



## น้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา : วิธีผลิตและการนำไปใช้งานในภาคเกษตรกรรม

ทีมงาน ABPlas : แพล/เรียบเรียง

ธีรวรรณ บุญญวรรณ : ตรวจทาน

### บทคัดย่อ

น้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา (Plasma Activated water; PAW) เป็นเทคโนโลยีที่มีประโยชน์หลากหลาย เช่น มีประสิทธิภาพสูง, มีความยืดหยุ่น, เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และไม่มีสารตกค้าง เป็นต้น เทคนิคน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาที่มีการศึกษาวิจัยและได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการเกษตรเพื่อเพิ่มผลผลิตในภาคเกษตรกรรม ดังนั้นการประยุกต์เทคโนโลยีน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาในการเพิ่มผลผลิตด้านเกษตรกรรม จึงหันมาเน้นย้ำความเป็นระบบ, ความสามารถในการควบคุม, และความสามารถในการใช้งาน เพื่อให้เทคโนโลยีนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงได้

บทความนี้แสดงวิธีผลิต และปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา รวมไปถึงการพิจารณากลไกและการนำไปใช้ประโยชน์ในภาคเกษตรกรรม เช่น ผลต่อการงอกของเมล็ดพันธุ์, การส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช, การควบคุมโรคและแมลงในพืช อีกทั้งยังนำเสนอข้อสรุปของน้ำกระตุ้นพลาสมาที่มีต่อผลผลิตภาคเกษตรกรรม รวมถึงความท้าทายและโอกาสที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีนี้ในเชิงลึก

(ต่อไปจะแทนคำ “น้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา” ด้วย “น้ำพลาสมา” เพื่อความกระชับของบทความ)

### 1. บทนำ

เกษตรกรรมเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานของเศรษฐกิจประเทศ และด้วยปริมาณประชากรโลกที่เพิ่มขึ้นทำให้ความต้องการในด้านสินค้าทางการเกษตรเพิ่มขึ้นอย่างมาก ดังนั้นวิธีการในการเพิ่มผลผลิตของสินค้าทางการเกษตรเป็นปัญหาที่ต้องได้รับการแก้ไขโดยด่วนในอุตสาหกรรมการเกษตร โดยในปัจจุบันวิธีดั้งเดิมในการเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรคือ การใช้ปุ๋ยเคมีและสารเคมีกำจัดศัตรูพืชซึ่งจะทำลายระบบนิเวศทางการเกษตรส่งผลให้เป็นแหล่งกำเนิดมลพิษ อันมีผลกระทบร้ายแรงต่อการเจริญเติบโตและพัฒนาการของพืชผล ในการแก้ปัญหานี้นักวิชาการได้ทำการศึกษาค้นคว้าเทคโนโลยีใหม่ๆ และพบว่าการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีพลาสมาอุณหภูมิต่ำในภาคเกษตรกรรม มาเป็นที่สนใจและจับตามองเพิ่มมากขึ้น

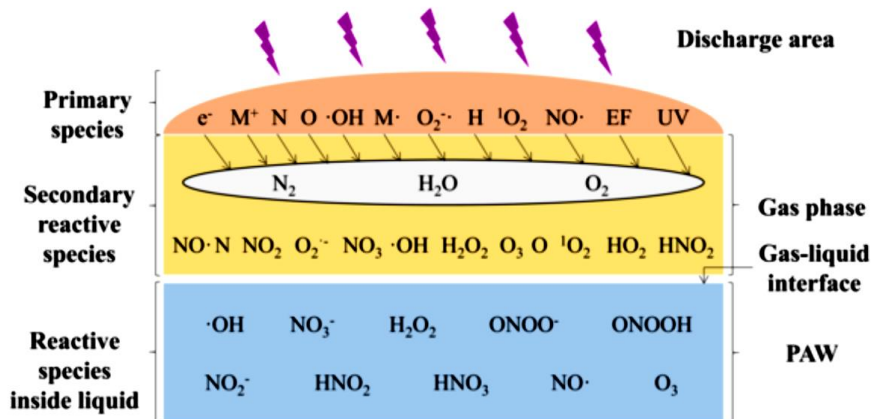


พลาสมาเป็นสถานะที่ 4 ของสสารโดยการรวมของประจุพลังงานสูง (อิเล็กตรอน, ไอออน, อะตอมและโมเลกุลในสถานะกระตุ้น, อนุภาคลิเธียม ฯลฯ) ทำปฏิกิริยาเช่นเดียวกับเคมีอินทรีย์ ประจุในพลาสมามีคุณสมบัติในการออกซิเดชันและลดปริมาณสารอินทรีย์ โดยที่ไม่เหลือสารตกค้างและปฏิกิริยาในสิ่งแวดล้อม ตั้งแต่ปี ค.ศ.1970 การใช้เทคโนโลยีพลาสมาความดันบรรยากาศในพัฒนาการเพาะเมล็ดพันธุ์, กระตุ้นการเจริญเติบโตของพืช, การทำให้ปลอดยาฆ่าแมลง, การยับยั้งไวรัส, การเก็บรักษาสินค้าทางการเกษตร, และการลดปริมาณยาฆ่าแมลงตกค้างได้ค่อยๆ เติบโตขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติ ความว่องไวปฏิกิริยา ประสิทธิภาพ และปลอดภัยของสารพิษ

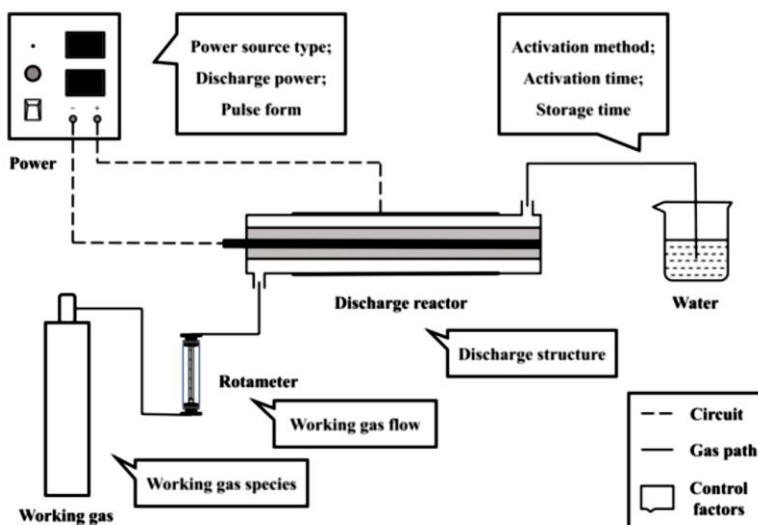
อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีพลาสมาอุณหภูมิต่ำ (ผลิตจากสถานะก๊าซ) ขาดความยืดหยุ่นในการประยุกต์ต่อพื้นผิวของพืชอย่างสม่ำเสมอ และกระบวนการที่ไม่เหมาะสมอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อพื้นผิวของพืชได้ ดังนั้นนักวิจัยจึงได้ทำการนำน้ำในรูปแบบต่างๆ มาใช้ในการผลิตเป็นน้ำพลาสมา เมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีพลาสมาแบบดั้งเดิม น้ำพลาสมามีความยืดหยุ่นและความปลอดภัย โดยยังสามารถรักษาสมบัติของพลาสมาและเอาชนะข้อจำกัดด้านอุปกรณ์ อีกทั้งยังประยุกต์บนพืชโดยตรง บทความนี้ได้สรุปการผลิตน้ำพลาสมา และปัจจัยที่มีอิทธิพลของเทคโนโลยี การใช้ประโยชน์ของเทคโนโลยีน้ำพลาสมาในภาคเกษตรกรรมได้ถูกวิเคราะห์ในด้านของการงอกของเมล็ดพันธุ์ การเจริญเติบโตของพืช การควบคุมโรคและศัตรูพืช และกลไกของน้ำพลาสมาประเภทต่างๆ โดยตอนท้ายได้สรุปความท้าทายและการพัฒนาการใช้ประโยชน์จากน้ำพลาสมาในภาคเกษตรกรรม

