ทัศนมิติแห่งการประยุกต์พลาสมาจากการปล่อยประจุไฟฟ้าในก๊าซและของเหลวเพื่อการเกษตร: ตอนที่ 1 การเสริมสมรรถนะผลิตผลในวัฏจักรชีวิตพืช

A perspective on the gas and liquid electrical discharge of plasma for agriculture applications: Part I. Enhancement of yield in plant lifecycle

ชาญชัย เดชธรรมรงค์ *
ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
128 ถนนห้วยแก้ว ต.ช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300
Chanchai Dechthummarong *
High Voltage Engineering Laboratory
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna
128 Huay Kaew Road, Muang, Chiang Mai, Thailand, 50300
*ผู้นิพนธ์ประสานงาน: chancmth@rmutl.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 0-5392-1444 ต่อ 2044

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทบทวนกรณีศึกษาเทคโนโลยีการประยุกต์พลาสมากับงานวิจัยด้านวัฏจักรชีวิตพืช รวมถึงผลเบื้องต้นของสิ่งประดิษฐ์เครื่องต้นแบบที่มีศักยภาพสำหรับกำเนิดพลาสมาในก๊าซและของเหลวด้วยไฟฟ้าแรงดันสูงซึ่งถูกสร้างขึ้นใช้เองในประเทศ เพื่อนำไปประยุกต์กับงานวิจัยด้านการเกษตรของไทย โดยเฉพาะการเสริมสมรรถนะผลิตผลในวัฏจักรชีวิตพืช ซึ่งเป็นสหวิทยาการใหม่และเป็นโจทย์ที่น่าท้าทายในระดับห้องปฏิบัติการวิจัยเพื่อนำไปสู่กระบวนการผลิตเชิงอุตสาหกรรม ในอดีตพลาสมามักถูกนำไปใช้กับงานยับยั้งหรือฆ่าจุลชีพขนาดเล็กในก๊าซหรือในน้ำ แต่อีกมุมมองหนึ่งในปัจจุบันและแนวโน้มการวิจัยในอนาคตจะมีการนำเทคโนโลยีพลาสมาไปเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรโดยเฉพาะในพืชอย่างครบวงจร เริ่มตั้งแต่การปรับสภาพเมล็ดพืชให้งอกได้ดี ปลอดจากเชื้อต่างๆ และมีคุณค่าทางโภชนาการเพิ่มขึ้น ในกรณีของการเจริญเติบโตเป็นลำต้นของพืช พลาสมาไม่เพียงแต่สามารถยับยั้งเชื้อโรคขนาดเล็กที่อยู่ในดิน น้ำ และอากาศ ยังสามารถเพิ่มธาตุอาหารบางชนิดที่จำเป็นให้กับพืชเพื่อใช้ในการเพาะปลูกได้อีกด้วย หลังการเก็บเกี่ยวพืชพลาสมายังถูกนำมาใช้ในการคงรักษาสภาพความสดขั้นต้นของผักและผลไม้ พลาสมาจึงน่าจะเป็นที่มีบทบาทและศักยภาพในการช่วยลดต้นทุนด้านการใช้สารเคมีในวัฏจักรชีวิตพืช การเก็บรักษาและการขนส่งสินค้าทางการเกษตรในอนาคต

คำสำคัญ การประยุกต์พลาสมา พลาสมาความดันบรรยากาศ การปรับสภาพทางเคมีด้วยพลาสมา การปล่อยประจุไฟฟ้าพลาสมาในก๊าซ การปล่อยประจุไฟฟ้าพลาสมาใต้น้ำ การเพาะปลูกพืช การเกษตร เทคนิคไฟฟ้าแรงดันสูง

Abstract

The objective of this paper is the recent literature review of increasing agricultural productivity of the whole plant lifecycle by using the non-thermal atmospheric pressure plasma (NTAPP) technology. Moreover, this paper also presents all of current NTAPPs in gas and liquid that are inventing at High Voltage Engineering Laboratory, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai, Thailand. Our NTAPPs are potential

approaches designed to keep moving forward for applying in advanced research of agriculture works in the future. Accordingly, the NTAPPs' approaches are presented here, along with the preliminary results. In the past plasma gas or liquid discharge from high voltage for agricultural applications usually used to inactivate or kill microorganisms and pathogens in the water or gas. However, another outlook on future research activities in novel developments for increasing agricultural productivity of the whole plant lifecycle by using the non-thermal atmospheric pressure plasma (NTAPP) technology will trend to potentially fulfill the need of industrial agriculture. The recent literature review during the past half-decade of research investigations shown that NTAPP offered the interest of enhancing the nutrition characteristics of seeds, increasing seed germination rate. Furthermore, NTAPP can apply for increasing plant growth rate and nutritional yield and subsequently agriculture produce quality. NTAPP not only can inactivate microorganisms on the surfaces or in the water but also can fix some nutrients necessary for plants to grow in the soil and water. After the harvest, the NTAPP has been used to maintain the freshness of the vegetables and fruits that has the benefit to reduce costs of storage and transportation.

Keywords: plasma applications, atmospheric pressure plasmas, chemical plasma treatment, gas discharge plasma, underwater electrical discharge plasma, plant cultivation, agriculture, high voltage techniques.

1. บทนำ

ในยุคศตวรรษที่ 21 ผู้บริโภคเลือกให้ความสนใจเกี่ยวกับความปลอดภัยจากการใช้สารเคมีตกค้างในพืชเพิ่มมากขึ้น เน้นคุณค่าโภชนาการของอาหารที่มาจากพืชและปราศจากเชื้อโรค [1] ในขณะเดียวกันกับประชากรผู้ประกอบอาชีพเกษตรกรรมมีจำนวนลดลง [2] สวนทางกับการเพิ่มขึ้นของประชากรโลก [3] เพื่อความพอเพียงอย่างยั่งยืน จึงต้องพัฒนาเทคโนโลยีสมัยใหม่เพื่อเพิ่มสมรรถนะอัตราการผลิตด้านสินค้าการเกษตรให้มากขึ้น และประยุกต์เทคโนโลยีที่ก้าวหน้าซึ่งมีศักยภาพต่อการเพาะพันธุ์พืช เพื่อการสร้างผลผลิตอันแข็งแกร่งทางด้านเกษตรกรรมของไทย ในเชิงอุตสาหกรรมส่งออกด้วยเทคโนโลยีที่รับประทานได้ มีทั้งคุณประโยชน์ คุณภาพและปลอดภัย สู่ความต้องการผู้บริโภคในประชาคมโลกที่มีแต่จะเพิ่มมากขึ้น

จากวิวัฒนาการวิจัยตั้งแต่ศตวรรษที่ 18 เป็นที่ยอมรับว่าไฟฟ้าแรงดันสูงมีอิทธิพลต่อพืชสอดคล้องกับงานของ Solly, E. [4] ซึ่งอ้างถึงการวิจัยของ Dr. Mainbray of Edinburgh ในปี ค.ศ.1746 ได้ทดลองปล่อยประจุไฟฟ้าไปยังต้นไม้ myrtle ตลอดเดือนตุลาคม พบว่าสามารถกระตุ้นการออกดอกและการเจริญเติบโตของกิ่งก้านได้ยาวเพิ่มขึ้น 2-3 นิ้ว นอกจากนี้ ยังมีรายงานเกี่ยวกับปรากฏการณ์ปล่อยประจุไฟฟ้าแรงสูงในบรรยากาศลงสู่พื้นโลก นั่นก็คือ การเกิดฟ้าผ่า ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่อาจส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช ในราวทศวรรษที่ 1950s Stanley Miller และ Harold Urey ได้ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการด้วยการปล่อยประจุประกายข้ามในน้ำ ซึ่งมีความผสมทางเคมีอาทิเช่น ไฮโดรเจน แอมโนเนีย และมีเทน เป็นต้น หลังจากนั้นสองสามวันพบว่าน้ำนั้นเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลที่มีส่วนผสมของกรดอะมิโน ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของโปรตีนที่อยู่ในสิ่งมีชีวิตเกือบทุกประเภทบนโลกนี้ [5]

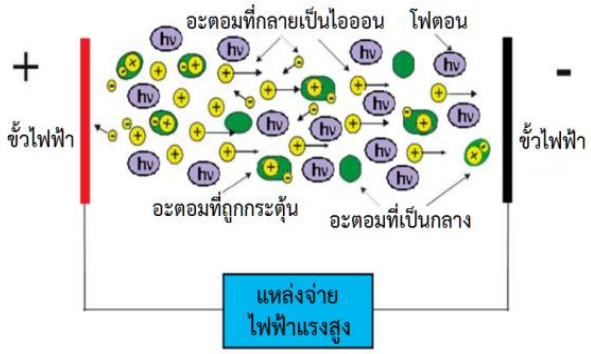
เทคโนโลยีด้านการประยุกต์สนามไฟฟ้าสถิตย์หรือสนามแม่เหล็กเพื่องานด้านการเกษตรได้รับการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องจวบจนปัจจุบัน ในบทความนี้ขอยกตัวอย่างพอสังเขป เช่น การใช้ไฟฟ้าสถิตย์ [6] โดยใช้หลักของการปล่อยประจุเข้าไปที่โมเลกุลของละอองน้ำยากำจัดศัตรูพืช เมื่อพ่นละอองน้ำออกไป ทำให้เกิดแรงคูลอมบ์ (Coulomb's force) ของสนามไฟฟ้า ระหว่างละอองน้ำกับพืชที่มีประจุตรงกันข้ามกัน ทำให้ละอองน้ำยากำจัดศัตรูพืชกระจายจับเกาะรอบต้นพืชได้ดี นอกจากนี้ ยังใช้หลักการไฟฟ้าสถิตย์เดียวกันนี้กับ การปรับสภาพอากาศด้วยการดักจับเชื้อโรคในโรงเรือน การคัดแยกและการกำจัดฝุ่นผงที่อยู่ในเครื่องจักรภาคการเกษตร การถ่ายละอองเรณู การไล่ความชื้นหรือการอบแห้งในผลิตผลด้านการเกษตร และการผลิตโอโซน รวมถึงการใช้สนามไฟฟ้าแบบ

