

การสลายสีเมทิลีนบลูด้วยพัลส์พลาสมาระดับไมโครวินาทีในบรรยากาศ ของก๊าซต่างชนิด

Decolorization of Methylene Blue via Microsecond Pulsed Plasma in Atmospheric Gases

ณัฐพล ถาวรวงศ์ (Nutthapon Thawonkul)* ภาคภูมิ อธิกพันธ์ (Pakpoom Athikaphan)*

ดร.สุธาสนี เนรมิตตกพงศ์ (Dr.Sutasinee Neramittagapong)**,**

ดร.อาทิตย์ เนรมิตตกพงศ์ (Dr.Arthit Neramittagapong)^{1**,**}

(Received: August 14, 2022; Revised: November 27, 2022; Accepted: December 2, 2022)

บทคัดย่อ

เครื่องปฏิกรณ์ฟองในแนวตั้งที่ดัดแปลงพลาสมาระดับไมโครวินาทีได้รับการออกแบบมาใหม่เพื่อพัฒนาการสลายสีเมทิลีนบลู โดยศึกษาผลของการก๊าซป้อนต่อประสิทธิภาพการสลายสี ได้แก่ อากาศ ออกซิเจน อาร์กอน และไนโตรเจน ผลการศึกษาพบว่าก๊าซป้อนทั้งหมดสามารถสลายสีเมทิลีนบลูได้สูงกว่า 95% ภายใน 30 นาที ขณะที่ค่าพลังงานการสลายสีที่ 50% (Y50) เท่ากับ 1.415, 0.954, 0.786 และ 0.586 g/kWh สำหรับ ออกซิเจน อากาศ อาร์กอน และไนโตรเจน ตามลำดับ การทดสอบข้อมูลการสลายสีด้วย $\ln(C_0/C_t)$ พบการแปรผันเป็นเส้นตรงตามเวลาที่เกิดปฏิกิริยาซึ่งบ่งชี้ว่าการสลายสีเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ในท้ายที่สุดได้ทดสอบยับยั้งอนุมูลไฮดรอกซิลด้วยสารคูมารินซึ่งแสดงให้เห็นว่าอนุมูลไฮดรอกซิลเป็นสารหลักสำหรับปฏิกิริยาการสลายสี โดยอนุมูลไฮดรอกซิลเหล่านี้อาจเกิดจากโอโซนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เมื่อพิจารณาทางด้านเศรษฐศาสตร์และประสิทธิภาพการสลายสีแล้ว อากาศเป็นตัวเลือกของก๊าซป้อนที่แนะนำสำหรับการสลายสีเมทิลีนบลู

ABSTRACT

A novel vertical bubble reactor with microsecond plasma discharge was designed for methylene blue decolorization. The effect of changing the type of feed gas in the plasma reactor (air, oxygen, argon, and nitrogen) on the decolorization efficiency was investigated. All the feed gases achieved methylene blue decolorization higher than 95% within 30 min, while the energy required for 50% decolorization (Y50) was 1.415, 0.954, 0.786, and 0.586 g/kWh for oxygen, air, argon, and nitrogen, respectively. By fitting with $\ln(C_0/C_t)$, the reaction time varied linearly with the reaction time, indicating that the decolorization reaction exhibited pseudo-first-order behavior. Finally, coumarin was used as an OH radical scavenger, demonstrating that OH radicals were the main active species in the decolorization reaction. These OH radicals may have been generated from ozone and hydrogen peroxide. Considering the economics and the decolorization efficiency, these results suggest that air is a promising feed gas candidate for methylene blue decolorization.

คำสำคัญ: พลาสมาอุณหภูมิต่ำ พัลส์โคโรนาดีสชาร์จ สีเมทิลีนบลู

Keywords: Non-thermal plasma, Pulsed corona discharge, Methylene blue

¹Corresponding author: Artner@kku.ac.th

*นักศึกษ าสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**นักวิจัย ศูนย์วิจัยด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและสารอันตราย มหาวิทยาลัยขอนแก่น และศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย ศูนย์เครือข่ายมหาวิทยาลัยขอนแก่น

***รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทนำ

ในปัจจุบันมีปริมาณประชากรที่ขยับตัวสูงขึ้น ก่อให้เกิดความต้องการสินค้าเพื่อการอุปโภคและบริโภคเพิ่มมากขึ้น จึงเกิดการขยายตัวทางด้านอุตสาหกรรมจำพวก สิ่งทอ ยา กระจก การฟอกหนัง ซึ่งน้ำเสียที่ปลดปล่อยจากอุตสาหกรรมเหล่านี้มักมีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ ซึ่งสารอินทรีย์ส่วนใหญ่นั้นมีโครงสร้างที่ซับซ้อนและแข็งแรง มีความเป็นพิษสูง เป็นสารก่อมะเร็ง [1] ไม่สามารถย่อยสลายได้เองโดยธรรมชาติ ก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำ โดยเมื่อน้ำเสียเหล่านี้ไหลลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะก็จะไปขวางทางเดินของแสงในน้ำ [2] ทำให้เกิดการเน่าเสียของแหล่งน้ำกลายเป็นภัยคุกคามอย่างยิ่งต่อระบบนิเวศวิทยา จากข้อมูลงานวิจัยต่างประเทศ พบว่าทั่วโลกมียอดการระบายน้ำเสียอยู่ที่ 280,000 ตันต่อปี [3] จากยอดการผลิตที่ย่อมขึ้นทั้งหมดประมาณ 7,000,000 ตันต่อปี [2] โดยข้อมูลจากธนาคารโลก (World bank) ได้ประเมินว่า 17-20% ของมลพิษทางน้ำมาจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ [3] ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีน้ำเสียจากอุตสาหกรรมนี้จะต้องผ่านการบำบัดด้วยวิธีที่ถูกต้องและได้มาตรฐาน ซึ่งทุกอุตสาหกรรมในประเทศไทยต้องปฏิบัติตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทั้งจากโรงงานของกรมโรงงาน กระทรวงอุตสาหกรรม [4] อย่างเคร่งครัดก่อนจะปล่อยน้ำเสียเหล่านั้นลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

จากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2560 ประกาศบังคับใช้ตั้งแต่วันที่ 7 มิถุนายน 2560 โดยมีมาตรฐานใหม่เกี่ยวกับค่าสีของน้ำทิ้ง ซึ่งจากฉบับเดิม (ปี พ.ศ. 2539) กำหนดว่า “ต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ” เปลี่ยนเป็น “ต้องมีค่าสีน้อยกว่า 300 เอดีเอ็มไอ (ADMI)” ซึ่งมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานฉบับใหม่ที่ออกมามีความเข้มงวดเรื่องค่าสีของน้ำทิ้งสูงขึ้นมากและถึงแม้ว่าในปัจจุบันจะมีกระบวนการบำบัดน้ำเสียทั้งแบบเคมีและกายภาพที่ใช้กันอย่างแพร่หลายได้แก่ การบำบัดทางชีวภาพ การตกตะกอน [5] และกระบวนการโอโซน [6] เป็นต้น แต่ก็ยังพบข้อบกพร่องเช่น การบำบัดทางชีวภาพซึ่งใช้จุลินทรีย์และแบคทีเรีย รวมถึงการใช้วัสดุจำพวกเส้นใยในการดูดซับไม่สามารถย่อยสลายสีย้อมที่มีความเข้มข้นต่ำๆได้ [2] ส่วนการตกตะกอนนั้นบำบัดสีย้อมแบบละลายน้ำได้ไม่ดี อีกทั้งยังมีกากตะกอนของเสียเกิดขึ้น [5] ซึ่งเป็นการเพิ่มภาระในการกำจัด และกระบวนการโอโซนก็ส่งกลิ่นรบกวนและเป็นสารพิษ [6] เป็นต้น

