

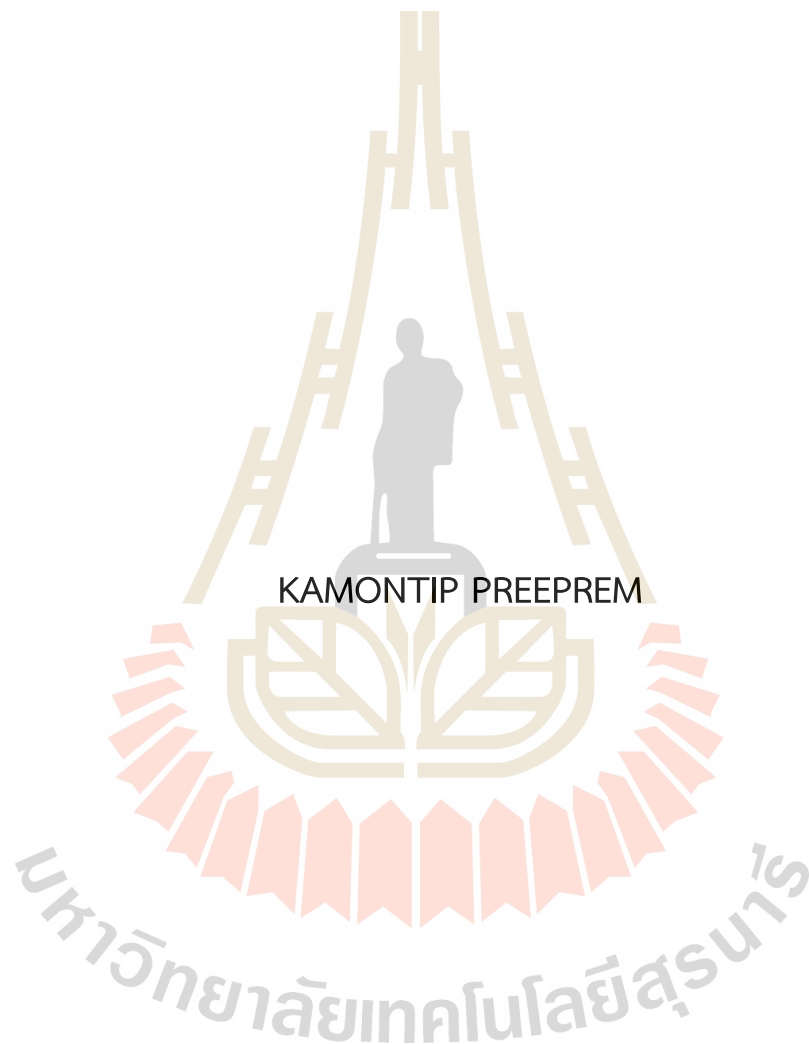
การพัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมา
และผลต่อการยับยั้งจุลินทรีย์ในผักสลัดกรีนโอ๊คและการกระตุ้นการงอก
ของเมล็ดถั่วเขียวพันธุ์ผิวมัน



นางสาวกมลทิพย์ ปรีเปรม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2568

DEVELOPMENT OF PROTOTYPE PLASMA-ACTIVATED WATER
GENERATORS AND EFFECTS ON MICROBIAL INHIBITION IN GREEN
OAK LETTUCE AND GERMINATION OF MUNG BEAN



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical and
Process System Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2025

การพัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับผลิตน้ำกระดุนพลาสมาและผลต่อการยับยั้งจุลินทรีย์
ในผักสลัดกรีนโอ๊คและการกระตุ้นการงอกของเมล็ดถั่วเขียวพันธุ์ผิวมัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิตต์ สายสุนทร)

ประธานกรรมการสอบ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำรรค)

อาจารย์ที่ปรึกษา



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำรรค)

กรรมการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.การุญ พิงสุวรรณรักษ์)

กรรมการ



(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและ

ประกันคุณภาพ



(รองศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

กมลทิพย์ ปรีเปรม: การพัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาและผลต่อการยับยั้งจุลินทรีย์ในผักสลัดกรีนโอ๊คและการกระตุ้นการงอกของเมล็ดถั่วเขียวพันธุ์ผิวมัน (DEVELOPMENT OF PROTOTYPE PLASMA-ACTIVATED WATER GENERATORS AND EFFECTS ON MICROBIAL INHIBITION IN GREEN OAK LETTUCE AND GERMINATION OF MUNG BEAN)

อาจารย์ที่ปรึกษา: ผศ. ดร.กระวี ตรีอำนรรค , 122 หน้า.

คำสำคัญ : น้ำกระตุ้นพลาสมา/ ผักสลัดกรีนโอ๊ค/ การยับยั้งจุลินทรีย์/ การงอกของเมล็ดถั่วเขียว

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องต้นแบบผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมา (Plasma-Activated Water: PAW) ศึกษาผลการปรับปรุงสมบัติของน้ำและประเมินการประยุกต์ใช้น้ำต่อการยับยั้งจุลินทรีย์ในผักสลัดกรีนโอ๊ค (*Lactuca sativa* var. *crispa* L.) รวมทั้งผลต่อการงอกและความแข็งแรงของเมล็ดถั่วเขียวพันธุ์ผิวมัน (*Vigna radiata*) เครื่องต้นแบบที่พัฒนามี 3 ระบบ ได้แก่ แบบกระตุ้นรอบเดียว ซึ่งใช้หม้อแปลงแรงดันสูง 8 kV ดิสชาร์จในละอองหมอก พบว่ามีการสะสมของ NO_3^- , NO_2^- และ H_2O_2 และเมื่อใช้ล้างผักสลัดสามารถลดปริมาณจุลินทรีย์ได้ 47.84–68.31% แต่ยังมีข้อจำกัดด้านกำลังการผลิต แบบที่สองเป็นระบบหมุนวน พัฒนาต่อยอดจากแบบแรก ทำให้สารออกซิแดนต์มีความเข้มข้นและเสถียรภาพสูงขึ้น แต่ประสิทธิภาพยังไม่เต็มที่ ส่วนแบบที่สามเป็นระบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge ซึ่งให้ผลดีที่สุด โดยติดตั้งหัวพลาสมาหลายหัวร่วมกับระบบหมุนเวียนน้ำ ทำให้ PAW มีความเข้มข้นและสม่ำเสมอสูง การทดสอบพบว่าค่า pH ลดลงชัดเจน ขณะที่ ORP, EC, NO_3^- , NO_2^- และ H_2O_2 เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะภายใต้เงื่อนไข 2 หัว อัตราการไหลของอากาศ 0.78–1.02 L/min นาน 90 นาที สามารถลดจุลินทรีย์บนผักสลัดได้มากกว่า 99.99% (≥ 4 log reduction) สำหรับการงอกของถั่วเขียว เมล็ดที่ใช้ น้ำ PAW งอกครบ 100% ภายในวันแรก ขณะที่กลุ่มควบคุมใช้เวลามากกว่า และค่าดัชนีความแข็งแรง (VI) แตกต่างตามเงื่อนไข โดยค่า VI สูงสุด (1,250) พบที่ 1 หัว อัตราการไหลของอากาศ 1.02 L/min นาน 90 นาที สะท้อนบทบาทของ RONS ในการกระตุ้นเมแทบอลิซึมของพืช ขณะที่การใช้ 2 หัวนานเกินไปกลับลดค่า VI จากผลของความเครียดออกซิเดชัน

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2568

ลายมือชื่อนักศึกษา กมลทิพย์ ปรีเปรม

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา น.ศ. ชัยวัฒน์

Kamontip Preeprem: APPLICATION OF PLASM-ACTIVATED WATER TO
INACTIVATE OF MICROBIAL CELLS IN VEGETABLES.

THESIS ADVISOR: ASST. PROF. KRAWEE TREEAMNUK, 122 PP

Keywords: Plasma-Activated Water, Green Oak Lettuce, Microbial Inhibition, Mung
Bean Germination

This study developed three prototype machines for producing plasma-activated water (PAW) and examined its effects on water properties, microbial inhibition in green oak lettuce, and mung bean germination. The first single-pass system (10 kV, copper electrodes) reduced microbes by 47.84–68.31% but was limited in capacity. The second recirculating design improved stability and oxidative species concentration but still lacked efficiency. The third, integrating Corona Discharge with multiple plasma heads, produced highly reactive and consistent PAW, lowering pH and increasing ORP, EC, NO_3^- , NO_2^- , and H_2O_2 . Under optimal conditions (two heads, 0.78–1.02 L/min, 90 min), microbial counts dropped by ≥ 4 log, confirming its strong disinfecting ability. In germination tests, PAW - treated mung beans achieved 100% germination within the first day, while the control group germinated more slowly and less uniformly. The vigor index (VI) reached its highest value (1,250) under moderate treatment conditions, reflecting the role of reactive oxygen and nitrogen species (RONS) in stimulating plant metabolism and early growth. However, harsher conditions, such as prolonged exposure with two plasma heads, led to reduced VI due to oxidative stress, highlighting the need to optimize treatment intensity. These results indicate that PAW has potential as a sustainable technology for both food safety enhancement and agricultural applications.

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2025

Student's Signature Kamontip Preeprem

Advisor's Signature Krawee TreeamnuK

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วย ความกรุณา ความเอื้อเฟื้อ และการสนับสนุนจากหลายท่าน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กระจวี ตรีอำนรรค อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษา รวมถึงข้อเสนอแนะที่มีคุณค่าอย่างยิ่งในทุกขั้นตอน ตั้งแต่การวางแผนจนถึงการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนกำลังใจที่มอบให้มาอย่างต่อเนื่อง

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนรรค ที่ได้ให้คำแนะนำอันมีคุณค่าในกระบวนการปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย อีกทั้งยังกรุณาชี้แนะและตรวจแก้บทความสำหรับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติ รวมถึงเอกสารที่นำเสนอในการประชุมวิชาการนานาชาติ ตลอดจนช่วยทบทวนและปรับปรุงเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิตต์ สายสุนทร ประธานกรรมการและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.การุญ พิงสุวรรณรักษ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้กรุณาให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ พร้อมทั้งชี้แนะและแก้ไขส่วนที่คลาดเคลื่อนในเนื้อหาวิทยานิพนธ์ เพื่อให้ผลงานมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คณะอาจารย์ในคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่มอบองค์ความรู้และชี้แนะแนวทางทางวิชาการอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการศึกษาค้นคว้าในครั้งนี้ อีกทั้งยังได้อำนวยความสะดวกด้านห้องปฏิบัติการและเครื่องมือวิจัยที่จำเป็น ทำให้การดำเนินงานสามารถบรรลุตามเป้าหมายที่วางไว้

ผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้การสนับสนุนด้านทุนการศึกษาและสิ่งอำนวยความสะดวกในการดำเนินงาน อีกทั้งขอขอบคุณ บุคลากรสายสนับสนุนทุกท่าน ที่คอยให้คำแนะนำด้านเอกสารและขั้นตอนต่าง ๆ ด้วยความเอื้อเฟื้อ

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยขอแสดงความกตัญญูต่อ บิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยเป็นกำลังใจ หล่อหลอมความมุ่งมั่น และเป็นแรงสนับสนุนที่สำคัญที่สุดตลอดช่วงระยะเวลาของการศึกษาและการทำวิจัย

กมลทิพย์ ปรีเปรม

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2 ปรัชณววรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1.1 พลาสมา.....	5
2.1.2 กระบวนการเกิดพลาสมา	11
2.1.3 ระบบพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ.....	13
2.1.4 การกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา (Plasma activation water, PAW)	21
2.1.5 ระยะเวลาในการกระตุ้น.....	22
2.1.6 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำพลาสมา.....	22
2.1.7 กลไกการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ของน้ำกระตุ้นพลาสมา	28

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.1.8	ผักกาดหอมหรือผักสลัด.....	30
2.1.9	กลไกการเพิ่มการงอกของเมล็ดด้วยน้ำกระตุ้นพลาสมา.....	33
2.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (literature reviews).....	35
3	วิธีการดำเนินการวิจัย	40
3.1	ผลของการปรับคุณภาพน้ำโดยเทคนิคกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา	40
3.1.1	ชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบรอบเดียว	40
3.1.2	ชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวน.....	42
3.1.3	ชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge.....	44
3.1.4	อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย.....	45
3.1.5	การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	48
3.2	ผลของการปรับคุณภาพน้ำต่อความสามารถในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์	52
3.2.1	วัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษาผลของการปรับคุณภาพน้ำ	52
3.2.2	ขั้นตอนการจุ่มล้างผักสลัดกรีนโอ๊ค.....	52
3.2.3	ขั้นตอนการวิเคราะห์จุลินทรีย์.....	53
3.3	อิทธิพลของน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาต่อการงอกของเมล็ด.....	57
3.3.1	วัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาต่อการงอก..	57
3.3.2	วิธีการเก็บข้อมูลผลการงอก	58
3.4	การประเมินการใช้พลังงานของระบบผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมา	60
3.4.1	พลังงานเฉลี่ยที่ใช้ต่อรอบ	60
3.4.2	ค่าการใช้พลังงานจำเพาะต่อหน่วยการผลิต.....	60
3.5	สถานที่ทำการศึกษาวิจัย	61
3.6	ระยะเวลาทำการทดลอง	61
4	ผลการวิจัยและอภิปรายผล	62

สารบัญ (ต่อ)

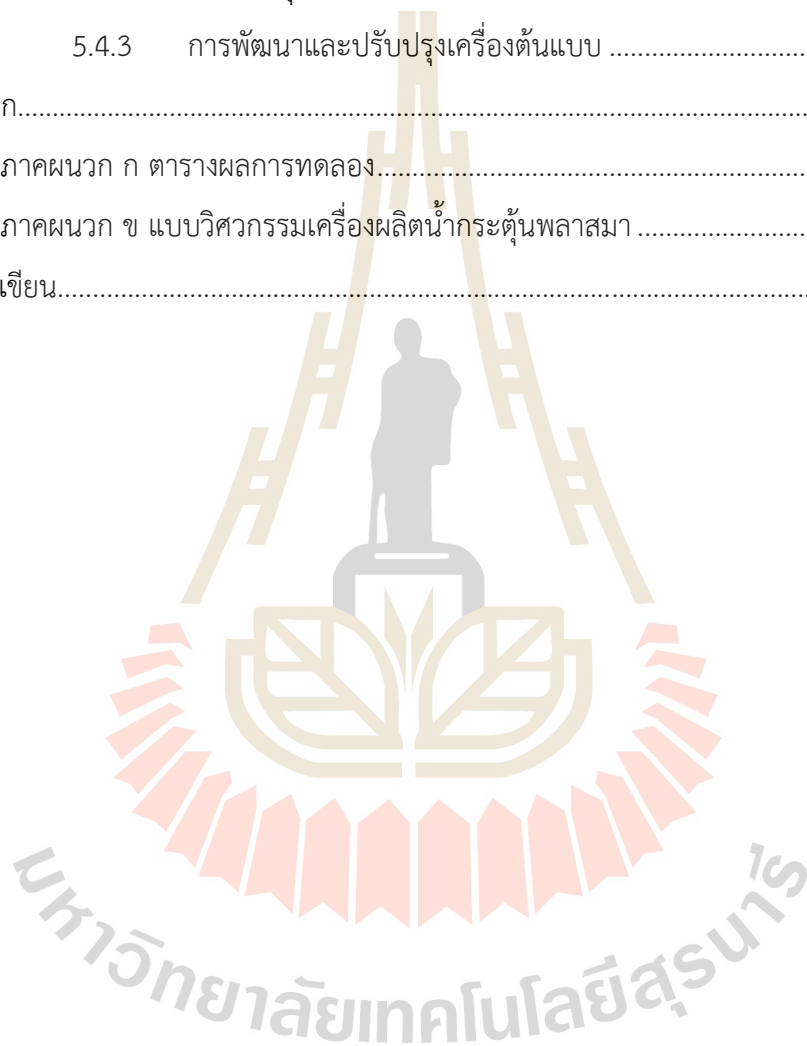
หน้า

4.1	ผลการศึกษาการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบรอบเดียว และแบบหมุนวน	62
4.1.1	ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไนเตรตและไนไตรท์	62
4.1.2	การศึกษาค่าความเป็นกรด-ต่าง (pH).....	63
4.1.3	ผลการศึกษาอิทธิพลของน้ำกระตุ้นพลาสมาต่อการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์....	64
4.1.4	การวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของผักสลัดกรีนโอ๊ค	66
4.2	ผลการศึกษาการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวน ร่วมกับ Corona Discharge	69
4.2.2	การศึกษาค่าความเป็นกรด-ต่าง (pH).....	73
4.2.3	ผลการศึกษาอิทธิพลของน้ำกระตุ้นพลาสมาต่อการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์....	77
4.3	ผลการศึกษาอิทธิพลของน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาต่อการงอกของเมล็ดถั่วเขียว	81
4.4	การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) กับประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมา.....	83
5	สรุปและข้อเสนอแนะ	87
5.1	การออกแบบและพัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมา และผลของการปรับปรุงสมบัติน้ำ.....	87
5.2	ประสิทธิภาพของน้ำกระตุ้นพลาสมาในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ในผักสลัดกรีนโอ๊ค	87
5.3	ผลของน้ำกระตุ้นพลาสมาต่อการงอกและความแข็งแรงของเมล็ดถั่วเขียวพันธุ์ผิวมัน	88
5.4	ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) กับประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมา	88
5.5	ข้อเสนอแนะเชิงปฏิบัติ (Recommendation).....	88
5.4.1	การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผักสด	88

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.4.2	การประยุกต์ใช้ในภาคการเกษตร	89
5.4.3	การพัฒนาและปรับปรุงเครื่องต้นแบบ	89
ภาคผนวก.....		97
ภาคผนวก ก	ตารางผลการทดลอง.....	98
ภาคผนวก ข	แบบวิศวกรรมเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมา	111
ประวัติผู้เขียน.....		123



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	คุณสมบัติของพลาสติกโดยการดิสซาร์จที่ความดันบรรยากาศ..... 14
2.2	เปรียบเทียบวิธีการใช้สารละลายลดสารพิษตกค้างในผักและผลไม้กับพลาสติกสารละลาย . 25
2.3	ค่าพารามิเตอร์ของน้ำจากการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยพลาสติก..... 36
2.4	ปฏิกิริยาเคมีของ ROS และ RNS ที่เกิดขึ้นจากน้ำกระตุ้นพลาสติก..... 36
3.1	ตารางสรุปตัวแปรและสูตรคำนวณการงอกของเมล็ด..... 59
4.1	ค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่ได้จากเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสติกแบบรอบเดียว 63
4.2	การเจริญของเชื้อจุลินทรีย์แบบ Total Plate Count (TPC) ที่ได้จากการจุ่มล้างด้วย น้ำประปาและผลิตน้ำกระตุ้นพลาสติกแบบรอบเดียว 64
4.3	ปริมาณการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ แบบ Total Plate Count (TPC) ได้จากการจุ่มล้างด้วย น้ำประปาและผลิตน้ำกระตุ้นพลาสติกแบบรอบเดียว 65
4.4	ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของผักสลัดกรีนโอ๊คที่เปลี่ยนไปในแต่ละวัน ของตัวอย่างผักสลัดกรีน โอ๊คที่ปลูกแบบไฮโดรโปนิคส์และการปลูกแบบลงดิน 67
4.5	ผลการตรวจวัดค่า NO_3^- , NO_2^- และ H_2O_2 ที่ได้จากเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสติกแบบ หมุนวนร่วมกับ Corona Discharge..... 69
4.6	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (p-value) ของปัจจัย A (จำนวนหัว) B (อัตราการไหลของอากาศ) และ C (เวลา) ที่ส่งผลต่อความเข้มข้นของ NO_3^- , NO_2^- และ H_2O_2 71
4.7	ผลทดสอบเปรียบเทียบความเข้มข้นของ ไนเตรต (NO_3^-) ไนไตรท์ (NO_2^-) และ ไฮโดรเจน เปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)..... 71
4.8	ค่า pH, ORP, EC และ อุณหภูมิของน้ำกระตุ้นพลาสติกที่ได้จากเครื่องผลิตน้ำกระตุ้น พลาสติกแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge..... 73
4.9	ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของ pH, ORP, Conductivity และอุณหภูมิ..... 75

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.10 การเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ แบบ Total Plate Count (TPC) ที่ได้จากการจุ่มล้างด้วยน้ำประปาและผลิตน้ำกระตุ้นพลาสติกแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge	77
4.11 ปริมาณการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ แบบ Total Plate Count (TPC) ได้จากการจุ่มล้างด้วยน้ำประปาและผลิตน้ำกระตุ้นพลาสติกแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge.....	79
4.12 ผลปริมาณการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์แบบ Total Plate Count (TPC) ได้จากการจุ่มล้างด้วยน้ำประปาและผลิตน้ำกระตุ้นพลาสติกแบบรอบเดียวและแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge.....	79
4.13 ผลการศึกษาการงอกของเมล็ดถั่วเขียวพันธุ์ผิวมัน	80
4.14 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ของระบบผลิตน้ำกระตุ้นพลาสติกจากเครื่องแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge.....	82
4.15 ค่าพลังงานจำเพาะต่อหน่วยการผลิต (SEC_{prod}) จากเครื่องแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge	83
ก.1 ผลการตรวจสอบค่า pH.....	97
ก.2 การเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ แบบ Total Plate Count (TPC)	98
ก.3 ผลการตรวจสอบค่า pH.....	99
ก.4 ผลการตรวจสอบค่า ORP (Oxidation-Reduction Potential).....	99
ก.5 ผลการตรวจสอบค่า conductivity (ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร)	100
ก.6 ผลการตรวจสอบค่า อุณหภูมิ (°C).....	101
ก.7 ผลการตรวจวัดค่า NO_3^- , NO_2^- และ H_2O_2	101
ก.8 การเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ แบบ Total Plate Count (TPC).....	102
ก.9 ความยาวต้นอ่อนและจำนวนเมล็ดถั่วเขียวที่งอกภายใต้เงื่อนไขการบำบัดด้วยน้ำกระตุ้นพลาสติกและน้ำประปา (Control).....	109
ก.10 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้และค่า SEC_{prod} ของระบบผลิตน้ำกระตุ้นพลาสติก ครั้งที่ 1 ...	114
ก.11 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้และค่า SEC_{prod} ของระบบผลิตน้ำกระตุ้นพลาสติก ครั้งที่ 2... 114	114

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่

หน้า

ก.12 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้และค่า SEC_{prod} ของระบบผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมา ครั้งที่ 3 ... 115

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	การเปรียบเทียบการปล่อยโคโรนาเชิงบวกและเชิงลบ 15
2.2	แสดงโครงสร้างและหลักการเกิดการคายประจุไฟฟ้า 16
2.3	การกำหนดค่าการปล่อยสิ่งกีดขวางอิเล็กทรอนิกส์ระนาบทั่วไปและทรงกระบอก..... 17
2.4	แสดงการเกิดพลาสมาแบบการดิสชาร์จเหนือผิว 18
2.5	แสดงการเกิดพลาสมาแบบดิสชาร์จร่วมระนาบ..... 18
2.6	แผนภาพแสดงการปล่อยประจุไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ ที่ใช้ในการเตรียมของเหลวที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมา..... 20
2.7	รูปแบบการคายประจุพลาสมาที่ใช้ในการกระตุ้นน้ำ แบบเหนือน้ำแลแบบใต้น้ำ 21
2.8	รูปแบบการเกิดองค์ประกอบอนุภาคน้ำกระตุ้นพลาสมา 23
2.9	แผนผังของการยับยั้งการทำงานของเซลล์จุลินทรีย์ที่เกิดจากน้ำกระตุ้นพลาสมา..... 28
2.10	ผักสลัดกรีนโอ๊ค..... 32
2.11	กลไกการเพิ่มการงอกของเมล็ดด้วยน้ำกระตุ้นพลาสมา..... 34
2.12	การใช้น้ำแข็งจากกระตุ้นด้วยพลาสมาเพื่อถนอมกุ้ง 35
2.13	ชุดกำเนิดลำพลาสมา DBD jet และแบบโคโรนาเจ็ท 38
2.14	แสดงระบบ PAM - Aeroponics..... 39
3.1	แผนภาพแสดงชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบรอบเดียว..... 41
3.2	แผนภาพแสดงชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวน 43
3.3	แผนภาพแสดงชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบ Corona Discharge 44
3.4	แผนภาพแสดงชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge 44
3.5	แหล่งจ่ายไฟฟ้า ATTEN INSTRUMENTS รุ่น APR3010H 46
3.6	บอร์ด Arduino Mega 2560 AT 46
3.7	Thermocouple type k และ Max6675 Module..... 46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8 Solid State Relay (SSR) 75DA	47
3.9 กระดาษทดสอบเปอร์ออกไซด์ รุ่น 91312	49
3.10 เครื่องวัดคุณภาพน้ำแบบมัลติพารามิเตอร์ รุ่น PC2700.....	51
3.11 เครื่องวัดสี Colorimeter ยี่ห้อ HunterLab รุ่น UltraScan	51
3.12 สารละลาย 0.1% peptone water	53
3.13 การเจือจางเชื้อจุลินทรีย์จากตัวอย่างผักสลัด.....	54
3.14 เครื่อง Biosafety cabinet class 2.....	54
3.15 3M™ Petrifilm™ Aerobic Count (AC) Plate.....	55
3.16 ตู้บ่มเพาะเชื้อควบคุมอุณหภูมิ.....	56
3.17 ชุดอ่านเชื้อจุลินทรีย์บนแผ่นกระดาษอัตโนมัติ ยี่ห้อ 3M Petrifilm รุ่น Petrifilm Plate Reader Advanced R3	56
4.1 (A) ผักสลัดกรีนโอ๊คของวันที่ 0, (B) ผักสลัดกรีนโอ๊คของวันที่ 4.....	68
ก.1 การเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ แบบ Total Plate Count (TPC).....	103
ก.8 ความยาวต้นอ่อนของถั่วเขียวพันธุ์ผิวมันวันที่ 7 ที่งอกภายใต้เงื่อนไขการบำบัดด้วยน้ำกระตุ้น พลาสมา.....	110
ข.1 ส่วนประกอบเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบรอบเดียว.....	117
ข.2 แบบเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบรอบเดียว.....	118
ข.3 ส่วนประกอบเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวน.....	117
ข.4 แบบเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวน.....	118
ข.5 ส่วนประกอบเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge.....	117
ข.6 แบบเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge.....	118

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

กระแสการดูแลสุขภาพที่ทวีความสำคัญในสังคมร่วมสมัยได้ส่งผลให้การบริโภคผักสดและผักใบเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ผักสดไม่เพียงทำหน้าที่เป็นแหล่งของสารอาหารที่จำเป็นต่อร่างกาย เช่น วิตามินซี วิตามินเอ และแคลเซียม แต่ยังมีสารประกอบเคมี เช่น คลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์ ที่มีบทบาทในการเสริมสร้างสุขภาพและลดความเสี่ยงต่อโรคเรื้อรัง (ณัฐธิดา ปัญญา มากไพบุลย์ และคณะ, 2561; สุภาพร ราชา และคณะ, 2560) ความนิยมในการบริโภคผักสดยังสะท้อนมิติทางเศรษฐกิจและพฤติกรรมผู้บริโภครุ่นใหม่โดยเฉพาะในเขตเมืองที่มีการขยายตัวของตลาดผักใบเขียวอย่างรวดเร็ว การจัดจำหน่ายในรูปแบบพร้อมรับประทาน เช่น สลัดกล่อง ได้กลายเป็นทางเลือกที่ตอบโจทย์วิถีชีวิตที่เร่งรีบของคนเมือง ปรากฏการณ์นี้ไม่เพียงสร้างมูลค่าทางเศรษฐกิจ แต่ยังบ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงเชิงวัฒนธรรมด้านการบริโภค อย่างไรก็ตาม ความนิยมในการบริโภคผักสดย่อมมาพร้อมกับความท้าทายด้านความปลอดภัย มีรายงานการเกิดโรคอาหารเป็นพิษและการปนเปื้อนจุลินทรีย์ในผักสดทั้งที่จำหน่ายในประเทศและที่ส่งออก (Brackett et al., 2001; Jackson et al., 1995; อติศร เสวตวัฒน์ และคณะ, 2538; ภวานาภา บุณนาค และคณะ, 2550) ข้อมูลจากสำนักมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ ยังระบุถึงการตรวจพบเชื้อก่อโรค เช่น *Salmonella* spp. และ *Escherichia coli* ในผัก ที่ส่งออกไปสหภาพยุโรปอย่างต่อเนื่อง (ปรีชา จึงสมานกุล และคณะ, 2553) การปนเปื้อนดังกล่าวส่งผลกระทบต่อสุขภาพผู้บริโภคและความเชื่อมั่นทางการค้า เนื่องจากอาจนำไปสู่การปฏิเสธการนำเข้าและความเสียหายทางเศรษฐกิจของประเทศ ดังนั้น การสร้างมาตรการที่สามารถควบคุมความปลอดภัยได้อย่างยั่งยืน จึงเป็นความจำเป็นในเชิงสาธารณสุขและเศรษฐกิจ การล้างผักด้วยสารคลอรีนยังเป็นวิธีมาตรฐานที่ใช้กันแพร่หลาย เนื่องจากสามารถยับยั้งจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ข้อจำกัดคือความเสี่ยงจากการตกค้างทางเคมีและการเกิดผลพลอยได้ ที่อาจไม่พึงประสงค์ (Gil et al., 2009). ด้วยเหตุนี้จึงมีการแสวงหาทางเลือกใหม่ เช่น การใช้โอโซน รังสีอัลตราไวโอเลต และกรดอินทรีย์ อย่างไรก็ตาม แต่ละวิธียังมีข้อจำกัด เช่น ประสิทธิภาพจำกัดบนพื้นผิวที่ไม่เรียบหรือความกังวลด้านสารตกค้าง

