

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ได้รวบรวมและอธิบายทฤษฎี ตลอดจนงานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้อง เพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางในการประยุกต์และต่อยอดสู่การพัฒนางานวิจัย ทั้งนี้ การนำเสนอได้แบ่งเป็นหัวข้อย่อยดังต่อไปนี้

2.1.1 พลาสมา (Plasma)

2.1.2 กระบวนการเกิดพลาสมา

2.1.3 ระบบพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ

2.1.4 การกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา (Plasma activation water, PAW)

2.1.5 ระยะเวลาในการกระตุ้น

2.1.6 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำพลาสมา

2.1.7 กลไกการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ของน้ำกระตุ้นพลาสมา

2.1.8 ผักสลัดกรีนโอ๊ค

2.1.9 กลไกการเพิ่มการงอกของเมล็ดด้วยน้ำกระตุ้นพลาสมา

2.1.1 พลาสมา

ในปัจจุบัน ประเด็นเกี่ยวกับ พลาสมา ได้รับการกล่าวถึงและยอมรับในวงกว้าง ทั้งในเชิงทฤษฎีและการประยุกต์ใช้ ว่าพลาสมาเป็นเฟสหนึ่งของสสารหรือมักเรียกกันว่าสถานะหนึ่งของสสาร เช่นเดียวกับของแข็งซึ่งมีโครงสร้างแน่น ของเหลวซึ่งมีการไหลตัวได้และก๊าซซึ่งมีการกระจายตัวสูง โดยทั่วไปแล้ว พลาสมาเป็นตัวกลางที่สามารถนำไฟฟ้าได้ ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคอิสระที่มีประจุลบ (อิเล็กตรอน) ร่วมกับอนุภาคที่มีประจุบวก (ไอออน) รวมทั้งอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ในสถานะสมดุลโดยไม่มีประจุไฟฟ้าหรืออาจประกอบด้วยทั้งอะตอมและโมเลกุลของแก๊ส ในภาพรวมแล้ว จำนวนประจุบวกในพลาสมาจะมีปริมาณใกล้เคียงกับจำนวนประจุลบ คุณสมบัติของพลาสมาถูกแสดงออก

ผ่านพฤติกรรมร่วมหมู่ (Collective behavior) ของอนุภาคที่ประกอบขึ้นเป็นพลาสมา ซึ่งแตกต่างจากพฤติกรรมเชิงเดี่ยว (Individual behavior) ของอนุภาคแต่ละชนิด สสารเกือบทั้งหมดในจักรวาลที่สามารถตรวจพบได้อยู่ในสถานะพลาสมา ไม่ว่าจะเป็นดวงอาทิตย์ ดาวฤกษ์ หรือวัตถุทางดาราศาสตร์อื่น ๆ แม้แต่ปรากฏการณ์เช่น แสงออโรรา (แสงเหนือและแสงใต้) และสายฟ้าก็เป็นพลาสมา ในชีวิตประจำวันเราสามารถพบเห็นพลาสมาได้ในแสงจากแหล่งแสงสังเคราะห์ เช่น ฟลูออเรสเซนต์ ฮาโลเจน และหลอดไฟชนิดอื่นที่ใช้กันในเชิงพาณิชย์ พลาสมาสามารถถูกสร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการโดยการให้ความร้อนแก่แก๊สหรือใช้สนามไฟฟ้าเพื่อเพิ่มอุณหภูมิ จนนำไปสู่การปฏิสัมพันธ์เชิงการชนระหว่างอนุภาคในลักษณะต่าง ๆ และกระบวนการไอออนไนเซชันซึ่งเกิดขึ้นต่อเนื่องและก่อให้เกิดผลลัพธ์ว่าอิเล็กตรอนถูกแยกออกจากไอออนภายในพลาสมา กระบวนการไอออนไนเซชัน (ionization) ในพลาสมาอาจเกิดขึ้นบางส่วนหรือเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ พลาสมาของแก๊สไฮโดรเจนที่ถูกไอออนไนซ์อย่างสมบูรณ์จะประกอบด้วยเพียงอิเล็กตรอนและโปรตอน ซึ่งเป็นนิวเคลียสของไฮโดรเจนเท่านั้น ทำให้มีความซับซ้อนเชิงโครงสร้างต่ำกว่าพลาสมาที่มีสภาวะไอออนเกิดขึ้นบางส่วน ซึ่งยังคงมีอะตอมและโมเลกุลผสมอยู่ ด้วยเหตุนี้ จึงอาจสรุปในเชิงวิชาการได้ว่าพลาสมาของแก๊สไฮโดรเจนที่ถูกไอออนไนซ์อย่างสมบูรณ์คือโครงสร้างพื้นฐานที่สุดของสถานะพลาสมา คำว่า "พลาสมา" ถูกบัญญัติขึ้นโดยเออร์วิง ลางมัวร์ (Irving Langmuir) ในระหว่างการศึกษาเกี่ยวกับการดิสชาร์จในแก๊ส ในปี 1929 ลางมัวร์ ร่วมกับ ลีวี ทงส์ (Lewi Tonk) นักฟิสิกส์อีกท่านหนึ่งซึ่งทำงานในการใช้คำนี้ในสหรัฐอเมริกา มีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยอธิบายบริเวณในการดิสชาร์จที่พบการแกว่งของอิเล็กตรอน (Tonks and Langmuir, 1929) ปรากฏการณ์นี้เมื่อเวลาผ่านไป แนวคิดนี้ถูกเผยแพร่และรู้จักในชื่อ "การแกว่งของพลาสมา" (Plasma oscillation) การศึกษาพลาสมาสมัยใหม่ที่เน้นพฤติกรรมร่วมหมู่อาจถือได้ว่าเริ่มต้นขึ้นระหว่างปี 1951 ถึง 1953 เมื่อนักฟิสิกส์อีกสองท่านคือ เดวิด โบห์ม (David Bohm) และเดวิด ไพนส์ (David Pines) ผลงานชิ้นสำคัญได้ถูกเผยแพร่ในประเด็นที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมร่วมหมู่ของกลุ่มแก๊สของอิเล็กตรอน งานวิจัยของพวกเขาได้ศึกษาปฏิสัมพันธ์ทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ควบคุมหรือกระทบต่อการเคลื่อนที่เป็นจังหวะของอิเล็กตรอน (Bohm and Pines, 1951) ปฏิสัมพันธ์เชิงการชนระหว่างอนุภาค (Bohm and Pines, 1952) และปฏิสัมพันธ์คุลมบ์ รวมถึงปรากฏการณ์การกำบัง (Shielding) (Bohm and Pines, 1953) (บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ ยรรยง, 2564)

ภายใต้สภาวะปกติ แก๊สทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้า แต่เมื่ออุณหภูมิสูงพอ แก๊สจะกลายเป็นตัวนำไฟฟ้า เมื่อค่าพลังงานอุณหภาพ (Thermal energy) สูงขึ้น อะตอมและโมเลกุลถูกกระตุ้นจนเข้าสู่กระบวนการสร้างไอออนจากการชนกัน ทำให้อิเล็กตรอนและไอออนแยกออกจากกัน

เมื่อความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงถึงระดับที่เพียงพอ แก๊สที่ถูกไอออนไนซ์จะเปลี่ยนสถานะเป็นพลาสมา หนึ่งในลักษณะพื้นฐานของพลาสมาคือสภาพกึ่งเป็นกลางทางไฟฟ้า (Quasi-neutrality) ซึ่งหมายถึงสภาพที่จำนวนประจุลบและประจุบวกต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของพลาสมามีค่าใกล้เคียงกัน สภาพกึ่งเป็นกลางทางไฟฟ้าจะเกิดขึ้นเมื่อเมื่อจำนวนอิเล็กตรอนต่อหน่วยปริมาตรเพิ่มขึ้นจนถึงเกณฑ์ที่กำหนดอย่างไรก็ตาม หากจำนวนอนุภาคที่มีประจุชนิดหนึ่งมีมากกว่าประจุชนิดตรงข้าม แรงคั้นตัวขนาดใหญ่จะเกิดขึ้น ดึงดูดกลุ่มอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเป็นขั้วตรงข้ามกันเข้าหากัน และทำให้เกิดการแกว่งของพลาสมาในที่สุด โดยทั่วไปแล้ว พลาสมาเป็นส่วนผสมที่ซับซ้อนของกลุ่มอนุภาคที่ประกอบด้วยชนิดต่าง ๆ ซึ่งแสดงความแตกต่างในเชิงมวล ประจุไฟฟ้า และการเคลื่อนที่เชิงอุณหภาพ เมื่อกล่าวถึงพลาสมาในฐานะสถานะหนึ่งของสสาร ลักษณะโดยรวมของมันจะถูกกำหนดโดยพลังงานและโมเมนตัมของอนุภาคองค์ประกอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอิเล็กตรอน มากกว่าคุณสมบัติทางเคมี การศึกษาอันตรกิริยาที่ซับซ้อนอย่างยิ่งระหว่างอนุภาคจำนวนมากมหาศาลเหล่านี้จำเป็นต้องใช้วิธีการสถิติ อัตราส่วนของจำนวนอนุภาคที่กระจายตัวภายในหนึ่งหน่วยปริมาตรของระบบ (n) และอุณหภูมิ (T) ซึ่งสะท้อนถึงพลังงานของอนุภาค ความหลากหลายเป็นปัจจัยที่ก่อให้เกิดความแตกต่างของค่าของอนุภาคองค์ประกอบในแต่ละประเภทจากกระบวนการการประมวลผลเชิงสถิติชี้ให้เห็นว่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของอนุภาคแต่ละประเภทจะเท่ากับ 1.5 เท่าของผลคูณระหว่างค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ (k_B) กับอุณหภูมิของกลุ่มอนุภาคนั้น คือ $\frac{3}{2} k_B T$ เนื่องจากพลาสมาโดยพื้นฐานเกิดจากแก๊ส ความดันจึงนิยามได้ว่าเป็นปริมาณฟิสิกส์ที่ได้จากการจับคู่ค่าความหนาแน่นของอนุภาคเข้ากับค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ และอุณหภูมิ หรือ $n k_B T$ ตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการจำแนกประเภทของพลาสมาประกอบด้วยความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ซึ่งหมายถึงจำนวนอิเล็กตรอนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (n_e) อุณหภูมิของอิเล็กตรอน (T_e) และองศาการไอออนไนซ์ ซึ่งเป็นสัดส่วนของแก๊สที่ถูกไอออนไนซ์ ตัวแปรสำคัญอีกตัวหนึ่งในพลาสมาคือความยาวเดอบาย (Debye Length) ซึ่งเป็นแนวคิดที่มาจากการศึกษาของ Peter Joseph William Debye และ Erich Hückel ในทฤษฎีอิเล็กโทรไลต์ (Debye และ Hückel, 1923) ความยาวเดอบายในพลาสมาเป็นระยะทางสูงสุดที่ความไม่เหมือนที่ปรากฏระหว่างระบบสามารถรองรับการดำรงอยู่ของประจุทั้งสองขั้ว คือบวกและลบ ได้ในเวลาเดียวกัน กำหนดโดยค่าคงที่ที่คูณด้วยรากที่สองของอัตราส่วนระหว่างค่าที่สะท้อนอุณหภูมิและปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอน: $\lambda_D = 7.43 \times 10^2 (T/n_e)^{1/2}$ ในหน่วยเซนติเมตร โดยที่ T มีหน่วยเป็น eV และ n_e มีหน่วยเป็น cm^{-3} (บุญโชติ เฝ้าสวัสดิ์ชัยรียง, 2564)

ที่ระยะทางสั้นกว่าความยาวเดอบาย ไอออนจะส่งแรงกระทำต่ออิเล็กตรอน ซึ่งทำให้สามารถเกิดพฤติกรรมเชิงเดี่ยวที่แตกต่างกันของกลุ่มอนุภาคแต่ละประเภทได้ อย่างไรก็ตาม ที่ระยะทางที่มากกว่าความยาวเดอบาย พลาสมาจะแสดงพฤติกรรมเสมือนเป็นกลางทางไฟฟ้าและพฤติกรรมร่วมหมู่ ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดข้อกำหนดหนึ่งในการพิจารณาว่าสสารนั้นอยู่ในสถานะพลาสมาหรือไม่ นั่นคือ ขนาดของปริมาตรพลาสมาจะต้องมีขนาดใหญ่กว่าความยาวเดอบายมาก นั่นคือ

$$\lambda_D \ll d$$

เมื่อ d เป็นมิติทั่ว ๆ ไปของระบบพลาสมา เช่น ขนาดของด้านหนึ่งของปริมาตรพลาสมา เส้นผ่านศูนย์กลางของการดิสชาร์จหรือระยะระหว่างขั้วไฟฟ้า เป็นต้น และเมื่อพิจารณาว่าการหาค่าของพารามิเตอร์หลายชนิดด้วยวิธีการคำนวณ ของพลาสมาล้วนอยู่บนพื้นฐานของกระบวนการทางสถิติ จึงจำเป็นต้องมีจำนวนอนุภาคที่หลากหลายน่าเพียงพอที่จะเกิดการแจกแจงเชิงสถิติและสามารถเกิดการกำกับค้ำยรบกวนได้ ดังนั้น ข้อกำหนดอีกประการหนึ่งในการอยู่ในสถานะพลาสมาสามารถเขียนได้ว่า

$$\frac{4}{3} \pi \lambda_D^3 n_e \gg 1$$

ในบริเวณที่พลาสมาไม่ได้อยู่ในสภาวะสมดุล อีกความหมายหนึ่งคือ อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในลักษณะที่สัมพันธ์กับไอออน ก็จะเสมือนว่ามีฟลักซ์เกิดขึ้นภายในพลาสมา อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคภายในทรงกลมที่ใช้กำหนดขอบเขตด้วยรัศมีซึ่งสอดคล้องกับค่า Debye length จุดสังเกตอยู่ที่การปะทะของอนุภาคที่เกิดขึ้นในทรงกลมนั่นเอง ผลรวมของการชนกันระหว่างอนุภาคสองตัวใด ๆ ที่เกิดขึ้นพร้อมกันอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาหนึ่งสามารถประเมินได้ จำนวนของเหตุการณ์การชนต่อหน่วยเวลาคือพารามิเตอร์ของพลาสมาที่เรียกว่า ความถี่ของการชน (collision frequency, ν) อีกหนึ่งพารามิเตอร์สำคัญของพลาสมาคือ ความถี่พลาสมา (ω_e) ค่าความถี่เชิงมุมของการแกว่งของอิเล็กตรอนที่ศึกษาโดย Langmuir และ Tonks เรียกว่าความถี่พลาสมา ซึ่งได้กล่าวถึงก่อนหน้านี้นี้ ความถี่พลาสมาเท่ากับค่าเฉลี่ยความเร็วอนุภาคของอิเล็กตรอนหารด้วยความยาวเดอบาย เขียนได้ว่า $\omega_e = \bar{v}_e / \lambda_D$ ซึ่งเมื่อแทนค่าตัวแปรและค่าคงที่ต่าง ๆ ลงในสมการนี้ จะพบว่าค่าความถี่พลาสมาในหน่วยเฮิรตซ์ (Hz) จะแปรผันตามรากที่สองของความหนาแน่นของอิเล็กตรอน $f_e = 8.97 \times 10^3 (n_e)^{1/2}$ เมื่อ n_e มีหน่วยเป็น cm^{-3} ทั้งนี้จะเห็นได้ในภายหลังว่าความถี่พลาสมาเป็นค่าความถี่ต่ำสุดที่คลื่นใด ๆ สามารถเคลื่อนที่ผ่านพลาสมาได้ แท้จริงแล้ว ข้อกำหนด