## 2. คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำพลาสมา

จากงานวิจัยของน้ำพลาสมาจำนวนมากได้ระบุว่าอนุมูลออกฤทธิ์ที่สำคัญของน้ำพลาสมา คือ Reactive oxygen species (ROS) และ Reactive nitrogen species (RNS) โดยที่ส่วนประกอบหลักของ ROS คือ อนุมูลไฮดรอกซิล ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ออกซิเจนอะตอมเดี่ยว ซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน และโอโซน เป็นต้น ในขณะที่ RNS มีส่วนประกอบหลักคือ ไนเตรต ไนไตรท์ เพอร์ออกซีไนไตรท์ อนุมูลไนตริกออกไซด์ และแอมโมเนียไนโตรเจน เป็นต้น จากองค์ประกอบทั้งหมดสารออกฤทธิ์ที่มีอายุยืนยาวคือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์, ไนเตรต, และไนไตรท์ ภาพที่ 1 แสดงแผนผังองค์ประกอบในการผลิตน้ำพลาสมา ซึ่งประกอบไปด้วยพื้นที่ในการดิสชาร์จ, เฟสก๊าซ, และอนุมูลออกฤทธิ์ที่ถูกผลิตขึ้นในของเหลว ยิ่งไปกว่านั้นคุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีของน้ำ เช่นการนำไฟฟ้า pH และศักยภาพในการเกิดออกซิเดชันรีดักชัน เป็นผลกระทบที่เกิดจากการเปิดใช้งานของพลาสมา กระบวนการในการผลิตน้ำพลาสมาแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งระบุปัจจัยควบคุมที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติในแต่ละกระบวนการผลิตน้ำพลาสมา โดยนักวิจัยจะเลือกปัจจัยควบคุม ได้แก่ รูปแบบของการดิสชาร์จ วิธีการกระตุ้นด้วยพลาสมา เวลาในการกระตุ้น ระยะเวลาในการจัดเก็บ และชนิดของก๊าซตั้งต้น



ภาพที่ 1 รูปแบบการเกิดองค์ประกอบอนุมูลของน้ำพลาสมา



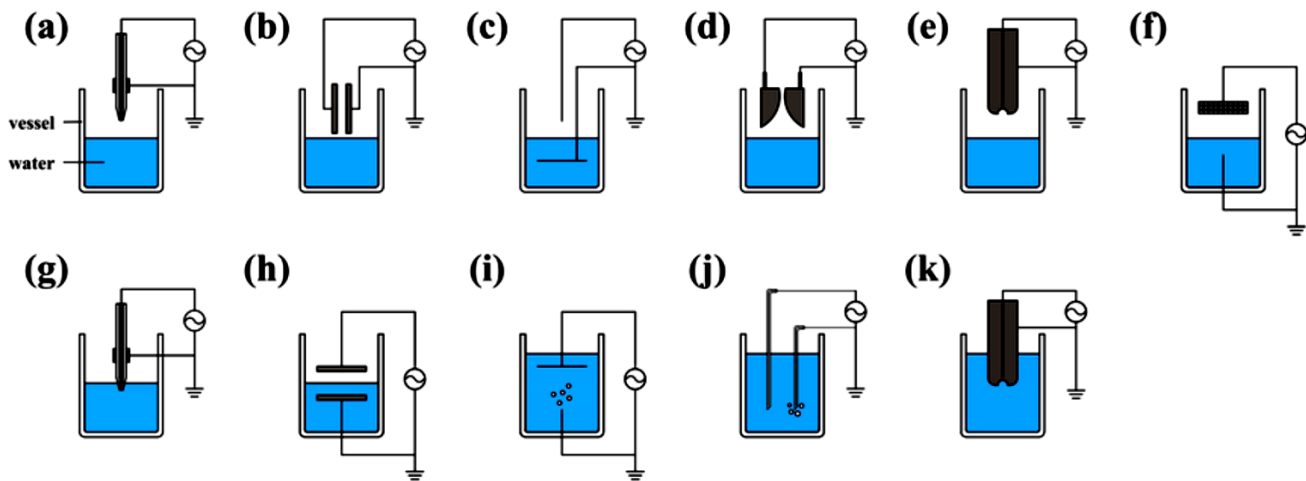
ภาพที่ 2 กระบวนการผลิตน้ำพลาสมาและปัจจัยในการควบคุม

## 2.1 รูปแบบของการดิสชาร์จ

รูปแบบหรือวิธีการดิสชาร์จเป็นปัจจัยที่สำคัญในการผลิตสถานะพลาสมา รูปแบบที่มักจะใช้ในการผลิตพลาสมา ได้แก่ Dielectric barrier discharge, Plasma jet, Glow discharge, Spark discharge, Corona discharge, Gliding และ Arc discharge เป็นต้น (แสดงในภาพที่ 3) น้ำพลาสมาที่ผลิตจากวิธี Spark discharge และ Microwave discharge มักจะประกอบไปด้วยอนุมูลที่ไนโตรเจนเป็นพื้นฐาน เช่น ไนเตรต และไนไตรท์ ในทางตรงกันข้ามน้ำพลาสมาที่ผลิตจากวิธี Glow discharge และ Dielectric barrier discharge ส่วนมากจะประกอบไปด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และไนเตรต ซึ่งเหตุผลสำคัญคือการเพิ่มขึ้นของอนุมูลไนโตรเจนไดออกไซด์ ซึ่งยังส่งผลให้ความเข้มข้นของไนเตรตสูงขึ้น Hoeben et al.

วิเคราะห์ความเข้มข้นของไนเตรต ไนไตรท์ และเพอร์ออกไซด์ในน้ำไร้ไอออนที่ถูกกระตุ้นด้วย Arc discharge กำลัง 150 W โดยผลที่ตามมาคือประสิทธิภาพในการเกิดไนไตรท์ ไนเตรต และเพอร์ออกไซด์ ซึ่งเท่ากับปริมาณอนุมูลต่อจุล 23 nmol  $NO_2^- gJ^{-1}$  9 nmol  $NO_3^- gJ^{-1}$  และ 2 nmol  $H_2O_2 gJ^{-1}$  ตามลำดับ นอกจากนี้โครงสร้างในการดิสชาร์จที่แตกต่างกันจะให้อนุมูลออกฤทธิ์ที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลให้คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีแตกต่างกัน น้ำพลาสมาผลิตจากวิธี Sliding arc discharge จะส่งผลให้น้ำพลาสมามีความเป็นกรด ในขณะที่ Spark discharge ทำให้น้ำมีค่า pH เป็นกลาง หรือเป็นด่างกว่า Darmanin et al. ผลิตน้ำพลาสมาที่แตกต่างกัน 2 ลักษณะ โดยดิสชาร์จพลาสมาบนผิวด้านแอโนด และด้านแคโทดของแผ่นทองแดง โดยที่ anodic oxidation PAW อุดมไปด้วยไนเตรต ซึ่งชี้ให้เห็นว่าปริมาณ Ionic conduction species ที่สูงกว่าน้ำพลาสมาแคโทดที่อุดมไปด้วยไนไตรท์