พลาสมาอุณหภูมิต่ำ (Non-thermal plasma, NTP) [7-8] เป็นหนึ่งในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Process, AOPs) ซึ่งกำลังได้รับความสนใจอย่างมาก การดิสชาร์จประจุไฟฟ้าแรงสูง ทำให้เกิดสารแอคทีฟ (Active species) พลังงานสูงได้แก่ โอโซน (O_3) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) อนุมูลไฮดรอกซิล ($OH^\cdot$) อนุมูลไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ($H_2O_2^\cdot$) อนุมูลออกซิเจน ($O^\cdot$) อิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง คลื่นกระแทก แสงอัลตราไวโอเลต (UV) เป็นต้น [9] เนื่องจากมีข้อดีซึ่งเป็นเอกลักษณ์ซึ่งเหนือกว่าการบำบัดแบบอื่นๆทั่วไป นั่นคือสามารถสร้างอนุมูลไฮดรอกซิล ($OH^\cdot$) ที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงและเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง [10] สามารถทำปฏิกิริยากับสารมลพิษแบบอินทรีย์ได้เกือบทุกชนิด [5]

สารเมทิลีนบลู (MB) เป็นสีย้อมเบสิก (Basic dyes) [11] ในจำพวกสารอะโรมาติกแบบเฮเทอโรไซคลิก (Heterocyclic aromatic) อยู่ในตระกูลฟีนไทอาซีน (Phenothiazine family) มีโครงสร้างที่แข็งแรง [8] มีสีฟ้าเด่นชัด และเป็นพิษ [11] ถูกใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่ม การพิมพ์ และทางการแพทย์ [12] กำลังเป็นปัญหาในการกำจัด [8] ถูกนำมาเป็นต้นแบบศึกษาในหลายงานวิจัยด้านการสลายสีย้อมอินทรีย์ [9] ซึ่งในงานวิจัยนี้เครื่องปฏิกรณ์พลาสมาแบบใหม่ได้รับการพัฒนาเพื่อสลายสีย้อมเมทิลีนบลู โดยเพิ่มการพ่นฟองในแนวดิ่งด้วยหัวพ่นฟองทำจากวัสดุพูนขนาดไมโครเมตร จุ่มแช่ลงในสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูโดยคาดว่าจะสามารถช่วยปรับปรุงเรื่องการถ่ายโอนมวลระหว่างสาร ออกซิเดนต์ที่เกิดจากพลาสมากับสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู พร้อมตั้งค่าพลังงานแบบเฉพาะซึ่งเมื่อมีการดิสชาร์จประจุไฟฟ้าเกิดขึ้นผ่านหัวพ่นฟองก่อเกิดสารแอคทีฟในสถานะก๊าซในท่อพ่นฟองภายใต้บรรยากาศของก๊าซป้อนที่แตกต่างกันทั้ง 4 ชนิด ได้แก่

อากาศ ออกซิเจน ไนโตรเจนและอาร์กอน ซึ่งอาจช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลีนบลูได้ พร้อมทั้งตรวจสอบค่าความเข้มข้นของสารออกซิแดนซ์ที่เกิดขึ้นในน้ำ ได้แก่ โอโซน และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นสารออกซิแดนซ์ที่มีความสัมพันธ์ต่อการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิล รวมถึงตรวจสอบค่าพลังงานที่ใช้ในการสลายสีเมทิลีนบลูภายใต้เครื่องปฏิกรณ์นี้

วิธีการวิจัย

สารเคมีที่ใช้

สีเมทิลีนบลู ($C_{16}H_{18}ClN_3S \cdot xH_2O$ >95%, Ajax Finechem Pty Ltd, Australia), โพแทสเซียม ไอโอไดด์ (KI >95%, Ajax Finechem Pty Ltd, Australia), โซเดียมไฮโอซัลเฟตเพนตะไฮเดรต ($Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ >95%, Ajax Finechem Pty Ltd, Australia), คูมาริน ($C_9H_6O_2$ ≥99% (HPLC), Sigma Aldrich, USA), กรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 98% (H_2SO_4 , RCI Labscan Limited, Thailand), โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$ 95%, Ajax Finechem Pty Ltd, Australia), ก๊าซออกซิเจน (O_2 99.5%, KASIDIT, Thailand), ก๊าซอาร์กอน (Ar 99.99%, KASIDIT, Thailand), ก๊าซไนโตรเจน (N_2 99.99 %, KASIDIT, Thailand), แอร์ซีโร่ (Zero Air (Lab grade), KASIDIT, Thailand) และน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) สำหรับการเตรียมสารละลาย

วิธีการทดลอง

ดำเนินการทดลองแบบกะในห้องควบคุมอุณหภูมิ 25 °C เพื่อทำการสลายสีของสารละลายสีเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 25 mg/l ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เริ่มต้นเท่ากับ 5.48 และค่าความนำไฟฟ้า (Electrical conductivity, EC) เริ่มต้นที่ 4 $\mu S/cm$ ดำเนินการดิสชาร์จพลาสมาเป็นเวลา 30 นาที ในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาซึ่งทำจากแก้วไฟร์เร็กซ์ทรงกลมสามคอ ซึ่งบรรจุสารละลายสีเมทิลีนบลูปริมาณ 30 ml ต่อกะ การดิสชาร์จพลาสมาเกิดขึ้นในท่อพ่นฟองซึ่งมีขนาดรูพ่นเฉลี่ย 160 μm ภายในท่อมีแท่งตัวนำอิเล็กโทรดขั้วบวกทำจากสแตนเลสปลายแหลม ระยะห่างสำหรับการดิสชาร์จที่ 8 mm โดยวัดจากด้านปลายของหัวพ่นฟองถึงปลายของแท่งตัวนำอิเล็กโทรดขั้วบวก สำหรับตัวนำอิเล็กโทรดขั้วลบใช้แท่งสแตนเลส ทรงกระบอกต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแรงดันสูงเพื่อทำการดิสชาร์จพลาสมาในรูปแบบพัลส์ที่มีความกว้างขนาด 60 μSec โดยตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าแรงสูง (Delivered voltage [13]) ที่ 36.1 kV ความถี่ 10 kHz พร้อมจ่ายก๊าซป้อนที่อัตราการไหลคงที่ 2 LPM ไปยังท่อพ่นฟอง ดังแสดง **ภาพที่ 1** การวัดค่า pH ใช้เครื่องวัดค่า pH (HI2002, HANNA Instruments, Thailand) และค่าความนำไฟฟ้าใช้เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า (EC-100, Extech Instruments, China)