พัลส์ในการฆ่าเชื้อในของเหลว เป็นต้น สำหรับการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในด้านการเกษตรได้ทำการศึกษาครั้งแรกเมื่อ ค.ศ. 1930 โดย Savostin [7] ได้รายงานเกี่ยวกับอิทธิพลของสนามแม่เหล็กส่งผลให้อัตราการงอกของรากยาวขึ้นกว่าเดิม เมื่อเร็วๆ นี้ ยังได้มีการค้นพบผลกระทบในแง่บวกว่าสนามแม่เหล็ก รังสี แสงเลเซอร์ และไมโครเวฟ สามารถเร่งการเจริญโตจากเมล็ดเป็นลำต้น กระตุ้นกระบวนการเผาผลาญอาหาร และกระบวนการทางโปรตีนของต้นพืช และเพิ่มปริมาณของโคลโรฟิลล์ (chlorophyll) เป็นต้น [8-13]

รูปที่ 1 วัฏจักรชีวิตพืชและส่วนที่เกี่ยวข้องซึ่งสามารถประยุกต์พลาสมามาเสริมกระบวนการต่างๆ

นอกจากเทคโนโลยีสนามไฟฟ้าสถิตย์และสนามแม่เหล็กที่กล่าวข้างต้น เมื่อไม่นานมานี้ ในต่างประเทศได้มีการวิจัยและพัฒนาบูรณาการศาสตร์ด้วยเทคโนโลยีการประยุกต์พลาสมาความดันบรรยากาศด้วยไฟฟ้าแรงดันสูงเพื่อนำมาใช้ทางด้านเกษตรกรรม ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่ง่ายเนื่องจากไม่จำเป็นต้องมีระบบสูญญากาศ เมื่อเทียบกับเทคโนโลยีแบบดั้งเดิมและราคาไม่แพงมากนัก อย่างไรก็ตาม ประเทศไทยยังไม่มีการวิจัยเกี่ยวกับการใช้พลาสมาที่เหมาะสมกับพืชที่มีอยู่ในประเทศมากนัก

ดังนั้นบทความนี้จึงได้ทบทวนนวัตกรรมเกี่ยวกับพลาสมาความดันบรรยากาศในต่างประเทศ ซึ่งใกล้เคียงกับสิ่งประดิษฐ์ที่มีอยู่ ณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ เพื่อเป็นจุดเริ่มต้นในการศึกษาวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับการเสริมสมรรถนะผลิตผลในวัฏจักรชีวิตพืชดังรูปที่ 1 ประกอบด้วย การปรับสภาพขณะเป็นเมล็ด การฆ่าเชื้อในขณะเก็บรักษาเมล็ด การเพิ่มขึ้นคุณค่าทางโภชนาของเมล็ดพืชเพื่อการบริโภค การเร่งการงอก และการเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตของพืช ไม่ว่าจะเป็น ราก ลำต้น ใบ ดอก และ ผลไม้ รวมไปถึงการรักษาความสดใหม่และการลดยาฆ่าแมลงขณะล้างผลผลิตทางการเกษตร การลดต้นทุนการขนส่งพืชผักและผลไม้หลากหลายชนิดผสมผสานคราวเดียวกันในตู้ขนส่งขนาดใหญ่เป็นระยะทางไกลๆ มักเกิดอุปสรรคของการขนส่งนอกจากเชื้อโรคและเชื้อรา เป็นต้น



รูปที่ 2 การกำเนิดพลาสมาด้วยไฟฟ้าแรงสูง [17]

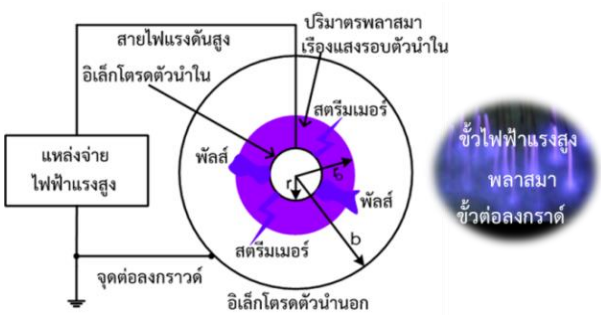
2. พลาสมาในก๊าซหรือในของเหลวที่ความดันบรรยากาศ

พลาสมาคือก๊าซหรือของเหลวที่เป็นกลางถูกทำให้กลายเป็นไอออน [14] คำว่าถูกทำให้กลายเป็นไอออนหมายถึงอิเล็กตรอนอย่างน้อยหนึ่งตัวหลุดออกจากอะตอมหรือโมเลกุลที่เป็นกลาง ทำให้อะตอมหรือโมเลกุลกลายเป็นไอออนบวกของโปรตรอนและอิเล็กตรอนซึ่งเป็นไอออนลบผสมกระจายกันอยู่อย่างเท่าๆ กันในตัวกลางของก๊าซ และยังมี นิวตรอน อนุมูลอิสระ อะตอมหรือโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นอยู่ในสภาวะกึ่งเสถียร ผนึกผสมประกอบอยู่รวมกันในสภาพที่มีพลวัตอย่างไร้ดุลภาพก่อให้เกิดกระบวนการทำปฏิกิริยาเคมีและการเคลื่อนที่ของอนุภาคชนิดต่างๆ ในพลาสมา [15] ด้วยสมบัติอันโดดเด่นนี้เองจึงมีการเรียกว่า สถานะที่สี่ของสสาร [16] จึงมีการค้นคว้าวิจัยพลาสมาอย่างจริงจังเพื่อพยายามประยุกต์ให้เกิดประโยชน์ในแวดวง วิทยาศาสตร์ การแพทย์ ชีวะ วิศวกรรม การเกษตร และอุสาหกรรมอย่างกว้างขวาง

2.1 พลาสมาในก๊าซที่ความดันบรรยากาศ

การกำเนิดพลาสมาความดันบรรยากาศที่อุณหภูมิห้องอาจทำโดยการใช้ไฟฟ้าแรงสูงดังรูปที่ 2 เมื่ออิเล็กตรอนภายในช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าถูกทำให้เคลื่อนที่และมีพลังงานจลน์สูงขึ้นจากการป้อนไฟฟ้าแรงสูงที่ขั้วไฟฟ้า อิเล็กตรอนที่

เคลื่อนที่ด้วยพลังงานสูงเกิดการปะทะกับอะตอมหรือโมเลกุลที่เป็นกลาง ทำให้เกิดการถ่ายทอดพลังงานไปยังอะตอมหรือโมเลกุลที่เป็นกลาง ถ้าพลังงานนี้สูงพอจะเกิดการกลายเป็นไอออนและพลาสมาขึ้น ส่วนอะตอมหรือโมเลกุลระหว่างขั้วไฟฟ้าที่ถูกทำให้เกิดการตื่นกระตุ้นจะคืนสู่สภาพที่เป็นกลางโดยการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปรังสีของแสง ซึ่งเป็นคุณลักษณะหนึ่งของพลาสมาที่รู้จักกันในนาม การปล่อยประจุเรืองแสง การปล่อยประจุเรืองแสงแบบพลาสมาที่ความดันบรรยากาศในก๊าซด้วยไฟฟ้าแรงสูงในปัจจุบันพอแบ่งออกได้ 2 แบบคือ (1) แบบการปล่อยประจุพลาสมาโดยตรงในก๊าซระหว่างขั้วอิเล็กโตรดและ (2) แบบการปล่อยประจุพลาสมาโดยมีตัวคั่นเป็นไดอิเล็กตริกที่ขั้วอิเล็กโตรด ซึ่งทั้งสองแบบนี้ได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นใช้เอง ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา โดยมีรายละเอียดพอสังเขปดังนี้



รูปที่ 3 แผนภาพและลักษณะการปล่อยประจุที่ปลายตัวนำโดยตรงในก๊าซระหว่างขั้วอิเล็กโตรด

