

## การคายประจุไฟฟ้าของพลาสมาโอโซนในเซออร์และการประยุกต์ใช้งาน

ยุทธนา ฐิระวณิชกุล<sup>1</sup> พิษณุศักดิ์ จันทร์กุล<sup>2</sup> และ สุภวรรณ ฐิระวณิชกุล<sup>3</sup>

### Abstract

Tirawanichakul, Y.<sup>1</sup>, Chankuson, P.<sup>1</sup> and Tirawanichakul, S.<sup>2</sup>  
**Electrical discharges of plasma ozonizer and its application**  
Songklanakar J. Sci. Technol., May 2007, Suppl 2 : 365-378

Ozone synthesis is one of the applications of near atmospheric plasma processing. An ozone generator in this research comprised two annular cylindrical-shaped electrodes. The inner electrode was made of stainless steel covered with the dielectric glass and the outer electrode was also made of stainless steel. The electric spacing gap was 0.0075 m and length of ozonizer was 0.21 m. Oxygen gas passing through the discharge gap between two electrodes supplied by an alternating current (AC) high voltage power supply, frequency 50 Hz, ranging of 6-10 kV<sub>AC</sub> was used for producing ozone. The amount of ozone was determined by the KI standard method. The result showed that the concentration of ozone is proportional to the AC applied voltage. For determining effect of purified oxygen feed rate of 6-10 L/min on quantity of ozone, the results indicated that at the volumetric flow rate of 8 L/min produced the largest amount of ozone. In addition, ozone concentration at a flow rate of 8 L/min and an electrical discharge time of 3 minutes was approximately determined as 41, 60, 80 and 135 mg/L at 8, 9, 10 and 11 kV<sub>AC</sub>, respectively.

Moreover, study of dye wastewater of Krajud mat was proposed and treated by three different methods. Firstly, dye wastewater was solely treated by a plasma ozonation. Secondly, a combination of ozonation and alum coagulation was used for dye wastewater treatment. Finally, the combined ozonation

---

<sup>1</sup>Department of Physics, Faculty of Science, <sup>2</sup>Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, 90112 Thailand.

---

<sup>1</sup>ปร.ด. (เทคโนโลยีพลังงาน) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ <sup>2</sup>นักศึกษาลักสูตร วท.ม. สาขาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ <sup>3</sup>ปร.ด. (เทคโนโลยีพลังงาน) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

Corresponding e-mail: yutthana.t@psu.ac.th

and activated carbon adsorption were used for dye wastewater treatment. The experimental results showed that the percentage of light absorbance reduction of pink dyed wastewater for these three different methods was about 56%, 35% and 10%, respectively compared to the reference sample. In addition, For these methods, the percentage of BOD of treated dye wastewater could be reduced to 64%, 54% and 46% respectively, the percentage of COD could be reduced to approximately 78%, 62% and 27%, respectively, compared to the reference sample. In conclusion, the most effective method for dye wastewater treatment was the combination of ozonation and adsorption by activated carbon.

For chemical compound analysis, the Fourier Transform Infrared (FTIR) spectrograph illustrated that the treated dye solutions using ozonation were slightly different compared to the reference sample. This is due to some complicated functional groups (methylene, carboxylate etc.) being broken down during ozonation.

**Key words :** activated carbon, low-temperature plasma, ozone synthesis, wastewater

### บทคัดย่อ

ยุทธนา ฐิระวณิชชกุล พิษณุศักดิ์ จันทร์กุล และ สุภวรรณ ฐิระวณิชชกุล  
ดิสซาร์จไฟฟ้าของพลาสมาโอโซนในเซอร์และการประยุกต์ใช้งาน

ว. สงขลานครินทร์ วทท. พฤษภาคม 2550 ฉบับพิเศษ 2 : 365-378

การผลิตโอโซนเป็นการประยุกต์ใช้งานอย่างหนึ่งในกระบวนการทางพลาสมา เครื่องกำเนิดโอโซนในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าทรงกระบอก ขั้วไฟฟ้าภายในทำจากสแตนเลส และถูกหุ้มด้วยแก้วไพเร็กซ์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารไดอิเล็กตริก ขั้วไฟฟ้าภายนอกทำจากโลหะไรซินิม เมื่อผ่านก๊าซออกซิเจนไปยังช่องดิสซาร์จระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง พร้อมกับจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความต่างศักย์สูงให้กับขั้วไฟฟ้าทั้งสอง จะเกิดโอโซน ซึ่งปริมาณความเข้มข้นของโอโซนหาได้โดยวิธีมาตรฐานโพแทสเซียมไอโอไดด์ จากผลการวิจัยพบว่า ปริมาณความเข้มข้นของโอโซนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความต่างศักย์ไฟฟ้า และเมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนตั้งแต่ 6-10 ลิตร/นาที พบว่าอัตราการไหลของออกซิเจนที่ให้ปริมาณโอโซนสูงสุดคือ 8 ลิตร/นาที ซึ่งปริมาณความเข้มข้นของโอโซนที่ได้ เมื่อจ่ายศักย์ไฟฟ้า 8-11 กิโลโวลต์ ให้แก่เครื่องกำเนิดโอโซน และให้อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 8 ลิตร/นาที ในเวลา 3 นาที ได้โอโซนประมาณ 41, 60, 80 และ 135 มก./ลิตร ตามลำดับ

นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาการประยุกต์ใช้โอโซนร่วมกับวิธีการต่าง ๆ เพื่อบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการย้อมสีเสื่อกระจูด ซึ่งมี 3 วิธี คือ วิธีหนึ่งการใช้โอโซนขั้นตอนเดียวในการบำบัด วิธีที่สองคือ การใช้โอโซนร่วมกับการตกตะกอนด้วยสารส้มในการบำบัด และวิธีที่สามคือการใช้โอโซนร่วมกับการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ ผลการทดลองพบว่า ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเสียสีย้อมสีชมพูหลังผ่านการบำบัดทั้ง 3 วิธี เหลืออยู่ประมาณ 56%, 35% และ 10% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเสียสีย้อมสีชมพูที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการบำบัด และค่า BOD เหลืออยู่ประมาณ 64%, 54% และ 46% ตามลำดับ และค่า COD เหลืออยู่ประมาณ 78%, 62% และ 27% ตามลำดับ สรุปได้ว่าวิธีบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมเสื่อกระจูดที่เหมาะสมที่สุดภายใต้เงื่อนไขการทดลองในงานวิจัยนี้คือ การใช้โอโซนร่วมกับการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบที่เปลี่ยนแปลงไปของน้ำเสียจากสีย้อมทางเคมี โดยใช้วิธีฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี FTIR ศึกษาโครงสร้างของสีย้อมเปรียบเทียบก่อนและหลังบำบัดด้วยโอโซน พบว่าโครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงไปโดยมีหมู่ฟังก์ชันบางหมู่หายไปเนื่องจากการแตกตัวระหว่างการผลิตโอโซนขึ้น สิ่งนี้น่าจะมีสาเหตุเนื่องมาจากพันธะทางโครงสร้างของหมู่ฟังก์ชันบางหมู่ถูกทำลายไป (เช่น methylene, carboxylate เป็นต้น) เนื่องจากโอโซนขึ้น

ดิสชาร์จไฟฟ้าแบบโคโรนาเป็นการแตกตัวของก๊าซในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอที่ความดันสูงกว่าหรือเท่ากับความดันบรรยากาศ ขึ้นอยู่กับรูปทรงเรขาคณิตของขั้วไฟฟ้า ลักษณะของดิสชาร์จคล้ายกับดิสชาร์จเรืองแสง ดิสชาร์จโคโรนาสามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ในระดับมิลลิแอมแปร์ และเกิดขึ้นได้ต่อเนื่องโดยลำพัง เช่น กรณีสายไฟฟ้าแรงสูงกระแสนางขนานกัน จะเกิดการเรืองแสงรอบเส้นลวด เมื่อศักย์เพิ่มขึ้นบริเวณเรืองแสงกว้างขึ้น โคโรนาในอากาศ มีผลทำให้เกิดโอโซนและออกไซด์ของไนโตรเจน (ชัยวิทย์, 2529) การนำดิสชาร์จไฟฟ้าแบบโคโรนาไปใช้มีมากกว่า 100 ปี มีการนำไปใช้ทางการค้า เช่น การถ่ายภาพทางไฟฟ้า การกำจัดสารพิษ และการเกิดโอโซน (Jen-Shih Chang *et al.*, 1991; Eliasson and Kogelchatz, 1991(a,b); ยุทธนา และคณะ 2541) เป็นต้น