ค่าประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลีนบลู ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV visible spectrometer (8453, Agilent technology) โดยทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 665 nm [14] แล้วทำการสอบเทียบเพื่อหาความเข้มข้นของสารละลายโดยใช้กราฟมาตรฐาน (Calibration curve) ซึ่งในการหาค่าประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลีนบลู (% Decolorization Efficiency, %DE) คำนวณจากสูตร (1) [14]

$$\%DE = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ C_0 คือค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีเมทิลีนบลู (mg/l) และ C_t คือค่าความเข้มข้นของตัวอย่างสีเมทิลีนบลู ณ เวลาเก็บตัวอย่าง และเนื่องจากเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 เทียม (Pseudo first order reaction) ดังนั้นค่าคงที่อัตรา (Kinetic rate constant, k) ในหน่วย min^{-1} คำนวณจากสูตร (2) [8]

$$\ln \left(\frac{C_0}{C_t} \right) = kt \quad (2)$$

ค่าพลังงานการสลายสี (Energy yield, Y) คำนวณจากสูตร (3) [17]

$$Y(\text{g/kWh}) = \frac{C_0(\text{g/L}) \times V_0(\text{L}) \times \frac{1}{100} \times \%DE}{P(\text{kW}) \times t(\text{h})} \quad (3)$$

การวัดค่าสัญญาณทางไฟฟ้า ใช้เครื่องออสซิลโลสโคป (DSO5102P, Hantek, China) ต่อพ่วงด้วยโพรบวัดสัญญาณไฟฟ้าแรงดันสูง อัตรา 1 : 1000 (HVP series, UNI-T, China) เพื่อวัดค่าแรงดันดิสชาร์จ $U(t)$ จากแท่งอิเล็กโทรดขั้วบวก และโพรบวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้า อัตรา 1 : 1 (PP-200, Hantek, China) สำหรับวัดค่าแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน 100 โอห์ม (Ω) เพื่อใช้หาค่ากระแส $I(t)$ [15] การหาค่ากำลังไฟฟ้าในการดิสชาร์จพลาสมา (Discharged Power, P) ในหน่วย W คำนวณจากสูตร (4) [14]

$$P = f \times \int_0^T U(t) \cdot I(t) dt \quad (4)$$

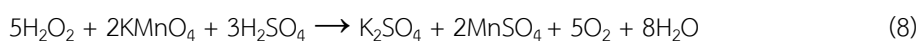
โดยที่ f คือค่าความถี่ของการดิสชาร์จพลาสมา ในหน่วย Hz, $U(t)$ คือแรงดันดิสชาร์จ ในหน่วย kV, $I(t)$ คือค่ากระแสไฟฟ้า ในหน่วย mA, T คือค่าคาบเวลาของสัญญาณพัลส์ใน 1 รอบ และ E คือค่าพลังงานต่อพัลส์ ในหน่วย J คำนวณจากสูตร (5) [16]

$$E = \int_0^T U(t) \cdot I(t) dt \quad (5)$$

ปริมาณโอโซน คิดเฉพาะปริมาณของโอโซนละลาย (Dissolved Ozone) ทำปฏิกิริยากับสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดต์ (KI) ความเข้มข้น 0.2 M ปริมาณ 30 ml ดังปฏิกิริยา (6) จากนั้นทำการไทเทรตกับสารละลายโซเดียมธีโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) ที่ความเข้มข้น 0.01 M ดังปฏิกิริยา (7) [18]



ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในน้ำปราศจากไอออนปริมาณ 30 ml เติมกรดซัลฟูริกจนมากพอ ก่อนทำการไทเทรตด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4) ความเข้มข้น 0.001 M ตามปฏิกิริยา (8) [20]



ทดสอบยับยั้งอนุมูลไฮดรอกซิล ทำโดยการใช้สารละลายคูมารินความเข้มข้น 100 μM เป็นตัวดักจับอนุมูลไฮดรอกซิล (OH scavenger) [21-22] โดยผสมลงในสารละลายสีเมทิลีนบลู

วัดค่าตามมาตรฐานสี ADMI (American Dye Manufacturers Institute) ด้วยวิธี APHA 2021F (ADMI weighted-ordinate spectrophotometric method) [23]

ผลการทดลองและอภิปรายผล

ผลของก๊าซต่อการเกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

อนุมูลไฮดรอกซิลถูกคาดว่าเป็นตัวการหลักในการสลาย เนื่องจากมีค่าศักย์การออกซิเดชันสูงเท่ากับ 2.8 V [10] แต่ก็มีอายุสั้นมากเช่นกัน (ประมาณ 10^{-8} วินาที [24]) ดังนั้นในการหาค่าโดยตรงจึงทำได้ยากและมีโอกาสคลาดเคลื่อนสูง การหาค่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นสารออกซิแดนซ์ที่มีอายุยาวนานกว่า (ค่าศักย์การออกซิเดชัน = 1.7 V [10])

จึงถูกนำมาทดแทน [7] เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการรวมตัวของอนุมูลไฮดรอกซิล ดังปฏิกิริยา (9-10) [10] และยังสามารถเปลี่ยนเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลได้ดังเดิมภายใต้แสงยูวีจากพลาสมาดังปฏิกิริยาที่ (11) [10]



จากการทดลองพบว่าปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากการดิสชาร์จพลาสมาในน้ำปราศจากไอออน มีปริมาณที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน แสดงดัง **ภาพที่ 2** โดยการเพิ่มขึ้นของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นฟังก์ชันของเวลา โดยภายใต้บรรยากาศของอาร์กอนสามารถผลิตได้สูงมากถึง 100 ppm อาจเนื่องมาจากภายใต้บรรยากาศของอาร์กอนมีความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงและอาร์กอนในสภาวะถูกกระตุ้นมีอายุยาวนาน จึงทำให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานสู่ผิวน้ำได้ดี [18] และภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนและอากาศพบปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ต่ำกว่า อาจมีสาเหตุมาจากไนตริกออกไซด์ (NO) และไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างพลาสมากับก๊าซไนโตรเจนและออกซิเจน ดึงอนุมูลไฮดรอกซิลไปทำปฏิกิริยาเกิดกรดไนตริก (HNO₂) และกรดไนตริก (HNO₃) ขึ้น ณ ขณะเคลื่อนที่ผ่านผิวน้ำลงสู่สารละลาย ดังปฏิกิริยาที่ (12-13) [10] จากงานวิจัยของ E. Brun และคณะ [21] ระบุว่า NO และ NO₂ เป็นสารดักจับอนุมูลไฮดรอกซิล (OH scavenger) ที่มีประสิทธิภาพและปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นการบ่งบอกปริมาณต่ำสุดของการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลในทางอ้อม ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าภายใต้บรรยากาศของอากาศอาจมีปริมาณของไนตริกออกไซด์และไนโตรเจนไดออกไซด์ที่สูงกว่าในการภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน เนื่องจากมีปริมาณโมเลกุลของออกซิเจนในสภาวะก๊าซมากกว่า ส่วนภายใต้บรรยากาศของออกซิเจนไม่มีโมเลกุลของไนโตรเจน จึงเกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้มากกว่า ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องทั้งงานวิจัยของ L. Chandana และคณะ [18] และงานวิจัยของ H. Nishiyama และคณะ [25] ดังนั้นจากข้อมูลข้างต้นดังกล่าว จึงพออนุมานปริมาณการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลภายใต้บรรยากาศของก๊าซทั้ง 4 ชนิด เรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ อาร์กอน ออกซิเจน ไนโตรเจน และอากาศ ตามลำดับ

ผลของก๊าซต่อการเกิดโอโซน

โอโซนเป็นหนึ่งในสารออกซิแดนท์ซึ่งมีความสำคัญต่อการสลายสีและกลิ่นโดยมีค่าศักย์การออกซิเดชันเท่ากับ 2.07 V [10] ซึ่งการหาปริมาณโอโซนละลาย (Dissolved Ozone) ในงานวิจัยนี้ จะหาปริมาณโอโซนละลายจากการดิสชาร์จพลาสมาภายใต้บรรยากาศของออกซิเจนและอากาศเท่านั้น [9] ไม่คิดปริมาณโอโซนละลายที่อาจเกิดภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนและอาร์กอนเนื่องจากไม่มีโมเลกุลของออกซิเจน ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าปริมาณโอโซนละลายที่เกิดภายใต้บรรยากาศของออกซิเจนและอากาศเป็นฟังก์ชันกับเวลา แสดงดัง **ภาพที่ 3** ภายใต้บรรยากาศของออกซิเจนมีปริมาณโอโซนละลายสูงที่สุดเท่ากับ 60 mg/L ภายใน 30 นาที ซึ่งโอโซนเกิดจากปฏิกิริยาการรวมตัวของอนุมูลออกซิเจน (O[•]) รวมตัวกับออกซิเจนในบรรยากาศ ดังปฏิกิริยาที่ (14) และ (15) [24] ส่วนภายใต้บรรยากาศของอากาศมีปริมาณโอโซนละลายเท่ากับ 40 mg/L ภายใน 30 นาที ซึ่งมีปริมาณที่น้อยกว่าภายใต้บรรยากาศของออกซิเจน เนื่องจากมีปริมาณโมเลกุลของออกซิเจนในเครื่องปฏิกรณ์ที่น้อยกว่า และอีกทั้งยังอาจต้องสูญเสียจำนวนโมเลกุลของออกซิเจน

จากการรวมตัวกับอะตอมไนโตรเจนในสภาวะถูกกระตุ้น (N^*) เกิดเป็นไนตริกออกไซด์ และไนโตรเจนไดออกไซด์ ดังปฏิกิริยาที่ (16-19) [13]



การสลายสีเมทิลีนบลู

ผลของการสลายสี ณ เวลาสิ้นสุดการทดลองในนาที่ที่ 30 พบว่าสีของเมทิลีนบลูภายใต้ก๊าซทั้ง 4 ชนิด มีการเปลี่ยนแปลงลดลงอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดง **ภาพที่ 4** ซึ่งหลังจากนำตัวอย่างไปทดสอบหาค่าการดูดกลืนแสงสเปกตรัม ในช่วงที่มองเห็นได้ที่มีความยาวคลื่น 665 nm พบว่าค่าการดูดกลืนแสงภายใต้ก๊าซทั้ง 4 ชนิดมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งหาเป็นความสัมพันธ์ของค่าประสิทธิภาพการสลายสีต่อเวลา ดังแสดง **ภาพที่ 5** จากข้อมูลผลการสลายสีเมทิลีนบลูข้างต้นพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยามีความสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเทียม ดังแสดง **ภาพที่ 6** พลาสมาภายใต้สภาวะบรรยากาศของออกซิเจน พบค่าประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลีนบลูสูงที่สุดเท่ากับ 99.87% โดยมีปฏิกิริยาการสลายสีเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่สุดด้วยค่าคงที่อัตราเท่ากับ 0.214 min^{-1} ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุดในงานวิจัยนี้ คาดว่าเกิดจากการทำงานร่วมกันของโอโซนในปริมาณสูงกับอนุมูลไฮดรอกซิลเป็นหลัก จึงมีสารออกซิแดนซ์ในระบบสูงกว่าก๊าซชนิดอื่น และเป็นเหตุให้ค่าประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลีนบลูภายใต้สภาวะบรรยากาศของออกซิเจนมีการเปลี่ยนแปลงสูงกว่าก๊าซชนิดอื่นอย่างชัดเจนในนาที่ที่ 5 และ 10 ดังแสดง **ภาพที่ 5** แม้ว่าภายใต้บรรยากาศของออกซิเจนจะมีปริมาณอนุมูลไฮดรอกซิลเป็นรองบรรยากาศของอาร์กอนก็ตาม นอกจากนี้ในงานวิจัยของ H. Nishiyama และคณะ [25] พบว่ามีโอโซนถูกหุ้มอยู่ในฟองก๊าซที่ถูกพ่นในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งอาจยิ่งช่วยให้โอโซนทำปฏิกิริยากับสีเมทิลีนบลูได้ดียิ่งขึ้น ส่วนภายใต้บรรยากาศของอาร์กอนและอากาศ มีค่าประสิทธิภาพการสลายสีใกล้เคียงกันมาก โดยอากาศมีค่าประสิทธิภาพการสลายสีเท่ากับ 98.68% และค่าคงที่อัตราเท่ากับ 0.142 min^{-1} ส่วนอาร์กอนค่าประสิทธิภาพการสลายสีเท่ากับ 97.79% และค่าคงที่อัตราเท่ากับ 0.130 min^{-1} เนื่องจากภายใต้บรรยากาศของอาร์กอนสามารถผลิตปริมาณอนุมูลไฮดรอกซิลได้มากที่สุดดังปฏิกิริยาที่(20-21) [24] ดังนั้นจึงอนุมานได้ว่าการสลายสีภายใต้บรรยากาศของอาร์กอนมาจากอนุมูลไฮดรอกซิลเป็นหลัก ในส่วนสภาวะบรรยากาศของอากาศ ถึงแม้จะมีปริมาณอนุมูลไฮดรอกซิลน้อยที่สุด แต่ก็ยังมีปริมาณโอโซนมาช่วยในการสลายสีซึ่งโอโซนนั้นนอกจากจะสามารถสลายสีโดยตรงเป็นกลไกหลักแล้ว [26] ยังสามารถสลายตัวเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลได้ เมื่อทำปฏิกิริยากับอนุมูลไฮโดรเพอรอกซิล ($HO_2^{\cdot}$) ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโอโซนและน้ำ แสดงได้ ดังปฏิกิริยาที่ (22-24) [24]





ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนมีค่าประสิทธิภาพการสลายสีน้อยที่สุดเท่ากับ 94.78% ด้วยค่าคงที่อัตราเท่ากับ 0.104 min^{-1} เมื่อนำพิจารณาเทียบกับอากาศแล้วพบว่า อาจมีสาเหตุมาจากการขาดตัวช่วยในการสลายสีที่สำคัญในระบบอย่างโอโซน แต่ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนนั้นถูกอนุมานว่ามีปริมาณอนุมูลไฮดรอกซิลสูงกว่าอากาศถึง 2 เท่า ทำให้ค่าประสิทธิภาพการสลายสี ณ นาทีที่ 30 ไม่แตกต่างกันมาก แต่เมื่อพิจารณาโดยการเปรียบเทียบค่าคงที่อัตราระหว่างไนโตรเจนและอากาศแล้วพบว่าแตกต่างกันถึง 36.54 % ซึ่งบ่งบอกได้ว่าปฏิกิริยาการสลายสีเมทิลีนบลูภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนมีอัตราที่ช้ากว่าอากาศอย่างเห็นได้ชัดจน ส่วนปัจจัยอื่นๆที่มักถูกกล่าวถึงทางด้านผลกระทบต่อการสลายสีเมทิลีนบลู นั้นคือค่า pH และ EC เริ่มต้นของสารละลาย ซึ่งในงานวิจัยนี้สารละลายสีเมทิลีนบลูมีค่า pH และค่า EC เริ่มต้นเท่ากันทุกการทดลองเท่ากับ 5.48 และ $4 \mu\text{S/cm}$ ตามลำดับ และจากงานวิจัยของ L. Wu และคณะ [17] ได้ทำการศึกษาผลกระทบจากค่าเริ่มต้นของค่า pH และ EC ต่อประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลีนบลูพบว่าผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อค่าประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลีนบลู ซึ่งค่า pH ณ เวลาต่างๆ ในงานวิจัยนี้ แสดงดัง **ภาพที่ 7** พบว่าบรรยากาศของอากาศและไนโตรเจนซึ่งมีค่า pH ต่ำมากกว่าก๊าซชนิดอื่น อาจมาจากปริมาณกรดไนตริก (HNO_2) กรดไนตริก (HNO_3) ที่เกิดขึ้นเฉพาะในบรรยากาศของอากาศและไนโตรเจน และในส่วนของคุณค่า EC ณ เวลาต่างๆ แสดงดัง **ภาพที่ 8** พบว่าผลต่างค่าความนำไฟฟ้าระหว่างในบรรยากาศไนโตรเจนและอาร์กอนที่ได้สามารถบ่งบอกปริมาณความแตกต่างปริมาณไอออนในสารละลายสีเมทิลีนบลูที่มากกว่า 10 เท่าตัว ซึ่งพบว่ามีผลสอดคล้องกับความแตกต่างของค่า pH ที่เกิดขึ้น ส่วนผลของการวัดค่าสีตามมาตรฐาน ADMI นั้น ค่าสีเมทิลีนบลูเริ่มต้นอยู่ที่ 2907 ADMI และค่าสีเมทิลีนบลูภายใต้บรรยากาศของอากาศ ณ นาทีที่ 30 คงเหลืออยู่ที่ 29.1 ADMI ซึ่งต่ำกว่าค่าที่กำหนดคือน้อยกว่า 300 ADMI (จากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2560) ซึ่งพออนุมานได้ว่าภายใต้บรรยากาศของก๊าซทุกชนิดมีค่าผ่านเกณฑ์ทั้งหมด เนื่องจากค่าประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลีนบลูภายใต้ก๊าซป้อนชนิดอื่นๆ ณ นาทีที่ 30 มีค่าแตกต่างกันไม่เกิน $\pm 5\%$

การยับยั้งปฏิกิริยาจากอนุมูลไฮดรอกซิล

ผลการผสมสารละลายคูมาริน $100 \mu\text{M}$ เพื่อยับยั้งปฏิกิริยาจากอนุมูลไฮดรอกซิลในการสลายสีเมทิลีนบลู พบว่าประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลีนบลู ณ นาทีที่ 10 ลดลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงดัง **ภาพที่ 9** ซึ่งพบว่าภายใต้บรรยากาศของอากาศ มีค่าประสิทธิภาพการสลายสีต่ำที่สุด อาจเนื่องมาจากภายใต้บรรยากาศของอากาศมีปริมาณอนุมูลไฮดรอกซิลน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับก๊าซชนิดอื่น อีกทั้งโอโซนที่เกิดขึ้นอาจเกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลดังปฏิกิริยาที่ (22-24) เป็นส่วนใหญ่และถูกสารคูมารินดักจับไว้ โดยจะสังเกตเห็นได้ว่าค่าประสิทธิภาพการสลายสีที่ได้มีความสอดคล้องกับค่าปริมาณอนุมูลไฮดรอกซิลเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้แก่ อาร์กอน ไนโตรเจน และ อากาศ ตามลำดับ ยกเว้นภายใต้บรรยากาศของออกซิเจน ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพการสลายสีสูงกว่าอาร์กอน ซึ่งเป็นไปได้ว่าเกิดจากการทำงานร่วมกันของอนุมูลไฮดรอกซิลและโอโซนที่มีปริมาณความเข้มข้นสูง

ค่าพลังงานการสลายสี

จากผลการทดลองพบว่าค่ากำลังไฟฟ้าดิสชาร์จภายใต้บรรยากาศของก๊าซต่างชนิด เรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ ไนโตรเจน อาร์กอน ออกซิเจน และอากาศ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10.93, 10.53, 9.83 และ 9.49 W ตามลำดับ โดยนำมาหาความสัมพันธ์ของค่าพลังงานต่อค่าประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลีนบลู แสดงดัง **ภาพที่ 10** โดยพบว่าค่าพลังงานการ

สลายสีเมทิลีนบลูลดลงต่ำมากมาเกาะกลุ่มกันในช่วงที่สีเมทิลีนบลูมีความเข้มข้นคงเหลือต่ำ ($<1.5 \text{ mg/l}$) ซึ่งอยู่ในช่วงของค่าประสิทธิภาพการสลายสีตั้งแต่ 95% ขึ้นไป นั้นหมายความว่าปัญหาเรื่องการถ่ายโอนมวลระหว่างสีเมทิลีนบลูและสารออกซิแดนท์ยังคงเกิดขึ้นอยู่ในช่วงที่ความเข้มข้นที่ต่ำมากจึงเป็นเหตุให้ใช้พลังงานมาก ดังนั้นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ในงานวิจัยนี้จึงใช้ค่าพลังงาน ณ ประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลีนบลูที่ 50% (Y50) ซึ่งจากงานวิจัยของ MA. Malik [27] ได้ระบุค่า Y50 ของเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาแบบพัลส์โคโรนาพร้อมพ่นฟองออกซิเจนในการสลายสีเมทิลีนบลูอยู่ที่ 0.341 g/kWh ซึ่งค่านี้ถูกใช้อ้างอิงในงานวิจัยของ H. Nishiyama และคณะ [25] และงานวิจัยนี้ด้วย ซึ่งผลการเปรียบเทียบค่าพลังงานกับงานวิจัยต่างๆ แสดงดัง ตารางที่ 1 พบว่าค่าพลังงานของการสลายสีเมทิลีนบลูสูงสุดของงานวิจัยนี้มีค่า Y50 เท่ากับ 1.415 g/kWh ซึ่งสูงกว่าค่าอ้างอิงถึง 4.15 เท่าและสูงกว่าค่าสูงสุดในงานของ H. Nishiyama และคณะ [25] ถึง 2.19 เท่าภายใต้บรรยากาศของออกซิเจน และค่า Y50 ต่ำสุดของงานวิจัยนี้เท่ากับ 0.586 g/kWh ซึ่งสูงกว่าค่าอ้างอิงถึง 1.78 เท่าภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเครื่องปฏิกรณ์ที่พัฒนาขึ้นมานี้มีประสิทธิภาพสูง

