ดแข็ง กากขานอ้อย ชี้อ้อย กระดุกสัตว์ เป็นต้น นำมาเผาด้วยความร้อนในเตาอับอากาศ และเผาแรงที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้เกิดความพรุน (Porosity) แล้วอัดด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่อุณหภูมิประมาณ 200-1,600 องศาเซลเซียส (Roop & Meenakshi, 2005) เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับให้มากที่สุด ความพรุนมีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อมวล (Surface area per mass ratio) ระหว่าง 500-1,600 ตารางเมตรต่อกรัม (ไพศาล วีรภิกข, 2549) จากนั้นนำไปบดเป็นเม็ดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1-2 มิลลิเมตร เรียกว่า ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular activated carbon) ส่วนถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powered activated carbon) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10-50 ไมครอน ในการกำจัดสีนิยมใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด โดยบรรจุในถังรูปทรงกระบอก (Fixed bed system) แล้วปล่อยให้สีไหลผ่านชั้นถ่านด้วยอัตราเร็วที่เหมาะสม คือ ระหว่าง 5-25 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงต่อหนึ่งตารางเมตรของพื้นที่หน้าตัดถัง และมีระยะเวลาสัมผัส (Contact time) ประมาณ 10-15 นาที (อุตร จารุรัตน์ และคณะ, 2542) ซึ่งจะเกิดกลไกการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ โดยโครงสร้างมีความพรุนสูงทำให้เกิดผิวสัมผัสโมเลกุลภายในจะถูกกระทำด้วยแรงเท่าๆ กันทุกทิศทาง ส่วนโมเลกุลที่อยู่บนผิวหน้าของถ่าน

กัมมันต์จะถูกกระทำด้วยแรงที่ไม่สมดุล ซึ่งแรงนี้สามารถทำให้สมดุลได้โดยทำให้โมเลกุลอื่นมาเกาะติดที่ผิวสัมผัสด้วยแรงยึดเหนี่ยวแวนเดอวาล์ว (Van der wals force) โมเลกุลของสารละลายจะถูกยึดไว้ ในสถานะที่ความเป็นกรดต่างค่าจะดูดซับได้ดี เนื่องจากถ่านกัมมันต์จะมีสภาพเป็นประจุบวกอันเนื่องมาจากดูดซับประจุบวกของไฮโดรเจนไว้ ในขณะที่เดียวกันสารคอลลอยด์และสารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดสีมีประจุลบ แรงดึงดูดระหว่างกันจึงมีมาก แต่การเกาะยึดกันเป็นแรงอ่อนๆ ดังนั้นสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงไปกลับมาได้ ทำให้การฟื้นฟูของตัวดูดติดผิวทำได้ง่าย แต่มักเกิดปัญหาสารแขวนลอยติดค้างอุดตันผิวหน้าของชั้นถ่านจนทำให้อัตราการไหลผ่านลดลง สามารถแก้ไขได้โดยการอัดน้ำล้างเข้าทางด้านล่าง (Backwashing) เมื่อรูพรุนของเม็ดถ่านจะถูกอุดตัน

ด้วยโมเลกุลของสิ่งสกปรกทำให้ถ่านหมดประสิทธิภาพการดูดซับสามารถฟื้นฟูสภาพโดยการเผาในเตาอับออกซิเจน ที่อุณหภูมิประมาณ 800 องศาเซลเซียส และผ่านไอน้ำเพื่อเร่งคุณสมบัติของถ่าน (สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2549) (ภาพที่ 1) การกำจัดสีด้วยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ เป็นเพียงวิธีการเคลื่อนย้ายสารอินทรีย์ออกจากน้ำโดยโมเลกุลของสิ่งสกปรกจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของเม็ดถ่านกัมมันต์ โมเลกุลของสีจะฟุ้งกระจายเข้าไปในรูของเม็ดถ่านจนเต็ม ถ่านกัมมันต์จะเสื่อมสภาพแต่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่โดยการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) ซึ่งมีต้นทุนสูง เพราะการเผาและการกำจัดกากทำให้ไม่เป็นที่นิยม (พวงรัตน์ ขจิตวิทยานุกุล, 2548; ธนกฤต พรหมทอง, 2552)



ภาพที่ 1 รูปตัดโพรงหรือช่องว่างภายในของถ่านกัมมันต์ (Bruce et al, 2007)

1.2 การกรองด้วยเยื่อแผ่น (Membrane)

กระบวนการกรองด้วยเยื่อแผ่น สามารถแบ่งได้ 3 วิธี คือ ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse osmosis) อัลตราฟิวเตรชัน (Ultrafiltration) และนาโนฟิวเตรชัน (Nanofiltration) แต่วิธีอัลตราฟิวเตรชันไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากมีขนาดรูเปิดของเยื่อกรองใหญ่ ไม่สามารถกรองอนุภาคของสีออกจากน้ำเสียได้ (กัลยา ศรีสุวรรณ, 2547; ศุภลักษณ์ อรรณพ, 2552) ส่วนวิธีออสโมซิสย้อนกลับเหมาะสำหรับการกำจัดสีที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ได้แก่ สีแท้ เป็นการกรองแยกน้ำออกจากของแข็งแขวนลอย หรือของแข็งที่ละลายน้ำ โดยผ่านรูพรุนขนาดเล็กและใช้ความดันเป็นแรงขับเคลื่อนให้น้ำไหลผ่านตัวกรองเป็นกระบวนการที่ต้องผ่านเยื่อแผ่น 2 ชั้นตอน คือ เยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำกร่อย และเยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำทะเล ซึ่ง