การกำเนิดโอโซนด้วยวิธีดิสชาร์จไฟฟ้าแบบโคโรนา (Corona discharges) และดิสชาร์จแบบไดอิเล็กตริกแบริเออร์ (Dielectric barrier discharges) เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากใช้พลังงานไฟฟ้าในการดิสชาร์จน้อยเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ และสามารถทำได้ที่ความดันบรรยากาศ เริ่มต้นจากอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าความเข้มสูงเมื่ออิเล็กตรอนมีความเร็วสูง และมีพลังงานจลน์ในช่วง 6-7 eV ซึ่งเพียงพอที่จะสลายพันธะระหว่างโมเลกุลออกซิเจนทำให้เกิดเป็นอะตอม 2 อนุภาค โดยการแตกตัวนี้จะเกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง การชนกันของอะตอมออกซิเจนสามารถจับตัวเป็นโมเลกุลใหม่ โดยอาจจะเป็น O<sub>2</sub> หรือ O<sub>3</sub> ก็ได้ นอกจากนี้การชนกันระหว่างอะตอมและโมเลกุลออกซิเจนก็อาจเกิดขึ้นเป็นโอโซนเช่นกัน แต่การชนของอิเล็กตรอนกับโมเลกุลออกซิเจนจะไม่เกิดเป็นอะตอมออกซิเจนเสมอไป เพราะมีปฏิกิริยาทางเคมีที่เป็นไปได้ระหว่างการเกิดดิสชาร์จโคโรนามากกว่า 139 ปฏิกิริยา ข้อสำคัญของการกำเนิดโอโซนวิธีนี้คือ อากาศที่ป้อนให้กับเครื่องกำเนิดโอโซนจะต้องแห้งปราศจากความชื้น เนื่องจากความชื้นจะมีผลต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์โอโซน และมีผลต่ออายุการใช้งานของเครื่องกำเนิดโอโซนอีกด้วย (ไพฑูรย์, 2545) ในงานวิจัยนี้เครื่องกำเนิดโอโซนประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าทรงกระบอก ขั้วไฟฟ้าภายในทำจากสแตนเลส และถูกหุ้มด้วยแก้วไฟเร็กซ์ทำหน้าที่เป็นสารไดอิเล็กตริก ซึ่งสารนี้จะมีหน้าที่ 2 ประการคือ จำกัดการเคลื่อนย้ายของประจุไปยังขั้วไฟฟ้า

(ป้องกันการลัดวงจร) อีกประการหนึ่งคือ ช่วยให้เกิดการกระจายของดิสชาร์จไฟฟ้าระดับจุลภาค (Micro-discharges) ให้ทั่วช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้านั้นเพื่อให้กระแสอิเล็กตรอนมีโอกาสสัมผัสกับอนุภาคของก๊าซให้ได้มากที่สุด ขั้วไฟฟ้าภายนอกทำจากโลหะไร้สนิม เมื่อผ่านก๊าซออกซิเจนไปยังช่องดิสชาร์จระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองพร้อมกับจ่ายไฟฟ้า กระแสสลับความต่างศักย์สูงให้กับขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะได้ก๊าซไอโซนออกมา โดยพลังงานอยู่ในระดับไม่เกิน 10 eV

โอโซนสามารถนำมาประยุกต์ในการใช้งานได้หลายด้าน ทั้งนี้เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่มีประสิทธิภาพรองจากก๊าซคลอรีนเท่านั้น ทำให้การออกซิไดซ์เกิดขึ้นรวดเร็วและสมบูรณ์กว่าการใช้ตัวออกซิไดซ์อื่นๆ สามารถลดค่า BOD (Biological Oxygen Demand) และ COD (Chemical Oxygen Demand) ได้, สามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ และไม่มีปัญหาในการกำจัดกากตะกอน เมื่อใช้ในปริมาณมากจะสามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่ยากต่อการออกซิไดซ์ได้, สามารถลดสี กลิ่น ความขุ่น และสารตั้งผิวได้, เพิ่มปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO) เป็นต้น การประยุกต์ใช้งานโอโซนจึงมีมากมายหลายด้าน เช่น อุตสาหกรรมอาหาร ในการฆ่าเชื้อโรคสำหรับอุตสาหกรรมบรรจุขวดพลาสติก โรงงานอุตสาหกรรมใช้โอโซนในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานหลายประเภท เช่น โรงงานย้อมผ้า โรงงานกระดาษ เป็นต้น (ไพฑูรย์, 2545) จากที่กล่าวมาจึงเป็นที่มาในการศึกษาสมบัติต่างๆ ที่ทำให้เกิดโอโซน และนำมาศึกษาผลที่ได้จากการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสียสี่ย้อมและเปรียบเทียบกับวิธีการบำบัดด้วยวิธีอื่นๆ เพื่อหาแนวทางการลดปัญหามลภาวะทางน้ำที่เกิดขึ้นจากการใช้สี่ย้อมผ้า โดยเฉพาะชุมชนในพื้นที่ภาคใต้ที่มีการทำเสื้อกระจุกเป็นอาชีพ

## วัสดุและวิธีการทดลอง

### 1. การหาความเข้มข้นของโอโซน ด้วยวิธีมาตรฐานโพแทสเซียมไอโอไดด์ (AOAC, 1995)

การเตรียมสารละลายสำหรับการทดสอบปริมาณความเข้มข้นของโอโซนจะประกอบด้วย สารละลายที่สำคัญ 2 ชนิด ได้แก่ สารละลายไอโอดีนมาตรฐานเพื่อทำการพามาตรฐาน และสารละลาย Absorbing reagent สำหรับทดสอบการเกิดโอโซน โดยการเตรียมสารละลาย Absorbing reagent

1% KI ใน 0.1 M Phosphate buffer ทำได้โดยชั่งสาร  $KH_2PO_4$  13.61 กรัม, KI 10.00 กรัม และ Anhydrous disodium hydrogen phosphate 14.20 กรัม ละลายสารเคมีทั้งหมดในน้ำกลั่น (Double distilled water) ทำให้มีปริมาตร 1 ลิตร และการเตรียมสารละลายไอโอดีนมาตรฐาน 0.025 M ทำได้โดยชั่งสาร KI 16.0 กรัม, I 3.1730 กรัม ละลายสารเคมีทั้งหมดในน้ำกลั่น และทำให้มีปริมาตร 500 มล. ทั้งสองสารละลายจะต้องเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 1 วัน ก่อนนำมาใช้

สร้างกราฟไอโอดีนมาตรฐาน โดยเตรียมสารละลายไอโอดีนมาตรฐาน 0.00125 M โดยปีเปตสารละลายไอโอดีนมาตรฐาน 0.025 M ปริมาตร 5 มล. ทำให้มีปริมาตรเป็น 100 มล. โดยให้ละลายในสารละลาย Absorbing reagent ปีเปตสารละลายไอโอดีนมาตรฐาน 0.00125 M ปริมาตร 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 และ 1.2 มล. ละลายด้วยสารละลาย Absorbing reagent จนได้ปริมาตร 25 มล. นำสารละลายไอโอดีนมาตรฐานความเข้มข้นต่างๆ ที่เตรียมไว้หาค่าการดูดกลืนของแสง (absorbance) ที่ค่าความยาวคลื่น 352 นาโนเมตร ซึ่งเป็นค่าพีคที่เห็นชัดเจนที่สุด

**2. ศึกษาหาความสัมพันธ์ของปริมาณโอโซนกับอัตราการไหลของออกซิเจน**

อัตราการไหลที่ต่างกันทำให้ปริมาณโอโซนที่ได้เปลี่ยนแปลงไปด้วย จึงต้องมีการหาปริมาณโอโซนที่อัตราการไหลของออกซิเจนต่างๆ กัน เพื่อจะได้ทราบอัตราการไหลของออกซิเจนที่เหมาะสมในการผลิตโอโซน โดยใช้อัตราการไหล 6, 7, 8, 9 และ 10 ลิตร/นาที โดยกำหนดให้ความต่างศักย์ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเป็น 8, 9, 10 และ 11 กิโลโวลต์

**3. ศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณโอโซนกับความต่างศักย์ไฟฟ้า**

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าให้กับเครื่องกำเนิดโอโซน ปริมาณโอโซนที่ได้จะเปลี่ยนแปลงไป จึงมีการหาค่าปริมาณโอโซนที่เวลาต่างๆ ของแต่ละความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยผ่านออกซิเจนไปยังเครื่องกำเนิดโอโซน โดยกำหนดให้อัตราการไหลของออกซิเจนเป็น 8 ลิตร/นาที ให้ความต่างศักย์ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเป็น 8 กิโล