เสริมอีกประการที่ใช้ในการที่ก๊าซจะอยู่ในสถานะพลาสมาได้ คือ อัตราการชนกันทั้งหมดของอนุภาค ต้องน้อยกว่าค่าความถี่พลาสมา

$$V \ll \omega_e$$

นั่นหมายถึงอันตรกิริยาของพฤติกรรมรวมหมู่ในพลาสมาจะขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กมากกว่าการชนกัน ทำให้คลื่นที่มีความถี่สูงสามารถเคลื่อนที่ผ่านพลาสมาได้ ส่งผลให้เกิดสนามแรงที่กระทำต่อประจุในระยะทางไกลออกไปจากจุดกำเนิดของคลื่น และเกินกว่าความยาวเดอบาย ซึ่งการให้กำเนิดและคงสภาพพลาสมาไว้จำเป็นต้องอาศัยพลังงานที่เพียงพอสำหรับการไอออไนซ์ในสถานะคงตัว อัตราการไอออไนซ์จะสมดุลกับอัตราการสูญเสียไอออนและอิเล็กตรอน ซึ่งออกไปจากพลาสมาโดยกระบวนการรีคอมบิเนชัน (recombination) และการแพร่ไปสู่ออบ (boundary) นอกบริเวณปริมาตรพลาสมา พลาสมามักถูกอ้างถึงว่าเป็นสถานะที่ 4 หรือเฟสที่ 4 ของสสาร เนื่องจากพลาสมาสามารถเกิดขึ้นได้จากการให้พลังงาน (โดยเฉพาะในรูปของความร้อน) แก่แก๊ส อย่างไรก็ตาม จะไม่ปรากฏการเปลี่ยนเฟสอย่างชัดเจนเมื่อเปลี่ยนจากแก๊สที่เป็นกลางไปเป็นพลาสมา บางครั้งพลาสมาในห้องปฏิบัติการอาจถูกเรียกด้วยชื่อที่แตกต่างกัน เช่น การดิสชาร์จไฟฟ้า (electrical discharge) การดิสชาร์จในแก๊ส (gaseous discharge) หรือการดิสชาร์จแบบเรืองแสง (glow discharge) โดยทั่วไปแล้ว คำว่า "ดิสชาร์จ" มักหมายถึงพลาสมาที่เกิดจากการปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านแก๊สโดยตรง ในยุคแรกนั้น กระบวนการนี้ทำได้โดยการสร้างความต่างศักย์สูงระหว่างขั้วอิเล็กโทรดสองขั้วในท่อแก้วที่บรรจุแก๊สที่มีความดันต่ำ แม้ว่าในปัจจุบันจะมีวิธีการสร้างพลาสมาที่หลากหลายมากขึ้น แต่คำว่า "ดิสชาร์จ" ยังคงเป็นที่ใช้อย่างแพร่หลาย อันที่จริง ในบางบริเวณของการดิสชาร์จ เช่น ในบริเวณชีท (sheath) พฤติกรรมของไอออนและอิเล็กตรอนอาจไม่สอดคล้องกับนิยามของพลาสมาตามแบบแผน ซึ่งเราจะได้ศึกษาในรายละเอียดต่อไป อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติ ความแตกต่างนี้ไม่ได้ส่งผลต่อสภาพของพลาสมาโดยรวมอย่างมีนัยสำคัญ พลาสมาที่เราศึกษาในห้องปฏิบัติการเป็นส่วนหนึ่งของการดิสชาร์จ ดังนั้น เราจึงมักพบการใช้คำเหล่านี้สลับกันอยู่เสมอ (บุญโชติ เฝ้าสวัสดิ์รณรงค์, 2564)

การจำแนกประเภทของก๊าซดิสชาร์จมักแบ่งออกเป็นสองลักษณะใหญ่ คือ Thermal plasma ซึ่งมีอุณหภูมิสูง และ Cold plasma หรือ Non - Thermal plasma ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำ (วุฒิชัย แสงวัง, 2565)

2.1.1.1 พลาสมาอุณหภูมิสูง (Thermal plasma)

พลาสมาอุณหภูมิสูง หมายถึงก๊าซที่อยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อน (Thermal Equilibrium) โดยที่อุณหภูมิของอิเล็กตรอน (T_e) มีค่าเท่ากับอุณหภูมิของไอออน (T_i) และสอดคล้องกับอุณหภูมิของก๊าซ (T_g) การสร้างพลาสมาประเภทนี้มักอาศัยการคายประจุไฟฟ้าในรูปแบบ อาร์คดิสชาร์จ (arc discharge) ซึ่งเกิดจากการป้อนพลังงานไฟฟ้าแรงสูงเข้าสู่อิเล็กโทรด ส่งผลให้เกิดการคายประจุและเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน ปริมาณความร้อนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อุณหภูมิของก๊าซภายในบริเวณดังกล่าวสูงขึ้นมาก และกระตุ้นให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนในวงกว้าง อิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยออกมาจะเคลื่อนที่เข้าชนอะตอมหรือโมเลกุลที่เป็นกลางทางไฟฟ้า ทำให้เกิดการแตกตัวเพิ่มเติมจนจำนวนไอออนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้มวลสารส่วนใหญ่ของระบบอยู่ในรูปไอออน อุณหภูมิที่ได้จากพลาสมาลักษณะนี้มีค่าใกล้เคียงกับเปลวไฟ ซึ่งสะท้อนถึงคุณสมบัติสำคัญคือการมีอุณหภูมิของอนุภาคทุกชนิดอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน นั่นคืออยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อน โดยทั่วไป พลาสมาอุณหภูมิสูงจึงมักถูกนำไปใช้ในกระบวนการเชื่อมโลหะ ตัดโลหะ และงานอุตสาหกรรมที่ต้องการความร้อนสูง (ธีวรรณ บุญญวรรณ, 2561)

2.1.1.2 พลาสมาอุณหภูมิต่ำ (Non-Thermal plasma)

พลาสมาอุณหภูมิต่ำ หรือ พลาสมาแบบไม่ใช้ความร้อน (Non - Thermal plasma) เป็นพลาสมาที่ไม่อยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อน (Non - Thermal Equilibrium) ลักษณะเด่นคืออุณหภูมิของอิเล็กตรอน (T_e) มีค่ามากกว่าอุณหภูมิของก๊าซ (T_g) และอุณหภูมิของไอออน (T_i) อย่างมีนัยสำคัญ พลาสมาประเภทนี้สามารถสร้างได้ภายใต้สภาวะความดันใกล้บรรยากาศ และไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานสูงมากเหมือนพลาสมาร้อน กลไกการเกิดมักมาจากการป้อนพลังงานไฟฟ้าแรงสูงเข้าสู่ขั้วอิเล็กโทรด ส่งผลให้ก๊าซแตกตัวและเกิดการกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าไปชนกับอะตอมหรือโมเลกุลที่เป็นกลาง ทำให้เกิดการแตกตัวเพิ่มเติมและก่อให้เกิดการคงอยู่ของพลาสมาได้แม้ในสภาวะที่อุณหภูมิของก๊าซยังคงต่ำ คุณสมบัติของพลาสมาลักษณะนี้คืออิเล็กตรอนมีพลังงานสูงพอที่จะชนและทำให้ก๊าซแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งสามารถนำไฟฟ้าได้ การแตกตัวดังกล่าวเกี่ยวข้องกับกระบวนการไอออไนเซชัน (ionization) ที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นสามารถก่อให้เกิดแสงสว่างในระหว่างกระบวนการ และมักสัมพันธ์กับการปลดปล่อยพลังงาน เช่น การเปล่งแสงออโรมา หรือการปลดปล่อยแสงแบบโกลว์ดิสชาร์จ (Glow discharge) ซึ่งเป็นพื้นฐานที่นำไปใช้ในงานด้านต่าง ๆ เช่น การเคลือบบาง (Thin film deposition) การฆ่าเชื้อ และการปรับปรุงพื้นผิววัสดุ (ธีวรรณ บุญญวรรณ, 2018)

2.1.2 กระบวนการเกิดพลาสมา (อัจฉราภรณ์ บุญมา, 2556)

2.1.2.1 การเกิดเป็นไอออน (Ionization)

การเกิดไอออนในพลาสมาที่อยู่ภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศสูงเกิดจากการที่อิเล็กตรอนพลังงานสูงเคลื่อนที่ชนกับโมเลกุลหรืออะตอมในก๊าซ การชนดังกล่าวทำให้อิเล็กตรอนถ่ายเทพลังงานไปยังอนุภาคที่ถูกชน ส่งผลให้โมเลกุลหรืออะตอมสูญเสียอิเล็กตรอนจนเปลี่ยนเป็นไอออน ขณะเดียวกันอาจปลดปล่อยแสงออกมาในลักษณะ โกลว์ดิสชาร์จ (Glow discharge) ทำให้พลาสมามีการเรืองแสง โดยแสงดังกล่าวจะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นได้ (400–700 นาโนเมตร) หรืออาจอยู่ในย่านรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) ทั้งนี้ การแผ่รังสีแสงดังกล่าวถือเป็นลักษณะเฉพาะของพลาสมาที่เกิดจากการแตกตัวเป็นไอออน และเป็นหลักการที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในงานหลากหลาย เช่น การฆ่าเชื้อ การประยุกต์ใช้ด้านแสงสว่าง หรือการเคลือบผิววัสดุ (จิรธรณ บุญญวรรณ, 2018) กระบวนการนี้สามารถอธิบายได้ด้วยสมการการแตกตัวและพลังงานที่เกี่ยวข้อง ดังแสดงในสมการที่ 2.1, 2.2 และ 2.3

พลังงานไอออนไนเซชันของอาร์กอน (Ionization energy of Argon)

1) กระบวนการไอออนไนซ์ครั้งแรกสามารถแสดงได้ดังนี้:



โดยมีค่าพลังงานที่ต้องใช้เท่ากับ 15.7 eV

2) สำหรับการไอออนไนซ์ครั้งที่สอง:



ซึ่งต้องใช้พลังงาน 27.6 eV

3) ส่วนการไอออนไนซ์ครั้งที่สาม:



ต้องใช้พลังงานสูงขึ้นไปเป็น 40.7 eV

2.1.2.2 การถูกกระตุ้น (Excitation)

กระบวนการกระตุ้นเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนถ่ายเทพลังงานไปยังอะตอม ทำให้อะตอมนั้นย้ายไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่าปกติ โดยไม่ถึงขั้นกลายเป็นไอออน การเปลี่ยนแปลงนี้สะท้อนถึงการที่อะตอมอยู่ในสภาวะกระตุ้น (Excited state) ซึ่งต้องการพลังงานน้อยกว่าการแตกตัวเป็นไอออนเต็มรูปแบบ กลไกดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (2.4)



2.1.2.3 การแยกตัวออก (Dissociation)

กระบวนการแยกตัวออกหมายถึงการที่โมเลกุลถูกชนหรือถูกกระตุ้นจนพันธะทางเคมีแตกออก กลายเป็นอะตอมอิสระหรืออนุภาคย่อย เช่น ในกรณีของโมเลกุลออกซิเจนเมื่อได้รับพลังงานจากการชนของอิเล็กตรอน จะสามารถแตกตัวออกเป็นอะตอมออกซิเจนสองอะตอมได้ ปรากฏการณ์นี้สามารถเขียนแทนด้วยสมการ (2.5)



ผลจากการแยกตัวของโมเลกุลมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาเคมีเนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความว่องไวต่อปฏิกิริยามากกว่าอะตอมที่ยังไม่แตกตัว การแตกตัวนี้อาจเกี่ยวข้องกับการเกิดเป็นไอออน (Ionization) หรือเป็นการแตกพันธะที่ไม่ทำให้เกิดไอออน ซึ่งเรียกว่า dissociative ionization ทั้งสองกรณีสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ (2.6) และ (2.7)



พลาสมาที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเหล่านี้มีคุณสมบัติสำคัญคือการแผ่รังสีในลักษณะ Glow discharge ซึ่งเกิดจากอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงชนกับอะตอมหรือโมเลกุลแล้วทำให้เปลี่ยนสภาพไปสู่สถานะกระตุ้น พลังงานที่สะสมอยู่ในอะตอมเหล่านั้นจะถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของแสงภายในช่วงเวลาสั้นๆ ประมาณ 10–18 วินาที การแผ่รังสีนี้สามารถอยู่ในช่วงแสงที่ตามองเห็น (Visible light) ทำให้พลาสมามีการเปล่งแสงออกมาอย่างชัดเจน

2.1.2.4 การแลกเปลี่ยนประจุ (Charge exchange)

การแลกเปลี่ยนไอออนเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นได้ง่ายระหว่างอะตอมและโมเลกุล ซึ่งมีการถ่ายเทพลังงานหรือประจุระหว่างกัน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะทางไฟฟ้าเคมีของอนุภาคที่เกี่ยวข้อง กลไกดังกล่าวสามารถแสดงได้ด้วยสมการ (2.8) และ (2.9)



แม้โดยทั่วไปอะตอมอาจไม่เกิดปฏิกิริยาระหว่างกัน แต่ก็สามารถเกิดการถ่ายโอนประจุได้ภายใต้เงื่อนไขเฉพาะ ตัวอย่างหนึ่งคือปฏิกิริยาระหว่างทองแดงไอออนกับอะตอมอาร์กอน ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามสมการ (2.10)



2.1.2.5 การถ่ายเทโมเมนตัม (Momentum transfer)

กระบวนการนี้มีบทบาทสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมระหว่างการชนกันของอนุภาค เช่น อิเล็กตรอนกับอะตอม อย่างไรก็ตามในการปลดปล่อยแสงแบบโกลว์ดีสชาร์จ (Glow discharge) ผลของการถ่ายโอนโมเมนตัมของอิเล็กตรอนไม่ใช่ตัวแปรที่มีอิทธิพลหลักนัก แต่ยังคงเป็นหนึ่งในกลไกที่เอื้อต่อการเกิดพลาสมา โดยเฉพาะในระบบที่ใช้ก๊าซเป็นตัวกลาง ตัวอย่างสมการที่เกี่ยวข้องแสดงใน (2.11) และ (2.12)



2.1.3 ระบบพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ

โดยทั่วไป การสร้างพลาสมาภายใต้ความดันบรรยากาศจัดเป็นความท้าทายที่สำคัญ เนื่องจากก๊าซในสภาวะนี้มีความหนาแน่นสูงและอัตราการชนกันของอนุภาคมีมาก ส่งผลให้การถ่ายโอนพลังงานจากสนามไฟฟ้าไปสู่อิเล็กตรอนทำได้ยากกว่าสภาวะสุญญากาศ ดังนั้น การออกแบบระบบพลาสมาลักษณะนี้จำเป็นต้องใช้เทคนิคเฉพาะ เช่น การประยุกต์แหล่งจ่ายไฟตรง (DC) ที่ควบคุมแรงดันและระยะช่องว่างเพื่อจุดประกายไฟฟ้า การจ่ายพลังงานเช่นนี้จะทำให้ก๊าซแตกตัวจนเกิดการคงอยู่ของพลาสมาในสภาวะจริง พลาสมาที่ความดันบรรยากาศสามารถสร้างได้จากหลาย