เยื่อแผ่นแรกสามารถกำจัดสีปรากฏซึ่งมาจากโรงฟอกย้อมได้ถึงร้อยละ 90 ความเข้มข้นของสีที่เหลือจะถูกส่งผ่านไปยังเยื่อแผ่นที่สอง และสามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 94 (ธนกฤต พรหมทอง, 2552) สำหรับกระบวนการกำจัดสีโดยใช้แผ่นกรองนาโนใช้หลักการเหมือนออสโมซิสผันกลับ แต่การกรองผ่านแผ่นนาโนมีประสิทธิภาพมากกว่าเนื่องจากมีรูขนาดที่เล็กกว่า ทำให้แยกสีออกจากน้ำได้ดีกว่าโดยสามารถแยกสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำออกจากสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น สารอินทรีย์เชื้อจุลินทรีย์กรดอินทรีย์ต่างๆ ซึ่งขนาดของแผ่นกรองส่วนใหญ่เป็นแบบเชิงประกอบที่มีรูพรุนประมาณ 1.5-2.5 นาโนเมตรและมีช่วงความดันที่ใช้ประมาณ 10-34 บาร์ (Van et al, 1995; Seungkwan & Menachem, 1997; Yacubowicz, 2005) เยื่อแผ่นนาโนสามารถกำจัดสีย้อมที่ความดัน 10 บาร์ อุณหภูมิ 45 และ 60 องศาเซลเซียส

มากกว่าร้อยละ 97 และจะลดลงเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น (ปิยนุช เหลืองโสวรรณ, 2544) ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะการกรองผ่านด้วยแผ่นนาโน ได้แก่ อัตราการไหลและลักษณะการไหล ความดัน ความเป็นกรดต่าง และอุณหภูมิ (ภัทร ศักดิ์เพชร, 2549)

นอกจากนี้ก็มีกระบวนการกำจัดสีจากโรงงานฟอกย้อมโดยการแยกสารผ่านเยื่อด้วยไฟฟ้า (Electrodialysis) ซึ่งเป็นระบบที่ใช้แผ่นกรองร่วมกับไฟฟ้ากระแสตรงแยกสารประจุบวกและประจุลบออกจากน้ำ โดยมีแผ่นกรองที่มีประจุบวก (Cation) และประจุลบ (Anion) ติดตั้งวางสลับกันเป็นชั้นๆ จากนั้นกระแสไฟฟ้าจะถูกส่งเข้าไปในช่องระหว่างแผ่นกรอง และขณะเดียวกันก็มีการปล่อยไฟฟ้ากระแสตรงผ่านแผ่นกรอง โดยแผ่นกรองประจุบวกยอมให้ประจุบวกไหลผ่านไปพร้อมกับน้ำส่วนหนึ่ง และแผ่นกรองประจุลบยอมให้สารประจุลบไหลผ่าน โดยน้ำที่มีประจุบวกและประจุลบรวมกันแล้วไหลทิ้งออกไป แต่มักเกิดปัญหาตะกอนเกาะติดแผ่นกรองทำให้สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ามาก และต้องทำล้างทำความสะอาดบ่อยครั้งจึงไม่ได้รับความนิยม (ไพศาล วีรกิจ, 2549)

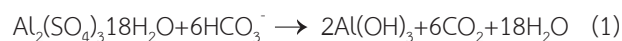
2. เทคโนโลยีการกำจัดสีทางเคมี (Chemical Technology)

2.1 การสร้างรวมตะกอน (Coagulation-flocculation)

การรวมตะกอนด้วยสารเคมีเป็นกระบวนการกำจัดสีแค้นและสีปรากฏในน้ำเสียโดยใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรดต่าง สารที่นิยมใช้เป็นสารเคมีสร้างตะกอน (Coagulant) คือ สารส้ม (Aluminium Sulfate; Alum) ปูนขาว (Calcium oxide) และเหล็กในรูปเฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4$) หรือเฟอร์รัสคลอไรด์ ($FeCl_2$) โดยถ้าโมเลกุลของสีมีขนาดเล็ก ละลายน้ำได้ดี การเกิดตะกอนของสีจะไม่สามารถทำได้ แต่ต้องปรับปรุงประสิทธิภาพของการรวมตะกอนให้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ โดยใช้สารช่วยให้เกิดการรวมตัวของตะกอน เช่น โพลีอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) (ธนกฤต พรหมทอง, 2552)

การกำจัดสีโดยการสร้างและรวมตะกอนเป็นการทำให้ตะกอนหรือสารแขวนลอยขนาดเล็ก (Colloid) รวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ขึ้น และสามารถตกตะกอน เนื่องจากอนุภาคของสารแขวนลอยมีประจุไฟฟ้าลบเป็นส่วนใหญ่ เมื่ออนุภาคเหล่านั้นมาพบกันก็จะผลักรันไม่สามารถรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงทำลายประจุของอนุภาคหรือทำให้อนุภาคเป็นกลางโดยการเติมสารเคมีสร้างตะกอนเรียกว่า กระบวนการสร้างตะกอน (Coagulation) หลังจากนั้นเกิดกระบวนการรวมกัน (Flocculation) ได้มากขึ้นโดยการเติมสารเคมีรวมตะกอน (Flocculants) ลงไปช่วยยึดหรือจับให้กลุ่มตะกอนที่รวมตัวกัน