โวลต์ เป็นเวลา 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.5 นาที ตามลำดับ เปลี่ยนความต่างศักย์ให้เป็น 9, 10 และ 11 กิโลโวลต์ ตามลำดับ

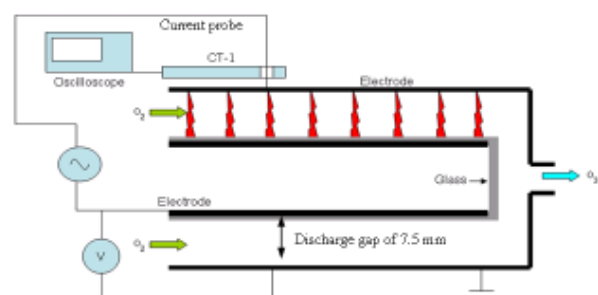
**4. ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างการดิสชาร์จ**

การวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างการดิสชาร์จ แสดงดัง Figure 1 โดยนำปลายข้างหนึ่งของเส้นลวดต่อเข้ากับสายดินของเครื่องกำเนิดโอโซนต่อสายสัญญาณจากหัววัดกระแสไฟฟ้า ยี่ห้อ Tektronix รุ่น CT-1 ไปยังออสซิลโลสโคปผ่านก้าชออกซิเจนไปยังเครื่องกำเนิดโอโซน โดยให้อัตราการไหลของก้าชเป็น 2 ลิตร/นาที จ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับเครื่องกำเนิดโอโซน โดยเริ่มที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 กิโลโวลต์ บันทึกสัญญาณที่ได้จากเครื่องออสซิลโลสโคป เปลี่ยนอัตราการไหลของออกซิเจนเป็น 8 ลิตร/นาที โดยใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 กิโลโวลต์เท่าเดิม ทำการบันทึกสัญญาณที่ได้จากเครื่องออสซิลโลสโคป แปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้เป็นกระแสดิสชาร์จ โดยใช้อัตราส่วน ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 มิลลิโวลต์ ต่อกระแสดิสชาร์จ 1 มิลลิแอมป์ ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็น 3 กิโลโวลต์ ทำการบันทึกสัญญาณที่ได้จากเครื่องออสซิลโลสโคป ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 2 และ 8 ลิตร/นาที ตามลำดับ

**5. การบำบัดน้ำเสียด้วยโอโซน**

**วิธีการเตรียมตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์**

ชั่งสีย้อมสีชมพู 1.00 กรัม ละลายในน้ำ 8000 มล. ต้มสารละลายน้ำสีย้อมนานประมาณ 1 ชั่วโมง นำกระดาษหนัก 100 กรัม ต้มในสารละลายน้ำสีย้อม นาน 20 นาที



**Figure 1. Experimental setup of a dielectric barrier discharge system for producing ozone**

เก็บตัวอย่างน้ำสีไปบำบัดด้วยโอโซน ทำซ้ำโดยเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน และสีแดง

#### วิธีการบำบัดด้วยโอโซน

นำตัวอย่างน้ำสี 500 มล. เปิดเครื่องกำเนิดโอโซน โดยจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 10 กิโลโวลต์ และอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 8 ลิตร/นาที ผ่านโอโซนนาน 30, 60 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสง ค่า BOD และค่า COD ทำซ้ำโดยเปลี่ยนเป็นตัวอย่างน้ำสีน้ำเงิน และสีแดง

#### 6. ศึกษาโครงสร้างของอนุภาคสีย้อมหลังบำบัดด้วยโอโซน

ซึ่งผงสีย้อมสีอะคริลิก สีมชมพู 2 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 250 มล. นำสารละลายสีชมพู ปริมาตร 100 มล. ใส่ในขวดมิดเก็ตอิมพริเนเจอร์ เปิดเครื่องกำเนิดโอโซน โดยจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 10 กิโลโวลต์ และอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 8 ลิตร/นาที ผ่านโอโซนไปยังสารละลายสีชมพูเป็นเวลา 2 ชั่วโมง 30 นาที ทำให้แห้ง โดยใช้อุปกรณ์เครื่องอบแห้งเยือกแข็ง (Freeze drying) ศึกษาโครงสร้างของผงสีที่แห้งแล้วด้วยเครื่อง FTIR โดยชั่งน้ำหนักผงสีแห้งทั้งก่อนและหลังการบำบัดด้วยโอโซนเท่ากัน คือ 2.1 มก. และใช้โพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) 200 มก. ทำซ้ำแต่เปลี่ยนผงสีย้อมเป็นสีแดง และสีน้ำเงิน

#### 7. การประยุกต์ใช้โอโซนในการบำบัดน้ำสีร่วมกับวิธีการอื่น ๆ

##### 7.1 การบำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วยโอโซนร่วมกับการตกตะกอนด้วยสารส้ม

ก. หาปริมาณสารส้มที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอนสารละลายสีย้อม มีขั้นตอน ดังนี้

หาค่า pH และการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำสี ปรับค่า pH ของน้ำสีย้อมสีอะคริลิก โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ นำตัวอย่างน้ำสีในบีกเกอร์ 5 ใบ ใบละ 500 มล. ต่อเข้ากับเครื่องมือสำหรับการทำจาร์เทสต์ เดิมสารส้มความเข้มข้น 1,000 มก./ลิตร ปริมาณ 10, 20, 30, 40 และ 50 มก./ลิตร ตามลำดับลงในแต่ละบีกเกอร์ เปิดเครื่องจาร์เทสต์ ด้วยความเร็วใบพัด 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 1 นาที เปลี่ยนความเร็วเป็น 30 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที ปิดเครื่องตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง ดูดตัวอย่างน้ำสีโดยใช้ปิเปต และนำไปหาค่าการดูดกลืนแสงของน้ำแต่ละบีกเกอร์

ซึ่งค่าการดูดกลืนแสงที่ต่ำสุดจะเป็นปริมาณสารส้มที่เหมาะสมในการใช้ในการทดลอง

ข. การบำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วยการตกตะกอนด้วยสารส้มร่วมกับโอโซน

ปรับค่า pH ของน้ำสีย้อมสีอะคริลิก โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ นำตัวอย่างน้ำสีในบีกเกอร์ 5 ใบ ใบละ 500 มล. ต่อเข้ากับเครื่องจาร์เทสต์ เดิมสารส้มความเข้มข้น 1,000 มก./ลิตร ปริมาณ 50 มก./ลิตร ลงในแต่ละบีกเกอร์ เปิดเครื่องจาร์เทสต์ ด้วยความเร็วใบพัด 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 1 นาที เปลี่ยนความเร็วเป็น 30 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที ปิดเครื่องตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง ดูดตัวอย่างน้ำสี เฉพาะด้านบนโดยใช้ปิเปต นำน้ำสีย้อมสีอะคริลิกที่ผ่านการตกตะกอนด้วยสารส้ม 550 มล. ใส่ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 1,000 มล. เปิดเครื่องกำเนิดโอโซน โดยจ่ายศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ 10 กิโลโวลต์ และให้อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเป็น 8 ลิตร/นาที ผ่านโอโซนไปยังน้ำสี เป็นเวลา 30 และ 60 นาที ตามลำดับ ทำการหาค่าการดูดกลืนแสง ค่า BOD และค่า COD เพื่อใช้พิจารณาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำสี

##### 7.2 การบำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วยโอโซนร่วมกับการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

ก. ศึกษาอิทธิพลของปริมาณถ่านกัมมันต์และเวลาสัมผัสที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม

นำน้ำเสียสีย้อม 50 มล. ใส่ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มล. เดิมถ่านกัมมันต์ 10 กรัม/ลิตรของน้ำเสียสีย้อม เขย่าด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 120 รอบ/นาที เวลาสัมผัส 5 นาที กรองน้ำเสียสีย้อมด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 4 นำไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงสูงสุดของสีแต่ละตัว เปลี่ยนเวลาสัมผัสเป็น 10, 15, 30, 60, 90, 120 และ 180 นาที เปลี่ยนปริมาณถ่านเป็น 20 และ 30 กรัม/ลิตรของน้ำเสียสีย้อม เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำสีกับเวลา เพื่อหาเวลาที่มีการดูดซับเข้าสู่สมดุล

ข. การบำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์ร่วมกับโอโซน

นำน้ำเสียสีย้อม 550 มล. ใส่ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 1,000 มล. เดิมถ่าน 10 กรัม/ลิตรของน้ำเสียสีย้อม