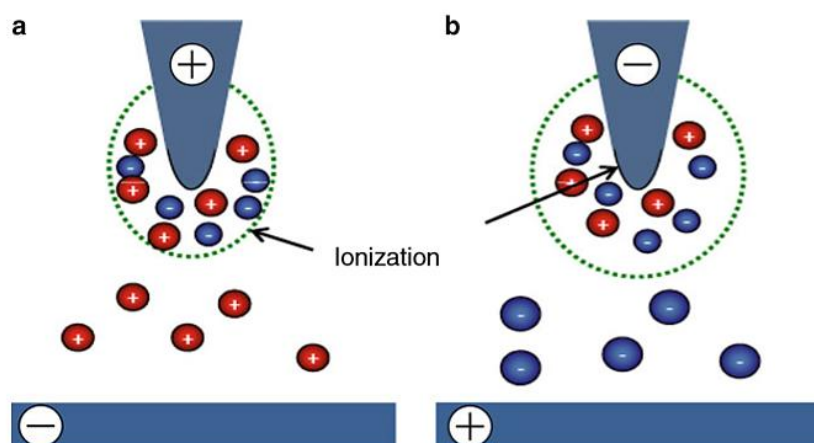
วิธีการ ตัวอย่างที่ใช้กันแพร่หลาย ได้แก่ Plasma needle, Dielectric Barrier discharge, Corona discharge, Micro hollow cathode discharge, One atmospheric uniform glow discharge, Gliding arc discharge, Atmospheric pressure plasma jet แต่ละเทคนิคมีคุณลักษณะเด่นและข้อจำกัดของแต่ละแนวทางไม่เหมือนกัน จึงต้องเลือกให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ เช่น การฆ่าเชื้อโรค การปรับปรุงพื้นผิววัสดุ การใช้ในด้านชีวการแพทย์ ตลอดจนงานวิจัยที่ต้องการควบคุมปฏิกิริยาเคมีเฉพาะ พลาสมาที่เกิดขึ้นในสถานะความดันบรรยากาศยังคงมีองค์ประกอบของอิเล็กตรอน ไอออน และเรดิคัลอิสระ ซึ่งส่วนใหญ่มีพลังงานต่ำ คุณสมบัตินี้ทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการจำกัดผลกระทบทางความร้อน เช่น การประยุกต์ในสิ่งมีชีวิตหรือวัสดุที่ไวต่ออุณหภูมิสูง ดังนั้น พลาสมาประเภทนี้จึงถูกนำมาใช้ในงานวิจัยและอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในด้านการผลิตวัสดุ การแปรรูปอาหาร และการแพทย์ (ธีววรรณ บุญญวรรณ, 2563) โดยคุณสมบัติของพลาสมาโดยการดิสชาร์จที่ความดันบรรยากาศ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของพลาสมาโดยการดิสชาร์จที่ความดันบรรยากาศ

	ดิสชาร์จโคโรนา	ดิสชาร์จข้ามฉนวน	เจ็ทพลาสมา	พลาสมาพุ่งแสงดีซี
ลักษณะอิเล็กโทรด	โลหะปลายแหลม	ฉนวนไฟฟ้าคั่นระหว่างกลางแบนโค้ง	ควบประจุ ความถี่สูง	คาโทดเป็นโพรง
วิธีดิสชาร์จ	pulsed DC	AC หรือ RF	RF 13.5 MHz	DC
ความดัน (atm)	≈1	≈1	≈1	≈1
พลังงานอิเล็กตรอน (eV)	5 แปรค่า	1-10	1-2	-
ความหนาแน่นอิเล็กตรอน (cm ⁻³)	10 ⁹ -10 ¹³ แปรค่า	≈10 ¹² -10 ¹⁵	10 ¹¹ -10 ¹²	-
ศักย์แรงดัน (kV)	10-50	5-25	0.05-20	-
การปรับขนาดได้	ไม่ได้	ได้	ได้	ได้
อุณหภูมิพลาสมา T (K)	อุณหภูมิห้อง	เฉลี่ยเท่าอุณหภูมิก๊าซ (≈300)	400	2000
ก๊าซพา	-	Rare gas/ rare gas halides	ฮีเลียม (He) อาร์กอน (Ar)	แก๊สเฉื่อย, ฮาโลด์ของแก๊สเฉื่อย

ระบบพลาสมาที่ความดันบรรยากาศสามารถแบ่งได้ 2 กลุ่มหลัก ๆ คือ

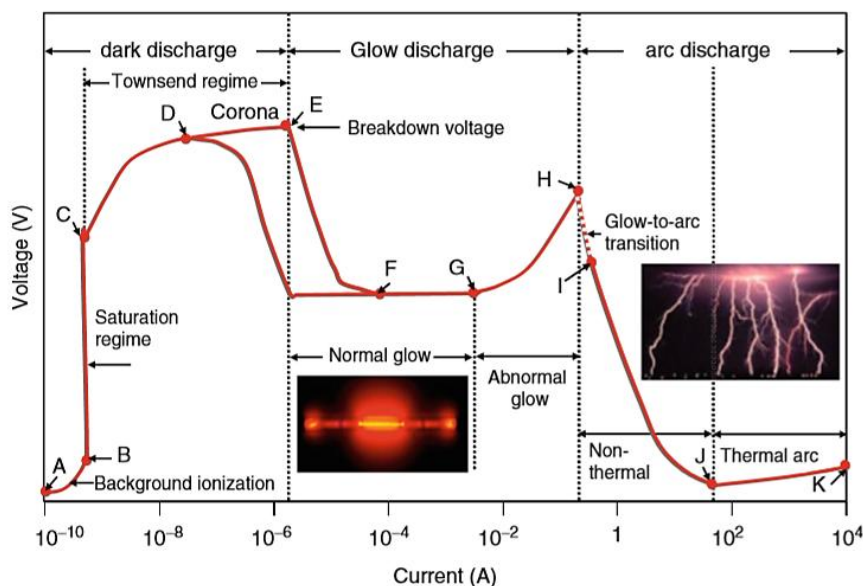
1) ดิสชาร์จโคโรนา (Corona discharge): การคายประจุไฟฟ้าในลักษณะโคโรนาจะเกิดขึ้นเมื่อมีการใช้ขั้วไฟฟ้าที่มีปลายแหลมหรือมีพื้นที่หน้าตัดเล็ก ทำให้เกิดความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงมากบริเวณปลายขั้วไฟฟ้านั้น สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอนี้ก่อให้เกิดการแตกตัวของก๊าซรอบ ๆ ขั้วไฟฟ้า ทำให้เกิดการคายประจุในรูปแบบโคโรนา ลักษณะของการปล่อยประจุไฟฟ้าเช่นนี้แตกต่างจากการคายประจุไฟฟ้าทั่วไป เนื่องจากจะกระจายอยู่เฉพาะบริเวณรอบขั้วไฟฟ้าแหลมและไม่ได้แพร่ไปทั่วทั้งก๊าซโดยรอบ การคายประจุโคโรนาสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทหลัก ได้แก่ โคโรนาขั้วบวก (Positive corona discharge) และ โคโรนาขั้วลบ (Negative corona discharge) สำหรับโคโรนาขั้วบวก เมื่อความเข้มของสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นที่บริเวณปลายแหลมของขั้วบวก จะทำให้เกิดการคายประจุที่แปรผันเป็นจังหวะ เช่น Burst pulse corona หรืออาจเกิดการคายประจุในลักษณะ Streamer corona ซึ่งมีเส้นทางการแตกตัวคล้ายสายฟ้าเล็ก ๆ หากสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องก็อาจพัฒนาไปสู่ Glow corona ที่มีการคายประจุเรืองแสงต่อเนื่อง ในขณะที่โคโรนาขั้วลบ อิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยจากปลายขั้วลบจะเร่งความเร็วและทำให้เกิดการชนกับโมเลกุลก๊าซ ส่งผลให้เกิดการคายประจุแบบต่าง ๆ เช่น Trichel pulse corona ซึ่งเป็นการคายประจุที่เกิดขึ้นถี่และสม่ำเสมอ หรือในบางกรณีอาจเป็นแบบ Pulseless corona ที่การคายประจุเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยไม่เป็นจังหวะชัดเจน ลักษณะทั้งหมดนี้แสดงให้เห็นความซับซ้อนของโคโรนาที่สามารถพัฒนาไปสู่การเกิดสปาร์ก (Spark) ได้หากความเข้มของสนามไฟฟ้าเพิ่มสูงมากเกินไป (ศักดิ์นันท์ แรมจันทิก, 2565) โดยสามารถแสดงการเปรียบเทียบการปล่อยโคโรนาเชิงบวกและเชิงลบได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเปรียบเทียบการปล่อยโคโรนาเชิงบวกและเชิงลบ

ที่มา: Maher I. Boulos et al. (2023)

2) ดิสชาร์จจรัสแสง (Glow discharge): การคายประจุไฟฟ้าในรูปแบบเรืองแสง หรือ DC glow discharge เกิดขึ้นเมื่อก๊าซได้รับแรงดันไฟฟ้าที่เพียงพอทำให้เกิดการแตกตัว โดยปรากฏการณ์นี้สามารถสังเกตได้จากการที่ก๊าซเปล่งแสงออกมา ลักษณะของการเรืองแสงขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซที่ใช้ ความดัน รวมถึงระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า โดยทั่วไปจะปรากฏเป็นแถบแสงเรืองอยู่ในช่วงระหว่างแคโทดกับแอโนด ความหนาแน่นและสีของแถบแสงอาจแตกต่างกันตามสภาวะและชนิดของก๊าซที่ใช้ การคายประจุชนิดนี้เป็นพื้นฐานที่สำคัญในการทำงานของหลอดไฟนีออน รวมทั้งเป็นหลักการเบื้องต้นของการพัฒนาพลาสมา เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น สนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดการเร่งอิเล็กตรอนที่ปล่อยออกมา กระบวนการชนซ้ำ ๆ ระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมก๊าซนำไปสู่การแตกตัวของก๊าซมากขึ้น ทำให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งการคายประจุชนิดนี้จะไม่เพิ่มขึ้นอย่างไร้ขีดจำกัด แต่จะมีการแบ่งเป็นหลายช่วง เช่น Townsend discharge, Normal glow, Abnormal glow, จนกระทั่งเข้าสู่ Arc discharge หากแรงดันสูงมากเกินไป กระบวนการนี้แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงลักษณะของพลาสมาตามเงื่อนไขแรงดันและกระแสที่ต่างกัน การทำความเข้าใจลักษณะเหล่านี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการออกแบบระบบไฟฟ้าแรงสูง การผลิตหลอดไฟ และการสร้างพลาสมาในงานอุตสาหกรรม (ศักดิ์นันท์ แรมจันติก, 2565) โดยสามารถแสดงโครงสร้างและหลักการเกิดการคายประจุไฟฟ้างดรูปที่ 2.2



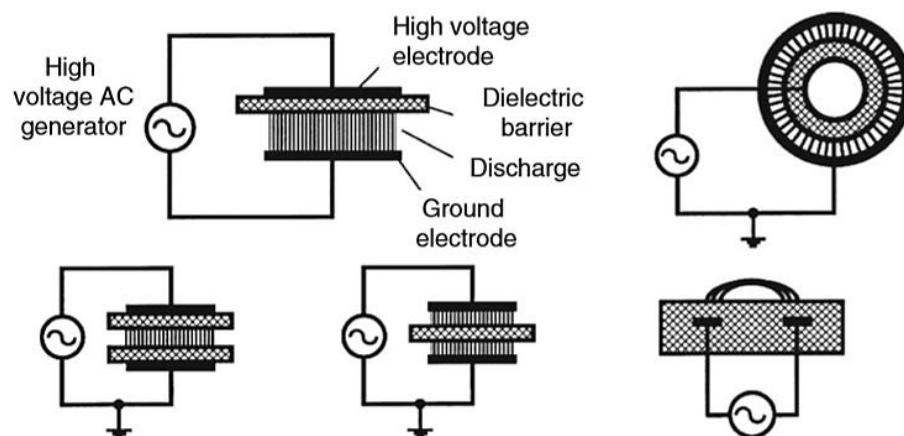
รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างและหลักการเกิดการคายประจุไฟฟ้า

ที่มา: Maher I. Boulos et al. (2023)

โดยจะมีไดอิเล็กทริกหรือฉนวนร่วม สามารถแบ่งย่อยได้อีก 3-4 รูปแบบ ดังนี้

การดิสชาร์จข้ามฉนวน (dielectric barrier discharge) การคายประจุไฟฟ้าลักษณะนี้เกิดขึ้นระหว่างขั้วไฟฟ้าที่ถูกแยกด้วยฉนวนหรือวัสดุไดอิเล็กทริก ซึ่งมีหน้าที่ป้องกันไม่ให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านต่อเนื่อง ผลที่ตามมาคือการคายประจุจะเกิดขึ้นในรูปแบบกระแสไฟฟ้าสั้น ๆ และกระจายเป็นหลายจุดเล็ก ๆ แทนที่จะเป็นกระแสถาวร วิธีการดังกล่าวจึงถูกเรียกว่า ดิสชาร์จเงียบ (Silent discharge) เนื่องจากไม่มีเสียงดังหรือการเปล่งประกายไฟชัดเจนเหมือนการคายประจุประเภทอื่น คุณสมบัติเด่นของการดิสชาร์จชนิดนี้คือสามารถสร้างพลาสมาได้ที่มีความดันบรรยากาศโดยไม่ต้องพึ่งสภาวะสุญญากาศหรือตัวกลางเฉพาะ และยังมีประสิทธิภาพสูงในการผลิตอนุภาคชนิดกัมมันต์ เช่น อิเล็กตรอน ไอออน และเรดิคัล ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการกระตุ้นปฏิกิริยาเคมี ตัวอย่างการใช้งาน ได้แก่ ระบบบำบัดมลพิษทางอากาศ การย่อยสลายก๊าซพิษ การกำจัดกลิ่น การปรับปรุงคุณสมบัติของพื้นผิววัสดุ ไปจนถึงการใช้ในการแพทย์และอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจาก DBD สามารถทำงานได้ภายใต้ความดันบรรยากาศ จึงเป็นทางเลือกที่สะดวกและคุ้มค่าสำหรับงานอุตสาหกรรมที่ต้องการการประมวลผลขนาดใหญ่ เช่น การฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ การสลายสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) การกระตุ้นปฏิกิริยาโฟโตเคมี รวมถึงการผลิตโอโซน ซึ่งเป็นการประยุกต์ที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางในระบบบำบัดน้ำและอากาศ (ศักดิ์นันท์ แรมจันทิก, 2565) โดยสามารถแสดงแผนภาพการกำหนดค่าการปล่อยสิ่งกีดขวางอิเล็กทริกขนาดทั่วไปและทรงกระบอก ดังรูปที่