การปล่อยประจุโดยตรงในก๊าซที่ความดันบรรยากาศระหว่างขั้วอิเล็กโตรดโดยใช้หลักการการปล่อยประจุโคโรนา (corona) บริเวณรอบๆ สายตัวนำไฟฟ้า หรือ บริเวณจุดปลายแหลมหรือปลายจุดคมดังรูปที่ 3 เนื่องจากมีความเข้มหรือความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณนี้สูง จึงเกิดการปล่อยประจุเรืองแสงจากการกลายเป็นไอออนและมักจะติดตามมาด้วยลำแสงที่ส่องตรงไปยังขั้วอิเล็กโตรดที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าต่ำกว่า เกิดเสียงการแตกตัวของประจุ ถ้าแรงดันไฟฟ้าสูงมากพอ จะมีการปล่อยประจุแบบพัลส์เป็นห้วงๆ ราว 25 ถึง 50 นาโนวินาที และเกิดการปล่อยประจุเป็นลำที่เรียกว่า ลำสตรีมเมอร์ซึ่งมีโอกาสทำให้เกิดการเสียสภาพฉับพลันในก๊าซและเกิดการปล่อยประจุแบบประกายข้ามได้ง่ายขึ้น (spark) ความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติ (E_{cr}) สำหรับการปล่อยประจุเพื่อกำเนิดพลาสมาเรืองแสงแบบโคโรนาในก๊าซที่ผิวสายตัวนำไฟฟ้าที่ความดันบรรยากาศในอากาศ สามารถหาได้จากสมการ

$$E_{cr} = 30\,\delta\,m\left(1+\frac{0.3}{\sqrt{\delta r}}\right) \quad [kV_p/cm] \qquad (1)$$

เมื่อ m คือ ตัวประกอบความไม่เรียบของผิวตัวนำสายไฟ ซึ่งตามมาตรฐานโดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.8 ถึง 0.89

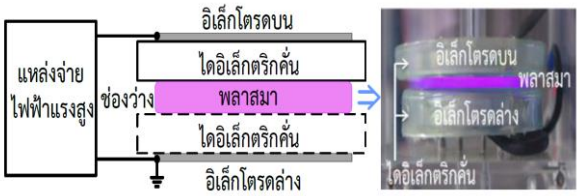
r คือ รัศมีของตัวนำ cm

δ คือ ตัวประกอบความหนาแน่นของอากาศ ที่ขึ้นอยู่กับความดันบรรยากาศและอุณหภูมิซึ่งหาได้จากสมการ

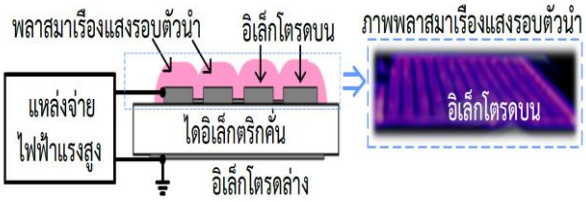
$$\delta = \frac{3.9211\,p}{273+t} \qquad (2)$$

p คือ ความดันบรรยากาศ cm of mercury

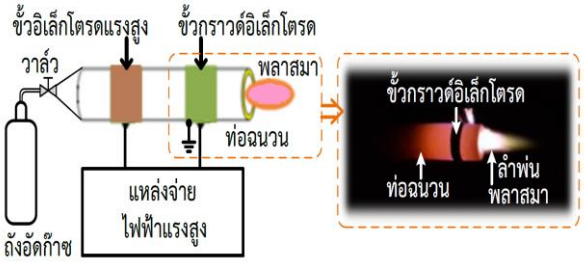
t คือ อุณหภูมิของผิวตัวนำ °C



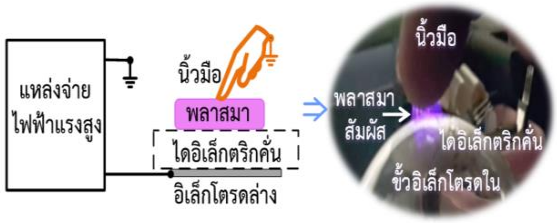
(ก) พลาสมาเรืองแสงระหว่างช่องว่างไดอิเล็กตริก [18]



(ข) พลาสมาเรืองแสงที่ผิวไดอิเล็กตริก [17]



(ค) พลาสมาเรืองแสงระหว่างไดอิเล็กตริกแบบพ่น



(ง) พลาสมาเรืองแสงที่ผิวไดอิเล็กตริกแบบสัมผัสโดยตรง

รูปที่ 4 แผนภาพและลักษณะการปล่อยประจุพลาสมาแบบคั่น

ด้วยไดอิเล็กตริกระหว่างขั้วอิเล็กโตรด

การปล่อยประจุพลาสมาแบบไดอิเล็กตริกเป็นตัวคั่นแสดงดังรูปที่ 4 มีทั้งการปล่อยประจุแบบไดอิเล็กตริกเป็นตัวคั่นภายใต้ความเครียดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ และแบบการปล่อยประจุเรืองแสงแบบโคโรนาที่ผิวตัวนำ ภายใต้ความเครียดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอรอบๆ ขั้วตัวนำไฟฟ้า การปล่อยประจุพลาสมาแบบไดอิเล็กตริกเป็นตัวคั่นมีข้อดีกว่าการปล่อยประจุที่ปลายตัวนำโดยตรงในก๊าซระหว่างขั้วอิเล็กโตรดคือ ไม่เกิดการปล่อยประจุเป็นลำสตรีมเมอร์ ซึ่งมีโอกาสทำให้เกิดการปล่อยประจุแบบประกายข้ามและเกิดการอาร์ก เนื่องจากฉนวนของแข็งซึ่งทำหน้าที่คั่นอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าแรงสูง มีความทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าได้สูง

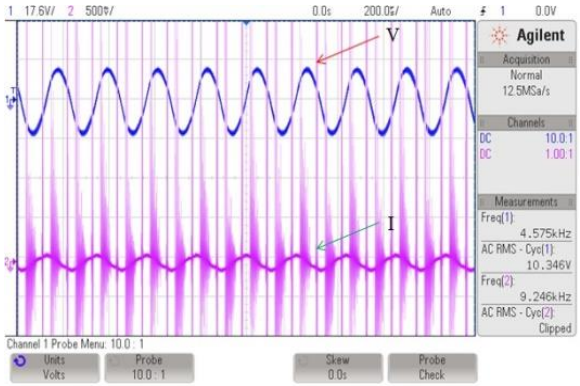
การปล่อยประจุพลาสมาเรืองแสงระหว่างช่องว่างอากาศที่ความดันบรรยากาศ โดยมีการคั่นด้วยไดอิเล็กตริกระหว่างขั้วอิเล็กโตรดภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอแสดงดังรูปที่ 4 (ก) แรงดันที่ทำให้ก๊าซกลายเป็นพลาสมา (V_B) ที่สภาวะอุณหภูมิมาตรฐาน และความดันในสภาพอากาศแห้ง (dry air) หาได้จากสมการ

$$V_B = 3000d + 1.35 \qquad [kV] \qquad (3)$$

เมื่อ d คือระยะห่างช่องว่างอากาศระหว่างไดอิเล็กตริก ส่วนความเครียดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอในช่องว่างอากาศระหว่างขั้วอิเล็กโตรดหาได้จาก

$$E_B = \frac{V_B}{d} \qquad [kV/m] \qquad (4)$$

สำหรับการปล่อยประจุพลาสมาเรืองแสงที่ผิวไดอิเล็กตริกพลาสมาเรืองแสงระหว่างไดอิเล็กตริกแบบพ่น พลาสมาเรืองแสงที่ผิวไดอิเล็กตริกแบบสัมผัสโดยตรง ดังรูปที่ 4 (ข) ถึงรูปที่ 4 (ง) เป็นลักษณะการปล่อยประจุพลาสมาภายใต้ความเครียดสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ



รูปที่ 5 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดัน (V) และกระแส (I) ขณะกำเนิดพลาสมาในช่องว่างอากาศความดันบรรยากาศ

การปล่อยประจุแบบมีตัวคั่นเป็นไดอิเล็คตริก โดยทั่วไปมักใช้แรงดันสูงไฟฟ้ากระแสสลับป้อนให้กับอิเล็คโตรดสองอัน ซึ่งอย่างน้อยด้านหนึ่งต้องมีฉนวนอยู่บนอิเล็คโตรดดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4 การจ่ายแรงดันสูงจะต้องเกินกว่าแรงดันเสียสภาพฉับพลันของพาสเชนของก๊าซ (paschen of the gas) ความถี่ของแรงดันสูงไฟฟ้ากระแสสลับสามารถทำงานในย่านกว้างๆ โดยความถี่อยู่ที่ประมาณ 50 Hz ถึง 1 MHz ปัจจุบันที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ใช้แรงดันสูงประมาณที่ 5 - 8 kV ความถี่ตั้งแต่ 4.8-6.5 kHz ดังรูปที่ 5 เพื่อใช้ในการกำเนิดพลาสมาในช่องว่างอากาศระยะ 1-5 มม.