เข้ามาจับเป็นกลุ่มตะกอนใหญ่ขึ้น เรียกว่า ฟล็อก (Floc) เมื่อตะกอนกลุ่มใหญ่ขึ้นก็มีน้ำหนักมากขึ้นก็จะสามารถตกตะกอนออกจากน้ำเสียได้ ซึ่งสารส้มมีคุณสมบัติทำหน้าที่เป็นทั้งสารสร้างและรวมตะกอน ในขั้นแรกจะเติมปริมาณน้อยเพื่อให้ประจุบวกที่เกิดขึ้นจะทำหน้าที่เป็นตัวสร้างตะกอน (Coagulant) ไปทำลายประจุลบ และเมื่อเติมสารส้มมากขึ้นจะเกิดเป็นตะกอนเบาของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) ซึ่งจะเป็นที่เกาะของอนุภาคต่างๆ ทำหน้าที่เป็นสารรวมตะกอน (สันตต์ ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2549) โดยสามารถละลายน้ำได้ดีถึง 71 ส่วนในน้ำ 100 ส่วน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เมื่อละลายน้ำจะทำปฏิกิริยาดังสมการที่ (1)



จากสมการที่ (1) อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์มีลักษณะเป็นเม็ดเหนียวๆ (คล้ายเม็ดแมงลักแต่เล็กกว่า) ไม่ละลายน้ำและจะตกตะกอนช้าๆ และระหว่างที่ตกตะกอนก็จะดึงเอาสารแขวนลอยต่างๆ มาเกาะเป็นเม็ดใหญ่ขึ้น จะมีประสิทธิภาพที่ความเป็นกรดต่างระหว่าง 5.0-7.0 ถ้าน้ำมีค่าสภาพต่างค่าเติมสารส้มมากทำให้สภาพต่างจะถูกทำลายหมด และจะทำให้ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำลดลงจนเป็นกรด ดังนั้นในบางกรณีจำเป็นต้องมีการเติมด่างไปพร้อมกับสารส้มเพื่อชดเชย ซึ่งปริมาณสารส้มที่ต้องใช้นั้นจะแตกต่างกันออกไป ขึ้นกับลักษณะของน้ำ จึงจำเป็นต้องหาปริมาณที่ถูกต้องด้วยวิธีทดสอบการตกตะกอน (Jar Test) โดยการเติมสารเคมีในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน แล้วเริ่มการกวนเร็วไม่เกิน 1 นาที แล้วเปลี่ยนความเร็วใบพัดมากวนช้า ประมาณ 5-20 นาที และหยุดให้เกิดการตกตะกอน (ไพศาล วีรกิจ, 2549) ซึ่งการตกตะกอนด้วยสารเคมี ทำให้มีกากตะกอน (Sludge) จำนวนมากต้องกำจัดต่อไป (Badawy & Ali, 2006) สำหรับปูนขาว (CaO) มีประสิทธิภาพไม่เท่าสารส้ม การใช้งานส่วนใหญ่มักจะเติมพร้อมกับสารส้ม เพื่อให้สารส้มตะกอนและปูนขาวปรับค่าความเป็นกรดต่างให้กับน้ำ ส่วนสารประกอบเหล็กในรูปต่างๆ ไม่ค่อยได้รับความนิยม เพราะมีราคาแพงกว่าสารส้ม และตะกอนของเหล็ก ($Fe(OH)_3$) ที่เกิดขึ้นอาจจะถูกจัดอยู่ในกลุ่มสารพิษ (ไพศาล วีรกิจ, 2549)

2.2 การออกซิเดชันทางเคมี (Chemical Oxidation)

กระบวนการออกซิเดชันทางเคมี ใช้สารเคมีเป็นปัจจัยสำคัญในการออกซิไดส์สารประกอบต่างๆ ในน้ำเสีย โดยสารเคมีที่นิยมใช้เป็นตัวออกซิแดนท์อย่างแพร่หลาย ได้แก่ สารเคมีเฟนต์ัน (Fenton's reagent) และโอโซน (O_3)

- กระบวนการเฟนต์ัน (Fenton process)

กระบวนการเฟนต์ัน คือ การออกซิเดชันขั้นสูงโดยใช้

สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) ทำปฏิกิริยากับเพอร์ร็อกซิไดออกไซด์ไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์สารอินทรีย์ (สุทธิณี นาควิทยา, 2551) ซึ่งไฮดรอกซิลของเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยอาศัยอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH[•]) ที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาเป็นตัวกลางสำคัญ ซึ่งอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลมีค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชันสูง แสดงถึงความสามารถในการในการรับอิเล็กตรอน ถ้าตัวออกซิไดซ์ที่แรงจะรับอิเล็กตรอนได้ง่ายมาก (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2546) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยาก จนเปลี่ยนเป็นรูปคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (Yang & James, 2006) มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสีของโรงงานย้อมสิ่งทอ (Ruey-Fang Yu et al, 2009) ปัจจุบันที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเฟนตัน ได้แก่ ความเข้มข้นของไฮดรอกซิล ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อุณหภูมิ ความเป็นกรดต่าง และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (ชนกฤต พรหมทอง, 2552)

- กระบวนการโอโซนออกซิเดชัน (Ozone oxidation) การกำจัดสีด้วยโอโซนทำให้พันธะของโมเลกุลที่ทำให้เกิดสี (Chromophores) แตกออกกลายเป็นโมเลกุลเล็กและสีหายไป