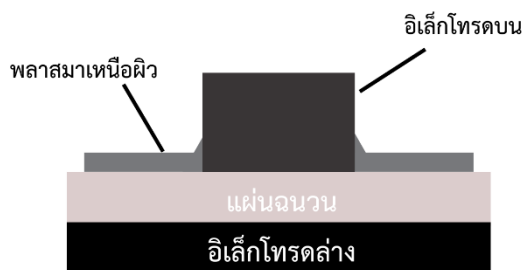
2.3



รูปที่ 2.3 การกำหนดค่าการปล่อยสิ่งกีดขวางอิเล็กทริกขนาดทั่วไปและทรงกระบอก

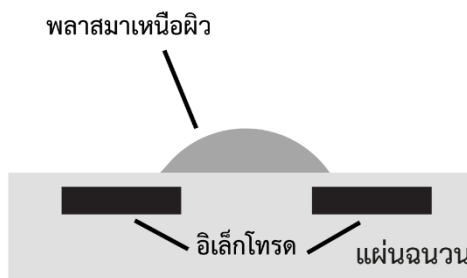
ที่มา: Maher I. Boulos et al. (2023)

การดิสชาร์จเหนือผิว (surface discharge) องค์ประกอบของอุปกรณ์ชนิดนี้ถูกออกแบบให้แผ่นอิเล็กโทรดอยู่ชิดกับวัสดุฉนวนที่ใช้เป็นตัวกั้นระหว่างขั้วไฟฟ้า ทำให้เกิดพลาสมากระจายบนผิวของแผ่นฉนวน อันเนื่องมาจากการคายประจุบน ผิวของฉนวน วิธีนี้ใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าแบบแรก และถูกดัดแปลงเป็นแบบที่ 3 แสดงการเกิดพลาสมาแบบการดิสชาร์จเหนือผิว ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงการเกิดพลาสมาแบบการดิสชาร์จเหนือผิว ที่มา: ชีรวรรณ บุญญวรรณ (2563)

การดิสชาร์จร่วมระนาบ (coplanar discharge) วิธีนี้เปลี่ยนเป็นให้โครงสร้างถูกออกแบบโดยให้อิเล็กโทรดถูกบรรจุอยู่ในชั้นฉนวน พลาสมาจะเกิดจากการคายประจุบนผิวของฉนวน แต่เนื่องจากอิเล็กโทรดถูกบรรจุอยู่ในชั้นฉนวน จึงต้องใช้แรงดันไฟฟ้าสูงกว่าแบบที่สองอยู่เล็กน้อย แสดงการเกิดพลาสมาแบบดิสชาร์จร่วมระนาบ ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงการเกิดพลาสมาแบบดิสชาร์จร่วมระนาบ ที่มา: ชีรวรรณ บุญญวรรณ (2563)

เจ็ทพลาสมา (Plasma jet)

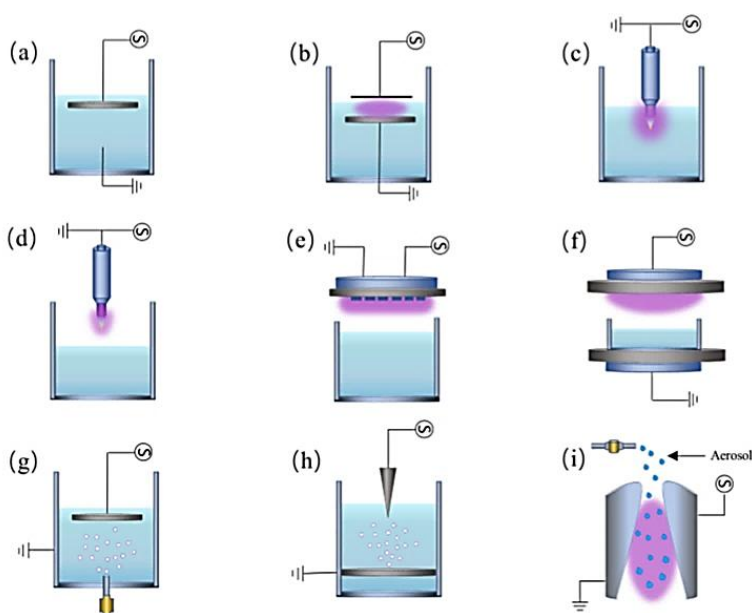
เจ็ทพลาสมาภายใต้ความดันบรรยากาศจัดเป็นพลาสมาอุณหภูมิต่ำประเภท Volumetric diffuse non - thermal plasma ที่มีความโดดเด่นคือไม่จำเป็นต้องใช้ระบบสุญญากาศเพื่อสร้างสภาวะพลาสมา ทำให้การใช้งานสะดวกและยืดหยุ่น เหมาะสำหรับการประยุกต์ทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและเชิงอุตสาหกรรม หลักการทำงานพื้นฐานคือการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับก๊าซพาหะ เช่น ฮีเลียม อาร์กอน ไนโตรเจน หรือก๊าซเฉื่อยชนิดอื่น ๆ เพื่อสร้างลำพลาสมา และในบางกรณีอาจ

เติมก๊าซปฏิกิริยาอย่างออกซิเจนหรือไฮโดรเจน เพื่อเสริมประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาเคมีกับพื้นผิวหรือตัวอย่างชีวภาพ พลาสมาเจ็ทมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยอิเล็กโทรดซึ่งทำหน้าที่จุดกำเนิดพลาสมา และช่องทางให้อากาศหรือก๊าซพาหะไหลผ่าน เมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมจะเกิดการแตกตัวของก๊าซ กลายเป็นลำพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่คงอยู่ในสภาพเสถียร และสามารถส่งผ่านออกไปในบรรยากาศโดยไม่ต้องพึ่งระบบสุญญากาศเสริม ความเสถียรของลำพลาสมาขึ้นอยู่กับชนิดก๊าซที่ใช้ ปริมาณการไหล (Gas flow) และรูปแบบการจ่ายแรงดันไฟฟ้า

ระบบสร้างเจ็ทพลาสมามีหลายรูปแบบ เช่น การใช้แหล่งกำเนิดความถี่วิทยุ (RF generator) การใช้แหล่งไฟแรงดันสูง (HF high voltage generator) หรือระบบกำเนิดพัลส์สั้นในระดับนาโนวินาที (Nanosecond pulse generator) แต่ละแบบถูกออกแบบเพื่อตอบสนองต่อการใช้งานที่แตกต่างกัน เช่น งานทางการแพทย์ที่ต้องการความแม่นยำและไม่ทำลายเนื้อเยื่อ งานบำบัดมลพิษทางอากาศ งานปรับปรุงคุณสมบัติพื้นผิว หรือแม้แต่การผลิตโอโซนในเชิงอุตสาหกรรม เจ็ทพลาสมามีข้อได้เปรียบคือสามารถปรับใช้ได้หลากหลายและครอบคลุม ตั้งแต่การฆ่าเชื้อจุลินทรีย์และการบำบัดน้ำ ไปจนถึงการวิจัยพื้นฐานด้านปฏิกิริยาพลาสมา โดยมีประสิทธิภาพสูงแม้ทำงานในบรรยากาศที่ความดันปกติ ซึ่งถือเป็นคุณสมบัติที่สำคัญต่อการประยุกต์ใช้งานจริง (ศักดิ์นันท์ แรมจันทิก, 2565)

ระบบพลาสมาภายใต้ความดันบรรยากาศที่อาศัยการคายประจุข้ามฉนวน หนึ่งในตัวอย่างคือเจ็ทพลาสมา ซึ่งต้องใช้ แหล่งพลังงานไฟฟ้าแรงดันสูง เพื่อจุดกำเนิดการแตกตัวของก๊าซ โดยแรงดันที่ใช้งานมักอยู่ในช่วงกิโลโวลต์ถึงหลายร้อยกิโลโวลต์ และอาจเลือกใช้ความถี่ในย่านกิโลเฮิรตซ์ จนถึงเมกะเฮิรตซ์ หรือแม้แต่แหล่งกำเนิดแบบพัลส์ ขึ้นอยู่กับการออกแบบระบบ อิเล็กโทรด ที่ใช้ในเจ็ทพลาสมามีหลายลักษณะ เช่น แบบเข็มโลหะ แบบฝังในฉนวน หรือขั้วไฟฟ้าที่จัดเรียงให้ตรงข้ามกัน การเลือกโครงสร้างของอิเล็กโทรดมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของลำพลาสมาที่เกิดขึ้น ทั้งในแง่ความเข้ม ความยาว และความเสถียรของไอออนไนซ์ เมื่อก๊าซพาหะถูกจ่ายผ่านอิเล็กโทรดและได้รับแรงดันไฟฟ้าเหมาะสม จะเกิดการแตกตัวและปล่อยออกมาเป็น ลำพลาสมาเจ็ท ที่สามารถคงอยู่ได้ในบรรยากาศปกติ ขึ้นอยู่กับชนิดก๊าซและเงื่อนไขการทำงาน หากเติมก๊าซปฏิกิริยา เช่น ออกซิเจนหรือไนโตรเจน จะทำให้ลำพลาสมามีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับตัวอย่างหรือพื้นผิวเพิ่มขึ้น อีกหนึ่งการประยุกต์ที่สำคัญคือการสร้าง น้ำพลาสมากระตุ้น (Plasma Activated Water: PAW) โดยให้ลำพลาสมาฉายไปบนผิวน้ำ ทำให้เกิดสารออกฤทธิ์ที่มีความสามารถในการยับยั้งจุลินทรีย์และปรับเปลี่ยนสมบัติของสารละลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ยังมีการพัฒนาเทคนิคอื่น ๆ ที่คล้ายคลึงกัน เช่น การคายประจุไฟฟ้าโดยตรงภายในของเหลว หรือการปล่อยประจุไฟฟ้าบริเวณผิว

ของเหลว ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันไปตามสภาวะที่ใช้ ลักษณะของการคายประจุถือเป็นตัวแปรหลักที่กำหนดประสิทธิภาพในการสร้างพลาสมา น้ำพลาสมากระตุ้น (PAW) มักถูกผลิตขึ้นผ่านกระบวนการใช้พลาสมาเย็นในบรรยากาศ (Atmospheric Cold Plasma, ACP) ซึ่งสามารถทำได้ใน 3 รูปแบบหลัก ได้แก่ การปล่อยประจุไฟฟ้าโดยตรงในของเหลว (รูปที่ 2.6 a-c), การปล่อยประจุไฟฟ้าในก๊าซเหนือผิวหน้าของของเหลว (รูปที่ 2.6 d-f) และการปล่อยประจุไฟฟ้าแบบหลายเฟส เช่น การปล่อยประจุไฟฟ้าในฟองอากาศภายในของเหลว (รูปที่ 2.6 g และ h) หรือการปล่อยประจุไฟฟ้าในละอองของเหลวหรือโฟม (รูปที่ 2.6 i)

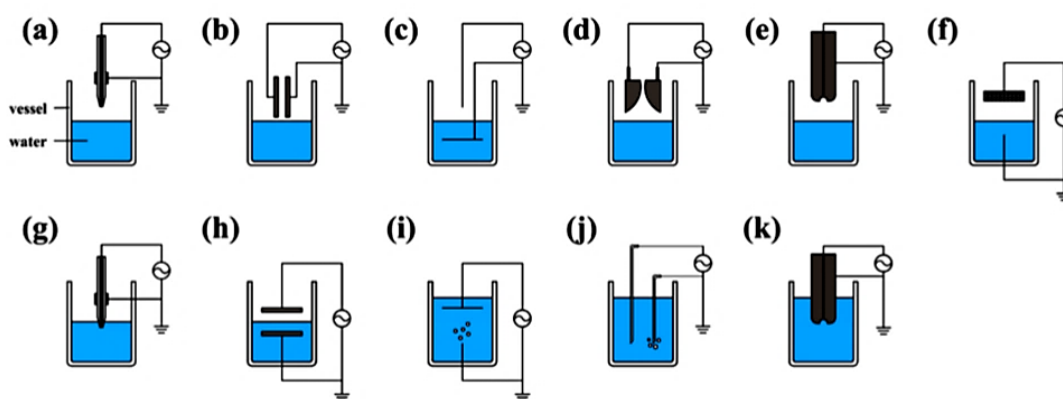


รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงการปล่อยประจุไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ ที่ใช้ในการเตรียมของเหลวที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมา (a, b) การปล่อยประจุโดยตรงในของเหลว (c) พลาสมาเจ็ตที่สัมผัสโดยตรงกับของเหลว. (d) การปล่อยประจุในเฟสก๊าซเหนือของเหลว. (e, f) การปล่อยประจุไฟฟ้าแบบเกราะไดอิเล็กทริกเหนือของเหลว (g) การปล่อยประจุโคโรนาในฟองอากาศ. (h) การปล่อยประจุในฟองอากาศแบบพลาสมา. (i) การปล่อยประจุแบบโค้งเลื้อนกับละออง

ที่มา: Xiang, Q et al. (2022)

กระบวนการผลิตน้ำพลาสมากระตุ้น (Plasma Activated Water: PAW) สามารถทำได้จากหลายเทคนิคการดิสชาร์จ เช่น Dielectric barrier discharge (DBD), Gliding arc discharge, Plasma jet รวมถึงการคายประจุไฟฟ้าขนาดเล็กบนพื้นผิว (surface micro-discharge, SMD) แต่

ละวิธีมีข้อเด่นในการสร้างชนิดของอนุภาคออกฤทธิ์ที่ต่างต่างกัน ส่งผลต่อคุณสมบัติของ PAW ที่ได้ งานวิจัยจำนวนมากได้พัฒนา ต้นแบบเครื่องกำเนิด PAW โดยใช้เทคนิคดีสชาร์จเหล่านี้เพื่อให้ได้ ปริมาณและคุณภาพที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น Andrasch et al. (2017) รายงานการใช้ระบบ PLeXC² เพื่อสร้างน้ำพลาสมาที่สามารถลดปริมาณจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนการศึกษาโดย Schnabel et al. (2020) พบว่าสามารถผลิต PAW ที่มีปริมาตรประมาณ 0.5 ลิตรต่อชั่วโมงโดยใช้ ระบบที่ออกแบบเฉพาะสำหรับการควบคุมความเสถียรของพลาสมา ในเชิงปฏิบัติ การสร้างน้ำ พลาสมาสามารถทำได้จากหลากหลายวิธี เช่น Spark discharge, Microwave discharge, Corona discharge และ Glow discharge เป็นต้น แต่ละวิธีให้อนุภาคกัมมันต์ต่างกันไป เช่น ไฮโดรเจน เปอร์ออกไซด์ ไนไตรท์ หรือไนเตรต ซึ่งเป็นสารสำคัญที่มีบทบาทต่อคุณสมบัติในการยับยั้งจุลินทรีย์ และการประยุกต์ใช้ในด้านเกษตร อาหาร และการแพทย์ ซึ่งรูปแบบการคายประจุพลาสมาที่ใช้ในการ กระตุ้นน้ำ แบบเหนือน้ำและแบบใต้น้ำ แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 รูปแบบการคายประจุพลาสมาที่ใช้ในการกระตุ้นน้ำ แบบเหนือน้ำ (a-f) แบบใต้น้ำ (g-k)

ที่มา: อธิวรรณ บุญญวรรณ (2564)

2.1.4 การกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา (Plasma activation water, PAW)

น้ำพลาสมากระตุ้นสามารถสร้างได้โดยอาศัย 2 แนวทางหลัก ได้แก่ การฉาย พลาสมาไปบนผิวน้ำโดยตรง (PAW - A) และการทำให้น้ำสัมผัสกับก๊าซพลาสมาก่อน (PAW - B) ซึ่ง ทั้งสองวิธีนี้จะทำให้เกิดคุณสมบัติต่างกันไปในเชิงเคมีและกายภาพ ในกรณี PAW - A จะเกิดจาก การที่พลาสมาส่งผลโดยตรงต่อโมเลกุลของน้ำ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบ เช่น การก่อตัว

