

ลักษณะเฉพาะของการดีสชาร์จไฟฟ้าของระบบพลาสมา
โอโซนในเซอร์และการประยุกต์ใช้บำบัดน้ำเสียสีย้อมเสีย

Characteristics of Electrical Discharges of Plasma Ozonizer
System and Its Application on Dye Wastewater Treatment

ยุทธนา ฐิระวณิชกุล

ปร.ด. (เทคโนโลยีพลังงาน)

Yutthana Tirawanichakul

Ph.D. (Energy Technology)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Assistant Professor, Department of Physics, Faculty of Science, Prince of Songkla University

สุภวรรณ ฐิระวณิชกุล

ปร.ด. (เทคโนโลยีพลังงาน)

Supawan Tirawanichakul

Ph.D. (Energy Technology)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,
Prince of Songkla University

พิชญ์ศักดิ์ จันท์กุล

นักศึกษาปริญญาโท (ฟิสิกส์)

Pitchasak Chanlusol

M.Sc.student (Physics)

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Department of Physics, Faculty of Science, Prince of Songkla University

คำสำคัญ : การตกตะกอน, พลาสมาแบบไม่สมดุลความร้อน, โอโซน, ลักษณะเฉพาะของศักย์-กระแสไฟฟ้า

Keywords : Coagulation, Non-thermal plasma, Ozone, V-I characteristics

Abstract

Ozone production is one of the applications of non-thermal equilibrium plasma processing. Ozone generator in this research was a coaxial cylindrical typed electrode. Both of electrodes were made of stainless steel and the inner electrode was covered with Pyrex glass (dielectric matter) for uniform electrical discharging. For generating of ozone, feed rate of purified oxygen (99.9% by volume) with

volumetric flow rate ranging of 4-10 l/min was passed through the discharge gap between inner and outer electrodes which were supplied by the continuous AC high voltage ranging of 8-11 kV. To determine the voltage-current characteristic, the results show that the peak of pulse current value was about of 4 mA with a rise time of 1-2 ns and the discharge voltage supply should be higher than 6 kV. The results show that amount of ozone produced was highly proportional to the voltage supply whilst ozone concentration has no significantly relation to the volumetric flow rate in this tested range and the suitable flow rate was 8 l/min for all voltage supplies. The amount of ozone concentration determined by KI standard method was approximately produced between 41 and 135 mg/L at discharged time of 3 min.

To feasibility study of application of ozone for dye Krajud mat wastewater treatment, the experiments were run in three categories as follows: a one-stage treatment by ozonation, a one-stage treatment by alum coagulation and the two-stage treatment by combined ozonation and alum coagulation were carried on this work. The results show that the percentage of light absorbance determined by UV-VIS spectroscopy of these three treatment processes for dye pink waste water was about of 56%, 52% and 35%, respectively comparing to the untreated sample. Moreover, the percentage of BOD of treated dye wastewater can be approximately reduced to 64%, 70% and 54%, respectively whilst the percentage of COD can be approximately reduced to 78%, 72% and 62%, respectively. The conclusion is that the most feasible dye wastewater treatment process for this work was the combination of ozonation and alum coagulation. Finally, to determine the chemical structure of treated dye, the Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) was used for this purpose and the results indicate that the treated dye solutions has significantly difference compared to the control sample. This is due to some of complicated hydroxyl functional groups in wastewater were dissociated by ozonation.

บทคัดย่อ

การผลิตก๊าซไอโซน เป็นการประยุกต์ใช้งานอย่างหนึ่งในกระบวนการทางพลาสมาแบบไม่สมดุลทางความร้อน เครื่องกำเนิดไอโซนในงานวิจัยเป็นแบบแกนขั้วไฟฟ้าทรงกระบอกร่วม ขั้วไฟฟ้าทั้งสองทำจากเหล็กไร้สนิมและขั้วไฟฟ้าด้านในถูกหุ้มด้วยแก้วไพเร็กซ์ (สารไดอิเล็กตริก) เพื่อให้เกิดการดิสชาร์จไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ สำหรับการกำเนิดก๊าซไอโซน ได้ทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์ (99.9% โดยปริมาตร) ในช่วงอัตราการไหลเชิงปริมาตรในช่วง 6-10 ลิตร/นาที โดยผ่านก๊าซออกซิเจนเข้าไประหว่างช่องดิสชาร์จซึ่งถูกป้อนด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับต่อเนื่องในช่วง 8-11 กิโลโวลต์ เพื่อหาลักษณะเฉพาะของศักย์ไฟฟ้า-กระแสไฟฟ้า จากผลการทดลองพบว่า พัลส์กระแสไฟฟ้าสูงสุดมีค่าประมาณ 4 มิลลิแอมแปร์ ที่ช่วงเวลาขาขึ้นในช่วง 1-2 นาโนวินาทีและศักย์ไฟฟ้าดิสชาร์จควรเลือกใช้ที่ค่าสูงกว่า 6 กิโลโวลต์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไอโซนที่ผลิตได้เป็นสัดส่วนกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบ ในขณะที่ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไอโซนมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญกับค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของก๊าซออกซิเจนในช่วงที่ทำการทดสอบ และมีค่าเหมาะสมที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรเท่ากับ 8 ลิตร/นาที ทุกช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้า ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไอโซนที่ผลิตได้วัดด้วยวิธีมาตรฐานโพแตสเซียมไอโอไดด์มีค่าอยู่ในช่วง 41 ถึง 135 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เวลาดิสชาร์จไฟฟ้า 3 นาที

เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ประยุกต์ใช้งานด้านการบำบัดน้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมสีเนื้อกระดูก โดยการทดลองได้ดำเนินการเป็น 3 แนวทาง คือ วิธีการบำบัดน้ำเสียด้วยไอโซเนชันเพียงขั้นตอนเดียว การบำบัดด้วยการตกตะกอนด้วยสารส้มขั้นตอนเดียว และวิธีสุดท้าย คือ การบำบัดน้ำเสีย 2 ขั้นตอนด้วยกระบวนการร่วมกันระหว่าง ไอโซเนชันและการตกตะกอนด้วยสารส้ม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เปอร์เซ็นต์การดักกลืนแสงค่าการดักกลืนแสงของน้ำเสียจากสีย้อมสีชมพูหลังผ่านการบำบัดทั้ง 3 แนวทางที่วัดด้วยเทคนิค UV-VIS สเปกโตรสโกปี มีค่าประมาณ 56%, 52% และ 35% เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากน้ำเสียตัวอย่างที่ไม่ผ่านกระบวนการบำบัด ตามลำดับ นอกเหนือจากนี้ ค่าเปอร์เซ็นต์ของบีโอดีลดลงเหลือได้ถึง 64%, 70% และ 54% ตามลำดับ ขณะที่ค่าบีโอดีลดลงได้ถึง 78%, 72% และ 62% ตามลำดับ สรุปได้ว่า กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมสีเนื้อกระดูกโดยใช้ไอโซเนชันร่วมกับการตกตะกอนด้วยสารส้ม เป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดภายใต้เงื่อนไขการทดลองในงานวิจัยนี้ และในที่สุดท้ายของงานวิจัยนี้ เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างเคมีที่เปลี่ยนแปลงไปของสารประกอบสีย้อมสีชมพูที่ผ่านการบำบัดด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี พบว่าโครงสร้างของสีย้อมสีชมพูก่อนและหลังบำบัดด้วยก๊าซไอโซเนชันมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับสารละลายควบคุม ดังเช่นกรณีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลเชิงซ้อนบางหมู่ของสีย้อมสีชมพูหายไป ซึ่งเป็นผลมาจากการถูกออกซิไดซ์ด้วย ไอโซเนชัน สอดคล้องกับผลการทดลองที่ปรากฏเช่นกันในการบำบัดน้ำเสียจากการย้อมสีเนื้อกระดูกสีอื่น ๆ

บทนำ

ดิสชาร์จไฟฟ้าแบบไซเลนท์ (Silent discharges) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าดิสชาร์จแบบไดอิเล็กตริกแบริเออร์ (Dielectric barrier discharges) เป็นกระบวนการดิสชาร์จก๊าซแบบไม่สมดุล เกิดขึ้นที่ระดับความดันของระบบเท่ากับหรือสูงกว่าบรรยากาศเล็กน้อย (0.1-10 bar) เป็นดิสชาร์จไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคไดอิเล็กตรอนในพลาสมามีพลังงานหรืออุณหภูมิสูงกว่าอนุภาคที่เป็นกลาง (Eliasson and Kogelschatz, 1986; สุภวรรณ และคณะ, 2539; ยุทธนา และคณะ, 2541) จัดเป็นลักษณะดิสชาร์จไฟฟ้าแบบโคโรนาประเภทหนึ่ง (Corona discharges) แตกต่างกันตรงที่ดิสชาร์จไฟฟ้าแบบไซเลนท์มีสารไดอิเล็กตริกห่อหุ้มด้านหนึ่งหรือทั้งสองด้านของขั้วไฟฟ้า ทำให้การเกิดดิสชาร์จเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ และลดเสียงดังที่เกิดขึ้นกับกรรเชียงดิสชาร์จแบบโคโรนา