โดยสามารถแยกสลายโมเลกุลของสีที่มีความยาวมากให้มีขนาดสั้นลง ทำให้สีของน้ำเสียลดลงซึ่งโอโซนเป็นตัวออกซิไดส์ที่รุนแรง มีประสิทธิภาพสูงในการทำลายสีในน้ำได้ประมาณ 20 เท่าของการละลายในน้ำของออกซิเจน สามารถกำจัดสีแท้จริง ทำลายโครงสร้างโมเลกุลแบบโครงสร้างแบบโซ่ของสารอินทรีย์ (Rice et al, 1980) ความสามารถในการกำจัดสีมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัสกับโอโซนให้นานขึ้น และสีของน้ำลดลงมากที่สุดเมื่อผ่านน้ำทิ้งเข้าระบบเป็นเวลา 60 นาที ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำเสียเป็นปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโอโซนออกซิเดชันในการกำจัดสีโดยความเป็นกรดต่างเท่ากับ 12±0.1 เป็นสภาวะที่สามารถกำจัดสีด้วยกระบวนการโอโซนออกซิเดชันได้ดีที่สุด (วารสาร อกวิวัฒนาภิวัต และคณะ, 2550) ก๊าซโอโซนไม่เสถียรสามารถสลายตัวกลายเป็นออกซิเจนได้ง่าย จึงต้องผลิตขึ้นมาใช้ ณ สถานที่ใช้งานเลย หรือเป็นแบบติดอยู่กับที่ (Generated on-site) โดยวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตก๊าซโอโซนคืออากาศหรือออกซิเจน โดยออกซิเจน 2 โมเลกุลจะผลิตก๊าซโอโซนได้ 1 โมเลกุล ดังสมการ (2) และ (3) การผลิตก๊าซโอโซนโดยอากาศด้วยเครื่องผลิตโอโซนจะได้ก๊าซโอโซนประมาณร้อยละ 0.5-3 ในขณะที่การผลิตก๊าซโอโซนโดยใช้ออกซิเจนจะได้ก๊าซโอโซนประมาณร้อยละ 1 - 6 การผลิตโอโซนจะอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีในการเปลี่ยนออกซิเจนเป็นก๊าซโอโซน โดยอาศัยการทำปฏิกิริยาเคมีกับสารเคมีบางชนิดที่เป็นสารให้ออกซิเจน หรือปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีโดยป้อนออกซิเจนเข้าไปในห้อง

ปฏิกิริยาที่มีชั่วประจุไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูงมาก แล้วทำให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุลของออกซิเจนเป็นอนุมูลออกซิเจนอิสระและไปรวมตัวกับโมเลกุลของออกซิเจนเป็นก๊าซโอโซน ซึ่งการผลิตที่เป็นที่นิยมก็คืออาศัยหลักการปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในการผลิต (สันตติศรีอนันต์ไพบูลย์, 2549; วราภรณ์ กัลยาเลิศ, 2540)



โอโซนมีสถานะเป็นก๊าซที่ความดันและอุณหภูมิปกติความสามารถในการละลายของโอโซนในน้ำจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันรวมทั้งค่าความเป็นกรดต่างเป็นสำคัญ โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียรอัตราการสลายตัวจึงเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรดต่างและอุณหภูมิสูงขึ้น (วารสาร กัลยาเลิศ, 2540) อย่างไรก็ตามการใช้โอโซนอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น กรณีที่ก๊าซโอโซนเป็นสารให้ออกซิเจนอย่างแรง (Strongly oxidizing agent) อาจจะมีปัญหาเกี่ยวกับสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ รวมทั้งอาจมีการทำปฏิกิริยากับสารบางชนิดในน้ำ และเกิดสารบางชนิดขึ้นโดยสารเหล่านั้นเป็นสารก่อมะเร็ง (Carcinogenic compounds หรือ Mutagenic compound) (Lung, 2000)

นอกจากนี้ยังมีกระบวนการกำจัดสีแบบไฟฟ้าเคมี (Electrochemical process) ซึ่งสามารถกำจัดสีรีแอกทีฟในน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม โดยเป็นกระบวนการที่มีความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาเคมีและพลังงานไฟฟ้า เรียกว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์ ซึ่งเกิดขึ้นโดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากสารที่เกิดออกซิเดชันไปยังสารที่เกิดรีดักชันผ่านตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม (Yasar et al, 2007) ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปออกซิเดชันของโลหะที่ก่อให้เกิดสี ทำให้เลขออกซิเดชันของไอออนของโลหะเปลี่ยนไป และสามารถดูดซับกับสารแขวนลอยต่างๆ ที่อาจก่อให้เกิดสีด้วยตะกอนเบาในรูปของออกไซด์ที่ได้จากการแตกตัวของอิเล็กโทรดให้เกิดการตกตะกอนขึ้น (อมรภาค ชูทอง, 2551) กระบวนการไฟฟ้าเคมีมีกลไกการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ด้วยกระบวนการสร้างตะกอน (Coagulation) การดูดซับ (Adsorption) การตกตะกอน (Precipitation) และการลอยตัว (Floatation) ทำให้สามารถกำจัดสีออกจากน้ำเสียได้ (ปาริชาติ หมั่นสีทา, 2547 ; อมรภาค ชูทอง, 2551; Inan et al, 2004; Ugurlu et al, 2008) ซึ่งปริมาณกระแสไฟฟ้า ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาและระยะเวลาการตกตะกอน เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยเมื่อใช้ระดับกระแสไฟฟ้าระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และระยะเวลาการตกตะกอนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการลดสี (ดวงตา กิจแก้ว, 2546)

3. เทคโนโลยีทางชีวภาพ (Biological technology)