ของอนุมูลอิสระหรือสารประกอบออกซิเจนเชิงปฏิกิริยา (Reactive Oxygen Species; ROS) โดยผลที่ได้ขึ้นอยู่กับลักษณะของพลาสติกและชนิดของก๊าซที่ใช้ ส่วน PAW-B เกิดจากการที่น้ำสัมผัสกับก๊าซพลาสติกที่สร้างขึ้น ทำให้ก๊าซที่ผ่านการกระตุ้นส่งต่อปฏิกิริยามายังของเหลว ทำให้น้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี เช่นเดียวกับกับ PAW - A แต่จะมีความแตกต่างด้านชนิดและความเข้มข้นของสารที่เกิดขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกัน พบว่า PAW - B มักให้ปริมาณอนุมูลอิสระมากกว่า เพราะก๊าซที่ผ่านการคายประจุสามารถสะสมและแพร่เข้าสู่ได้ต่อเนื่อง ในขณะที่ PAW - A อาจให้ปฏิกิริยาเฉพาะบริเวณผิวสัมผัสของน้ำเป็นหลัก อย่างไรก็ตามทั้งสองวิธีต่างมีข้อดีที่สามารถประยุกต์ใช้ในงานเกษตรและอาหารได้ เช่น การยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ และการยืดอายุการเก็บรักษาผลผลิต โดยมีรายงานว่ากลุ่มออกซิเจนที่อยู่ในรูปสารประกอบกัมมันต์ (Oxygen-containing group) และ ROS มีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพของ PAW ในการยับยั้งจุลินทรีย์มากกว่าน้ำธรรมดา (ธีรวรรณ บุญวรรณ, 2564)

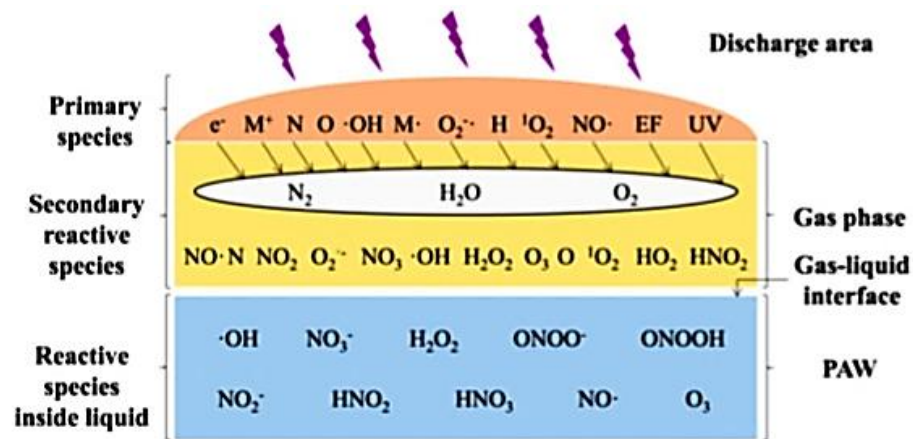
2.1.5 ระยะเวลาในการกระตุ้น

ช่วงเวลาที่ใช้ในการฉายพลาสติกเพื่อนำมากระตุ้นน้ำนับเป็นปัจจัยสำคัญ โดยงานวิจัยส่วนใหญ่รายงานว่ามักใช้เวลาประมาณ 5–30 นาที ทั้งนี้ เมื่อเพิ่มระยะเวลาการฉาย จะทำให้ปริมาณพลาสติกที่สัมผัสกับน้ำมีมากขึ้น ส่งผลให้การสร้างอนุมูลที่มีฤทธิ์ทางเคมี (Reactive Oxygen and Nitrogen Species; RONS) มีจำนวนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ระยะเวลาการกระตุ้นยังส่งผลต่อคุณลักษณะทางฟิสิกส์และเคมีของน้ำพลาสติก เช่น การเปลี่ยนแปลงค่า pH และการเพิ่มขึ้นของไนเตรตและไนไตรท์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพของ PAW อย่างไรก็ตาม การใช้เวลาฉายที่ยาวนานเกินไปอาจก่อให้เกิดข้อจำกัด เช่น การทำให้น้ำมีสถานะเป็นกรดจัด ($\text{pH} < 3.5$) รวมถึงการสะสมของสารบางชนิดที่อาจลดทอนความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้งาน (ธีรวรรณ บุญวรรณ, 2564)

2.1.6 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำพลาสติก

จากการศึกษาหลายฉบับพบว่า น้ำพลาสติกที่ถูกกระตุ้นจะมีการสร้างสารสำคัญหลายชนิด โดยเฉพาะกลุ่มอนุมูลที่มีความไวต่อปฏิกิริยา เช่น Reactive Oxygen Species (ROS) และ Reactive Nitrogen Species (RNS) อนุมูลในกลุ่ม ROS มักพบได้แก่ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไนไตรท์ ไนเตรต และโอโซน ส่วน RNS พบได้ทั้งไนตรัสออกไซด์ เพอร์ออกซิไนไตรท์ และ

สารประกอบไนโตรเจนอื่น ๆ ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้จะปรับเปลี่ยนไปตามชนิดของพลาสมาและสภาพแวดล้อมที่ใช้กระตุ้นน้ำ สารออกฤทธิ์เหล่านี้ เช่น ไนเตรตและไนไตรท์ เป็นตัวบ่งชี้หลักที่ใช้ยืนยันการเกิดปฏิกิริยาในน้ำพลาสมา และสามารถตรวจวัดได้ด้วยเทคนิควิเคราะห์ทางเคมี (ดังแสดงในรูปที่ 2.8) คุณลักษณะเหล่านี้เป็นปัจจัยที่สำคัญ เพราะมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติด้านการต้านจุลชีพโดยตรงของ PAW นอกจากองค์ประกอบทางเคมีแล้ว น้ำพลาสมายังมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเกิดขึ้นบางส่วน เช่น ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่ลดลงหลังการฉายพลาสมา รวมถึงการนำไฟฟ้าที่มักสูงขึ้นเมื่อมีการสะสมของสารอนินทรีย์ละลายน้ำ โดยเฉพาะสารกลุ่มออกซิเจนและไนโตรเจน การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ทำให้ PAW มีคุณสมบัติแตกต่างจากน้ำปกติ และอาจถูกนำไปใช้ประโยชน์ในการควบคุมและยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์หรือต่อยอดทางด้านเกษตรและอุตสาหกรรมอาหารได้ (ธีรวรรณ บุญญวรรณ, 2564)



รูปที่ 2.8 รูปแบบการเกิดองค์ประกอบอนุมูลของน้ำพลาสมา

ที่มา: ธีรวรรณ บุญญวรรณ (2564)

เพื่อให้พลาสมามีประสิทธิภาพต่อการฆ่าเชื้อหรือยับยั้งจุลินทรีย์ จำเป็นต้องอาศัยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Process; AOPs) ซึ่งเกิดจากการสร้างอนุมูลอิสระที่มีความไวต่อปฏิกิริยาสูง เช่น ไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\cdot OH$) อนุมูลอิสระเหล่านี้จะทำหน้าที่โจมตีสารอินทรีย์และผนังเซลล์ของจุลินทรีย์อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เซลล์ถูกทำลายหรือหยุดการเจริญเติบโตได้ จากการศึกษาพบว่า อนุมูลไฮดรอกซิลสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้หลายชนิดและมีบทบาทเด่นในการทำให้น้ำพลาสมาแสดงฤทธิ์ทางชีวภาพ นอกจากนี้ยังตรวจพบสารประกอบอินทรีย์ที่มีฤทธิ์ เช่น ไนเตรต (NO_3^-) และไนไตรท์ (NO_2^-) ซึ่งเป็นผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นระหว่าง

กระบวนการกระตุ้นน้ำ การมีอยู่ของไอออนเหล่านี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของน้ำพลาสมาในการกำจัดสิ่งปนเปื้อน รวมถึงการเสริมการทำงานของ ROS อื่น ๆ เช่น โอโซน (O_3) และเพอร์ออกไซด์ โดยสรุปกระบวนการออกซิเดชันในน้ำพลาสมาสามารถเกิดขึ้นได้หลายเส้นทาง ไม่ว่าจะเป็นการแตกตัวของโมเลกุลน้ำ การสร้างอนุมูลออกซิเจนเชิงปฏิกิริยา (ROS) หรือการเกิดปฏิกิริยาไนโตรเจนออกไซด์ (RNS) ผลลัพธ์คือทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะไปสู่รูปแบบที่มีคุณสมบัติเป็นสารออกซิไดซ์ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้น้ำพลาสมามีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นสารฆ่าเชื้อหรือสารยับยั้งจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การสร้างพลาสมาโดยตรงภายในของเหลว หรือที่บางครั้งเรียกว่า Plasma Activated Solution (PAS) ใช้พลังงานสูงกว่าเมื่อเทียบกับการสร้างพลาสมาในบรรยากาศ เนื่องจากของเหลวมีความหนาแน่นและมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าที่แตกต่างจากก๊าซ เมื่อกระแสไฟฟ้าถูกส่งผ่านลงไป อิเล็กตรอนจะชนกับโมเลกุลน้ำและสารละลายที่อยู่โดยรอบ ทำให้เกิดการแตกตัวและเกิดอนุมูลอิสระ เช่น $-OH$, O^- , H , H_2O_2 รวมถึงสารออกฤทธิ์อื่น ๆ ที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์สูง กลไกเหล่านี้ทำให้ PAS มีศักยภาพสูงในการยับยั้งจุลินทรีย์ การกำจัดสารอินทรีย์ และการกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้อง โดยทั่วไปพบว่าในระหว่างการดิสชาร์จในน้ำ อนุมูลไฮดรอกซิล ($-OH$) จะถูกสร้างขึ้นในปริมาณมากและถือเป็นองค์ประกอบสำคัญที่สุด เนื่องจากมีอายุสั้นแต่มีความไวต่อปฏิกิริยาอย่างยิ่ง วิธีการสร้าง PAS มีหลายรูปแบบ เช่น การดิสชาร์จอาร์คเลื่อน (Gliding Arc Plasma) การปล่อยประกายในน้ำ (Spark discharge) หรือการใช้คลื่นไมโครเวฟ โดยทุกวิธีต่างก่อให้เกิดการแตกตัวของน้ำและการสร้างอนุมูลอิสระคล้ายคลึงกัน แต่แตกต่างกันที่ประสิทธิภาพและสัดส่วนของอนุมูลที่เกิดขึ้น หลังการสร้างพลาสมาในน้ำ อนุมูลเหล่านี้สามารถรวมตัวหรือเปลี่ยนสถานะได้ เช่น กลายเป็น H_2O_2 , O_3 หรือไนเตรต/ไนไตรต์ (NO_3^- , NO_2^-) ซึ่งช่วยเพิ่มความเสถียรและคงประสิทธิภาพทางชีวภาพของ PAS เมื่อเก็บไว้ระยะหนึ่ง นั่นทำให้ PAS ถูกพิจารณาเป็นอีกหนึ่งวิธีที่มีศักยภาพสูงสำหรับการฆ่าเชื้อและการประยุกต์ใช้ในด้านเกษตรและอุตสาหกรรมอาหาร

อนุมูลไฮดรอกซิล ($-OH$) คือรูปที่ไร้ประจุ (neutral form) ของไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) โดยอนุมูลของไฮดรอกซิลมีความไวในการเกิดปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์สูงมากดังตารางที่ 2.1 โดยมีฤทธิ์รองมาจากฟลูออรีน (F_2) แต่มีประสิทธิภาพสูงกว่าโอโซน ในสาขาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ อนุมูลไฮดรอกซิลมีการนำไปใช้ในหลายลักษณะ เช่น การฆ่าเชื้อบนพื้นผิว การกำจัดมลพิษในน้ำ และการสลายสารอินทรีย์เชิงโมเลกุล จุดเด่นคือเมื่อทำปฏิกิริยากับสารที่มีพิษ จะได้สารสุดท้ายที่ไม่เป็นพิษ อาทิ น้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และออกซิเจน อนุมูลไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เกิดจากกระบวนการที่ อนุมูลไฮดรอกซิล ($-OH$) ซึ่งมีอายุการดำรงอยู่สั้นมาก

(ประมาณ 3.7×10^{-9} วินาที) ทำปฏิกิริยารวมตัวกันเอง ส่งผลให้เกิดสารที่มีเสถียรภาพมากกว่า คือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ H_2O_2 มักปรากฏอยู่ในน้ำและสิ่งแวดล้อมทั่วไป สามารถสะสมและคงอยู่ได้ยาวนานกว่า $-OH$ และทำหน้าที่เป็นสารออกซิแดนต์ที่สำคัญ H_2O_2 มีคุณสมบัติเด่นตรงที่สามารถซึมผ่านผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ได้ดี ทำให้เกิดการออกซิเดชันต่อองค์ประกอบภายในเซลล์ เช่น โปรตีน ไขมัน และกรดนิวคลีอิก ผลกระทบนี้ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างพื้นฐานของเซลล์ และนำไปสู่การทำลายจุลินทรีย์อย่างมีประสิทธิภาพ ในเชิงกลไก H_2O_2 สามารถสลายตัว (Decompose) ภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตหรือการเร่งปฏิกิริยาโดยเอนไซม์ เช่น คาแทเลส และเปอร์ออกซิเดส ทำให้เกิดอนุมูลอิสระที่มีพลังงานสูง เช่น $-OH$, O_2^- ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการออกซิเดชันของสารอินทรีย์ และเป็นต้นเหตุของปฏิกิริยา Lipid peroxidation ที่ทำให้เยื่อหุ้มเซลล์สูญเสียความสามารถในการควบคุมการซึมผ่าน (permeability) จนนำไปสู่ความเสียหายของเซลล์ โดยสรุป H_2O_2 จึงเป็นสารออกฤทธิ์ที่ทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมระหว่างอนุมูลอิสระสั้นที่มีอายุสั้น (เช่น $-OH$) กับผลกระทบระยะยาวต่อโครงสร้างชีวโมเลกุลภายในสิ่งมีชีวิตหรือเซลล์จุลินทรีย์ และเมื่อเปรียบเทียบวิธีการใช้สารละลายลดสารพิษตกค้างในผักและผลไม้กับพลาสมาสารละลาย แสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบวิธีการใช้สารละลายลดสารพิษตกค้างในผักและผลไม้กับพลาสมาสารละลาย

วิธีการ	รายละเอียด	ระยะเวลาแช่	ประสิทธิภาพ (%ลดลง)
น้ำส้มสายชู ($C_2H_4O_2$)	สารละลายที่มีความเข้มข้น 5% ถูกนำมาผสมน้ำในอัตราส่วน 1 ต่อ 10	10-15 นาที	60-84
ด่างทับทิม ($KMnO_4$)	ปริมาณ 20 ถึง 30 เกล็ดผสมน้ำ 4 ลิตร	10 นาที	35-43
โซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$)	นำสารปริมาณ 1 ช้อนโต๊ะมาละลายในน้ำอุ่น 20 ลิตร	15 นาที	70-90
น้ำอิเล็กโทรไลต์	เป็นการแยกสลายสารละลายด้วยขั้วไฟฟ้าบวกและลบให้เกิดไอออน OH^- และ Cl^-	5 - 10	60-75
โอโซน (O_3)	เป็นตัวออกซิไดซ์รุนแรงจึงเกิดปฏิกิริยาได้ดีและสลายตัวง่าย	15-30 นาที	70
พลาสมาสารละลาย (PAS/PAW)	ความเข้มข้นปรับได้ตามกำลังไฟฟ้าของวิธีรีชาร์จพลาสมา	30-120 วินาที	70-90