เขย่าด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 120 รอบ/นาที เวลาสัมผัส 150 นาที กรองน้ำเสียที่ย้อมด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 4 นำน้ำสีที่ย้อมเหลือทิ้ง 550 มล. ใส่ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 1,000 มล. เปิดเครื่องกำเนิดโอโซน โดยจ่ายศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ 10 กิโลโวลต์ และให้อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเป็น 8 ลิตร/นาที ผ่านโอโซนไปยังน้ำสีที่ย้อมเป็นเวลา 30 และ 60 นาที ตามลำดับ เก็บน้ำสี เพื่อทำการดูดกลืนของแสง ค่า BOD และ ค่า COD เพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำสี

### ผลการทดลองและวิเคราะห์

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลในงานวิจัยนี้ จะแบ่งตามขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย ดังนี้

#### 1. การหาความเข้มข้นของปริมาณโอโซน

จากการศึกษาการหาปริมาณโอโซน โดยวิธีมาตรฐานโพแทสเซียมไอโอไดด์ จะได้กราฟไอโอดีนมาตรฐานที่ใช้เป็นกราฟมาตรฐานในการเปรียบเทียบหาปริมาณโอโซน

#### 2. การหาความสัมพันธ์ของปริมาณโอโซนกับอัตราการไหลของออกซิเจน

จากการหาปริมาณโอโซนที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนต่างๆ ที่ให้แก่เครื่องกำเนิดโอโซน โดยใช้เวลา 3

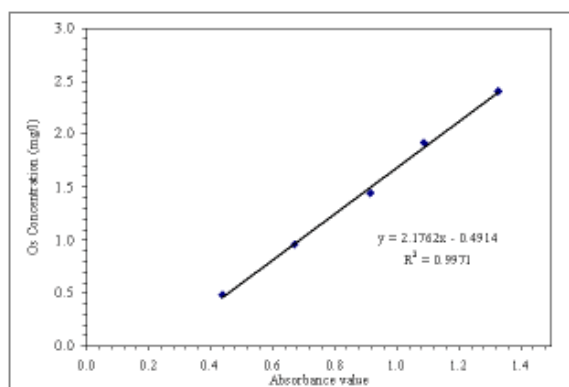


Figure 2. Standard calibration curve of ozone concentration and absorbance value (1 molecule of ozone is equivalent to 1 molecule of Iodine which is absorbed by wavelength at 352 nm)

นาที พบว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน มีผลต่อการปริมาณการเกิดโอโซนของระบบ นั่นคือ เมื่อให้เงื่อนไขของศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบ และปัจจัยอื่นๆ ให้มีค่าคงที่ พบว่า อัตราการไหลของก๊าซที่เพิ่มขึ้นในช่วงหนึ่งเท่านั้นที่จะทำให้ปริมาณการเกิดโอโซนเพิ่มขึ้น โดยในการทดลองนี้ที่อัตราการไหล 8 ลิตร/นาที เป็นอัตราการไหลที่ทำให้เกิดโอโซนมากที่สุด และหลังจากอัตราการไหลช่วงนี้แล้วปริมาณการเกิดโอโซนจะลดลง เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เพื่อทำให้เกิดการแตกตัวระดับหนึ่งที่ทำให้สามารถผลิตโอโซนได้มากที่สุด น่าจะมีสาเหตุมาจาก ณ ปริมาณศักย์ไฟฟ้าคงที่นั้น พลังงานที่ป้อนให้กับระบบ (โอโซนในเซอร์) คงที่ ซึ่งเพียงพอต่อจำนวนโมเลกุลของออกซิเจนขนาดหนึ่ง ดังนั้น หากเพิ่มปริมาณโมเลกุลของออกซิเจนมากขึ้น โดยเพิ่มอัตราการไหล จึงเป็นผลให้ปริมาณโมเลกุลบางส่วนไม่สามารถถูกดิสชาร์จและเปลี่ยนไปเป็นโอโซนได้ อีกเหตุผลหนึ่งน่าจะมาจากการที่อัตราการไหลของอากาศสูงๆ จะทำให้โมเลกุลของออกซิเจนไหลผ่านเร็วมากในบริเวณช่องว่างดิสชาร์จ ทำให้โมเลกุลของก๊าซส่วนมากไม่ได้ถูกทำให้แตกตัวในเวลาที่เหมาะสม จึงทำให้ปริมาณโอโซนต่ำกว่าที่อัตราการไหลต่ำๆ

#### 3. การหาความสัมพันธ์ของปริมาณโอโซนกับความต่างศักย์ไฟฟ้า

จากการหาปริมาณโอโซนที่เวลาต่างๆ ของแต่ละความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยให้อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน

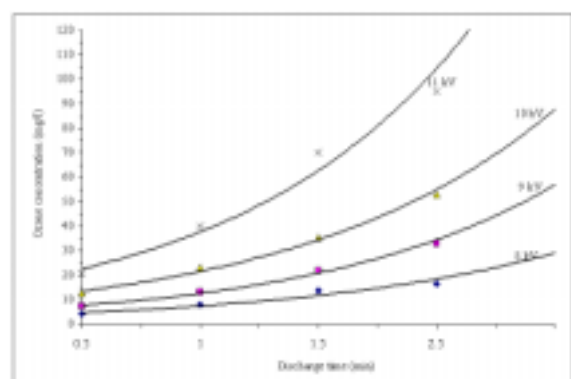


Figure 3. Ozone concentration at discharge time and high voltage values

8 ลิตร/นาที จะได้กราฟแสดงปริมาณไอซอนที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 8, 9, 10 และ 11 กิโลโวลต์ แสดงดัง Figure 3 จากผลของการทดลอง พบว่า ปริมาณความเข้มข้นของไอซอนขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบ นอกจากนี้พบว่าที่เวลาการดิสชาร์จเท่ากัน ปริมาณการเกิดไอซอนจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของศักย์ไฟฟ้า สามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นของไอซอนกับเวลาการดิสชาร์จในลักษณะของกราฟเป็นรูปเอกซ์โพเนนเชียล ดังสมการที่ 1

$$y = a \cdot \exp(bt) \tag{1}$$

เมื่อ  $y$  คือ ปริมาณไอซอนที่เกิดขึ้น หน่วย มก./ลิตร

$x$  คือ เวลาที่เกิดดิสชาร์จ หน่วย นาที

$$a = 0.0504 \exp(0.5098V); R^2 = 0.9975$$

$$b = 0.0171V + 0.3107; R^2 = 0.7945$$

$V$  = ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า, kV

และได้ว่าการเปลี่ยนแปลงเวลาการดิสชาร์จทำให้ปริมาณไอซอนเพิ่มขึ้นเนื่องจากเวลาในการดิสชาร์จเพิ่มขึ้น ซึ่งก็คือเวลาในการทำให้ก๊าซออกซิเจนแตกตัวแล้วรวมกันเป็นไอซอนมีมากขึ้นก็ย่อมได้ไอซอนมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาคือ ปริมาณ yield ที่ได้เป็นฟังก์ชันกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขั้วอิเล็กโทรด (Francis L.E. 1972; ยุทธนา และคณะ, 2541)

#### 4. การหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างการดิสชาร์จ

จากการศึกษากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างการดิสชาร์จ ผลการทดลองจากการออสซิลโลสโคปที่ความต่างศักย์ และอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนต่างๆ กัน แสดงได้ดังใน Figure 4

เมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็น 2 กิโลโวลต์ และอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเป็น 2 และ 8 ลิตร/นาที ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้เป็น 10 มิลลิโวลต์ แปลง

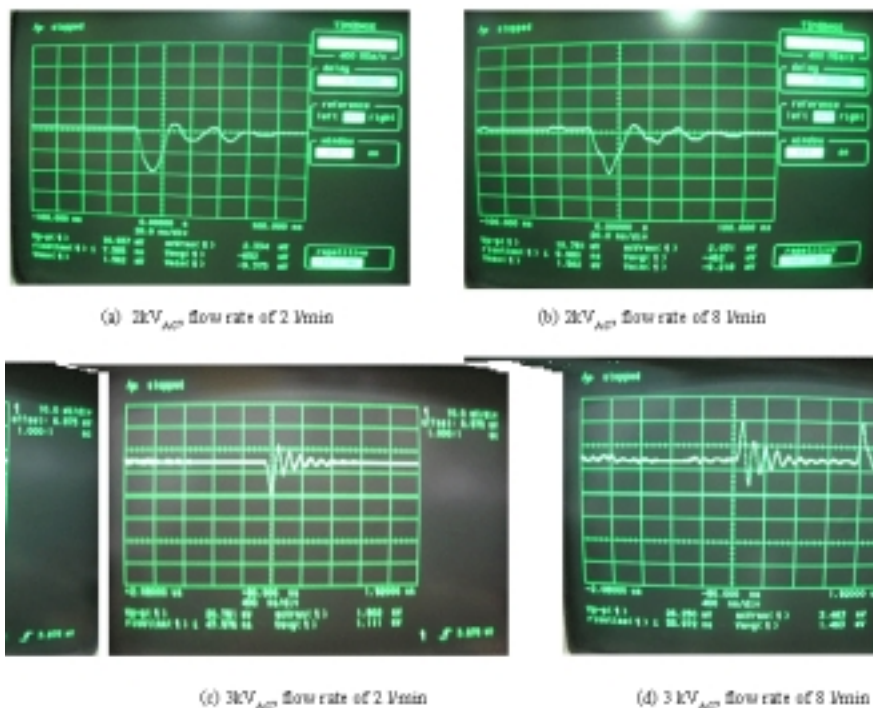


Figure 4. Current signals during AC high voltage supply at 2 and 3 kVac supply at flow rate of oxygen 2 and 8 l/min, respectively.