ดิสชาร์จแบบไซเลนท์และโคโรนามีข้อดีเมื่อเทียบกับดิสชาร์จไฟฟ้ารูปแบบอื่น ก็คือ ดิสชาร์จเหล่านี้จะสามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ในระดับไม่ก่ไม่โครแอมแปร์ไปจนถึงระดับหลายมิลลิแอมแปร์ได้อย่างต่อเนื่อง หลังเกิดดิสชาร์จขึ้นแล้ว นอกจากนี้ดิสชาร์จไฟฟ้าแบบโคโรนาและไซเลนท์มีข้อได้เปรียบระบบดิสชาร์จไฟฟ้า

แบบอื่น ๆ ตรงที่สามารถทำงานได้ที่ความดันบรรยากาศ และสามารถสร้างได้จากแหล่งกำเนิดพลังงานหลายรูปแบบ เช่น แหล่งพลังงานประเภทศักย์ไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ และกระแสตรง แหล่งจ่ายพลังงานแบบคลื่นวิทยุความถี่สูง และแหล่งพลังงานคลื่นไมโครเวฟ เป็นต้น ปัจจุบันมีงานวิจัยจำนวนมากมายที่ใช้ประโยชน์จากการดิสชาร์จไฟฟ้า ทั้งสองแบบดังกล่าว อาทิเช่น งานวิจัยของ Falkenstein (1998) ซึ่งกล่าวถึงการประยุกต์ใช้ดิสชาร์จไฟฟ้าแบบไซ-เลนท์ในงานประยุกต์ด้านการบำบัดก๊าซในกลุ่มออกไซด์ของไนโตรเจนหรืองานด้านบำบัดน้ำดื่มดั่งรายงานวิจัยของ Wataru *et al.*, (2003) ซึ่งทดสอบการลดปริมาณคาร์บอนจากสารอินทรีย์ที่ละลายในน้ำดื่ม (Dissolved organic carbon, DOC) ด้วยกระบวนการบำบัดแบบชีวภาพร่วมกับไอโซเนชันแบบหลายขั้นตอน (Multi-stages treatment) น้ำดิบจากแหล่งน้ำต่างๆ ที่ถูกนำมาใช้ในการบำบัด ได้แก่ น้ำจากแหล่งน้ำดิบจากบ่อพัก, น้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดเบื้องต้นจากน้ำทิ้งชุมชน และน้ำจากสารอินทรีย์พวกฮิวมัสจากปุ๋ยสด (หมักจากใบไม้ผุ) จากผลการทดลองสรุปได้ว่า การกำจัดปริมาณ DOC ด้วยวิธีการบำบัดน้ำเสียแบบหลายขั้นตอนนี้ มีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบบำบัดน้ำเสียที่มีใช้ทั่วไป

นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณก๊าซโอโซนที่ผลิตขึ้นด้วยวิธีดิสชาร์จแบบโคโรนาก็ไม่มีผลมากนักต่อปริมาณสาร DOC ที่ถูกกำจัดออกไป

ก๊าซโอโซน (O_3) เป็น allotropic form ของออกซิเจน ซึ่งไม่มีสีที่อุณหภูมิห้อง มีกลิ่นฉุน สามารถละลายน้ำได้ดีกว่าก๊าซออกซิเจนถึง 10 เท่า (Francis, 1972) ก๊าซโอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียร นำมาอัดตัวให้อยู่ในสถานะของเหลวได้ยาก และเมื่ออยู่ในสถานะของเหลวจะง่ายต่อการเกิดระเบิด ดังนั้นการผลิตก๊าซโอโซนจึงต้องผลิต ณ.ที่บริเวณที่ต้องการใช้งาน กระบวนการผลิตก๊าซโอโซนที่นิยมใช้มีหลายวิธี อาทิเช่น pulse radiolysis (Hochanadel *et al.* 1986), flash photolysis (Hochanadel *et al.* 1986), electrolysis of perchloric acid (Francis, 1972) และ dielectric barriers discharges (Kogelchatz, 1983) พบว่า ก๊าซโอโซนมีกระบวนการผลิต 2 วิธีการใหญ่ๆ คือวิธีการทางกายภาพและวิธีการทางเคมี โดยปกติวิธีการทางกายภาพเป็นวิธีการที่นิยมใช้ในการผลิตก๊าซโอโซนมากกว่าวิธีการทางเคมี การกำเนิดโอโซนด้วยวิธีดิสชาร์จโคโรนาหรือดิสชาร์จแบบไซเลนท์ เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากสามารถผลิตก๊าซโอโซนได้ในปริมาณมากและไม่ต้องอาศัยระบบสูญญากาศเข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้ลดต้นทุนของระบบและลดความสิ้นเปลืองพลังงานในการดิสชาร์จเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ และสามารถทำได้ที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งพบว่าเมื่ออนุภาคอิเล็กตรอนมีพลังงานจลน์ในช่วง 6-7 eV ก็จะสามารถที่จะสลายพันธะระหว่างโมเลกุลออกซิเจน ทำให้เกิดเป็นอะตอม 2 อนุภาค โดยการแตกตัวหรือไอออนในชั้นนี้จะเกิดขึ้นระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง การชนกันของอะตอมของก๊าซออกซิเจนสามารถจับตัวเป็นโมเลกุลใหม่ได้ซึ่งอาจจะเป็นโมเลกุลของก๊าซออกซิเจน (O_2) หรืออยู่ในรูปโมเลกุลของก๊าซโอโซน (O_3) ก็ได้ อย่างไรก็ตามการชนกันเองระหว่างอะตอมและโมเลกุลของก๊าซออกซิเจน ก็อาจเกิดขึ้นเป็นก๊าซโอโซนได้เช่นกัน เป็นที่ทราบกันดีว่าก๊าซโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่มีประสิทธิภาพรองจากก๊าซคลอรีนเท่านั้น

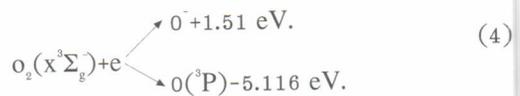
ทำให้การออกซิไดซ์เกิดขึ้นรวดเร็ว และสมบูรณ์กว่าการใช้ตัวออกซิไดซ์อื่นๆ ก๊าซโอโซนจึงสามารถนำมาประยุกต์ในการใช้งานได้หลายด้าน เช่น ฆ่าเชื้อในอุตสาหกรรมอาหารและผักผลไม้ ฆ่าเชื้อโรคสำหรับอุตสาหกรรมบรรจุขวดพลาสติก การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานหลายประเภท ได้แก่ โรงงานย้อมผ้า โรงงานกระดาษ เป็นต้น

ในการผลิตโอโซนต้องเกี่ยวข้องกับอะตอมออกซิเจนซึ่งเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลออกซิเจน สำหรับอะตอมออกซิเจนจะต้องใช้พลังงาน 493.3 kJ/mol O_2 และ 682.8 kJ/mol O_2 เปลี่ยนเป็นสภาวะ $O(^3P)$ และ $O(^1D)$ ตามลำดับ ดังแสดงตามสมการ



เมื่อ M หมายถึง อะตอมหรือโมเลกุลอื่นๆ

การแตกตัวของโมเลกุลออกซิเจนไปเป็นออกซิเจนในรูปของไอออนในปฏิกิริยาของโอโซน พลังงานที่ใช้ทำให้เกิดการแตกตัวได้จากอนุภาคอิเล็กตรอนหรือโฟตอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงซึ่งทำให้มีการดิสชาร์จไฟฟ้าภายในช่องดิสชาร์จ การกระทำของอิเล็กตรอนต่อออกซิเจนชักนำให้มีไอออนของออกซิเจนเกิดขึ้นหรือเกิดอะตอมของออกซิเจนระดับพลังงาน (3P)



ไอออนออกซิเจนสามารถที่จะกลับมารวมกันใหม่อยู่ในรูปโมเลกุลที่ระดับพลังงาน $x^3\Sigma_g^-$ ของก๊าซออกซิเจนได้โดยกระบวนการคายความร้อน (Exothermic reaction) ออกมาดังปฏิกิริยา



อย่างไรก็ดีแม้ว่ามีการผลิตก๊าซไอโซนด้วยเทคนิคดิสชาร์จไฟฟ้าแบบโคโรนาและแบบไซเลนที่ไปใช้ประโยชน์มานานกว่าหนึ่งศตวรรษไม่ว่าจะเป็นงานวิจัยหรือการบำบัดมลภาวะทางอากาศและทางน้ำ การผลิตไอโซนเพื่อใช้ในกระบวนการคะตาลีซิสของสารปีโตรเคมีหรือแม้กระทั่งใช้กับน้ำดื่ม (Elassion and Kogelschatz, 1991) แล้วก็ตามสำหรับในประเทศไทยเอง พบว่า การศึกษาเรื่องนี้ไม่เป็นที่แพร่หลายเท่าที่ควร มีเพียงงานวิจัยบางกลุ่มที่ดำเนินการอยู่มาเป็นระยะเวลาหนึ่ง (ประสาร, 2538; ดิเรก, 2538; สุภวรรณและคณะ, 2539; ธวัชมันชัย, 2542; ยุทธนาและคณะ, 2543; ไพฑูรย์, 2545)

ปริมาณก๊าซไอโซนที่ผลิตได้ตามที่ Francis (1972) ได้ให้รายละเอียดไว้ โดยกล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณที่ก๊าซไอโซนผลิตได้ต่อหน่วยพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้ากับพารามิเตอร์ต่างๆ ดังสมการที่ (6)

$$(Y/A) = k \frac{f \epsilon V^2}{d} \quad (6)$$

โดยที่ Y/A = ปริมาณไอโซนต่อหน่วยพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า
k = ค่าคงที่
f = ความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า
ε = ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก
V = ศักย์ไฟฟ้าแรงสูง
d = ช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

จากที่กล่าวมาจึงเป็นที่มาของวัตถุประสงค์ในงานวิจัยชิ้นนี้ กล่าวคือ เพื่อศึกษาสมบัติต่างๆ ทางกายภาพที่มีผลต่อการผลิตไอโซนด้วยเทคนิคดิสชาร์จไฟฟ้าแบบไซเลนที่ และหาจุดเหมาะสมในการทำงานของระบบและรวมไปถึงศึกษาสมบัติเฉพาะทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระหว่างดิสชาร์จไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วไฟฟ้าและวัตถุประสงค์สุดท้ายเพื่อศึกษาผลที่ได้จากการใช้ก๊าซไอโซนในการบำบัดน้ำเสียสี่ข้อมเสื่อกระจุโดยเปรียบเทียบกับบำบัดด้วยวิธีอื่นๆ เพื่อหาแนวทางในการลดปัญหามลภาวะทางน้ำที่เกิดขึ้นจากการใช้สี่ข้อมโดย

เฉพาะชุมชนในพื้นที่ภาคใต้ตอนล่างรอบๆ ทะเลสาบสงขลา ซึ่งมีการทำเสื่อกระจุและข้อมสี่เป็นอาชีพ

วัตถุประสงค์และวิธีดำเนินการวิจัย วัสดุและอุปกรณ์

ก. หลอดไอโซไนเซอร์และระบบจ่ายพลังงานจากศักย์ไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ

โครงสร้างของเซลล์ไอโซไนเซอร์มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกซ้อนกันทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้า โดยขั้วไฟฟ้าภายในจะมีแก้วทนความร้อนไฟเร็กซ์ทำหน้าที่เป็นไดอิเล็กตริก โดยขั้วไฟฟ้าที่ทรงกระบอกทำจากโลหะไร้สนิม ความยาว 0.15 m เส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วไฟฟ้าภายนอกมีขนาด 0.04 m ขณะที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วไฟฟ้าภายในมีค่าเท่ากับ 0.019 m ทำให้ได้ช่องดิสชาร์จไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าประมาณ 0.0025 m โดยช่องแคบระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เกิดดิสชาร์จนี้อยู่ในช่วงที่สามารถทำให้เกิดไอโซนตามที่ Eliasson *et al.* (1987) แนะนำไว้ รายละเอียดของเซลล์ไอโซไนเซอร์แสดงดัง Figure 1 และ Figure 2 แสดงวงจรไฟฟ้าของแหล่งพลังงานศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงขนาด 1-15 kV 30 mA ที่ความถี่สัญญาณ 50 Hz ค่าศักย์ไฟฟ้าแรงสูงถูกแปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V ด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าขึ้นโดยควบคุมศักย์ไฟฟ้าด้วยเครื่อง Variac และมีวงจรกรองสัญญาณรบกวนหลังผ่านการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าแล้ว

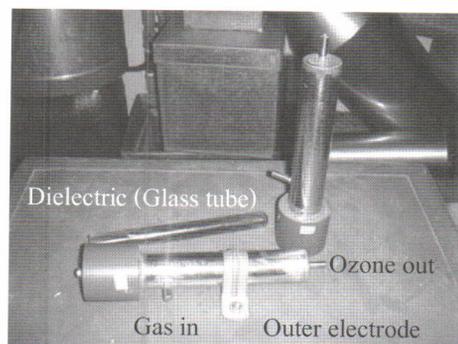


Figure 1 Illustration of the 2 ozoinser cells and dielectric matter (Glass tube)

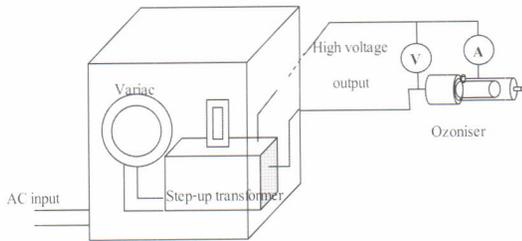


Figure 2 AC high voltage power supply system and the ozoniser cell

ข. อุปกรณ์วัดศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าแรงสูงและอื่นๆ อุปกรณ์วัดค่าศักย์ไฟฟ้าแรงสูงเป็นหัวโพรบแบบแบ่งศักย์ไฟฟ้าของ บริษัท Hewlett Packard รุ่น HP6015B ขณะที่การวัดกระแสพัลส์ที่เกิดขึ้นระหว่างเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าที่ช่องว่างขั้วไฟฟ้า และใช้เครื่องวัดกระแสไฟฟ้าพัลส์ของบริษัท Tektronix รุ่น CT1 ซึ่งสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ของทั้งค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า จะต่อส่งผ่านสายสัญญาณโคแอกเซียลไปยังเครื่องออสซิลโลสโคปแบบบันทึกผลได้ (ของบริษัท Hewlett Packard รุ่น HP 54502A)

ปริมาณก๊าซโอโซนที่ผลิตได้สามารถวัดได้ด้วยวิธีการมาตรฐานตาม ASTM (1995) โดยวัดการดูดกลืนของแสงจากสารละลายโปแตสเซียมไอโอไดด์ที่ความยาวคลื่น 352 nm ด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer (ของบริษัท Perkin-Elmer)

ค. สารเคมีและตัวอย่างสีย้อมและสารละลายสีย้อมสีเอกระจูด

สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย Absorbing reagent และสารละลายมาตรฐานเพื่อใช้ในการวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซโอโซนที่ผลิตได้ด้วยระบบที่สร้างขึ้น ได้แก่ สารประกอบโปแตสเซียมไอโอไดด์ สารประกอบไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟส ปราศจากน้ำ สารประกอบโปแตสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟส และน้ำไร้ออกซิเจน

สารส้มถูกนำมาใช้เพื่อบำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วยการตกตะกอน โดยน้ำที่เติมสารส้มลงไปจะนำไปกวนเพื่อให้เกิดการตกตะกอนด้วยชุดอุปกรณ์ Jar test ที่อัตราการกวน 100 rpm เป็นเวลา 1 min หลังจากนั้นกวนต่อที่อัตรา 30 rpm เป็นเวลา 30 นาที และตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนอีก 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นดูดตัวอย่างน้ำจากด้านบนไปทดสอบหาค่า BOD และค่า COD และเปรียบเทียบกับสารตัวอย่างก่อนการบำบัด โดยแปรค่าความเข้มข้นของสารส้มในช่วง 10 ถึง 50 mg/l เพิ่มครั้งละ 10 mg/l ต่อการทดลอง ทำการทดลอง 2 ครั้ง

สำหรับตัวอย่างสีย้อม ได้แก่ สี Disperse red, Reactive blue, Reactive orange, Pink และ Disperse yellow และกรณีตัวอย่างน้ำทิ้งจากสารละลายสีย้อมสีเอกระจูด นั้นได้มาจากตัวอย่างสีย้อมของชุมชนผลิตสีเอกระจูด บริเวณทะเลสาบสงขลา จังหวัดพัทลุง

วิธีดำเนินการวิจัย

ก. ลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของระบบดิสชาร์จไฟฟ้าแบบไซเลนที่ขณะผลิตก๊าซโอโซน

ปริมาณทางไฟฟ้าที่สำคัญได้แก่ ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโดยหัววัดความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงสูงจะต่อขนานกับสายไฟด้านเอาต์พุตของหม้อแปลงไฟฟ้าข้างขึ้น (ดูรายละเอียดใน Figure 2) ขณะที่อุปกรณ์วัดกระแสไฟฟ้า CT1 จะต่ออนุกรมกับสายไฟด้านเอาต์พุตของหม้อแปลงไฟฟ้าข้างขึ้น รายละเอียดแสดงดัง Figure 3 โดยทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซเป็น 6 l/min จ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเริ่มต้นที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 kV บันทึกสัญญาณที่ได้จากเครื่องออสซิลโลสโคป เปลี่ยนอัตราการไหลของออกซิเจนเป็น 8 l/min โดยใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 kV เท่าเดิม ทำการบันทึกสัญญาณที่ได้จากเครื่องออสซิลโลสโคป แปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้เป็นกระแสดิสชาร์จ (โดยมีแฟลคเตอร์เปลี่ยนหน่วย คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 mV เทียบเท่ากับค่ากระแสดิส

ชาร์จ 1 mA) ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็น 6 kV ทำการบันทึกสัญญาณที่ได้จากเครื่องออสซิลโลสโคป ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 8 และ 10 l/min เพื่อศึกษาผลของศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขณะเกิดดิสชาร์จแบบไซเลนท์

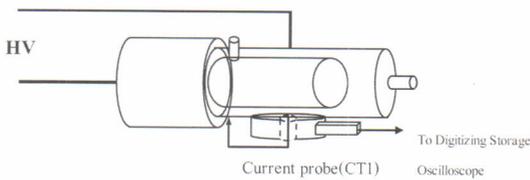


Figure 3 Illustration of measuring current of dielectric barrier discharge by CT1 probe

ข. ศึกษาผลของอัตราการไหลของก๊าซขาเข้าต่อปริมาณความเข้มข้นของโอโซนที่ผลิตได้

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปริมาณความเข้มข้นของโอโซนที่ได้จากระบบกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของก๊าซออกซิเจนขาเข้าที่ค่า 6, 7, 8, 9 และ 10 l/min และทดลองดิสชาร์จไฟฟ้าที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับในช่วง 8 ถึง 11 kV โดยเพิ่มทีละ 1 kV ในแต่ละงวดที่ทำการทดลอง กาทดลองครั้งนี้จะทำให้ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซโอโซน และนำสภาวะเงื่อนไขนี้ไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียและน้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมสีเสื้อกระจุตในหัวข้อต่อไป

ค. ศึกษาผลของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อปริมาณความเข้มข้นของโอโซน

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าให้กับหลอดโอโซนในเซอร์ ปริมาณความเข้มข้นของโอโซนที่ได้จะเปลี่ยนแปลงไป จากนั้นทำการวัดค่าปริมาณโอโซนที่เวลาต่างๆ ของแต่ละความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยผ่านออกซิเจนไปยังเครื่องกำเนิดโอโซน โดยกำหนดให้อัตราการไหลของออกซิเจนเป็น 8 l/min ให้ความต่างศักย์ของแหล่ง

กำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเป็น 8 kV และป้อนให้กับหลอดโอโซนในเซอร์โดยเลือกช่วงเวลาจ่ายพลังงานเป็น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.5 นาที ที่ค่าความต่างศักย์ 9, 10 และ 11 kV ตามลำดับ

ง. ศึกษาผลการบำบัดน้ำทิ้งจากสีย้อมเสื้อกระจุตด้วยเทคนิคโอโซนเนชั่น

เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัดน้ำเสียด้วยก๊าซโอโซน (หรือที่เรียกว่าการบำบัดด้วยเทคนิคโอโซนเนชั่น) จะทำการทดลองกับสีสังเคราะห์หลายๆ สีที่ละลายในน้ำกลั่นและปรับค่า pH หลายค่า เพื่อหาค่าความยาวคลื่นที่เหมาะสมที่สารละลายสีนั้นๆ ดูดกลืนแสง และใช้ค่าความยาวคลื่นที่เหมาะสมสำหรับสารละลายสีต่างๆ นี้ เป็นดัชนีที่จะนำไปใช้ในตรวจสอบประสิทธิภาพการสลายสารสีด้วยก๊าซโอโซนในการทดลองตอนต่อไป

ภายหลังการบำบัดจะนำตัวอย่างน้ำโดยก๊าซโอโซนจะตั้งไว้ที่ค่าความเข้มข้นของสารละลายน้ำสีคงที่ที่ 50 mg/l ปริมาตรที่ใช้ทำการทดสอบเท่ากับ 500 ml น้ำสีปล่อยทิ้งก่อนและหลังออกซิเดชันด้วยก๊าซโอโซนที่อัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมที่เลือกไว้จากการทดลองในหัวข้อ ข และจากนั้นจะนำไปทดสอบเปอร์เซ็นต์ การดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer

นำน้ำทิ้งจากเสื้อกระจุตที่ย้อมด้วยสีชมพู สีน้ำเงินและสีแดงจะถูกนำมาบำบัดด้วยก๊าซโอโซนโดยการผ่านก๊าซโอโซนเข้าไปละลายในน้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมสีเสื้อกระจุตสีชมพู ทำซ้ำโดยเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินและสีแดง โดยมีการกำหนดเวลาในการออกซิเดชันที่ 30 และ 60 นาที ด้วยก๊าซโอโซนที่อัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมที่เลือกไว้จากการทดลองในหัวข้อ ข นำตัวอย่างน้ำทิ้งมาทดสอบหาค่าการดูดกลืนแสง ค่า BOD และ COD เปรียบเทียบกับน้ำทิ้งที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการบำบัด

จ. ศึกษาผลการบำบัดน้ำเสียด้วยการตกตะกอนด้วยสารส้ม

1. หาปริมาณสารส้มที่เหมาะสม มีขั้นตอน ดังนี้

หาค่า pH และการดูกลิ่นแฉงของตัวอย่างน้ำสีปรับค่า pH ของน้ำเสียก่อนเสี้อกระจุค โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ นำตัวอย่างน้ำสีใส่ในบีกเกอร์ 5 ใบๆ ละ 500 ml ต่อเข้ากับเครื่อง Jar Test เดิมสารส้มที่มีความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 mg/l ตามลำดับลงในแต่ละบีกเกอร์ (เพื่อหาปริมาณความเข้มข้นของสารส้มที่เหมาะสมในการบำบัด) จากนั้นเปิดเครื่อง Jar Test ด้วยความเร็วใบพัด 100 rpm เป็นเวลา 1 นาที เปลี่ยนความเร็วเป็น 30 rpm เป็นเวลา 30 นาที ปิดเครื่องตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมงหลังตกตะกอนจึงดูตัวอย่างน้ำสีเฉพาะด้านบนโดยใช้ปิเปตหาค่าการดูกลิ่นแฉงของน้ำแต่ละบีกเกอร์ ซึ่งค่าการดูกลิ่นแฉงของน้ำเสียที่ต่ำสุดจะเป็นดัชนีชี้ถึงค่าปริมาณสารส้มที่เหมาะสมในการใช้ในการทดลอง

2. การบำบัดน้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมสีเสี้อกระจุคโดยการตกตะกอนด้วยสารส้ม

หลังจากหาปริมาณความเข้มข้นและค่าความยาวคลื่นแฉงที่ดูกลิ่นน้ำเสียต่าง ๆ ที่เหมาะสมแล้วจากการทดลองตอนที่ จ.1 ได้แล้ว

ฉ. ศึกษาผลการบำบัดน้ำเสียด้วยไอโซไนเซออร์ร่วมกับการตกตะกอนด้วยสารส้ม

ปรับค่า pH ของน้ำเสียก่อนเสี้อกระจุค โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ นำตัวอย่างน้ำสีใส่ในบีกเกอร์ 5 ใบ ๆ ละ 500 ml ต่อเข้ากับเครื่อง Jar Test เดิมสารส้มความเข้มข้น 1,000 ml/l ปริมาณ 50 mg/l ตามลำดับลงในแต่ละบีกเกอร์ เปิดเครื่อง Jar Test ด้วยความเร็วใบพัด 100 rpm เป็นเวลา 1 นาที เปลี่ยนความเร็วเป็น 30 rpm เป็นเวลา 30 นาที ปิดเครื่องตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง แล้วจึงดูตัวอย่างน้ำสีเฉพาะด้านบนโดยใช้ปิเปตไปหาค่าการดูกลิ่นแฉงของน้ำแต่ละบีกเกอร์ จากนั้นนำน้ำสีที่ได้มาทำออกซิเดชันด้วยก๊าซไอโซไน ที่อัตราการไหลของก๊าซ

ออกซิเจนที่เหมาะสมที่เลือกไว้จากการทดลองในหัวข้อ ข เป็นเวลา 0-60 นาที

ช. การศึกษาโครงสร้างทางเคมีของสารสีย้อมหลังบำบัดด้วยไอโซไน

ซึ่งผงสีย้อมเสี้อกระจุค สีชมพู 2 g ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 250 ml นำสารละลายสีชมพู ปริมาตร 100 ml ใส่ใน midget impinger เปิดเครื่องกำเนิดไอโซไนโดยจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับและอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนที่เหมาะสมจากการทดลองในหัวข้อ ข และผ่านก๊าซไอโซไนไปยังสารละลายสีชมพูเป็นเวลา 150 min ทำให้แห้ง โดยใช้อุปกรณ์ Freeze Dryer จากนั้นจึงนำมาศึกษาโครงสร้างทางเคมีของผงสีที่แห้งด้วยเครื่อง FTIR โดยชั่งน้ำหนักผงสีทั้งก่อนและหลังการบำบัดด้วยไอโซไนเท่ากันคือ 2.1 ml และใช้โพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) 200 mg ทำการทดลองเหมือนเดิมอีก 2 ชั่ง และจากนั้นจึงทดลองเช่นเดียวกันกับที่กล่าวมาแล้วข้างต้นโดยการเปลี่ยนผงสีย้อมเป็นสีแดง และสีน้ำเงิน