2.1.6.1 ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity, EC)

ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำหมายถึงความสามารถของน้ำในการถ่ายโอนกระแสไฟฟ้า ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณไอออนที่ละลายอยู่ในน้ำ เช่น เกลือแร่หรือสารประกอบต่าง ๆ การมีไอออนทั้งประจุบวกและประจุลบในสารละลายน้ำจะเอื้อต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้ามีค่ามากหรือน้อยแตกต่างกันไป ขณะที่น้ำกลั่นหรือสารละลายที่แทบไม่มีไอออน จะมีสมบัติคล้ายฉนวนไฟฟ้าและไม่สามารถนำกระแสได้อย่างมีประสิทธิภาพ การเปลี่ยนแปลงของค่าการนำไฟฟ้าสามารถเกิดขึ้นจากการสร้างอนุมูลอิสระชนิดต่าง ๆ เช่น อนุมูลออกซิเจนก่อก่อปฏิกิริยา (Reactive Oxygen Species; ROS) และอนุมูลไนโตรเจนก่อก่อปฏิกิริยา (Reactive Nitrogen Species; RNS) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการกระตุ้นน้ำพลาสมา ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของน้ำเปลี่ยนแปลงไป รวมถึงการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) ที่ช่วยเสริมการเพิ่มค่า EC ด้วย (R. Thirumdas, 2018) ทั้งนี้ ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำยังสัมพันธ์กับความเข้มข้นของไอออนรวมทั้งหมดและปริมาณของแข็งละลายน้ำ (Total Dissolved Solids; TDS) อีกด้วย ยิ่งมีปริมาณไอออนละลายมาก ค่าการนำไฟฟ้าก็จะยิ่งสูงตามไปด้วย การวัดค่าการนำไฟฟ้า (EC) จึงถูกใช้เป็นตัวชี้วัดสำคัญที่บ่งบอกถึงสมบัติทางเคมีและความเปลี่ยนแปลงในน้ำ เช่น น้ำประปา น้ำบาดาล หรือน้ำที่ผ่านการบำบัด ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าที่สูงขึ้นหมายความว่าน้ำมีศักยภาพในการนำไฟฟ้ามากขึ้นตามลำดับ หน่วยมาตรฐานสากล (SI: International System of Units) ที่ใช้กำหนดค่าการนำไฟฟ้า คือ ซีเมนส์ต่อเมตร (S/m) อย่างไรก็ตาม ในการใช้งานทั่วไปโดยเฉพาะการตรวจวัดคุณภาพน้ำ มักนิยมแปลงหน่วยเป็นไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ($\mu\text{S}/\text{cm}$) เนื่องจากค่าการนำไฟฟ้าในน้ำประปาหรือน้ำดื่มไม่ได้สูงมาก มาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มได้กำหนดช่วงของค่าการนำไฟฟ้าให้อยู่ระหว่าง 0 ถึง $50,000 \mu\text{S}/\text{cm}$ โดยปกติน้ำดื่มจะมีค่าการนำไฟฟ้าอยู่เพียงประมาณ 0 ถึง $1,500 \mu\text{S}/\text{cm}$ ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมต่อการบริโภคและสะท้อนถึงคุณภาพน้ำที่ดี

น้ำที่มีค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0-800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ นิยมใช้เป็นน้ำดื่มในการดำรงชีวิตสำหรับมนุษย์ (ในกรณีที่ไม่มีการพิกซ์หรืออินทรีย์วัตถุแขวนลอยเกินไป) และเหมาะสำหรับการชลประทานทั่วไปรวมถึงปศุสัตว์ทุกชนิด

น้ำที่มีค่าการนำไฟฟ้าระหว่าง 800-2,500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ นิยมใช้สำหรับการบริโภคของมนุษย์ และเหมาะสำหรับการชลประทานทั่วไปรวมถึงปศุสัตว์ทุกชนิด

น้ำที่มีค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 2,500-10,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ไม่แนะนำสำหรับการบริโภคของมนุษย์ ซึ่งมักจะไม่เหมาะสำหรับการชลประทานทั่วไป แม้ว่าสามารถนำมาใช้เป็นน้ำดื่มสำหรับสัตว์ปีกและสุกรได้

2.1.6.2 ค่าสารประกอบไนโตรเจน (Nitrogen Compound)

Thirumdas R. et al. (2018) ศึกษาค่าไนไตรท์และไนเตรตใน PAW เป็นหลักฐานหลักถือเป็นข้อบ่งชี้สำคัญที่ยืนยันการเกิดขึ้นของ RNS

1) ไนไตรท์ (Nitrite, NO_2^-) มักถูกนำมาใช้เป็นตัวชี้วัดสำหรับประเมินสถานะของระบบบำบัดน้ำหรือกระบวนการชีวภาพ เพื่อยืนยันว่ากระบวนการทำงานยังคงมีประสิทธิภาพตามที่กำหนด ทั้งนี้ ไนไตรท์เกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชันของแอมโมเนียโดยจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนเป็นตัวกลาง และการตรวจพบไนไตรท์ในระดับที่สูงขึ้นมักสะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงจำนวนประชากรจุลินทรีย์บางกลุ่ม

2) ไนเตรต (Nitrate, NO_3^-) จัดเป็นสารประกอบสุดท้ายที่เกิดขึ้นในกระบวนการเปลี่ยนแปลงไนโตรเจน โดยมักได้จากการย่อยไนไตรท์ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ในสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติสามารถตรวจพบไนเตรตในน้ำบาดาลที่มีการใช้ปุ๋ยหรือสารเร่งการเจริญเติบโต อีกทั้งยังสามารถเกิดขึ้นได้จากกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้ออกซิเจนที่พบในบางชนิดของพืช

2.1.6.3 ค่าความเป็นกรด-เบส (pH)

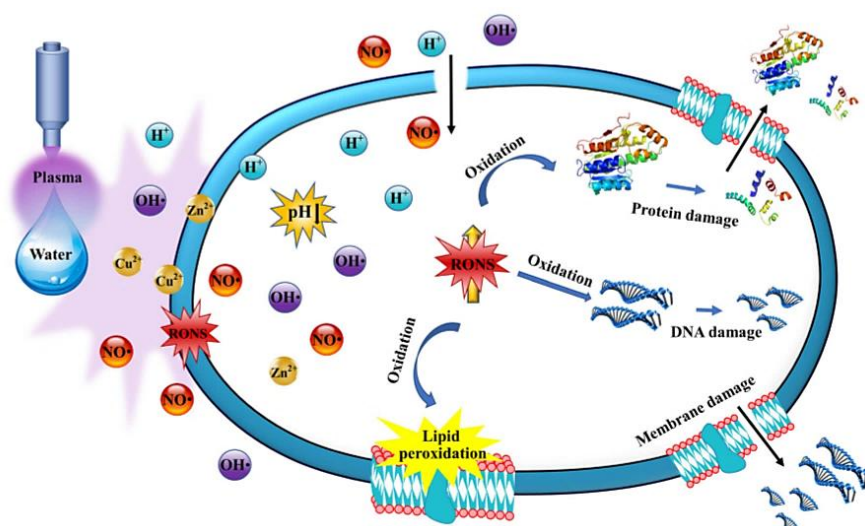
ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) หมายถึงค่าที่ใช้บ่งบอกระดับความเป็นกรดหรือต่างของสารละลาย โดยมีช่วงค่าตั้งแต่ 1-14 หากค่า pH มีค่าน้อยกว่า 7 แสดงว่าสารนั้นมีสมบัติเป็นกรด ในทางตรงกันข้าม หากค่ามากกว่า 7 หมายถึงมีสมบัติเป็นด่าง ส่วนค่าที่เท่ากับ 7 ถือว่าเป็นกลาง การตรวจสอบค่า pH ในน้ำดื่มหรือน้ำสำหรับการบริโภคมีความสำคัญต่อการประเมินคุณภาพน้ำ โดยน้ำที่มี pH ต่ำกว่า 7 มักจะมีสภาพเป็นกรด ขณะที่น้ำที่มีค่า pH สูงกว่า 7 มักเป็นด่าง และหากมีค่า pH ประมาณ 7 จัดเป็นน้ำที่อยู่ในภาวะสมดุล (วุฒิชัย แสงวัง, 2565)

ในธรรมชาติ น้ำประปาทั่วไปมีค่า pH อยู่ราว 5-6 ซึ่งถือว่าเป็นกรดอ่อน ๆ อันมีสาเหตุมาจากการละลายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ทำให้น้ำมีค่าพีเอชลดลง ในกรณีของน้ำประปาหรือแหล่งน้ำที่ผ่านการบำบัด ค่า pH มักอยู่ที่ 5.6-6.5 แต่ก็มีข้อกำหนดว่า น้ำดื่มควรมีค่า pH ไม่ต่ำกว่า 4 และไม่เกิน 9 ทั้งนี้ ค่าที่เหมาะสมต่อการบริโภคมากที่สุดควรอยู่ในช่วง 6.5-8.5 ตาม

มาตรฐานคุณภาพน้ำดื่ม เนื่องจากหากน้ำมีความเป็นกรดหรือด่างสูงเกินไป อาจก่อให้เกิดการกัดกร่อนหรือปัญหาด้านสุขภาพได้ สำหรับแหล่งน้ำธรรมชาติ เช่น น้ำบาดาล มักจะมีค่า pH ค่อนข้างคงที่ในช่วง 6.5–8.5 อย่างไรก็ตาม น้ำในแหล่งต่าง ๆ เช่น น้ำผิวดิน น้ำบาดาล หรือแม่น้ำ อาจมีค่าความเป็นกรด-เบสที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมและแร่ธาตุที่ละลายอยู่ในน้ำ ดังนั้น ค่า pH ของน้ำจึงเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญในการพิจารณาคุณภาพน้ำที่ใช้สำหรับการอุปโภคและบริโภค

2.1.7 กลไกการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ของน้ำกระตุ้นพลาสมา

จากการศึกษาหลายงานพบว่า น้ำที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลาสมาและสารละลายพลาสมา มีคุณสมบัติในการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุให้เกิดการเน่าเสียของอาหาร (เช่น *Aeromonas hydrophila*, *Shewanella putrefaciens* และ *Pseudomonas fluorescens*) รวมถึงเชื้อ อักอโรค (*Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* และ *Listeria innocua*) โดยผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าน้ำพลาสมามีศักยภาพสูงในการยับยั้งเชื้อเหล่านี้โดยมีประสิทธิภาพ การยับยั้งดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากน้ำกระตุ้นพลาสมา (Plasma-Activated Water: PAW) ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการปลดปล่อยสารที่มีฤทธิ์ออกซิไดซ์ เช่น รีแอกทีฟออกซิเจนและไนโตรเจนสปีชีส์ (RONS) ซึ่งสารเหล่านี้สามารถทำลายผนังเซลล์และโครงสร้างภายในของจุลินทรีย์ ส่งผลให้เซลล์เสียสมดุลและไม่สามารถดำรงชีวิตต่อไปได้ กลไกนี้ถือเป็นหัวใจสำคัญที่ทำให้น้ำพลาสมามีบทบาทในการฆ่าเชื้อและชะลอการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยแสดงผลอย่างชัดเจนตามที่ปรากฏในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แผนผังของการยับยั้งการทำงานของเซลล์จุลินทรีย์ที่เกิดจาก PAW

ที่มา: Xiang, Q et al. (2022)

2.1.7.1 การสร้างสารออกซิเดชันในน้ำพลาสมา

เมื่อพลาสมาถูกนำมาใช้กับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาที่สร้างสารออกซิเดชัน (Reactive Oxygen Species, ROS) และสารออกซิเดชันที่มีไนโตรเจน (Reactive Nitrogen Species, RNS) เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2), ไนเตรต (NO_3^-), ไนไตรท์ (NO_2^-) และโอโซน (O_3) สารเหล่านี้มีบทบาทสำคัญในการทำลายเซลล์จุลินทรีย์ (Xiang, Q et al, 2022) กล่าวคือ

1) การทำลายเยื่อหุ้มเซลล์

ROS และ RNS สามารถเกิดปฏิกิริยากับองค์ประกอบของเยื่อหุ้มเซลล์ จุลินทรีย์ ส่งผลให้เกิดกระบวนการ *Lipid Peroxidation* ทำให้เยื่อหุ้มสูญเสียความสมบูรณ์ เกิดความเสียหาย และลดความสามารถในการควบคุมการซึมผ่านของสารต่าง ๆ ภายในเซลล์

2) การออกซิเดชันของโปรตีน

สารออกซิเดชันที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับโปรตีนและเอนไซม์ที่อยู่ในเซลล์จุลินทรีย์ ทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างโปรตีน ส่งผลให้การทำงานของโปรตีนบกพร่องหรือเสื่อมประสิทธิภาพ จนไม่สามารถคงสมดุลทางสรีรวิทยาของสิ่งมีชีวิตได้

3) ความเสียหายของ DNA

ROS และ RNS มีศักยภาพในการเข้าทำลายโครงสร้างพันธะของ DNA ทำให้เกิดการแตกหักหรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ส่งผลให้ DNA สูญเสียความสามารถในการถ่ายทอดพันธุกรรมและการแบ่งเซลล์ ซึ่งอาจนำไปสู่การหยุดการเจริญเติบโตหรือการตายของเซลล์จุลินทรีย์

การยับยั้งและทำลายเชื้อจุลินทรีย์โดยใช้น้ำที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลาสมาเป็นกลไกที่มีประสิทธิภาพสูง ครอบคลุมตั้งแต่การทำลายโครงสร้างเยื่อหุ้มเซลล์ การเกิดออกซิเดชันที่โปรตีน ความเสียหายต่อสารพันธุกรรม (DNA) การสลายตัวของไบโอฟิล์ม รวมถึงการกำจัดสปอร์ของเชื้อแบคทีเรีย กระบวนการเหล่านี้ทำให้น้ำกระตุ้นพลาสมาถูกมองว่าเป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพในการเพิ่มคุณภาพน้ำและเสริมความปลอดภัยในมิติที่หลากหลาย

4) การทำลายแบคทีเรีย

สำหรับแบคทีเรียที่อยู่ในสภาพลอยตัว (Planktonic Bacteria) การสัมผัสโดยตรงกับ PAW จะทำให้เกิดการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์และเกิดความเครียดออกซิเดชันภายในเซลล์ ทำให้แบคทีเรียถูกทำลายอย่างรวดเร็ว

5) การทำลายไบโอฟิล์ม

PAW สามารถทำลายไบโอฟิล์มได้โดยการทำลายเมทริกซ์ของสารพอลิเมอร์ (Extracellular Polymeric Substance, EPS) ที่ยึดติดจุลินทรีย์เข้าด้วยกันและกับพื้นผิว ทำให้แบคทีเรียที่อยู่ในไบโอฟิล์มถูกทำลาย

6) การทำลายไวรัส

สารออกซิเดชันสามารถทำลายเยื่อหุ้มของไวรัส ทำให้โครงสร้างไวรัสเสียหายและสูญเสียความสามารถในการติดเชื้อเซลล์ นอกจากนี้ยังทำลายโปรตีนและกรดนิวคลีอิกของไวรัส ทำให้ไวรัสไม่สามารถดำรงชีวิตได้