เป็นกระแสไฟฟ้าที่เกิดระหว่างดิสชาร์จ โดยใช้อัตราส่วน 5 มิลลิโวลต์ต่อ 1 มิลลิแอมแปร์ ดังนั้นกระแสดิสชาร์จมีค่าเท่ากับ 2 มิลลิแอมแปร์ กระแสดิสชาร์จที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะค่อนข้างคงที่

เมื่อเปลี่ยนความต่างศักย์เป็น 3 กิโลโวลต์ และอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเป็น 2 และ 8 ลิตร/นาที ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้เป็น 14 มิลลิโวลต์ ทั้งสองอัตราการไหล แปลงเป็นกระแสไฟฟ้าที่เกิดระหว่างดิสชาร์จ โดยใช้อัตราส่วน 5 มิลลิโวลต์ต่อ 1 มิลลิแอมแปร์ ดังนั้นกระแสดิสชาร์จมีค่าเท่ากับ 2.8 มิลลิแอมแปร์ กระแสดิสชาร์จที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะค่อนข้างคงที่ เช่นเดียวกัน

## 5. การประยุกต์ใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสีย

ในการศึกษาการประยุกต์ใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสีย รวมทั้งการใช้โอโซนร่วมกับการตกตะกอนด้วยสารส้ม ในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์ตัวแปรเพื่อใช้บอกคุณภาพของน้ำ คือ ค่าการดูดกลืนแสง ค่า BOD และค่า COD ซึ่งในการหาค่าการดูดกลืนของแสงจะต้องทำการวิเคราะห์ โดยใช้ความยาวคลื่นที่เหมาะสม ซึ่งความยาวคลื่นที่เหมาะสมในการใช้วิเคราะห์การดูดกลืนแสงของน้ำเสียสีส้มจะแตกต่างกันไป โดยสีน้ำเงินที่ 590 นาโนเมตร สีแดงที่ 490 นาโนเมตร และสีชมพูที่ 555 นาโนเมตร

### 5.1 การบำบัดน้ำเสียสีส้มด้วยโอโซน

จากการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสียสีส้มสามารถแสดงผลการทดลองได้ดังใน Table 1 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า โอโซนสามารถทำให้ความเข้มของน้ำเสียสีส้มลดลง โดยเห็นได้จากค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่าการดูดกลืนของแสงหลังการบำบัดด้วยโอโซนของสีส้ม สีน้ำเงิน และสีแดง ที่เวลา 60 นาที มีค่าเป็น 44%, 27.98% และ 23.01% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับความเข้มเริ่มต้นที่ไม่ได้บำบัดด้วยโอโซน (ที่เวลาดิสชาร์จเท่ากับศูนย์) เนื่องจากโอโซนสามารถออกซิไดส์สารประกอบเชิงซ้อนของสีส้ม ทำให้ความเข้มของสีลดลง หรือกล่าวได้ว่าทำให้น้ำทั้งมีความโปร่งแสงมากขึ้น โดยเห็นได้จากค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่าการดูดกลืนแสงหลังการบำบัดด้วยโอโซน

นอกจากการวัดค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่าการดูดกลืนแสงแล้ว ค่า BOD และค่า COD ก็เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการบอกถึงคุณภาพน้ำ จาก Table 1 พบ

ว่าโอโซนทำให้น้ำมีคุณภาพดีขึ้น โดยพิจารณาจากค่า BOD และค่า COD ของน้ำเสียสีส้มสีชมพู หลังผ่านการบำบัดด้วยโอโซนนาน 60 นาที มีค่าลดลง 35.96% และ 21.94% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับค่า BOD และ ค่า COD ของน้ำเสียสีส้มสีชมพูก่อนการบำบัด (ที่เวลาดิสชาร์จเท่ากับศูนย์) และพบลักษณะนี้เช่นเดียวกันสำหรับน้ำเสียสีน้ำเงิน และสีแดง ค่า BOD และค่า COD หลังผ่านการบำบัดด้วยโอโซนมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบเชิงซ้อนในสีส้มกับไอออนของออกซิเจนที่แตกตัวจากโมเลกุลของโอโซน

### 5.2 การบำบัดน้ำเสียสีส้มโดยการตกตะกอนด้วยสารส้มร่วมกับการใช้โอโซน

เริ่มจากการหาปริมาณของสารส้มที่เหมาะสมสำหรับในงานวิจัยนี้ ผลที่ได้แสดงดัง Figure 5 พบว่า เมื่อใช้สารส้มความเข้มข้น 1,000 มก./ลิตร ในการบำบัดน้ำเสียสีส้มสีส้มจะตกตะกอน ปริมาณสารส้มที่เหมาะสมในการทำให้เกิดการตกตะกอนสูงสุดคือ 50 มล. ทั้งในกรณีสีชมพู สีแดง และสีน้ำเงิน

เมื่อใช้สารส้มความเข้มข้น 1,000 มก./ลิตร ปริมาณ 50 มล. ทำการบำบัดน้ำเสียสีส้มสีส้มจะตกตะกอน โดยการทำให้เกิดการตกตะกอน สามารถแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่าการดูดกลืนของแสง ค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า BOD และค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า COD ก่อนและหลังการบำบัดดังใน Table 2

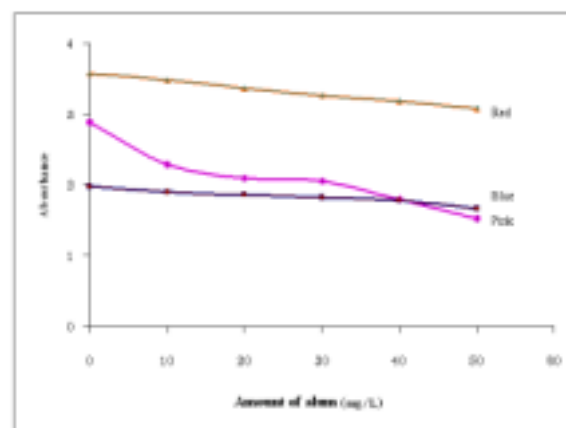


Figure 5. Illustration of absorbance of three different dye solutions in alum coagulation concentration



**Table 1. Experimental result of dye wastewater after ozonation**

Sample/ Parameter Study	Absorption		BOD value (mg/l)		COD value (mg/l)		Percentage reduction of Absorbance	Percentage reduction of BOD (%)	Percentage reduction of COD (%)
	Bef.	Aft.	Bef.	Aft.	Bef.	Aft.			
Pink	3.157	1.768	114	73	392	306	44%	35.96%	21.94%
Blue	2.098	1.511	158	115	627	539	27.98%	27.22%	14.04%
Red	3.681	2.834	117	82	431	353	23.01%	29.91%	18.09%

Remark: Bef. means reference sample  
Aft. means sample after ozonation 60 min.

**Table 2. Experimental result of dye wastewater after Jar Test**

Sample/ Parameter Study	Absorption		BOD value (mg/l)		COD value (mg/l)		Percentage reduction of Absorbance	Percentage reduction of BOD (%)	Percentage reduction of COD (%)
	Bef.	Aft.	Bef.	Aft.	Bef.	Aft.			
Pink	3.157	1.648	114	80	392	318	47.79%	29.82%	18.88%
Blue	2.098	1.732	158	91	627	293	17.45%	42.41%	53.27%
Red	3.681	2.104	117	38	431	248	15.67%	67.52%	42.4%

Remark: Bef. means reference sample  
Aft. means sample after ozonation 60 min.