นอกจากนี้นักวิจัยยังได้ศึกษาโครงสร้างการผลิตน้ำพลาสมาที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของน้ำพลาสมาที่ดีกว่า Nedybaliuk et al. พัฒนาระบบพลาสมาดิสชาร์จน้ำที่ขึ้นกับการหมุน Sliding discharge ของอิเล็กโทรดเหลวเดี่ยว โดยแนวคิดนี้สามารถนำมาสร้างเครื่องผลิตน้ำพลาสมาคุณภาพสูง เมื่อเปรียบเทียบกับอิเล็กโทรดแบบหมุนชนิดอื่นๆ ของ Sliding discharge เนื่องจากการระเหยเล็กน้อยของอิเล็กโทรด Wu et al. เพิ่มความสามารถละลายตัวของ ROS และ RNS ในน้ำโดยการผนวกเทคโนโลยีพลาสมาและไมโครบับเบิลเข้าด้วยกัน ซึ่งสามารถเพิ่มความเข้มข้นของไนไตรท์ ไนเตรต และโอโซน สดสมในน้ำอย่างน้อยสองเท่าของน้ำพลาสมาทั่วไป



**ภาพที่ 3** รูปแบบของการดิสชาร์จพลาสมาสำหรับการกระตุ้นน้ำด้วยวิธีต่างๆ แบบเหนือน้ำ (a-f) แบบใต้น้ำ (g-k): (a) Plasma jet, (b) Dielectric barrier discharge, (c) Glow discharge, (d) R-Gliding arc discharge, (e) Spark discharge, (f) Gas-phase pulsed electrical discharge, (g) Plasma jet, (h) Dielectric barrier discharge, (i) Point-to-plate/mesh electrode discharge, (j) Bubble discharge, (k) Gliding arc discharge



## 2.2 การผลิตน้ำพลาสมา

น้ำพลาสมา จึงสามารถผลิตด้วยเทคนิคพลาสมากระตุ้นเหนือผิวน้ำ (PAW-A) และเทคนิคพลาสมากระตุ้นใต้ผิวน้ำ (PAW-B) คุณสมบัติของน้ำพลาสมาที่ผลิตขึ้นจากวิธีการกระตุ้นที่แตกต่างกันย่อมมีการตอบสนองต่างกันไป วิธีแรกเกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบน้ำเนื่องจากพลาสมากระตุ้นเหนือผิวน้ำ (PAW-A) เป็นการดิสชาร์จที่บริเวณรอยต่อพลาสมา ก๊าซ-น้ำ แต่เมื่อทำการดิสชาร์จต่ำกว่าผิวน้ำ (PAW-B) น้ำจะกลายเป็นส่วนหนึ่งของการตอบสนองการดิสชาร์จ ทำให้ปฏิกิริยามีความรุนแรงขึ้นและผลิตสารที่ออกฤทธิ์มากขึ้น

สำหรับพลาสมากระตุ้นเหนือผิวน้ำ สิ่งสำคัญในระบบน้ำพลาสมาแบบนี้คือการส่งถ่ายอนุภาคจากก๊าซไปที่น้ำมีข้อจำกัดอยู่ ซึ่งการหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดอาจใช้การผสมก๊าซและน้ำจะสามารถแก้ปัญหานี้ได้ โดยที่มินักวิจัยบางคนใช้ปั๊มรีดท่อ (Peristaltic pump) ในการเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างพลาสมา และน้ำ การส่งพลาสมาผ่านท่อไปยังกันของอ่างเก็บน้ำจะช่วยเพื่อเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างพลาสมาและน้ำ Sysolyatina et al. เสนอวิธีการใหม่ในการผลิตน้ำพลาสมา โดยการใช้ตัวผลิตพลาสมาแบบสองทางระหว่างอากาศขึ้น และ สเปรย์น้ำละเอียด Kovačević et al. ใช้การหมุนเมมเบรนกับ dielectric barrier discharge (DBD) ในการผลิตน้ำพลาสมา โดยมีหลักการคือ สารละลายไหลผ่านบริเวณที่เกิดการดิสชาร์จในสภาวะฟิล์มบางจากด้านบน, เพิ่มการสัมผัสระหว่างสารละลายกับพลาสมา ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการส่งถ่ายอนุภาค นอกจากนี้การปรับระยะของพลาสมาจากผิวน้ำยังสามารถควบคุมสัดส่วนการปรากฏอนุมูลออกซิเจนและไนโตรเจนในน้ำพลาสมาได้อีกด้วย

สำหรับพลาสมากระตุ้นใต้ผิวน้ำนั้น ย่อมจะมีปริมาณออกซิเจนในน้ำมากกว่าในอากาศ ดังนั้นพลาสมากระตุ้นใต้ผิวน้ำผลิต oxygen-containing group มากขึ้นในเมื่อเป็นการได้รับผลโดยตรงจากพลาสมาที่น้ำ ดังนั้นโอกาสในการเกิดอิเล็กตรอนอิสระและROS ใต้ผิวน้ำย่อมมีมากกว่า Liu et al. เปรียบเทียบส่วนประกอบของน้ำพลาสมาเมื่อน้ำถูกใช้เป็นตัวบวกลบและขั้วลบสลับกัน และรายงานว่าคุณสมบัติในการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของแคโทดน้ำดีกว่าแอโนดน้ำอย่างมากเมื่อเทียบกับปฏิกิริยาของน้ำพลาสมาที่ผ่านๆ มา ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะรวมตัวกับอนุมูลไฮดรอกซิลเมื่อใช้น้ำเป็นแคโทด อีกทั้งการสลายตัวของก๊าซไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่มีผลกระทบต่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เห็นได้ชัด แต่เมื่อใช้น้ำเป็นแอโนดจะมีปริมาณการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ต่ำเนื่องจากอนุมูลไฮดรอกซิลถูกทำให้หมดไปผ่านอิเล็กตรอนในน้ำ การทำให้เป็นด่างในพลาสมาส่งผลโดยตรงต่อบริเวณรอยต่อผิวน้ำ นอกจากนี้การใช้พลังงานในการกระตุ้นน้ำพลาสมาจะน้อยกว่าการผลิตพลาสมาจากก๊าซ