เทคโนโลยีทางกายภาพ และเคมีเป็นการใช้สารเคมีในการกำจัดสี ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและเกิดตะกอน ทั้งยังเป็นการเพิ่มสารเคมีเข้าสู่ระบบสิ่งแวดล้อม เทคโนโลยีทางชีวภาพจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ (โสภภาพรรณ รัตนพันธุ์, 2547) จึงมีการศึกษาการย่อยสลายโครงสร้างของสีย้อมกลุ่มอะโซ (ประกอบด้วยหมู่ -N=N- เกาะกับวงแอรอแมติก) และแอนทราควิโนน (ประกอบด้วยหมู่ conjugated aromatics) โดยจุลินทรีย์จำพวกยีสต์ ราและแบคทีเรียที่ย่อยบริเวณหมู่โครโมฟอร์และลดความเป็นพิษของสี (วีรานุช หลาง และคณะ, 2008) นอกจากนี้ Marco *et al* (2006) ศึกษาการย่อยสีรีแอคทีฟกลุ่มไดอะโซโดยยีสต์ *Candida oleophila* ที่แยกได้จากน้ำทิ้งในโรงงานสกัดน้ำมันมะกอก พบว่าการย่อยเกิดได้ดีในช่วง การเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วในอัตราคงที่ (exponential growth phase) โดยการย่อยเกิดโดยเอนไซม์ที่มีกิจกรรมคล้ายกับเอนไซม์อะโซรีดักเตส (azoreductase) ที่พบในแบคทีเรีย ซึ่งสามารถลดสีในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมได้

เทคโนโลยีทางชีวภาพสามารถนำมากำจัดสีแท้และสีปรากฏจากจากน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อม เยื่อกระดาษ และอุตสาหกรรมอื่นๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 การดูดซับด้วยสาหร่าย (Algae absorption)

สาหร่ายสามารถกำจัดสีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรม โดยการดูดซับสีเหล่านั้นภายใต้สภาวะที่มีแสงโดยเปลี่ยนโมเลกุลที่มีสีเป็นโมเลกุลที่ไม่มีสี (Dilek à F. B. *et al*, 1999) ซึ่งสาหร่ายช่อพริกไทย (*Caulerpa lentillifera*) สามารถดูดซับสีเบสจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมได้ โดยสมมูลของการดูดซับเป็นไปตามทั้งโมเดลของ Langmuir และ Freundlich (พิมล พันธุ์จันทู, 2549) นอกจากนี้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน และกลุ่มสาหร่ายสีเขียวมีประสิทธิภาพกำจัดสีของโรงงานผลิตสุราที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ โดยมีปัจจัยด้านปริมาณความเข้มข้นของอาหาร ปริมาณความเข้มข้น ปริมาณความเข้มข้นของเซลล์ตั้งต้น รวมทั้งค่าความเป็นกรดต่าง และเมื่อนำปฏิกิริยาเพนตันและโอโซนมาบำบัดร่วมกับการใช้สาหร่ายทั้งสองสายพันธุ์ พบว่าสาหร่ายทั้งสองสามารถกำจัดสีได้เพิ่มขึ้น (ชื่นจิต ชาญชิตปรีชา, 2542)

3.2 การย่อยสลายโดยเชื้อรา (Fungi decomposition)

กระบวนการกำจัดสีในน้ำทิ้งโดยเชื้อราเป็นการสร้างเอนไซม์นอกเซลล์กลุ่มลิกนินโอไลติก (Ligninolytic enzyme) (Iimura Y. *et al*, 1996; Leontievsky A. *et al*, 2001) ย่อยสลายเนื้อไม้ โดยเฉพาะเห็ดราในกลุ่มเชื้อราไวท์หรือหรือบราวหรือ (White or brown rot fungi) ซึ่งสามารถเจริญเติบโตได้ดีบนขอนไม้ โดยในเนื้อไม้มีองค์ประกอบที่สำคัญ คือ ลิกนินเซลลูโลส ทำให้สามารถ

กำจัดสีในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษได้ (พิมพ์ชนก เต็งเจริญ, 2546; Yuzhu Fu & Viraraghavan T., 2001) นอกจากนี้เชื้อรา *Aspergillus fumigates* สามารถผลิตสารแลคเคส เพอร์แมงกานีส และโซเดียมซึ่งมีประสิทธิภาพกำจัดสีโดยย่อยสลายลิกนินในช่วงความเป็นกรดต่าง 6.0-9.0 (Debendra K. Sahoo & Rimp Gupta , 2005) นอกจากนี้รา Isolate A19 ที่แยกได้จากเห็ด และรา Isolate B7 ที่แยกได้จากเห็ดและกิ่งไม้ไม่สามารถกำจัดสีและลิกนินของน้ำทิ้งในสภาวะที่มีน้ำตาลซูโครสเป็นอาหาร คาร์บอนและโซเดียมไนเตรตเป็นแหล่งอาหารไนโตรเจน ที่ความเป็นกรดต่าง 5 รวมทั้งเชื้อราเส้นใยสีขาว *Datronia* sp. KAPI0039 สามารถผลิตเอนไซม์ย่อยสลายลิกนินแลคเคสและแมงกานีสเพอร์ออกซิเดส ซึ่งทำให้สีรีแอคทีฟของน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอลดลง (จิรวท เจตน์จันทร์ และคณะ, 2552; อรชรีรา เพ็ชรช้อย และคณะ, 2552) การใช้ราในการกำจัดสีย้อมผ้าไม่ค่อยเป็นที่นิยมเนื่องจากมีข้อด้อยในด้านความสะดวกในการใช้งาน การเก็บรักษา รวมถึงการขนส่ง จึงมีการทดลองนำราชนิด *Lentinus polychrous* Lev. ซึ่งอยู่ในรูปของเส้นใยแห้งที่ได้จากการทำแห้งแบบฟลูอิดซ์ (fluidized bed drying) กำจัดสีจากโรงงานฟอกย้อม พบว่าสามารถกำจัดสีได้รวมทั้งการทำแห้งเป็นวิธีง่ายและสะดวก อีกทั้งสามารถประหยัดพลังงานทำให้มีต้นทุนต่ำ (ปัทมา พลอยสว่าง และภคมน จิตประเสริฐ, 2551) โดยปัจจัยที่มีผลต่อกิจกรรมเอนไซม์และการเจริญเติบโต ได้แก่ สารอาหาร คือ ระดับความเข้มข้นไนโตรเจน และคาร์บอน อุณหภูมิ ความเป็นกรดต่าง สารยับยั้ง จากกระบวนการแคทาไลซิสหรือไฮโดรไลซิสของเอนไซม์ และอิออนโลหะ ได้แก่ แมงกานีส (โสภภาพรรณ รัตนพันธุ์, 2546)