**Table 3. Experimental result of dye wastewater after Jar Test and ozonation**

Sample/ Parameter Study	Absorption		BOD value (mg/l)		COD value (mg/l)		Percentage reduction of Absorbance	Percentage reduction of BOD (%)	Percentage reduction of COD (%)
	Bef.	Aft.	Bef.	Aft.	Bef.	Aft.			
Pink	3.157	1.105	114	62	392	243	64.99%	45.61%	38.01%
Blue	2.098	1.154	158	30	627	218	45%	81.02%	65.23%
Red	3.681	2.088	117	21	431	223	43.27%	82.05%	48.26%

Remark: Bef. means reference sample  
Aft. means sample after ozonation 60 min and coagulation

จาก Table 2 จะเห็นว่าการบำบัดน้ำเสียโดยการตกตะกอนด้วยสารส้มสามารถทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่าการดูดกลืนแสง ค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า BOD และค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า COD ของน้ำเสียผสมสีชมพูเป็น 47.79%, 29.82% และ 18.88% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับก่อนการบำบัด และพบลักษณะนี้เช่นเดียวกันสำหรับน้ำเสียสีน้ำเงิน และสีแดง

เมื่อทดลองทำการบำบัดน้ำเสียโดยการตกตะกอนด้วยสารส้ม ตามด้วยการบำบัดด้วยโอโซน สามารถ

แสดงผลที่ได้ดัง Table 3 สรุปได้ว่าเมื่อทำการบำบัดน้ำเสียสีชมพูด้วยการตกตะกอนด้วยสารส้มก่อน ทำให้การบำบัดด้วยโอโซนสามารถทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียขึ้น เนื่องจากการตกตะกอนด้วยสารส้มทำให้สารแขวนลอย หรืออนุภาคขนาดใหญ่บางส่วนถูกกำจัดไปก่อนการบำบัดด้วยโอโซน เมื่อตกตะกอนด้วยสารส้ม ก่อนทำการบำบัดด้วยโอโซนนาน 60 นาที จึงทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่าการดูดกลืนแสง และค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า BOD และค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า COD ของน้ำเสียผสมสีชมพูมีค่า

เป็น 64.99%, 45.61% และ 38.01% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับก่อนการบำบัด และพบลักษณะเช่นเดียวกันสำหรับ สีย้อมสีน้ำเงินและสีแดง

### 5.3 การบำบัดน้ำเสียข้อมลือกระจุจโดยการดูดซับด้วยถ่านดูดซับร่วมกับการใช้โอโซน

ผลจากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณถ่านและเวลาสัมผัสที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมลือแต่ละชนิดแสดงดัง Figure 6, 7 และ 8 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมลือเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านดูดซับ โดยเมื่อใช้ปริมาณถ่าน 10 กรัม/ลิตร จะพบว่าน้ำเสียข้อมลือกระจุจจะเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 120 นาที และค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมลือที่จุดสมดุลเป็น 50% และเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านเป็น 20, 30 กรัม/ลิตร เข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 90 นาที โดยค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีมีค่าเป็น 61% และ 74% ตามลำดับ

จาก Figure 7 พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมลือเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณถ่าน โดยเมื่อใช้ปริมาณถ่าน 10 กรัม/ลิตร เข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 120 นาที ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมลือที่จุดสมดุลเป็น 22% และเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านเป็น 20, 30 กรัม/ลิตร เข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 90 นาที โดยค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีมีค่าเป็น 25% และ 29% ตามลำดับ

จาก Figure 8 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมลือเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณถ่าน โดยเมื่อใช้ปริมาณถ่าน 10 กรัม/ลิตร เข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 120 นาที ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมลือที่จุดสมดุลเป็น 27% และเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านเป็น 20, 30 กรัม/ลิตร เข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 90 นาที โดยค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีมีค่าเป็น 32% และ 37% ตามลำดับ

สำหรับการเพิ่มปริมาณสารดูดซับทำให้ความหนาแน่นของสารถูกดูดซับบนสารดูดซับน้อยลง เนื่องจากพื้นที่ผิวของสารดูดซับยังคงดูดซับไม่อิ่มตัวในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา และที่ประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้นนั้นเนื่องจากมีการเพิ่มพื้นที่ผิวจึงทำให้มีการดูดซับสารได้เพิ่มขึ้น โดยในขณะที่กระบวนการดูดซับดำเนินไป ตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับมีแนวโน้มที่จะหลุดออกมาสู่สารละลาย เมื่ออัตราการดูดซับและอัตราการคายสารออกเข้าสู่ภาวะสมดุล เรียกว่า สมดุลของการดูดซับ ที่จุดสมดุลจะไม่มีเปลี่ยนแปลง

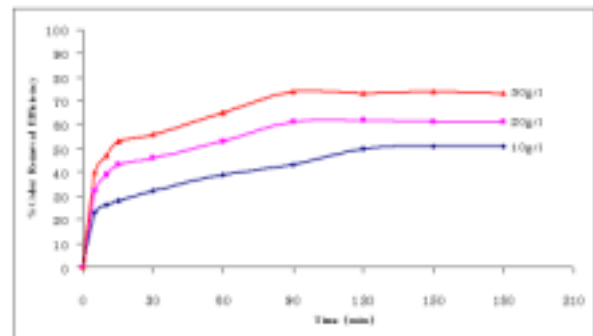


Figure 6. Percentage of color removal of pink dyed wastewater at various discharge time

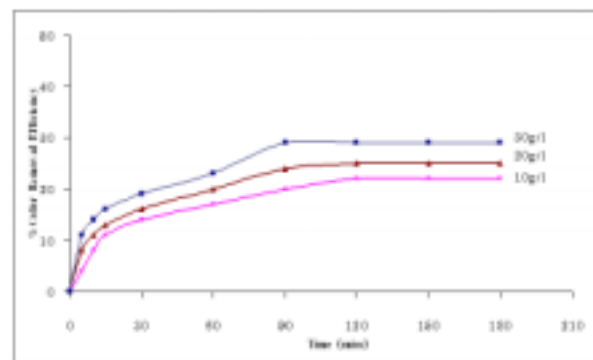


Figure 7. Percentage of color removal of red dyed wastewater at various discharge time

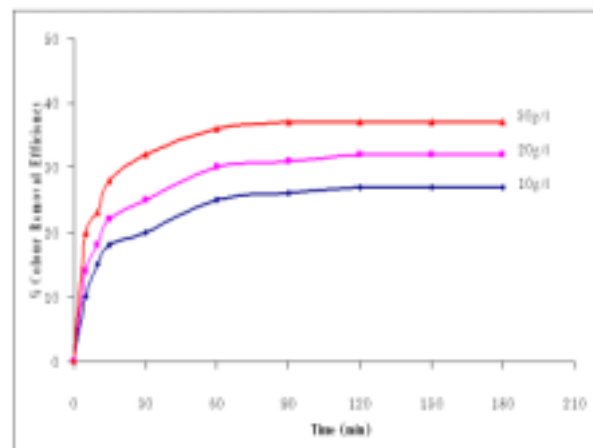


Figure 8. Percentage of color removal of blue dyed wastewater at various discharge time

ความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของสารดูดซับ จาก Table 4 จะพบว่า การบำบัดน้ำเสียโดยการ

**Table 4. Experimental result of dye wastewater after adsorption**

Sample/ Parameter Study	Absorption		BOD value (mg/l)		COD value (mg/l)		Percentage reduction of Absorbance	Percentage reduction of BOD (%)	Percentage reduction of COD (%)
	Bef.	Aft.	Bef.	Aft.	Bef.	Aft.			
Pink	3.157	1.338	114	12	392	99	57.62%	89.47%	74.75%
Blue	2.098	1.348	158	17	627	241	35.75%	89.24%	61.56%
Red	3.681	2.637	117	26	431	227	28.36%	77.78%	47.33%

Remark: Bef. means reference sample

Aft. means sample after adsorption with activated carbon

**Table 5. Experimental result of dye wastewater after adsorption and ozonation**

Sample/ Parameter Study	Absorption		BOD value (mg/l)		COD value (mg/l)		Percentage reduction of Absorbance	Percentage reduction of BOD (%)	Percentage reduction of COD (%)
	Bef.	Aft.	Bef.	Aft.	Bef.	Aft.			
Pink	3.157	0.019	114	5	392	57	99.39%	95.61%	85.46%
Blue	2.098	0.123	158	8	627	175	94.14%	94.94%	72.08%
Red	3.681	0.311	117	7	431	179	91.58%	94.02%	58.47%