### 2.3 ระยะเวลาในการกระตุ้น

ระยะเวลาในการกระตุ้นคือเวลาที่ใช้พลาสมากระตุ้นน้ำ ในงานวิจัยทั่วไประยะเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นส่วนมากอยู่ที่ 5-30 นาที การเพิ่มระยะเวลาในการกระตุ้นจะส่งผลให้ปริมาณพลาสมาที่สัมผัสกับน้ำมากขึ้น ทำให้การผลิต RONS เพิ่มขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นระยะเวลาในการกระตุ้นจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของน้ำพลาสมา Laurita et al. พบว่ายิ่งระยะเวลาในการดิสชาร์จมาก ยิ่งส่งผลให้ความเข้มข้นของไนเตรท และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงขึ้น แต่เมื่อขยายระยะเวลาในการดิสชาร์จทำให้ไนไตรท์ในน้ำพลาสมาไม่เสถียร ในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด (pH < 3.5) และแสดงให้เห็นแนวโน้มในการลดลง Ma et al. รายงานว่าการนำไฟฟ้า, อุณหภูมิ, และศักย์ภาพการเกิดออกซิเดชัน รีดักชันของน้ำพลาสมาเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการกระตุ้นพลาสมาที่เพิ่มขึ้น แต่ค่า pH ของน้ำพลาสมาลดลงในช่วงกระตุ้น 10 นาทีแรก และมีค่าคงที่ที่ pH = 3 หลังจากกระตุ้นไป 20 นาที Kovačević et al. ได้ค้นพบว่าค่า pH ของน้ำพลาสมาประปาจะมีค่าคงที่ (pH 7.5) เนื่องจากเป็นธรรมชาติของ hydrocarbon buffer system การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเป็นน้ำพลาสมาประปา Park et al. เสนอผลการวิเคราะห์ของน้ำหลังจากการดิสชาร์จด้วยการย้ายอาร์ค ค่า pH เพิ่มขึ้นเมื่อทำการดิสชาร์จไป 30 วินาที และลดลงอย่างคงที่ตามระยะเวลาในการดิสชาร์จ

### 2.4 ระยะเวลาในการเก็บรักษา

เมื่อระยะเวลาผ่านไปคุณสมบัติของน้ำพลาสมาจะมีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเมื่อระยะเวลาในการจัดเก็บนานเท่าไรก็ยิ่งส่งผลกระทบต่อปริมาณ RONS ในน้ำพลาสมา Zhao et al. ใช้พลาสมาเจ็ทความดันบรรยากาศที่ 15 กิโลวัตต์เป็นระยะเวลา 5 นาทีในการผลิตน้ำพลาสมา ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลดลงจาก  $16.25 \mu\text{mol}\text{L}^{-1}$  เหลือ  $3.74 \mu\text{mol}\text{L}^{-1}$  หลังจากเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง สำหรับการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำปริมาณไนไตรต์ลดลงจาก  $17.28 \mu\text{mol}\text{L}^{-1}$  เป็น  $13.61 \mu\text{mol}\text{L}^{-1}$  เมื่อเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมงและเท่ากับ 11.08 เมื่อเก็บเป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง ส่วนศักย์ภาพการเกิดออกซิเดชัน รีดักชันของน้ำที่ถูกเก็บ พบว่า มีค่า  $553 \pm 5$  มิลลิโวลต์ ในวันที่ 4 แล้วเพิ่มขึ้นเป็น  $630 \pm 10$  มิลลิโวลต์ ในวันที่ 9 Andreec et al. เตรียมน้ำพลาสมาโดยใช้ electrode-microwave discharge plasma พบว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีปริมาณเท่ากับ  $3 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$  ซึ่งมีความเสถียรมากกว่า 7 วัน Vlad et al. ประเมินเวลาในการวิวัฒนาการของน้ำพลาสมา และพิสูจน์ว่าคุณสมบัติของน้ำพลาสมามีความเสถียรที่ระยะเวลามากกว่า 21 วัน ยิ่งไปกว่านั้น Kutasi et al. ระบุว่าคลื่นไมโครเวฟดิสชาร์จสามารถเปลี่ยนเส้นทางการรวมตัวกันของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และยืดระยะเวลาในการจัดเก็บอนุมูลไนไตรต์







ยิ่งไปกว่านั้นอัตราการไหลของ working gas ก็มีผลต่อคุณสมบัติพลาสมาเช่นกัน ซึ่งเมื่ออัตราการไหลของก๊าซต่ำ ก๊าซจะอยู่ในบริเวณพลาสมาดีสชาร์จนานขึ้น ทำให้ความหนาแน่นของพลาสมาสูง และเมื่ออัตราการไหลของก๊าซสูง ทำให้ในเวลาเดียวกันมีการผลิตพลาสมามากขึ้น โดย Uchida et al. สาธิตผลกระทบที่นำที่ของความเร็วของก๊าซในลักษณะการปล่อยไอพ่นน้ำ พื้นที่ในการกระตุ้นพลาสมาเหนือผิวหน้าสามารถเพิ่มด้วยการเพิ่มขึ้นของความเร็วก๊าซซึ่งส่งผลให้ปริมาณอนุภาคที่ถูกส่งไปยังน้ำเพิ่มขึ้น

### 3. การนำพลาสมาไปใช้ประโยชน์ในภาคการเกษตร

#### 3.1 ผลกระทบของพลาสมาต่อการงอกของเมล็ดพันธุ์

มีงานตีพิมพ์มากมายได้ทำการรายงานเกี่ยวกับการใช้น้ำพลาสมาเพื่อเพิ่มอัตราการงอกของเมล็ดอย่างละเอียด และได้ระบุว่าพลาสมากระตุ้นนั้นมีประสิทธิภาพในการกระตุ้นการงอกของเมล็ดอย่างมาก ซึ่งงานวิจัยทั้งหมดได้แสดงในตารางที่ 1 ยกตัวอย่างเช่น Naumova et al. ผลิตน้ำพลาสมาเพื่อรักษาเมล็ดข้าวไรย์ ซึ่งได้เผยว่าเมื่อนำพลาสมาไปกับเมล็ดข้าวไรย์เป็นระยะเวลา 5 นาทีสามารถเพิ่มอัตราการงอกของเมล็ด 50 เปอร์เซ็นต์ ต่อมา Kovačević et al. ใช้ spark discharge ในการผลิตน้ำพลาสมาดีไอ และน้ำพลาสมาประปา เพื่อใช้กับเมล็ดข้าวสาลี ซึ่งพบว่าอัตราการงอกของเมล็ดข้าวสาลีเพิ่มขึ้น 26 เปอร์เซ็นต์ และ 103 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ Judée et al. ได้เตรียมน้ำพลาสมาประปาในการบำบัดเมล็ดถั่วเลนทิล และจากผลลัพธ์แสดงให้เห็นอัตราการงอกที่มากที่สุดของเมล็ดถั่วเลนทิลเมื่อถูกรักษาด้วยน้ำพลาสมาประปาซึ่งมากถึง 99 เปอร์เซ็นต์

**ตารางที่ 1** ผลงานวิจัยด้านการกระตุ้นการงอกของเมล็ดพันธุ์ด้วยน้ำพลาสมา

Seed	Plasma devices	Voltage/ Power	Working gas	Activation time (min/ml)	Mode of activation	Storage time	Treatment time	Germination rate
Wheat	Spark discharge	6W	Air	0.5	a	-	Soak 3h	100%
Black gram	High voltage discharge	6W	O <sub>2</sub>	0.12	b	30 min	Soak 24h	Increased 10-15%
Lentil	DBD	12kV	Air	0.3	a	-	Soak 3h	99%
Mung bean	Plasma jet	30mA	N <sub>2</sub> , He, O <sub>2</sub> , Air	0.2	a	-	20 ml per day	90.33-97.33%





Seed	Plasma devices	Voltage/ Power	Working gas	Activation time (min/ml)	Mode of activation	Storage time	Treatment time	Germination rate
Soybean	DBD	80kV	Air	0.25	a	-	2ml per day	100%
Radish	DBD	40kV	Air	0.12	a	-	1 ml per day	Increased 60%
Rapeseed	Arc discharge	30W	Ar, O <sub>2</sub>	0.20	b	30 min	Soak 4 days	Increased 16-18%

a: Plasma activation of water above water surface.

b: Plasma activation of water below water surface.