ภายใต้แรงดันสูงความถี่สูงพลาสมามีความถี่ของการชนกัน v_c เป็นได้ทั้งอิเล็คตรอนหรือไอออนที่ความดันหนึ่งบรรยากาศ (1 atm) ความถี่วิกฤต (critical frequency, f_c) คือ

$$f_c = \frac{e\,V_{rms}}{\pi\, m_p\, f_i\, d^2} \qquad [Hz] \qquad (5)$$

เมื่อ e คือ ค่าประจุของอิเล็กตรอนเท่ากับ 1.602x10^{-19}C

V_{rms} คือ แรงดันประสิทธิผล $[V]$

m_p คือ มวลอนุภาค $[kg]$

f_i คือ ความถี่ที่ทำให้เกิดการชนกันของอนุภาค $[Hz]$

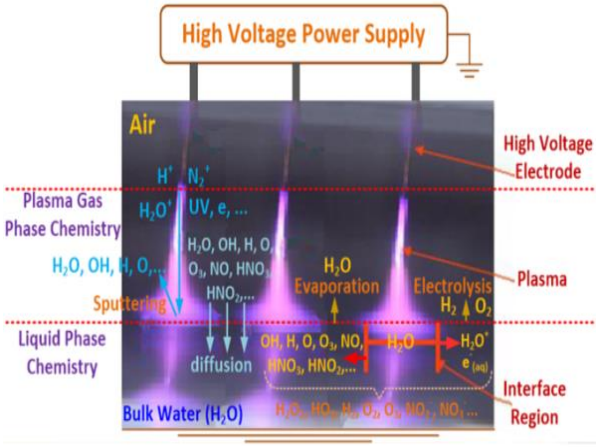
d คือระยะห่างช่องว่างอากาศระหว่างไดอิเล็กตริก $[m]$

2.2 พลาสมาในน้ำด้วยเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

การปล่อยประจุไฟฟ้าเพื่อกำเนิดพลาสมาในของเหลวอย่างเช่น น้ำ ได้รับความสนใจและนำมาประยุกต์กับการบำบัดน้ำ [19-22] และการเกษตร [23-24] เนื่องจากการปล่อยประจุเรืองแสงแบบพลาสมาด้วยแรงดันสูง ในกรณีของการปล่อย

ประจุในอากาศลงสู่น้ำทำให้เกิดไอออนต่างๆ อาทิเช่น O_2-, NO_2-, NO_3-, OH, O, N, O_3, และ H_2O_2 เป็นต้น ดังรูปที่ 6

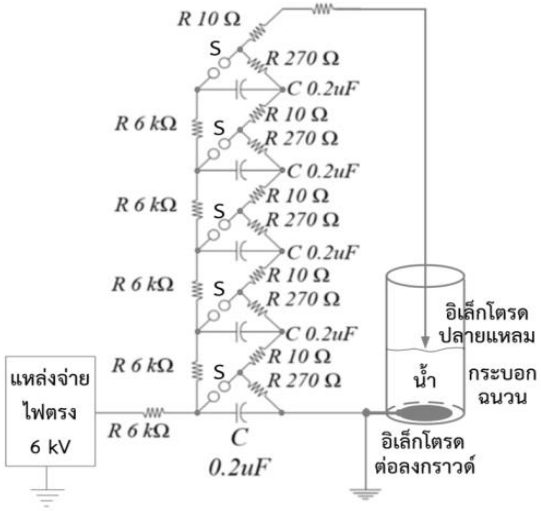
ไอออน ในพลาสมาที่ยกตัวอย่างมาข้างต้น มีคุณสมบัติทำให้เกิดปฏิกริยาทางเคมี จึงสามารถนำไปปรับสภาพน้ำให้มีธาตุไนโตรเจนให้เพิ่มขึ้น น้ำนี้จึงมีธาตุอาหารส่วนหนึ่งทำจำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของพืชและยังเป็นการช่วยเพิ่มปริมาณของออกซิเจนในน้ำได้อีกทางหนึ่ง นอกจากนี้ OH, O_3 รวมถึงรังสียูวี ที่เกิดจากการปล่อยประจุเรืองแสงแบบพลาสมาด้วยแรงดันสูง ยังสามารถช่วยในการยับยั้งหรือกำจัดเชื้อโรค เชื้อรา และ เชื้อแบทีเรีย ทั้งที่อยู่ในก๊าซและในน้ำได้ ในบทความนี้ขอยกตัวอย่างหลักการของแหล่งจ่ายแรงดันสูงเพื่อกำเนิดพลาสมาในน้ำที่จัดสร้างขึ้นใช้เอง โดยมีรายละเอียดพอสังเขปดังต่อไปนี้



รูปที่ 6 ตัวอย่างปฏิกริยาเคมีจากการปล่อยประจุพลาสมา

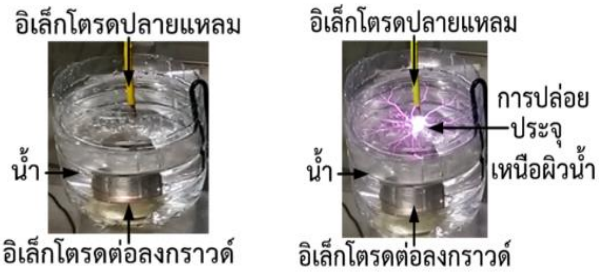
3.1 แหล่งจ่ายแรงดันอิมพัลส์สำหรับกำเนิดพลาสมาบนผิวน้ำและในน้ำ

แรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันที่มีรูปคลื่นเลียนแบบมาจากแรงดันที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาชั่วครู่ยกตัวอย่างเช่น ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าเรียกว่าแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า เป็นต้น การสร้างแรงดันอิมพัลส์มักนิยมใช้หลักการวงจรกำเนิดอิมพัลส์ของมาก์ซ์แบบหลายขั้น (multi-stage impulse of Marx's generator) [25] ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 วงจรกำเนิดอิมพัลส์ของมาก์ซ์แบบ 5 ขั้น

จากรูปที่ 7 เมื่อตัวเก็บประจุ (C) แต่ละตัวได้รับการอัดประจุจากแหล่งจ่ายไฟตรง 6 kV ผ่านตัวต้านทานในวงจรถึงค่าที่กำหนดด้วยช่องว่างประกายข้าม (S) จะเกิดการเสียสภาพฉับพลันระหว่างช่องว่างประกายข้าม ทำให้ตัวเก็บประจุ (C) แต่ละตัวอยู่ในลักษณะต่ออนุกรมกัน จึงได้แรงดันรวมราว 30 kV จ่ายไปยังอิเล็กโตรดปลายแหลมที่อยู่บนผิวน้ำหรือจุ่มอยู่ในน้ำ ผลก่อนและระหว่างการปล่อยประจุบนผิวน้ำด้วยแรงดันอิมพัลส์แสดงดังรูปที่ 8 (ก) และ 8 (ข) ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าการปล่อยประจุจากแรงดันอิมพัลส์อยู่ในลักษณะแตกเป็นแขนงบนผิวน้ำ ส่วนผลก่อนการปล่อยประจุและระหว่างการปล่อยประจุแรงดันอิมพัลส์ในน้ำแสดงดังรูปที่ 8 (ข) และ 8 (ค) ตามลำดับ พบว่าระหว่างการปล่อยประจุในน้ำเกิดเป็นแสงสว่างจ้าสีขาวจากการเกิดประกายข้ามระหว่างขั้วอิเล็กโตรดปลายแหลมกับขั้วต่อลงกราวด์ในน้ำ

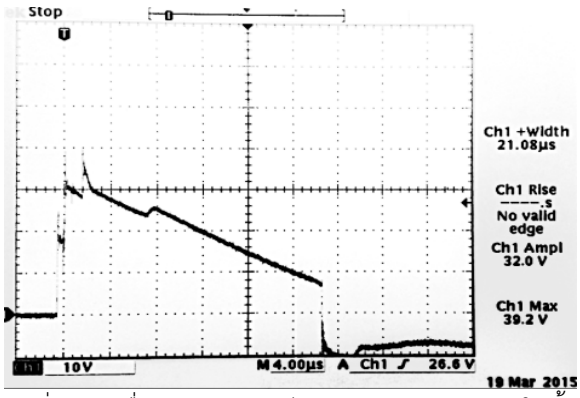


(ก) ก่อนปล่อยประจุบนผิวน้ำ (ข) ปล่อยประจุบนผิวน้ำ

(ค) ก่อนปล่อยประจุในน้ำ (ง) ระหว่างปล่อยประจุในน้ำ

รูปที่ 8 ภาพตัวอย่างการปล่อยประจุแรงดันอิมพัลส์กับน้ำ

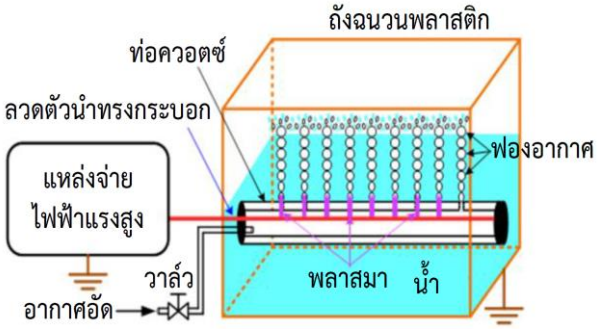
เมื่ออัดประจุเข้าไปยังน้ำด้วยค่าเวลาคงตัวของตัวเก็บประจุ (C) และตัวต้านทาน R 10 Ω ผ่านไปถึงแรงดันค่ายอดและการเสียสภาพฉับพลันระหว่างช่องว่างประกายข้ามหยุดลง จะเกิดการคายประจุจากน้ำผ่านกลับมาลงกราวด์โดยผ่านตัวต้านทาน R 10 Ω และตัวต้านทาน R 270 Ω ทำให้เกิดแรงดันรูปคลื่นอยู่ในลักษณะอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หางคลื่นดังรูปที่ 9 มีค่ายอดแรงดันสูงสุดราว 39 kV หน้าคลื่นอยู่ที่ราว 1 μs ส่วนห่างคลื่นถูกตัวที่เวลาประมาณ 24 μs