7) การทำลายสปอร์ของแบคทีเรีย

การทำงานร่วมกันระหว่างน้ำพลาสมาที่ถูกกระตุ้น (PAW) และกระบวนการให้ความร้อน พบว่าสามารถช่วยยับยั้งและทำลายสปอร์ของแบคทีเรียได้อย่างมีประสิทธิภาพ กลไกนี้เกิดจากการเสริมฤทธิ์ระหว่างปัจจัยทั้งสอง กล่าวคือ เมื่อมีการใช้ PAW ควบคู่กับการให้ความร้อน จะส่งผลต่อการทำลายสปอร์ที่มีความคงทนสูง ทำให้สปอร์สูญเสียความสามารถในการดำรงอยู่ในสิ่งแวดล้อม และนำไปสู่การเสื่อมสภาพจนไม่สามารถคงตัวได้

2.1.8 ผักกาดหอมหรือผักสลัด

ผักสลัดจัดเป็นพืชในวงศ์ Composite หรือ Asteraceae ซึ่งในทางพฤกษศาสตร์มีชื่อว่า *Lactuca sativa* L. คำว่า *Lactuca* มีรากศัพท์มาจากภาษาละติน หมายถึง “พืชที่มีน้ำนม” โดยทั่วไปพบผักชนิดนี้ในแถบยุโรปและเอเชีย ถือเป็นพืชที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงโดยเฉพาะในส่วนของใบที่เจริญเติบโตดี มีการนำมาบริโภคในรูปแบบผักสดและเป็นส่วนประกอบของอาหารหลากหลายประเภท ผักสลัดยังเหมาะกับการเพาะปลูกในพื้นที่ที่มีสภาพดินและปุ๋ยจำกัด จึงสามารถปลูกได้แม้ในสถานะที่ไม่เอื้อต่อการเจริญเติบโตสูงมากนัก นอกจากคุณค่าทางด้านโภชนาการแล้ว ผักสลัดยังอุดมไปด้วยสารพฤกษเคมีที่มีประโยชน์ต่อร่างกายมนุษย์ โดยพบว่าสามารถช่วยเสริมสร้างสุขภาพ ลดความเสี่ยงจากโรคบางชนิด และเป็นหนึ่งในผักที่นิยมรับประทานสด เช่น ผักสลัดใบเขียวหรือใบแดง โดยที่ ชนิดของผักสลัดที่นิยมรับประทาน (ปิยรัตน์ และคณะ, 2542) ได้แก่

- 1) กรีนโอ๊ค (Green Oak Lettuce)
- 2) เรดโอ๊ค (Red oak)
- 3) เรดคอรัล (Red coral)

- 4) บัตเตอร์เฮด (Butter Head)
- 5) ผักกาดคอส (Cos)
- 6) ผักกาดแก้ว (Iceberg Lettuce)
- 7) เบบี้ร็อกเก็ต (Baby Rocket)
- 8) ไวลด์ ร็อกเก็ต (Wild Rocket)
- 9) เรดิชิโอ (Radicchio)
- 10) มิซึน่า (Mizuna)
- 11) ผักโขมเบบี้ (Baby Spinach)
- 12) ฟิลเลย์ ไอซ์เบิร์ก (Frillice Iceberg Lettuce)

ในหลายงานวิจัยเลือกใช้ผักกาดหอมกรีนโอ๊คเป็นตัวอย่างในการศึกษา เนื่องจากเป็นผักสลัดที่ได้รับความนิยมสูงในกลุ่มผู้บริโภคชาวไทย อีกทั้งยังหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาดทั่วไป และมีคุณค่าทางโภชนาการที่สำคัญต่อร่างกาย เช่นเดียวกับในงานวิจัยนี้

ผักสลัดกรีนโอ๊ค (Green Oak, Oak Leaf, Lettuce) จัดอยู่ในสกุล *Lactuca sativa* var. *crispa* L. ซึ่งเป็นพืชในวงศ์ Composite (Asteraceae) โดยมีถิ่นกำเนิดดั้งเดิมอยู่ในยุโรปตอนเหนือและเอเชียตะวันตกเฉียงใต้ และเป็นผักใบที่นิยมปลูกเพื่อบริโภคสด ทั้งในรูปแบบสลัดหรือใช้ประกอบอาหารอื่น ๆ ผักชนิดนี้เป็นแหล่งของวิตามินและเกลือแร่ที่สำคัญและมีประโยชน์ต่อสุขภาพมนุษย์เป็นอย่างมาก ตามข้อมูลจากฐาน USDA National Nutrient Database พบว่า ผักสลัดกรีนโอ๊คสดปริมาณ 100 กรัม มีคุณค่าทางโภชนาการดังนี้: ให้พลังงาน 15 กิโลแคลอรี มีไขมัน 0.15 กรัม โปรตีน 1.36 กรัม คาร์โบไฮเดรต 2.79 กรัม น้ำตาล 0.38 กรัม ไฟเบอร์ละลายน้ำ 0.375 มิลลิกรัม และใยอาหารรวม 1.3 กรัม พร้อมด้วยแร่ธาตุหลายชนิด เช่น แมกนีเซียม 13 มิลลิกรัม แคลเซียม 36 มิลลิกรัม ฟอสฟอรัส 29 มิลลิกรัม โพแทสเซียม 194 มิลลิกรัม สังกะสี 0.18 มิลลิกรัม และเหล็ก 0.86 มิลลิกรัม นอกจากนี้ยังมีวิตามินซี 9.2 มิลลิกรัม วิตามินเอ 7,405 IU และกรดโฟลิก 38 ไมโครกรัม ซึ่งทั้งหมดนี้สะท้อนให้เห็นถึงคุณค่าทางโภชนาการที่เหมาะสมต่อการบริโภคเพื่อสุขภาพ โดยรูปที่ 2.10 แสดงรูปร่างของผักสลัดกรีนโอ๊ค



รูปที่ 2.10 ผักสลัดกรีนโอ๊ค

ที่มา: บริษัท ฟาร์มแซนเนล จำกัด (2563)

2.1.8.1 โรคและศัตรูพืชที่สำคัญของผักสลัดกรีนโอ๊ค

1) โรคโคนเน่ารากเน่า

สาเหตุของโรคเกิดจากเชื้อ *Phytophthora parasitica* Dastur ซึ่งสามารถเข้าสู่ระบบราก ลำต้น และโคนต้น ส่งผลให้เกิดการเน่าเปื่อยและแสดงอาการเหี่ยวเฉาอย่างต่อเนื่อง ใบมีลักษณะเหลืองและร่วงหล่น อาการรุนแรงจะสังเกตได้จากการเหี่ยวเฉาทั้งต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่มีความชื้นสูงหรือในเรือนเพาะที่มีการระบายน้ำไม่ดี ความเสียหายที่เกิดขึ้นมักพบมากในฤดูฝนหรือสภาพที่มีความชื้นสะสมสูง ทำให้ผักสลัดเจริญเติบโตได้ไม่เต็มที่

2) โรคใบจุด

โรคนี้สามารถพบได้จากเชื้อราหลายชนิด เช่น *Alternaria* spp., *Septoria* spp. และ *Cercospora* spp. โดยมีอาการเริ่มต้นเป็นจุดสีน้ำตาลเข้มหรือดำกระจายอยู่บนใบ เมื่อโรคพัฒนาไป จุดดังกล่าวจะขยายใหญ่ขึ้นและอาจรวมกันเป็นแผลขนาดใหญ่ เนื้อใบตรงกลางแผลแห้งกรอบและอาจหลุดออก ทำให้ใบมีลักษณะเป็นรูพรุน หากมีการระบาดรุนแรง ใบจะร่วงและส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลผลิตโดยตรง โดยทั่วไปโรคใบจุดมักพบในสภาพอากาศที่มีความชื้นสูง อากาศถ่ายเทไม่สะดวก และในแปลงปลูกที่มีการให้น้ำมากเกินไป

3) หนอนชอนใบ

หนอนชอนใบจัดเป็นศัตรูพืชที่สามารถเข้าทำลายพืชเศรษฐกิจได้หลากหลายชนิดมากกว่า 100 ชนิด ตัวอย่างเช่น พืชในกลุ่มกะหล่ำ ผักสลัด มะเขือเทศ พริก รวมถึงพืชตระกูลถั่วและวัชพืชบางประเภท

4) หนอนกระพุ่ม

หนอนกระพุ่มเป็นหนอนผีเสื้อที่มักเริ่มกักกินใบอ่อนของพืช โดยในระยะต้นจะพบการทำลายแบบเป็นกลุ่ม แต่เมื่อโตเต็มที่จะเคลื่อนย้ายไปกักกินส่วนปลายใบ ก้านดอก หรือผลของพืช

2.1.8.2 รูปแบบการปลูกผักกาดหอมกรีนไฮโดรโปนิกส์

การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (ไฮโดรโปนิกส์) (ดิเรก, 2547) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระบบหลัก ดังนี้

1) การปลูกพืชในวัสดุปลูก (Substrate Culture)

วัสดุที่ใช้รองรับรากพืชมีอยู่ 2 ประเภท คือ ชนิดที่สลายตัวง่าย เช่น ฟาง ขี้เลื่อย แกลบ ขุยมะพร้าว และชนิดที่ไม่สลายตัว เช่น กรวด ทราาย เพอร์ไลต์ เวอร์มิคูไลต์ หรือร็อกวูล วัสดุเหล่านี้ช่วยค้ำจุนและยึดรากพืช ขณะเดียวกันก็ช่วยรักษาความชื้นให้พืช แต่ต้องมีการจัดการด้านน้ำและธาตุอาหารร่วมด้วยเพื่อให้พืชเจริญเติบโตได้ตามปกติ

2) การปลูกพืชในสารละลายธาตุอาหารพืช (Hydroponics)

เป็นระบบที่ใช้เพียงสารละลายธาตุอาหารเลี้ยงพืช ตัวอย่างเช่น DFT (Deep Flow Technique), NFT (Nutrient Film Technique), DRF (Dynamics Root Floating System), ระบบน้ำท่วมและระบายน้ำ (Ebb & Flow System) หรือ Flood and Drain ซึ่งแต่ละระบบมีข้อดีข้อจำกัดแตกต่างกัน แต่ล้วนเป็นที่นิยมในการผลิตพืชไร้ดิน

3) การปลูกพืชที่รากลอยอยู่ในอากาศ (Aeroponics)

เป็นเทคนิคการปลูกที่รากไม่ได้สัมผัสกับดิน แต่แขวนลอยในอากาศ พร้อมกับได้รับการพ่นละอองสารละลายธาตุอาหารที่มีความเข้มข้นพอดีเข้าสู่รากโดยตรงวิธีนี้ช่วยเพิ่มการดูดซึมน้ำและการเจริญเติบโตของพืชได้อย่างรวดเร็ว

2.1.9 กลไกการเพิ่มการงอกของเมล็ดด้วยน้ำกระตุ้นพลาสมา

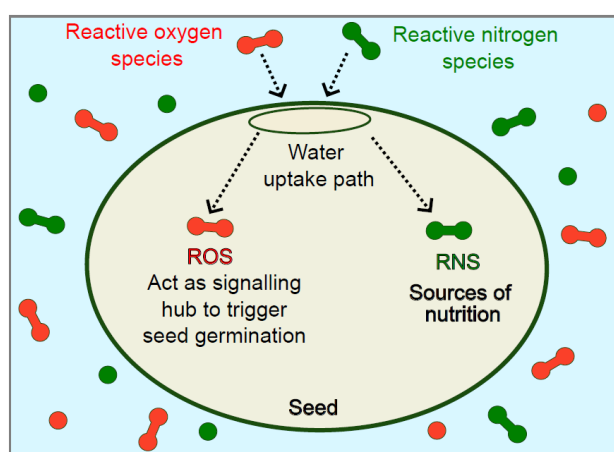
น้ำที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลาสมามีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพหลายประการ โดยเฉพาะการก่อเกิดอนุมูลอิสระและสารออกซิแดนท์ชนิดต่าง ๆ เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2), ไนเตรต (NO_3^-) และไนไตรต์ (NO_2^-) ซึ่งทำให้สภาพแวดล้อมของน้ำมีการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH), ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity; EC ให้อยู่ในระดับที่มีผลกระตุ้นต่อกระบวนการงอกของเมล็ด

ประการแรก สารออกซิแดนซ์ที่เกิดขึ้นทำหน้าที่คล้าย สัญญาณชีวภาพ (signaling molecules) ช่วยกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสลายแป้งและโปรตีนในเมล็ด ส่งผลให้ต้นอ่อนสามารถใช้สารอาหารสะสมได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปริมาณที่เหมาะสมยังมีบทบาทในการกระตุ้นการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันความเครียดและการเริ่มต้นของการงอก

ประการที่สอง การมีอยู่ของไนเตรตและไนไตรตในน้ำทำให้เมล็ดได้รับ สารตั้งต้นของ ไนตริกออกไซด์ (NO) ซึ่งเป็นโมเลกุลสัญญาณที่มีบทบาทสำคัญในการควบคุมการแตกตัวของเปลือกหุ้มเมล็ดและการยืดตัวของรากอ่อน ผลลัพธ์คือการเร่งให้กระบวนการงอกเริ่มต้นได้เร็วขึ้น

ประการที่สาม น้ำกระตุ้นพลาสมาช่วยปรับสภาพเปลือกเมล็ด โดยโครงสร้างของชั้นนอกอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้ความสามารถในการดูดซึมน้ำ (imbibition) ดีขึ้น ส่งผลให้เมล็ดดูดน้ำเข้าสู่ภายในได้เร็วและมากขึ้น กระบวนการนี้เป็นก้าวแรกที่สำคัญของการงอก

เมื่อรวมผลทั้งหมดนี้ การใช้น้ำที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลาสมาจึงไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มความเร็วและสัดส่วนการงอกของเมล็ด แต่ยังช่วยให้ต้นกล้าที่ได้มีความแข็งแรงมากขึ้น ทั้งจากการยกระดับกระบวนการเมตาบอลิซึมภายในเมล็ด และจากการป้องกันการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ที่อาจยับยั้งการงอกในสภาวะปกติ โดยสามารถแสดงแผนภาพกลไกการเพิ่มการงอกของเมล็ดด้วยน้ำกระตุ้นพลาสมา ได้ดังรูปที่ 2.11



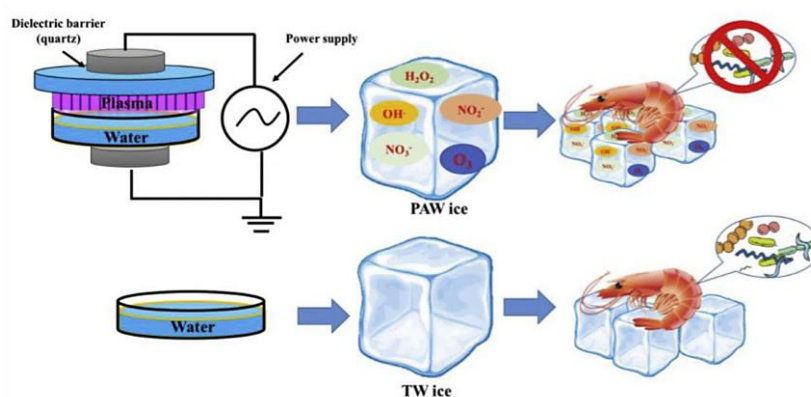
รูปที่ 2.11 กลไกการเพิ่มการงอกของเมล็ดด้วยน้ำกระตุ้นพลาสมา