3.3 การย่อยสลายด้วยแบคทีเรีย (Bacteria decomposition)

การย่อยสลายสีด้วยแบคทีเรียสามารถลดสีหลายประเภทโดย Walker & Weatherley (2000) ศึกษาการดูดซับสีกลุ่มแอนทราควิโนนโดยเชื้อ *Bacillus gordonae*, *B. benzeovorans* และ *Ps. putida* ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีเท่ากับร้อยละ 13, 19 และ 18 ตามลำดับ และการย่อยสลายสีรีแอคทีฟ Red 2 พบว่า สามารถกำจัดได้ดีโดยกระบวนการเอสปีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก แบคทีเรียที่มีความสำคัญในการกำจัดสี 3 สกุล คือ *Pseudomonas* sp., *Proteus* sp. และ *Klebsiella* sp. (ฉาติศา เนียมมณี, 2542) นอกจากนี้วีรานุช หลาง และคณะ (2008) ศึกษาประสิทธิภาพของแบคทีเรียสายพันธุ์ *Burkholderia glumae* ในการย่อยสลายสีรีแอคทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า กระบวนการ

บำบัดแบบไม่เติมอากาศให้ผลเร่งการกำจัดได้ดีกว่าการบำบัดแบบเติมอากาศ โดยสามารถขจัดสีในน้ำทิ้งได้ร้อยละ 76 ในเวลา 7 วัน โดยปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลาย คือ ค่าความเป็นกรดต่าง ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม สารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญ รวมถึงความต้องการอากาศในการเจริญของเชื้อแบคทีเรียและการย่อยสลายสี

สรุป (Conclusion)