รูปที่ 9 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ระหว่างการปล่อยประจุในน้ำ

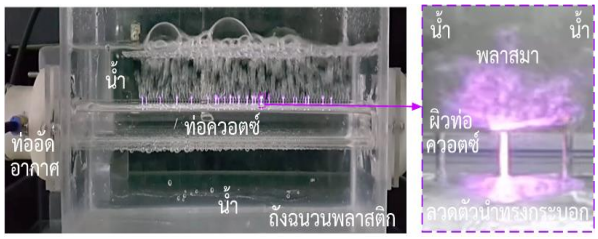
2.3 การกำเนิดพลาสมาในฟองก๊าซใต้น้ำ

การกำเนิดพลาสมาในฟองก๊าซใต้น้ำเป็นการปรับสภาพน้ำที่ได้รับการปรับปรุงและพัฒนาเพื่อนำไปประยุกต์ในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากพลาสมาที่กำเนิดได้ในฟองก๊าซมีการไหลสัมผัสกับน้ำอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งมีการกระจายฟองก๊าซพลาสมาใต้น้ำได้ทั่วถึงดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 แผนภาพการปล่อยประจุพลาสมาผ่านฟองก๊าซใต้น้ำ

แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้อยู่ในราว 10-30 kV ซึ่งสามารถหาได้จากไฟฟ้ากระแสสลับของหม้อแปลงนีออนแบบขดลวดความถี่ต่ำ 50 Hz ไปจนถึงหม้อแปลงนีออนแบบอิเล็กทรอนิคส์ความถี่สูงเป็น kHz ก็ได้ จึงช่วยลดต้นทุนการสร้างแหล่งจ่ายแรงดันสูงราคาแพงอย่างเช่น แหล่งจ่ายแรงดันอิมพัลส์ เป็นต้น เมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงเข้าไปในลวดตัวนำทรงกระกอกซึ่งถูกบรรจุอยู่ในท่อควอตซ์ภายใต้การอัดอากาศเข้าไปในท่อควอตซ์ซึ่งจุ่มอยู่ใต้น้ำ หากความเครียดสนามไฟฟ้าสูงพอระหว่างลวดตัวนำกับฟองอากาศที่พ่นขึ้นมาจากใต้น้ำราว 30 kV/cm จะทำให้เกิดการปล่อยประจุพลาสมาโดยการเกิดประกายข้ามในอากาศผ่านรูท่อควอตซ์ไปสัมผัสกับน้ำทันทีดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 ภาพตัวอย่างการปล่อยประจุฟองพลาสมาใต้น้ำ

3. การประยุกต์พลาสมากับเมล็ดพันธุ์พืช

ในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงตัวอย่างการใช้พลาสมาสำหรับงานวิจัยด้านการเกษตร ซึ่งส่วนใหญ่มีผลลัพธ์ทางบวกในช่วงครึ่งทศวรรษล่าสุดที่ผ่านมา โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การเก็บรักษาผลผลิตและเมล็ดพันธุ์พืช การเพิ่มโภชนาการเมล็ดพันธุ์พืชสำหรับการรับประทาน และการปรับสภาพเมล็ดพันธุ์พืชด้วยพลาสมาเพื่อให้งอกได้เร็วและเจริญเติบโตจากเมล็ดรวดเร็วขึ้น เป็นต้น ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อดังต่อไปนี้

3.1 การใช้พลาสมาเพื่อเก็บรักษาผลผลิตและเมล็ดพันธุ์พืช

เนื่องจากลักษณะสมบัติของพลาสมาที่กล่าวมาข้างต้น มีศักยภาพในการทำให้ปราศจากเชื้อโรค เชื้อรา เชื้อไวรัส และสามารถยับยั้งหรือลดประชากรจุลชีพบนผิวของเมล็ดพืชได้ เป็นการยืดอายุเก็บรักษาได้ยาวนานขึ้น และลดการใช้สารเคมีถนอมผลิตผลที่อาจเป็นอันตรายลงในระหว่างการขนส่งและการบรรจุถุงหรือหีบห่อบรรจุภัณฑ์ จากการวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการประยุกต์เครื่องกำเนิดพลาสมาความดันบรรยากาศไร้ความร้อนชนิดต่างๆ เพื่อการเก็บรักษาผลผลิตและเมล็ดพันธุ์พืชดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การประยุกต์เครื่องกำเนิดพลาสมาเพื่อการเก็บรักษาผลผลิตและเมล็ดพันธุ์พืช

ชนิดของเครื่องกำเนิดพลาสมา	การประยุกต์
พลาสมาเรืองแสงระหว่างช่องว่างไดอิเล็กตริก	กำจัด E. coli ที่เมล็ดอัลมอนด์ [26] ลดเชื้อราในเมล็ดข้าวสาลี [27]
พลาสมาปล่อยประจุเรืองแสงจากโคโรนาแบบพ่น	กำจัดการติดเชื้อของเมล็ดผักกาดก้านขาว [28]
พลาสมาเรืองแสงระหว่างไดอิเล็กตริกแบบพ่น	น้ำแช่ล้างสตรอเบอร์รีซึ่งถูกพ่นด้วยพลาสมา [29]

การประยุกต์พลาสมาเรืองแสงในอากาศที่ความดันบรรยากาศระหว่างช่องว่างไดอิเล็กตริก ในบทความนี้ขอยกตัวอย่างการนำไปใช้กับการกำจัดเชื้อ E. coli บนเมล็ดอัลมอนด์ [26] และเชื้อราในข้าวสาลี [27] ซึ่งพอสรุปได้ดังนี้ การกำจัดกำจัดเชื้อแบคทีเรีย E. coli ทำโดยการใช้ไฟฟ้าแรงดันสูงราว 30 kV ที่ความถี่ 2 kHz ในการกำเนิดพลาสมาลงบนเมล็ดอัลมอนด์เป็นเวลา 30 วินาที พบว่าเชื้อ E. coli ลดลงเกือบ 5-log CFU/g และพบว่าประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อจะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าและความถี่ การลดเชื้อราในข้าวสาลีทำได้โดยใช้ระนาบอิเล็กโตรดทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มม. วางขนานกัน มีช่องว่างอากาศ 20 มม. ถูกป้อนด้วยแรงดันไฟฟ้าสูงราว 8 kV ที่ความถี่ 100 Hz และ 83 kHz ใช้เวลาในการปรับสภาพข้าวสาลีด้วยเวลาสูงสุดเพียง 30 วินาที หลังจากทิ้งไว้ในห้องมืดควบคุมอุณหภูมิที่ 22 °C เป็นเวลาเจ็ดวันในจานเพาะเชื้อพบผลในเชิงบวกคือ พลาสมาลดจำนวนประชากรของเชื้อรา Alternaria alternata ที่ปรากฏขึ้นบนเม็ดข้าวสาลีได้จาก 76% เหลือเพียง 26% หรือไม่ปรากฏเชื้อราเช่น เชื้อรา Alternaria botrytis เป็นต้น

เมล็ดผักกาดก้านขาวติดเชื้อแบคทีเรียที่ต้องการออกซิเจนในการดำรงชีวิตเพื่อการหายใจ รา ยีสต์ Bacillus cereus, E. coli, และ Salmonella spp เมื่อปรับสภาพด้วยพลาสมาปล่อยประจุเรืองแสงจากโคโรนาแบบพ่นในอากาศที่ความเร็วลม 2.5 m/s [28] เป็นเวลา 3 นาที ด้วยไฟฟ้าแรงดันสูง 20 kVdc จุลชีพขนาดเล็กเหล่านี้ถูกลดลงเหลือราว 1.2-2.2 log CFU/g พลาสมาเรืองแสงระหว่างไดอิเล็กตริกแบบพ่นยังถูกนำมาประยุกต์กับน้ำล้างสตรอเบอร์รี [29] ด้วยขั้นตอนง่ายๆ คือหลังจากพ่นพลาสมาจากก๊าซอาร์กอนหรือออกซิเจนลงไปในน้ำซึ่งถูกเรียกในชื่อใหม่ว่า น้ำที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมา (plasma-activated water) น้ำนี้จึงสามารถต่อต้านจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียได้ เมื่อนำแช่สตรอเบอร์รีเป็นเวลา 5-15 นาที พบว่าสามารถกำจัดการติดเชื้อและป้องกันเชื้อสแตฟิโลค็อกคัสออเรียส (staphylococcu saureus, S. aureus) ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษ นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของ สีสัน ค่าพีเอส (pH) และ ความแน่นของเนื้อสตรอเบอร์รี เมื่อนำสตรอเบอร์รีซึ่งผ่านการแช่น้ำที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมาไปเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 20 ± 2 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 70 ± 5% เป็นเวลา 6 วัน ไม่เกิดการเน่าเสียจากเชื้อรา ในขณะที่สตรอเบอร์รีซึ่งไม่ได้ผ่านการแช่ด้วยน้ำที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมา เกิดการเน่าเสียและมีเชื้อราอยู่โดยรอบ

3.2 การใช้พลาสมาเพื่อการเพิ่มโภชนาการของเมล็ดพันธุ์พืช

กระบวนการงอกของเมล็ดข้าวช่วยให้คุณค่าทางอาหารของเมล็ดพันธุ์พืชเพิ่มขึ้น ไม่ว่าจะเป็นวิตามิน บี และ อี รวมทั้งกรดอะมิโนแกรมมา (gramma-aminobutyric acid, GABA) ซึ่งรู้จักกันในนามของกาบา เมื่อไม่นานมีนี้ พลาสมาความดันบรรยากาศที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้อง ถูกนำมาประยุกต์กับกระบวนการรักษาคุณค่าทางอาหารและการเพิ่มโภชนาการของเมล็ดพันธุ์พืช [30] ได้มีการทดลองใช้พลาสมาเรืองแสงในก๊าซอาร์กอนและออกซิเจนระหว่างไดอิเล็กตริกแบบพ่น ใช้เวลาพ่นข้าวกล้องเพียง 5-10 วินาที ที่แรงดัน 3-5 kV ความถี่ 300 kHz แล้วนำไปเพาะให้งอกตามปกติด้วยเวลาการงอก 48-96 ชั่วโมง พบว่าสารกาบาในข้าวกล้องงอกมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด 1.8 μg/g เมื่อเทียบกับข้าวกล้องงอกที่ไม่ได้ปรับสภาพด้วยพลาสมามีเพียง 1.2 μg/g

3.3 การใช้พลาสมาสำหรับเร่งการงอกของเมล็ดและเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตพืช

เมื่อไม่นานมานี้ ได้มีการประยุกต์เครื่องกำเนิดพลาสมาเรืองแสงแบบโคโรนาแบบมีไดอิเล็กคั่นด้วยแผ่นแก้วที่ขั้วต่อลงดิน [31] เพื่อยับยั้งเชื้อจุลชีพขนาดเล็กที่ติดอยู่บนผิวเปลือกเมล็ดข้าว แก้ปัญหาเรื่องการเกิดเชื้อราขณะเพาะข้าวงอกและปรับสภาพผิวให้สามารถซึมซาบน้ำได้ง่ายขึ้น ทำให้เปอร์เซนต์การงอกสูงถึง 98% เมื่อเทียบกับเมล็ดข้าวที่ไม่ได้ปรับสภาพด้วยพลาสมามีเปอร์เซนต์การงอกราว 90%

พลังงานของอิเล็กตรอนและอนุภาคของอากาศตื่นกระตุ้น รวมทั้งรังสียูวี จากไฟฟ้าแรงดันสูงราว 5 ~ 6 kV ที่ความถี่ 8 ~ 30 kHz ในพลาสมาเรืองแสงระหว่างช่องว่างไดอิเล็กตริกในความดันบรรยากาศ โดยใช้เวลาในการปรับสภาพเมล็ดด้วยพลาสมาเพียง 6 วินาที พลาสมาสามารถแทรกซึมทะลุผ่านเปลือกของเมล็ดมะเขือเทศ [32] ทำให้เกิดการเร่งการย่อยสลายสารอาหารภายในเมล็ด จึงช่วยเสริมให้รากของเมล็ดมะเขือเทศงอกได้เร็วขึ้น

เครื่องกำเนิดพลาสมาเรืองแสงที่ผิวไดอิเล็กตริกถูกนำไปประยุกต์เพื่อเร่งการงอกของเมล็ดพันธุ์พืชและการเจริญเติบโตของถั่วลันเตา (pisum sativum L.) [33] พบว่าหลังจากเมล็ดถั่วถูกพลาสมาชนิดนี้เป็นเวลา 180 วินาที สามารถเปลี่ยนผิวของถั่วให้ซึมซาบน้ำได้ง่ายขึ้นภายใน 2 ชั่วโมงแรกเมล็ดสามารถดูดซับน้ำได้มากกว่า 23% เมื่อเทียบกับเมล็ดที่ได้ไม่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยพลาสมา ทำให้อัตราการงอกเพิ่มขึ้น นอกจากนี้พลาสมายังมีผลต่อการเปลี่ยนฮอร์โมนควบคุมการเจริญเติบโตเช่น ออกซิน (auxins) ไซโตไคนิน (cytokinins) เป็นต้น เมล็ดถั่วจึงมีการเจริญเติบโตได้เร็วขึ้น นอกจากนั้นยังมีการใช้พลาสมาดังกล่าวในการเสริมการเจริญเติบโตของเมล็ดผักกาดหัว (raphanus sativus) [34] พบว่าความยาวของก้านงอกจากเมล็ดที่ถูกปรับสภาพด้วยพลาสมามีความยาวเฉลี่ยมากกว่า 250% เมื่อเทียบกับการงอกของเมล็ดที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพด้วยพลาสมาในระยะเวลา 7 วันเท่ากัน

ตารางที่ 2 การประยุกต์เครื่องกำเนิดพลาสมาเพื่อเร่งการงอกของเมล็ดพันธุ์พืชและการเจริญเติบโตของพืช

ชนิดของเครื่องกำเนิดพลาสมา	การประยุกต์
พลาสมาเรืองแสงแบบโคโรนา	กำจัดเชื้อโรคและเชื้อราบนเมล็ดข้าว [31]
พลาสมาเรืองแสงระหว่างช่องว่างไดอิเล็กตริก	เมล็ดมะเขือเทศ [32]
พลาสมาเรืองแสงที่ผิวไดอิเล็กตริก	เมล็ดถั่วลันเตา [33] เมล็ดผักกาดหัว [34]
พลาสมาเรืองแสงระหว่างไดอิเล็กตริกแบบพ่น	เมล็ดหัวไชเท้า [35]
การปล่อยประจุฟองก๊าซพลาสมาใต้น้ำ	เมล็ดถั่วเขียว [36]

พลาสมาเรืองแสงระหว่างไดอิเล็กตริกแบบพ่นมีการประยุกต์เพื่อเร่งการงอกของเมล็ดพันธุ์พืชและการเจริญเติบโตของพืช [35] ก๊าซอาร์กอนพ่นด้วยอัตราการไหล 4 ลิตรต่อนาที ถูกทำให้กลายเป็นพลาสมาด้วยไฟฟ้าแรงสูง 30 kV ที่ค่ายอดกระแสปล่อยประจุแบบพัลส์เพียง 186 mA ในช่วงเวลาสั้นๆ แค่ 45 μs เมื่อนำพลาสมานี้ไปพ่นลงเมล็ดหัวไชเท้าพบว่า การงอกของรากจากเมล็ดที่พ่นด้วยพลาสมากับเมล็ดที่ไม่ได้พ่นมีความแตกต่างกันไม่มากนัก แต่การเจริญเติบโตของเมล็ดที่พ่นด้วยพลาสมามีมากกว่า เมื่อคิดจากน้ำหนักเมล็ดงอกตอนถูกทำให้แห้งมีค่าเพิ่มขึ้นราว 9-12% เทียบกับน้ำหนักเมล็ดงอกที่ไม่ได้พ่นด้วยพลาสมา

การปล่อยประจุฟองก๊าซพลาสมาความดันบรรยากาศผสมกับน้ำ [36] ได้มีการทดลองโดยการใช้ฟองก๊าซชนิดต่างๆ เช่น N_2, He, O_2 และอากาศ เป็นต้น ในการกำเนิดพลาสมาผสมกับน้ำที่แช่ถั่วเขียวพบว่า พลาสมาจากอากาศมีประสิทธิผลในการเร่งให้เมล็ดงอกและมีอัตราการเจริญเติบโตมากที่สุด เนื่องจากอากาศเมื่อถูกกระตุ้นให้กลายเป็นพลาสมามีทั้งตัวทำปฏิกิริยาออกซิเจนและตัวทำปฏิกิริยาไนโตรเจนอยู่รวมกันในพลาสมา

4. การใช้พลาสมากับน้ำเพื่อการเติบโตของพืช

การปล่อยประจุพลาสมาเรืองแสงในอากาศลงสู่น้ำทำให้เกิดรังสียูวี [37] และไอออนตื่นกระตุ้นต่างๆ เช่น OH, O_2^- หรือ O, O_3 และ H_2O_2 [38-42] ซึ่งไอออนในกลุ่มนี้มีศักยในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสูง (oxidation potential) ตั้งแต่ 2.8 V, 2.42 V, 2.07 V และ 1.78 V ตามลำดับ [43] เมื่อเทียบกับคลอลีนมีศักยออกซิเดชั่นเพียง 1.36 V ดังนั้นไอออนหรืออะตอมมิกเหล่านี้ จึงมีประโยชน์ต่อการฆ่าเชื้อโรคต่างๆ ในน้ำได้สูงและไอออนตื่นกระตุ้นเหล่านี้จะคืนตัวกลับเป็นน้ำหรือออกซิเจนในช่วงเวลาสั้นๆ จึงไม่เหลือสารตกค้างจากไอออนในน้ำนั้น อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ใช้อากาศเป็นก๊าซในการกำเนิดพลาสมา เนื่องจากอากาศมีองค์ประกอบธาตุหลักหนึ่งคือไนโตรเจนราวเกือบ 80% ย่อมเกิดอะตอมของไนโตรเจน (N) และไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ถูกตรึงผสมอยู่ในน้ำเป็นเวลานานหลายวัน [44] ซึ่งในทางสิ่งแวดล้อมถือว่าไนโตรเจนนี้