สรุปผลวิจัย

ระบบพลาสมาอุณหภูมิต่ำเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการสลายสีเมทิลีนบลู จากผลของงานวิจัยพบว่าอนุโมเลกุลไฮดรอกซิลเป็นตัวการหลักในการสลายสีเมทิลีนบลูในบรรยากาศของก๊าซทุกชนิด ซึ่งอาจได้มาจากการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโอโซน ดังนั้นภายใต้บรรยากาศของออกซิเจนและอากาศจึงมีค่าประสิทธิภาพการสลายสีสูงสุด การสลายสีเมทิลีนบลูในบรรยากาศของก๊าซทุกชนิดเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม พบข้อจำกัดในเรื่องของถ่ายโอนมวลระหว่างสีเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นต่ำมากเป็นเหตุให้ต้องใช้พลังงานสูงขึ้น ภายใต้บรรยากาศของอากาศมีค่าพลังงานการสลายสี (Y50) เท่ากับ 0.954 g/kWh ซึ่งรองจากออกซิเจน แต่มีความคุ้มค่ามากที่สุดเนื่องจากมีไม่มีต้นทุนของก๊าซป้อนอีกทั้งค่าการสลายสีใน 30 นาทีใกล้เคียงกับออกซิเจนมากและมีค่าสีคงเหลือเพียง 29 ADMI ซึ่งต่ำกว่าข้อกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานมาก ($<300 \text{ ADMI}$)

กิตติกรรมประกาศ

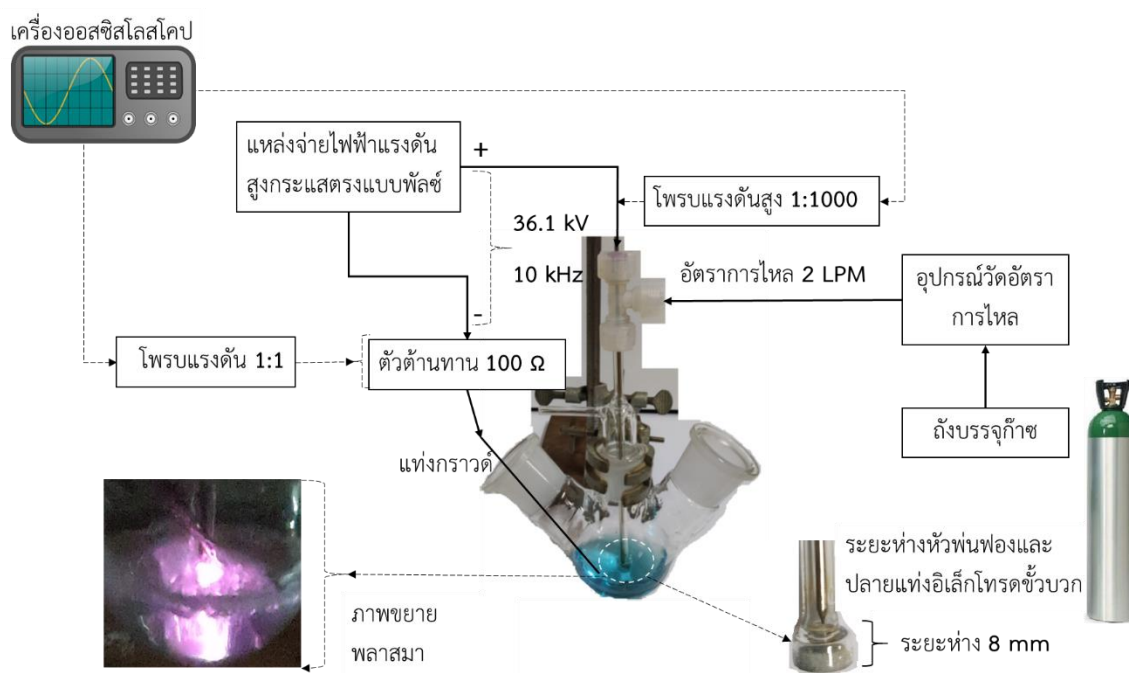
ขอขอบคุณกองทุนวิจัยคณะกรรมการศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในการสนับสนุนทุนวิจัยเลขที่ Mas.che-8/2564 และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น ศูนย์วิจัยด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและสารอันตราย (EHSM) มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ได้อำนวยความสะดวกและสนับสนุนในด้านเครื่องมือและอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ อันเป็นประโยชน์ต่อความสำเร็จของการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

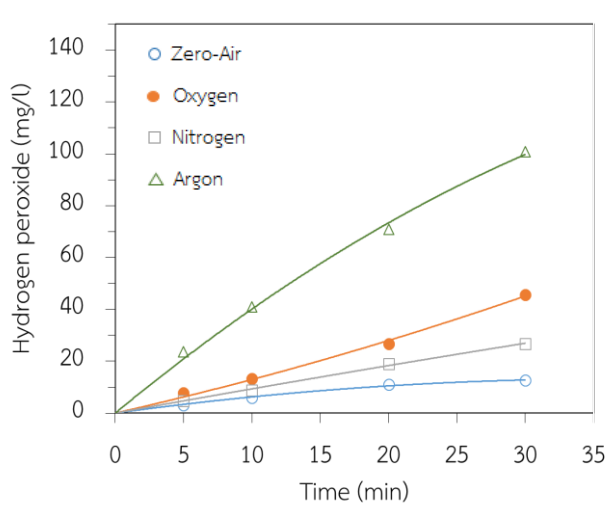
1. Krosuri A, Wu S, Bashir MA, Walquist M. Efficient degradation and mineralization of methylene blue via continuous-flow electrohydraulic plasma discharge. *Journal of Water Process Engineering*. 2021; 40(January):101926.
2. Varjani S, Rakholiya P, Shindhal T, Shah A V, Ngo HH. Trends in dye industry effluent treatment and recovery of value added products. *Journal of Water Process Engineering*. 2021;39 (June):101734.

3. Jegatheesan V, Pramanik BK, Chen J, Navaratna D, Chang CY, Shu L. Treatment of textile wastewater with membrane bioreactor: A critical review. *Bioresource Technology*. 2016; 204:202–212.
4. Ministry of Industry. Announcement of the Ministry of Industry entitled the Treated Effluent Standards from Factories. *Royal Government Gazette*. 2017;134(153d):11–15.
5. Tange K, Nomura S, Nakajima J. Methylene blue decomposition via various in-liquid plasma methods. *Nihon Enerugi Gakkaishi/Journal of the Japan Institute of Energy*. 2020;99(8):99–103.
6. Rekhate C V, Srivastava JK. Recent advances in ozone-based advanced oxidation processes for treatment of wastewater- A review. *Chemical Engineering Journal Advances*. 2020;3(June):100031.
7. Magureanu M, Bradu C, Piroi D, Mandache NB, Parvulescu V. Pulsed corona discharge for degradation of methylene blue in water. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2013;33(1):51–64.
8. García MC, Mora M, Esquivel D, Foster JE, Rodero A, Jiménez-Sanchidrián C, et al. Microwave atmospheric pressure plasma jets for wastewater treatment: Degradation of methylene blue as a model dye. *Chemosphere*. 2017; 180:239–246.
9. Wang B, Dong B, Xu M, Chi C, Wang C. Degradation of methylene blue using double-chamber dielectric barrier discharge reactor under different carrier gases. *Chemical Engineering Science*. 2017;168:90–100.
10. Zeghioud H, Nguyen-Tri P, Khezami L, Amrane A, Assadi AA. Review on discharge Plasma for water treatment: mechanism, reactor geometries, active species and combined processes. *Journal of Water Process Engineering*. 2020;38(May):101664.
11. Khan I, Saeed K, Zekker I, Zhang B, Hendi AH, Ahmad A, et al. Review on Methylene Blue: Its Properties, Uses, Toxicity and Photodegradation. Vol. 14, *Water (Switzerland)*. MDPI; 2022.
12. Wang S, Zhu ZH, Coomes A, Haghseresht F, Lu GQ. The physical and surface chemical characteristics of activated carbons and the adsorption of methylene blue from wastewater. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2005;284(2):440–446.
13. Bulusu RKM, Wandell RJ, Gallan RO, Locke BR. Nitric oxide scavenging of hydroxyl radicals in a nanosecond pulsed plasma discharge gas-liquid reactor. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2019;52(50).
14. Liang JP, Zhao ZL, Zhou XF, Yang DZ, Yuan H, Wang WC, et al. Comparison of gas phase discharge and gas-liquid discharge for water activation and methylene blue degradation. *Vacuum*. 2020;181(July):109644.
15. Dubois D, Merbahi N, Eichwald O, Yousfi M, Benhenni M. Electrical analysis of positive corona discharge in air and N₂, O₂, and C O₂ mixtures. *Journal of Applied Physics*. 2007;101(5).
16. Wandell RJ, Bresch S, Wang H, Babicky V, Lukes P, Locke BR. The effects of pulse frequency on chemical species formation in a nanosecond pulsed plasma gas-liquid film reactor. *International Journal of Plasma Environmental Science and Technology*. 2020;14(1):1–9.

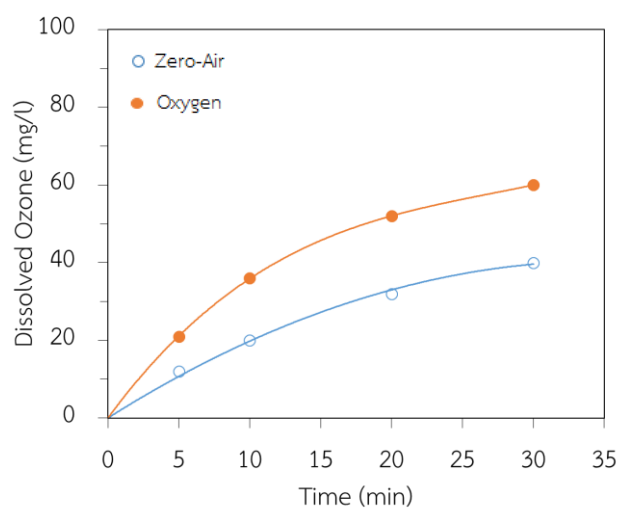
17. Wu L, Xie Q, Lv Y, Wu Z, Liang X, Lu M, et al. Degradation of methylene blue via dielectric barrier discharge plasma treatment. *Water (Switzerland)*. 2019;11(9).
18. Chandana L, Manoj Kumar Reddy P, Subrahmanyam C. Atmospheric pressure non-thermal plasma jet for the degradation of methylene blue in aqueous medium. *Chemical Engineering Journal*. 2015 Dec 15; 282:116–122.
19. Chasanah U, Yulianto E, Zain AZ, Sasmita E, Restiwijaya M, Kinandana AW, et al. Evaluation of Titration Method on Determination of Ozone Concentration produced by Dielectric Barrier Discharge Plasma (DBDP) Technology. In: *Journal of Physics: Conference Series*. Institute of Physics Publishing; 2019.
20. Bolouki N, Kuan WH, Huang YY, Hsieh JH. Characterizations of a plasma-water system generated by repetitive microsecond pulsed discharge with air, nitrogen, oxygen, and argon gases species. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021 Jul 1;11(13).
21. Brun E, Girard HA, Arnault JC, Mermoux M, Sicard-Roselli C. Hydrogen plasma treated nanodiamonds lead to an overproduction of hydroxyl radicals and solvated electrons in solution under ionizing radiation. *Carbon N Y*. 2020; 162:510–518.
22. De-Nasri SJ, Nagarajan S, Robertson PKJ, Ranade V. Quantification of hydroxyl radicals in photocatalysis and acoustic cavitation: Utility of coumarin as a chemical probe. *Chemical Engineering Journal*. 2021;420.
23. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. APHA, AWWA, WEF, 23rd edition, 2017.
24. Motoki Y, Wahayudiono, Siti M, Hedeki K, Motonobu G. Nonthermal Atmospheric Pressure Plasma for Methylene Blue Dye Decolorization by Using Slug Flow Reactor System. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2020;40(Published: 04 February 2020):985–1000.
25. Nishiyama H, Nagai R, Ninuma K, Tanaka H. Characterization of DBD multiple Jets for Methylene Blue Decolorization. *Journal of fluid Science and technology*. 2013;8.
26. Nashmi OA, Abdulrazzaq NN, Mohammed AA. Removal of methylene blue from aqueous solution by ozone microbubbles. *Association of Arab Universities Journal of Engineering Sciences*. 2020 Sep 30;27(3):31–40.
27. Malik MA. Water purification by plasmas: Which reactors are most energy efficient? *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2010 Feb;30(1):21–31.



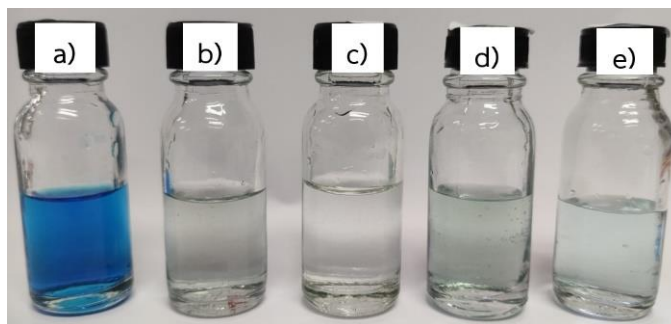
ภาพที่ 1 เครื่องปฏิกรณ์พลาสมา



ภาพที่ 2 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ณ เวลาต่างๆ

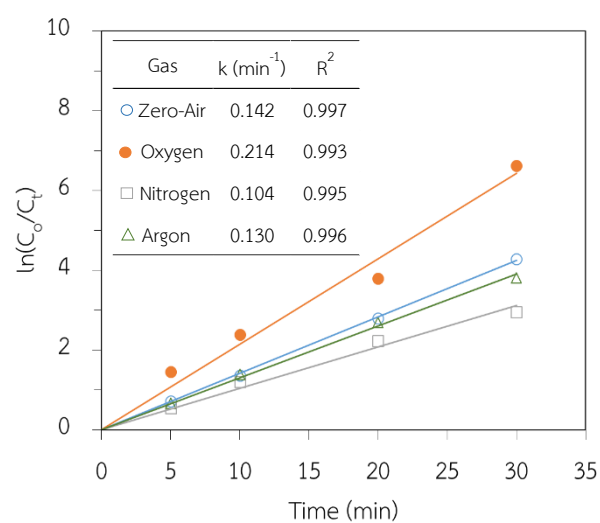
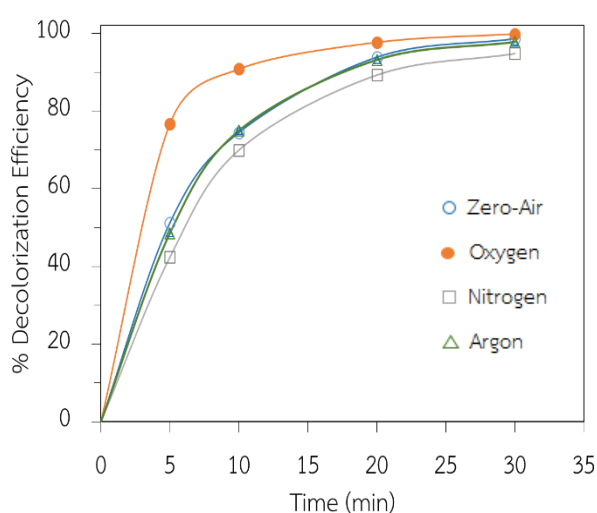