Chiara et al. ได้พบว่าน้ำพลาสมาสามารถเพิ่มการงอกของเมล็ดถั่วเหลือง และอัตราการงอกสามารถมากถึง 100 เปอร์เซ็นต์ในวันที่สาม ยิ่งไปกว่านั้น Sajib et al. ได้ทำการสำรวจผลกระทบของน้ำพลาสมาต่อถั่วเขียวผิวดำ ซึ่งพบว่าอัตราการงอกของเมล็ดถั่วเขียวผิวดำเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญอยู่ที่ 10 เปอร์เซ็นต์ ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ Adreev et al. พบว่าน้ำพลาสมาสามารถปรับปรุงการทนทานต่อภัยแล้งของหัวไชเท้า และเมล็ดพันธุ์อื่นๆ และพัฒนาอัตราการงอกภายใต้สภาวะภัยแล้ง ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลลัพธ์ของ Loganathan et al. ซึ่งอัตราการงอกของเมล็ดหัวไชเท้าอยู่ที่ 100 เปอร์เซ็นต์

จากการทบทวนวรรณกรรม กลไกของน้ำพลาสมาต่อการเพิ่มการงอกของเมล็ดส่วนใหญ่เกี่ยวกับ 3 มุมมองดังต่อไปนี้ ประการแรกคือ ROS ที่เกิดขึ้นจากน้ำพลาสมานั้นมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เปลือกหุ้มเมล็ดแตกออกทำให้ตัวเคลือบเมล็ดบางลง ซึ่งเพิ่มการดูดซึมน้ำและสารอาหารของเมล็ดส่งผลให้เพิ่มอัตราการงอกของเมล็ด ดัชนีการงอก และดัชนีความแข็งแรงของเมล็ด ซึ่ง Chen et al. ได้ทำการรายงานว่ายูวีเอเอหรือออกไซด์ใน ROS ช่วยให้เมล็ดแข็งแรง ซึ่งทำให้เมล็ดสามารถดูดซึมน้ำความชื้นได้ ต่อมาประการที่สองคือ RNS ในน้ำพลาสมาสามารถใช้เป็นสารอาหารในการงอกเมล็ด ไนเตรตเป็นสารอาหารที่ถูกใช้โดยเมล็ด ซึ่งจะมีปริมาณลดลงด้วยเอนไซม์ไนเตรตรีดักเทสจนกลายเป็นไนไตรท์ และจากนั้นลดลงอีกด้วยเอนไซม์ไนไตรท์รีดักเทสจนกลายเป็นไอออนแอมโมเนีย สุดท้ายรวมเข้ากับกรดอะมิโน ประการสุดท้ายคือ ROS และ RNS โดยเฉพาะอย่างยิ่งไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ และไนเตรตในน้ำพลาสมาทำหน้าที่เป็นโมเลกุลสัญญาณในการกระตุ้นการงอกของเมล็ด รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของระดับของ Proteomic Transcriptomic และฮอร์โมน กรดแอบไซซิก (Abscisic acid; ABA) คือ ฮอร์โมนในพืชที่จะทำการยับยั้งการเจริญเติบโต และมีบทบาทสำคัญในการพักตัวของพืช อนุมูลของออกซิเจนและไนโตรเจนสามารถกระตุ้นกลไกการเรียงซ้อนของ Mitogen-activated protein kinases (MAPK) ซึ่งส่งผลต่อการแสดงออกของยีน PsMAPK2 และกระทบต่อระดับฮอร์โมนในพืชส่งผลให้ปริมาณของ ABA และกรดจัสโมนิก



(JA) ลดลงทำให้การงอกของเมล็ดเพิ่มขึ้น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถทำให้การขนส่ง ABA เสียหายก่อให้เกิดการลดลงของ ABA ทั้งทางตรงและทางอ้อมบนตัวอ่อนพืช สำหรับ Protein carbonylation ที่เป็นตัวดัชนีชี้วัดทางชีวภาพที่มีประโยชน์ต่อภาวะ Oxidative stress และลดการพักตัวของเมล็ด ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อให้เกิดปฏิกิริยา Carbonylation ของการจับกับโปรตีนของเมล็ด และกระตุ้นการงอกของเมล็ด นอกจากนี้เอนไซม์ไกลโคไลติกกระตุ้น Pentose phosphate pathway (PPP) ในระหว่างการจับกับ Protein carbonylation โดยที่การกระตุ้น PPP สามารถให้ NADPH กับระบบ Thioredoxin ที่ส่งเสริมการงอกของเมล็ด ยกตัวอย่างเช่น ไนตริกออกไซด์สามารถกระจายผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ซึ่งมีส่วนร่วมในกระบวนการสลาย ABA และกระบวนการสังเคราะห์สารชีวโมเลกุล GA ส่งผลให้เพิ่มการงอกของเมล็ด แต่ในทางกลับกันไอออน  $H^+$  เป็นภัยต่อการงอกของเมล็ด

### 3.2 น้ำพลาสมาในการเพิ่มการเจริญเติบโตของพืช

น้ำพลาสมายังสามารถเพิ่มการเจริญเติบโตของพืชได้ โดยที่งานวิจัยทั้งหมดแสดงในตารางที่ 2 Maniruzzaman et al. ใช้อากาศเป็น Working gas ในการผลิตน้ำพลาสมา และใช้รักษาเมล็ดข้าวสาลีซึ่งเพาะปลูกในกระถางเป็นเวลา 28 วัน โดยที่ Biomass ของเมล็ดเท่ากับ 87 เปอร์เซ็นต์สูงกว่ากลุ่มควบคุม นอกจากนี้ น้ำพลาสมายังสามารถเพิ่มการเจริญเติบโตของพืชผักและผลไม้ lwata et al. รักษาตาหัวไชเท้าด้วยน้ำพลาสมา ซึ่งสามารถเพิ่มความยาวขึ้นเป็นสองเท่า Takahata et al. ได้รายงานว่าความสูงของหัวไชเท้าเพิ่มขึ้น 53 เปอร์เซ็นต์ เมื่อรักษาด้วยน้ำพลาสมา Takaki et al. เตรียมน้ำพลาสมาในการพัฒนาการเจริญเติบโตของกะหล่ำปลี ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าน้ำหนักของกะหล่ำปลีแห่งที่ถูกรักษาด้วย PAW-10 (น้ำพลาสมาที่ถูกกระตุ้นเป็นเวลา 10 นาที) และ PAW-20 (พลาสมาน้ำที่ถูกกระตุ้นเป็นเวลา 20 นาที) สามารถเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.044 กรัมและ 0.076 กรัมตามลำดับ หรือเท่ากับ 3.9 เท่าและ 6.6 เท่าของกลุ่มควบคุม Lindsay et al. ใช้ Coaxial glow discharge ภายใต้ความดันบรรยากาศในการเตรียมน้ำพลาสมาสำหรับลำงอกดาวเรือง, มะเขือเทศ, มันฝรั่ง, และแครอท โดยผลที่ได้คือน้ำหนักเพิ่มขึ้น 1.7 ถึง 2.2 เท่า ยิ่งไปกว่านั้น Zhang et al. พบว่าน้ำพลาสมาสามารถเพิ่มอัตราการงอกของถั่วเลนทิลได้อย่างมีนัยสำคัญ และเพิ่มการเจริญเติบโตลำต้นของถั่วเลนทิลได้ดีกว่าการใช้ปุ๋ยเคมี


**ตารางที่ 2** ผลงานวิจัยด้านการกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืชด้วยน้ำพลาสมา

Plant	Plasma devices	Voltage/ Power	Working gas	Activation time (min/ml)	Mode of activation	Storage time	Treatment mode	Results
Wheat	Spark discharge	6W	Air	0.5	a	-	Cultivated for 28 days	The average length increased 6-7%
	Point-to-plate/ Mesh electrode discharge	18kV	Ar, Air	0.04	b	-	2.5ml PAW per day	The biomass of shoot increased 17-33%
Black gram	High voltage discharge	6W	O <sub>2</sub>	0.24	b	30min	Cultivated for 7 days	The dry weights of roots treated with PAW-12 provide the highest one of 7.10 mg
Lentil	DBD	12kV	Air	0.3	a	-	100ml PAW per day	The length increased 28%
Mung bean	Plasma jet	30mA	N <sub>2</sub> , He, O <sub>2</sub> , Air	0.2	a	-	20ml PAW per day	Total plant length increased 0.92-5.96cm (Control 6.05cm)
Soybean	DBD	80kV	Air	0.05	a	-	5ml PAW per day	The length increased 75%
Radish	DBD	40kV	Air	0.12	a	-	5ml PAW per day	The length increased 45%
	Atmospheric glow discharge	420W	Air	≈0.04	a	2 days	Cultivated for 2 weeks	Shoot masses increased 1.7-2.2 times
	DBD	93W	Air	0.06	b	-	Cultivated for 28 days	Dry weight increased 4.0 times
	DBD	3.54-9.64W	Ar, N <sub>2</sub> , He, O <sub>2</sub> , Air	0.1	a	1h	Cultivated for 3 days	The maximum of normalized length increased 1.04-1.62 times
	DBD	3.54-9.64W	Ar, N <sub>2</sub> , He, O <sub>2</sub>	0.1	a	1 days	Cultivated for 3 days	The maximum of normalized length



Plant	Plasma devices	Voltage/ Power	Working gas	Activation time (min/ml)	Mode of activation	Storage time	Treatment mode	Results
			Air					increased 1.08-1.52 times
Arabidopsis thaliana	Plasma jet	10kV	He	0.5	b	-	10-30ml PAW per week	Diameter of the rosette increased 1cm
Rapeseed	Arc discharge	30W	O <sub>2</sub> , Ar	0.2	b	30min	Cultivated for 4 days	Shoot height increased 2-2.1cm
Chinese cabbage	DBD	30kV	Air	0.04-0.08	b	-	Cultivated for 28 days	Dry weight increased 0.044-0.076g
Marigold	Atmospheric glow discharge	420W	Air	≈0.04	a	2 days	Cultivated for 2 weeks	Shoot masses 1.7–2.2 times larger than controls
Tomato	Atmospheric glow discharge	420W	Air	≈0.04	a	2 days	Cultivated for 2 weeks	Shoot masses 1.7–2.2 times larger than controls
Spinach	DBD	93W	Air	0.12	b	-	Cultivated for 28 days	Dry weight corresponds to 5.8 times that of the control group.
Strawberry	DBD	93W	Air	0.12	b	-	Cultivated for 63 days	Dry weight corresponds to 1.6 times that of the control group.

a: Plasma activation of water above water surface

b: Plasma activation of water below water surface

กลไกในการเพิ่มการเจริญเติบโตพืชของน้ำพลาสมานั้นเกิดขึ้นการการทำงานร่วมกันของปัจจัยหลายๆ อย่าง โดยประการแรกคือ ไนเตรตเป็นสิ่งสำคัญในการผลิตไนโตรเจนที่เหมาะสมในดิน ดังนั้นไนเตรตในน้ำพลาสมาเป็นธาตุหลักในการเร่งการเจริญเติบโตของพืช เมื่อไนเตรต-ไนโตรเจนได้เข้าไปในเซลล์ของพืชจะสามารถลดขั้นตอนในแต่ละขั้นตอนโดย Nitrate reductase และ Nitrite reductase จนกระทั่งผลิตไอออนแอมโมเนียที่ป้อนกรดอะมิโนในการผลิตสารอาหารสำหรับเพิ่มการเจริญเติบโตของพืช นอกจากนี้การใช้ไอออนไบคาร์บอเนตระหว่างกระบวนการกระตุ้นพลาสมานั้นสามารถช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตของพืชได้ ปัจจัยถัดมาคือ ROS โดยเฉพาะไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีหน้าที่เป็นโมเลกุลสัญญาณที่



สำคัญมากในการเพิ่มกลไกความทนทานของพืช ลดความเสียหายการออกซิเดชันของพืช และรักษาสรีรวิทยาและกิจกรรมในการเผาผลาญพื้นฐานของพืช โดย Iseri et al. พบว่าการใช้ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้นต่ำจากแหล่งภายนอกสามารถเพิ่ม Ascorbate peroxidase (APX) activity และการสะสมโพรลีนในต้นกล้ามะเขือเทศซึ่งสามารถช่วยรักษาการควบคุมระบบออสโมติกและความเสถียรของเยื่อ เพิ่มสถานะของสารต้านอนุมูลอิสระของมะเขือเทศ และเพิ่ม Oxidative stress ได้อย่างมีนัยสำคัญ ปฏิบัติการตอบสนองดังกล่าวทำให้ต้นอ่อนมะเขือเทศโตได้ดีกว่าภายใต้ความดันอากาศเย็น APX คือ ระบบป้องกันของพืชที่ไม่ใช่เอนไซม์ซึ่งสามารถตอบสนองต่อออกซิเจนที่ใช้งานในเซลล์ของพืชเพื่อกระตุ้น Oxidative defense Malonaldehyde (MDA) ผลผลิตของเมมเบรนเพอร์ออกซิเดชัน และเป็นตัวบ่งชี้ของลิพิดเพอร์ออกซิเดชันและความเสียหายของเมมเบรนโดยตรง Sayed et al. ได้รายงานว่าการบำบัดโดยใช้ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์สามารถลดปริมาณไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์และปริมาณ MDA ในต้นอ่อนผ่านการสะสมโพรลีน และกรดแอสคอบิกที่ช่วยลดผลเสียของแคดเมียมต่อการเจริญเติบโตของถั่วได้ ส่วนปัจจัยประการสุดท้ายอนุมูลออกซิเจนและอนุมูลไนโตรเจนสามารถเพิ่มการเจริญเติบโตของพืชได้โดยส่งผลกระทบต่อระดับฮอร์โมนของพืช และการแสดงออกของยีน เช่น กรดอินโดลแอซิดิก (Indole acetic acid; IAA) และ ABA การเพิ่มความยาวเซลล์ของพืชเป็นหน้าที่ทางสรีรวิทยาขั้นต้นของ IAA ปริมาณของ IAA ในถั่วเขียวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญหลังจากรักษาด้วยพลาสมา ABA เป็นฮอร์โมนที่ยับยั้งการเจริญเติบโตของพืช และยังยับยั้งการแบ่งเซลล์และการยืดของเซลล์ จากการอธิบายข้างต้น RONS กระตุ้นการแสดงออกของยีนบางชนิดผ่าน MAPK cascade และลดปริมาณ ABA ซึ่งทำให้เพิ่มการเจริญเติบโตของพืช ยิ่งไปกว่านั้นไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เป็นตัวสำคัญในการเร่งการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งเมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ต่ำกว่า 0.07 เปอร์เซ็นต์ การบำบัดจะเป็นประโยชน์มากต่อการเจริญเติบโตของพืช และเมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็น 0.1 เปอร์เซ็นต์ และ 0.3 เปอร์เซ็นต์จะส่งผลให้การเจริญเติบโตของพืชถูกยับยั้ง ซึ่งจะสามารถสรุปได้สั้นๆว่าไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์สามารถเพิ่มการเจริญเติบโตของพืชได้โดยการยับยั้งการเติบโตของใบที่ไม่มีการพัฒนา, ลดการหลุดของตา และเพิ่มการแสดงออกที่เกี่ยวข้องกับยีนของดอกไม้