การกำจัดสีจากน้ำเสียอุตสาหกรรมซึ่งเป็นสีแท้หรือสีจริงจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โรงงานอบไม้ยางพารา ส่วนสีปรากฏจากโรงงานทอผ้า ฟอกย้อมหรือสีของน้ำเสียจากโรงงานกระดาษต้องมีกระบวนการกำจัดที่เหมาะสมกับลักษณะของสี โดยมีเทคโนโลยีทางกายภาพ ได้แก่ กระบวนการดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ และกระบวนการกรองด้วยเยื่อแผ่น ส่วนเทคโนโลยีการกำจัดสีทางเคมี ได้แก่ การรวมตะกอนด้วยสารเคมี โดยใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรดต่าง โดยสารที่นิยมใช้เป็นสารเคมีสร้างตะกอน คือ สารส้ม ปูนขาว และเหล็กในรูปเฟอร์รัสซัลเฟต หรือเฟอร์รัสคลอไรด์ กระบวนการออกซิเดชันทางเคมี โดยสารเคมีที่นิยมใช้เป็นตัวออกซิแดนท์อย่างแพร่หลาย ได้แก่ โอโซน และสารเคมีเพนตัน รวมถึงกระบวนการแบบเคมีไฟฟ้า การใช้เทคโนโลยีทางกายภาพ และเคมีสามารถกำจัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากการใช้สารเคมีในการกำจัดสี นอกจากจะสิ้นเปลืองแล้วยังเกิดตะกอนจากการบำบัดสูง ทั้งยังเป็นการเพิ่มสารเคมีเข้าสู่ระบบสิ่งแวดล้อมรวมทั้งการทำปฏิกิริยาต่างๆ อาจก่อให้เกิดสารตั้งต้นของสารก่อมะเร็ง และผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำได้ จึงมีการนำเทคโนโลยีการกำจัดสีทางชีวภาพมาใช้ ได้แก่ การใช้สาหร่าย รา และแบคทีเรีย แต่มีข้อด้อยในด้านความสะดวกในการใช้งาน การเก็บรักษา รวมถึงการขนส่ง รวมถึงการควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับและย่อยสลาย ได้แก่ ค่าความเป็นกรดต่าง ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม สารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญ อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีหลายประเภทสามารถกำจัดได้ทั้งสีแท้และสีปรากฏ ดังนั้นการเลือกเทคโนโลยีที่ใช้กับน้ำเสียที่เกิดขึ้นของอุตสาหกรรมแต่ละประเภทต้องคำนึงถึงลักษณะน้ำเสีย ปริมาณ ประสิทธิภาพ ค่าใช้จ่าย ฯลฯ เพื่อประโยชน์สูงสุดควรมีการทดสอบวิธีการในการกำจัดสี โดยการนำน้ำเสียมาทดลองก่อนและประเมินค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสมต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- กัณทริย์ ศรีพงษ์พันธุ์. (2547). *มลพิษทางน้ำ*. (พิมพ์ครั้งที่ 3) กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- กัลยา ศรีสุวรรณ. (2547). *โมเดลการเกิดฟาวลิงของเมมเบรนสำหรับการกำจัดสีในกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม*. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, วิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. (2546). *ของเสียอันตราย*. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยรังสิต, ปทุมธานี.
- จิรวท เจตน์จันทร์, อรชिरา เพ็ชรช้อย, พิลานี ไถนอมสัจด์, วราภรณ์ อภิวัฒนาภิวัด, ต่อพงศ์ กรีธาชาติ และสาวิตรี จันทรานุรักษ์. (2552). การลดสีน้ำทิ้งที่มีลักษณะเป็น ส่วนประกอบโดยเชื้อราเส้นใยสีขาว *Datronia* sp. KAPI0039. ใน *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 47 : สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม*. (น. 236-244). กรุงเทพฯ.
- ชินจิต ชาอุชิตปรีชา. (2542). *การใช้สาหร่ายกำจัดสีและซีไอดีในน้ำทิ้งจากโรงงานสุราที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ*. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, สุขาภิบาลสิ่งแวดล้อม, คณะสาธารณสุขศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหิดล.
- ดวงดา กิจแก้ว. (2546). *การกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี*. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, เทคโนโลยีการบริหารสิ่งแวดล้อม, คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากร, มหาวิทยาลัยมหิดล.
- ฉालิศา เนียมมณี. (2542). *การกำจัดสีรีแอกทีฟ 2 ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยแบคทีเรียเด่นในกระบวนการเอลบีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก*. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, สหสาขาวิชา (วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชนกฤต พรหมทอง. (2552). *การกำจัดสีและสารอินทรีย์ของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยน้ำหมักชีวภาพแลเพนตันรีเอเจนต์*. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, การจัดการสิ่งแวดล้อม, คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ปาริชาติ หมื่นสีทา. (2547). *การกำจัดสีและซีไอดีจากน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ผ่านการบำบัดบางส่วนโดยใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า*. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- ปิยนุช เหลืองโสวรรณ. (2544). *การบำบัดน้ำล้างสีย้อมจากกระบวนการฟอกย้อมโดยใช้เยื่อแผ่นนาโนฟิลเตรชัน*. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. วิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ปัทมา พลอยสว่าง และภคมน จิตประเสริฐ. (2551). อิทธิพลของสภาวะแวดล้อมและการกระตุ้นการเจริญต่อการกำจัดสีย้อมผ้าโดย *Lentinus polychrous* Lev. ที่ผ่านการทำแห้งแบบฟลูอิดไรซ์. ใน *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 46 : สาขาอุตสาหกรรมเกษตร*, (น. 270-277). กรุงเทพฯ.
- พิมล พันธุ์จัญหาญ. (2549). *การกำจัดสีเบสด้วยกลไกการดูดซับทางชีวภาพ*. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, วิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พิมพ์ชนก เต็งเจริญ. (2546). *การกำจัดสีของน้ำทิ้งในการผลิตลิกนินโดยราไวด์รอต*. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, สาขาเคมี, คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ไพศาล วีรกิจ. (2549) *การผลิตน้ำสำหรับอุตสาหกรรม*. (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ หจก.นำอักษรการพิมพ์.
- พวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกูล. (2548). *โครงการการใช้กระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันในการบำบัดน้ำเสียขึ้นต้นสำหรับน้ำเสียจากโรงพยาบาล*. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.
- ภัทร ศักดิ์เพชร. (2549). *การแยกเกลือในน้ำปลาด้วยกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน*. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, เทคโนโลยีอาหาร, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- มงคล ดำรงค์ศรี และต่อพงศ์ กริธาชาติ. (2546). การลดสีจากน้ำทิ้งที่บำบัดแล้วของโรงงานเยื่อและกระดาษโดยกระบวนการดูดซับด้วยแอคติเวตเต็ดคาร์บอนใน. *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 41: สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์*. (หน้า. 261-268). กรุงเทพฯ.
- วรารณณ์ กัลยาเลิศ. (2540). *การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมด้วยโอโซน*. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาสิ่งแวดล้อม, คณะสาธารณสุขศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหิดล.
- วรารณณ์ อภิวัฒนาภิวัด, ต่อพงศ์ กริธาชาติ และพิลาณี ไวถนอมสัตย์. (2550). การลดสีน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษโดย โอโซนออกซิเดชัน. ใน *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 45: สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม*. (หน้า. 825-834). กรุงเทพฯ.
- วีรานุช หลาง, ธนสิริ มีชัย และ วิชชุพร จันท์ศรี. (2551). ความสามารถในการกำจัดสีย้อมผ้าประเภทที่แอกทีฟของ *Burkholderia glumae*. *Environment and Natural Resources Journal*, 6, 66-81.
- ศุภลักษณ์ อรรถนพ. (2552). *ผลของการเติมอากาศแบบเป็นช่วงต่อระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนสำหรับบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม*. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, การจัดการสิ่งแวดล้อม, คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สุทธินี นาควิทยา. (2551). *ออกซิเดชันสาร 2,6-ไดเมธิลอะนิลีนโดยกระบวนการฟลูอิดไรซ์เบดเฟนตัน*. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สันทัต ศิริอนันต์ไพบูลย์. (2549). *ระบบบำบัดน้ำเสีย : การเลือกใช้การออกแบบ การควบคุม และการแก้ปัญหา*. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด.
- โสภภาพรณ รัตนพันธุ์. (2547). การบำบัดและกำจัดสีของน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยเส้นใยเห็ด *Lentinus spp.* วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, เทคโนโลยีชีวภาพ, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- อมรภัก ชูทอง. (2551). *การบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี*. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, การจัดการสิ่งแวดล้อม, คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- อุตร จารุรัตน์, จารุรัตน์ วรรณสรากุล และศักดิ์ชัย สุริยจันทร์ทอง. (2542). *วิศวกรรมการประปาและสุขาภิบาล เล่ม 1*. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพฯ.

- อรชรีรา เพ็ชรชัย, พิลาณี ไวกอนอมสตัย, วราภรณ์ อภิวัฒน์นาวิวัต, จิรวาท เจตน์จันทร์, นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และศวพร ศุภผล (2552). การย่อยสลายทางชีวภาพของสีรีแอคทีฟโดยเชื้อราเส้นใยสีขาว *Datronia* sp. KAPI0039. ใน *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 47 : สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม*. (น. 245-252). กรุงเทพฯ.
- Badawy M.I. & Ali M.E.M. (2006). Fenton's peroxidation and coagulation processes for the treatment of combined industrial and domestic wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 136, 961-966.
- Bruce Seelig, Fred Bergsrud & Russell Derickson. (2007). *Treatment Systems for Household Water Supplies Activated Carbon Filtration*. Retrieved August 19, 2010 from <http://www.ag.ndsu.edu/pubs/h2oqual/watsys/ae1029w.htm>
- Chulhwan Park, Myunggu Lee, Byunghwan Lee, Seung-Wook Kim, Howard A. Chase, Jinwon Lee & Sangyong Kim. (2007). Biodegradation and biosorption for decolorization of synthetic dyes by *Funalia trogii*. *Biochemical Engineering Journal*, 36, 59-65.
- Debendra K. Sahoo & Rimpay Gupta. (2005). Evaluation of ligninolytic microorganisms for efficient decolorization of a small pulp and paper mill effluent. *Process Biochemistry*, 40, 1573-1578.
- Dilek á F. B., Taplamacioglu á H. M. & Tarlan E. (1999). Colour and AOX removal from pulping effluents by algae. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 52, 585-591.
- Duygu Ozsoy H. & Van Leeuwen J. (2010). Removal of Color from Fruit Candy Waste by Activated Carbon Adsorption. *Journal of Food Engineering*, 101, 106-112.
- George Tchobanoglous, Franklin L. Burton, & David Stensel H. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. 4th ed. Boston, McGraw-Hill c2003.
- limura Y. , Hartikainen P. & Tatsumi K. Dechlorination of tetrachloroguaiacol by laccase of white-rot basidiomycete. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 45, 434-439.
- Inan H., Anatoly Dimoglo, imek H. & Karpuzcu M. (2004). Olive oil mill wastewater treatment by means of electro-coagulation. *Separation and Purification Technology*, 36, 23-31.
- Leontievsky A., Myasoedova N., Baskunov B., Golovleva L., Bucke C. & Evans C. (2001) Transformation of 2,4,6-trichlorophenol by free and immobilized fungal laccase. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 57, 85-91.
- Lung-Chyuan Chen. (2000). Effects of Factors and Interacted Factors on The Optimal Decolorization Process of Methyl Orange by Ozone. *Water Research*, 34, 974-982.
- Mahesh S., Prasad B., Mall I. D., & Mishra I. M. (2006). Electrochemical Degradation of Pulp and Paper Mill Wastewater. Part 1. COD and Color Removal. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 22, 9786-9796.
- Marco S. Lucas, Carla Amaral, Ana Sampaio, José A. Peres & Albino A. Dias. (2006). Biodegradation of the diazo dye Reactive Black 5 by a wild isolate of *Candida oleophila*. *Enzyme and Microbial Technology*. 39, 51-55.
- Radha K.V., Sridevi V. & Kalaivani K. (2009). Electrochemical oxidation for the treatment of textile industry wastewater. *Bioresource Technology*, 100, 987-990.
- Rice R.G., Miller G.W., Robson C.M. & Hill A.G. (1980). Ozone Utilization in Europe. In. *AIChE Symposium Series*, Ozone Institute, Toronto, 117-134.
- Roop Chand Bansal & Meenakshi Goyal. (2005). *Activated Carbon Adsorption*. CRC Press.
- Ruey-Fang Yu, Ho-Wen Chen, Wen-Po Cheng, & Peng-Han Hsieh. (2009). Dosage Control of the Fenton Process for Color Removal of Textile Wastewater Applying ORP Monitoring and Artificial Neural Networks. *Journal of Environmental Engineering*, 135, 325-332.

- Seungkwan Hong & Menachem Elimelech. (1997). Chemical and physical aspects of natural organic matter (NOM) fouling of nanofiltration membranes. *Journal of Membrane Science*, 132, 159-181.
- Shaobin Wang. (2008). A Comparative study of Fenton and Fenton-like reaction kinetics in decolourisation of wastewater. *Dyes and Pigments*, 76, 714-720.
- Süreyya Meriç, Deniz Kaptan & Tu ba Ölmez (2003). Color and COD removal from wastewater containing Reactive Black 5 using Fenton's oxidation process. *Chemosphere*, 54, 435-441.
- Van der Horst H.C., Timmer J. M. K., Robbertsen T. & Leenders J. (1995). Use of nanofiltration for concentration and demineralization in the dairy industry: Model for mass transport. *Journal of Membrane Science*, 104, 205-218.
- Uğurlu M., Gürses A., Ç. Dogar & Yalçın M. (2008). The removal of lignin and phenol from paper mill effluents by electrocoagulation. *Journal of Environmental Management*, 87, 420-428 .
- Walker G.M. & Weatherley L.R. (2000). Biodegradation and biosorption of acid anthraquinone dye. *Environmental Pollution*, 108, 2, 219-223.
- Yacubowicz H. & Yacubowicz J. (2005). Nanofiltration : Properties nano and uses. *Filtration + Separation*, 42, 16-21.
- Yang Deng & James D. Englehardt. (2006). Treatment of landfill leachate by the Fenton process . *Water Research*, 40, 3683-3694 .
- Yasar Avsar, Ugur Kurt & Talha Gonullu. (2007). Comparison of classical chemical and electrochemical processes for treating rose processing wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 148, 340-345.
- Yuzhu Fu & Viraraghavan T. (2001). Fungal decolorization of dye wastewaters: a review. *Bioresource Technology*, 79, 251-262.