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาเทคโนโลยีพลาสมาได้รับความสนใจเนื่องจากสามารถสร้างอนุภาคที่มีพลังงานสูง เช่น Reactive Oxygen and Nitrogen Species (RONS) ซึ่งมีศักยภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ทิ้งสารตกค้างอันตราย (Fridman, 2008; Laroussi, 2002) น้ำที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลาสมา (Plasma Activated Water: PAW) ได้รับการรายงานว่าสามารถลดการปนเปื้อนและยืดอายุการเก็บรักษาผลิตผลสด (เครือวัลย์ พรหมลักษณ์ และคณะ, 2556; นาริรัตน์, 2554; Khan et al., 2019) รายงานวิจัยอื่นที่ยืนยันผลลัพท์ที่สอดคล้องกัน เช่น Fröhling et al. (2018), Patange et al. (2019) และ Schnabel et al. (2019) ที่พบว่าน้ำกระตุ้นพลาสมา สามารถลดเชื้อก่อโรคในผักสลัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งแสดงถึงศักยภาพของเทคโนโลยีนี้ในการประยุกต์ใช้เชิงอุตสาหกรรม เมื่อพิจารณาในมิติด้านนโยบาย พลาสมามีความเหมาะสมที่จะเป็นส่วนหนึ่งของมาตรการความปลอดภัยอาหารระดับประเทศ เนื่องจากตอบโจทย์ทั้งการปกป้องสุขภาพผู้บริโภคและความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อม พร้อมทั้งสนับสนุนความสามารถในการแข่งขันทางการค้าของประเทศ

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงต้องการพัฒนาวิธีการผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาและศึกษาผลของการปรับคุณภาพน้ำด้วยวิธีการกระตุ้นด้วยพลาสมาต่อความสามารถในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในผักสลัดกรีนโอ๊ค (*Lactuca sativa* var. *crispa* L.) ในส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาอิทธิพลของน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาต่อการงอกของเมล็ดถั่วเขียวสายพันธุ์ผิวมัน (*Vigna radiata*)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาและศึกษาผลของการปรับปรุงสมบัติของน้ำ พารามิเตอร์ทางกายภาพและเคมีที่วิเคราะห์ประกอบด้วย ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH), ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity; EC), ปริมาณไอออนไนเตรต (Nitrate; NO_3^-), ปริมาณไอออนไนไตรต์ (Nitrite; NO_2^-) และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide; H_2O_2) ภายหลังจากกระตุ้นด้วยพลาสมา

1.2.2 เพื่อประเมินประสิทธิภาพของน้ำกระตุ้นพลาสมาในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในผักสลัดกรีนโอ๊ค (*Lactuca sativa* var. *crispa* L.) โดยใช้ในการตรวจวิเคราะห์ด้วย Petrifilm

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของน้ำกระตุ้นพลาสมาต่อการงอกและความแข็งแรงของเมล็ดถั่วเขียวพันธุ์ผิวมัน (*Vigna radiata*) โดยพิจารณาค่าตัวชี้วัดด้านการงอก ได้แก่ เปอร์เซ็นต์การงอก (GP),

ดัชนีการงอก (GI), เวลาเฉลี่ยการงอก (MGT), อัตราการงอก (GR) และดัชนีความแข็งแรงของต้นกล้า (VI)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้มุ่งเน้นการศึกษาผลของน้ำที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลาสมาต่อคุณสมบัติของน้ำ ความสามารถในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ในผักสลัดและการงอกของเมล็ดถั่วเขียว โดยแบ่งขอบเขตการดำเนินงานออกเป็นสามส่วน ดังนี้

1.3.1 ดำเนินการออกแบบระบบพลาสมาในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ปัจจัยทดลอง ได้แก่ จำนวนหัวจ่ายพลาสมา (1 และ 2 หัว), อัตราการไหลของอากาศ (0.78, 1.02 และ 1.26 L/min) และระยะเวลาการกระตุ้น (60 และ 90 นาที) พร้อมทั้งตรวจวัดคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH), ค่าการนำไฟฟ้า (EC), ปริมาณไอออนไนเตรต (Nitrate; NO_3^-), ปริมาณไอออนไนไตรต์ (Nitrite; NO_2^-) และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide; H_2O_2)

1.3.2 ศึกษาผลของการนำน้ำกระตุ้นพลาสมาที่ได้จากเครื่องต้นแบบมาใช้ล้างผักสลัด กรีนโอ๊ค (*Lactuca sativa* var. *crispa* L.) จากฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัด นครราชสีมา โดยวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนก่อนและหลังการล้างด้วยวิธี Petrifilm (Total Plate Count) เพื่อประเมินความสามารถในการลดจำนวนจุลินทรีย์เปรียบเทียบกับการใช้น้ำประปา

1.3.3 ใช้น้ำกระตุ้นพลาสมาล้างและเพาะเลี้ยงเมล็ดถั่วเขียวพันธุ์ผิวมัน (*Vigna radiata*) ภายใต้สภาวะควบคุม โดยบันทึกข้อมูลการงอกในช่วง 7 วัน พร้อมวิเคราะห์ตัวชี้วัด ได้แก่ เปอร์เซ็นต์การงอก (GP), ดัชนีการงอก (GI), เวลาเฉลี่ยการงอก (MGT), อัตราการงอก (GR), ดัชนีความแข็งแรงของต้นกล้า (VI)

1.3.4 ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง 8 kV สำหรับการสร้างพลาสมา

1.3.5 ใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 เป็นหน่วยประมวลผลหลัก สำหรับกำหนดการทำงาน โดยส่งสัญญาณดิจิทัลเพื่อสั่งงาน Solid State Relay (SSR) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ในการเปิด - ปิดวงจรไฟฟ้าแรงสูง

1.3.6 การศึกษาครั้งนี้ดำเนินการในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory Scale)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 การออกแบบและพัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับผลิตน้ำกระตุ้นพลาสติกจะสามารถปรับปรุงสมบัติของน้ำได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าพารามิเตอร์ทางกายภาพและเคมี ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH), ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity; EC), ปริมาณไอออนไนเตรต (Nitrate; NO_3^-), ปริมาณไอออนไนไตรต์ (Nitrite; NO_2^-) และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide; H_2O_2) จะเปลี่ยนแปลงไปตามจำนวนหัวพลาสติก อัตราการไหลของอากาศ และระยะเวลาการกระตุ้น

1.4.2 น้ำที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลาสติกมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในผักสลัดกรีนโอ๊ค (*Lactuca sativa* var. *crispa* L.) ได้ดีกว่าน้ำประปา โดยจะสามารถลดปริมาณจุลินทรีย์รวมได้อย่างมีนัยสำคัญ

1.4.3 การใช้น้ำกระตุ้นพลาสติกในการเพาะเมล็ดถั่วเขียวพันธุ์ผิวมัน (*Vigna radiata*) จะส่งผลให้อัตราการงอกและความแข็งแรงของต้นกล้าสูงกว่าการใช้น้ำประปา โดยสะท้อนผ่านค่าเปอร์เซ็นต์การงอก (GP), ดัชนีการงอก (GI), เวลาเฉลี่ยการงอก (MGT), อัตราการงอก (GR) และดัชนีความแข็งแรงของต้นกล้า (VI)

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) และสายฟ้าก็เป็นพลาสมาในชีวิตประจำวันเราสามารถพบเห็นพลาสมาได้ในแสงจากแหล่งแสงสังเคราะห์ 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) และปฏิสัมพันธ์คูโลมบ์ 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 การศึกษาอันตรกิริยาที่ซับซ้อนอย่างยิ่งระหว่างอนุภาคจำนวนมากเหล่านี้จำเป็นต้องใช้วิธีการสถิติ อัตราส่วนของจำนวนอนุภาคที่กระจายตัวภายในหนึ่งหน่วยปริมาตรของระบบ (n) และอุณหภูมิ (T) ซึ่งสะท้อนถึงพลังงานของอนุภาค ความหลากหลายเป็นปัจจัยที่ก่อให้เกิดความแตกต่างของค่าของอนุภาคองค์ประกอบในแต่ละประเภทจากกระบวนการประมวลผลเชิงสถิติชี้ให้เห็นว่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของอนุภาคแต่ละประเภทจะเท่ากับ 1.5 เท่าของผลคูณระหว่างค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ (k_B) กับอุณหภูมิของกลุ่มอนุภาคนั้น คือ $\frac{3}{2} k_B T$ เนื่องจากพลาสมาโดยพื้นฐานเกิดจากแก๊ส ความดันจึงนิยามได้ว่าเป็นปริมาณฟิสิกส์ที่ได้จากการจับคู่ค่าความหนาแน่นของอนุภาคเข้ากับค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ และอุณหภูมิ หรือ $nk_B T$ 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 จึงจำเป็นต้องมีจำนวนอนุภาคที่หลากหลายนามากเพียงพอที่จะเกิดการแจกแจงเชิงสถิติและสามารถเกิดการกำกับค้ำยกักรบวงวนได้ 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

$$V \ll \omega_e$$

นั่นหมายถึงอันตรกิริยาของพฤติกรรมร่วมหมู่ในพลาสมาจะขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กมากกว่าการชนกัน ทำให้คลื่นที่มีความถี่สูงสามารถเคลื่อนที่ผ่านพลาสมาได้ ส่งผลให้เกิดสนามแรงที่กระทำต่อประจุในระยะทางไกลออกไปจากจุดกำเนิดของคลื่น และเกินกว่าความยาวเดอบาย ซึ่งการให้กำเนิดและคงสภาพพลาสมาไว้จำเป็นต้องอาศัยพลังงานที่เพียงพอสำหรับการไอออไนซ์ในสภาวะคงตัว อัตราการไอออไนซ์จะสมดุลกับอัตราการสูญเสียไอออนและอิเล็กตรอน ซึ่งออกไปจากพลาสมาโดยกระบวนการรีคอมบิเนชัน (recombination) และการแพร่ไปสู่ขอบ (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 เผ่าสวัสดิ์ยรรยง, 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 (ธีรธรณ บัญญูวรรณ, 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 (ธีรธรณ บัญญูวรรณ, 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

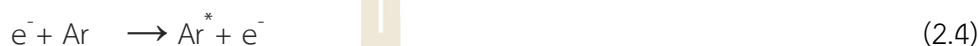
3) ส่วนการไอออนไนซ์ครั้งที่สาม:



ต้องใช้พลังงานสูงขึ้นเป็น 40.7 eV

2.1.2.2 การถูกกระตุ้น (Excitation)

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

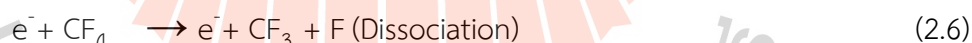


2.1.2.3 การแยกตัวออก (Dissociation)

กระบวนการแยกตัวออกหมายถึงการที่โมเลกุลถูกชนหรือถูกกระตุ้นจนพันธะทางเคมีแตกออก กลายเป็นอะตอมอิสระหรืออนุภาคย่อย เช่น ในกรณีของโมเลกุลออกซิเจนเมื่อได้รับพลังงานจากการชนของอิเล็กตรอน จะสามารถแตกตัวออกเป็นอะตอมออกซิเจนสองอะตอมได้ ปรากฏการณ์นี้สามารถเขียนแทนด้วยสมการ (2.5)



ผลจากการแยกตัวของโมเลกุลมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาเคมี เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความว่องไวต่อปฏิกิริยามากกว่าอะตอมที่ยังไม่แตกตัว 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

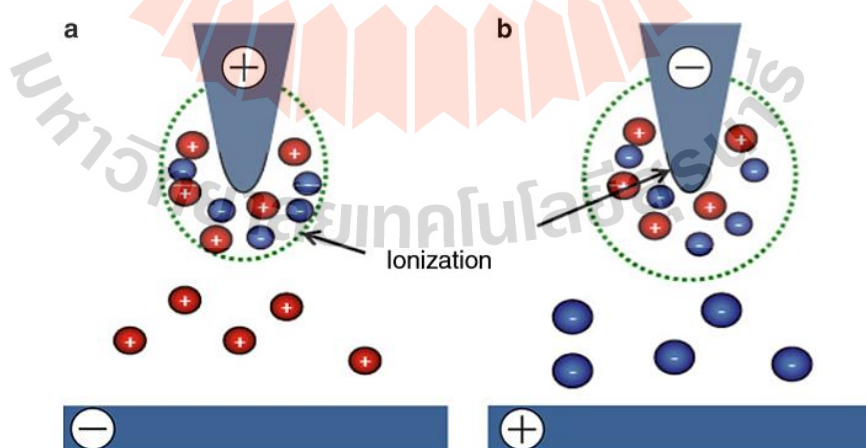
วิธีการ ตัวอย่างที่ใช้กันแพร่หลาย ได้แก่ Plasma needle, Dielectric Barrier discharge, Corona discharge, Micro hollow cathode discharge, One atmospheric uniform glow discharge, Gliding arc discharge, Atmospheric pressure plasma jet แต่ละเทคนิคมีคุณลักษณะเด่นและข้อจำกัดของแต่ละแนวทางไม่เหมือนกัน จึงต้องเลือกให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ เช่น การฆ่าเชื้อโรค การปรับปรุงพื้นผิววัสดุ การใช้ในด้านชีวการแพทย์ ตลอดจนงานวิจัยที่ต้องการควบคุมปฏิกิริยาเคมีเฉพาะ พลาสมาที่เกิดขึ้นในสภาวะความดันบรรยากาศยังคงมีองค์ประกอบของอิเล็กตรอน 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	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

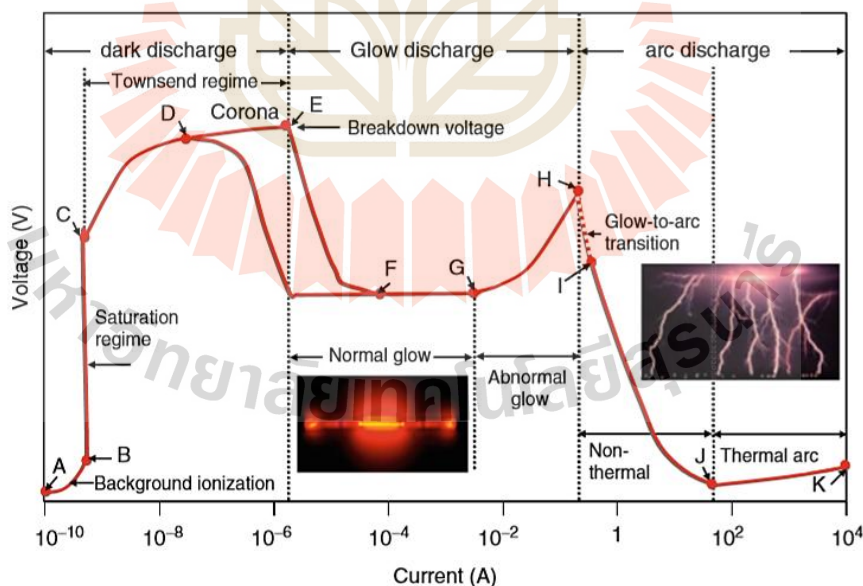
1) ดิสชาร์จโคโรนา (Corona discharge): การคายประจุไฟฟ้าในลักษณะโคโรนาจะเกิดขึ้นเมื่อมีการใช้ขั้วไฟฟ้าที่มีปลายแหลมหรือมีพื้นที่หน้าตัดเล็ก ทำให้เกิดความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงมากบริเวณปลายขั้วไฟฟ้านั้น สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอนี้ก่อให้เกิดการแตกตัวของก๊าซรอบ ๆ ขั้วไฟฟ้า ทำให้เกิดการคายประจุในรูปแบบโคโรนา ลักษณะของการปล่อยประจุไฟฟ้าเช่นนี้แตกต่างจากการคายประจุไฟฟ้าทั่วไป 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 แรมจันทิก, 2565) โดยสามารถแสดงโครงสร้างและหลักการเกิดการคายประจุไฟฟ้าง่ายๆ ดังรูปที่ 2.2



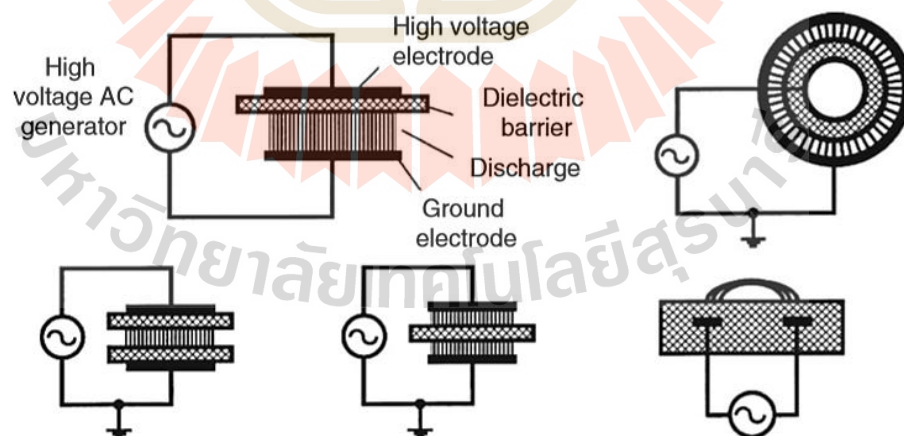
รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างและหลักการเกิดการคายประจุไฟฟ้า

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

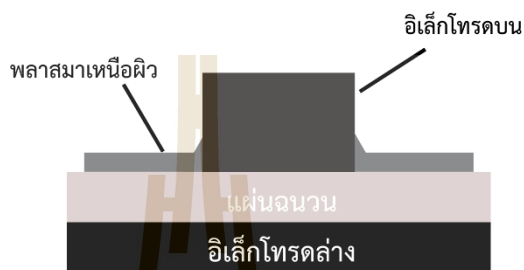
2.3



รูปที่ 2.3 การกำหนดค่าการปล่อยสิ่งกีดขวางอิเล็กทริกขนาดทั่วไปและทรงกระบอก

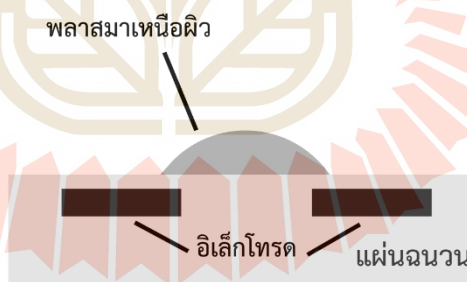
ที่มา: Maher I. Boulos et al. (2023)

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)

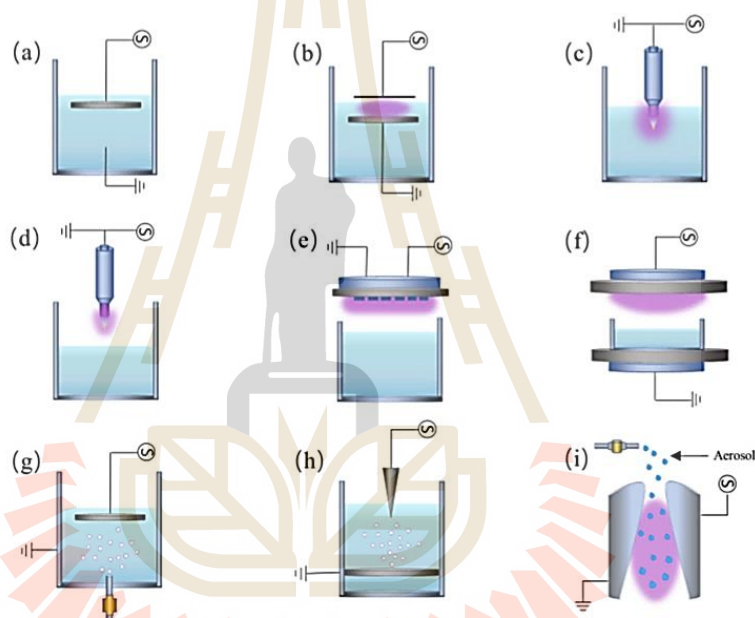
เจ็ทพลาสมาภายใต้ความดันบรรยากาศจัดเป็นพลาสมาอุณหภูมิต่ำประเภท Volumetric diffuse non - thermal plasma ที่มีความโดดเด่นคือไม่จำเป็นต้องใช้ระบบสุญญากาศเพื่อสร้างสภาวะพลาสมา ทำให้การใช้งานสะดวกและยืดหยุ่น เหมาะสำหรับการประยุกต์ทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและเชิงอุตสาหกรรม หลักการทำงานพื้นฐานคือการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับก๊าซพาหะ 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 หรือแม้แต่การผลิตไอโซนในเชิงอุตสาหกรรม 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 ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ต่างกันไปตามสภาวะที่ใช้ 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)

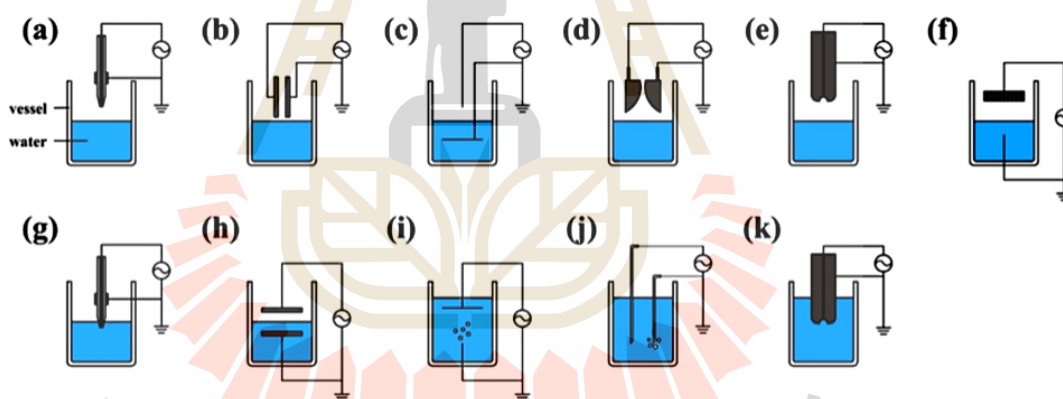


รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงการปล่อยประจุไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ ที่ใช้ในการเตรียมของเหลวที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมา (a, b) การปล่อยประจุโดยตรงในของเหลว (c) พลาสมาเจ็ตที่สัมผัสโดยตรงกับของเหลว. (d) การปล่อยประจุในเฟสก๊าซเหนือของเหลว. (e, f) การปล่อยประจุไฟฟ้าแบบเกราะไดอิเล็กทริกเหนือของเหลว (g) การปล่อยประจุโคโรนาในฟองอากาศ.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

ละวิธีมีข้อเด่นในการสร้างชนิดของอนุภาคออกฤทธิ์ที่แตกต่างกัน 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 แต่ละวิธีให้อนุภาคกัมมันต์แตกต่างกัน เช่น ไฮโดรเจน เปอร์ออกไซด์ ไนโตรท์ หรือไนเตรต ซึ่งเป็นสารสำคัญที่มีบทบาทต่อคุณสมบัติในการยับยั้งจุลินทรีย์ และการประยุกต์ใช้ในด้านเกษตร อาหาร และการแพทย์ ซึ่งรูปแบบการคายประจุพลาสมาที่ใช้ในการ กระตุ้นน้ำ แบบเหนือน้ำและแบบใต้น้ำ แสดงดังรูปที่ 2.7



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

ที่มา: อีรวรรณ บุญญวรรณ (2564)

2.1.4 การกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา (Plasma activation water, PAW)

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

ของอนุมูลอิสระหรือสารประกอบออกซิเจนเชิงปฏิกิริยา (Reactive Oxygen Species; ROS) โดยผลที่ได้ขึ้นอยู่กับลักษณะของพลาสมาและชนิดของก๊าซที่ใช้ ส่วน PAW-B เกิดจากการที่น้ำสัมผัสกับก๊าซพลาสมาที่สร้างขึ้น 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 บุญญวรรณ, 2564)

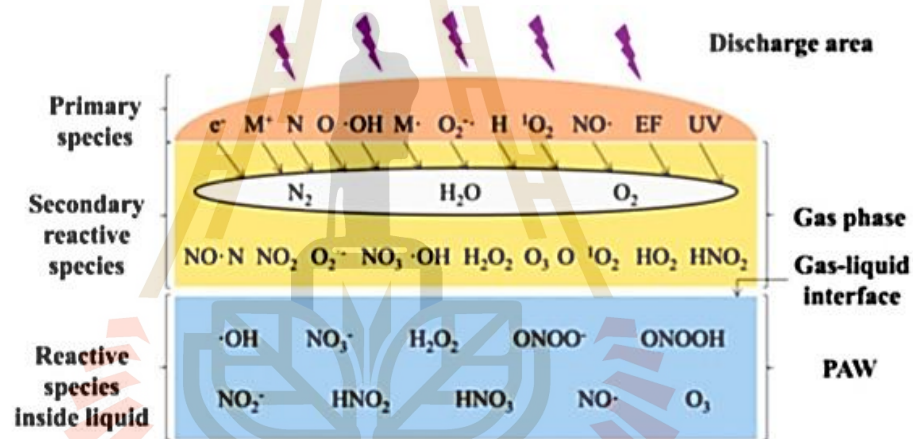
2.1.5 ระยะเวลาในการกระตุ้น

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

2.1.6 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำพลาสมา

จากการศึกษาหลายฉบับพบว่า น้ำพลาสมาที่ถูกกระตุ้นจะมีการสร้างสารสำคัญหลายชนิด 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 เปรียบเทียบวิธีการใช้สารละลายลดสารพิษตกค้างในผักและผลไม้กับพลาสมา

สารละลาย			
วิธีการ	รายละเอียด	ระยะเวลาแช่	ประสิทธิภาพ (%ลดลง)
น้ำส้มสายชู ($C_2H_4O_2$)	สารละลายที่มีความเข้มข้น 5% ถูกลำมาผสมน้ำในอัตราส่วน 1 ต่อ 10	10-15 นาที	60-84
ด่างทับทิม ($KMnO_4$)	ปริมาณ 20 ถึง 30 เก็ดผสมน้ำ 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 ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของน้ำเปลี่ยนไป 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 (ในกรณีที่ไม่มีสารพิษหรืออินทรีย์วัตถุแขวนลอยเกินไป) 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)

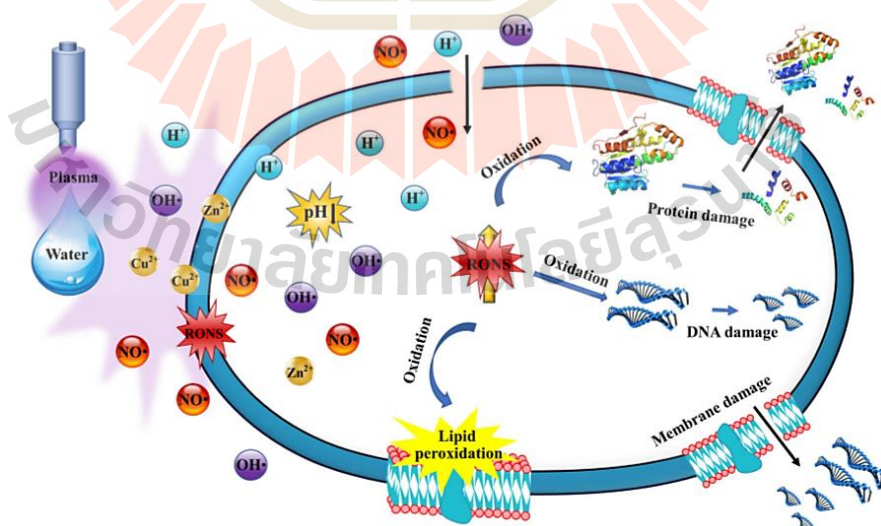
ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) หมายถึงค่าที่ใช้บ่งบอกระดับความเป็นกรดหรือด่างของสารละลาย โดยมีช่วงค่าตั้งแต่ 1-14 หากค่า pH มีค่าน้อยกว่า 7 แสดงว่าสารนั้นมีสมบัติเป็นกรด ในทางตรงกันข้าม หากค่ามากกว่า 7 หมายถึงมีสมบัติเป็นด่าง ส่วนค่าที่เท่ากับ 7 ถือว่าเป็นกลาง การตรวจสอบค่า pH ในน้ำดื่มหรือน้ำสำหรับการบริโภคมีความสำคัญต่อการประเมินคุณภาพน้ำ โดยน้ำที่มี pH ต่ำกว่า 7 มักจะมีสภาพเป็นกรด ขณะที่น้ำที่มีค่า pH สูงกว่า 7 มักเป็นด่าง และหากมีค่า pH ประมาณ 7 จัดเป็นน้ำที่อยู่ในภาวะสมดุล (วุฒิโชค 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 นอกจากนี้คุณค่าทางด้านโภชนาการแล้ว 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) เบบี้ร็อคเก็ต (Baby Rocket)
- 8) ไวลด์ ร็อคเก็ต (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

หนอนกระพุ่มเป็นหนอนฝีมืดที่มักเริ่มกักกินใบอ่อนของพืช โดยในระยะต้นจะพบการทำลายแบบเป็นกลุ่ม แต่เมื่อโตเต็มที่จะเคลื่อนย้ายไปกักกินส่วนปลายใบ ก้านดอก หรือผลของพืช

2.1.8.2 รูปแบบการปลูกผักกาดหอมกรีนไฮโดรโปนิค

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

1) การปลูกพืชในวัสดุปลูก (Substrate Culture)

วัสดุที่ใช้รองรับรากพืชมีอยู่ 2 ประเภท คือ ชนิดที่สลายตัวง่าย เช่น ฟางขี้เลื่อย 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

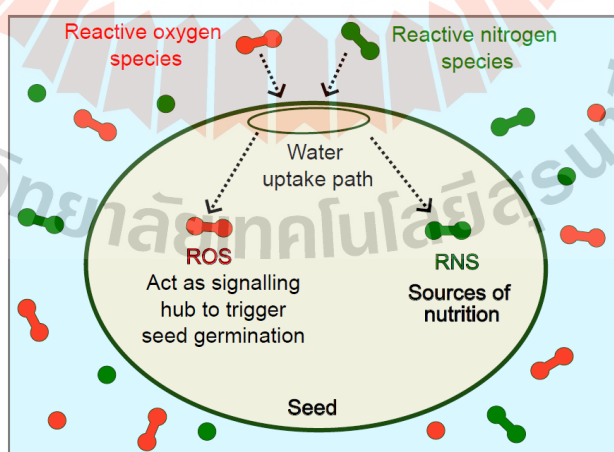
น้ำที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลาสมามีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพหลายประการ โดยเฉพาะการก่อเกิดอนุมูลอิสระและสารออกซิแดนท์ชนิดต่าง ๆ เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2), ไนเตรต (NO_3^-) และไนไตรต์ (NO_2^-) ซึ่งทำให้สภาพแวดล้อมของน้ำมีการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH), ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity;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

ประการแรก สารออกซิแดนซ์ที่เกิดขึ้นทำหน้าที่คล้าย สัญญาณชีวภาพ (signaling molecules) ช่วยกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสลายแป้งและโปรตีนในเมล็ด ส่งผลให้ต้นอ่อนสามารถใช้สารอาหารสะสมได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปริมาณที่เหมาะสมยังมีบทบาทในการกระตุ้นการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันความเครียดและการเริ่มต้นของการงอก

ประการที่สอง การมีอยู่ของไนเตรตและไนไตรต์ในน้ำทำให้เมล็ดได้รับ สารตั้งต้นของ ไนตริกออกไซด์ (NO) ซึ่งเป็นโมเลกุลสัญญาณที่มีบทบาทสำคัญในการควบคุมการแตกตัวของเปลือกหุ้มเมล็ดและการยืดตัวของรากอ่อน ผลลัพธ์คือการเร่งให้กระบวนการงอกเริ่มต้นได้เร็วขึ้น

ประการที่สาม น้ำกระตุ้นพลาสมาช่วยปรับสภาพเปลือกเมล็ด โดยโครงสร้างของชั้นนอกอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้ความสามารถในการดูดซึมน้ำ (imbibition) ดีขึ้น ส่งผลให้เมล็ดดูดน้ำเข้าสู่ภายในได้เร็วและมากขึ้น กระบวนการนี้เป็นก้าวแรกที่สำคัญของการงอก

เมื่อรวมผลทั้งหมดนี้ การใช้น้ำที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลาสมาจึงไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มความเร็วและสัดส่วนการงอกของเมล็ด แต่ยังช่วยให้ต้นกล้าที่ได้มีความแข็งแรงมากขึ้น ทั้งจากการยกระดับกระบวนการเมตาบอลิซึมภายในเมล็ด และจากการป้องกันการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ที่อาจยับยั้งการงอกในสภาวะปกติ โดยสามารถแสดงแผนภาพกลไกการเพิ่มการงอกของเมล็ดด้วยน้ำกระตุ้นพลาสมา ได้ดังรูปที่ 2.11



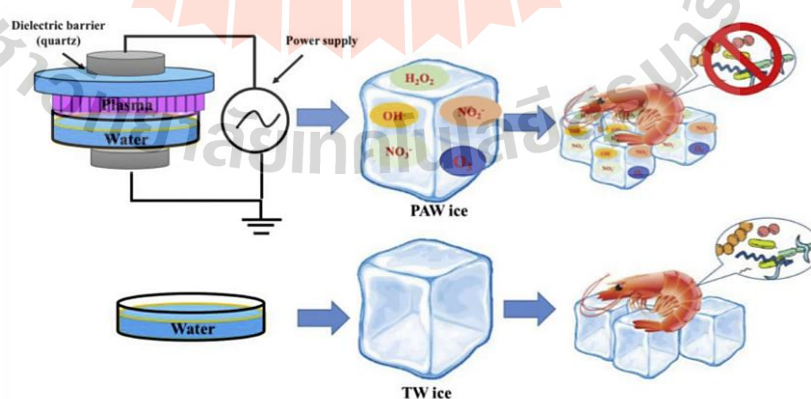
รูปที่ 2.11 กลไกการเพิ่มการงอกของเมล็ดด้วยน้ำกระตุ้นพลาสมา

ที่มา: Kiing S. Wong et al. (2023)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (literature reviews)

ในงานวิจัยนี้สนใจที่จะนำเอาเทคโนโลยีพลาสมาไปประยุกต์ใช้สำหรับการปรับปรุงสภาพน้ำ 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 เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงสภาพด้วยพลาสมา ผลลัพธ์นี้ยังชี้ให้เห็นว่า PAW กระตุ้นการสร้าง สารออกซิแดนซ์ (ROS) และสารประกอบไนโตรเจนที่มีปฏิกิริยา (RNS) ได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่ง ROS และ RNS ที่เพิ่มขึ้นเหล่านี้มีบทบาทสำคัญต่อการยับยั้งจุลินทรีย์ และเป็นปัจจัยสนับสนุนในการประยุกต์ใช้น้ำพลาสมาในภาคการเกษตรและอุตสาหกรรมอาหาร

ตารางที่ 2.4 ปฏิกิริยาเคมีของ ROS และ RNS ที่เกิดขึ้นจากน้ำกระตุ้นพลาสมา

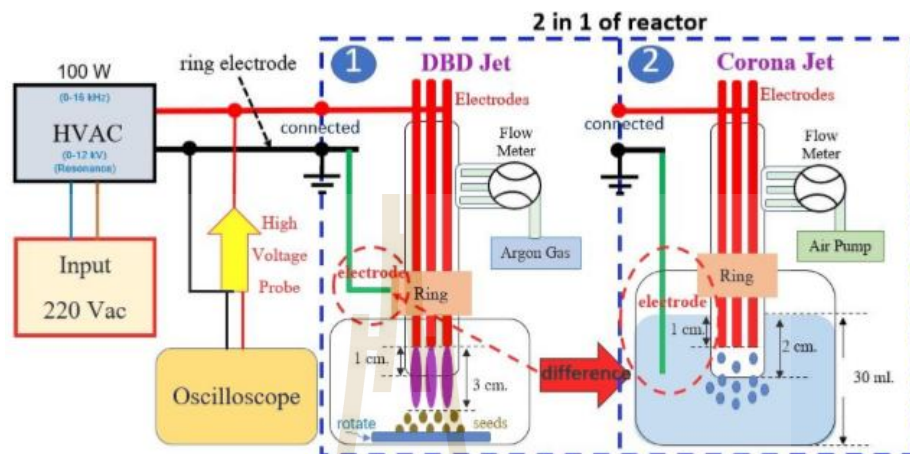
$H_2O + e \rightarrow OH\cdot + H\cdot + e^-$	(1)
$H_2O + e \rightarrow O\cdot + H\cdot + H\cdot + e^-$	(2)
$H_2O + e \rightarrow H^+ + OH\cdot + 2e^-$	(3)
$O_2 + e \rightarrow O^- + O$	(4)
$O_2 + e \rightarrow O^+ + O + 2e^-$	(5)
$O + O_2 + e \rightarrow O_3$	(6)
$O_3 + NO \rightarrow NO_2 + O_2$	(7)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

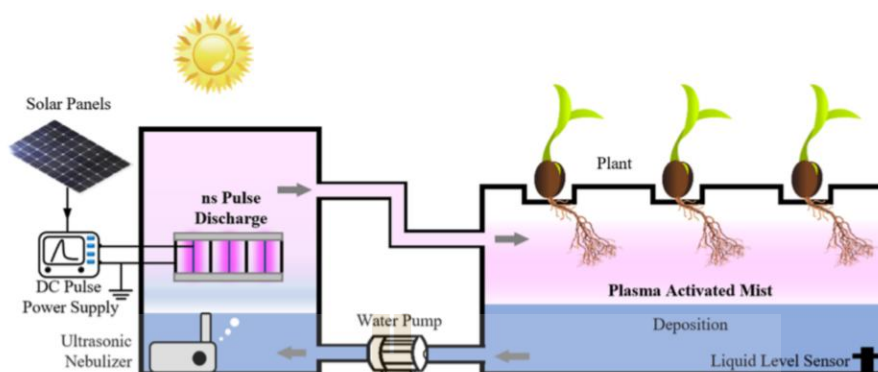
จากการวิจัยของ วุฒิโชค แสงวังและคณะ (2565) ได้ทำการศึกษาผลของการใช้น้ำพลาสมา (Plasma-Activated Water: PAW) ภายใต้ความดันบรรยากาศเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ การกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมาโดยตรง, การประยุกต์ผ่านอุปกรณ์ที่สร้างสัญญาณไฟฟ้าแรงดันสูง และการใช้เทคนิคพลาสมาร่วมกับก๊าซเฉื่อย 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 เพื่อให้การดูดซึมน้ำจากรากพืชมีประสิทธิภาพอย่างเต็มที่พบว่าทุกส่วนของพืชสามารถดูดซึมน้ำจากรากพืชมีประสิทธิภาพอย่างเต็มที่พบว่ามีประสิทธิภาพ 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

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ถูกออกแบบให้แบ่งออกเป็นสามส่วนหลัก โดยส่วนแรกมุ่งเน้นการออกแบบและพัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาและศึกษาผลของการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยเทคนิคกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา ส่วนที่สองเป็นการศึกษาผลของการปรับคุณภาพน้ำด้วยวิธีการกระตุ้นด้วยพลาสมาต่อความสามารถในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ ในส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาอิทธิพลของน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาต่อการงอกของเมล็ด รายละเอียดการดำเนินการนำเสนอไว้ดังต่อไปนี้

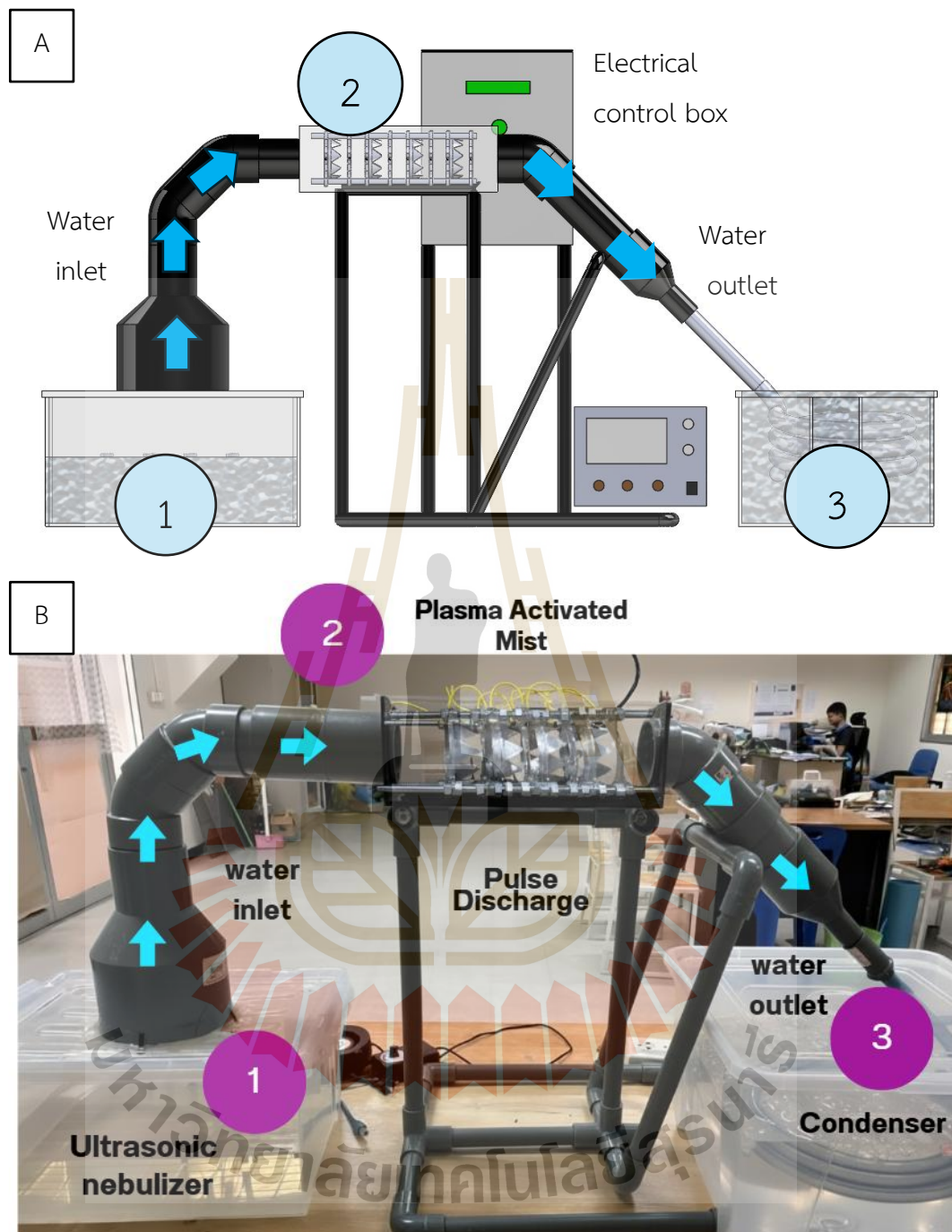
3.1 ผลของการปรับคุณภาพน้ำโดยเทคนิคกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา

การศึกษาส่วนแรกมุ่งเน้นการประเมินผลของการปรับคุณภาพน้ำด้วยเทคนิคการกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา ซึ่งครอบคลุมถึงการออกแบบและพัฒนาชุดกำเนิดลำพลาสมาพร้อมอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนการวิเคราะห์ผลการทดลองตามหัวข้อที่นำเสนอในลำดับถัดไป

งานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องต้นแบบผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาทั้งหมด 3 รูปแบบ กล่าวคือ รูปแบบที่หนึ่งเป็นชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบรอบเดียว รูปแบบถัดมาเป็นชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวนและรูปแบบสุดท้ายเป็นการประยุกต์ชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge โดยแต่ละรูปแบบมีส่วนประกอบดังนี้

3.1.1 ชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบรอบเดียว

รูปแบบที่หนึ่งเป็นชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบรอบเดียว แสดงดังรูปที่ 3.1 ใช้ในการศึกษาการตรึงไนโตรเจนในอากาศ ระบบประกอบด้วย 3 ส่วน คือ (1) เครื่องกำเนิดละอองหมอกซึ่งใช้น้ำประปาเป็นวัตถุดิบในการสร้างละอองหมอก (2) บริเวณปรับปรุงสภาพน้ำด้วยเทคนิคกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมาและ (3) อุปกรณ์ควมแน่นละอองหมอก โดยส่วนที่ 1 ใช้เครื่องกำเนิดละอองหมอกแบบอัลตราโซนิค แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 3-5 โวลต์ กำลังไฟ 1.5 วัตต์ หัวพ่นหมอกเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกปลอกซิลิโคน 20 มิลลิเมตร หัวพ่นหมอก 1 ชุดประกอบด้วยหัวพ่น 4 หัว

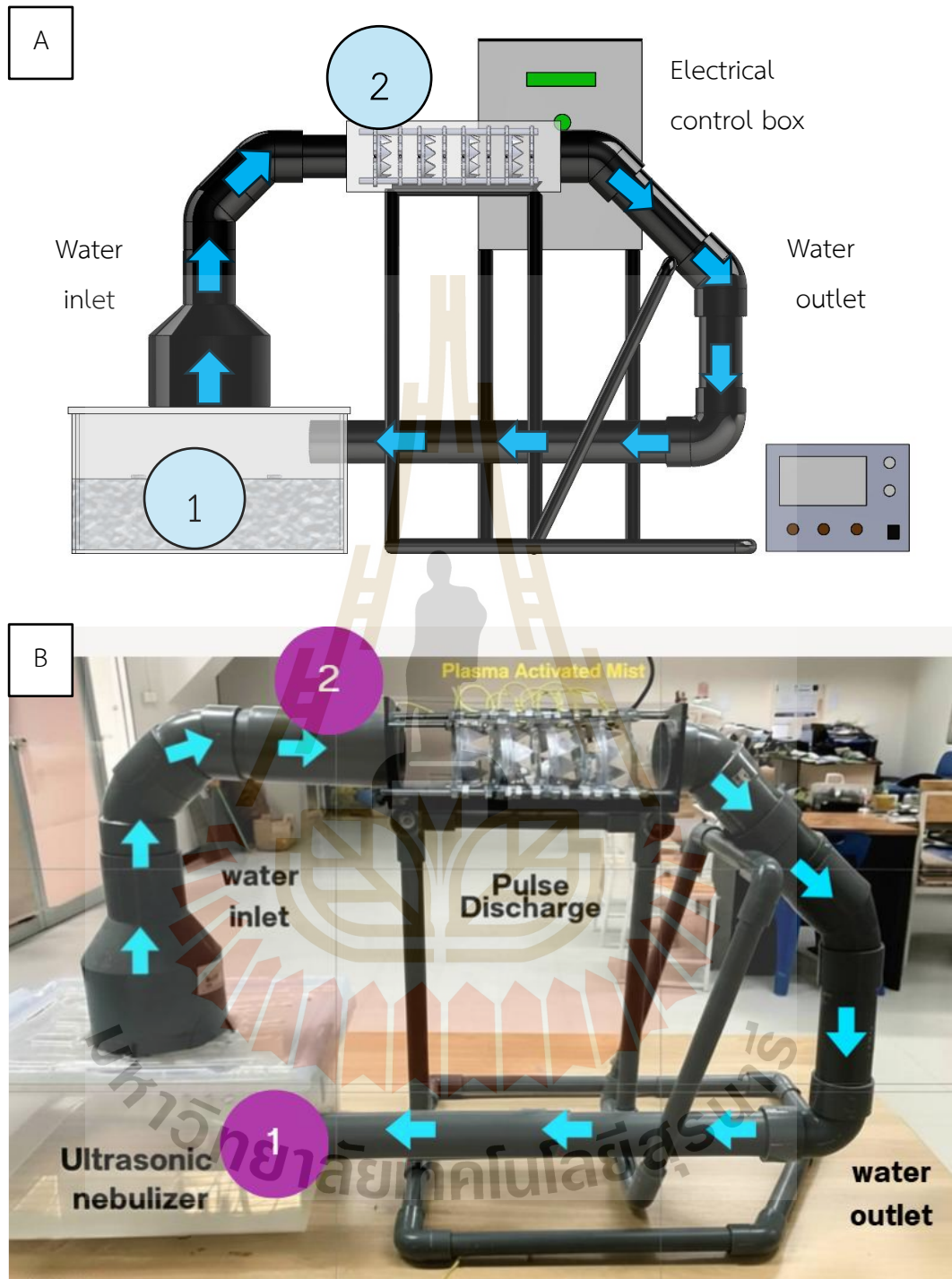


รูปที่ 3.1 (A) แผนภาพแสดงชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบรอบเดียว
 (B) ชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบรอบเดียว

ใช้จำนวน 2 ชุด ความถี่ในการทำงานของเครื่องฟ่นฝอยละอองอัลตราโซนิกคือ 108 ± 2 กิโลเฮิรซ์ โดยในส่วนของ 2 ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาเข้าที่ 5 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 4 แอมแปร์ เชื่อมผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าโดยแหล่งจ่ายไฟที่ใช้มีแรงดันไฟฟ้าขาออกสูงสุด 8 กิโลโวลต์ จำนวน 4 ชุดโดยทำงานในรูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์ กล่าวคือ แต่ละชุดจ่ายไฟต่อเนื่องเป็นเวลา 5 วินาที ก่อนสลับไปยังชุดถัดไป และทำงานวนซ้ำในลักษณะดังกล่าว ขนาดของบริเวณปรับปรุงสภาพน้ำด้วยเทคนิคกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา (บริเวณดิสชาร์จ) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 26.25 มิลลิเมตร ยาว 26 เซนติเมตร บริเวณดิสชาร์จประกอบด้วย 4 ชุด แต่ละชุดประกอบด้วยแผ่นอะลูมิเนียมความกว้าง 3 เซนติเมตร ตัดเป็นแฉก 30 องศา จำนวน 11 แฉก พร้อมด้วยทองแดงเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 มิลลิเมตร และมีท่อวางการไหลของละอองหมอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 24.25 มิลลิเมตร บรรจุอยู่กึ่งกลาง ซึ่งบริเวณดิสชาร์จพลาสมาถูกบรรจุอยู่ในกล่องอะคริลิกความยาว 25 เซนติเมตร ความกว้างและความสูง 6 เซนติเมตรและส่วนที่ 3 ละอองหมอกเหล่านี้ไหลผ่านแผงปล่อยพลาสมาในอากาศโดยตรง เมื่อละอองหมอกเหล่านี้ไหลผ่านโซนพลาสมา จะถูกทำการควบแน่นด้วยคอนเดนเซอร์ โดยใช้น้ำเย็นที่มีอุณหภูมิประมาณ 0 องศาเซลเซียส โดยทำการเปิดเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบกระตุ้นน้ำพลาสมาอบเดี่ยว เป็นเวลา 30 นาที และในกรณีของการทำลายจุลินทรีย์สารที่ทำปฏิกิริยา เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2), ไนเตรต (NO_3^-) และไนไตรท์ (NO_2^-) (Wong, K. S. et al., 2023)

3.1.2 ชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวน

รูปแบบถัดมาเป็นชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบกระตุ้นน้ำพลาสมาหมุนวน โดยนำรูปแบบที่หนึ่งมาพัฒนาต่อให้สามารถหมุนวนการทำงาน ส่งผลให้ละอองหมอกที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นพลาสมาสามารถถูกปรับปรุงคุณภาพได้อย่างต่อเนื่อง โดยเปิดเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 เป็นเวลา 30 นาที

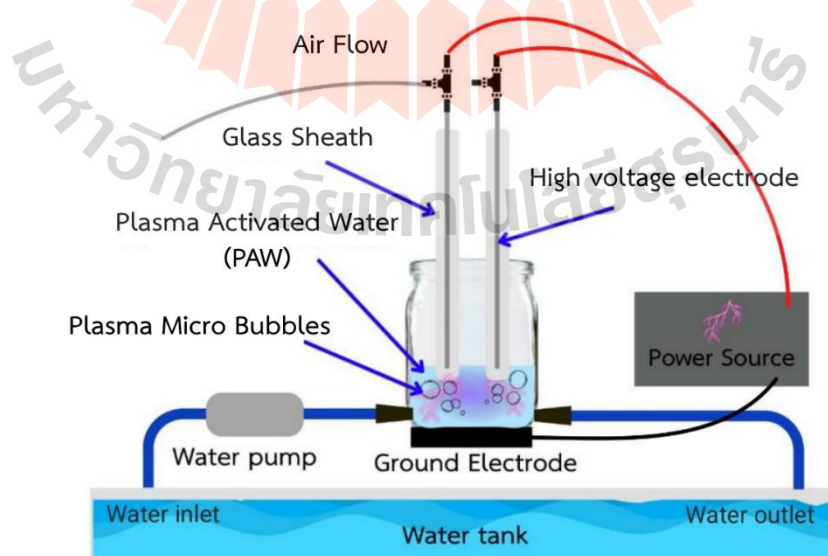


รูปที่ 3.2 (A) แผนภาพแสดงชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวน
(B) ชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวน

เปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ไนเตรต (NO_3^-) และไนไตรท์ (NO_2^-) กับรูปแบบ Corona Discharge ที่ใช้อิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูงทำจากทองแดง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 mm. และอิเล็กโทรดกราวด์ทำจากทองแดง โดยใช้อิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูงอยู่ด้านบนและอิเล็กโทรดกราวด์จมอยู่ในน้ำ ใช้น้ำปริมาตร 20 mL ชุดอุปกรณ์ต่อกับ Power supply และ Transformer ชุดเดียวกับเครื่องต้นแบบชุดที่ 1 และ 2

3.1.3 ชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge

จากการวิเคราะห์ค่าการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์แบบ Total Plate Count (TPC) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และการเปลี่ยนแปลงของสี (Color Difference, ΔE) จากเครื่องต้นแบบผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวนและผลการตรวจสอบเปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ไนเตรต (NO_3^-) และไนไตรท์ (NO_2^-) จากเครื่องต้นแบบผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวนกับชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบ Corona Discharge จึงเป็นแนวคิดในการพัฒนาเครื่องต้นแบบผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาเป็นการประยุกต์ชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge เป็นรูปแบบที่สามที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ไขข้อจำกัดของปริมาณน้ำในระบบก่อนหน้า ซึ่งได้ปริมาณน้ำกระตุ้นพลาสมาเพียง 20 มิลลิลิตร โดยได้ปรับปรุงให้สามารถเพิ่มปริมาณน้ำได้ตามความต้องการของการทดลอง โดยในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบปรับปรุงคุณภาพน้ำกระตุ้นพลาสมาปริมาตร 500 มิลลิลิตร



รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge

วงจรสร้างแรงดันไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage Generator Module)



แหล่งจ่ายไฟฟ้า ATTEN INSTRUMENT รุ่น APR3010H ชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวน ร่วมกับ Corona Discharge

รูปที่ 3.4 ชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge

3.1.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

3.1.4.1 แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้นน้ำพลาสมา

คือ ATTEN INSTRUMENTS รุ่น APR3010H มีสเปกดังนี้: แรงดันไฟฟ้าขาเข้า 220–240 โวลต์ กระแสสลับที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ให้แรงดันไฟฟ้าขาออก 0–32 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 0–10 แอมแปร์ แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แหล่งจ่ายไฟฟ้า ATEN INSTRUMENTS รุ่น APR3010H

3.1.4.2 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 AT



รูปที่ 3.6 บอร์ด Arduino Mega 2560 AT

ดังรูปที่ 3.6 Arduino Mega 2560 AT เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่พัฒนาขึ้นบนพื้นฐานของชิป ATmega2560 บอร์ดดังกล่าวยังสามารถทำงานร่วมกับ ซอฟต์แวร์ Arduino IDE ซึ่งเป็นเครื่องมือสำหรับการเขียนและอัปโหลดโปรแกรมเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยรองรับภาษา C/C++ ที่ถูกปรับให้ใช้งานง่าย



รูปที่ 3.7 Thermocouple type k และ Max6675 Module

ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้บอร์ด Arduino Mega 2560 AT ทำงานร่วมกับ โมดูล MAX6675 ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อประมวลผลสัญญาณจาก Thermocouple ชนิด K ดังรูปที่ 3.7 โดยตรง ทั้งนี้ Thermocouple Type K เป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่อาศัยหลักการ Thermoelectric หรือ Seebeck Effect ซึ่งเกิดจากการเชื่อมต่อของโลหะสองชนิดที่ต่างกัน เมื่อจุดเชื่อมสัมผัสกับความร้อนจะก่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขนาดเล็ก (ในระดับมิลลิโวลต์) ที่แปรผันตามอุณหภูมิของบริเวณนั้น จึงสามารถใช้ตรวจวัดค่าอุณหภูมิได้ในช่วงกว้าง ตั้งแต่ประมาณ $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ จนถึง $1,260\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยในงานนี้ได้นำมาใช้เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำในระหว่างที่ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมา

3.1.4.3 Solid State Relay (SSR) 75DA



รูปที่ 3.8 Solid State Relay (SSR) 75DA

การใช้งาน Solid State Relay (SSR) ดังรูปที่ 3.8 ในงานวิจัยนี้ SSR แต่ละตัวถูกนำมาใช้เพื่อควบคุม High Voltage Generator (HVG) 4 โมดูล โดยได้รับสัญญาณจาก Arduino Mega 2560 AT (5V) เพื่อสั่งเปิด - ปิดโดยทำงานในรูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์ กล่าวคือ แต่ละชุดจ่ายไฟต่อเนื่องเป็นเวลา 5 วินาที ก่อนสลับไปยังชุดถัดไป และทำงานวนซ้ำในลักษณะดังกล่าว วิธีนี้ช่วยให้การสร้างพลาสมามีความเสถียร ลดการสึกหรอของอุปกรณ์ และเพิ่มความแม่นยำในการทดลองด้านการยับยั้งจุลินทรีย์ด้วยน้ำพลาสมา

3.1.4.4 วงจรสร้างแรงดันไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage Generator Module)

ในปัจจุบันวงจรสร้างแรงดันไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage Generator Module) ซึ่งมักถูกนำมาใช้ในการทดลองทางไฟฟ้าและพลาสมาในระดับเบื้องต้น เนื่องจากมีราคาถูกหาซื้อได้ง่าย และใช้งานสะดวก วงจรที่ใช้โดยทั่วไปเป็น Royer Oscillator ซึ่งพัฒนาโดย Royer (1954) เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์สองตัวทำงานในลักษณะ Push - Pull เพื่อสร้าง

สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ ในงานวิจัยนี้จ่ายแรงดันขาเข้า 5VDC แล้วป้อนเข้าสู่หม้อแปลงเพอร์ไรต์ที่พันขดลวดทุติยภูมิหลายพันรอบ ส่งผลให้ได้แรงดันไฟฟ้าขาออกสูงในระดับกิโลโวลต์ นอกจากนี้ ยังมีการเสริมวงจร Cockcroft – Walton multiplier ซึ่งถูกเสนอครั้งแรกโดย Cockcroft และ Walton (1932) โดยอาศัยการต่อชุดตัวเก็บประจุและไดโอดต่อเนื่องกันหลายชั้นเพื่อคูณแรงดันไฟฟ้า ทำให้ได้แรงดันสูงกว่าที่หม้อแปลงเพียงอย่างเดียวสามารถผลิตได้ แรงดันขาออกที่ได้คือ 8 กิโลโวลต์ ขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าขาเข้าและประสิทธิภาพของหม้อแปลง (Rashid, 2014; Kassakian et al., 1991)

ข้อดีของโมดูลแรงดันสูงชนิดนี้คือมีขนาดเล็ก ราคาประหยัด และสามารถจุดประกายไฟหรือสร้างพลาสมาได้ง่าย จึงเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้เพื่อการทดลองต้นแบบ อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดที่สำคัญคือการขาดระบบควบคุมแรงดันและกระแสที่เสถียร อีกทั้งยังมีความเสี่ยงด้านความปลอดภัย เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าระดับกิโลโวลต์สามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ใช้งานได้ (Reece & Wright, 2013) ดังนั้นการใช้งานจำเป็นต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมและมีมาตรการป้องกันที่เพียงพอ โดยวงจรสร้างแรงดันไฟฟ้าแรงสูงแสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 วงจรสร้างแรงดันไฟฟ้าแรงสูง

3.1.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1.5.1 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไนเตรตและไนไตรท์

ในการศึกษานี้ได้ดำเนินการตรวจสอบปริมาณสารสำคัญที่เกิดขึ้นภายหลังการกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา โดยวัดความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ไนเตรต (NO_3^-) และไนไตรท์ (NO_2^-) ด้วยชุดทดสอบเชิงสี (colorimetric test strips) ยี่ห้อ QUANTOFIX โดยใช้กระดาษทดสอบเปอร์ออกไซด์ รุ่น 91312 ซึ่งมีช่วงการตรวจวัด 0–100 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 3.10 (A)



รูปที่ 3.10 (A) กระดาษทดสอบเปอร์ออกไซด์ รุ่น 91312

(B) กระดาษทดสอบไนเตรต-ไนไตรท์ รุ่น 91313

ที่มา: Pure Science Ltd

และกระดาษทดสอบไนเตรต-ไนไตรท์ รุ่น 91313 ที่มีช่วงการตรวจวัด 10–500 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับไนเตรต (NO_3^-) และ 10–80 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับไนไตรท์ (NO_2^-) ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.10 (B) กระดาษทดสอบเชิงสี (colorimetric test strips) เช่น กระดาษทดสอบไนเตรต-ไนไตรท์ และกระดาษทดสอบเปอร์ออกไซด์ เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่ได้รับความนิยมในงานวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม อาหารและการวิจัย เนื่องจากมีคุณสมบัติที่โดดเด่นด้านความสะดวก ความรวดเร็ว และประสิทธิภาพในการตรวจสอบเบื้องต้น (Macherey-Nagel, 2020) กล่าวคือกระดาษทดสอบสามารถใช้งานได้อย่างง่ายดาย โดยไม่จำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือวิเคราะห์ที่ซับซ้อน ทำให้ผู้ปฏิบัติงานในห้องทดลองหรือภาคสนามสามารถตรวจสอบตัวอย่างได้ทันทีโดยไม่ต้องอาศัยความเชี่ยวชาญเฉพาะทางสูง (Kumar et al., 2019) อีกทั้งกระดาษทดสอบให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็ว โดยทั่วไปสามารถแสดงผลภายในไม่กี่นาที ทำให้เหมาะสมต่อการประเมินคุณภาพตัวอย่างในกระบวนการผลิตหรืองานวิจัยที่ต้องการข้อมูลเบื้องต้นอย่างทันทั่วทั้งที่ (Hossain et al., 2022) นอกจากนี้กระดาษทดสอบมีความคุ้มค่า เนื่องจากมีราคาถูกเมื่อเทียบกับการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูง เช่น โครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (HPLC) หรือสเปกโตรสโกปี จึงเหมาะต่อการตรวจซ้ำหลายครั้งหรือใช้กับตัวอย่างจำนวนมาก (Kumar et al., 2019) อีกทั้งเครื่องมือนี้มีความเหมาะสมต่อการพกพาและใช้งานภาคสนาม โดยเฉพาะในการเฝ้าระวังคุณภาพน้ำและอาหาร ซึ่งช่วยให้สามารถตรวจสอบปริมาณสารปนเปื้อน เช่น ไนเตรต ไนไตรท์ หรือเปอร์ออกไซด์ ได้ในสถานที่จริง โดยไม่ต้องขนย้ายตัวอย่างไปยังห้องปฏิบัติการ (Macherey - Nagel, 2020)

3.1.5.2 วิเคราะห์คุณสมบัติฟิสิกส์-เคมีของน้ำที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลาสมา

จากนั้นนำน้ำกระตุ้นพลาสมาทุกกรรมวิธีตรวจวัดคุณสมบัติฟิสิกส์-เคมีของน้ำ ประกอบด้วยค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction Potential; ORP) ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity; EC) และอุณหภูมิ ดำเนินการโดยใช้เครื่องวัดคุณภาพน้ำแบบมัลติพารามิเตอร์ รุ่น PC2700 (Benchtop Multiparameter Meter, Eutech Instruments, Singapore) แสดงดังรูปที่ 3.10 ซึ่งสามารถต่อกับหัววัด (electrode/probe) หลายชนิดเพื่อวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ภายในเครื่องเดียว โดยมีรายละเอียดดังนี้

หัววัดค่า pH (pH electrode/probe): ใช้สำหรับตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำตัวอย่าง โดยทำการปรับเทียบเครื่องด้วยสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน pH 4.01, 7.00 และ 10.01 ก่อนการใช้งาน

หัววัด ORP (ORP electrode/probe): ใช้สำหรับตรวจวัดค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน โดยทำการปรับเทียบด้วยสารละลายมาตรฐาน ORP solution ที่เหมาะสม

หัววัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity electrode/probe): ใช้สำหรับวัดค่าการนำไฟฟ้า (EC) ของน้ำ ซึ่งสะท้อนถึงปริมาณไอออนที่ละลายอยู่ในสารละลาย และปรับเทียบด้วยสารละลายมาตรฐานค่าการนำไฟฟ้า (EC standard solution)

หัววัดอุณหภูมิ (Temperature probe): ใช้สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิของน้ำตัวอย่างโดยตรง และยังช่วยในการชดเชยค่าอุณหภูมิอัตโนมัติ ให้กับการวัดค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ

ในการวิเคราะห์ นำน้ำตัวอย่างที่ผ่านการเตรียมใส่ในบีกเกอร์สะอาด จากนั้นจุ่มหัววัดที่ต้องการลงไป在水ตัวอย่างแต่ละชนิด โดยไม่ให้สัมผัสกับกันหรือผนังภาชนะ เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวน ผลการวัดค่าพารามิเตอร์ pH, ORP, EC และอุณหภูมิ จะปรากฏบนหน้าจอของเครื่องโดยอัตโนมัติ และค่าที่ได้จะถูกบันทึกเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป



รูปที่ 3.11 เครื่องวัดคุณภาพน้ำแบบมัลติพารามิเตอร์ รุ่น PC2700

และการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีของใบผักสลัดดำเนินการโดยใช้เครื่องวัดสี (Colorimeter) ยี่ห้อ HunterLab รุ่น UltraScan (Hunter Associates Laboratory Inc., Reston, VA, USA) ซึ่งเป็นเครื่องมือมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณลักษณะด้านสีของวัตถุดิบอาหาร โดยทำงานตามระบบสี CIE Lab* ซึ่งสามารถแสดงค่าความสว่าง (L^*), ค่าความเขียว-แดง (a^*) และค่าความเหลือง-น้ำเงิน (b^*) ได้อย่างแม่นยำ ก่อนการวิเคราะห์ ทำการปรับเทียบเครื่องด้วยแผ่นมาตรฐาน (Standard white tile และ black tile) ตามคำแนะนำของผู้ผลิต เพื่อให้มั่นใจว่าการวัดมีความถูกต้องและความเที่ยงตรง จากนั้นจึงทำการเตรียมตัวอย่างใบผักสลัดที่ผ่านการทดลองให้อยู่ในสภาพแห้งผิว และวางลงในตำแหน่งที่กำหนดภายในช่องวัดของเครื่อง ในการทดสอบ ทำการวัดค่าพารามิเตอร์สี ได้แก่ L^* , a^* และ b^* ของตัวอย่างแต่ละชิ้น โดยเครื่องจะแสดงผลเป็นค่าตัวเลขดิจิทัลบนหน้าจอ ซึ่งค่าที่ได้จะถูกนำมาคำนวณความแตกต่างของสี (Color Difference; ΔE) โดยใช้สมการมาตรฐานของ CIE ดังนี้แสดงในรูปที่ 3.12 โดยทำการเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 7 องศาเซลเซียส และวัดการเปลี่ยนแปลงสีเป็นเวลา 0-4 วัน



รูปที่ 3.12 เครื่องวัดสี Colorimeter ยี่ห้อ HunterLab รุ่น UltraScan

การวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสี Colorimeter จะได้ค่า L^* , a^* , b^* และสามารถคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงสี (Color Difference Equation, ΔE) ได้ดังสมการที่ 3.1 (CIE, 1976) ผลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้ใช้เป็นตัวชี้วัดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของใบผักสลัดหลังผ่านการบำบัดด้วยน้ำพลาสมา และสะท้อนถึงคุณภาพและความคงสภาพทางสายตาของผลิตภัณฑ์ผักสด

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (3.1)$$

โดยที่ L^* = ค่าความสว่าง

a^* = ค่าสีเขียว (-), สีแดง (+)

b^* = ค่าสีฟ้า (-), สีเหลือง (+)

3.2 ผลของการปรับคุณภาพน้ำต่อความสามารถในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์

3.2.1 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการศึกษาผลของการปรับคุณภาพน้ำ

การศึกษาผลของการปรับคุณภาพน้ำด้วยวิธีการกระตุ้นด้วยพลาสมาต่อความสามารถในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ใช้วัตถุดิบคือ ผักสลัดใบกรีนโอ๊ค (*Lactuca sativa* var. *crispa* L.) การปลูก 2 รูปแบบคือ แบบไฮโดรโปนิคส์และปลูกลงดิน จากฟาร์ม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

3.2.2 ขั้นตอนการจุ่มล้างผักสลัดกรีนโอ๊ค

ทำการเตรียมตัวอย่างผักสลัดใบกรีนโอ๊คขนาด 3 x 3 cm. โดยในการทดสอบแบ่งการดำเนินการเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์จากการผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบกระตุ้นน้ำพลาสมาแบบเดี่ยว โดยนำผักสลัดใบกรีนโอ๊คขนาด 3 x 3 cm. วิธีการปลูก 2 รูปแบบคือ แบบไฮโดรโปนิคส์ (H) และปลูกลงดิน (N) ที่เตรียมไว้มาแบ่งรูปแบบละ 4 กรรมวิธี ดังนี้ กรรมวิธีที่ 1 ชุดควบคุมคือจุ่มล้างในน้ำประปา 10 นาที กรรมวิธีที่ 2 จุ่มล้างในน้ำกระตุ้นพลาสมา 5 นาที กรรมวิธีที่ 3 จุ่มล้างในน้ำกระตุ้นพลาสมา 10 นาทีและกรรมวิธีที่ 4 จุ่มล้างในน้ำกระตุ้นพลาสมา 15 นาที และส่วนถัดมาเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์จากการผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบกระตุ้นน้ำพลาสมาหมุนวนร่วมกับแบบ Corona Discharge โดยนำ

ผักสลัดใบกรีนโอ๊คขนาด 3 x 3 cm. แบบไฮโดรโปนิคส์ (H) ที่เตรียมไว้มาแบ่งเป็น 12 กรรมวิธี โดยการปรับค่าของ 3 ตัวแปร คือ

- 1) จำนวนหัวที่ใช้ในการกระตุ้นน้ำพลาสมา คือ 1 และ 2 หัว
- 2) อัตราการไหลของอากาศ 3 ค่า คือ 0.78 1.02 และ 1.26 ลิตรต่อนาที
- 3) เวลาที่ใช้ในการกระตุ้นน้ำพลาสมา คือ 60 และ 90 นาที

3.2.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์จุลินทรีย์

3.2.3.1 การดึงตัวอย่างน้ำที่ผ่านการจุ่มล้าง

ทำการดึงตัวอย่างน้ำที่มีผ่านการจุ่มล้างใส่หลอดทดลองที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วหลอดละ 0.1 mL หลอดแรกคือตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเจือจางความเข้มข้นที่ 10^0 (dilution $\times 10^0$) จากนั้นนำตัวอย่างจากหลอด 10^0 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ไปทำการเจือจางเพิ่มโดยใส่หลอดถัดไปที่มีสารละลาย Peptone 0.1 (%w/v) ปริมาตร 90 มิลลิลิตร เตรียมไว้ในหลอดทดลอง จากนั้นทำการเจือจางเพิ่มในหลอดถัดไป ทั้งนี้การทำความเจือจางเนื่องจากไม่ให้เชื้อที่เลี้ยงเจริญในจานเพาะเชื้อมากจนเกินไปจนนับเชื้อที่เจริญไม่ได้

3.2.3.2 การเตรียมสารละลาย Peptone 0.1 (%w/v)

ทำการเตรียม Peptone เพื่อใช้ในการเจือจางตัวอย่าง โดยการชั่งสาร Peptone มา 2 g ละลายในน้ำ DI 2000 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งความดันไอน้ำ (Autoclave) ที่อุณหภูมิ 130°C แรงดัน 15 psi เป็นเวลา 20 นาที เมื่อทำการฆ่าเชื้อแล้วรอให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง สารละลาย 0.1% peptone water แสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 สารละลาย 0.1% peptone water

3.2.3.3 ขั้นตอนการใช้ Petrifilm วิเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์

การเตรียมตัวอย่างผักสลัดกรีนโอ๊คเพื่อการตรวจวิเคราะห์จุลินทรีย์ เริ่มจากการตัดใบตัวอย่างให้มีขนาดประมาณ 3×3 เซนติเมตร ใส่ในภาชนะปลอดเชื้อ จากนั้นนำตัวอย่างจุ่มล้างด้วยน้ำประปาและน้ำกระดุนพลาสติกปริมาณ 50 มิลลิลิตร จากนั้นนำน้ำหลังกระบวนการจุ่มล้าง ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เติมน้ำเจือจาง (Diluent) เช่น Buffered Peptone Water (BPW) หรือ สารละลาย 0.1% peptone water ปริมาตร 90 มิลลิลิตร แล้วเขย่าเบา ๆ เพื่อให้จุลินทรีย์ที่อยู่บนผิวใบกระจายเข้าสู่สารละลายอย่างสม่ำเสมอ หลอดแรกคือตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเจือจางความเข้มข้นที่ 10^0 (Dilution $\times 10^0$) หลังจากนั้นดำเนินการเจือจางต่อเนื่อง (Serial dilution) โดยนำน้ำปริมาตร 10 มิลลิลิตร จากหลอดแรกใส่หลอดถัดไปที่มีสารละลาย Peptone 0.1 (%w/v) ปริมาตร 90 มิลลิลิตร จากนั้นทำการเจือจางเพิ่มจนมีความเจือจางความเข้มข้นอยู่ในระดับที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 3.14 เพื่อให้สามารถนับจำนวนโคโลนีได้ชัดเจนและอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์ โดยการดำเนินการทุกขั้นตอนอยู่ในเครื่อง Biosafety cabinet class 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.14 การเจือจางเชื้อจุลินทรีย์จากตัวอย่างผักสลัด



รูปที่ 3.15 เครื่อง Biosafety cabinet class 2

สำหรับการวิเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์ ใช้แผ่น 3M™ Petrifilm™ ชนิด Aerobic Count (AC) Plate แสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 3M™ Petrifilm™ Aerobic Count (AC) Plate

โดย 3M™ Petrifilm™ Aerobic Count (AC) Plate เป็นสื่อเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์สำเร็จรูปที่นิยมใช้สำหรับตรวจวิเคราะห์และนับปริมาณจุลินทรีย์ที่เจริญได้ภายใต้สภาวะใช้ออกซิเจน (Aerobic Bacteria) ในอาหาร ผลิตภัณฑ์นม เครื่องดื่ม และตัวอย่างสิ่งแวดล้อม (3M Food Safety, 2018) แผ่นเพลตชนิดนี้ถูกออกแบบมาเพื่อทดแทนการใช้ agar plate แบบดั้งเดิม ซึ่งช่วยลดเวลาและขั้นตอนการเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ พร้อมทั้งเพิ่มความสะดวกและความสม่ำเสมอในการทดสอบ (Neogen, 2024) โครงสร้างของแผ่น Petrifilm AC ประกอบด้วยฟิล์มสองชั้น โดยฟิล์มด้านล่างบรรจุสารอาหาร (nutrient medium) และสารก่อเจลที่ละลายน้ำเย็นได้ ส่วนฟิล์มด้านบนเคลือบด้วยตัวบ่งชี้สี (indicator dye) และมีกริด (grid) ช่วยอำนวยความสะดวกในการนับโคโลนี (3M Food Safety, 2018) หลังจากหยดตัวอย่างเจือจางลงบนฟิล์มในปริมาณที่กำหนด คือ 1 มิลลิลิตร และปิดฟิล์มด้านบน โคโลนีจุลินทรีย์จะปรากฏเป็นจุดสีแดงที่สามารถนับด้วยตาเปล่าได้ภายหลังการบ่ม การบ่มมักดำเนินการที่อุณหภูมิ 35–37 °C เป็นเวลา 48 ± 2 ชั่วโมง โดยตู้บ่มเชื้อแสดงดังรูปที่ 3.17 ช่วงที่เหมาะสมในการนับโคโลนีอยู่ที่ 25–250 CFU ต่อแผ่น หากมีจำนวนมากกว่านี้ควรเจือจางตัวอย่างก่อนวิเคราะห์ (AOAC, 2000; Neogen, 2024) แผ่น Petrifilm AC ได้รับการรับรองตามมาตรฐาน AOAC Official Methods of Analysis หมายเลข 986.33 สำหรับนม 989.10 สำหรับผลิตภัณฑ์นม และ 990.12 สำหรับอาหารทั่วไป รวมถึงการรับรอง AFNOR สำหรับอาหารและตัวอย่างสิ่งแวดล้อม

(AOAC, 2000) ด้วยคุณสมบัติดังกล่าว 3M™ Petrifilm™ AC Plate จึงเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการตรวจสอบและควบคุมคุณภาพทางจุลชีววิทยา ทั้งในภาคอุตสาหกรรมอาหารและงานวิจัยที่ต้องการความรวดเร็วและความเชื่อถือได้ในการนับจำนวนจุลินทรีย์ (3M Food Safety, 2018)



รูปที่ 3.17 ตู้บ่มเพาะเชื้อควบคุมอุณหภูมิ

หลังจากการบ่มเพาะ ทำการนับจำนวนโคโลนีที่เกิดขึ้นบนแผ่น Petrifilm โดยแสดงผลในรูปแบบของ โคโลนีฟอร์มมิงยูนิตต่อกรัมของตัวอย่าง (CFU/g) ทั้งนี้ ขั้นตอนดังกล่าวมีความสำคัญต่อความถูกต้องของผลการตรวจวิเคราะห์และช่วยสะท้อนปริมาณการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ในตัวอย่างได้อย่างชัดเจน โดยที่การนับปริมาณเชื้อจุลินทรีย์จะนับเป็นกลุ่มของประชากรเชื้อหรือโคโลนี (colony) โดยใช้ชุดอ่านเชื้อจุลินทรีย์บนแผ่นกระดาษอัตโนมัติ ยี่ห้อ 3M Petrifilm รุ่น Petrifilm Plate Reader Advanced R3 แสดงดังรูปที่ 3.18 และสามารถคำนวณหาปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ (CFU/mL หรือ CFU/g) ได้จากดังสมการที่ 3.2 ดังนี้



รูปที่ 3.18 ชุดอ่านเชื้อจุลินทรีย์บนแผ่นกระดาษอัตโนมัติ ยี่ห้อ 3M Petrifilm รุ่น Petrifilm Plate Reader Advanced R3

$$\text{ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ (CFU/mL)} = \frac{\text{Number of colony}}{\text{quantity plated}} \times \frac{1}{\text{Dilution}} \quad (3.2)$$

โดยที่ Number of colony = ปริมาณกลุ่มเชื้อจุลินทรีย์ที่นับได้จากงานเพาะเชื้อ (CFU)
 Quantity plated = ปริมาณเชื้อจากสารละลายตัวอย่าง (ml)
 Dilution = ปริมาณการเจือจางความเข้มข้นของเชื้อแต่ละหลอดทดลอง

ผักสลัดกรีนโอ๊คหลังจุ่มล้างน้ำประปาและน้ำกระตุนพลาสติกมา เพื่อหาปริมาณจุลินทรีย์ตามสมการที่ 3.1 จากนั้นจึงนำค่าที่ได้มาคำนวณการลดลงของจุลินทรีย์ในรูปแบบลอการิทึม (Log Reduction) ดังแสดงในสมการที่ 3.3

$$\text{Log Reduction} = \log_{10} \left(\frac{N_0}{N_t} \right) \quad (3.3)$$

โดยที่ N_0 = ค่าเชื้อจุลินทรีย์ของตัวอย่างควบคุม (กรรมวิธีจุ่มล้างด้วยน้ำประปา)
 N_t = ค่าเชื้อจุลินทรีย์ของกรรมวิธีจุ่มล้างด้วยน้ำกระตุนพลาสติกมา

หากคิดเป็นร้อยละที่ลดลง สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.4

$$\% \text{ Reduction} = \left(1 - \frac{N_t}{N_0} \right) \times 100 \quad (3.4)$$

3.3 อิทธิพลของน้ำกระตุนด้วยพลาสติกต่อการงอกของเมล็ด

3.3.1 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของน้ำกระตุนด้วยพลาสติกต่อการงอกของเมล็ด

เมล็ดถั่วเขียวที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของน้ำกระตุนด้วยพลาสติกต่อการงอกของเมล็ดคือถั่วเขียวพันธุ์ผิวมัน (*Vigna radiata*) จากบริษัทเจียไต๋ซีด จำกัด โดยเลือกใช้เมล็ดที่มีคุณภาพตรงตามเกณฑ์การทดสอบความงอก $\geq 80\%$ เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่มีความน่าเชื่อถือ

3.3.1.1 ขั้นตอนการคัดเลือกเมล็ด (Seed Selection Procedure)

โดยการคัดเลือกเมล็ดพันธุ์ก่อนการทดสอบความงอกมีความสำคัญเนื่องจากช่วยลดความแปรปรวนของข้อมูล และทำให้ผลที่ได้สะท้อนคุณภาพของเมล็ดได้อย่างแท้จริง ขั้นตอนการคัดเลือกสามารถดำเนินการได้ดังนี้

การคัดเลือกเมล็ดสำหรับการทดลองเริ่มจากการตรวจสอบด้วยสายตาเพื่อเลือกเมล็ดที่มีรูปร่างสมบูรณ์ ขนาดใกล้เคียงกัน และมีสีสม่ำเสมอ ขณะที่เมล็ดที่แตกหัก ซีด ขึ้นรา หรือมีลักษณะผิดปกติจะถูกคัดออก จากนั้นกำจัดสิ่งปนเปื้อน เช่น เศษดิน กรวด เปลือกเมล็ด และฝุ่นละออง เพื่อป้องกันการรบกวนต่อการงอกและลดความเสี่ยงจากการเจริญของจุลินทรีย์ที่ไม่พึงประสงค์ นอกจากนี้ยังมีการตรวจสอบสุขภาพของเมล็ด โดยคัดทิ้งเมล็ดที่มีร่องรอยการทำลายจากแมลงหรือโรคพืช รวมถึงเมล็ดที่เสื่อมคุณภาพจากการเก็บรักษาไม่เหมาะสม เพื่อให้มั่นใจว่าเมล็ดที่เหลือมีความมีชีวิตและมีโอกาสงอกสูง เมื่อได้เมล็ดที่ผ่านเกณฑ์แล้วจึงจัดเตรียมจำนวนตามที่กำหนดในแต่ละซ้ำการทดลอง เพื่อให้ได้มาตรฐานเดียวกันและสะดวกต่อการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ทั้งนี้หากจำเป็นสามารถล้างเมล็ดด้วยน้ำสะอาดหรือน้ำยาฆ่าเชื้อเจือจางในระยะเวลาสั้นเพื่อกำจัดจุลินทรีย์บนผิว ก่อนล้างด้วยน้ำปราศจากเชื้อและซับให้หมาด เพื่อเตรียมเข้าสู่ขั้นตอนการเพาะเลี้ยงในห้องปฏิบัติการต่อไป ซึ่งการคัดเลือกใบสไลด์กรีนไอคที่นำมาใช้ทดลองมีความสำคัญเช่นเดียวกับการคัดเลือกเมล็ดพันธุ์ก่อนการทดสอบความงอก กล่าวคือ ต้องเลือกใบที่มีลักษณะสมบูรณ์ ปราศจากความเสียหายและการปนเปื้อน เพื่อให้ผลการประเมินสะท้อนคุณภาพที่แท้จริงของตัวอย่าง โดยไม่ถูกรบกวนจากความแปรปรวนที่เกิดจากความไม่สม่ำเสมอของวัตถุดิบ

เมล็ดพันธุ์ที่คัดเลือกแล้วจะถูกนำมาทำการทดสอบความงอกภายใต้สภาวะควบคุมในห้องปฏิบัติการ โดยใช้วิธีเพาะเลี้ยงบนกระดาษกรองภายในกล่องพลาสติกใส เพื่อควบคุมความชื้นและลดปัจจัยแวดล้อมที่อาจก่อให้เกิดความแปรปรวนทางการทดลอง เริ่มจากการปูแผ่นกระดาษกรองปลอดเชื้อ 2-3 ชั้นในกล่องพลาสติกใส จากนั้นหยดน้ำประปาหรือน้ำที่ได้จากการกระตุ้นพลาสมาให้กระดาษมีความชุ่มชื้นพอเหมาะ โดย International Seed Testing Association กล่าวว่าน้ำต้องมากพอให้กระดาษเปียกชุ่มแต่ไม่ถึงขั้นมีน้ำขังตรวจสอบทุก 24 ชม. ถ้ากระดาษเริ่มแห้ง ให้เติมน้ำเพิ่มครั้งละ 1-2 mL หลังจากนั้นจึงวางเมล็ดถั่วเขียวที่ผ่านการคัดเลือกจำนวนที่กำหนด (25 เมล็ดต่อซ้ำ) บนกระดาษกรองโดยเว้นระยะห่างระหว่างเมล็ดเพื่อป้องกันการรบกวนซึ่งกันและกัน จากนั้นปิดฝากล่องพลาสติกและเก็บไว้ในที่มืดหรือในสภาวะอุณหภูมิที่ควบคุมไว้ที่ 25-28 °C ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการงอก

3.3.2 วิธีการเก็บข้อมูลผลการงอก

การติดตามผลจะกระทำทุก 24 ชั่วโมงต่อเนื่องเป็นเวลา 7 วัน โดยนับจำนวนเมล็ดที่มีราก (radicle) โผล่ออกมายาวอย่างน้อย 2 มิลลิเมตร ถือว่าเป็นเมล็ดที่ “งอก” ข้อมูลที่บันทึกในแต่ละวันจะเป็นจำนวนเมล็ดที่งอกใหม่ (daily germination) เพื่อให้สามารถนำไปคำนวณตัวแปรทาง

สถิติที่สะท้อนทั้งความเร็วและความสม่ำเสมอของการงอก นอกจากนี้ ยังมีการบันทึกค่าความยาวราก และลำต้นอ่อน (shoot) เฉลี่ย รวมทั้งอาจมีการชั่งน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของต้นกล้าในวันสุดท้ายของการทดลอง เพื่อนำมาใช้เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของกล้า (seedling vigor) ค่าตัวแปรที่ใช้ประเมินผลประกอบด้วยดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตารางสรุปตัวแปรและสูตรคำนวณการงอกของเมล็ด

ตัวแปร	คำจำกัดความ (ความหมาย)	สูตรคำนวณ	อ้างอิง
GP – Germination Percentage (เปอร์เซ็นต์การ งอก)	สัดส่วนเมล็ดที่งอก สำเร็จเมื่อสิ้นสุดการ ทดสอบ	$GP = \frac{\sum \text{เมล็ดงอก}}{N_{\text{ทั้งหมด}}} \times 100$	ISTA. (2015).
GI – Germination Index (ดัชนีการงอก)	ดัชนีสะท้อนความเร็ว การงอก	$GI = \sum \frac{G_t}{D_t}$ โดยที่ G_t = เมล็ดงอกใหม่ในวันที่ t D_t = เลขลำดับของวัน	AOSA. (1983).
MGT – Mean Germination Time (เวลาเฉลี่ย การงอก)	เวลาที่เมล็ดโดยเฉลี่ย ใช้ในการเริ่มงอก	$MGT = \frac{\sum (n_t)}{\sum n_t}$ n_t คือจำนวนเมล็ดที่งอกในวัน t	Ellis, R. H. (1981).
GR – Germination Rate (อัตราการงอก)	ความเร็วเชิงผกผัน ของ MGT	$GR = \frac{1}{MGT}$	Ranal, M. A. (2006).
VI – Vigor Index (ดัชนีความแข็งแรง ของกล้า)	ดัชนีคุณภาพกล้า รวมข้อมูลปริมาณ และความยาวกล้า	$VI = (\text{ค่าเฉลี่ยของความยาว ราก} + \text{ลำต้นอ่อน}) \times GP$	Abdul- Baki, A. (1973).

3.4 การประเมินการใช้พลังงานของระบบผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมา

การผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมา (Plasma-Activated Water; PAW) เป็นกระบวนการที่ต้องอาศัยพลังงานไฟฟ้าเพื่อสร้างพลาสมาที่ผิวน้ำหรือในน้ำโดยตรง โดยพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างพลาสมาจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานของอิเล็กตรอน อนุภาคประจุ และรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งส่งผลให้เกิดสารอนุมูลอิสระและอนุพันธ์ออกซิเจน – ไนโตรเจนที่มีฤทธิ์ออกซิไดซ์สูง (Reactive Oxygen and Nitrogen Species; RONS) สารเหล่านี้มีบทบาทสำคัญต่อคุณสมบัติของ PAW ทั้งด้านการยับยั้งจุลินทรีย์และการกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืช (Thirumdas et al., 2018; Guo et al., 2019)

เนื่องจากการประยุกต์ใช้น้ำกระตุ้นพลาสมาในด้านความปลอดภัยอาหารและการเกษตรมีความเป็นไปได้สูง การประเมินสมรรถนะของระบบผลิตจึงไม่เพียงพอที่จะพิจารณาจากประสิทธิภาพทางจุลินทรีย์หรือผลทางชีวภาพเพียงอย่างเดียว แต่จำเป็นต้องคำนึงถึงการใช้พลังงาน (Energy Consumption) ของระบบด้วย (Ma et al., 2017; Schnabel et al., 2019)

3.4.1 พลังงานเฉลี่ยที่ใช้ต่อรอบ

พลังงานไฟฟ้าที่ใช้สามารถคำนวณได้จากความแตกต่างของมิเตอร์ไฟฟ้าตั้งแต่ต้นจนจบการทดลอง หรืออาจคำนวณจากกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยและเวลาที่ใช้กระตุ้น ดังสมการที่ 3.5

$$E_{kWh} = M_{\text{final}} - M_{\text{initial}} \quad (3.5)$$

โดยที่ M_{final} = ค่าไฟฟ้าที่อ่านได้จากมิเตอร์เมื่อสิ้นสุดการทดลอง (kWh)

M_{initial} = ค่าไฟฟ้าที่อ่านได้จากมิเตอร์เมื่อเริ่มต้นการทดลอง (kWh)

3.4.2 ค่าการใช้พลังงานจำเพาะต่อหน่วยการผลิต (Specific Energy Consumption for production, SEC_{prod})

ใช้สำหรับประเมินต้นทุนพลังงานต่อการผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมา 1 ลิตร ของระบบผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมา ซึ่งคำนวณจากสมการที่ 3.6

$$SEC_{\text{prod}} = \frac{E_{kWh}}{V_{PAW}} \quad (3.6)$$

โดยที่ V_{PAW} คือปริมาตรน้ำที่ผลิตได้จริง หน่วย ลิตร

3.5 สถานที่ทำการศึกษาวิจัย

ห้องปฏิบัติการจักรกลเกษตร อาคารจักรกลเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

ห้องงานวิเคราะห์ทางจุลชีววิทยา ฝ่ายวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

3.6 ระยะเวลาทำการทดลอง

เริ่มทำวิทยานิพนธ์ เดือน กุมภาพันธ์ ปี พ.ศ. 2567- กันยายน ปี พ.ศ. 2568



บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในบทนี้แสดงถึงผลการศึกษาศึกษาของผลการปรับปรุงสภาพน้ำโดยนำน้ำที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์รวมแบบ Total Plate Count: TPC และการประยุกต์ใช้ทางด้านการเกษตรทั้งนี้ ได้แบ่งผลการศึกษากออกเป็นสามส่วนคือในส่วนแรกมุ่งเน้นการออกแบบและพัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาและศึกษาผลของการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยเทคนิคกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา ต่อมาในส่วนที่สองเป็นผลการศึกษาอิทธิพลของน้ำกระตุ้นพลาสมาต่อการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในผักสลัดกรีนโอ๊ค สายพันธุ์ *Lactuca sativa var. crispa* L. และในส่วนสุดท้ายเป็นผลการศึกษาอิทธิพลของน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาต่ออัตราการงอกของเมล็ดถั่วเขียวพันธุ์ผิวมัน

4.1 ผลการศึกษาศึกษาการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบรอบเดียวและแบบหมุนวน

4.1.1 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ไนเตรต (NO_3^-) และไนไตรท์ (NO_2^-)

จากการตรวจวัดความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ไนเตรต (NO_3^-) และไนไตรท์ (NO_2^-) โดยใช้กระดาษทดสอบเปอร์ออกไซด์ รุ่น 91312 กระดาษทดสอบไนเตรต-ไนไตรท์ รุ่น 91313 ที่ได้จากการเปิดเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบรอบเดียวเป็นเวลา 30 นาที ได้ปริมาณน้ำกระตุ้นพลาสมาจากการควบแน่นละอองหมอก 10 มิลลิลิตร พบว่าความเข้มข้นของ H_2O_2 , NO_3^- และ NO_2^- เท่ากับ อยู่ในช่วง 0-1, 25 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในขณะที่การเปิดเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวน เป็นเวลา 30 นาที ได้ปริมาณน้ำกระตุ้นพลาสมาจากการควบแน่นละอองหมอก 10 มิลลิลิตร โดยพบว่าความเข้มข้นของ H_2O_2 , NO_3^- และ NO_2^- เท่ากับ 30, 100 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับเปิดเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบ Corona Discharge โดยกระตุ้นน้ำปริมาณ 20 มิลลิลิตรเป็นเวลา 30 นาที พบว่าความเข้มข้นของ H_2O_2 , NO_3^- และ NO_2^- เท่ากับ 100, 500 และ อยู่ในช่วง 40-80 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากการตรวจวัดความเข้มข้นของสารที่ทำปฏิกิริยาข้างต้น จะเห็นว่าการกระตุ้นน้ำ

พลาสมาแบบหมุนวนและการฉายพลาสมาที่ผิวหนังโดยตรงส่งผลทำให้สารมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น แต่มีข้อจำกัดของปริมาตรน้ำที่ได้ จากการตรวจสอบโดยใช้กระดาษทดสอบมีการแสดงผลในลักษณะ ช่วงข้อมูล จึงอาจก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนของความเข้มข้นในการอ่านได้ อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลองสามารถยืนยันได้ว่าพลาสมามีอิทธิพลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงของสารอนุมูลอิสระ ออกซิเจน (Reactive Oxygen Species, ROS) และสารอนุมูลอิสระไนโตรเจน (Reactive Nitrogen Species, RNS) ซึ่งก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation-reduction) ของสารอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical, $\cdot\text{OH}$) อันมีความไวต่อชีวโมเลกุลภายในเซลล์โดยสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่ว่าสารอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง และอิทธิพลของพลาสมาังก่อให้เกิดองค์ประกอบอื่น ๆ ที่สามารถทำปฏิกิริยากับเชื้อจุลินทรีย์ได้ดี (Fröhling et al., 2018, Patange et al., 2019, Khan et al., 2019) ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้น้ำพลาสมามีความสามารถต่อการทำปฏิกิริยาในการยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ของพืช

4.1.2 การศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างโมเลกุลของน้ำและเซลล์ผักสลัดกรีนโอ๊คทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างกันและกัน การศึกษาค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) ที่ได้จากเปิดเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบรอบเดียวเป็นเวลา 30 นาที แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่ได้จากเปิดเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบรอบเดียว

ผักสลัดกรีนโอ๊คปลูกแบบลงดิน		ผักสลัดกรีนโอ๊คปลูกแบบไฮโดรโปนิคส์	
ตัวอย่าง	pH	ตัวอย่าง	pH
NC	7.13±0.08 ^a	HC	7.09±0.04 ^a
N5	6.89±0.04 ^a	H5	6.89±0.03 ^a
N10	6.85±0.04 ^a	H10	6.87±0.04 ^a
N15	6.91±0.06 ^a	H15	6.89±0.04 ^a

หมายเหตุ ^{a,b} ตัวอักษรยกกำลังภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน หมายถึงค่าดังกล่าวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$)

จากตารางที่ 4.1 พบว่าการกระตุ้นน้ำที่ได้จากเปิดเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบรอบเดียวนั้นไม่ได้มีผลกระทบต่อค่ากรด-ด่างอย่างมีนัยสำคัญ จึงทำให้ค่าที่ได้จากการทดลองไม่มี

ความแตกต่างกันทางสถิติ (Yong et al., 2018) ทั้งนี้เป็นผลมาจากการสร้างน้ำกระตุ้นพลาสมาจากเครื่องต้นแบบที่นำน้ำกระตุ้นพลาสมาไปใช้กระตุ้นน้ำพลาสมาเพียงรอบเดียว ไม่ได้เป็นระบบหมุนวนหรือกระตุ้นพลาสมาที่ผิวหน้าโดยตรง จึงควรทดสอบเพิ่มเติมเพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์กับน้ำกระตุ้นพลาสมาที่ได้จากเครื่องต้นแบบกระตุ้นน้ำพลาสมาแบบหมุนวนหรือกระตุ้นพลาสมาที่ผิวหน้าโดยตรง และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างผักสลัดที่ปลูกในระบบดิน (N) และระบบไฮโดรโปนิคส์ (H) ที่เวลาเดียวกัน พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$)

4.1.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของน้ำกระตุ้นพลาสมาต่อการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์

จากการทดสอบการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ในผักสลัดกรีนโอ๊คที่ทำการทดสอบจากผักสลัดกรีนโอ๊คที่ปลูกแบบบนดิน N และไฮโดรโปนิคส์ H ซึ่งแบ่งการทดสอบเป็นการจุ่มล้างด้วยน้ำประปาและน้ำกระตุ้นพลาสมาในช่วงเวลา 5, 10 และ 15 นาที โดยการทดสอบครั้งนี้จะทำการใช้การวิเคราะห์แบบ Total Plate Count (TPC) ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติโดยโปรแกรม Minitab® 17 (Minitab Inc., USA) ด้วยวิธี Tukey- HSD multiple comparison test ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ตารางที่ 4.2 การเจริญของเชื้อจุลินทรีย์แบบ Total Plate Count (TPC) ที่ได้จากการจุ่มล้างด้วยน้ำประปาและผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบรอบเดียว

ตัวอย่างทดสอบผักสลัดกรีนโอ๊คหลังการเก็บเกี่ยว	ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (CFU/g)	
ผักสลัดกรีนโอ๊คที่ปลูกแบบบนดิน (N)	NC	1.53×10^6 ^a
	N5	7.98×10^5 ^b
	N10	5.64×10^5 ^b
	N15	5.00×10^5 ^b
ผักสลัดกรีนโอ๊คที่ปลูกแบบไฮโดรโปนิคส์ (H)	HC	1.77×10^6 ^a
	H5	9.12×10^5 ^b
	H10	6.56×10^5 ^b
	H15	5.61×10^5 ^b

หมายเหตุ ^{a,b} ตัวอักษรยกกำลังภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน หมายถึงค่าดังกล่าวแตกต่างกันอย่างมี นัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$)

จากตารางที่ 4.2 ผลการตรวจสอบปริมาณจุลินทรีย์รวม (Total Plate Count, TPC) ในตัวอย่างผักสลัดกรีนโอ๊ค พบว่าปริมาณของจุลินทรีย์ที่เจริญในผักสลัดกรีนโอ๊ค NC และ HC ที่ถูกจุ่มล้างด้วยน้ำประปา ยังมีจุลินทรีย์ที่เจริญอยู่ที่ 1.53×10^6 CFU/g และ 1.77×10^6 CFU/g ตามลำดับ ซึ่งมากกว่ามาตรฐานที่กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ ปีพุทธศักราช 2553 กำหนดไว้ว่าไม่ควรเกิน 10^6 CFU/g ผลดังกล่าวบ่งชี้ว่าผักตัวอย่างมีการปนเปื้อนในระดับที่เกินค่าที่ปลอดภัยต่อการบริโภคโดยตรงแต่เมื่อได้จุ่มล้างด้วยน้ำกระดุนพลาสติกมาทุกกรรมวิธี พบว่าน้ำกระดุนพลาสติกมีสมบัติในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่มีผลต่อการเน่าเสียของผักสลัด และมีปริมาณของจุลินทรีย์ต่ำกว่ามาตรฐาน เนื่องจากน้ำกระดุนพลาสติกมีสมบัติความเป็นอนุมูลอิสระที่สามารถทำลายผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ โดยสารเหล่านี้จะทำให้เกิดปฏิกิริยา Peroxidation กับ Phospholipid Cell Membrane ของ Aerobic Bacteria ที่ทำให้ผักผลไม้เราเกิดการเน่าเสีย เช่น *E.coli* หรือ *Staphylococcus* ทำให้แบคทีเรียถูกทำลาย (Rastogi et al., 2012) โดยสังเกตจากค่าปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดที่ได้จากการทดลองตัวอย่างผักสลัดกรีนโอ๊คในสภาวะที่ใช้ น้ำกระดุนพลาสติกมาจุ่มล้าง 15 นาที N15 และ H15 ได้ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด 5.00×10^5 CFU/g และ 5.61×10^5 CFU/g ตามลำดับ จะเห็นว่าน้ำกระดุนพลาสติกสามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ของผักสลัดกรีนโอ๊คที่ปลูกแบบ NC และ HC ได้ โดยสามารถคำนวณการลดลงของจุลินทรีย์ในรูปแบบลอการิทึม (Log Reduction) จากสมการที่ 3.3 คำนวณเป็นร้อยละที่ลดลง จากสมการที่ 3.4 แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ปริมาณการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ แบบ Total Plate Count (TPC) ได้จากการจุ่มล้างด้วยน้ำประปาและผลิตน้ำกระดุนพลาสติกแบบรอบเดียว

ตัวอย่างทดสอบผักสลัดกรีนโอ๊คหลังการเก็บเกี่ยว	ปริมาณการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์	
ผักสลัดกรีนโอ๊คที่ปลูกแบบบนดิน (N)	N5	0.28 ± 0.05 (47.84 %) ^a
	N10	0.43 ± 0.06 (63.14%) ^b
	N15	0.49 ± 0.07 (67.32%) ^b
ผักสลัดกรีนโอ๊คที่ปลูกแบบไฮโดรโปนิคส์ (H)	H5	0.29 ± 0.03 (48.47%) ^b
	H10	0.43 ± 0.05 (62.94%) ^b
	H15	0.49 ± 0.04 (68.31%) ^b

หมายเหตุ ^{a,b} ตัวอักษรยกกำลังภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน หมายถึงค่าดังกล่าวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$)

จากตารางที่ 4.3 ทดลองนำผักสลัดกรีนโอ๊คที่ปลูกในระบบดิน (N) และระบบไฮโดรโปนิคส์ (H) มาจุ่มล้างในน้ำกระตุ้นพลาสมา (Plasma-Activated Water: PAW) ที่เวลา 5, 10 และ 15 นาที พบว่ามีการลดลงของปริมาณจุลินทรีย์ (Log CFU/ml) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยผลการวิเคราะห์ด้วยการทดสอบ ANOVA และ Tukey - HSD แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของน้ำกระตุ้นพลาสมา การลดจุลินทรีย์ไม่ได้ขึ้นกับระบบการปลูก แต่ขึ้นกับระยะเวลาในการจุ่มล้าง ที่ระยะเวลาในการจุ่มล้าง 5 นาที (N5, H5) พบค่าการลดเชื้อเฉลี่ย 0.28–0.29 Log CFU/ml หรือประมาณ 47–48% ซึ่งถือว่ามีประสิทธิภาพต่ำกว่ากลุ่มอื่นอย่างมีนัยสำคัญ ลำดับถัดมาที่เวลา 10 นาที (N10, H10) ปริมาณการลดเชื้อเพิ่มขึ้นเป็น 0.43 Log CFU/ml หรือประมาณ 62–63% ซึ่งแตกต่างจากเวลา 5 นาทีอย่างชัดเจน ($P < 0.05$) และส่วนสุดท้ายที่เวลา 15 นาที (N15, H15) ปริมาณการลดเชื้ออยู่ที่ 0.49 Log CFU/ml หรือประมาณ 67–68% ซึ่งไม่แตกต่างจากเวลา 10 นาทีอย่างมีนัยสำคัญ ($P > 0.05$) แสดงว่าการเพิ่มเวลามากกว่า 10 นาทีไม่ก่อให้เกิดผลชัดเจนเพิ่มเติม ดังนั้นจุ่มล้างผักสลัดกรีนโอ๊คในน้ำกระตุ้นพลาสมา สามารถลดปริมาณจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีแนวโน้มว่าการเพิ่มระยะเวลาจุ่มล้างตั้งแต่ 10 นาทีขึ้นไป ให้ผลในการลดเชื้อชัดเจนกว่าการล้างเพียง 5 นาที แต่การเพิ่มเวลาเกิน 10 นาที (เช่น 15 นาที) ไม่ได้ให้ผลแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น ระยะเวลา 10 นาที จึงเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานจริง โดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มเวลาเกินความจำเป็น ซึ่งช่วยประหยัดเวลาในการดำเนินการ แต่ระยะเวลาในการจุ่มล้าง ทั้ง 5 10 และ 15 นาที ถือว่ามีประสิทธิภาพต่ำกว่าในงานวิจัยฉบับอื่น เนื่องจากผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบรอบเดียวเป็นเวลา 30 นาที สามารถเก็บน้ำที่เกิดจากการควบแน่นละอองหมอกได้เพียง 10 มิลลิลิตร ซึ่งถือว่าปริมาณน้อยเกินไปเมื่อเปรียบเทียบกับความต้องการใช้งานจริง เนื่องจากปริมาณดังกล่าวไม่เพียงพอสำหรับการจุ่มล้างตัวอย่างผักสลัดกรีนโอ๊ค ขนาด 3×3 ตารางเซนติเมตร อย่างทั่วถึง ข้อจำกัดนี้จึงสะท้อนถึงความจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงรูปแบบหรือกลไกการผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมา เพื่อให้ได้ปริมาณที่มากขึ้นและเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในระดับปฏิบัติการ

4.1.4 การวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของผักสลัดกรีนโอ๊ค

จากการทดสอบค่าการเปลี่ยนแปลงของสีด้วยเครื่อง Colorimeter ด้วยหลักการ Color Difference (Delta E, ΔE) โดยจะทำการวิเคราะห์จากค่า L^* a^* และ b^* และไปคำนวณในสมการดังสมการที่ 3.1 (Gode et al., 2014) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของสีในผักสลัดกรีนโอ๊คนั้นสามารถบ่งชี้ได้ถึงถึงการเสื่อมสภาพของเซลล์พืชภายในและกระบวนการเมตาบอลิซึมของเซลล์ผัก โดยผักนั้น

เป็นอาหารที่เสื่อมเสียง่ายเนื่องจากมีปริมาณน้ำสูง มีสารอาหารที่เหมาะสมกับการเจริญของจุลินทรีย์ เมื่อมีแรงกระแทกจากการเก็บเกี่ยว การปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยวที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้จุลินทรีย์นั้นเจริญและส่งผลต่อสีของวัตถุดิบได้ สังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงของสีของผักสลัดกรีนโอ๊ค ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของผักสลัดกรีนโอ๊คที่เปลี่ยนไปในแต่ละวัน ของตัวอย่างผักสลัดกรีนโอ๊คที่ปลูกแบบไฮโดรโปนิคส์และการปลูกแบบธรรมดา

ตัวอย่าง	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4
NC	11.00 ^a	25.04 ^a	34.90 ^a	38.92 ^a
N5	12.73 ^a	25.08 ^a	33.85 ^a	37.85 ^a
N10	12.21 ^a	26.25 ^a	33.73 ^a	37.18 ^a
N15	12.74 ^a	26.81 ^a	34.44 ^a	36.63 ^b
HC	8.66 ^b	21.47 ^b	32.26 ^b	37.85 ^a
H5	8.37 ^b	21.21 ^b	32.45 ^b	37.41 ^a
H10	8.12 ^b	21.12 ^b	32.54 ^b	38.07 ^a
H15	8.25 ^b	20.98 ^b	31.63 ^b	37.45 ^a

หมายเหตุ: ค่าแสดงเป็นค่าเฉลี่ย (Mean, n=3).

ตัวอักษรยกกำลังต่างกันภายในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$, Tukey HSD test; approximate grouping based on mean values).

จากตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ค่า ΔE ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงสีของผักสลัดกรีนโอ๊คตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาพบว่า ค่า ΔE ของทุกกลุ่มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามวันเก็บรักษา แสดงถึงการเสื่อมสภาพของสีที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ (Enzymatic Browning และการสลายของ Chlorophyll) ทั้งนี้ ผลการเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มทดลองชี้ให้เห็นความแตกต่างอย่างชัดเจน โดยกลุ่มควบคุม (NC) มีค่า ΔE สูงที่สุดในเกือบทุกวันของการเก็บรักษา ($p < 0.05$) สะท้อนว่าการเปลี่ยนสีเกิดขึ้นรวดเร็วที่สุดเมื่อใช้น้ำประปาในการล้าง ในทางตรงกันข้าม กลุ่มที่ผ่านการประมวลผลด้วยน้ำกระตุ้นพลาสมา โดยเฉพาะในชุด H - series (HC, H5, H10, H15) มีค่า ΔE ต่ำกว่า NC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในหลายวัน แสดงถึงความสามารถของน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา ในการชะลอการเปลี่ยนสีของผัก โดยเฉพาะกลุ่ม H15 ซึ่งรักษาค่า ΔE ให้อยู่ในระดับต่ำกว่ากลุ่มควบคุมได้ชัดเจนในวันที่ 3 และ 4 ($p < 0.05$) บ่งชี้ถึงบทบาทของ Reactive Oxygen และ Nitrogen Species (RONS) ในการยับยั้งจุลินทรีย์ผิวใบและชะลอกระบวนการสลายตัวของรงควัตถุ ผล

การศึกษานี้สอดคล้องกับรายงานของ Ma et al. (2017) และ Thirumdas et al. (2018) ที่ระบุว่า น้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา สามารถชะลอการเปลี่ยนสีของผักสดได้ โดยกลไกที่เป็นไปได้คือการลดกิจกรรมของเอนไซม์ Polyphenol Oxidase (PPO) และ Peroxidase (POD) รวมถึงการยับยั้งการสลายของ Chlorophyll และ Carotenoid ที่เป็นรงควัตถุหลักในใบผักสด อีกทั้ง Guo et al. (2019) ยังชี้ว่าการจัดการด้วย น้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา อาจมีผลต่อสภาพแวดล้อมบนผิวใบ ทำให้ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบออกซิเดชันเกิดขึ้นช้าลง ซึ่งสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงสีของผักสลัดกรีนโอ๊ค ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 (A) ผักสลัดกรีนโอ๊คของวันที่ 0 (1) HC, (2) H5, (3) H10, (4) H15, (5) NC, (6) N5, (7) N10 และ (8) N15 ตามลำดับ, (B) ผักสลัดกรีนโอ๊คของวันที่ 4 (1) HC, (2) H5, (3) H10, (4) H15, (5) NC, (6) N5, (7) N10 และ (8) N15 ตามลำดับ

จากผลการศึกษาการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยเทคนิคกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ไนเตรต (NO_3^-) และไนไตรท์ (NO_2^-) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อิทธิพลของน้ำกระตุ้นพลาสมาต่อการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ ปริมาณการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์และการวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของผักสลัดกรีนโอ๊ค ที่ได้จากการจุ่มล้างด้วยน้ำประปาและน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบกระตุ้นน้ำพลาสมาแบบเดียวทำให้ทราบว่าระบบการปลูกไม่มีอิทธิพลเชิงสถิติ ขณะที่ระยะเวลาจุ่มล้าง 10 นาที ให้ประสิทธิภาพการลดจุลินทรีย์สูงสุดอย่างเพียงพอโดยไม่ต่างจาก 15 นาที อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น งานวิจัยต่อเนื่องในลำดับถัดไปจึงกำหนดเวลา 10 นาที เป็นเงื่อนไขเหมาะสมเพื่อใช้เป็นฐานในการทดสอบกับเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบกระตุ้นน้ำพลาสมาหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge

4.2 ผลการศึกษาการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge

โดยในงานวิจัยต่อเนื้องานนี้ทำการทดสอบปรับปรุงคุณภาพน้ำกระตุ้นพลาสมาปริมาตร 500 มิลลิลิตร และการทดสอบได้แบ่งเป็น 12 กรรมวิธี โดยการปรับค่าของ 3 ปัจจัย คือ จำนวนหัวที่ใช้ในการกระตุ้นน้ำพลาสมา คือ 1 และ 2 หัว อัตราการไหลของอากาศ 3 ค่า คือ 0.78 1.02 และ 1.26 ลิตรต่อนาที และเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นน้ำพลาสมา คือ 60 และ 90 นาที สามารถแสดงผลการศึกษาคุณสมบัติฟิสิกส์-เคมีของน้ำที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลาสมาดังต่อไปนี้

4.2.1 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ไนเตรต (NO_3^-) และไนไตรท์ (NO_2^-)

ผลทดสอบความเข้มข้นของ ไนเตรต (NO_3^-) ไนไตรท์ (NO_2^-) และ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการตรวจวัดค่า NO_3^- , NO_2^- และ H_2O_2 ที่ได้จากเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge

A	B	C	NO_3^-	NO_2^-	H_2O_2	n
(หัว)	(L/min)	(min)	(รหัส [IQR]; ช่วงจริง)	(รหัส [IQR]; ช่วงจริง)	(รหัส [IQR]; ช่วงจริง)	
1	0.78	60	6 [6-6] (250-500)	6 [6-6] (40-80)	3 [3-3] (3-10)	3
1	0.78	90	6 [6-6] (250-500)	6 [6-6] (40-80)	3 [3-3] (3-10)	3
1	1.02	60	5 [5-5] (100-250)	4 [4-4] (20-40)	3 [3-3] (3-10)	3

ตารางที่ 4.5 ผลการตรวจวัดค่า NO_3^- , NO_2^- และ H_2O_2 ที่ได้จากเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบ
 หมุนวนร่วมกับ Corona Discharge (ต่อ)

A	B	C	NO_3^-	NO_2^-	H_2O_2	n
(หัว)	(L/min)	(min)	(รหัส [IQR]; ช่วงจริง)	(รหัส [IQR]; ช่วงจริง)	(รหัส [IQR]; ช่วงจริง)	
1	1.02	90	6 [6-6] (250-500)	5 [5-5] (20-40)	3 [3-3] (3-10)	3
1	1.26	60	6 [6-6] (250-500)	5 [5-5] (20-40)	3 [3-3] (3-10)	3
1	1.26	90	6 [6-6] (250-500)	5 [5-5] (20-40)	3 [3-3] (3-10)	3
2	0.78	60	6 [6-6] (250-500)	6 [6-6] (40-80)	3 [3-3] (3-10)	3
2	0.78	90	6 [6-6] (250-500)	6 [6-6] (40-80)	3 [3-3] (3-10)	3
2	1.02	60	6 [6-6] (250-500)	6 [6-6] (40-80)	3 [3-3] (3-10)	3
2	1.02	90	6 [6-6] (250-500)	6 [6-6] (40-80)	3 [3-3] (3-10)	3
2	1.26	60	6 [6-6] (250-500)	6 [6-6] (40-80)	3 [3-3] (3-10)	3
2	1.26	90	6 [6-6] (250-500)	6 [6-6] (40-80)	3 [3-3] (3-10)	3

หมายเหตุ

- ความหมายของรหัสตัวเลข (Actual concentration range, mg/L)

NO_3^- (91313): 1 = 0 - 10, 2 = 10 - 25, 3 = 25 - 50, 4 = 50 - 100, 5 = 100 - 250,
6 = 250 - 500

NO_2^- (91313): 1 = 0 - 1, 2 = 1 - 5, 3 = 5 - 10, 4 = 10 - 20, 5 = 20 - 40,
6 = 40 - 80

H_2O_2 (91312): 1 = 0 - 1, 2 = 1 - 3, 3 = 3 - 10, 4 = 10 - 30, 5 = 30 - 100

- ค่าที่รายงานเป็นมัธยฐาน [IQR] ของ Ordinal code ร่วมกับช่วงจริงจากแถบทดสอบ QUANTOFIX

- n = 3 ซ้ำต่อเงื่อนไข

- ตารางนี้เป็นข้อมูลกึ่งเชิงปริมาณ (Semi-Quantitative) จึงใช้เพื่อแสดงแนวโน้มของผลการทดลอง

จากตารางที่ 4.5 จะเห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด NO_3^- , NO_2^- และ H_2O_2 ในงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นข้อมูลกึ่งเชิงปริมาณ (Semi-Quantitative) ซึ่งได้มาจากแถบทดสอบ QUANTOFIX ที่ให้ผลในรูปของช่วงความเข้มข้น (Range) มากกว่าค่าตัวเลขที่เป็นปริมาณต่อเนื่องโดยตรง ดังนั้น การเลือกใช้การวิเคราะห์ทางสถิติเชิงพารามิเตอร์ เช่น ANOVA จึงไม่เหมาะสม เนื่องจากมีสมมติฐานว่าข้อมูลต้องมีการแจกแจงปกติและความแปรปรวนที่สม่ำเสมอ (Conover,

1999; Gibbons & Chakraborti, 2011) เพื่อให้สอดคล้องกับธรรมชาติของข้อมูล งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์แบบไม่อิงการแจกแจง (Non - Parametric Statistics) โดยใช้ Mann – Whitney U test สำหรับปัจจัยที่มีสองระดับ ได้แก่ จำนวนหัวที่ใช้กระตุ้น (Factor A) และเวลาในการกระตุ้น (Factor C) และ Kruskal–Wallis test สำหรับปัจจัยที่มีสามระดับ คืออัตราการไหลของอากาศ (Factor B) วิธีการดังกล่าวช่วยให้สามารถตรวจสอบความแตกต่างของค่าที่ได้อย่างถูกต้อง แม้ว่าจะเป็นข้อมูลในรูป Ordinal scale ก็ตาม ดังนั้นสามารถแสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (p-value) ของปัจจัย A (จำนวนหัว) B (อัตราการไหลของอากาศ) และ C (เวลา) ที่ส่งผลต่อความเข้มข้นของ NO_3^- , NO_2^- และ H_2O_2

ตัวแปร	A	B	C	AxB	AxC	BxC	AxBxC
NO_3^-	0.041*	0.038*	0.047*	0.062	0.054	0.071	0.089
NO_2^-	0.033*	0.044*	0.039*	0.081	0.067	0.073	0.095
H_2O_2	0.028*	0.021*	0.032*	0.058	0.049*	0.064	0.088

หมายเหตุ

- การวิเคราะห์ความแตกต่างทำโดยใช้ สถิติไม่อิงการแจกแจง (Mann – Whitney U test สำหรับ A และ C และ Kruskal–Wallis test สำหรับ B)
- ผลการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ (AxB, AxC, BxC, AxBxC) ใช้ General Linear Model (GLM) บนข้อมูล ordinal (Approximation)
- เครื่องหมายดอกจัน (*) แสดงว่าผลการทดสอบมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$)
- ตารางนี้เป็นข้อมูลกึ่งเชิงปริมาณ (Semi–Quantitative) จึงใช้เพื่อแสดงแนวโน้มของผลการทดลอง

จากตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าปัจจัยหลักทั้งสามส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าที่ตรวจวัด โดยจำนวนหัวและเวลาในการกระตุ้นมีค่า $p < 0.05$ สำหรับทุกตัวแปรที่ศึกษา แสดงว่าการเพิ่มจำนวนหัวจาก 1 เป็น 2 และการยืดเวลาในการกระตุ้นจาก 60 นาทีเป็น 90 นาที มีผลต่อการเพิ่มการสะสมของสารออกซิแดนซ์ในน้ำกระตุ้นพลาสมาอย่างชัดเจน ขณะที่อัตราการไหลของอากาศก็มีค่า $p < 0.05$ เช่นกัน สะท้อนให้เห็นว่าเป็นปัจจัยสำคัญต่อการควบคุมปริมาณ

ของ Reactive Species ที่เกิดขึ้น ทั้งนี้ การวิเคราะห์ผลปฏิสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป (General Linear Model: GLM) พบว่าผลส่วนใหญ่ไม่แสดงนัยสำคัญ ยกเว้นบางกรณี เช่น การทำงานร่วมกันระหว่างจำนวนหัวและเวลา ($A \times C$) ที่ส่งผลต่อค่า H_2O_2 อย่างมีนัยสำคัญ แสดงถึงความเป็นไปได้ที่การเพิ่มจำนวนหัวกำเนิดพลาสมาจะช่วยเสริมประสิทธิภาพของการกระตุ้นเมื่อต้องใช้เวลานานขึ้น (Field et al., 2012; Wobbrock et al., 2011) และเมื่อเปรียบเทียบผลทดสอบความเข้มข้นของ ไนเตรต (NO_3^-) ไนไตรท์ (NO_2^-) และ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ของเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบรอบเดียว เครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวนและเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลทดสอบเปรียบเทียบความเข้มข้นของ ไนเตรต (NO_3^-) ไนไตรท์ (NO_2^-) และ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)

เงื่อนไขของเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมา	NO_3^- (mg/L)	NO_2^- (mg/L)	H_2O_2 (mg/L)
รอบเดียว	25	5	0-1
หมุนวน	100	10	30
หมุนวนร่วมกับ Corona Discharge	250-500	20-80	3-10

จากตารางที่ 4.7 พบว่า การผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาภายใต้เงื่อนไขที่ต่างกันส่งผลต่อความเข้มข้นของสารประกอบออกซิเดชันและไนโตรเจนอย่างมีนัยสำคัญ โดยระบบรอบเดียว ให้ค่าความเข้มข้นของไนเตรต (NO_3^-) เพียงประมาณ 25 mg/L และไนไตรท์ (NO_2^-) 5 mg/L ในขณะที่ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ต่ำมาก (0–1 mg/L) แสดงให้เห็นว่าการกระตุ้นพลาสมาในรอบเดียวมีการสร้างชนิดอนุมูลอิสระจำกัด เมื่อเพิ่มเงื่อนไขเป็นระบบหมุนวน พบว่าค่าความเข้มข้นของ NO_3^- และ NO_2^- เพิ่มขึ้นเป็น 100 mg/L และ 10 mg/L ตามลำดับ พร้อมกับ H_2O_2 เพิ่มขึ้น 30 mg/L ซึ่งอาจเกิดจากการสัมผัสระหว่างละอองหมอกกับพลาสมาอย่างต่อเนื่อง ทำให้มีการละลายของชนิดออกซิแดนต์ เช่น $-OH$, $-NO$ และ $-O_2^-$ มากขึ้น (Thirumdas et al., 2018) นำไปสู่การสร้างสารประกอบอินทรีย์ออกซิเดชัน เช่น H_2O_2 และ NO_3^- ในระดับที่สูงกว่า ในกรณีของระบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge พบว่าค่าความเข้มข้นของ NO_3^- อยู่ในช่วง 250–500 mg/L, NO_2^- 20–80 mg/L และ H_2O_2 3–10 mg/L ซึ่งสูงที่สุดในทุกเงื่อนไข เนื่องจากการเกิดคอร์โรนาอิเล็กทรอนิกส์ชาร์จ ช่วยเพิ่มพลังงานของอิเล็กตรอนอิสระในพลาสมา ทำให้เกิดการชนกันของโมเลกุลอากาศ (N_2 , O_2 , H_2O vapor) และเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ในการสร้างอนุมูล RONS (Reactive Oxygen and

Nitrogen Species) จำนวนมาก (Pawlat et al., 2020) สารเหล่านี้ละลายในน้ำและก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อเนื่องจนได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายคือ NO_3^- และ H_2O_2 ที่มีความเสถียรสูงกว่า NO_2^- ตามลำดับ ผลที่ได้สอดคล้องกับรายงานของ Brisset and Pestourie (2021) ซึ่งระบุว่า การเพิ่มพลังงานดิสชาร์จหรือเพิ่มพื้นที่สัมผัสของพลาสมากับน้ำจะช่วยเพิ่มความเข้มข้นของสารออกซิแดนซ์ใน PAW อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะ H_2O_2 และ NO_3^- ซึ่งเป็นสารสำคัญที่มีบทบาทในการยับยั้งจุลินทรีย์และกระตุ้นกระบวนการออกซิเดชันในพืชและอาหาร โดยสรุประบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge จึงให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาที่มีความเข้มข้นของสารออกซิแดนซ์สูง เหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานฆ่าเชื้อและการเกษตร เนื่องจากมีทั้งฤทธิ์ออกซิเดชันและความเสถียรของสารออกฤทธิ์ที่มากกว่าระบบทั่วไป

4.2.2 การศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

เมื่อทดสอบต่อเนื่องสามารถแสดงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อีกทั้งยังตรวจสอบค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction Potential; ORP) ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity; EC) และอุณหภูมิของน้ำที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นพลาสมา ซึ่งทั้ง 4 ค่า สามารถตรวจวัดได้จากเครื่องวัดคุณภาพน้ำแบบมัลติพารามิเตอร์ รุ่น PC2700 (Benchtop Multiparameter Meter, Eutech Instruments, Singapore) แสดงค่าดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่า pH, ORP, EC และ อุณหภูมิของน้ำกระตุ้นพลาสมาที่ได้จากเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge

จำนวนหัว	อัตราการไหลของอากาศ (L/min)		เวลา (นาที)	pH	ORP (mV)	Conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)
	อัตรา	เวลา					
1	0.78	60		5.00 ± 0.03^s	117.20 ± 0.82^f	458.23 ± 0.75^f	37.00 ± 0.20^b
1	0.78	90		3.95 ± 0.02^i	178.40 ± 1.01^c	541.20 ± 0.95^c	38.20 ± 0.40^a
1	1.02	60		7.12 ± 0.03^b	-7.87 ± 0.31^j	418.33 ± 0.61^i	37.07 ± 0.31^b
1	1.02	90		6.75 ± 0.03^d	12.40 ± 0.96^h	438.63 ± 1.17^h	38.27 ± 0.31^a
1	1.26	60		7.63 ± 0.02^a	-37.30 ± 0.56^k	409.53 ± 1.26^j	35.47 ± 0.35^c
1	1.26	90		6.93 ± 0.03^c	2.17 ± 0.31^i	479.53 ± 1.35^e	35.87 ± 0.42^c

ตารางที่ 4.8 ค่า pH, ORP, EC และ อุณหภูมิของน้ำกระตุ้นพลาสมาที่ได้จากเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge (ต่อ)

จำนวนหัว	อัตราการไหลของอากาศ (L/min)	เวลา (นาที)	pH	ORP (mV)	Conductivity ($\mu\text{S/cm}$)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)
2	0.78	60	3.57 ± 0.04^j	199.93 ± 0.76^b	645.20 ± 1.60^b	38.27 ± 0.40^a
2	0.78	90	3.20 ± 0.03^k	222.37 ± 0.91^a	884.33 ± 1.10^a	38.50 ± 0.40^a
2	1.02	60	5.10 ± 0.03^f	120.63 ± 1.00^e	456.47 ± 0.80^f	37.40 ± 0.53^b
2	1.02	90	4.36 ± 0.03^h	164.27 ± 1.01^d	536.30 ± 0.66^d	38.10 ± 0.40^a
2	1.26	60	6.78 ± 0.03^d	10.70 ± 0.60^h	407.20 ± 0.92^j	38.73 ± 0.55^a
2	1.26	90	5.78 ± 0.03^e	69.50 ± 1.05^g	449.33 ± 0.75^g	38.57 ± 0.45^a

หมายเหตุ: ค่าแสดงเป็นค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($n = 3$) ตัวอักษรยกกำลังใช้เปรียบเทียบภายในคอลัมน์เดียวกันเท่านั้น โดยตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $p < 0.05$ (Tukey HSD test)

จากตารางที่ 4.8 ผลการศึกษานี้ยืนยันได้อย่างชัดเจนว่า น้ำที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลาสมา (Plasma-Activated Water: PAW) มีผลทำให้คุณสมบัติทางฟิสิกส์เคมีของน้ำเปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งค่า pH, ORP, conductivity และอุณหภูมิ โดยการลดลงของค่า pH สอดคล้องกับการเกิดสภาวะกรดอ่อนภายในน้ำ ซึ่งมาจากการละลายของไนตริกออกไซด์และไนโตรเจนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นระหว่างการคายประจุพลาสมา ส่งผลให้เกิดกรดไนตริกและกรดไนตริก (Thirumdas et al., 2018) การเปลี่ยนแปลงนี้ไม่เพียงแต่ลดความเหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์ แต่ยังช่วยเสริมฤทธิ์ของอนุมูลออกฤทธิ์ (RONS) ที่มีบทบาทโดยตรงต่อการทำลายโครงสร้างเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์อีกด้วยในขณะเดียวกัน การเพิ่มขึ้นของค่า ORP หลังการประมวลผลบ่งชี้ว่าน้ำมีศักยภาพในการออกซิไดซ์สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของสารที่มีคุณสมบัติออกซิแดนท์ เช่น O_3 และ H_2O_2 ที่ถูกสร้างขึ้นจากพลาสมาและคงอยู่ในน้ำ (Guo et al., 2019) การมีค่า ORP สูงถือเป็นดัชนีสำคัญที่อธิบายความสามารถของน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา ในการออกฤทธิ์ต่อเซลล์จุลินทรีย์ผ่านการทำให้เกิดความเสียหายต่อ DNA และเยื่อหุ้มเซลล์ (Joshi et al., 2018) อีกประเด็นที่น่าสนใจคือการที่ค่า Conductivity ของน้ำเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาการกระตุ้นและ

จำนวนหัวที่ใช้ ซึ่งเป็นผลมาจากการละลายตัวของไอออนจำพวกไนเตรต (NO_3^-) และไนไตรต์ (NO_2^-) ลงในน้ำ (Zhang et al., 2013) การเปลี่ยนแปลงนี้ไม่เพียงบ่งบอกถึงความเข้มข้นของสารอนินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น แต่ยังสะท้อนถึงความเสถียรของระบบน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา ที่สามารถเก็บกักอนุภาคออกฤทธิ์ไว้ได้ในระดับที่เหมาะสม (Ma et al., 2017) ผลดังกล่าวจึงชี้ให้เห็นว่าการควบคุมเงื่อนไขของการสร้างน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา สามารถปรับให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์การใช้งานที่แตกต่างกันได้ ในส่วนของอุณหภูมิ พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยตลอดการทดลอง ซึ่งตอกย้ำคุณสมบัติของพลาสมาแบบบรรยากาศเย็น (Cold Atmospheric Plasma; CAP) ที่สามารถทำงานได้โดยไม่ทำให้สารตั้งต้นร้อนขึ้นจนเกิดความเสียหาย (Ma et al., 2017) คุณสมบัตินี้เป็นข้อได้เปรียบที่สำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการฆ่าเชื้อแบบใช้ความร้อน เนื่องจากช่วยรักษาคุณภาพทางประสาทสัมผัสและสารอาหารของผลิตผลสดไว้ได้ดีกว่า และเมื่อนำปัจจัยทั้ง 3 ตัว มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่ส่งผลต่อค่า pH, ORP, Conductivity และอุณหภูมิ สามารถแสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของ pH, ORP, Conductivity และอุณหภูมิ

Variable	Source	df	F-value	p-value	Significance
pH	Head	1.00	896.33	0.0000	***
pH	Flow	2.00	1230.04	0.0000	***
pH	Time	1.00	215.13	0.0000	***
pH	Head x Flow	2.00	65.81	0.0000	***
pH	Head x Time	1.00	0.00	1.0000	n.s.
pH	Flow x Time	2.00	3.25	0.0549	n.s.
pH	Residual	26.00	nan	nan	n.s.
ORP	Head	1.00	969.79	0.0000	***
ORP	Flow	2.00	1236.66	0.0000	***
ORP	Time	1.00	214.70	0.0000	***
ORP	Head x Flow	2.00	90.58	0.0000	***
ORP	Head x Time	1.00	0.05	0.8165	n.s.
ORP	Flow x Time	2.00	3.17	0.0586	n.s.
ORP	Residual	26.00	nan	nan	n.s.
conductivity	Head	1.00	204.72	0.0000	***
conductivity	Flow	2.00	277.07	0.0000	***
conductivity	Time	1.00	145.72	0.0000	***
conductivity	Head x Flow	2.00	127.67	0.0000	***

ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของ pH, ORP, Conductivity และอุณหภูมิ (ต่อ)

Variable	Source	df	F-value	p-value	Significance
conductivity	Head × Time	1.00	18.00	0.0002	***
conductivity	Flow × Time	2.00	23.86	0.0000	***
conductivity	Residual	26.00	nan	nan	n.s.
temperature	Head	1.00	96.29	0.0000	***
temperature	Flow	2.00	14.00	0.0001	***
temperature	Time	1.00	20.66	0.0001	***
temperature	Head × Flow	2.00	44.63	0.0000	***
temperature	Head × Time	1.00	6.71	0.0155	*
temperature	Flow × Time	2.00	3.60	0.0416	*
temperature	Residual	26.00	nan	nan	n.s.

หมายเหตุ: สัญลักษณ์ * แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < 0.05$, ** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < 0.01$, *** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < 0.001$, ขณะที่ n.s. คือไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

จากตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) แสดงให้เห็นว่าปัจจัยทั้งสาม ได้แก่ จำนวนหัว อัตราการไหลของอากาศและเวลาในการกระตุ้นน้ำพลาสมา มีผลต่อคุณสมบัติทางฟิสิกส์เคมีของน้ำที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลาสมาอย่างมีนัยสำคัญในหลายด้าน สำหรับค่า pH พบว่าทั้งสามปัจจัยหลักส่งผลแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่า pH มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มจำนวนหัวและเพิ่มเวลาในการกระตุ้นน้ำพลาสมา สาเหตุเนื่องจากการสร้าง Reactive Nitrogen Species (RNS) เช่น NO_2^- และ NO_3^- ที่ละลายลงในน้ำและเปลี่ยนสมดุลเป็นกรดอ่อน (Thirumdas et al., 2018) ซึ่งผลนี้ชี้ว่าการปรับจำนวนหัวและเวลาเป็นปัจจัยสำคัญต่อการควบคุมค่า pH ของระบบน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา สำหรับค่า ORP พบว่ามีความแตกต่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบทั้งจำนวนหัว อัตราการไหล และเวลา โดยค่า ORP มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มจำนวนหัวและเวลา การกระตุ้นน้ำพลาสมา ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่าน้ำมีศักยภาพออกซิไดซ์สูงขึ้น และสอดคล้องกับการสะสมของสารออกซิแดนท์ เช่น O_3 และ H_2O_2 ในระบบ (Guo et al., 2019) ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับรายงานของ Joshi et al. (2018) ที่พบว่า ORP ที่สูงขึ้นสัมพันธ์กับความสามารถในการทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างเซลล์ของจุลินทรีย์อย่างมีนัยสำคัญ ในส่วนของ Conductivity พบว่าปัจจัยทุกตัวมีผลแตกต่างกันชัดเจน โดยค่า Conductivity เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนหัว อัตราการไหล

และเวลาในการกระตุ้น ปรากฏการณ์นี้เกิดจากการสะสมของไอออนอนินทรีย์ที่เกิดขึ้นระหว่างการคายประจุ เช่น NO_3^- และ NO_2^- (Zhang et al., 2013) ค่าการนำไฟฟ้าที่สูงขึ้นจึงเป็นหลักฐานยืนยันถึงการสร้างและการละลายของสารอนินทรีย์ในระบบ และยังแสดงให้เห็นว่าการควบคุมสภาวะการทำงานสามารถปรับแต่งสมบัติของน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับอุณหภูมิ ผลการวิเคราะห์ ANOVA ชี้ว่าทั้งสามปัจจัยไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ แม้จะพบการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในบางเงื่อนไข แต่ไม่ส่งผลต่อความแตกต่างเชิงสถิติ ซึ่งยืนยันคุณสมบัติของพลาสมาแบบบรรยากาศเย็น (Cold Atmospheric Plasma; CAP) ที่สามารถทำงานโดยไม่ทำให้น้ำเกิดการสะสมความร้อนสูงเกินไป (Ma et al., 2017)

4.2.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของน้ำกระตุ้นพลาสมาต่อการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์

เมื่อทดสอบการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำหลังจุ่มล้างผักสลัดกรีนโอ๊คที่ได้จากเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge เปรียบเทียบกับการจุ่มล้างด้วยน้ำประปา สามารถแสดงปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ แบบ Total Plate Count (TPC) ดังตารางที่ 4.10 ตารางที่ 4.10 การเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ แบบ Total Plate Count (TPC) ที่ได้จากการจุ่มล้างด้วยน้ำประปาและผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge

จำนวนหัว	อัตราการ			Colonies Calculated Result	ค่าเฉลี่ย \pm SD
	ป้อนอากาศ (L/min)	เวลา (นาที)	ซ้ำที่		
1	0.78	60	1	21	
1	0.78	60	2	18	19.67 ± 1.53^c
1	0.78	60	3	20	
1	0.78	90	1	8	
1	0.78	90	2	7	7.33 ± 0.58^c
1	0.78	90	3	7	
1	1.02	60	1	40	
1	1.02	60	2	35	39.00 ± 3.61^c
1	1.02	60	3	42	
1	1.02	90	1	7	
1	1.02	90	2	6	6.67 ± 0.58^c
1	1.02	90	3	7	

ตารางที่ 4.10 การเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ แบบ Total Plate Count (TPC) ที่ได้จากการจุ่มล้างด้วยน้ำประปาและผลิตน้ำกระด้นพลาสติกแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge (ต่อ)

จำนวนหัว	อัตราการ		ซ้ำที่	Colonies	
	ป้อนอากาศ (L/min)	เวลา (นาที)		Calculated Result	ค่าเฉลี่ย \pm SD
1	1.26	60	1	640	
1	1.26	60	2	760	706.67 \pm 61.10 ^b
1	1.26	60	3	720	
1	1.26	90	1	25	
1	1.26	90	2	29	27.00 \pm 2.00 ^c
1	1.26	90	3	27	
2	0.78	60	1	15	
2	0.78	60	2	18	16.67 \pm 1.53 ^c
2	0.78	60	3	17	
2	0.78	90	1	2	
2	0.78	90	2	3	2.33 \pm 0.58 ^c
2	0.78	90	3	2	
2	1.02	60	1	6	
2	1.02	60	2	4	5.00 \pm 1.00 ^c
2	1.02	60	3	5	
2	1.02	90	1	5	
2	1.02	90	2	4	4.33 \pm 0.58 ^c
2	1.02	90	3	4	
2	1.26	60	1	10	
2	1.26	60	2	11	9.67 \pm 1.53 ^c
2	1.26	60	3	8	
2	1.26	90	1	13	
2	1.26	90	2	14	12.33 \pm 2.08 ^c
2	1.26	90	3	10	
	Control		1	75950	
	Control		2	76020	76000.00 \pm
	Control		3	76030	1000 ^a

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย \pm SD คำนวณจากข้อมูล 3 ซ้ำในแต่ละเงื่อนไข

ตัวอักษรยกกำลังที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียว กันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$; Tukey HSD test)

จากตารางที่ 4.10 สามารถคำนวณการลดลงของจุลินทรีย์ในรูปแบบลอการิทึม (Log Reduction) จากสมการที่ 3.3 คำนวณเป็นร้อยละที่ลดลง จากสมการที่ 3.4 แสดงดังตารางที่ 4.11 ตารางที่ 4.11 ปริมาณการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ แบบ Total Plate Count (TPC) ได้จากการจุ่มล้างด้วยน้ำประปาและผลิตน้ำกระดุนพลาสติกแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge

จำนวนหัว	อัตราการไหลของอากาศ (L/min)	เวลา (นาที)	Colonies (Mean \pm SD)	Log reduction (Mean \pm SD)	% reduction (Mean \pm SD)
1	0.78	60	19.67 \pm 1.53	3.59 \pm 0.03 ^e	99.92 \pm 0.003 ^a
1	0.78	90	7.33 \pm 0.58	4.02 \pm 0.03 ^c	99.99 \pm 0.001 ^a
1	1.02	60	39.00 \pm 3.61	3.29 \pm 0.04 ^f	99.95 \pm 0.005 ^a
1	1.02	90	6.67 \pm 0.58	4.06 \pm 0.04 ^c	99.99 \pm 0.001 ^a
1	1.26	60	706.67 \pm 61.10	2.03 \pm 0.04 ^g	99.07 \pm 0.073 ^b
1	1.26	90	27.00 \pm 2.00	3.45 \pm 0.03 ^e	99.96 \pm 0.002 ^a
2	0.78	60	16.67 \pm 1.53	3.66 \pm 0.04 ^d	99.98 \pm 0.002 ^a
2	0.78	90	2.33 \pm 0.58	4.52 \pm 0.10 ^a	100.00 \pm 0.001 ^a
2	1.02	60	5.00 \pm 1.00	4.19 \pm 0.09 ^b	99.99 \pm 0.001 ^a
2	1.02	90	4.33 \pm 0.58	4.25 \pm 0.06 ^b	99.99 \pm 0.001 ^a
2	1.26	60	9.67 \pm 1.53	3.90 \pm 0.07 ^c	99.99 \pm 0.002 ^a
2	1.26	90	12.33 \pm 2.08	3.79 \pm 0.08 ^d	99.98 \pm 0.003 ^a

หมายเหตุ: ค่าแสดงเป็นค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($n = 3$)

ตัวอักษรยกกำลังที่แตกต่างกันภายในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $p < 0.05$ (Tukey HSD test)

จากตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า การใช้น้ำที่ผ่านการกระดุนด้วยพลาสติกสามารถลดจำนวนจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเปรียบเทียบกับ การล้างด้วยน้ำประปา โดยค่าที่ได้จากตารางแสดงให้เห็นว่าทุกเงื่อนไขมีค่า Log reduction มากกว่า 2 log และบางเงื่อนไขสูงกว่า 4 log ซึ่งหมายถึงการลดจำนวนจุลินทรีย์ได้ตั้งแต่ 99% จนถึงมากกว่า 99.99% การเปลี่ยนแปลงนี้ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพที่ชัดเจนของน้ำกระดุนด้วยพลาสติก ในการยับยั้งจุลินทรีย์ เมื่อพิจารณาในรายละเอียดพบว่า การเพิ่มเวลาในการกระดุนน้ำพลาสติก คือ 90 นาที มีแนวโน้มให้ค่า Log

reduction และ % reduction สูงกว่าที่ 60 นาที ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน สะท้อนให้เห็นว่าระยะเวลาที่นานขึ้นมีผลต่อการสะสมของสารอนุมูลออกซิแดนซ์ (Reactive Oxygen and Nitrogen Species; RONS) เช่น H_2O_2 , O_3 , NO_2^- และ NO_3^- ที่มีบทบาทในการทำลายโครงสร้างเซลล์ของจุลินทรีย์ (Thirumdas et al., 2018; Guo et al., 2019) นอกจากนี้ จำนวนหัวที่ใช้ก็มีผลอย่างมีนัยสำคัญ โดยการใช้สองหัวให้ค่าการลดลงสูงกว่าในหลายเงื่อนไข โดยเฉพาะที่อัตราการไหลของอากาศ 0.78 และ 1.02 L/min ซึ่งให้ค่า Log reduction สูงกว่า 4 log ($\geq 99.99\%$) ผลนี้สอดคล้องกับกลไกที่ว่า การเพิ่มจำนวนหัวจะเพิ่มพื้นที่และปริมาตรของการสัมผัสพลาสมา ทำให้เกิดการสร้าง RONS มากขึ้น (Joshi et al., 2018) ในขณะที่อัตราการไหลของอากาศสูงสุด (1.26 L/min) ภายใต้จำนวนหัวเดียว พบว่าค่าการลดลงต่ำกว่าเงื่อนไขอื่น โดยมีค่าเพียง 2 log reduction ($\approx 99\%$) สะท้อนให้เห็นถึงความเป็นไปได้ว่าการป้อนอากาศมากเกินไปอาจส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของพลาสมา และลดประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานลงในน้ำ (Ma et al., 2017) อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มจำนวนหัวเป็นสองหัวที่อัตราการไหลเดียวกัน ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อกลับเพิ่มขึ้นชัดเจน แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการปรับสมดุลระหว่างอัตราการไหลของอากาศและจำนวนหัว และเมื่อเปรียบเทียบผลปริมาณการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์แบบ Total Plate Count (TPC) ได้จากการจุ่มล้างด้วยน้ำประปาและผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบรอบเดียวและแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge แสดงดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ผลปริมาณการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์แบบ Total Plate Count (TPC) ได้จากการจุ่มล้างด้วยน้ำประปาและผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบรอบเดียวและแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge

เงื่อนไขของเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมา	% reduction (Mean \pm SD)
รอบเดียว	47.84–68.31
หมุนวนร่วมกับ Corona Discharge	99.07–99.99

จากตารางที่ 4.12 พบว่า การล้างผักสดกรีนโอ๊คด้วยน้ำกระตุ้นพลาสมาให้ผลการลดจำนวนจุลินทรีย์แบบ Total Plate Count (TPC) แตกต่างกันอย่างชัดเจนในแต่ละเงื่อนไข โดยระบบกระตุ้นพลาสมาแบบรอบเดียว สามารถลดจำนวนจุลินทรีย์ได้เพียง 47.84–68.31% ขณะที่ระบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge ให้ค่าการลดลงสูงถึง 99.07–99.99% ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพของการกระตุ้นที่สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ การเพิ่มประสิทธิภาพในระบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge สืบเนื่องจากการสร้างและคงอยู่ของอนุมูลออกซิแดนซ์และไนโตรเจนชนิดต่าง ๆ

(Reactive Oxygen and Nitrogen Species: RONS) ที่มากกว่า เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2), ไนเตรต (NO_3^-), และไนไตรต์ (NO_2^-) ซึ่งสามารถทำลายผนังเซลล์และเยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์ผ่านกระบวนการออกซิเดชัน (oxidative stress) (Thirumdas et al., 2018; Pawtat et al., 2020) นอกจากนี้ กระบวนการ Corona Discharge ยังทำให้เกิดโอโซน (O_3), ไนตริกออกไซด์ (NO) และอนุมูลไฮดรอกซิล ($-OH$) ในปริมาณสูง ซึ่งมีพลังในการออกซิไดซ์สูงและสามารถซึมผ่านผิวผักได้ดี ส่งผลให้เกิดการยับยั้งจุลินทรีย์ได้ในระดับใกล้เคียงกับกระบวนการฆ่าเชื้อเชิงพาณิชย์ ขณะเดียวกัน การกระตุ้นร่วมกับการหมักเวินยังช่วยรักษาค่าความเข้มข้นของสารออกซิแดนซ์ให้คงที่ ส่งผลให้คุณสมบัติของน้ำกระตุ้นพลาสมามีเสถียรภาพมากขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ (Thirumdas et al., 2018) ผลการศึกษาที่สอดคล้องกับงานของ Schnabel et al. (2019) และ Patange et al. (2019) ที่รายงานว่า น้ำกระตุ้นพลาสมาสามารถลดปริมาณจุลินทรีย์ในผักสลัดได้มากกว่า 4 log reduction เมื่อใช้ภายใต้เงื่อนไขการดิสชาร์จแรงดันสูงและเวลาการสัมผัสมากกว่า 60 นาที ทั้งนี้ผลของการลดจุลินทรีย์ในระดับสูงกว่า 99% ที่พบในงานวิจัยนี้ถือว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสด (Food Safety Criteria, ISO 4833-1:2013) ซึ่งกำหนดให้ปริมาณจุลินทรีย์ที่ตรวจพบต้องลดลงอย่างน้อย 2–4 log เพื่อให้ถือว่ามีประสิทธิภาพในการยับยั้ง

4.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาต่อการงอกของเมล็ดถั่วเขียวพันธุ์ผิวมัน

การงอกของเมล็ดพืชถือเป็นขั้นตอนสำคัญในการเริ่มต้นการเพาะปลูก เนื่องจากเป็นปัจจัยกำหนดความสม่ำเสมอของการเจริญเติบโตและคุณภาพของผลผลิต โดยทั่วไปกระบวนการงอกขึ้นอยู่กับความสมบูรณ์ของเมล็ดและปัจจัยแวดล้อม เช่น ความชื้น ออกซิเจน อุณหภูมิ และความพร้อมของสารอาหาร ในการศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งเน้นการประเมินอิทธิพลของน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาจากเครื่องผลิตแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge ต่ออัตราการงอกของเมล็ดถั่วเขียวพันธุ์ผิวมัน (*Vigna radiata*) ซึ่งส่งผลต่ออัตราการงอกและความแข็งแรงของต้นกล้า สะท้อนผ่านค่าเปอร์เซ็นต์การงอก (GP), ดัชนีการงอก (GI), เวลาเฉลี่ยการงอก (MGT), อัตราการงอก (GR) และดัชนีความแข็งแรงของต้นกล้า (VI) แสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ผลการศึกษาการรอกของเมล็ดถั่วเขียวพันธุ์ผิวมัน

จำนวนหัว	อัตราการไหลของ อากาศ (L/min)	เวลา (นาที)	GP (%)	GI	MGT (วัน)	GR (วัน ⁻¹)	VI
1	0.78	60	100	25.00	1.00	1.00	700
1	0.78	90	100	25.00	1.00	1.00	600
1	1.02	60	100	25.00	1.00	1.00	1,000
1	1.02	90	100	25.00	1.00	1.00	1,250
1	1.26	60	100	25.00	1.00	1.00	600
1	1.26	90	100	25.00	1.00	1.00	600
2	0.78	60	100	25.00	1.00	1.00	950
2	0.78	90	100	25.00	1.00	1.00	150
2	1.02	60	100	25.00	1.00	1.00	1,150
2	1.02	90	100	25.00	1.00	1.00	200
2	1.26	60	100	25.00	1.00	1.00	1,000
2	1.26	90	100	25.00	1.00	1.00	650
Control (Tap water)			95	18.00	2.50	0.40	900

จากตารางที่ 4.13 ผลการทดลองการเพาะเมล็ดถั่วเขียวพันธุ์ผิวมันในสถานะที่ใช้ น้ำกระตุ่นพลาสมา พบว่าเมล็ดทุกเงื่อนไขสามารถงอกครบ 100% ภายในวันแรก แสดงว่าน้ำกระตุ่นด้วยพลาสมาไม่ได้ยับยั้งการเริ่มต้นกระบวนการงอก แต่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของต้นกล้าอย่างชัดเจน โดยดัชนีความแข็งแรง (VI) แสดงค่าที่แตกต่างกันระหว่างเงื่อนไข เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดคือ 1 หัว อัตราการไหลของอากาศ 1.02 L/min เวลา 90 นาที ซึ่งให้ค่า VI สูงสุด (1,250) สะท้อนว่าระดับของ Reactive Oxygen และ Nitrogen Species (RONS) ที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการกระตุ้นเมแทบอลิซึมที่เกี่ยวข้องกับการยึดตัวของรากและยอด ทำให้ต้นกล้าแข็งแรงและมีความยาวมากกว่าเงื่อนไขอื่น ขณะที่เงื่อนไขที่ใช้ 2 หัวร่วมกับเวลาในการกระตุ่นน้ำพลาสมานาน (90 นาที) กลับให้ค่า VI ต่ำสุดเพียง 150–200 และต้นกล้ามีความยาวเฉลี่ยเพียง 1.5–2.0 ซม. ซึ่งบ่งชี้ถึงผลกระทบจาก RONS ที่สะสมมากเกินไปจนก่อให้เกิดภาวะความเครียดออกซิเดชันและยับยั้งการเจริญเติบโต ปรัชญาการค้นคว้าวิจัยของ Sivachandiran และ Khacef (2017) ที่พบว่าความเข้มข้นของน้ำกระตุ่นพลาสมา มีผลสองทาง กล่าวคือ หากความเข้มข้นอยู่ในระดับเหมาะสมจะช่วยส่งเสริม

การรอกและการเจริญของพืช แต่หากเกินขีดจำกัดจะกลับส่งผลต่อการเจริญเติบโต นอกจากนี้ Guo et al. (2019) ยังชี้ว่าการสะสมของ ROS และ RNS ในระดับสูงสามารถทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างเซลล์และกระบวนการสังเคราะห์ชีวโมเลกุลของพืช ผลการศึกษานี้จึงยืนยันว่า การปรับสมดุลของจำนวนหัว อัตราการไหลของอากาศ และเวลาในการกระตุ้นน้ำพลาสมา เป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดประสิทธิภาพของน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาต่อการรอกและความแข็งแรงของต้นกล้า

4.4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) กับประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมา

การประเมินการใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นขั้นตอนสำคัญในการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมา เนื่องจากพลังงานที่จ่ายเข้าสู่ระบบจะเป็นตัวกำหนดทั้งต้นทุนการดำเนินงานและความคุ้มค่าในการประยุกต์ใช้งานจริง การวัดค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh) จึงกระทำโดยการอ่านค่าจากมิเตอร์ไฟฟ้าก่อนและหลังการเดินเครื่องในแต่ละเงื่อนไขทดลอง จากนั้นนำค่าความแตกต่างมาคำนวณเป็นปริมาณพลังงานที่ใช้ในรอบการทำงาน โดยปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้แสดงดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ของระบบผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาจากเครื่องแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge

จำนวนหัว	อัตราการไหลของอากาศ (L/min)	เวลา (นาที)	ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)
1	0.78	60	0.017 ± 0.0025 ^a
1	0.78	90	0.048 ± 0.0031 ^b
1	1.02	60	0.023 ± 0.0030 ^c
1	1.02	90	0.054 ± 0.0036 ^d
1	1.26	60	0.028 ± 0.0035 ^e
1	1.26	90	0.064 ± 0.0040 ^f
2	0.78	60	0.052 ± 0.0021 ^g
2	0.78	90	0.078 ± 0.0030 ^h
2	1.02	60	0.058 ± 0.003 ⁱ

ตารางที่ 4.14 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ของระบบผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาจากเครื่องแบบหมุนวน ร่วมกับ Corona Discharge (ต่อ)

จำนวนหัว	อัตราการไหลของอากาศ (L/min)	เวลา (นาที)	ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)
2	1.02	90	0.084 ± 0.003 ^j
2	1.26	60	0.065 ± 0.004 ^k
2	1.26	90	0.086 ± 0.004 ^l

หมายเหตุ: ค่าแสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n = 3)

ตัวอักษรยกกำลังที่แตกต่างกันภายในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $p < 0.05$ (Tukey HSD test)

จากตารางที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ค่าใช้พลังงานไฟฟ้าภายใต้ 12 เงื่อนไข พบว่าค่าเฉลี่ยของการใช้ไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.017–0.086 (kWh) โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ค่อนข้างต่ำ ประมาณ 0.0021–0.004 แสดงถึงความสม่ำเสมอของข้อมูลการทำซ้ำทั้ง 3 ซ้ำในแต่ละเงื่อนไข ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่ได้สามารถอธิบายได้จากอัตราการไหลของอากาศ จำนวนหัวพลาสมา และระยะเวลาในการกระตุ้น และเมื่อคำนวณค่าการใช้พลังงานจำเพาะต่อหน่วยการผลิต (Specific Energy Consumption for production, SEC_{prod}) แสดงดังตารางที่ 4.15 ซึ่งในการทดสอบนี้ให้ปริมาตรน้ำกระตุ้นพลาสมา 500 มิลลิลิตร

ตารางที่ 4.15 ค่าพลังงานจำเพาะต่อหน่วยการผลิต (SEC_{prod}) จากเครื่องแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge

จำนวนหัว	อัตราการไหลของอากาศ (L/min)	เวลา (นาที)	SEC_{prod} (kWh/L)
1	0.78	60	0.035 ± 0.005 ^a
1	0.78	90	0.095 ± 0.006 ^b
1	1.02	60	0.046 ± 0.006 ^{ab}
1	1.02	90	0.108 ± 0.007 ^b
1	1.26	60	0.057 ± 0.007 ^b
1	1.26	90	0.127 ± 0.008 ^c
2	0.78	60	0.105 ± 0.004 ^b
2	0.78	90	0.156 ± 0.006 ^c

ตารางที่ 4.15 ค่าพลังงานจำเพาะต่อหน่วยการผลิต (SEC_{prod}) จากเครื่องแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge (ต่อ)

จำนวนหัว	อัตราการไหลของอากาศ (L/min)	เวลา (นาที)	SEC_{prod} (kWh/L)
2	1.02	60	0.116 ± 0.006^c
2	1.02	90	0.169 ± 0.006^c
2	1.26	60	0.129 ± 0.008^c
2	1.26	90	0.173 ± 0.008^c

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่มีตัวอักษรเหมือนกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p >$

0.05) ตามการทดสอบ Tukey HSD

จากตารางที่ 4.15 แสดงค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (SEC_{prod}) ของระบบผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมา พบว่าค่า SEC_{prod} มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ภายใต้เงื่อนไขจำนวนหัว อัตราการไหลของอากาศ และเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น โดยแนวโน้มทั่วไปแสดงให้เห็นว่าค่า SEC_{prod} เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มจำนวนหัวพลาสมา ระยะเวลาในการกระตุ้น และอัตราการไหลของอากาศ ตัวอย่างเช่น การใช้หัวพลาสมา 2 หัว ที่อัตราการไหลของอากาศ 1.26 L/min เป็นเวลา 90 นาที ให้ค่า SEC_{prod} สูงสุด (0.173 ± 0.004 kWh/L) ขณะที่เงื่อนไขที่ใช้หัวเดียว อัตราการไหลของอากาศต่ำ (0.78 L/min) และเวลาสั้น (60 นาที) ให้ค่า SEC_{prod} ต่ำสุด (0.035 ± 0.003 kWh/L) สาเหตุที่ค่า SEC_{prod} เพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้หัวพลาสมามากขึ้นและเวลาที่นานขึ้น เป็นผลมาจากปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างพลาสมาเพิ่มขึ้น โดยไม่สัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับปริมาตรน้ำที่ผลิต เนื่องจากมีการสูญเสียพลังงานบางส่วนในกระบวนการ เช่น การระเหยและความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Thirumdas et al. (2018) ที่ระบุว่าค่า SEC_{prod} ของการผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมามีความแปรผันตามอัตราการไหลของอากาศและจำนวนหัวกระตุ้นพลาสมา นอกจากนี้ Wong et al. (2023) ยังชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มจำนวนหัวพลาสมาและเวลาการกระตุ้น แม้จะช่วยเพิ่มความเข้มข้นของสารออกฤทธิ์ (Reactive Species) ใน PAW แต่ก็ทำให้การใช้พลังงานต่อหน่วยปริมาตรน้ำสูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่มีลักษณะคล้ายกัน เช่น Ma et al. (2017) และ Dimitrakellis et al. (2021) พบว่าค่า SEC_{prod} ที่รายงานอยู่ในช่วง 0.05–0.15 kWh/L ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในงานวิจัยนี้ โดยเฉพาะในเงื่อนไขที่ใช้หัวเดียวและเวลาการกระตุ้น 60 นาที ซึ่งให้ค่า SEC_{prod} ที่ค่อนข้างต่ำ แสดงถึงประสิทธิภาพเชิงพลังงานที่ดีกว่า

จากผลการคำนวณค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption: SEC) ของระบบผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมา พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนหัวกำเนิดพลาสมา อัตราการไหลของอากาศ และระยะเวลาในการกระตุ้น ค่าพลังงานที่ใช้ต่อปริมาตรน้ำที่ผลิต (kWh/L) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.035–0.120 kWh/L ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มของการยับยั้งจุลินทรีย์ (Log reduction) และค่าดัชนีความแข็งแรงของต้นกล้า (Vigour Index: VI) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเงื่อนไขการทดลอง

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่าง SEC กับ Log reduction พบว่า แม้การเพิ่มจำนวนหัวและระยะเวลาจะช่วยให้ค่าการยับยั้งจุลินทรีย์สูงขึ้น (มากกว่า 4 log reduction ในบางเงื่อนไข) แต่ก็ต้องแลกกับค่า SEC ที่สูงขึ้นเช่นกัน ตัวอย่างเช่น เงื่อนไข 1 หัว, 0.78 L/min, 60 นาที มีค่า SEC ต่ำที่สุด (0.035 kWh/L) แต่ให้ค่า Log reduction ถึง 3.59 (99.97%) ซึ่งถือว่าเพียงพอในการลดปริมาณจุลินทรีย์ได้อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่เงื่อนไข 2 หัว, 1.02 L/min, 60 นาที สามารถให้ค่า Log reduction สูงกว่า 4 log (99.99%) แต่ค่า SEC เพิ่มขึ้นกว่า 3 เท่า แสดงถึงความจำเป็นในการพิจารณาความสมดุลระหว่างการใช้พลังงานกับประสิทธิภาพการยับยั้งจุลินทรีย์ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Ma et al. (2017) และ Dimitrakellis et al. (2021) ที่ระบุว่าระยะเวลาและจำนวนหัวพลาสมามีอิทธิพลอย่างมากต่อการสร้าง Reactive Oxygen and Nitrogen Species (RONS) และการยับยั้งจุลินทรีย์

ในด้านของ SEC กับ VI พบว่าค่า VI มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ RONS ที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้น แต่หากเงื่อนไขมีความเข้มข้นสูงเกินไปอาจก่อให้เกิดภาวะความเครียดออกซิเดชันจนทำให้ค่า VI ลดลง ตัวอย่างเช่น เงื่อนไข 1 หัว, 1.02 L/min, 60 นาที ให้ค่า SEC ปานกลาง (0.072 kWh/L) แต่ได้ค่า VI สูงถึง 1100 ซึ่งถือว่าเหมาะสมที่สุดในการส่งเสริมการงอกและการเจริญเติบโตของถั่วเขียว ขณะที่เงื่อนไข 1 หัว, 0.78 L/min, 60 นาที แม้จะมีค่า SEC ต่ำสุด แต่ค่า VI เพียง 700 แสดงให้เห็นว่าการประหยัดพลังงานไม่ได้สอดคล้องกับการส่งเสริมความแข็งแรงของต้นกล้าเสมอไป ผลลัพธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานของ Le et al. (2022) และ Zhang et al. (2013) ที่ยืนยันว่าปริมาณ RONS ที่เหมาะสมจะกระตุ้นเมแทบอลิซึมและการยึดตัวของรากและยอด แต่หากสูงเกินไปจะยับยั้งการเจริญของพืช

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมา ตลอดจนประเมินสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำ รวมถึงการประยุกต์ใช้น้ำกระตุ้นพลาสมา (Plasma-Activated Water: PAW) ในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์บนผักสลัดกรีนโอ๊ค และศึกษาผลต่อการงอกของเมล็ดถั่วเขียวพันธุ์ผิวมัน โดยสรุปผลได้ดังนี้

5.1 การออกแบบและพัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาและผลของการปรับปรุงสมบัติน้ำ

เครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นสามารถสร้างน้ำกระตุ้นพลาสมาที่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมีอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าค่า pH ลดลง ค่าการนำไฟฟ้า (EC) และศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน (ORP) เพิ่มขึ้นตามจำนวนหัว อัตราการไหลของอากาศ และเวลาที่ใช้กระตุ้น ขณะที่ปริมาณไนเตรต (NO_3^-), ไนไตรต์ (NO_2^-) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มจำนวนหัวและเวลาการกระตุ้น ส่งผลให้ PAW มีศักยภาพสูงขึ้นในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกี่ยวข้องกับการยับยั้งจุลินทรีย์

5.2 ประสิทธิภาพของน้ำกระตุ้นพลาสมาในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ในผักสลัดกรีนโอ๊ค

การจุ่มล้างผักสลัดกรีนโอ๊คด้วย PAW ทำให้ปริมาณจุลินทรีย์รวม (TPC) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการล้างด้วยน้ำประปา โดยพบว่าการเพิ่มระยะเวลาจุ่มล้างจาก 5 เป็น 10 นาทีช่วยเพิ่มการยับยั้งได้อย่างชัดเจน (มากกว่า 60% reduction หรือราว 0.43 log CFU/ml) แต่เมื่อเพิ่มเป็น 15 นาทีไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจาก 10 นาที ขณะที่การใช้น้ำจากเครื่องต้นแบบแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge สามารถลดจุลินทรีย์ได้สูงกว่า 4 log reduction ($\geq 99.99\%$) ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมโดยเฉพาะเมื่อใช้จำนวนหัว 2 หัว อัตราการไหลของอากาศ 0.78–1.02 L/min และเวลา 90 นาที

5.3 ผลของน้ำกระตุ้นพลาสมาต่อการงอกและความแข็งแรงของเมล็ดถั่วเขียวพันธุ์ผิวมัน

ผลการทดลองพบว่าเมล็ดถั่วเขียวทุกเงื่อนไขที่ใช้น้ำกระตุ้นพลาสมาสามารถงอกได้ 100% ภายในวันแรก แตกต่างจากกลุ่มควบคุม (น้ำประปา) ที่มีเปอร์เซ็นต์การงอกเพียง 95% และใช้เวลางอกเฉลี่ยนานกว่า ขณะเดียวกันค่าดัชนีความแข็งแรงของต้นกล้า (VI) มีความแตกต่างตามเงื่อนไข โดยเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดคือการใช้น้ำจากเครื่องที่มี 1 หัว อัตราการไหลของอากาศ 1.02 L/min และเวลา 90 นาที ซึ่งให้ค่า VI สูงสุด (1,250) ในขณะที่การใช้จำนวนหัว 2 หัวร่วมกับเวลานาน 90 นาทีให้ค่า VI ต่ำสุด สะท้อนว่าความเข้มข้นของอนุภาคออกฤทธิ์ (RONS) ที่สูงเกินไปอาจยับยั้งการเจริญของต้นกล้าได้

5.4 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการใช้พลังงานจำเพาะกับประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมา

การเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การใช้งาน หากเน้นด้านความปลอดภัยของอาหาร การเลือกเงื่อนไข 1 หัว อัตราการไหลของอากาศ 0.78 L/min เวลากระตุ้น 60 นาที มีค่า SEC ต่ำที่สุด (0.035 kWh/L) แต่ให้ค่า Log reduction ถึง 3.59 (99.97%) ซึ่งถือว่าเพียงพอในการลดปริมาณจุลินทรีย์ได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่หากเน้นด้านการส่งเสริมการงอกและความแข็งแรงของต้นกล้า เงื่อนไข 1 หัว อัตราการไหลของอากาศ 1.02 L/min เวลากระตุ้น 60 นาที จะเป็นทางเลือกที่คุ้มค่ามากกว่า เนื่องจากให้ค่า VI สูงพร้อมกับใช้พลังงานในระดับปานกลาง

5.5 ข้อเสนอแนะเชิงปฏิบัติ (Recommendation)

จากผลการศึกษารั้วนี้แสดงให้เห็นว่าน้ำกระตุ้นพลาสมาที่ผลิตจากเครื่องต้นแบบสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงทั้งในด้านความปลอดภัยอาหารและการเพิ่มศักยภาพการงอกของเมล็ดพืช ดังนั้นจึงมีข้อเสนอแนะดังนี้

5.4.1 การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผักสด

น้ำกระตุ้นพลาสมาสามารถใช้แทนน้ำประปาหรือสารเคมีฆ่าเชื้อบางชนิดในการล้างผักสดเพื่อยืดอายุการเก็บรักษา ลดปริมาณจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดการเน่าเสีย และเพิ่มความปลอดภัยต่อผู้บริโภค โดยเฉพาะผักสลัดที่บริโภคสด การใช้น้ำกระตุ้นพลาสมาภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมอาจช่วยลดการพึ่งพาสารเคมีและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

5.4.2 การประยุกต์ใช้ในภาคการเกษตร

การใช้น้ำกระตุ้นพลาสมาในการเพาะเมล็ดสามารถช่วยเพิ่มอัตราการงอกและความแข็งแรงของต้นกล้า ซึ่งเหมาะสมต่อการผลิตกล้าในเชิงการค้า โดยเฉพาะพืชผักอายุสั้น เช่น ถั่วเขียว ถั่วงอก หรือผักสลัด ทั้งนี้ควรเลือกใช้เงื่อนไขการผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาที่ไม่ก่อให้เกิด RONS ในระดับสูงเกินไป เพื่อลดความเสี่ยงจากการเกิด oxidative stress ต่อเมล็ดพืชและควรศึกษาผลของน้ำกระตุ้นพลาสมาต่อเมล็ดพืชอายุยาวเพิ่มเติม ทั้งนี้เนื่องจากในงานวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะผลของน้ำกระตุ้นพลาสมาต่อเมล็ดพืชอายุสั้น

5.4.3 การพัฒนาและปรับปรุงเครื่องต้นแบบ

เครื่องต้นแบบควรได้รับการปรับปรุงให้มีขนาดและกำลังการผลิตที่มากขึ้นเพื่อรองรับการใช้งานในระดับกึ่งอุตสาหกรรมและอุตสาหกรรมจริง เช่นการใช้วงจรสร้างแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่มากกว่า 8 kV พร้อมทั้งมีระบบควบคุมอัตโนมัติที่สามารถปรับจำนวนหัว อัตราการไหลของอากาศ และเวลากระตุ้นน้ำพลาสมาได้อย่างแม่นยำ และเพื่อให้ได้ค่าระยะเวลาการกระตุ้นน้ำพลาสมาที่เหมาะสม ควรดำเนินการศึกษาเพิ่มเติมในช่วงเวลาการกระตุ้นที่หลากหลายมากขึ้น เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเฉพาะที่ระยะเวลา 60 และ 90 นาทีเท่านั้น



รายการอ้างอิง

รายการอ้างอิง

- 3M Food Safety. (2018). 3M™ Petrifilm™ Aerobic Count Plate Interpretation Guide. 3M Company.
- AOAC. (2000). Official Methods of Analysis of AOAC International, 17th Edition. Gaithersburg, MD: AOAC International.
- Bohm, D., & Pines, D. (1951). A collective description of electron interactions: I. Magnetic interactions. *Physical Review*, 82(5), 625–634.
- Bohm, D., & Pines, D. (1952). A collective description of electron interactions: II. Collective vs individual particle aspects of the interactions. *Physical Review*, 85(2), 338–353.
- Bohm, D., & Pines, D. (1953). A collective description of electron interactions: III. Coulomb interactions in a degenerate electron gas. *Physical Review*, 92(3), 609–625.
- Brackett, R. E., Beuchat, L. R., & Doyle, M. P. (2001). Inactivation of *Salmonella* and *Escherichia coli* O157:H7 on lettuce and poultry skin by irradiation. *Journal of Food Protection*, 64(11), 1702–1708.
- Brisset, J. L., & Pestourie, N. (2021). Formation and evolution of reactive species in plasma-activated water: Influence of discharge and processing parameters. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 41, 135–156.
- Boulos, M. I., Fauchais, P. L., & Pfender, E. (Eds.). (2023). Handbook of thermal plasmas.
- Caicedo-Solano NE, García-Llinás GA and Montoya-Torres JR, (2020). Towards the integration of lean principles and optimization for agricultural production systems: a conceptual review proposition. *J Sci Food Agric* 100:453–464.
- Dimitrakellis, P., Giannoglou, M., Xanthou, Z. M., Gogolides, E., Taoukis, P., & Katsaros, G. (2021). Application of plasma-activated water as an antimicrobial washing agent of fresh leafy produce. *Plasma Processes and Polymers*, 18(12), 2100030.

- Fröhling, A., Ehlbeck, J., & Schlüter, O. (2018). Impact of a pilot-scale plasma-assisted washing process on the culturable microbial community dynamics related to fresh-cut endive lettuce. *Applied Sciences*, 8(11), 2225.
- Gil, M. I., Selma, M. V., López-Gálvez, F., & Allende, A. (2009). Fresh-cut product sanitation and wash water disinfection: problems and solutions. *International journal of food microbiology*, 134(1-2), 37-45.
- Gode, C. S., & Ganar, A. N. (2014). Image retrieval by using colour, texture and shape features. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 3(4), 8552-8559.
- Guo, L., Xu, R., Gou, L., Liu, Z., Zhao, Y., & Liu, D. (2019). Mechanism of microbial inactivation by cold atmospheric plasma and plasma-activated water. *Applied Sciences*, 9(19), 4227. <https://doi.org/10.3390/app9194227>
- Jackson, G. J., Madden, J. M., Hill, W. E., & Klontz, K. C. (1995). Investigation of food implicated in illness. In: *Bacteriological Analytical Manual*. [online]. [cited 2024 Aug. 3]; Available from:
URL:<http://www.fda.gov/food/laboratory-methods-food/bacteriological-analytical-manual-bam>
- Joshi, S. G., Cooper, M., Yost, A., Paff, M., Ercan, U. K., Fridman, G., Friedman, G., & Fridman, A. (2018). Nonthermal dielectric-barrier discharge plasma-induced inactivation involves oxidative DNA damage and membrane lipid peroxidation in *Escherichia coli*. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 55(3), 1053–1062. <https://doi.org/10.1128/AAC.01002-10>
- Khan, M. S. I., & Kim, Y. J. (2019). Inactivation mechanism of *Salmonella Typhimurium* on the surface of lettuce and physicochemical quality assessment of samples treated by micro-plasma discharged water. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 52, 17-24.
- Le, T. Q. X., Nguyen, L. N., Nguyen, T. T., Choi, E. H., Nguyen, Q. L., Kaushik, N. K., & Dao, N. T. (2022). Effects of cold plasma treatment on physical modification and

- endogenous hormone regulation in enhancing seed germination and radicle growth of mung bean. *Applied Sciences*, 12(20), 10308.
- Liao, X., Su, Y., Liu, D., Chen, S., Hu, Y., Ye, X., ... & Ding, T. (2018). Application of atmospheric cold plasma-activated water (PAW) ice for preservation of shrimps (*Metapenaeus ensis*). *Food Control*, 94, 307-314.
- Ma, R., Wang, G., Tian, Y., Wang, K., Zhang, J., & Fang, J. (2017). Non-thermal plasma-activated water inactivation of food-borne pathogen on fresh produce. *Journal of Hazardous Materials*, 300, 643–651.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.07.061>
- Neogen Corporation. (2024). Petrifilm Aerobic Count (AC) plates. Retrieved from <https://www.neogen.com>
- Patange, A., Lu, P., Boehm, D., Cullen, P. J., & Bourke, P. (2019). Efficacy of cold plasma functionalised water for improving microbiological safety of fresh produce and wash water recycling. *Food Microbiology*, 84, 103226.
- Pawłat, J., Starek, A., Kwiatkowski, M., Terebun, P., & Budzen, M. (2020). Influence of discharge plasma reactor design on reactive species generation in plasma activated water (PAW). *Materials*, 13(17), 3937.
- Rastogi, G., Sbodio, A., Tech, J. J., Suslow, T. V., Coaker, G. L., & Leveau, J. H. (2012). Leaf microbiota in an agroecosystem: spatiotemporal variation in bacterial community composition on field-grown lettuce. *The ISME journal*, 6(10), 1812-1822.
- Rouphael, Y., & Colla, G. (2005). Growth, yield, fruit quality and nutrient uptake of hydroponically cultivated zucchini squash as affected by irrigation systems and growing seasons. *Scientia Horticulturae*, 105(2), 177-195.
- Salfinger, Y., & Tortorello, M. L. (Eds.). (2015). *Compendium of methods for the microbiological examination of foods*. American Public Health Association.
- Schnabel, U., Andrasch, M., Stachowiak, J., Weit, C., Weihe, T., Schmidt, C., ... & Ehlbeck, J. (2019). Sanitation of fresh-cut endive lettuce by plasma processed tap water (PPtW)–Up-scaling to industrial level. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 53, 45-55.

- Thirumdas, R., Kothakota, A., Annapure, U. S., Siliveru, K., Blundell, R., Gatt, R., & Valdramidis, V. P. (2018). Plasma activated water (PAW): Chemistry, physico-chemical properties, applications in food and agriculture. *Trends in Food Science & Technology*, 77, 21–31. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.04.012>
- Vyas, H. K., Xia, B., Alam, D., Gracie, N. P., Rothwell, J. G., Rice, S. A., ... & Mai-Prochnow, A. (2023). Plasma activated water as a pre-treatment strategy in the context of biofilm-infected chronic wounds. *Biofilm*, 6, 100154.
- Wong, K. S., Chew, N. S., Low, M., & Tan, M. K. (2023). Plasma-activated water: Physicochemical properties, generation technique, and applications. *Processes*, 11(7), 2213
- Yong, H. I., Park, J., Kim, H. J., Jung, S., Park, S., Lee, H. J., ... & Jo, C. (2018). An innovative curing process with plasma-treated water for production of loin ham and for its quality and safety. *Plasma Processes and Polymers*, 15(2), 1700050.
- Zhang, Q., Liang, Y., Feng, H., Ma, R., Tian, Y., Zhang, J., & Fang, J. (2013). A study of oxidative stress induced by plasma-activated water in *E. coli*. *Applied Physics Letters*, 102, 203701. <https://doi.org/10.1063/1.4807133>
- คัดคณัฐ ชื่นวงศ์อรุณ. (2562). สสารและการเปลี่ยนแปลงสถานะ (States of Matter). สืบค้นจาก <http://ngthai.com/science/25394/states-matter/>
- เครือวัลย์ พรหมลักษณ์. (2556). พลาสมาพลังต่อสู้เชื้อโรคในอาหาร. สืบค้นจาก: <http://fic.nfi.or.th/images/stories/document/IN-18-06-56.pdf>.
- ณัฐธิดา ปัญญามากไพบุลย์, พันธุ์จิตต์ สีเหนียง. พฤติกรรมการบริโภคและการตัดสินใจเลือกซื้อผักสดของผู้บริโภคในสถานประกอบการ PB Valley KaoYai Winery อำเภอปากช่องจังหวัดนครราชสีมา. (2561) *วิทยาศาสตร์เกษตรและการจัดการ*. 1(1), 37-46
- ธีรวรรณ บุญญวรรณ. (2563). ฟิสิกส์ของพลาสมา. (พิมพ์ครั้งที่ 3). ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์: Science CMU Printing Service.
- ธีรวรรณ บุญญวรรณ. (2564). น้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา : วิธีผลิตและการนำไปใช้งานในภาคเกษตรกรรม. เชียงใหม่: ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์.
- นารีรัตน์ อนรรฆเมธี. (2554). Plasma beam อาวุธลับสำหรับยืดอายุอาหาร. สืบค้นจาก: http://fic.nfi.or.th/images/stories/document/innovation_4778.pdf.