### 3.3 การใช้น้ำพลาสมาควบคุมโรคและศัตรูพืช

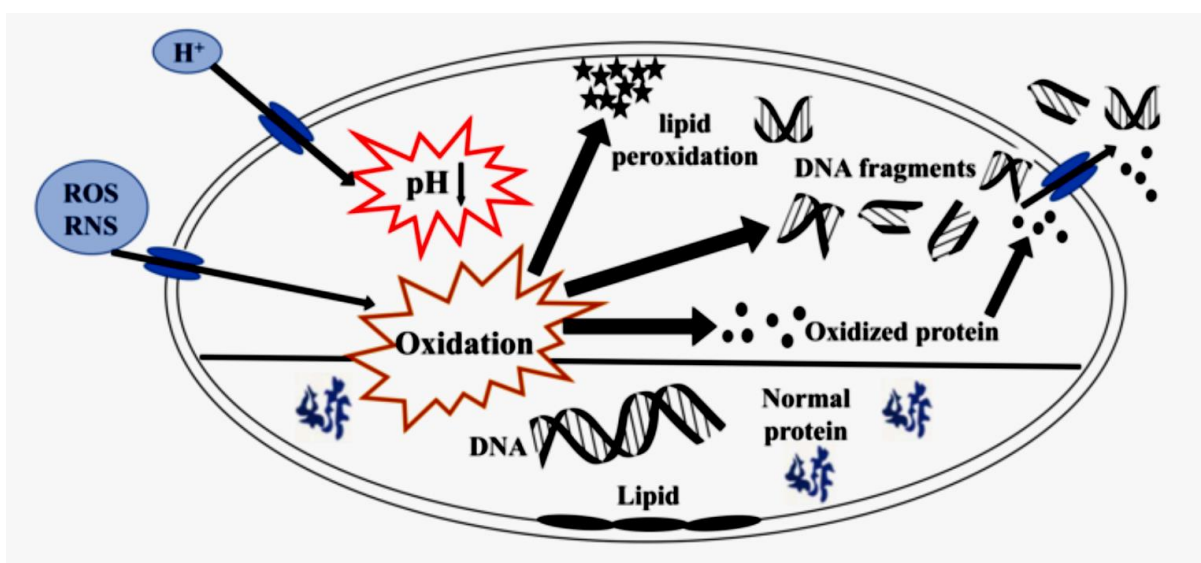
งานวิจัยสำหรับการใช้น้ำพลาสมาในการควบคุมโรค และศัตรูพืชมีปริมาณน้อยลงเรื่อยๆ และกระจุกกระจายในชั้นการทดลอง Guo et al. รักษาถั่วด้วยน้ำพลาสมาซึ่งเตรียมโดยใช้ Jet corona discharge เป็นระยะเวลา 60 นาทีต่อน้ำกลั่นที่ผ่านการฆ่าเชื้อ โดยพบว่าน้ำพลาสมาสามารถลดปริมาณยีสต์บนผิวเมล็ด  $0.51 \pm 0.11 \log \text{CFU} \cdot \text{ml}^{-1}$  ในขณะเดียวกันน้ำพลาสมาสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตไมซีเลียของ *Fusarium graminearum* ได้อย่างสมบูรณ์เมื่อรักษาเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมงถึง 36 ชั่วโมง โดยการลดอัตราการงอกของโคนิเดียมซึ่งสามารถใช้ในการควบคุมโรค Wheat scab ส่วน Sun et al. รักษาพืชด้วยน้ำพลาสมาเป็นระยะเวลา 6 นาที ซึ่งสามารถอัตราการทำลาย *Bacillus subtilize* ได้



97 เบอร์เซ็นต์ Bertaccini et al. รายงานว่าน้ำพลาสมาสามารถใช้เป็นตัวเพิ่มความต้านทานของพืชในการกระตุ้นให้มะเขือเทศป้องกัน *Xanthomonas vesicatoria* (Xv) และกระตุ้นองุ่นให้ป้องกัน Phytoplasma และด้วยหลักการเดียวกันนี้ Perez et al. ได้ศึกษาต่อในเรื่องของความสามารถในการป้องกันของน้ำพลาสมาต่อโรคใบจุด (Left spot disease) ในต้นมะเขือเทศ ซึ่งได้รายงานว่าความรุนแรงของโรคลดลงเมื่อใช้น้ำพลาสมาเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง ก่อนเชื้อก่อโรค โดยสามารถป้องกันโรคที่ 61 เบอร์เซ็นต์ และ 51 เบอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าการลอรหัสพันธุกรรม (Gene transcription) ของเอนไซม์ Phenylalanine ammonia lyase (PAL) ในมะเขือเทศด้วยน้ำพลาสมา และตามด้วยการฉีดเชื้อ Xv มีประสิทธิภาพดีกว่าการฉีดแค่เชื้อก่อโรคอย่างมีนัยสำคัญ จากผลที่ตามมาเหล่านี้แสดงให้เห็นว่า PAL เป็นองค์ประกอบหลักในปฏิกิริยาการปรับสภาพด้วยน้ำพลาสมา Adhikari et al. แสดงให้เห็นว่าการล้างเมล็ดมะเขือเทศด้วยน้ำพลาสมาช่วยให้การเจริญเติบโตในด้านสัณฐานวิทยาดีขึ้น (เปรียบเทียบความยาวลำต้นและราก) และยังคงการแสดงออกของยีน นอกจากนี้ Sroykaew et al. เปรียบเทียบประสิทธิภาพต่อโรคในใบอ้อยของน้ำพลาสมาที่ผลิตด้วย Line to line discharge และ Plasma jet discharge พบว่า Line to line discharge สามารถลดการเกิดโรคที่ 50 เบอร์เซ็นต์ และ Plasma jet discharge สามารถลดการเกิดโรคที่ 40 เบอร์เซ็นต์ ส่วนในเรื่องของการควบคุมศัตรูพืชนั้น Sun et al. ได้ทำการคิดค้นปุ๋ยน้ำที่มีน้ำพลาสมาเป็นส่วนประกอบ 60 เบอร์เซ็นต์ พบว่าสามารถลดแมลงศัตรูพืชในองุ่นได้