Remark: Bef. means reference sample

Aft. means sample after ozonation 60 min and adsorption

ดูดซับด้วยถ่านดูดซับมีผลต่อการบำบัดน้ำเสีย โดยค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่าการดูดกลืนแสง ค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า BOD และค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า COD ของสีข้อมสีชมพูเป็น 57.62%, 89.47% และ 74.75% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับก่อนการบำบัด และพบลักษณะนี้เช่นเดียวกันสำหรับน้ำเสียสีน้ำเงินและสีแดง เมื่อทดลองทำการบำบัดน้ำเสียโดยดูดซับด้วยถ่านดูดซับตามด้วยการบำบัดด้วยโอโซน สามารถแสดงผลที่ได้ดัง Table 5

เมื่อทำการบำบัดน้ำเสียสีข้อมด้วยการดูดซับด้วยถ่านดูดซับก่อนการใช้โอโซนในการออกซิไดซ์ พบว่าทำให้การบำบัดด้วยโอโซนมีประสิทธิภาพในการบำบัดมากขึ้น ดัง Table 5 โดยดูได้จากค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่าการดูดกลืนแสง, ค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า BOD และค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า COD ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้จะมีเหตุผลมาจากโมเลกุลของสีที่มีลักษณะเป็นขั้วทางไฟฟ้า เกิดการดึงดูดกับประจุทางไฟฟ้าของสารดูดซับ ทำให้โครงสร้างบางส่วนของสีข้อมเปลี่ยนไปก่อนการบำบัดด้วยโอโซน ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่าการดูดกลืนแสง, ค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า BOD และค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า COD เพิ่มขึ้นจาก

กรณีการใช้ถ่านดูดซับเพียงอย่างเดียว

ดังนั้นเพื่อให้เห็นผลชัดเจนว่ากระบวนการบำบัดแบบใดที่มีประสิทธิภาพสูง จึงนำผลการทดลองทั้งสามตอนมาสร้างกราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่าการดูดกลืนแสง ค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า BOD และค่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่า COD

เมื่อนำผลที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียด้วยการใช้โอโซนเพียงอย่างเดียว ผลที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียด้วยการตกตะกอนด้วยสารส้มร่วมกับการใช้โอโซน และผลที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียด้วยการดูดซับด้วยถ่านดูดซับร่วมกับการใช้โอโซน มาเปรียบเทียบกัน จะได้ดัง Figure 9, 10 และ 11

ผลจากการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การดูดกลืนแสงของน้ำเสียสีข้อมสีชมพู โดยการบำบัดน้ำเสียสีข้อมด้วยวิธีต่างๆ ดัง Figure 9 จะพบว่าวิธีการบำบัดโดยการใช้โอโซนร่วมกับการดูดซับด้วยถ่านดูดซับ สามารถทำให้ความเข้มของสีน้ำเสียสีข้อมสีชมพูลดลงมากกว่าวิธีการใช้โอโซนหรือวิธีการใช้โอโซนร่วมกับการตกตะกอนด้วยสารส้ม โดยเห็นได้จากค่าเปอร์เซ็นต์การดูดกลืนแสงหลังการบำบัดด้วยโอโซนที่เวลา 60 นาที มีค่าลดลงเหลือ 10%, 56%

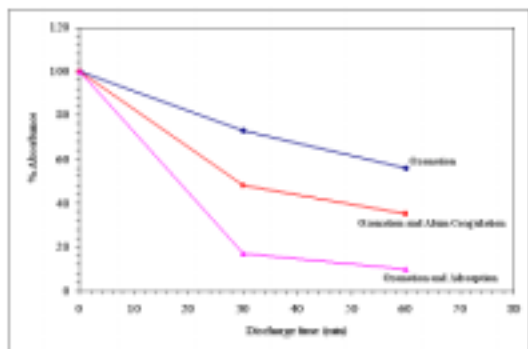


Figure 9. Percentage of absorbance reduced of pink dye wastewater at various treatment processes

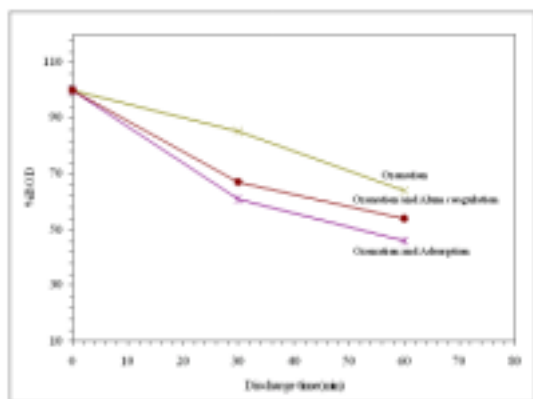


Figure 10. Percentage of BOD reduced of pink dye wastewater at various treatment processes

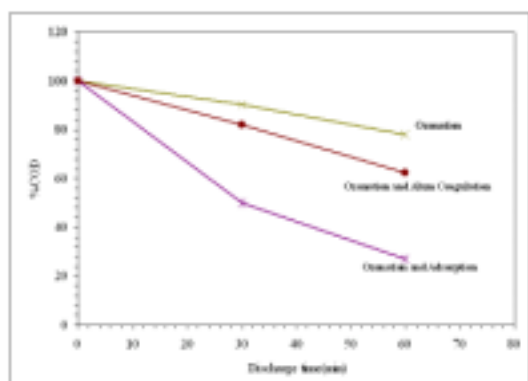


Figure 11. Percentage of COD reduced of pink dye wastewater at various treatment processes

และ 35% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสีย้อมที่ไม่ได้บำบัดด้วยวิธีการต่างๆ และพบลักษณะเช่นเดียวกันนี้ในน้ำเสียสีย้อมสีแดงและสีน้ำเงิน

ผลจากการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ค่า BOD ของน้ำเสียสีย้อมสีชมพู โดยการบำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วยวิธีต่างๆ ดัง Figure 10 พบว่าวิธีการบำบัดโดยใช้โอโซนร่วมกับการดูดซับด้วยถ่านดูดซับ สามารถทำให้ค่า BOD ของสีน้ำเสียสีย้อมสีชมพูลดลงมากกว่าวิธีการใช้โอโซนอย่างเดียว หรือวิธีการใช้โอโซนร่วมกับการตกตะกอนด้วยสารส้ม โดยเห็นได้จากค่าเปอร์เซ็นต์ค่า BOD หลังการบำบัดด้วยโอโซนที่เวลา 60 นาที มีค่าลดลงเหลือ 46%, 64% และ 54% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับค่า BOD เริ่มต้นของน้ำเสียสีย้อมที่ไม่ได้บำบัดด้วยวิธีการใดๆ

ผลจากการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ค่า COD ของน้ำเสียสีย้อมสีชมพู โดยการบำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วยวิธีต่างๆ ดังใน Figure 11 พบว่าวิธีการบำบัดโดยใช้โอโซนร่วมกับการดูดซับด้วยถ่านดูดซับ สามารถทำให้ค่า COD ของสีน้ำเสียสีย้อมสีชมพูลดลงมากกว่าวิธีการใช้โอโซน หรือการใช้โอโซนร่วมกับวิธีการตกตะกอนด้วยสารส้ม โดยเห็นได้จากค่าเปอร์เซ็นต์ค่า COD หลังการบำบัดด้วยโอโซนที่เวลา 60 นาที มีค่าลดลงเหลือ 27%, 78% และ 62% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับค่า COD เริ่มต้นของน้ำเสียสีย้อมที่ไม่ได้บำบัดด้วยวิธีใดๆ

## 6. การศึกษาโครงสร้างของอนุภาคสีย้อมเสื่อกระดาษหลังการบำบัดด้วยโอโซน

จากการศึกษาโครงสร้างสีย้อมเสื่อกระดาษด้วยเครื่อง FTIR ได้ผลดังใน Figure 12 จะพบว่ามียี่ดต่างๆ มากมาย เมื่อแปลงพีคที่ปรากฏเด่นชัดให้เป็นหมู่ฟังก์ชันสามารถแสดงได้ดัง Table 6

จาก Table 6 พบว่า สีชมพูทั้งก่อนและหลังการบำบัดประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน กลุ่มแอลกอฮอล์ (หมู่ OH) กลุ่มที่มีลักษณะวงแหวนอะโรมาติก (หมู่ -C=C-) และสารประกอบคลอไรด์ (C-Cl) สำหรับหมู่ฟังก์ชันที่ต่างกันระหว่างสีชมพูก่อนการบำบัดและหลังการบำบัด คือ สีชมพูก่อนการบำบัดจะประกอบด้วยกลุ่มเมทิล (methyl group, CH<sub>3</sub>) และกลุ่มคาร์บอกซิลเลต (carboxylate, C=O) ในขณะที่สีชมพูหลังการบำบัดจะไม่มีกลุ่มฟังก์ชันเหล่านี้ นอก