ผลการทดลองและวิเคราะห์

ก. ลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของดิสชาร์จแบบไซเลนท์

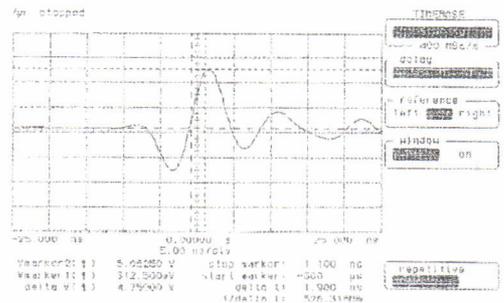
จากผลการทดลอง พบว่า หลอดไอโซไนเซออร์ที่สร้างขึ้นนี้สามารถทำให้เกิดการดิสชาร์จไฟฟ้าได้เมื่อจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับไม่ต่ำกว่า 6 kV ค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซไอโซไนที่ผลิตได้จะเปลี่ยนแปลงตามค่าศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขั้วไฟฟ้า โดยสอดคล้องกับทางทฤษฎีที่กล่าวไว้ในสมการที่ (6) ในกรณีการวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะเริ่มดิสชาร์จไฟฟ้านั้น พบว่าค่ากระแสพัลส์ที่เกิดขึ้นมีช่วง rise time ในระดับ 1-2 ns ขณะที่ life time มากกว่า 25 ns Figure 4 แสดงภาพสัญญาณของกระแสไฟฟ้าขณะเกิดดิสชาร์จ โดยสเกลของเครื่องออสซิลโลสโคปตั้งอยู่ที่ 2 V/div และ 5 ns/div (1 mV/div มีค่าเท่ากับ 1 mA/div) พบว่า ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดมีค่าอยู่ในช่วง 4.0 ถึง 5.0 A ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าไม่มีผลต่อ

ช่วงเวลาการเกิดดิสชาร์จในช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้า
รูปแบบของสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะ
เดียวกันทุกๆ ช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ทดลอง ดังนั้น
จากผลการทดลองสรุปได้ว่า หากใช้แหล่งจ่ายพลังงาน
ไฟฟ้าประเภทพัลส์หรือประเภทความถี่สูงในการทำให้เกิด
ดิสชาร์จจะทำให้ใช้พลังงานได้อย่างเหมาะสมกว่ากรณีที่ใช้
แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับแบบ ต่อเนื่อง
อย่างไรก็ดีการเลือกใช้แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบ
ต่อเนื่องนี้ มีข้อได้เปรียบตรงที่ออกแบบและสร้างได้ง่ายกว่า
แหล่งจ่ายพลังงานแบบอื่น

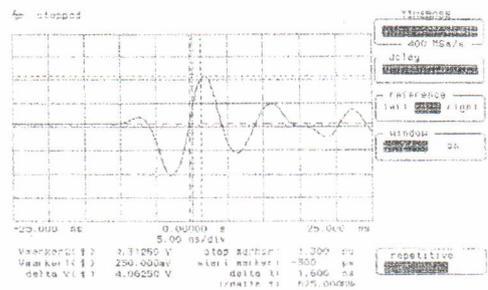
จากการศึกษาการหาปริมาณความเข้มข้นของ
โอโซนด้วยวิธีมาตรฐานโพแทสเซียมไอโอไดด์ (ASTM,
1995) จะได้กราฟไอโอดีนมาตรฐานที่ใช้เป็นกราฟในการ
หาปริมาณความเข้มข้นโอโซนโดยเปรียบเทียบกับค่าการดูด
กลืนแสงที่ความยาวคลื่น 352 nm ของสารละลาย
absorbing reagent ที่ทำปฏิกิริยากับก๊าซโอโซน กราฟ
Figure 5 แสดงการดูดกลืนของสารละลาย absorbing
reagent ที่ความเข้มข้นของโอโซนที่ค่าต่างๆ อาทิเช่น
หากทำการทดลองและพบว่าหากค่าการดูดกลืนแสงของ
สารละลายมีค่าเท่ากับ 0.9 จะคิดเป็นความเข้มข้นของ
โอโซนได้เท่ากับ 1.5 mg/l จากผลการทดลอง สามารถ
หาความสัมพันธ์ของการดูดกลืนคลื่นรังสีอัลตราไวโอเลต
กับปริมาณความเข้มข้นของก๊าซโอโซนที่ผลิตได้ดังสมการ
ที่ (7) ต่อไปนี้

$$C_{O_3} = 2.1762Abs - 0.4914 \quad r^2 = 0.997 \quad (7)$$

เมื่อ C_{O_3} = ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซโอโซน, mg/l
Abs = ค่าการดูดกลืน, ทศนิยม



(a) Discharging at 2 kV



(b) Discharging at 8 kV

Figure 4 Current signals during AC high
voltage supply at 2 and 8 kV ac supply
(set-up voltage and timebase scales at
2 V/div และ 5 ns/div)

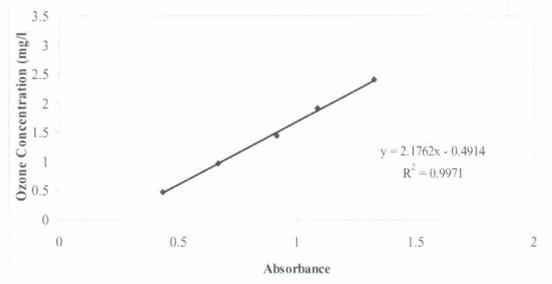


Figure 5 Illustration of standard graph
between concentrations of ozone at
various absorbance values

ข. ศึกษาผลของอัตราการไหลของก๊าซขาเข้าต่อปริมาณความเข้มข้นของโอโซนที่ผลิตได้

จากการศึกษาผลของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของก๊าซออกซิเจนขาเข้าหลอดโอโซนในเซอรัที่ค่าต่าง ๆ ต่อปริมาณความเข้มข้นของโอโซนที่ผลิตได้ เวลาที่ใช้ในการดิสชาร์จ 3 นาที จะได้ผลการทดลองที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 8 ถึง 11 kV_{ac} ดังแสดงใน Figure 6

จากกราฟจะเห็นว่า ค่าความเข้มข้นของโอโซนมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่หนึ่ง ๆ นั้น อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อปริมาณโอโซนที่ผลิตได้อย่างเห็นได้ชัด ยกเว้นที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนที่ 8 l/min ที่ให้ค่าความเข้มข้นของโอโซนที่ผลิตได้สูงที่สุด ดังนั้นในการผลิตโอโซนด้วยหลอดโอโซนในเซอรัในการทดลองนี้จะใช้อัตราการไหลของออกซิเจนที่ค่านี้ต่อไปในการทดลอง

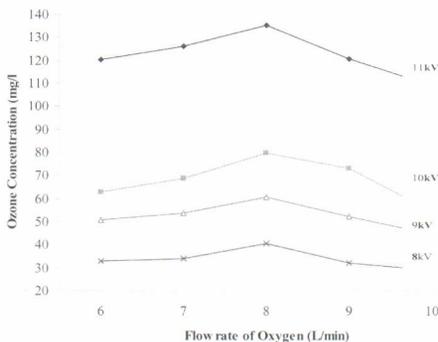


Figure 6 Amount of ozone produced at various volumetric flow rates of purified oxygen in high voltage supply ranging of 8 and 11 kV_{ac} supply

ค. ศึกษาผลของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อปริมาณความเข้มข้นของโอโซน

จากการหาปริมาณโอโซนที่เวลาต่างๆ ของแต่ละความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยให้อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนที่ 8 l/min จะได้กราฟแสดงปริมาณโอโซนที่

ความต่างศักย์ไฟฟ้า 8, 9, 10 และ 11 kV ดังแสดงใน Figure 7 ผลการทดลองพบว่า ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซโอโซนที่ผลิตได้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับเวลาที่เกิดดิสชาร์จไฟฟ้า โดยเฉพาะกรณีที่ใช้ศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับสูงกว่า 9 kV นั้น มีแนวโน้มที่ความเข้มข้นของโอโซนเพิ่มขึ้นอย่างมากจากกราฟจะเห็นว่า ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 8, 9, 10 และ 11 kV ณ.เวลาดิสชาร์จที่เวลา 2.0 นาทีเท่ากัน มีปริมาณความเข้มข้นโอโซนที่ผลิตได้มีค่าเท่ากับ 15, 30, 52 และ 95 mg/l ตามลำดับ

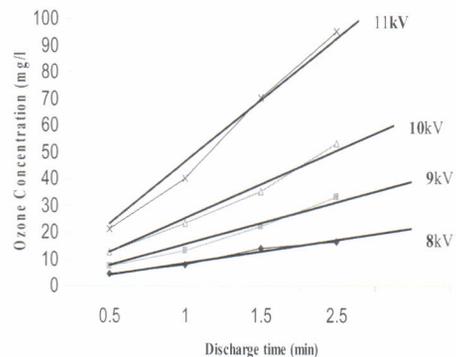


Figure 7 Relationship between ozone concentration and discharge time at various high voltage supply (Purified oxygen feed rate of 8 l/min)

ง. ผลการศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งจากสีย้อมเสียกระจุด้วเทคนิคโอโซนเนชั่น

สำหรับตัวอย่างสีย้อมที่ถูกนำมาทดสอบในที่นี้ได้แก่ สี Disperse red (DR 82), Reactive blue, Reactive orange, Pink และ Disperse yellow โดยตัวอย่างสีเหล่านี้ส่วนใหญ่เป็นสีปฏิกิริยาที่นิยมใช้กันในการผสมสีเพื่อให้ได้สีย้อมสีอื่น ๆ ขณะทำการทดลองจะนำสารสีย้อมมาละลายในน้ำกลั่นที่เตรียมให้ได้ความเข้มข้น 100 mg/l และก่อนเริ่มการบำบัดด้วยก๊าซโอโซน

สารละลายที่เตรียมไว้จะถูกนำมาทดสอบหาค่าความยาวคลื่นที่เห็นการดูดกลืนได้ชัดเจนมากที่สุด และใช้ค่าความยาวคลื่นนี้เป็นตัวชี้วัดความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายหลังสารละลายสียอมผ่านการบำบัดด้วยก๊าซโอโซนตามเงื่อนไขต่างๆ สารละลายสียอมจะถูกนำไปใส่ในขวด Midget impinger ขนาด 500 ml และละลายก๊าซโอโซนลงในขวดโดยการพ่นเป็นฟองอากาศในสารละลาย เป็นเวลา 1, 3, 5, 10, 15 และ 20 นาที และเก็บตัวอย่างสารละลายในขวดและนำไปวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer

ผลการตรวจสอบหาความยาวคลื่นที่ให้ค่าการดูดกลืนสูงสุด พบว่า ค่าความยาวคลื่นที่ให้ค่าการดูดกลืนของสารละลายสีใช้ค่าความยาวคลื่นในช่วง 300-800 nm และค่า pH ในช่วง 3 ถึง 11 มีผลการทดลองดังนี้

- สำหรับสารละลายสี Reactive red ให้ค่าการดูดกลืนสูงสุดในช่วงความยาวคลื่น 540-542 nm ในการทดลองจะเลือกใช้ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 541 นาโนเมตร ทุกค่า pH ของสารละลายที่ทำการทดสอบ
- สำหรับสารละลายสี Reactive black ให้ค่าการดูดกลืนสูงสุดในช่วงความยาวคลื่น 595 - 597.5 nm สำหรับสารละลายสี pH 3-10 ในการทดลองจะเลือกใช้ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 596.0 nm
- สำหรับสารละลายสี Reactive orange ให้ค่าการดูดกลืนสูงสุดในช่วงความยาวคลื่น 412-421 nm ในการทดลองจะเลือกใช้ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 417 nm ทุกค่า pH
- สำหรับสารละลายสี Reactive blue ให้ค่าการดูดกลืนสูงสุดในช่วงความยาวคลื่น 587-587.5 nm ในการทดลองจะเลือกใช้ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 587 nm ทุกค่า pH ของสารละลาย
- สำหรับสารละลายสี Disperse red ให้ค่าการดูดกลืนสูงสุดในช่วงความยาวคลื่น 530-540 nm ในการทดลองจะเลือกใช้ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 535 nm ทุกค่า pH ของสารละลาย

Table 1 แสดงตัวอย่างของสารละลายสี DR 82 ที่ค่า pH 4-10 ภายหลังจากการบำบัดด้วยก๊าซโอโซนที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 3 l/min และความต่างศักย์ที่ 11 kV จากผลการทดลองใน Table 1 แสดงให้เห็นว่าค่าร้อยละการดูดกลืนแสงที่ลดลงไม่ได้รับผลกระทบจากค่า pH ของสารละลายสียอมในช่วง 4-10

Table 1 Experimental results of percentage of absorption reduction of disperse red (DR 82) after ozonation in three different pH values (setup wavelength of 540 nm)

Time (min)	% Reduction of absorbance		
	pH 4	pH 7	pH 10
0	0.00	0.00	0.00
1	3.37	3.12	4.40
3	13.80	12.94	13.96
5	32.00	32.42	32.76
10	70.35	71.78	73.73
15	92.08	92.21	71.49
20	97.72	97.35	97.16

อย่างไรก็ดีสำหรับสีบางกลุ่ม เช่น สี Reactive orange เมื่อทำเป็นสารละลายสียอมแล้วทำการบำบัดด้วยก๊าซโอโซน พบว่า ค่า pH มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสง กล่าวคือ ร้อยละการดูดกลืนแสงจะมีค่าลดลงเมื่อสารละลายสียอมมีความเป็นกรดเพิ่มขึ้น (หรือค่า pH ลดลง) ผลการทดลองแสดงรายละเอียดใน Table 2 ซึ่งตารางที่ 1 นี้แสดงให้เห็นค่าร้อยละการดูดกลืนแสงของน้ำสีที่เปลี่ยนแปลงไปของสารละลาย Reactive orange ที่บำบัดด้วยก๊าซโอโซนที่ความเข้มข้นประมาณ 100 mg/l โดยใช้เวลาดิสซาร์จ 3 นาที ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 11 kV

Table 2 Experimental results of percentage of absorption reduction of disperse red (DR 82) after ozonation in three different pH values (setup wavelength of 417 nm)

pH value	Absorbance of dye solution		Percentage of reduction (%)
	Initial value	After treatment	
3	0.931	0.256	86.25
4	0.947	0.243	87.17
5	0.943	0.252	86.64
6	0.916	0.267	85.42
7	0.894	0.213	88.09
8	0.873	0.225	87.11
9	0.847	0.239	85.89
10	0.954	0.093	95.12
11	0.994	0.068	96.58
12	0.979	0.079	95.96

ในทำนองเดียวกัน สำหรับการศึกษาดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมอื่นๆ ก็ทำการทดลองในลักษณะเดียวกันกับสีย้อม DR82 และ Reactive orange กล่าวโดยสรุปได้ว่า ก๊าซโอโซนสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำทิ้งจากสีย้อมได้ ดังนั้นในการทดลองต่อไปจะนำเอาก๊าซโอโซนที่ผลิตได้จากระบบพลาสมาโอโซนเซอร์ไปใช้บำบัดน้ำทิ้งจากการย้อมสีเยื่อกระดาษ และได้แนวทางในการเลือกค่าความยาวคลื่นที่เหมาะสมกับกลุ่มของน้ำทิ้งจากสารละลายสีย้อมอื่นๆ ต่อไป

การประยุกต์ใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสีย รวมทั้งการใช้โอโซนร่วมกับการตกตะกอนด้วยสารส้ม ในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์ตัวแปรเพื่อใช้บอกคุณภาพของน้ำ คือ ค่าการดูดกลืนแสง ค่า BOD และค่า COD ซึ่งในการหาค่าการดูดกลืนแสงจะต้องทำการวิเคราะห์โดยเลือกใช้ความยาวคลื่นที่เหมาะสม การหาค่าความยาวคลื่นที่เหมาะสมเพื่อใช้วิเคราะห์การดูดกลืนแสงของน้ำสีย้อมเยื่อกระดาษของสีแต่ละชนิด จะแตกต่างกันไปโดยสารละลายสีย้อมสีน้ำเงิน สีแดงและสีชมพู จะเลือกใช้

ความยาวคลื่นที่ดูดกลืนแสงที่เหมาะสมที่ 590, 490 และ 555 nm ตามลำดับ

จากการใช้ก๊าซโอโซนในการบำบัดน้ำสีย้อมเยื่อกระดาษ สามารถแสดงผลการทดลองได้ดัง Figure 8 จะเห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที ก๊าซโอโซนสามารถออกซิไดซ์สารประกอบเชิงซ้อนที่อยู่ในน้ำทั้งสีย้อม ทำให้ความเข้มของสีลดลงหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือทำให้น้ำทั้งมีความโปร่งแสงมากขึ้นโดยจะเห็นได้จาก ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดกลืนแสงหลังการบำบัดด้วยก๊าซโอโซนมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และนอกจากกรณีการวัดค่าเปอร์เซ็นต์การดูดกลืนแสงแล้ว ค่า BOD และค่า COD ก็เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการบ่งชี้คุณภาพน้ำ จากการทดลองนำตัวอย่างน้ำทิ้งหลังบำบัดด้วยก๊าซโอโซนพบว่าการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นดังแสดงใน Figure 8

จากกราฟ Figure 8 จะเห็นว่าค่า BOD และ COD หลังผ่านการบำบัดด้วยก๊าซโอโซนมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาที่ใช้ในการดิสซาร์จนานขึ้น ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบเชิงซ้อนในน้ำทั้งจากการย้อมเยื่อกระดาษด้วยสีชมพูกับไอออน

ของออกซิเจนที่แตกตัวออกมาจากโมเลกุลของก๊าซโอโซน
สิ่งนี้สอดคล้องกับข้อมูลการตรวจวิเคราะห์โครงสร้าง
ทางเคมีของสารประกอบเชิงซ้อนที่เปลี่ยนไปในน้ำทิ้งด้วย
เทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี
ดังแสดงใน Figure 14

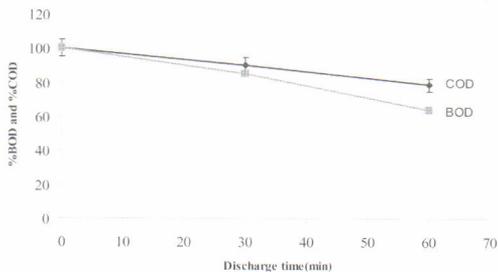


Figure 8 BOD and COD reduction of pink dye solution after treatment by ozone among discharge time of 0-60 minutes

จ. ศึกษาผลการบำบัดน้ำเสียด้วยการตกตะกอนด้วยสารส้ม

ในการทดลองเบื้องต้นนั้น จำเป็นต้องหาปริมาณของสารส้มที่เหมาะสมในการตกตะกอนก่อน โดยน้ำที่ผ่านการตกตะกอนจะนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ตัวอย่างของน้ำเสียเชื่อมสีชมพูที่ผ่านการตกตะกอนแสดงดังรูป Figure 9