ที่มา: Kiing S. Wong et al. (2023)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (literature reviews)

ในงานวิจัยนี้สนใจที่จะนำเอาเทคโนโลยีพลาสมามาประยุกต์ใช้สำหรับการปรับปรุงสภาพน้ำ จากการศึกษาที่ได้กล่าวถึงความสัมพันธ์เบื้องต้นจากหัวข้อที่ผ่านมาไม่ว่าจะเป็น พลาสมา(plasma), กระบวนการเกิดพลาสมา, รูปแบบของการดิสชาร์จ, การกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา (Plasma activation water, PAW), ระยะเวลาในการกระตุ้น, คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำพลาสมา กลไกการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ของน้ำกระตุ้นพลาสมาและกลไกการเพิ่มการงอกของเมล็ดด้วยน้ำกระตุ้นพลาสมา ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งจะมีส่วนสำคัญสำหรับงานวิจัยเล่มนี้ เพื่อนำมาประกอบกับการทดลอง ดังต่อไปนี้

ในการศึกษาของ Xinyu Liao และคณะ (2018) มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา (PAW) เป้าหมายคือการปรับปรุงคุณสมบัติของน้ำและน้ำแข็งที่ใช้ถนอมอาหาร เพื่อคงสภาพความสดและทำให้อายุการเก็บรักษายาวนานขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลาสมามีคุณสมบัติช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังส่งผลให้คงคุณภาพอยู่ได้นานขึ้น งานวิจัยดังกล่าวยืนยันว่า PAW สามารถช่วยลดจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ได้อย่างมีนัยสำคัญ ผลลัพธ์ยังแสดงให้เห็นว่าการกระตุ้นน้ำสามารถเพิ่มความเข้มข้นของสารออกซิแดนท์ เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ งานวิจัยนี้จึงชี้ให้เห็นว่า PAW เป็นเครื่องมือที่มีศักยภาพสูงในการยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ และช่วยเสริมประสิทธิภาพในกระบวนการฆ่าเชื้อแบคทีเรียผ่านกลไกของสารอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจากกระบวนการกระตุ้นด้วยพลาสมา โดยรูปที่ 2.12 แสดงการใช้น้ำแข็งจากกระตุ้นด้วยพลาสมาเพื่อถนอมกุ้ง และตารางที่ 2.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ของน้ำจากการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยพลาสมา



รูปที่ 2.12 การใช้น้ำแข็งจากกระตุ้นด้วยพลาสมาเพื่อถนอมกุ้ง ที่มา: Xinyu Liao et al. (2018)

ตารางที่ 2.3 ค่าพารามิเตอร์ของน้ำจากการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยพลาสมา

Property	pH	ORP	Electrical	H ₂ O ₂	Ozone	Nitrate
			Conductivity (μ S/cm)	Concentration (mg/L)	Concentration (mg/L)	Concentration (mg/L)
TW ice	6.91±0.09	267 ± 8	8.6 ± 0.5	0.030 ± 0.001	0.050 ± 0.002	1.60 ± 0.04
PAW ice	3.04 ± 0.14	485 ± 2	427.0± 3.0	2.15 ± 0.02	8.60 ± 0.11	78.2 ± 1.5

ที่มา: Xinyu Liao et al. (2018)

ในการศึกษาของ Thirumdas R. และคณะ (2018) พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงหลายด้านที่เกิดจากกระบวนการทางเคมีของ Plasma-Activated Water (PAW) โดยสังเกตได้ว่าค่าน้ำมีค่า pH ลดลงใกล้เคียงกับสภาวะกรดมากขึ้น พร้อมทั้งมีการเพิ่มขึ้นของไอออนที่ละลายอยู่ในน้ำ ส่งผลต่อการนำไฟฟ้าที่สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพด้วยพลาสมา ผลลัพธ์นี้ยังชี้ให้เห็นว่า PAW กระตุ้นการสร้าง สารออกซิแดนซ์ (ROS) และสารประกอบไนโตรเจนที่มีปฏิกิริยา (RNS) ได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่ง ROS และ RNS ที่เพิ่มขึ้นเหล่านี้มีบทบาทสำคัญต่อการยับยั้งจุลินทรีย์ และเป็นปัจจัยสนับสนุนในการประยุกต์ใช้น้ำพลาสมาในภาคการเกษตรและอุตสาหกรรมอาหาร

ตารางที่ 2.4 ปฏิกิริยาเคมีของ ROS และ RNS ที่เกิดขึ้นจากน้ำกระตุ้นพลาสมา

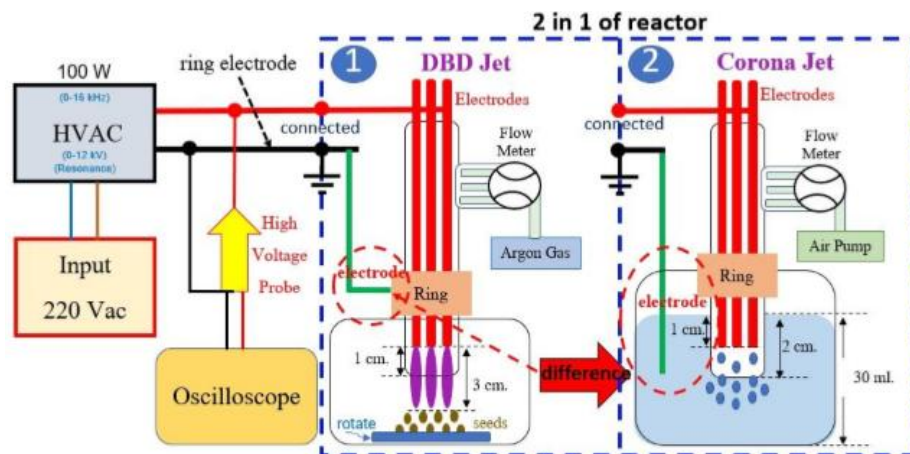
$H_2O + e \rightarrow OH\cdot + H\cdot + e^-$	(1)
$H_2O + e \rightarrow O\cdot + H\cdot + H\cdot + e^-$	(2)
$H_2O + e \rightarrow H^+ + OH\cdot + 2e^-$	(3)
$O_2 + e \rightarrow O^- + O$	(4)
$O_2 + e \rightarrow O^+ + O + 2e^-$	(5)
$O + O_2 + e \rightarrow O_3$	(6)
$O_3 + NO \rightarrow NO_2 + O_2$	(7)
$O + N_2 \rightarrow NO + N$	(8)
$N + O_2 \rightarrow NO + O$	(9)
$2NO + O_2 \rightarrow 2NO_2$	(10)
$O + NO_2 \rightarrow NO + O_2$	(11)

ตารางที่ 2.4 ปฏิกิริยาเคมีของ ROS และ RNS ที่เกิดขึ้นจากน้ำกระตุ้นพลาสมา (ต่อ)

$H_2O_2 + hv \rightarrow OH\cdot + OH\cdot$	(12)
$OH\cdot + OH\cdot \rightarrow H_2O_2$	(13)
$H_2O_2 + H^+ + NO_2^- \rightarrow ONOOH + H_2O$	(14)
$OH + NO_2 \rightarrow [O=N-OOH] \rightarrow O=N-OO^- + H^+$	(15)
$NO_2 + OH \rightarrow HNO_3$	(16)
$NO + NO \rightarrow N_2 + O_2$	(17)
$NO + OH\cdot \rightarrow HNO_2$	(18)
$HNO_2 + OH\cdot \rightarrow NO_2 + H_2O$	(19)
$NO_2 + hv \rightarrow NO + O\cdot$	(20)
$NO_3 + hv \rightarrow NO + O_2$	(21)
$NO_2 + NO_3 \rightarrow N_2O_5$	(22)
$N_2O_5 + H_2O \rightarrow 2HNO_3$	(23)
$2NO_2 + H_2O \rightarrow NO_2^- + NO_3^- + 2H^+$	(24)
$3NO_2 + H_2O \rightarrow 2HNO_3 + NO$	(25)
$3NO_2^- + 3H^+ \rightarrow 2NO + NO_3^- + H_3O^+$	(26)

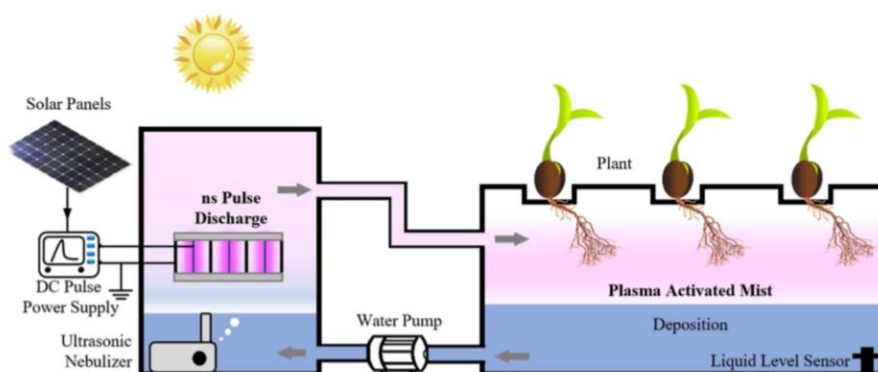
จากการวิจัยของ วุฒิโชค แสงวังและคณะ (2565) ได้ทำการศึกษาผลของการใช้น้ำพลาสมา (Plasma-Activated Water: PAW) ภายใต้ความดันบรรยากาศเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ การกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมาโดยตรง, การประยุกต์ผ่านอุปกรณ์ที่สร้างสัญญาณไฟฟ้าแรงดันสูง และการใช้เทคนิคพลาสมาพร้อมกับก๊าซเฉื่อย ผลลัพธ์ที่ได้ชี้ให้เห็นว่าน้ำที่ผ่านกระบวนการเหล่านี้มีค่า pH ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม ขณะเดียวกันพบว่าความเข้มข้นของ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2), ไนเตรต (NO_3^-) และไนไตรต์ (NO_2^-) ใน PAW เพิ่มขึ้น สารประกอบออกซิแดนซ์เหล่านี้มีส่วนช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Escherichia coli* ได้อย่างมีนัยสำคัญ ผลการศึกษายังยืนยันว่า PAW สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านเชื้อจุลินทรีย์ได้ดี และเมื่อประเมินคุณภาพน้ำ พบว่าค่าการนำไฟฟ้า (EC) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารอนินทรีย์ที่เกิดขึ้นในน้ำ สะท้อนให้เห็นว่าน้ำพลาสมามีศักยภาพเพียงพอที่จะนำไปใช้ทั้งในงานเกษตรกรรม

และการควบคุมเชื้อก่อโรคในพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถแสดงชุดกำเนิดลำพลาสมา (DBD jet) และชุดน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาแบบโคโรนาเจ็ท ได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 (กรอบซ้ายหมายเลข 1) ชุดกำเนิดลำพลาสมา (DBD jet) และ (กรอบขวาหมายเลข 2) ชุดน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาแบบโคโรนาเจ็ท (corona jet) ที่มา: วุฒิโชค แสงวงษ์ (2022)

ในงานวิจัยของ Haotian Gao et al., 2023 ได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ปล่อยพัลส์พลาสมาระดับนาโนวินาทีที่มีขนาด 30 cm. x 30 cm. ซึ่งพลาสมาสามารถทำปฏิกิริยากับละอองหมอก (plasma-activated mist, PAM) ที่มีการอัตราการไหล 300 mL/h ได้อย่างเต็มที่ หยดขนาดไมครอนหรือละอองหมอกเหล่านี้มีอัตราส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรขนาดใหญ่ ทำให้อุณหภูมิที่มีประจุส่วนประกอบออกฤทธิ์ รังสีอัลตราไวโอเล็ต สร้างโดยพลาสมาสามารถผลิต NO_3^- , NO_2^- และ NH_4^+ ในละอองหมอกได้ โดยมีประสิทธิภาพเชิงพลังงานของการตรึงไนโตรเจนของระบบ PAM เท่ากับ 47.79 MJ/mol และผลผลิตคือ 279.7 $\mu\text{mol/h}$ และ PAM ที่มีส่วนประกอบในการตรึงไนโตรเจนถูกนำไปใช้งานร่วมกับระบบ Aeroponic เพื่อให้การดูดซึมน้ำจากรากพืชมีประสิทธิภาพอย่างเต็มที่พบว่าทุกส่วนของพืชสามารถดูดซึมน้ำส่วนประกอบการตรึงไนโตรเจนที่ผลิตโดยพลาสมาได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถเพิ่มอัตราการงอกของใบและพื้นที่ใบของถั่วงอกมากกว่า 30% โดยที่รูปที่ 2.14 แสดงแผนภาพระบบ PAM – Aeroponics



รูปที่ 2.14 แสดงระบบ PAM - Aeroponics ประกอบด้วยระบบตรึงไนโตรเจน เครื่องพ่นละอองหมอกอัลตราโซนิค ถังเก็บน้ำ และบริเวณปลูก แผงโซลาร์เซลล์ใช้ขับเคลื่อนระบบ PAM
ที่มา: Haotian Gao et al. (2023)

จากการศึกษาของ วรณวรารภรณ์ พัฒนะโพธิ์ และคณะ (2562) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับผลของน้ำพลาสมาต่อคุณภาพและการเก็บรักษาองุ่นสายพันธุ์เรดโกลบ โดยแบ่งกลุ่มทดลองออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ (1) ไม่ผ่านพลาสมา (ชุดควบคุม), (2) เชื้อด้วยเชื้อ *Pestalotiopsis* sp., (3) ผ่านน้ำพลาสมาเพียงอย่างเดียว และ (4) ผ่านน้ำพลาสมาพร้อมกับเชื้อ *Pestalotiopsis* sp. การทดสอบใช้ความเข้มข้น 500 โวลต์ ที่ 0.2 มิลลิแอมแปร์ เป็นเวลา 10 นาที และ 0.2 มิลลิแอมแปร์ ที่เวลา 10 นาที โดยเก็บองุ่นไว้ในอุณหภูมิห้อง 5 องศาเซลเซียส แล้วทำการตรวจสอบคุณภาพทุก ๆ 3 วัน ผลการทดสอบพบว่า การเกิดการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์มีอยู่ในช่วง 0.24–5.28% ค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ระหว่าง 6.22–8.42 ค่าความหวาน ($^{\circ}$ Brix) อยู่ที่ 39.83–51.28 ค่า C^* ประมาณ 20.50–29.85 และค่า H° อยู่ในช่วง 82.26–69.17 ขณะที่น้ำหนักขององุ่นลดลงประมาณ 17.1–19.2% รวมทั้งค่าความชื้นอยู่ที่ 0.060–0.084% w/w ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม แต่คุณภาพขององุ่นที่ผ่านน้ำพลาสมาสามารถเก็บรักษาได้นานถึง 21 วัน จากผลการศึกษานี้จึงสรุปได้ว่า การใช้น้ำพลาสมาเพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลไม้ สามารถช่วยยืดอายุการเก็บรักษา และยังทำให้คุณภาพโดยรวมไม่เสื่อมลงอย่างรวดเร็ว โดยมีปัจจัยสำคัญคือการใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าและการเลือกชนิดอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสม