

# การประยุกต์ใช้นวัตกรรมการพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่สภาวะบรรยากาศแบบจนวนคั่นเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำ

## Novel Application of Atmospheric Low Temperature DBD Plasma for Water Quality Improvement

คณิศร มาตรา<sup>1\*</sup> กิตติศักดิ์ โคมน้อย<sup>2</sup> สุธิดา ทีปรัชพันธ์<sup>3</sup> ณัฐกิตติ์ กานบุตร<sup>1</sup> ณัฐริกา บุญชู<sup>1</sup> พงศ์ภัค สมวี<sup>1</sup> และ สุพัตรา หวังเกษม<sup>1</sup>

Khanit Matra<sup>1\*</sup>, Kitisak Komnoi<sup>2</sup>, Suthida Theepharaksapan<sup>3</sup> Natthakit Kabut<sup>1</sup>, Natthariga Boonchub<sup>1</sup>,  
Pongpak Somvee<sup>1</sup>, and Suphattra Wangkasem<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ จังหวัดนครนายก

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University,  
Nakhon Nayok, Campus, Thailand,

<sup>2</sup>ศูนย์วิศวกรรมและเทคโนโลยีนิวเคลียร์ชั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) จังหวัดนครนายก

<sup>2</sup>Advanced Engineering and Nuclear Technology Center, Thailand Institute of Nuclear Technology  
(Public Organization), Nakhon Nayok, Thailand,

<sup>3</sup>ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ จังหวัดนครนายก

<sup>3</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University,  
Nakhon Nayok, Campus, Thailand,

\*Corresponding Author E-mail: khanit@g.swu.ac.th

Received: 30/08/24, Revised: 4/10/24, Accepted: 5/10/24

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติของน้ำกระตุ้นพลาสมา โดยใช้พลาสมาอุณหภูมิต่ำภายใต้สภาวะบรรยากาศ โดยมีการพัฒนาและออกแบบเครื่องสร้างพลาสมา โดยใช้เทคนิคพลาสมาแบบมีจนวนคั่น เพื่อผลิตน้ำที่อุดมไปด้วยองค์ประกอบของปุ๋ยไนโตรเจน เครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบมีจนวนคั่นถูกออกแบบโดยใช้ชุดท่อจนวนซ้อนกันเพื่อช่วยในการระบายความร้อนที่มีการสะสมบริเวณพื้นผิวของแกงอเล็กโทดขณะสร้างพลาสมาด้วยน้ำแบบไหลเวียนโดยพลาสมาจะเกิดระหว่างผิวหน้าและผิวด้านล่างของท่อจนวนซ้อนกัน จากผลการทดลองการศึกษาอิทธิพลของเวลาในการกระตุ้นน้ำแร่ซึ่งทำการกระตุ้นน้ำซ้ำเป็นจำนวน 4 รอบ พบว่า ค่าพารามิเตอร์ทางน้ำมีการเปลี่ยนแปลงตามจำนวนรอบต่อการกระตุ้นน้ำที่เพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งพบว่า หลังจากทำการกระตุ้นน้ำรอบที่ 4 มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด โดยมีค่าความเป็นกรด – ด่าง (pH) และค่าศักย์รีดักซ์ – ออกซิเดชัน (ORP) มีค่าลดลงเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น โดยลดลงเหลือ 8.50 และ 170 mV ตามลำดับ ในขณะที่ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดระหว่าง (TDS) และค่าการนำไฟฟ้า (EC) มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดเป็น 280 ppm และ 550  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ตามลำดับ นอกจากนี้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โอโซน และไนเตรดในน้ำกระตุ้นพลาสมา ยังมีค่าเพิ่มขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเหล่านี้ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของน้ำและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตปุ๋ยน้ำในภาคการเกษตร

**คำสำคัญ:** พลาสมา น้ำกระตุ้นพลาสมา พลาสมาแบบมีจนวนคั่น

### Abstract

This article presents a study on improving the properties of plasma-activated water (PAW) using low-temperature plasma under atmospheric environment. A plasma generator was developed and designed using a dielectric barrier discharge (DBD) technique to produce water enriched with nitrogen fertilizer components. The DBD plasma-activated water generator was designed with a coaxial dielectric barrier discharge system to aid in dissipating heat accumulated on the electrode surface during plasma generation with circulating water. The plasma is generated between the water surface and the lower surface of the coaxial dielectric barrier discharge tube. The experimental results of studying the effect of activation time on mineral water, which was repeatedly activated for 4 cycles, showed that the water parameters changed significantly with an increasing number of cycles per water activation. After the 4<sup>th</sup> cycle, the most significant changes were observed. The pH and oxidation-reduction potential (ORP) values decreased with increasing cycles, decreasing to 8.50 and 170 mV, respectively. Meanwhile, the total dissolved solids (TDS) and electrical conductivity (EC) values increased to a maximum of 280 ppm and 550  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , respectively. Additionally, the concentrations of hydrogen peroxide, ozone, and nitrate in the plasma-activated water increased.

These chemical changes help improve water properties and enhance the efficiency of liquid fertilizer production in the agricultural sector.

**Keywords:** Plasma, Plasma Activated Water, Dielectric barrier discharge

## 1. บทนำ

การบริหารและการจัดการน้ำและมีบทบาทสำคัญในการลดปัญหาการขาดแคลนน้ำในภาคเกษตรกรรม รวมไปถึงภาคอุตสาหกรรมซึ่งเป็นรากฐานสำคัญของเศรษฐกิจของประเทศ ด้วยจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นทำให้ความต้องการน้ำและผลผลิตทางการเกษตรและภาคอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้นอย่างมาก อย่างไรก็ตามวิธีการทั่วไปในการเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร เช่น การใช้ปุ๋ยและสารเคมี ส่งผลเสียต่อระบบนิเวศ ซึ่งนำไปสู่มลภาวะและการปนเปื้อนในแหล่งน้ำ ด้วยความท้าทายเหล่านี้ทำให้การจัดการน้ำมีความซับซ้อนและจำเป็นต้องศึกษาเทคโนโลยีใหม่ ๆ เพื่อแก้ไขปัญหาเหล่านี้ให้มีประสิทธิภาพ

เทคโนโลยีพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่สภาวะบรรยากาศ (atmospheric low temperature plasma technology) กำลังได้รับความสนใจอย่างสูงในแวดวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เนื่องจากศักยภาพอันโดดเด่นในการประยุกต์ใช้ในหลากหลายสาขา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งเป็นประเด็นท้าทายระดับโลกในปัจจุบัน พลาสมาอุณหภูมิต่ำมีคุณสมบัติในการสร้างอนุมูลอิสระที่มีปฏิกิริยาสูง เช่น อนุมูลอิสระของออกซิเจน (reactive oxygen species, ROS) และอนุมูลอิสระของไนโตรเจน (reactive nitrogen species, RNS) ด้วยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (advanced oxidation process, AOP) [1-3] ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายสารปนเปื้อนที่พบในน้ำเสีย ไม่ว่าจะเป็นสารอินทรีย์ สารเคมี หรือแม้กระทั่งจุลินทรีย์ก่อโรค ทำให้สามารถบำบัดน้ำเสียและปรับปรุงคุณภาพน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยปราศจากการใช้สารเคมีที่อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม นอกเหนือจากการบำบัดน้ำเสียแล้ว เทคโนโลยีพลาสมาอุณหภูมิต่ำยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำได้อีกด้วย ตัวอย่างเช่น การเพิ่มปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ การลดความกระด้างของน้ำ และการปรับค่า pH ของน้ำ ให้มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานในด้านต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทำเกษตรกรรมโดยการสร้างปุ๋ยน้ำสารประกอบไนโตรเจน ซึ่งได้แก่ ไนไตรท์ (nitrite,  $\text{NO}_2^-$ ) และไนเตรท (nitrate,  $\text{NO}_3^-$ ) [3-4] ในรูปของน้ำกระตุ้นพลาสมา (plasma activated water, PAW) ด้วยศักยภาพในการบำบัดน้ำเสียและปรับปรุงคุณภาพน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เทคโนโลยีพลาสมาอุณหภูมิต่ำจึงถือเป็นทางเลือกที่น่าสนใจและมีอนาคตสำหรับการแก้ไขปัญหาคุณภาพน้ำ ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญที่ทั่วโลกกำลังเผชิญอยู่ในปัจจุบัน [4-7]

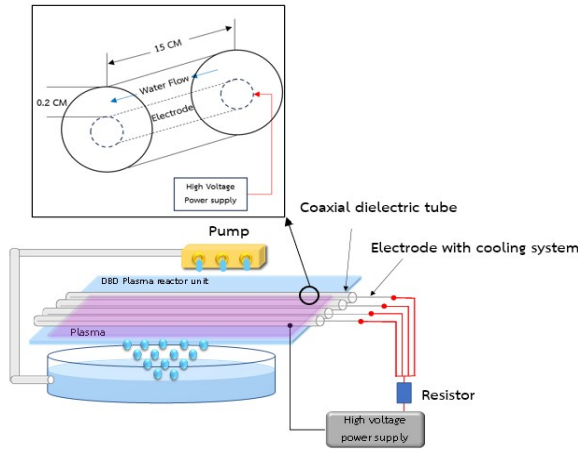
จากคุณสมบัติข้างต้นของเทคโนโลยีพลาสมา บทความนี้จึงสนใจศึกษาการใช้เทคโนโลยีพลาสมาเพื่อช่วยในการเพิ่มศักยภาพในการทำเกษตรกรรม ซึ่งจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของผลผลิตด้านการเกษตร และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยในงานนี้ได้เลือกใช้เทคโนโลยีพลาสมาแบบมีฉนวนกั้น (dielectric barrier discharge, DBD) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีพลาสมาแบบหนึ่งที่สามารถสร้างขึ้นได้ง่ายภายใต้สภาวะบรรยากาศเพื่อใช้ในการกระตุ้นน้ำพลาสมา เครื่องสร้างพลาสมาที่มีการออกแบบโดยใช้หม้อแปลงป้ายนีออน (neon sign transformer) ซึ่งราคาไม่สูง และหาได้ง่ายในประเทศไทยนำมาใช้ในการสร้างพลาสมา โดยพลาสมารีแอคเตอร์ (plasma reactor) ได้มีการออกแบบพิเศษในส่วนของคุณสมบัติของหลอดทงแดงและท่อฉนวนฉนวนกันความร้อนร่วมกับระบบระบายความร้อนซึ่งจะทำให้ช่วยลดความร้อนสะสมที่พลาสมารีแอคเตอร์ได้ ซึ่งจะได้ทำการศึกษาอิทธิพลของเวลาที่สัมผัสต่อการกระตุ้นน้ำดื่มที่พลาสมาแบบมีฉนวนกั้น โดยมีการปรับเปลี่ยนจำนวนรอบในการกระตุ้นน้ำดื่ม และศึกษาค่าพารามิเตอร์ในน้ำ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH), ค่าความสามารถของสารในการออกซิไดซ์หรือรีดิวซ์สารอื่น (Oxidation reduction potential, ORP), ค่าปริมาณสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ที่ละลายในน้ำ (Total Dissolved Solids, TDS) และ ค่าความนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity, EC)

## 2. การออกแบบและกระบวนการทดลอง

### 2.1 ออกแบบเครื่องกำเนิดพลาสมาสำหรับกระตุ้นน้ำ

จากรูปที่ 1 แสดงถึงการกำหนดอุปกรณ์ของเครื่องกำเนิดพลาสมาสำหรับการกระตุ้นน้ำดื่มที่พลาสมา โดยโครงสร้างประกอบไปด้วยชุดแท่งอิเล็กโทรด ทงแดงทำหน้าที่เป็นแท่งตัวนำไฟฟ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เซนติเมตร มีความยาว 30 เซนติเมตร จัดวางไว้ในบริเวณกึ่งกลางของท่อ ฉนวนฉนวนกันความร้อนอะลูมินา (alumina) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร มีความยาว 20 เซนติเมตร แท่งอิเล็กโทรดมีระยะห่างจากท่ออะลูมินา 0.2 เซนติเมตร โดยที่ท่อฉนวนฉนวนกันความร้อนอะลูมินาจำนวน 4 ชุด ถูกจัดเรียงในแนวระนาบห่างกัน 0.5 เซนติเมตร ทั้งนี้เพื่อระบายความร้อนที่สะสมบริเวณพื้นผิวแท่งอิเล็กโทรด จะได้ทำการไหลเวียนน้ำผ่านท่อฉนวนฉนวนกันความร้อนอะลูมินา ด้านล่างของชุดแท่งอิเล็กโทรดทั้ง 4 ชุด เป็นแผ่นทงแดงสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 13 เซนติเมตร และมีความยาว 11 เซนติเมตร มีฉนวนที่เป็นแผ่นอะคริลิกวางปิดอยู่ด้านบน ผิวแผ่นทงแดง โดยระยะของผิวด้านล่างของท่ออะลูมินาห่างจากแผ่นอะคริลิกมีระยะห่าง 5 มิลลิเมตร ทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงด้วยหม้อแปลงป้ายนีออนกระแสสลับความถี่สูง (high frequency AC neon transformer) ขนาดแรงดัน 12 กิโลโวลต์ (kV) และกระแสสูงสุด 40 มิลลิแอมแปร์ (mA) ความถี่ 20 กิโลเฮิรตซ์ (kHz) ซึ่งเป็นชนิดที่ไม่มีกราวด์ (isolation transformer) ทำการต่อขั้วด้าน

หนึ่งทีแ่งอเล็กโทรตองแดง และอิกขั้วตรงข้ามค้บกับแผ่นทองแดง ด้านล่างขูดอเล็กโทรตองแดง โดยเริ่มการทำการกระตุ้นน้ำ ด้วยการปั้มน้ำคูด น้ำจากถังเก็บน้ำปริมาตร 400 มิลลิลิตร จากด้านล่างจะไหลวนขึ้นด้านบน และไหลผ่านช่วงส่วนกลางระหว่างผิวของท่ออะลูมินาที่เกิดพลาสมาด้วย อัตรา 70 มิลลิลิตรต่อนาที ต่อ 1 รอบ



รูปที่ 1 แสดงการกำหนดอุปกรณ์ของเครื่องกำเนิดพลาสมากระตุ้นน้ำ

## 2.2 การวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีเชิงแสงและการวัดค่าพารามิเตอร์ทางน้ำ

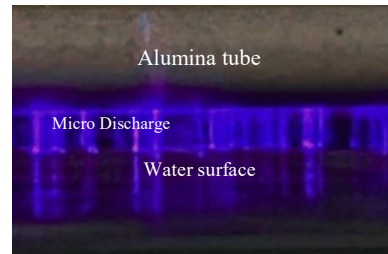
ลักษณะทางไฟฟ้าของพลาสมาถูกวิเคราะห์โดยใช้ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope, WaveRunner รุ่น 8208HD) โดยการต่อหัววัดแรงดันสูง (High voltage probe) ไปที่ขั้วแท่งตัวนำทั้งบนและด้านล่างเพื่อวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าทั้ง 2 จุด และเพื่อหาแรงดันไฟฟ้าดีสชาร์จ (discharge voltage) ตกคร่อมที่บริเวณเครื่องกระตุ้นพลาสมาแบบมีฉนวนกันที่ก่เกิดขึ้นจากผลต่างระหว่างจุดเชื่อมต่อหัววัดแรงดันสูงทั้ง 2 จุด โดยใช้หัววัดแรงดันสูง ยี่ห้อ PINTEK รุ่น HVP-9pro และ HVP-28HF ในส่วนของการ วัดกระแสดีสชาร์จ (discharge current) ทำโดยการเชื่อมต่อกับเครื่องมือวัดกระแสแบบแคลมป์ (Current probe, Pearson Current Monitor Model 2877) คล้องรอบสายไฟที่ออกจากหม้อแปลงนิออนข้างหนึ่ง ทั้งนี้มีการใช้สเปกโตรมิเตอร์แบบ charge-coupled device (CCD) ยี่ห้อ Newport รุ่น 71SI00087 เพื่อวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีเชิงแสง (Optical Emission Spectroscopy, OES) ร่วมด้วย

มีการดำเนินการตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำอย่างละเอียด ซึ่งครอบคลุมค่า pH, EC, TDS และ ORP โดยใช้เครื่องวัด pH Mettler Toledo SevenEasyTM และเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า Hanna HI4321 นอกจากนี้ เพื่อยืนยันการมีอยู่ของ  $\text{NO}_3^-$  ในตัวอย่างน้ำ ได้มีการใช้แถบทดสอบ Quantofix Nitrate/Nitrite ซึ่งมีความสามารถในการตรวจวัดค่า  $\text{NO}_3^-$  ในช่วง 10-500 mg/L และ  $\text{NO}_2^-$  ในช่วง 1-80 mg/L

## 3. ผลการทดลองและการอภิปราย

### 3.1 ลักษณะของพลาสมา

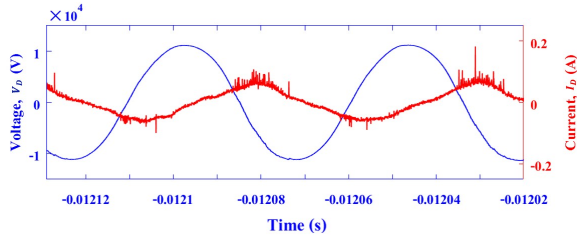
รูปที่ 2 แสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาโดยใช้เทคนิคพลาสมาแบบมีฉนวนกัน โดยกระบวนการสร้างพลาสมาในอากาศทำโดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงเพื่อกระตุ้นการเกิดพลาสมาระหว่างน้ำที่ไหลวนผิวของแผ่นฉนวนที่เคลือบและผิวด้านล่างของท่อฉนวน ซึ่งสนามไฟฟ้าจะเกิดความเครียดไฟฟ้าปริมาณมากแก่อากาศบริเวณนั้น จนเกิดกระบวนการดีสชาร์จจากประจุไฟฟ้าจนเกิดการเบรกดาวน์ทางไฟฟ้า (electrical breakdown) จนเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านอากาศระหว่างขูดอเล็กโทรตองแดง ซึ่งลักษณะของการดีสชาร์จจะมีแสงสีม่วงเข้มเกิดขึ้นเพราะเกิดจากแก๊สไนโตรเจนที่มีอยู่ภายในอากาศ [4], [8]



รูปที่ 2 การเบรกดาวน์ของอากาศระหว่างผิวน้ำกับผิวด้านล่างท่ออะลูมินา

### 3.2 ลักษณะทางไฟฟ้าของการดีสชาร์จ

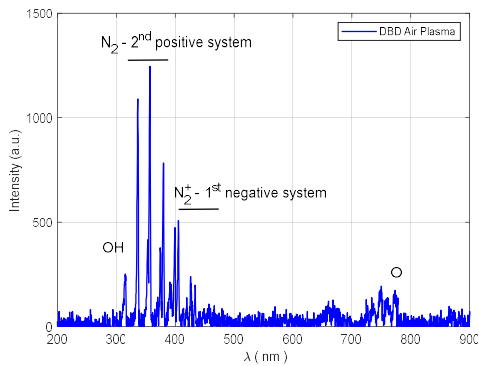
ลักษณะรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าดีสชาร์จขณะกระตุ้นน้ำสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 โดยจะสังเกตเห็นได้ว่ากราฟแรงดันดีสชาร์จและกราฟกระแสไฟฟ้าดีสชาร์จมีการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบสัญญาณไซน์ซอซอด (sinusoidal wave) ที่มีความถี่อยู่ประมาณ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยสัญญาณของกระแสไฟฟ้ามีลักษณะนำหน้าสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ซึ่งเป็นลักษณะโหลดแบบคาปาซิทีฟ (capacitive load) ในขณะที่ขนาดของแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในขอบข่ายของสัญญาณทั้งฝั่งครึ่งคลื่นบวกและลบ เมื่อแรงดันเพิ่มถึงจุดวิกฤตซึ่งทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วอเล็กโทรตองแดงมากพอ จะทำให้อากาศในบริเวณนั้นเกิดการแตกตัวเป็นไอออน ไอออน (ionization) และเบรกดาวน์กลายเป็นพลาสมาในที่สุด จากกราฟในรูปที่ 3 จะสามารถสังเกตได้ว่า การดีสชาร์จจะเกิดขึ้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าถึงจุดวิกฤตเบรกดาวน์ ในขณะที่เกิดพลาสมาแรงดันคร่อมอเล็กโทรตองแดงหรือแรงดันไฟฟ้าดีสชาร์จ (discharge voltage,  $V_D$ ) จะมีค่าลดลง พร้อมกับมีสัญญาณกระแสไฟฟ้าดีสชาร์จ (discharge current,  $I_D$ ) แบบพัลส์เพิ่มขึ้นและตกลงอย่างรวดเร็ว [4], [8], [9] โดยความกว้างของสัญญาณพัลส์ในที่นี่มีค่าอยู่ที่ประมาณ 29 ไมโครวินาที โดยสัญญาณพัลส์นี้เรียกว่าไมโครดีสชาร์จ (micro discharge) สำหรับการทดลองนี้แรงดันไฟฟ้าดีสชาร์จและกระแสไฟฟ้าดีสชาร์จเฉลี่ยขณะทำการกระตุ้นน้ำจะมีค่าอยู่ประมาณ  $10 \text{ kV}_{rms}$  และ  $36 \text{ mA}_{rms}$  ตามลำดับ



รูปที่ 3 ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าดีสชาร์จ

### 3.3 การวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีเชิงแสงของพลาสมา

จากการตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีเชิงแสง (OES) จะสามารถตรวจจับสเปกตรัมการปล่อยแสงที่หลากหลายระหว่างการสร้างพลาสมาในอากาศซึ่งแสดงในรูปที่ 4 โดยพบ  $N_2$  second positive system และ  $N_2^+$  first negative system ในช่วง 300-400 และ 390-480 nm ตามลำดับ โดยมีออกซิเจนอะตอม (O) ที่ 777 nm อนุมูลไฮดรอกซิล ( $\cdot OH$ ) ที่ 309.6 nm โดยอนุมูลอิสระออกซิเจนและไนโตรเจน (reactive oxygen and nitrogen species, RONSs) และ สารอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นขณะสร้างพลาสมามีเป็นประโยชน์ต่อกระบวนการบำบัดน้ำ ซึ่งได้แก่  $\cdot OH$  ซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน ( $O_2^{\cdot -}$ ) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) โอโซน ( $O_3$ ) ไนตริกออกไซด์ ( $NO$ ) ไนเตรต ( $NO_3$ ) ไนไตรท์ ( $NO_2$ ) กรดไนตริก (Nitrous acid,  $HNO_3$ ) กรดเพอร์ออกซินิตริค ( $ONOOH$ ) และเพอร์ออกซินไนไตรท์ ( $ONOO$ ) ซึ่งสารประกอบเหล่านี้มีประโยชน์ในการยับยั้งเชื้อ ปรับปรุงคุณสมบัติของน้ำ และเป็นสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช [4], [7], [10-12]

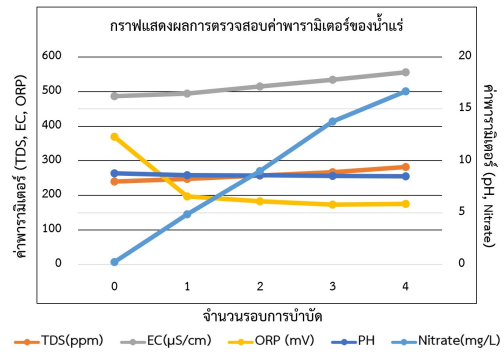


รูปที่ 4 ส่วนประกอบทางเคมีเชิงแสงของพลาสมา (OES)

### 3.4 อิทธิพลของการกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมาต่อค่าพารามิเตอร์ในน้ำแร่

จากผลการทดลองพบว่าอิทธิพลของจำนวนรอบมีผลต่อค่าพารามิเตอร์ในน้ำแร่ ด้วยเทคนิคพลาสมาแบบมีฉนวนกั้นส่งผลให้คุณสมบัติของน้ำเปลี่ยนไป ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งรอบที่ 0 คือกรณีที่ไม่ได้ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมา โดยมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดหลังทำการ

กระตุ้น 4 รอบ ซึ่งทำให้ ค่า pH ของน้ำลดลง 3.95 % ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพของความเป็นกรด-ด่างของน้ำเป็นไปในทิศทางที่ดีขึ้น ค่าตะกอนแขวนลอยหรือ ค่า TDS เพิ่มขึ้น 17.50 % ซึ่งแสดงถึงการเกิดการตกตะกอนหรือสารอนุมูลอิสระในน้ำที่เพิ่มขึ้น ค่าการนำไฟฟ้า EC เพิ่มขึ้น 14.10 % ซึ่งเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของไอออนและตะกอนแขวนลอยที่ละลายได้ทั้งหมดในน้ำ ค่า ORP หรือ REDOX ลดลง 57.43 % ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของความสามารถการเกิดออกซิเดชันและรีดักชันของน้ำ ทั้งนี้อาจเป็นผลจากการสร้าง  $NO_3^-$  ที่มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่า  $NO_3^-$  มีค่าเพิ่มขึ้นจาก  $0.25 \pm 0.07$  mg/L เป็น  $16.7 \pm 1.98$  mg/L ซึ่งคิดเป็น 66.8 เท่าของกลุ่มควบคุม (น้ำที่ไม่ได้ผ่านการกระตุ้นด้วยพลาสมา)



รูปที่ 5 ผลการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ของน้ำแร่

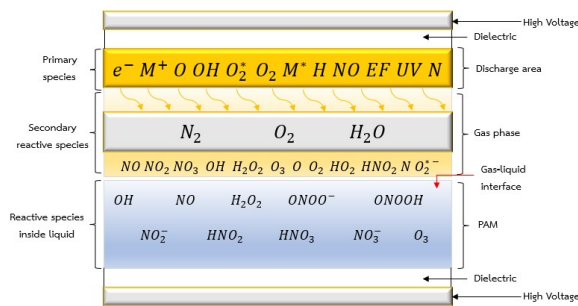
จากผลการทดลองพบว่าการกระตุ้นน้ำดื่มแร่ด้วยพลาสมาทำให้ค่าพารามิเตอร์ทางน้ำซึ่งได้แก่ ค่า pH, TDS, EC, ORP และ  $NO_3^-$  เปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่ดีขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยรูปที่ 6 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสปีชีส์ที่ว่องไวหรืออนุมูลอิสระซึ่งถูกผลิตขึ้นระหว่างกระบวนการสร้างพลาสมาในอากาศกับของเหลวสามารถจำแนกออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

1. ปฏิกิริยาในสถานะก๊าซ: ขั้นตอนนี้เริ่มต้นด้วยการสร้างสารปฐมภูมิ (primary species) อันเป็นผลมาจากการแตกตัวของก๊าซโมเลกุลในอากาศ ภายหลังจากนั้น สารปฐมภูมิเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาซึ่งกันและกัน ก่อให้เกิดสารทุติยภูมิ (secondary species) ทั้งนี้ในช่วงนี้จะมีการสร้างอนุมูลอิสระ (radicals) ที่มีอายุสั้นและชาวโฟตอน (photons) สนามไฟฟ้า (electric fields) รังสี UV (UV radiation) และคลื่นกระแทก (shock waves) ร่วมด้วย

2. ปฏิกิริยาที่บริเวณรอยต่อระหว่างก๊าซกับของเหลว: อนุมูลอิสระที่มีอายุสั้นยาวกว่าจะเคลื่อนที่ไปยังพื้นผิวของของเหลวและทำปฏิกิริยากับสารประกอบทางเคมีที่ปรากฏอยู่ในของเหลว ก่อให้เกิดสปีชีส์ที่ว่องไวชนิดทุติยภูมิ (secondary reactive species) ละลายเข้าสู่ชั้นของเหลว

3.ปฏิกิริยาในของเหลว: อนุภาคอิสระที่สามารถละลายเข้าสู่ของเหลวได้ รวมถึงสปีชีส์ที่ว่องไวที่ยังแอกทีฟอยู่ จะยังคงทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับสารประกอบทางเคมีอื่น ๆ ที่มีอยู่ในของเหลว

โดยสรุป กลไกที่ได้อธิบายไว้นี้แสดงให้เห็นถึงกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่มีความซับซ้อน ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อพลาสมาในอากาศมีปฏิสัมพันธ์กับของเหลว เริ่มต้นจากการก่อกำเนิดสปีชีส์ที่ว่องไวในสถานะก๊าซ การถ่ายโอนไปยังของเหลว และขั้นตอนสุดท้ายคือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในของเหลวเอง [1], [4], [5], [7], [10] ซึ่งจะให้น้ำที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมามีคุณสมบัติที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 6 อนุภาคอิสระที่เกิดขึ้นระหว่างพลาสมาที่น้ำ (ดัดแปลงจาก [1])

โดยที่ EF = Electric field, M<sup>+</sup> = Ionized atom /Molecules และ UV = Ultraviolet

จากผลการทดลองที่ได้ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ บ่งชี้ถึงศักยภาพอันโดดเด่นของน้ำที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยพลาสมาในการส่งเสริมภาคการเกษตร โดยการปรับเปลี่ยนค่า pH, TDS, EC, และ ORP นอกจากนี้ การตรวจพบสารประกอบที่มีอายุยาวนาน เช่น ไนเตรต ไนไตรต์ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (ไม่ได้นำเสนอผลการทดลองในงานวิจัยนี้) ในน้ำที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยพลาสมาสามารถยืนยันศักยภาพของเทคโนโลยีนี้ในการเป็นเครื่องมือสำหรับการทำเกษตรกรรม ดังนั้น นวัตกรรมกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยพลาสมา จึงไม่เพียงแต่เป็นเทคโนโลยีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเท่านั้น หากแต่ยังเป็นก้าวสำคัญที่จะนำไปสู่การปฏิรูปแนวทางการเกษตรกรรมอย่างยั่งยืนในอนาคตของประเทศไทย

#### 4. สรุป

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาค้นคว้าพัฒนานวัตกรรมพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่สภาวะบรรยากาศแบบจนวนก้นเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำกระตุ้นพลาสมา (PAW) เพื่อผลิตน้ำที่อุดมด้วยสารประกอบไนโตรเจนสำหรับการเกษตร เครื่องผลิต PAW ที่พัฒนาขึ้นใช้ระบบ DBD แบบซ้อนแกนร่วม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตพลาสมาและลดการสะสมความร้อน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมาซ้ำหลายรอบทำให้คุณสมบัติของน้ำเปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้ค่า pH, TDS, EC และ ORP เปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่ดีขึ้น และเพิ่มความเข้มข้นของสารที่เป็นประโยชน์ในการเป็น

สารอาหารของพืชซึ่งได้แก่ ไนเตรต จากผลการศึกษาในครั้งนี้ซึ่งให้เห็นถึงศักยภาพของ PAW ในฐานะเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงการเกษตรที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] N. N. K. Kaushik *et al.*, “Biological and medical applications of plasma-activated media, water and solutions,” *Biol. Chem.*, vol. 400, no. 1, pp. 39–62, Dec. 2018, doi: 10.1515/hsz-2018-0226.
- [2] P. Attri, K. Koga, T. Okumura, N. Takeuchi, and M. Shiratani, “Green route for ammonium nitrate synthesis: fertilizer for plant growth enhancement,” *RSC Adv.*, vol. 11, no. 46, pp. 28521–28529, 2021, doi: 10.1039/d1ra04441a.
- [3] K. Matra, Y. Tanakaran, V. Luang-In, and S. Theepharaksapan, “Enhancement of Lettuce Growth by PAW Spray Gliding Arc Plasma Generator,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 50, no. 6, pp. 1430–1439, Jun. 2022, doi: 10.1109/TPS.2021.3105733.
- [4] S. Theepharaksapan, Y. Lerkmahalikhit, P. Suwannapech, P. Boonnong, M. Limawatchanakarn, and K. Matra, “Impact of multi-air plasma jets on nitrogen concentration variance in effluent of membrane bioreactor pilot-plant,” *Eng. Appl. Sci. Res.*, vol. 48, no. 6, pp. 732–739, 2021, doi: 10.14456/easr.2021.75.
- [5] K. Matra *et al.*, “Application of Electrical Breakdown in Liquid Process on Inulin Structural Transformations,” *IEEE Access*, vol. 11, no. June, pp. 114777–114789, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3321339.
- [6] K. Matra, “Atmospheric non-thermal argon-oxygen plasma for sunflower seedling growth improvement,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 57, no. 1, p. 01AG03, Jan. 2018, doi: 10.7567/JJAP.57.01AG03.
- [7] W. Samee *et al.*, “Electrical breakdown in liquid-phase processing on an enhancement of 7-hydroxymitragynine conversion from mitragynine in *Mitragyna speciosa* (Kratom),” *Heliyon*, vol. 10, no. 17, p. e36676, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e36676.
- [8] K. Matra, K. Narinram, S. Ploysap, P. Prakongsil, and J. Promping, “Microbial Reduction of Bitter Melon (*Momordica charantia* L.) and Chan Khao (*Tarenna hoensis* Pitard) Herb Powder by Dielectric Barrier Discharge Plasma for Food Sanitary,” *Eng. J.*, vol. 25, no. 10, pp. 87–94, 2021, doi: 10.4186/ej.2021.25.10.87.
- [9] T. A. Kurniawan, W. H. Lo, and G. Y. S. Chan, “Physico-chemical treatments for removal of recalcitrant contaminants from landfill leachate,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 129, no. 1–3, pp. 80–100, 2006, doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.08.010.

- [10] S. Theepharaksapan *et al.*, “The Potential of Plasma-Activated Water as a Liquid Nitrogen Fertilizer for Microalgae Cultivation,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, pp. 1–11, 2024, doi: 10.1109/TPS.2024.3362629.
- [11] W. Seelarat *et al.*, “Enhanced Fruiting Body Production and Bioactive Phytochemicals from White Cordyceps *militaris* by Blending Cordyceps *militaris* and Using Cold Plasma Jet,” *Plasma Chem. Plasma Process.*, vol. 43, no. 1, pp. 139–162, Jan. 2023, doi: 10.1007/s11090-022-10292-w.
- [12] P. Thana *et al.*, “A compact pulse-modulation cold air plasma jet for the inactivation of chronic wound bacteria: development and characterization,” *Heliyon*, vol. 5, no. 9, p. e02455, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e02455.