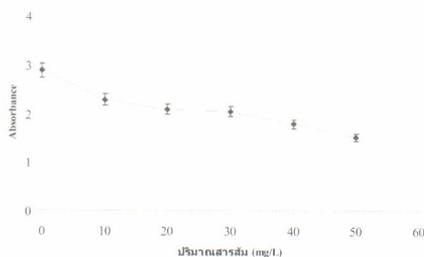


Figure 9 Illustration of absorbance of dye pink waste water after alum coagulation

จากรูปกราฟเป็นตัวอย่างของสารละลายสีชมพูเชื่อมสีชมพูที่ผ่านการตกตะกอนด้วยสารส้ม พบว่าเมื่อปริมาณสารส้มที่เหมาะสมในการทำให้เกิดการตกตะกอนสูงสุดคือ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งในกรณีสีชมพูเชื่อมสีแดง และสีน้ำเงิน หลังจากนั้นทำการทดลองบำบัดน้ำทิ้งจากการเชื่อมสีเหลืองด้วยการตกตะกอนด้วยสารส้มเพียงกระบวนการเดียวจะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์การดูดกลืนแสงเปอร์เซ็นต์ค่า BOD และ COD หลังการบำบัดน้ำทิ้งมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับน้ำทิ้งก่อนผ่านกระบวนการตกตะกอนด้วยสารส้ม

ฉ. ศึกษาผลการบำบัดน้ำเสียด้วยโอโซนร่วมกับการตกตะกอนด้วยสารส้ม

หลังจากศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งจากการเชื่อมสีเหลืองด้วยการตกตะกอนด้วยกระบวนการเดียวกับในข้อ (ง) และ (จ) แล้วในหัวข้อนี้จะทำการทดลองบำบัดน้ำทิ้งแบบ 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกจะบำบัดน้ำทิ้งสีชมพูเชื่อมสีเหลืองโดยการตกตะกอนด้วยสารส้ม และในขั้นตอนสุดท้ายจะนำน้ำทิ้งที่ได้จากขั้นตอนแรกไปทำออกซิเดชันด้วยก๊าซโอโซนที่ผลิตจากระบบพลาสมาโอโซนในเซอร์ น้ำทิ้งจากการเชื่อมสีเหลืองเชื่อมมี 3 สีได้แก่ สีแดง, สีน้ำเงิน และสีชมพู น้ำทิ้งจะถูกนำมาวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพด้วยการวัดเปอร์เซ็นต์การดูดกลืนแสง เช่นเดียวกับ 2 ตอนที่ผ่านมา Figure 10 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดกลืนแสงของน้ำทิ้งจากการเชื่อมสีเหลืองเชื่อมทั้งสามสีชมพู จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของการดูดกลืนแสงมีค่าแปรผันโดยตรงกับระยะเวลาที่ใช้ในบำบัดด้วยก๊าซโอโซน และน้ำทิ้งเชื่อมสีชมพูมีการลดลงของการดูดกลืนแสงมากกว่าน้ำทิ้งจากกลุ่มที่เหลือทั้งสองกลุ่ม

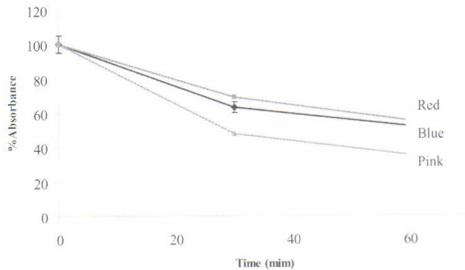


Figure 10 Percentage of absorbance of dye wastewater using combined alum coagulation and ozone treatment among discharge time

เมื่อทำการบำบัดน้ำทิ้งจากการย้อมสีด้วยการตกตะกอนด้วยสารส้มก่อนการใช้ก๊าซโอโซนในการออกซิไดซ์ พบว่าทำให้การบำบัดด้วยก๊าซโอโซนมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งจากกระบวนการดีซัน โดยดูได้จากค่าเปอร์เซ็นต์การดูดกลืนแสงลดลงขณะที่ค่าเปอร์เซ็นต์ BOD และ COD ลดลง ทั้งนี้จะมีเหตุผลมาจากสารแขวนลอยและสารประกอบเคมีเชิงซ้อนบางส่วนตกตะกอนออกไปก่อนการบำบัดด้วยก๊าซโอโซน ทำให้ตัวอย่างน้ำทิ้งเหล่านี้ยอมให้แสงส่องผ่านได้มากขึ้น (เปอร์เซ็นต์การดูดกลืนลดลง) และอีกเหตุผลก็คือปริมาณของสารอินทรีย์ที่ทำให้ค่า BOD และค่า COD มีปริมาณลดลง บางส่วนแตกตัวและถูกจับไว้ในกลุ่มของตะกอน

อย่างไรก็ดีเพื่อให้เห็นชัดเจนว่า กระบวนการแบบ 2 ขั้นตอนที่ใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งที่มีประสิทธิภาพสูง จึงนำผลการทดลองทั้งสามตอนมาสร้างกราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์การดูดกลืน เปอร์เซ็นต์การลดลงของค่า BOD และ COD ดังกราฟ Figure 11, 12, 13 และ 14 ตามลำดับ ผลของการวิจัยนี้สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงที่เกิดขึ้นในการบำบัดน้ำทิ้งแบบหลายขั้นตอน และสอดคล้องกับงานวิจัยที่มีมาในอดีต (จารุทัศน์, 2537)

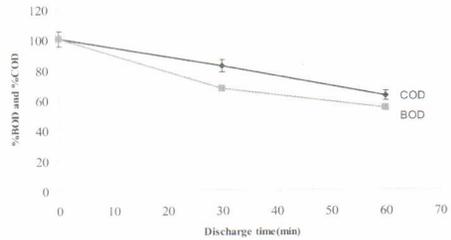


Figure 11 Percentages of BOD and COD reduced of dye wastewater using combined coagulation and ozone treatment among discharge time

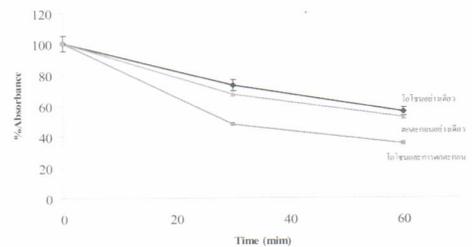


Figure 12 Percentage of absorbance of dye pink wastewater at various treatment processes

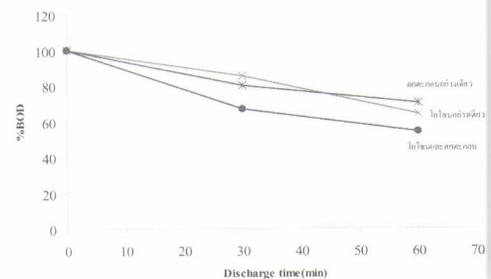


Figure 13 Percentage of BOD reduced of dye pink wastewater at various treatment processes

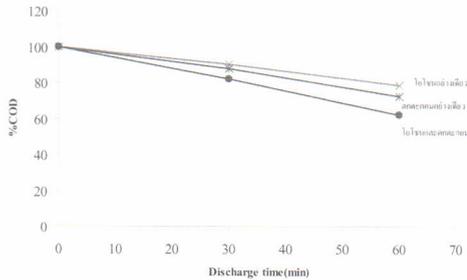


Figure 14 Percentage of COD reduced of dye pink wastewater at various treatment processes

รูปที่ 12 แสดงให้เห็นเปอร์เซ็นต์การดูดกลืนแสงที่ลดลงของน้ำทิ้งสีชมพูสีย้อมสีชมพูภายหลังการบำบัดด้วยกระบวนการขั้นตอนเดียว 2 วิธีได้แก่ การใช้สารส้มเพื่อตกตะกอนและการใช้ก๊าซโอโซน และการบำบัดสองขั้นตอนด้วยโอโซนและสารส้ม ซึ่งจะเห็นได้ว่าในกระบวนการสองขั้นตอนให้ผลการลดลงของเปอร์เซ็นต์การดูดกลืนแสงของน้ำเสียได้ค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับกระบวนการแบบขั้นตอนเดียว และจะเห็นผลได้ชัดเจนเมื่อใช้เวลาในการดิสชาร์จไฟฟ้าด้วยโอโซนที่นานขึ้น โดยเฉพาะเมื่อใช้เวลาดิสชาร์จนานถึง 60 นาที ในทำนองเดียวกันรูปที่ 13 และ 14 แสดงเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่า BOD และค่า COD ของน้ำทิ้งจากการย้อมสีเยื่อกระดาษด้วยสีชมพู ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระบวนการบำบัดด้วยสองขั้นตอนจะให้

การลดลงของเปอร์เซ็นต์ BOD และ COD มากที่สุดเมื่อเทียบกับกระบวนการบำบัดน้ำทิ้งด้วยขั้นตอนเดียว อย่างไรก็ตามเพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระดับโครงสร้าง ดังรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

ช. การศึกษาโครงสร้างของอนุภาคสีชมพูเยื่อกระดาษหลังการบำบัดด้วยโอโซน

จากการศึกษาโครงสร้างสีชมพูเยื่อกระดาษด้วยเครื่อง FTIR ได้ผลดัง Figure 15 จะเห็นว่ามีความถี่สูงสุดและจุดต่ำสุดต่างๆ จำนวนหนึ่ง และเมื่อแปลงค่าที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ปรากฏเด่นชัดให้เป็นหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบเชิงซ้อนต่างๆ จากการเทียบกับฐานข้อมูลในเครื่อง FTIR สามารถแสดงระบุได้ดัง Table 3

จากตารางพบว่าสีชมพูทั้งก่อนและหลังการบำบัดประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน กลุ่มแอลกอฮอล์ (หมู่ OH) กลุ่มที่มีลักษณะวงแหวนอะโรมาติก (หมู่ -C=C-) และสารประกอบพวกคลอไรด์ (C-Cl) สำหรับหมู่ฟังก์ชันที่ต่างกันระหว่างสีชมพูก่อนการบำบัดและหลังการบำบัดคือสีชมพูก่อนการบำบัดจะประกอบด้วยกลุ่มเมทิล (methyl group, CH₃) และกลุ่มคาร์บอกซิลเลต (carboxylate, C=O) ในขณะที่สีชมพูหลังการบำบัดจะไม่มีกลุ่มฟังก์ชันเหล่านี้ นอกจากนี้จะพบว่าพีคเล็กๆ จำนวนมากในช่วง wavenumber 1600 ถึง 1300 พีคเหล่านี้จะหายไปหลังการบำบัดด้วยโอโซน ซึ่งเกิดจากการออกซิไดซ์ด้วย

Table 3 Illustration of functional group in dye solution before and after treatment by ozone

สีชมพูก่อนการบำบัดด้วยโอโซน		สีชมพูหลังการบำบัดด้วยโอโซน	
Wave number	หมู่ฟังก์ชัน	Wave number	หมู่ฟังก์ชัน
3500-3250	OH	3500-3250	OH
1950-1600	C=O	1950-1600	C=O
1380-1310	CH ₃	1280-1150	C-O
1280-1150	C-O	760-510	C-Cl
760-510	C-Cl		

ก๊าซไอโซน ทำให้สารประกอบเชิงซ้อนมีขนาดเล็กลงและสามารถย่อยสลายได้ง่ายตามธรรมชาติ ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (ไพฑูรย์, 2545)

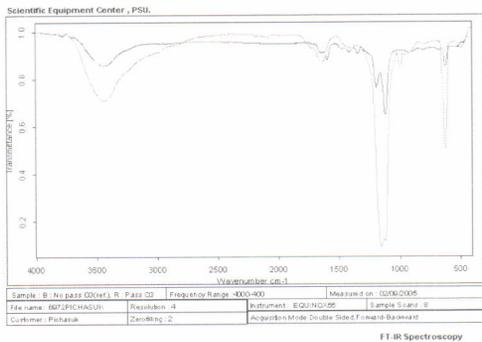


Figure 15 Spectrograph of dye pink waste water before (blue line) and after (red line) ozonation

สรุปผลการทดลอง

สามารถสรุปแบ่งเป็นข้อๆตามผลและการวิเคราะห์ที่ได้ดังนี้

1. ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจะต้องมีค่าเพียงพอที่จะทำให้เกิดการแตกตัวของออกซิเจนและรวมตัวกันใหม่เป็นก๊าซไอโซน ซึ่งควรมีค่าไม่ต่ำกว่า 6 kV ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าประมาณ 2-3 mm ขณะที่กระแสพัลส์ขณะเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าอยู่ในระดับ ns
2. ปริมาณความเข้มข้นก๊าซไอโซนไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเข้าที่ป้อนให้กับหลอดไอโซนไนเซอร์ และปริมาณไอโซนที่ได้จะเพิ่มขึ้นตามค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วไฟฟ้าด้วย
3. การประยุกต์ใช้ไอโซนในการบำบัดน้ำเสียเชื่อมโยงสู่การจุดพบว่าใช้ไอโซนสามารถลดปริมาณความเข้มข้นได้ 56% รวมทั้งทำให้คุณภาพของน้ำทิ้งจากกระบวนการย่อยสลายเชื่อมโยงสู่การจุดดีขึ้น โดยดูได้จากปริมาณ BOD และ COD ที่ลดลง
4. การใช้ไอโซนร่วมกับการตกตะกอนด้วยสารส้มในการบำบัดน้ำทิ้งจากการเชื่อมโยงสู่การจุด เป็นวิธีการที่เหมาะสมกว่าการบำบัดน้ำเพียงขั้นตอนเดียว

5. การวิเคราะห์โครงสร้างของสารด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปี สามารถบอกให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น กับสารประกอบเชิงซ้อนในสีย้อมเมื่อการจุดหลังการไอโซนเนชัน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา และภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้สนับสนุนทุนอุดหนุนงานวิจัยตลอดจนเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลองต่างๆ จนทำให้การดำเนินงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- ชัยวิทย์ ศิลาวัชานาไนย. (2529). ฟิสิกส์ของดิสชาร์จไฟฟ้า. โครงการส่งเสริมตำราของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา, 250 หน้า.
- ดิเรก ชัยชนะ. (2538). การผลิตก๊าซไอโซนที่ความดันบรรยากาศ, โครงการระดับปริญญาบัณฑิต, ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 80 หน้า.
- ธวัชณันชัย เทพนวล. (2542). เครื่องกำเนิดไอโซนโดยพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 124 หน้า.
- ประสาร ชาตะรัตน์. (2538). การสร้างไอโซนที่ความดันบรรยากาศด้วยโคโรนาดีสชาร์จโดยไฟฟ้ากระแสสลับ. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 57 หน้า.
- ไพฑูรย์ ไทยพันธ์. (2545). การผลิตไอโซนด้วยวิธีไฟฟ้าแรงสูง และการใช้บำบัดน้ำเสียเชื่อมโยงสู่การจุด. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 88 หน้า.
- ยุทธนา ฐิระวณิชกุล, ชัยวิทย์ ศิลาวัชานาไนย และธวัชณันชัย เทพนวล. (2541). การออกแบบและสร้างระบบพลาสมาไอโซไนเซอร์ที่ความดัน

- บรรยากาศ. วารสารสงขลานครินทร์. 20(3), 355-366.
- ศุภวรรณ ฐิระวณิชกุล, ยุทธนา ฐิระวณิชกุล, ณรงค์ สุวรรณณณี, ดิเรก ชัยชนะ และ ประสิทธิ์ สงวน. (2539). การศึกษาเบื้องต้นของกระบวนการของกระบวนการทางเคมีพลาสมาสำหรับการทำน้ำให้บริสุทธิ์. การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22. บทคัดย่อ No. F-02. 16-18 ตุลาคม, มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพฯ.
- Chang, C.H., Lawless, P.A. and Yamamoto, T. (1991). Corona discharge processes. IEEE Transaction on Plasma Science. 19(6), 1152-1166.
- Eliasson, B., Hirth, M. and Kogelschatz, U. (1987). Ozone synthesis from oxygen in dielectric barrier discharge. J. Phys. D : Appl. Phys. (20), 1421-1437.
- Eliasson, B. and Kogelschatz, U. (1986). Electron impact dissociation in oxygen. Phys. B: At. Mol. Phys. (19), 1241-1247.
- Eliasson, B. and Kogelschatz, U. (1991). Modeling and applications of silent discharge plasmas. IEEE. Transaction on Plasma Science. 19(2), 309-323.
- Falkenstein, Z. (1998). Application of dielectric barrier discharges, Presented in the 12th Int. Conf. on High-Energy Particle Beams. Beams 98.
- Francis, L. Evans III. (1972). Ozone in water and wastewater treatment. Ann arbor Science Pub. Inc., Michigan, 185 pages.
- Hadj-Ziane S., Held, B., Pignolet, P., Peyrous, R., Benas, J.M. and Coste, C. (1990). Ozone production in and oxygen-fed wire cylinder ozonizer, J. Phys D : Appl. Phys. (23), 1390-1395.
- Harano, A., Sadakata, M and Sato, M. (1991). Soot oxidation in a silent discharge. J. of Chem. Eng. of Japan. 2(1), 100-106.
- Hochanadel, C.J., Ghormley, J.A. and Boyle, J.W. (1986). J. Chem. Phys. (48), 2416.
- Kogelchatz, U. (1983). Ozone synthesis in gas discharges. Proc. XVI Int. Conf. On Phenomena in Ionized Gases (ICPIG XVI). Dusseldorf, Germany, 240-250.
- Morris, K. (1977). Methods of sampling and analysis. 2nd ed., APHA Intersociety Committee.
- Nomoto, Y., Ohleubo, T., Kanazawa, S. and Adachi, T. (1995). Improvement of ozone yield by a silent-surface hybrid discharge ozonizer. IEEE Transaction on Industry Application. 31(6), 1458-1462.
- Scar, J.T. and Sutherland, J.W. (1968). J. Phys. Chem. (71), 1166.
- Wataru N., Fahmi, Tsukasa M. And Mtsumasa O. (2003). DOC removal by multi-stage ozonation-biological treatment, Water Research. (37), 150-154.
- Yamabe, C. S. and Ishimine, M. (1994). Fundamental studies of ozone generating and its characteristics using new type of ozonizer. Jpn. J. Appl. Phys. (33), 4361-4364.