เป็นพิษต่อคนและสัตว์ แต่นำมาใช้กับงานด้านการปลูกพืช โดยเฉพาะการปลูกพืชไร้ดินในระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด จะมีประโยชน์นอกจากการฆ่าเชื้อโรคและเชื้อราในน้ำ และยังช่วยเพิ่มธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตได้อีกทางหนึ่ง

การเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตของพืช โดยใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงแบบพัลส์บวกราว 30 kVp [24] กระแสแบบพัลส์ประมาณ 8 Ap ในช่วงความกว้างพัลส์ราว 110 ns ด้วยอัตราการซ้ำของพัลส์ 250 pps เพื่อการปล่อยประจุพลาสมาแบบประกายข้ามที่โลหะปลายแหลมในฟองก๊าซอากาศซึ่งถูกพ่นออกมาจากท่อแก้ว ทำให้ไอออนในพลาสมาผสมกับน้ำด้วยอัตราการไหลของอากาศ 0.5 ลิตรต่อนาที เป็นเวลานาน 15 นาที เมื่อนำน้ำไปรดผัก S. oleracea ทุกวันเป็นเวลา 28 วัน พบว่าผักที่รดด้วยน้ำที่ผ่านการปรับสภาพด้วยพลาสมามีความสูงเฉลี่ยราว 120 มม. แต่ผักที่รดด้วยน้ำกลั่นมีความสูงเฉลี่ยเพียง 60 มม.

5. เทคโนโลยีพลาสมาในเชิงประสิทธิภาพทางเศรษฐศาสตร์

นอกจากประสิทธิภาพเชิงวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมในการเสริมสมรรถนะผลิตผลในวัฏจักรชีวิตพืชตามที่กล่าวมา หากพิจารณาในเชิงประสิทธิภาพทางเศรษฐศาสตร์อย่างพอเพียงยั่งยืน การใช้เทคโนโลยีการกำเนิดพลาสมาความดันบรรยากาศด้วยไฟฟ้าแรงดันสูงมีแนวโน้มส่งผลให้เกิดผลผลิตในวัฏจักรชีวิตพืชสูงสุดต่อการใช้ต้นทุนทรัพยากรน้อยที่สุด เนื่องจากราคาต้นทุนค่าไฟฟ้าน้อย แม้จะจะใช้แรงดันสูงเป็นพันโวลต์ แต่กระแสอยู่ในราวหนึ่งในพันแอมแปร์ และเวลาที่ใช้มีเพียงไม่กี่วินาทีหรือเป็นนาที ยกตัวอย่างเช่น พลาสมาเรืองแสงแบบพ่นเพื่อเร่งการงอกของเมล็ดพันธุ์พืชและการเจริญเติบโตของพืชใช้แรงดันสูง 30 kV กระแส 186 mA ในช่วงเวลา 45 μs คิดเป็นพลังงานไฟฟ้าเพียง 4.11 mW·hr/ครั้ง ในกรณีของการใช้พลาสมากับน้ำเพื่อการเติบโตของพืช หากใช้ไฟฟ้าแรงสูง 30 kVp ที่กระแส 8 Ap ความกว้างพัลส์ราว 110 ns การซ้ำของพัลส์ 250 pps นาน 15 นาที จะเสียพลังงานไฟฟ้าราว 1.7 kW•hr/ครั้ง ซึ่งอาจคิดเป็นค่าไฟฟ้าประมาณ 10 บาทต่อครั้ง เป็นต้น

ในแง่ของการใช้ก๊าซร่วมกับพลาสมาในงานวัฏจักรชีวิตพืช ก๊าซที่มีต้นทุนราคาถูกที่สุดคืออากาศ รองลงมาคือ N_2, O_2, Ar และ He มีราคาแพงเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้พลาสมาเป็นสภาวะกึ่งเสถียรจะสลายไปเมื่อหยุดจ่ายไฟไประยะเวลาหนึ่ง จึงจัดเป็นเทคโนโลยีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เทคโนโลยีนี้จึงมีแนวโน้มที่จะถูกนำมาใช้งานในอนาคต โดยมีทิศทางการพัฒนาแหล่งจ่ายให้มีความถี่สูงแบบพัลส์เพื่อให้มีประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกำเนิดพลาสมาเพิ่มขึ้น ปัจจุบันเครื่องกำเนิดพลาสมาความถี่ต่ำและความถี่สูงมีประสิทธิภาพอยู่ที่ราว 40% และ 96% ตามลำดับ การพัฒนาเครื่องกำเนิดพลาสมาให้มีความถี่สูงควรเน้นให้มีราคาถูกเมื่อเทียบกับระบบความถี่ต่ำ

6. สรุป

จากที่กล่าวมาข้างต้น เทคโนโลยีการกำเนิดพลาสมาความดันบรรยากาศด้วยไฟฟ้าแรงดันสูงมีศักยภาพอย่างครบวงจร ในการยับยั้งหรือฆ่าจุลชีพขนาดเล็กในก๊าซหรือในน้ำ ปรับสภาพเมล็ดพืชให้งอกได้ดี ปลอดจากเชื้อต่างๆ และมีคุณค่าทางโภชนาการเพิ่มขึ้น สามารถเพิ่มธาตุอาหารบางชนิดที่จำเป็นให้กับพืชเพื่อใช้ในการเพาะปลูก คงรักษาสภาพความสดขั้นต้นของผักและผลไม้ในการเก็บรักษาและการขนส่งสินค้า

แต่เดิมนั้นการผลิตพลาสมามักถูกกำเนิดอยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศเป็นหลัก จึงมีต้นทุนด้านระบบสุญญากาศค่อนข้างสูง ในปัจจุบันมีการผลิตพลาสมาที่ความดันบรรยากาศด้วยไฟฟ้าแรงสูงทั้งในก๊าซและในของเหลวกันมากขึ้น เนื่องจากมีส่วนหลักคือไฟฟ้าแรงสูงราวไม่เกิน 50 kV และขั้วอิเล็กโตรดสำหรับกำเนิดพลาสมาเท่านั้น การวิจัยพลาสมาที่ความดันบรรยากาศในก๊าซเท่าที่ผ่านมาส่วนใหญ่เป็น พลาสมาแบบโคโรนา พลาสมาเรืองแสงระหว่างช่องว่างไดอิเล็กตริก พลาสมาเรืองแสงที่ผิวไดอิเล็กตริก และพลาสมาเรืองแสงระหว่างไดอิเล็กตริกแบบพ่น ซึ่งพลาสมาเหล่านี้นอกจากช่วยเพิ่มคุณค่าทางอาหารยังช่วยเร่งการงอกของเมล็ดรวมอีกทั้งช่วยเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตพืชได้อีกทางหนึ่ง

ส่วนการกำเนิดพลาสมาในของเหลวสำหรับงานด้านการเกษตรกรรม ปัจจุบันมีการประยุกต์แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงทั้งแบบไฟฟ้ากระแสตรง กระแสสลับ อิมพัลส์ และ พัลส์ ในการกำเนิดพลาสมาบนผิวน้ำ ในน้ำ และฟองก๊าซในน้ำ พลาสมาที่ผลิตได้นอกจากฆ่าเชื้อได้ยังสามารถช่วยยืดอายุการเก็บรักษาผลผลิตและเมล็ดพันธุ์พืช และช่วยเพิ่มธาตุอาหารในน้ำทำให้พืชมีอัตราการเจริญเติบโตมากขึ้น นอกจากนี้ พลาสมาที่ความดันบรรยากาศยังถูกประยุกต์กับงานด้านอื่นๆ ซึ่งยังไม่ได้นำมา

กล่าวในบทความนี้เช่น การแพทย์ อาหารและยา ความงาม ศัลยกรรมตกแต่ง รวมทั้งงานด้านอุตสาหกรรมการผลิตสมัยใหม่เช่น สิ่งทอ โลหะ และสารกึ่งตัวนำ เป็นต้น

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณท่านอธิการบดี รองศาสตราจารย์ นำยุทธ สงค์ธนาพิทักษ์ และคณะผู้บริหาร เจ้าหน้าที่ คณาจารย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ ทุกท่านที่ได้สนับสนุนด้านการลงทุนการจัดซื้อ เครื่องมือวัด เครื่องมือวิเคราะห์ ด้านไฟฟ้าแรงดันสูงและพลาสมาอีกทั้งได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของเทคโนโลยีสมัยใหม่ซึ่งกำลังมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะในงานอุตสาหกรรมด้านเกษตรกรรมทั่วโลก ขอขอบพระคุณ Prof. Dr. Kiyoshi YOSHIKAWA ที่ได้สนับสนุนด้านการให้ความรู้ ข้อแนะนำ การพาเดินทางไปศึกษาดูงานในมหาวิยาลัยชั้นนำต่างๆ ของประเทศญี่ปุ่น ซึ่งเกี่ยวข้องกับการประยุกต์พลาสมาเพื่อการเกษตร รวมทั้งสนับสนุนด้านการจัดหาเครื่องมือและอุปกรณ์บางส่วน ในการสร้างแหล่งกำเนิดพลาสมาทั้งในก๊าซและในของเหลว

8. เอกสารอ้างอิง

[1] ณรงค์ ศิขิรัมย์, อาหารปลอดภัยนำครัวไทยสู่ครัวโลกและความอยู่รอดของอุตสาหกรรมอาหารไทย, คณะมนุษยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, SDU Res. J. Jan - Jun 2012; 5(1): 71-84.