การควบคุมโรคพืช และแมลงศัตรูพืชด้วยน้ำพลาสมาสะท้อนให้เห็นใน 2 ด้าน ซึ่งในทางกลับกันน้ำพลาสมาสามารถป้องกันพืชจากศัตรูพืช และโรคพืชโดยการฆ่าเชื้อแบคทีเรียก่อโรคบนผิวของพืช ในน้ำพลาสมา ภาพที่ 5 แสดงกระบวนการฆ่าเชื้อแบคทีเรียก่อโรคโดยน้ำพลาสมา ซึ่งประกอบไปด้วย RON และ ROS ที่สามารถเข้าไปในเซลล์ของแบคทีเรียผ่านรูขนาดใหญ่ที่อยู่ในเยื่อหุ้มเซลล์แบบใช้พลังงาน (Active transport cell membrane) RNS และ ROS ในเซลล์จะเข้าไปออกซิไดซ์ DNA โปรตีน และไขมัน โดยไปทำลายสาย DNA ทำลายโปรตีน และกระตุ้นกระบวนการลิพิดเปอร์ออกซิเดชัน ทำให้สิ่งที่อยู่ภายในเซลล์แบคทีเรียไหลออกมาและตายลงในที่สุด ซึ่งจากองค์ประกอบทั้งหมดในน้ำพลาสมาคือไอออน และสารต้านอนุมูลอิสระ Peroxynitrite มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคเหนือตัวอื่น ยิ่งไปกว่านั้นนักวิจัยมากมายได้ตั้งข้อสงสัยว่าความเป็นกรด และสารออกฤทธิ์ (Active substance) ในน้ำพลาสมามีความสัมพันธ์กัน โดยยิ่งค่า pH น้อยแบคทีเรียจะตายกว่า ในมุมที่หนึ่งนี้การลดการต้านสภาพแวดล้อมความเป็นกรดของแบคทีเรียเกิดจากไอออนของไฮโดรเจน ส่วน ROS และ RNS จะทำปฏิกิริยาต่อไขมันและคาร์โบไฮเดรตในเซลล์โปรตีนของ DNA ค่า pH ในเซลล์ลดลง และทำให้เกิดความผิดปกติด้านสรีรวิทยาและเซลล์ตาย นอกจากนี้ น้ำพลาสมาสามารถนำมาใช้เป็นตัวกระตุ้นความต้านทานสำหรับพืช เพื่อช่วยกระตุ้นให้พืชป้องกันศัตรูพืชและโรคพืช ทั้งไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และไนตริกออกไซด์ในน้ำพลาสมานั้นกระตุ้นการแสดงออกของโปรตีน Pathogenesis-related (PR) กิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ กรดซาลิไซลิก และ JA pathway enzymes ผ่าน MAPK signaling pathways ซึ่งการโปรตีนป้องกัน และฮอร์โมนพืชเหล่านี้เสริมความแข็งแรงในพืช ต่อการป้องกันเชื้อก่อโรคพืช





ภาพที่ 5 กลไกการฆ่าเชื้อแบคทีเรียก่อโรคด้วยน้ำพลาสมา

#### 4. สรุปและภาพรวมในอนาคต

คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ที่โดดเด่น และกิจกรรมทางชีวเคมีที่ไม่เหมือนใครของน้ำพลาสมา ทำให้น้ำพลาสมาได้รับความสนใจอย่างมากในด้านวิชาการและการเกษตร ซึ่งในบทความฉบับนี้ได้สรุปการผลิตน้ำพลาสมา และอธิบายการนำน้ำพลาสมาไปประยุกต์ใช้ใน 3 ด้านคือ การเพิ่มประสิทธิภาพในการงอกของเมล็ดพืช ผลต่อการเจริญเติบโตของพืช และการป้องกันโรคพืชและแมลงศัตรูพืช ปัจจุบันการนำน้ำพลาสมาไปประยุกต์ใช้ในด้านของเกษตรกรรมยังพบกัอุปสรรคมาก ได้แก่ 1) คุณสมบัติของน้ำพลาสมาในงานวิจัยยังไม่เพียงพอ โดยยังขาดในด้านการวิเคราะห์ทางปริมาณ และการศึกษาผลกระทบชั่วคราว 2) กลไกส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับปริมาณของสารแอกทีฟ (Active species) ที่มีอายุยาว เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไนไตรท์ และไนเตรต ซึ่งยังขาดการศึกษาผลกระทบของสารแอกทีฟ อื่นๆ และ 3) แนวทางของงานวิจัยที่มีค่อนข้างไปในทิศทางเดียว ซึ่งส่วนใหญ่ทำการศึกษาการงอกของพืช และระยะการเจริญเติบโตของพืช ในขณะที่การศึกษาการควบคุมโรคพืชและศัตรูพืชยังมีน้อย

ดังนั้นแนวทางในการวิจัยหลักในอนาคตควรมุ่งเน้นไปในด้านต่างๆ ดังนี้

1. เจาะลึกในการผลิตน้ำพลาสมาควรปรับให้เหมาะสมที่สุดเพื่อที่จะควบคุมน้ำพลาสมาได้มากขึ้น โดยรวมไปถึงการพัฒนาอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับผลิตน้ำพลาสมา และการค้นหาแนวทางในการควบคุมคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของน้ำพลาสมา ยกตัวอย่างเช่น การเติมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนของพลาสมาเป็นเพิ่มความเข้มข้นของ Plasma jet อีกทั้งองค์ประกอบทางเคมีของน้ำพลาสมามีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ดังนั้นควรศึกษาผลของเวลาต่อการใช้งานในการผลิตน้ำพลาสมาจริง



2. ของเหลวต่างๆ เช่นสารละลาย Phosphate buffered saline (PBS) ของเหลวไอออนิก และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ถูกกระตุ้นโดยพลาสมา เพื่อให้ได้น้ำพลาสมาที่มีคุณสมบัติคงที่ ปฏิกริยารุนแรง และมีประสิทธิภาพมากขึ้น และที่ขาดไม่ได้เลยคือการศึกษาคุณสมบัติของตัวกลาง และของเหลวที่แตกต่างกัน เพื่อเลือกประเภทของของเหลวที่เหมาะสมต่อเป้าหมาย และผลกระทบที่ต้องการในการนำไปประยุกต์ใช้จริง

3. ในปัจจุบันการศึกษการควบคุมโรคพืช และแมลงศัตรูพืชด้วยน้ำพลาสมายังมีประปรายและกระจัดกระจายในระหว่างการทดลอง อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้ในด้านนี้ก็มีความสำคัญสำหรับอุตสาหกรรมทางการเกษตร ดังนั้นควรให้ความสำคัญในเรื่องกลไกของน้ำพลาสมาต่อการควบคุมโรคพืช และแมลงศัตรูพืช และแสดงผลร่วมกับการประยุกต์ใช้ในอีกสองด้านก่อนหน้า ซึ่งมีความสำคัญทางวิทยาศาสตร์ และการประยุกต์ใช้ที่สำคัญในสาขาการเกษตรในการหาเงื่อนไข หรือระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุด

### เอกสารอ้างอิง

- Dingmeng Guo, Hongxia Liu, Lei Zhou, Jinzhuo Xie and Chi He *Plasma-activated water production and its application in agriculture* J Sci Food Agric 2021 DOI 10.1002/jsfa.11258