ภาพที่ 3 ความเข้มข้นของโอโซนละลาย ณ เวลาต่างๆ

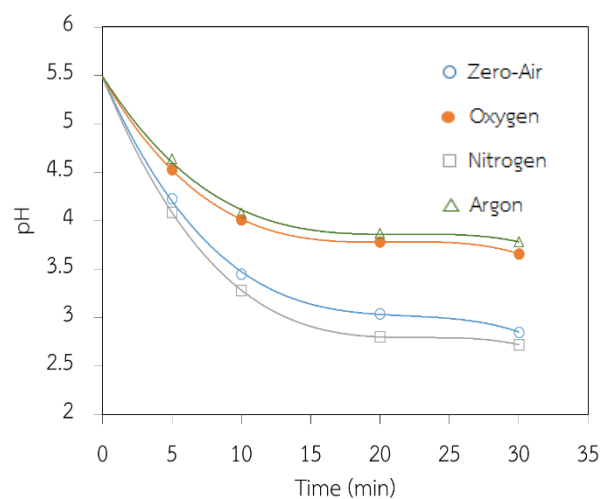


ภาพที่ 4 ตัวอย่างสีเมทิลีนบลูก่อนและหลัง 30 นาทีภายใต้ก๊าซป้อนทั้ง 4 ชนิด

a) สีเมทิลีนบลูเริ่มต้น b) อากาศ c) ออกซิเจน d) ไนโตรเจน e) อาร์กอน

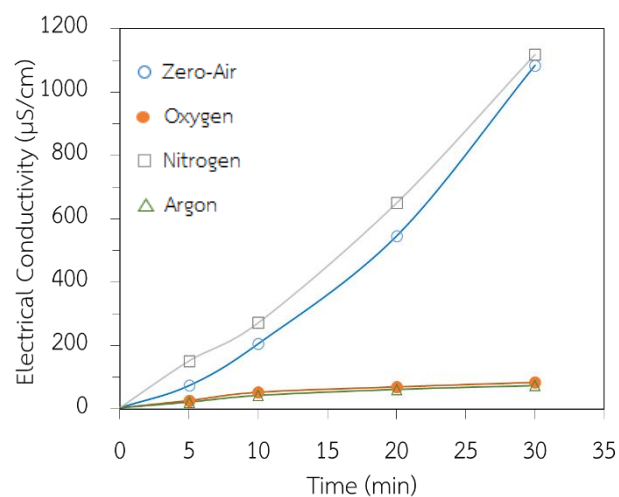


ภาพที่ 5 ประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลีนบลู ณ เวลาต่างๆ

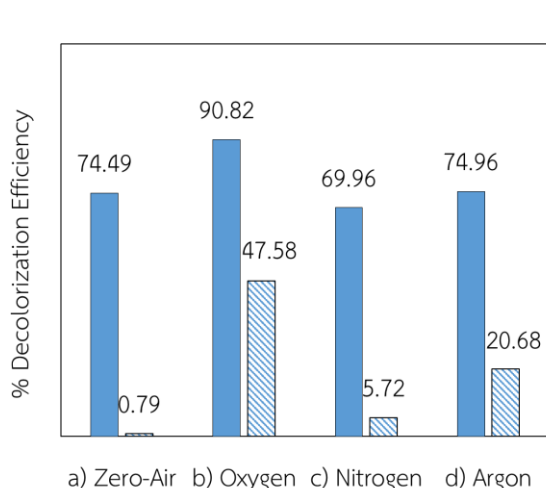


ภาพที่ 7 pH ณ เวลาต่างๆ

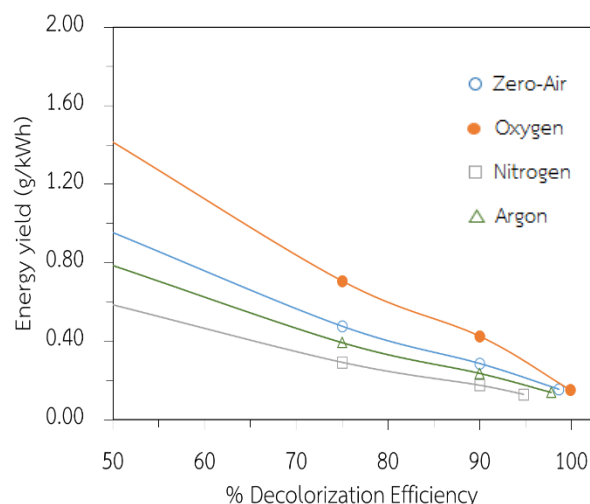
ภาพที่ 6 ปฏิกริยาอันดับที่ 1 เทียมของการสลายสี



ภาพที่ 8 ค่าความนำไฟฟ้า ณ เวลาต่างๆ



ภาพที่ 9 ประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลีนบลู ณ 10 นาที
แบบปกติเทียบกับแบบผสมสารคูมาริน



ภาพที่ 10 พลังงานต่อประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลีนบลู

ตารางที่ 1 ตารางเปรียบเทียบค่าพลังงานการสลายสีเมทิลีนบลูกับงานวิจัยต่างๆ

ค่าพลังงานการสลายสี (Y, g/kWh)				
รูปแบบเครื่องปฏิกรณ์	ค่าขอบเขต	50% (Y50)	75% (Y75)	งานวิจัยอ้างอิง
พลาสมาในท่อพ่นฟอง (งานนี้)	ค่าสูงสุด	1.415	0.708	PCD, $C_0 = 25$ mg/L, $V_0 = 30$ ml, $V = 36.1$ kV, $f = 10$ kHz, 2 l/min (Ar, O ₂ , Air, N ₂), $t = 30$ min
	ค่าต่ำสุด	0.586	0.293	
พลาสมาระบบของเหลว	ค่าสูงสุด	-	0.0439	[5] PCD, $C_0 = 10$ mg/L, $V_0 = 100$ ml- 6l, $P = 730-970$ W, $f = 200$ kHz, $t = 10$ min
ไหลวนและหล่อเย็น	ค่าต่ำสุด	-	0.0045	
พลาสมาเจ็ท ณ ระดับ	ค่าสูงสุด	0.296	-	[8] PJ, $C_0 = 5-250$ mg/L, $V_0 = 40$ ml, $P = 150$ W, $f = 2.45$ GHz, 350-1400 sccm (Ar), $t = 30$ min
ความถี่ไมโครเวฟ	ค่าต่ำสุด	0.007	-	
พลาสมาในหลายท่อพ่น	ค่าสูงสุด	0.644	-	[25] PCD, $C_0 = 1$ mg/L, $V_0 = 0.55$ l, $V = 6$ kV, $f = 1000$ Hz, 4 sl/min (Ar, O ₂ , Air), $t = 30$ min
ฟองขนาดไมโคร	ค่าต่ำสุด	0.184	-	

หมายเหตุ: PCD คือพัลส์โคโรนาดีสชาร์จ, PJ คือพลาสมาเจ็ท