[2] สำนักงานสถิติแห่งชาติ (ประเทศไทย): ทิศทางการทำงานของแรงงานไทย สืบค้นจาก: http://service.nso.go.th/nso/nsopublish/citizen/news/news_lfsdirect.jsp [สืบค้นเมื่อ 13 ตุลาคม 2559].

[3] UN News Centre: UN projects world population to reach 8.5 billion by 2030, driven by growth in developing countries. Available from: http//www.un.org/appsnews/story.asp?NewsID=51526#.WBWk4nRGzqA [Accessed 13th October 2016].

[4] Solly, E., The influence of electricity on vegetation, Journal of the Horticultural Society (London) 1845; 81-109.

[5] S.L. Miller, H.C. Urey, Organic compound synthesis on the primitive earth, Science 1959; 130 (3370): 245-251.

[6] S. Edward Law, Agricultural electrostatic spray application: a review of significant research and development during the 20th century, Journal of Electrostatics 2001; 51-52: 25-42.

[7] Savostin PW, Magnetic growth relations in plants. Planta 1930; 12:327.

[8] Namba K, Sasao A, Shibusawa S, Effect of magnetic field on germination and plant growth. Acta Hortic. 1995; 399: 143-147.

[9] Atak C, Danilov V, Yurttas B, Yaln S, Mutlu D, Rzakoulieva A, Effects of magnetic field on soybean (Glycine max L.Merrill) seeds. Com JINR. Dubna 1997; 1-13.

[10] Reina FG, Pascual LA, Fundora IA, Influence of a Stationary Magnetic Field on water relations in lettuce Seeds. Part II: Experimental Results. Bioelectromagnetics 2001; 22: 596-602.

[11] Amera AMS, Hozayn M, Magntic water technology, a novel tool to increase growth, yield, and chemical constiuents of lentil (Lens esculenta) under greenhouse condition. Amer.-Eurasian J. Agric. Environ. Sci 2010; 7(4):457-462

[12] Pietruszewski S, Kania K, Effect of magnetic field on germination and yield of wheat. Int. Agrophys 2010; 24:297-302.

[13] Hozayn M, Abd El-Monem AM, Elwia TA, Abdallah MM, Future of magnetic agriculture in arid and semi arid regions (case study). Series A. Agron 2014; 57:197-204.

[14] Alexander F., Introduction to Theoretical and Applied Plasma Chemistry, Plasma Chemistry. UK: Cambridge Univ. Press; 2008, 1-11.

[15] Shishoo R., Trent JM. Introduction – The potential of plasma technology in the textile

industry, Plasma technologies for textiles. USA: Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC; 2002. p. 15-17.

[16] Shalom Eliezer, What is Plasma?, The Fourth State of Matter. Second Edition. UK: IOP Publishing Ltd; 2002. p. 22-48.

[17] Dechthummarong C., High Voltage Power Supply for Generating Atmospheric Pressure Plasma with Surface Glow Discharge, Thai Journal Of Physics, Series 6, 2010; 211-214.

[18] อิทธิพล จักกระโทก และ ชาญชัย เดชธรรมรงค์, อิทธิพลของพลาสมาแรงดันสูงความถี่สูงที่มีผลต่อการปรับสภาพผิวของพอลิเมอร์, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7, 27-29 พฤษภาคม 2558; 1-4.

[19] C. Comninellis, A. Kapalka, S. Malato, S.A. Parsons, I. Poulios, D. Mantzavinos, Advanced oxidation processes for water treatment: advances and trends for R&D, J. Chem. Technol. Biotechnol. 2008; 83: 769–776.

[20] M. Klavarioti, D. Mantzavinos, D. Kassinos, Removal of residual pharmaceuticals from aqueous systems by advanced oxidation processes, Environ. Int. 2009; 35: 402–417.

[21] J.C. Kruithof, P.C. Kamp, B.J. Martijn, UV/H_2O_2 treatment: a practical solution for organic contaminant control and primary disinfection, Ozone Sci. Eng. 2007; 29: 273–280.

[22] R.P. Joshi, S.M. Thagard, Streamer-like electric discharges in water: Part II. Environmental applications, Plasma Chem. Plasma Process. 2013; 33: 17–49.

[23] K Takaki et al., Improvements in plant growth rate using underwater discharge, 7th Inter. Conf. on Applied Electrostatics (ICAES-2012), Journal of Physics: Conference 2013: 418, 012140; 1-7.

[24] Junichiro Takahata et al., Improvement of growth rate of plants by bubble discharge in water, Japanese Journal of Applied Physics, 2015; 54: 1-6.

[25] Marx, E. Deutsches Reichspatent No. 455933, (German Patent).

[26] Shaobo Deng et al., Inactivation of Escherichia coli on Almonds Using Non-thermal Plasma, Food Microb. and Safety, 2007; 72(2): M62-M66.

[27] Leszek Kordas et al., The Effect of Low-Temperature Plasma on Fungus Colonization of Winter Wheat Grain and Seed Quality, Pol. J. Environ. Stud., 2015; 24(1): 433-438.

[28] Pradeep Puligundla et al., Effect of corona discharge plasma jet treatment on decontamination and sprouting of rapeseed (Brassica napus L.) seeds, Food Control, 2017 (Available online 18 July 2016), 71: 376-382.

[29] Ruonan Ma et al., Non-thermal plasma-activated water inactivation of food-bornepathogen on fresh produce, Journal of Hazardous Materials, 2015; 300: 643–651.

[30] Phumon Sookwong et al., Application of Oxygen-argon Plasma as a Potential Approach of Improving the Nutrition Value of Pre-germinated Brown Rice, Journal of Food and Nutrition Research, 2014; 2(12): 946-951.

[31] Natthaporn Khamsen et al., Rice (Oryza sativa L.) Seed Sterilization and Germination Enhancement via Atmospheric Hybrid Non-thermal Discharge Plasma, ACS Applied Mat. and Int., 2016; 8 (30): 19268–19275.

[32] Zhuwen Zhou et al., Introduction of a new atmospheric pressure plasma device and application on tomato seeds, Agricultural Sciences, 2011; 2: 23-27.

[33] Tibor Stolarik et al., Effect of Low-Temperature Plasma on the Structure of Seeds, Growth and Metabolism of Endogenous Phytohormones in Pea (Pisum sativum L.), 2015; 35: 659–676.

[34] Satoshi Kitazaki et al., Plasma induced long-term growth enhancement of Raphanus sativus L. using combinatorial atmospheric air dielectric barrier discharge plasmas, Current Applied Physics, 2014; 14: S14-S153.

[35] Khanit Matra, Non-thermal Plasma for Germination Enhancement of Radish Seeds, Procedia Computer Science, 2016; 86: 132–135.

[36] Renwu Zhou et al., Effects of Atmospheric-Pressure N_2, He, Air, and O_2 Microplasmas on Mung Bean Seed Germination and Seedling Growth, Scientific Reports, 2016; 1-11.

[37] Hartmut Lange, Vacuum UV Radiation of a Plasma Jet Operated With Rare Gases at Atmospheric Pressure, IEEE Transactions On Plasma Science, 2009; 37(6): 859-865.

[38] Tomoyuki Murakami et al., Chemical kinetics and reactive species in atmospheric pressure helium–oxygen plasmas with humid-air impurities, , 2012; 22: 015003.

[39] Rajesh Dorai et al., A model for plasma modification of polypropylene using atmospheric pressure discharges, Journal of Physics D: Applied Physics, 2003; 36(6): 666.

[40] Vernon Cooray et al., On the NOx production by laboratory electrical discharges and lightning, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2009; 71: 1877.

[41] Roger Atkinson, Atmospheric chemistry of VOCs and NOx, Atm. Environ., 2000; 43: 2063–2101.

[42] Chris Miller et al., Gaseous nitric oxide bactericidal activity retained during intermittent high-dose short duration, 2009; 20: 16–23.

[43] Sun, B., Sato, M., and Clements, J.S., Optical study of active species produced by a pulsed streamer corona discharge in water. J. Electrostat., 1997; 39: 189-132.

[44] Wenjuan Bian et al., Nitrogen Fixation Into Water by Pulsed High-Voltage Discharge, IEEE Transactions On Plasma Sci., 2009; 37: 211-218.