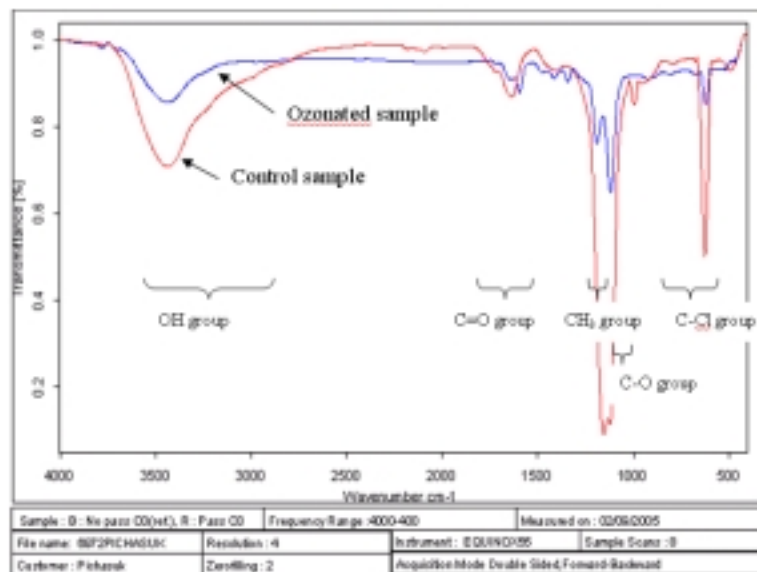


Figure 12. Spectrograph of pink dye wastewater before (blue line) and after (red line) ozonation

Table 6. Function group of pink dye before and after treated by ozonation

Before treated by ozone		After treated by ozone	
Wavenumber	function group	Wavenumber	function group
3500-3250	OH	3500-3250	OH
1950-1600	C = O	1950-1600	C = O
1380-1310	CH <sub>3</sub>	1280-1150	C - O
1280-1150	C - O	760-510	C - Cl
760-510	C - Cl		

จากนี้จะพบว่าพีคเล็กๆ จำนวนมากในช่วง เลขคลื่น 1600 ถึง 1300 พีคเหล่านี้จะหายไปหลังการบำบัดด้วยโอโซน แสดงว่าโครงสร้างของสีย้อมมีการเปลี่ยนแปลงไปโดยที่โอโซนเข้าไปทำลายพันธะบางส่วนทำให้โครงสร้างของสีย้อมจากเดิมที่มีขนาดใหญ่ยากแก่การย่อยสลาย มีขนาดเล็กลงที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ หรือโดยกระบวนการบำบัดอื่นๆ ต่อไป

#### สรุปผลการทดลอง

สามารถสรุปแบ่งเป็นข้อๆ ตามผลและการวิเคราะห์ได้ดังนี้

1. ปริมาณความเข้มข้นโอโซนจะไม่ใช่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน แต่จะมีค่าสูงสุดที่อัตราการไหล 8 ลิตร/นาที ที่ 10 กิโลวัตต์ โดยสามารถผลิตโอโซนได้ที่ความเข้มข้น 80 มก./ลิตร
2. ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับเครื่องกำเนิดโอโซน มีผลต่อการผลิตปริมาณโอโซน โดยมีความสัมพันธ์กันในลักษณะไม่เชิงเส้น และปริมาณความเข้มข้นของโอโซนเป็นฟังก์ชันแบบสมการเอกซ์โปเนนเชียลของเวลาวิเคราะห์ไฟฟ้า
3. กระแสดีสชาร์จที่เกิดขึ้นมีค่าคงที่ที่ความต่างศักย์เดียวกัน อยู่ในระดับมิลลิแอมป์ และเกิดในช่วงเวลาสั้นระดับมิลลิวินาที
4. การประยุกต์ใช้โอโซนในการบำบัดน้ำสีย้อมเสื้อ

กระจุตเพียงอย่างเดียว และการใช้โอโซนร่วมกับการดูดซับด้วยถ่านดูดซับ พบว่า มีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมจากการย้อมสีเนื้อกระจุต โดยพบว่าการใช้โอโซนเพียงกระบวนการเดียวสามารถลดปริมาณความเข้มสีลง และทำให้คุณภาพของน้ำดีขึ้นทั้งค่า BOD และค่า COD ที่ลดลง และเมื่อใช้โอโซนร่วมกับการดูดซับด้วยถ่านดูดซับในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมเนื้อกระจุต พบว่าวิธีนี้มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณความเข้มสีได้สูงกว่าการใช้โอโซนเพียงกระบวนการเดียวและมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมเนื้อกระจุตได้มากกว่าการใช้โอโซนร่วมกับการตกตะกอนด้วยสารส้ม

5. โครงสร้างของสีย้อมมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อใช้โอโซนละลายในน้ำสีย้อมตัวอย่าง เนื่องจากโอโซนจะทำลายพันธะบางส่วนทำให้โครงสร้างของสีย้อมจากเดิมที่มีขนาดใหญ่ยากแก่การย่อยสลายมีขนาดเล็กลง ซึ่งเป็นการง่ายต่อการย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ หรือโดยกระบวนการบำบัดอื่นๆ ต่อไป

#### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัย ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้ความอนุเคราะห์สถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือวิจัยต่างๆ ในการดำเนินการวิจัย จนทำให้งานนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

#### เอกสารอ้างอิง

- ชัยวิทย์ ศิลาวัชานาไย. 2529. ฟิสิกส์ของดีสชาร์จไฟฟ้า. โครงการส่งเสริมตำราของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา.
- ไพฑูริย์ ไทยพันธ์. 2545. การผลิตโอโซนด้วยวิธีไฟฟ้าแรงสูงและการใช้บำบัดน้ำเสียสีย้อมเนื้อกระจุต. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ยุทธนา ภูริระวิชย์กุล ชัยวิทย์ ศิลาวัชานาไย และธวัชณ์ชัย เทพนวล. 2541. การออกแบบและสร้างระบบพลาสมาโอโซนในเซอร์ที่ความดันบรรยากาศ. วารสารสงขลานครินทร์. ปีที่ 20 ฉบับที่ 3, 355-366.
- AOAC. 1995. Official Method of Analysis, 16<sup>th</sup> ed., The Association of Official Analytical Chemists, Inc. Arlington, Virginia. USA.
- Balakrishnan, P.A., Arunagiri, A. and Rao.,P.G. 2002. Ozone generation by silent electric discharge and its application in tertiary treatment of tannery effluent, J. of Electrostatics. 56, 77-86.
- Elassion, B. and Kogelschatz, U. 1991a. Modeling and applications of silent discharge plasma, IEEE Trans. on Plasma Sci. 2, 309-323.
- Elassion, B. and Kogelschatz, U. 1991b. Nonequilibrium volume plasma chemical processing, IEEE. Trans. on Plasma Sci. 6, 1063-1077.
- Francis, L.E. III. 1972. Ozone in water ad wastewater treatment. Ann Arbor Science Publ. Inc., Michigan, 185 pages.
- Hadj-Ziane S., Held, B., Pignolet, P., Peyrous, R., Benas, J.M. and Coste, C. 1990. Ozone production in oxygen-fed wire cylinder pzonizer, J. Phys D: Appl. Phys. 23, 1390-1395.
- Jen-Shih Chang, Lawless, P.A. and Yamamoto, T. 1991. Corona discharge processes, IEEE. Trans. on Plasma Sci. 19(6), 1152-1166.
- Murphy A.B. and R. Morrow., 2002, Glass sphere discharges for ozone production. IEEE Trans. on Plasma Sci. 30(1), 170-181.
- Perkins, W.S., Walsh, W.K., Reed, I.E. and Namboodri, C.G. 1995. A demonstration of reuse of spent dyebath water following color removal with ozone, Textile Chem. and Col. 28, 31-37.
- Ryo O. and Teisuji O. 2003. Formation and structure of primary and secondary streamers in positive pulse corona discharge-effect of oxygen concentration and applied voltage. J. Phys D: Appl. Phys. 36, 1952-1958.
- Yamabe, C., S. and Ishimine, M., 1994, Fundamental studies of ozone generating and its characteristics using new type of ozonizer, Jap. J. of Appl. Phy. 33, 4361-4364.