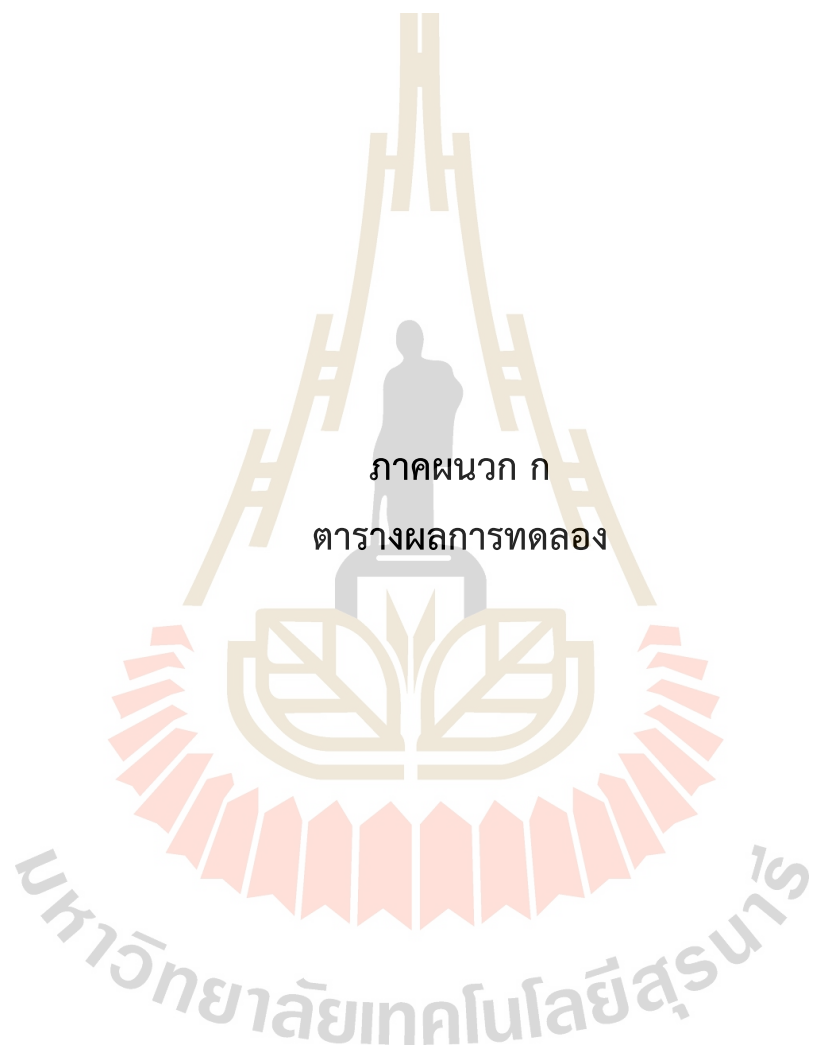
- บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง. (2564). ฟิสิกส์ของพลาสมาและโกลด์สซาร์จ. (พิมพ์ครั้งที่ 1). ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปิยรัตน์ เขียวมีสุขและคณะ. (2542). แผลงศัตรูผัก. เอกสารวิชาการ กองกัญและสัตววิทยา กรมวิชาการเกษตร.
- ปรีชา จึงสมานกุล, นวรัตน์ รัตนดิถก ณ ภูเก็ต และกมลวรรณ กันแดง. (2553). การปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในผักสด. กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์, 52(1-2), 30-39
- วรรณวรงค์ พัฒนะโพธิ์และ ธนะชัย พันธุ์เกษมสุข. (2562). ผลของสารละลายพลาสมาต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวลำไยพันธุ์ดอ. ใน การประชุมวิชาการพืชสวนแห่งชาติ ครั้งที่ 18. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- วุฒิชัย แสงวัง. (2565). พลาสมาแบบอนุหุมิต่ำที่สภาวะบรรยากาศเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำ (ปริญญาานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- ไว อินตะแก้ว. (2536). ผลกระทบจากการใช้สารฆ่าแมลงของเกษตรกรผู้ปลูกผักคะน้า : กรณีศึกษาการยอมรับในสิ่งไม่ควรยอมรับ (ปริญญาานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต). เชียงใหม่: สถาบันเทคโนโลยีการเกษตรแม่โจ้.
- ศักดิ์นันท์ แรมจันทิก. (2565). การออกแบบข้าวอิเล็กทรอนิกส์สำหรับกำเนิดพลาสมาเพื่อกำจัดเชื้อแบคทีเรียในน้ำในการเพาะเลี้ยงลูกปลานิล (ปริญญาานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต). นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- สุภาพร ราชชา, ศิราธิญากร จันทร์ขศิริพร. (2560). ผลของน้ำหมักชีวภาพจากเศษปลาและผักที่มีต่อการเจริญเติบโตและลักษณะทางสรีระวิทยาของผักกาดหอมพันธุ์ไอ้คี่ที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิคส์. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 22:216-224
- สำนักงานพาณิชย์จังหวัดชัยนาท. (2567). สถิติการส่งออกสินค้าเกษตรและสินค้าอุตสาหกรรมเกษตรของไทย ปี 2566, สืบค้นจาก <http://chainat.moc.go.th/th/content/category/detail/id/112/iid/36030>
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2567). ตารางปริมาณและมูลค่าการนำเข้าวัตถุดิบที่สำคัญทางการเกษตร ปี 2562-2566, สืบค้นจาก <http://oae.go.th/view/1/ปัจจัยการผลิต/TH-TH#>
- อดิศร เสวตวัฒน์, ปรีชา จึงสมานกุล. (2538). ซาลโมเนลลาและลิสทีเรียในผักสด. กองวิเคราะห์อาหาร กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์, 25(3), 185-189.

ภาวนาภู บุณนาค, ชวรัตน์ ทับทิมไทย, สุวณี กิตติลาภา นนท์ และคณะ. (2550) งานบริการวิเคราะห์
สินค้าเกษตรร้านพืชเพื่อการส่งออก. สืบค้นจาก:

URL: <http://it.dao.go.th/re/5/show.php?record>

อัจฉราภรณ์ บุญมา. (2556). อิทธิพลของพลาสมาจากก๊าซต่อการตัดแปรคุณสมบัติพื้นผิวของฟิล์ม
พอลิแลคติกแอซิด (ปริญญาานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต). นครราชสีมา: มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีสุรนารี





ภาคผนวก ก

อิทธิพลของการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยเทคนิคกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมาจากเครื่องต้นแบบรอบ
เดียวของผักสลัดกรีนโอ๊คที่ปลูกแบบบนดิน (N) และปลูกแบบไฮโดรโปนิคส์ (H)

ตารางที่ ก.1 ผลการตรวจสอบค่า pH

ตัวอย่าง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
NC	7.17	7.04	7.18
N10	6.91	6.84	6.92
N15	6.81	6.85	6.89
N20	6.93	6.84	6.96
HC	7.08	7.05	7.13
H10	6.87	6.92	6.88
H15	6.91	6.88	6.83
H20	6.93	6.85	6.89

ตารางที่ ก.2 การเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ แบบ Total Plate Count (TPC)

ตัวอย่าง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
NC	1520000	1530000	1540000
N5	920000	730000	780000
N10	510000	670000	540000
N15	460000	600000	440000
HC	1760000	1770000	1780000
H5	950000	850000	950000
H10	570000	720000	670000
H15	640000	530000	550000

อิทธิพลของการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยเทคนิคกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมาจากเครื่องต้นแบบผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาหมุนวนกับชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบ Corona Discharge

ตารางที่ ก.3 ผลการตรวจสอบค่า pH

จำนวนหัว	อัตราการไหล		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
	ของอากาศ (L/min)	เวลา (min)			
1	0.78	60	5.02	5	4.97
1	0.78	90	3.97	3.95	3.93
1	1.02	60	7.14	7.12	7.09
1	1.02	90	6.78	6.76	6.72
1	1.26	60	7.64	7.63	7.61
1	1.26	90	6.96	6.93	6.91
2	0.78	60	3.61	3.57	3.53
2	0.78	90	3.23	3.2	3.17
2	1.02	60	5.12	5.1	5.07
2	1.02	90	4.39	4.36	4.34
2	1.26	60	6.81	6.78	6.75
2	1.26	90	5.81	5.78	5.75

ตารางที่ ก.4 ผลการตรวจสอบค่า ORP (Oxidation-Reduction Potential)

จำนวนหัว	อัตราการไหล		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
	ของอากาศ (L/min)	เวลา (min)			
1	0.78	60	117	118.1	116.5
1	0.78	90	179.5	178.2	177.5
1	1.02	60	-8.2	-7.8	-7.6
1	1.02	90	13.1	12.8	11.3
1	1.26	60	-37.9	-37.2	-36.8
1	1.26	90	2.5	2.1	1.9

ตารางที่ ก.4 ผลการตรวจสอบค่า ORP (Oxidation-Reduction Potential, mV) (ต่อ)

จำนวนหัว	อัตราการไหล		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
	ของอากาศ (L/min)	เวลา (min)			
2	0.78	60	200.8	199.6	199.4
2	0.78	90	223.2	222.5	221.4
2	1.02	60	121.6	120.7	119.6
2	1.02	90	165.2	164.4	163.2
2	1.26	60	11.3	10.7	10.1
2	1.26	90	70.6	69.4	68.5

ตารางที่ ก.5 ผลการตรวจสอบค่า Conductivity (ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร)

จำนวนหัว	อัตราการไหลของ		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
	อากาศ (L/min)	เวลา (min)			
1	0.78	60	459	458.2	457.5
1	0.78	90	542.2	541.1	540.3
1	1.02	60	419	418.2	417.8
1	1.02	90	439.9	438.4	437.6
1	1.26	60	410.7	409.7	408.2
1	1.26	90	480.9	479.5	478.2
2	0.78	60	646.8	645.2	643.6
2	0.78	90	885.2	884.7	883.1
2	1.02	60	457.3	456.4	455.7
2	1.02	90	537	536.2	535.7
2	1.26	60	408	407.4	406.2
2	1.26	90	450.1	449.3	448.6

ตารางที่ ก.6 ผลการตรวจสอบค่า อุณหภูมิ (°C)

จำนวน หัว	อัตราการไหล		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
	ของอากาศ (L/min)	เวลา (min)			
1	0.78	60	37.2	37	36.8
1	0.78	90	38.6	38.2	37.8
1	1.02	60	37.4	37	36.8
1	1.02	90	38.6	38.2	38
1	1.26	60	35.8	35.5	35.1
1	1.26	90	36.2	36	35.4
2	0.78	60	38.7	38.2	37.9
2	0.78	90	38.9	38.5	38.1
2	1.02	60	38	37.2	37
2	1.02	90	38.5	38.1	37.7
2	1.26	60	39.3	38.7	38.2
2	1.26	90	39	38.6	38.1

ตารางที่ ก.7 ผลการตรวจวัดค่า NO_3^- , NO_2^- และ H_2O_2

A	B	C	NO_3^-	NO_2^-	H_2O_2
(หัว)	(L/min)	(min)	(รหัส [IQR]; ช่วงจริง)	(รหัส [IQR]; ช่วงจริง)	(รหัส [IQR]; ช่วงจริง)
1	0.78	60	6 [6-6] (250-500)	6 [6-6] (40-80)	3 [3-3] (3-10)
1	0.78	90	6 [6-6] (250-500)	6 [6-6] (40-80)	3 [3-3] (3-10)
1	1.02	60	5 [5-5] (100-250)	4 [4-4] (20-40)	3 [3-3] (3-10)
1	1.02	90	6 [6-6] (250-500)	5 [5-5] (20-40)	3 [3-3] (3-10)
1	1.26	60	6 [6-6] (250-500)	5 [5-5] (20-40)	3 [3-3] (3-10)
1	1.26	90	6 [6-6] (250-500)	5 [5-5] (20-40)	3 [3-3] (3-10)

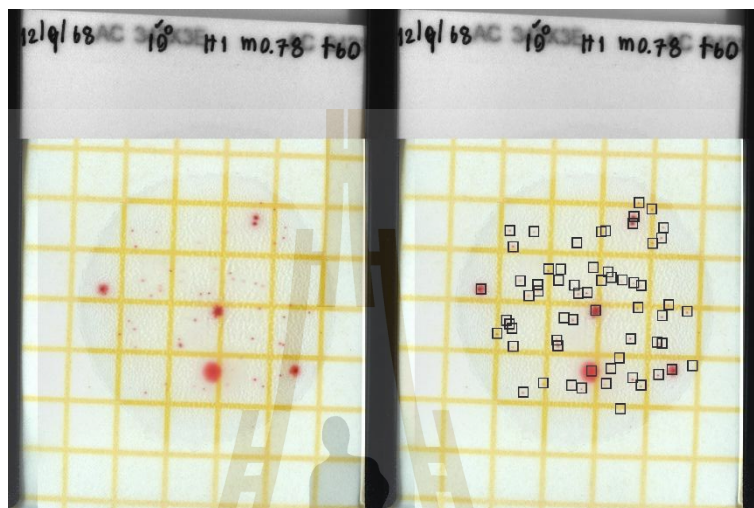
ตารางที่ ก.8 ผลการตรวจวัดค่า NO_3^- , NO_2^- และ H_2O_2 (ต่อ)

A	B	C	NO_3^-	NO_2^-	H_2O_2
(หัว)	(L/min)	(min)	(รหัส [IQR]; ช่วงจริง)	(รหัส [IQR]; ช่วงจริง)	(รหัส [IQR]; ช่วงจริง)
2	0.78	60	6 [6-6] (250-500)	6 [6-6] (40-80)	3 [3-3] (3-10)
2	0.78	90	6 [6-6] (250-500)	6 [6-6] (40-80)	3 [3-3] (3-10)
2	1.02	60	6 [6-6] (250-500)	6 [6-6] (40-80)	3 [3-3] (3-10)
2	1.02	90	6 [6-6] (250-500)	6 [6-6] (40-80)	3 [3-3] (3-10)
2	1.26	60	6 [6-6] (250-500)	6 [6-6] (40-80)	3 [3-3] (3-10)
2	1.26	90	6 [6-6] (250-500)	6 [6-6] (40-80)	3 [3-3] (3-10)

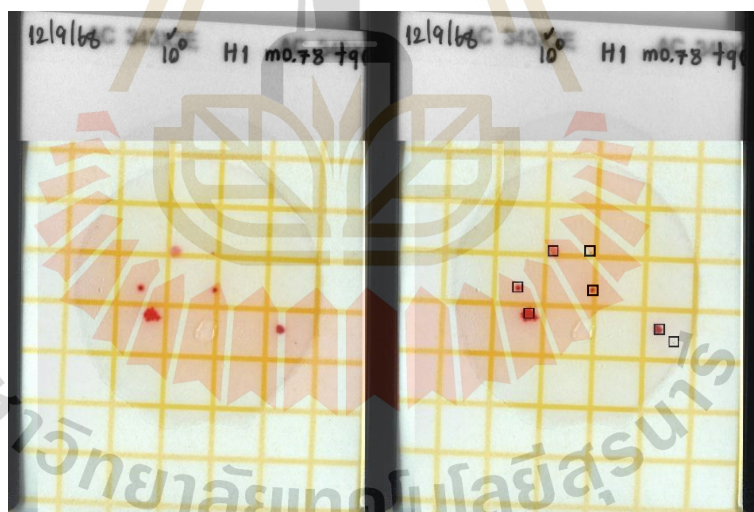
ตารางที่ ก.9 การเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ แบบ Total Plate Count (TPC)

จำนวนหัว	อัตราการไหล		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
	ของอากาศ (L/min)	เวลา (min)			
1	0.78	60	62	59	61
1	0.78	90	8	7	7
1	1.02	60	40	35	42
1	1.02	90	7	6	7
1	1.26	60	640	760	720
1	1.26	90	25	29	27
2	0.78	60	15	18	17
2	0.78	90	2	3	2
2	1.02	60	6	4	5
2	1.02	90	5	4	4
2	1.26	60	10	11	8
2	1.26	90	13	14	10
	Control		75000	76000	77000

รูปการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์หลังจุ่มล้างผักสลัดกรีนโอ๊ค แบบ Total Plate Count (TPC) และการแสดงผลการนับที่ได้จากชุดอ่านเชื้อจุลินทรีย์บนแผ่นกระดาษอัตโนมัติ ยี่ห้อ 3M Petrifilm รุ่น Petrifilm Plate Reader Advanced R3 แสดงดังรูปที่ ก.1 ถึง ก.7



(A)

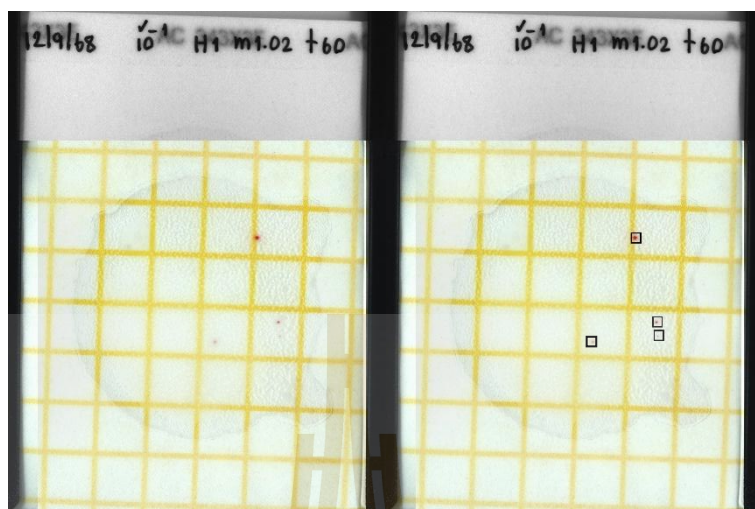


(B)

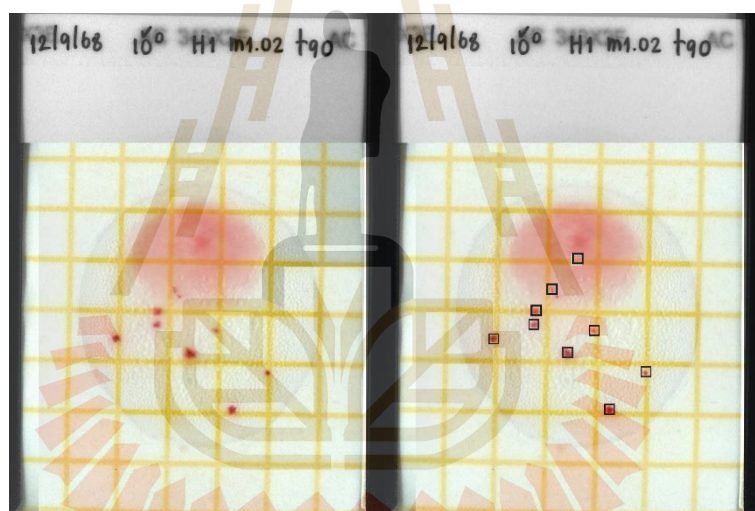
รูปที่ ก.1 การเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ แบบ Total Plate Count (TPC)

(A) น้ำกระดุนพลาสติกแฉีก 1 หัว อัตราการไหลของอากาศ 0.78 ลิตรต่อนาที เวลา กระดุน 60 นาที

(B) น้ำกระดุนพลาสติกแฉีก 1 หัว อัตราการไหลของอากาศ 0.78 ลิตรต่อนาที เวลา กระดุน 90 นาที



(A)

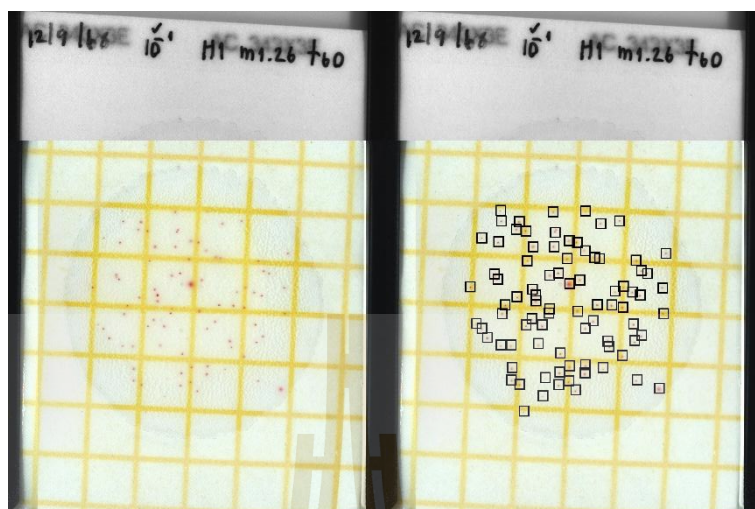


(B)

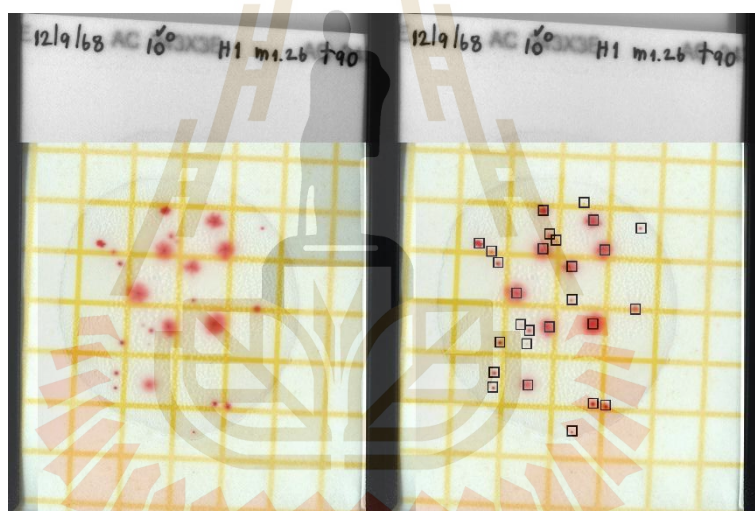
รูปที่ ก.2 การเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ แบบ Total Plate Count (TPC)

(A) น้ำกระตุ้นพลาสติกมาเงื่อนไซ 1 หัว อัตราการไหลของอากาศ 1.02 ลิตรต่อนาที เวลากระตุ้น 60 นาที

(B) น้ำกระตุ้นพลาสติกมาเงื่อนไซ 1 หัว อัตราการไหลของอากาศ 1.02 ลิตรต่อนาที เวลากระตุ้น 90 นาที



(A)

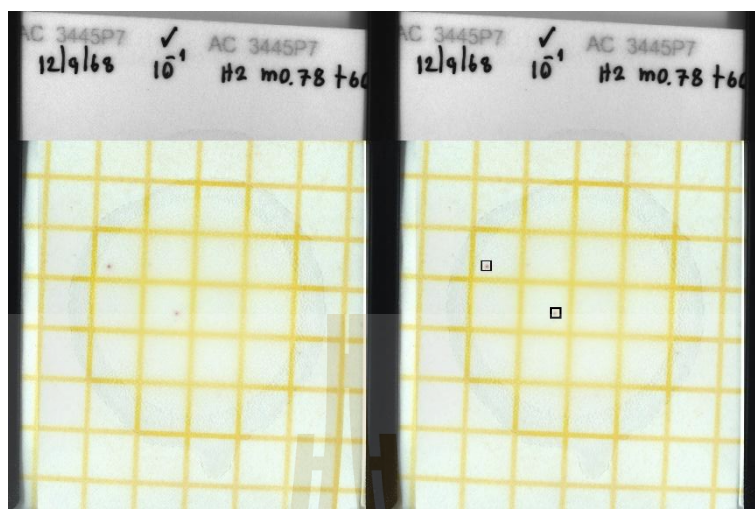


(B)

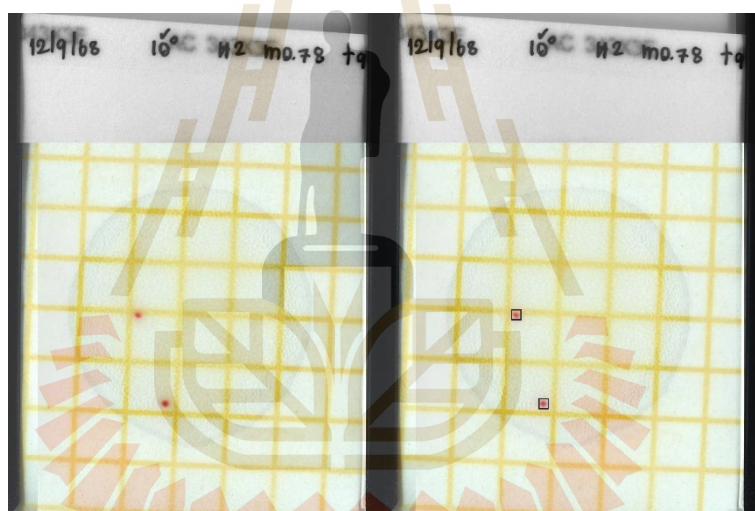
รูปที่ ก.3 การเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ แบบ Total Plate Count (TPC)

(A) น้ำกระตั้นพลาสติกมาเงื่อนไข 1 ชั่วโมง อัตราการไหลของอากาศ 1.26 ลิตรต่อนาที เวลา กระตั้น 60 นาที

(B) น้ำกระตั้นพลาสติกมาเงื่อนไข 1 ชั่วโมง อัตราการไหลของอากาศ 1.26 ลิตรต่อนาที เวลา กระตั้น 90 นาที



(A)

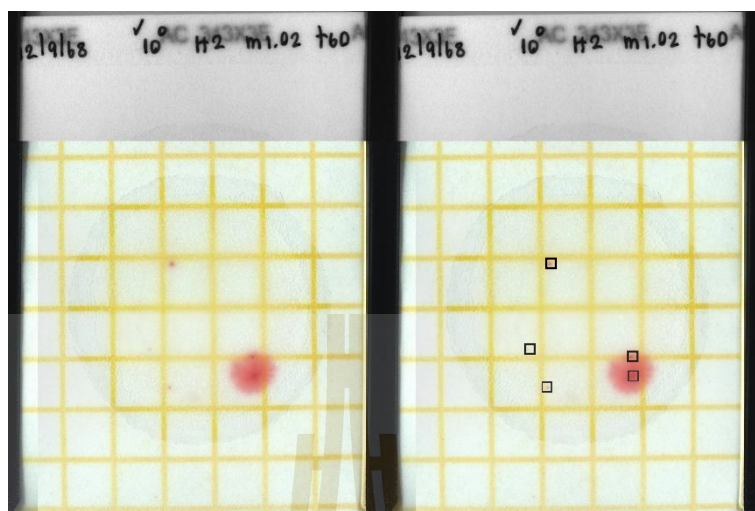


(B)

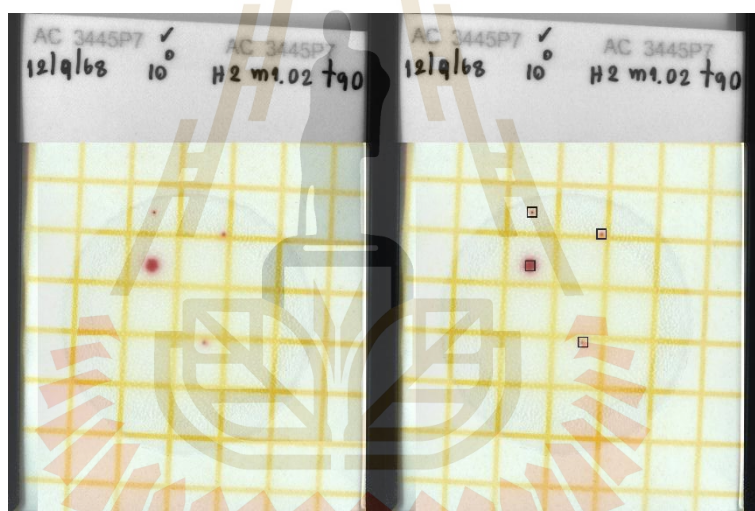
รูปที่ ก.4 การเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ แบบ Total Plate Count (TPC)

(A) น้ำกระตุ้นพลาสติกมาเงื่อนไซ 2 หัว อัตราการไหลของอากาศ 0.78 ลิตรต่อนาที เวลากระตุ้น 60 นาที

(B) น้ำกระตุ้นพลาสติกมาเงื่อนไซ 2 หัว อัตราการไหลของอากาศ 0.78 ลิตรต่อนาที เวลากระตุ้น 90 นาที



(A)

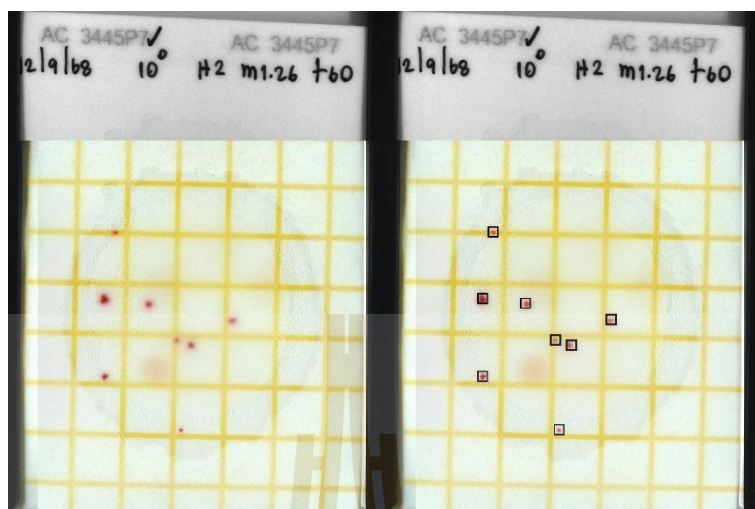


(B)

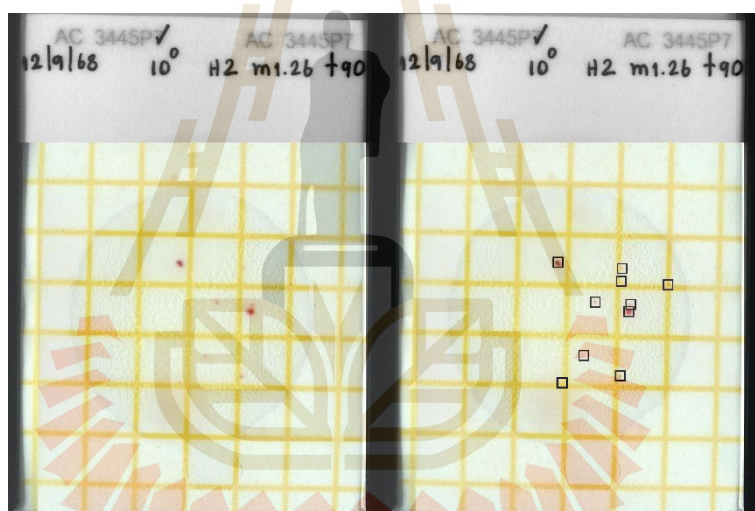
รูปที่ ก.5 การเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ แบบ Total Plate Count (TPC)

(A) น้ำกระตุ้นพลาสติกมาเงื่อนไข 2 ชั่วโมง อัตราการไหลของอากาศ 1.02 ลิตรต่อนาที เวลากระตุ้น 60 นาที

(B) น้ำกระตุ้นพลาสติกมาเงื่อนไข 2 ชั่วโมง อัตราการไหลของอากาศ 1.02 ลิตรต่อนาที เวลากระตุ้น 90 นาที



(A)

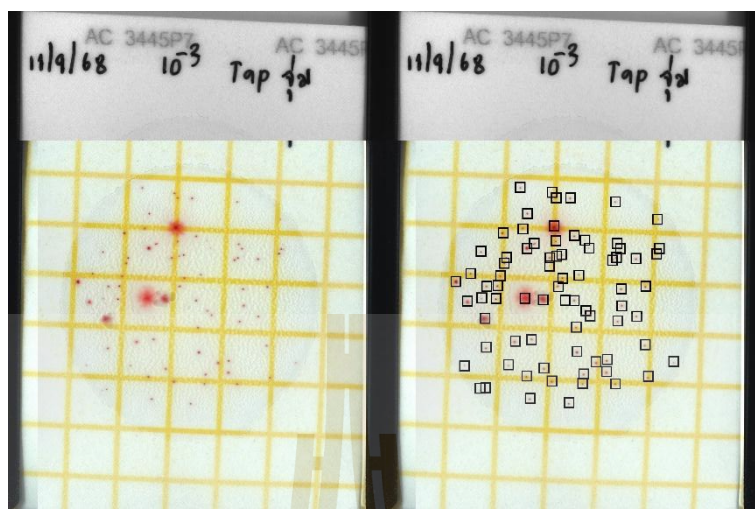


(B)

รูปที่ ก.6 การเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ แบบ Total Plate Count (TPC)

(A) น้ำกระดุนพลาสติกมาเงื่อนไข 2 ชั่วโมง อัตราการไหลของอากาศ 1.26 ลิตรต่อนาที เวลา กระดุน 60 นาที

(B) น้ำกระดุนพลาสติกมาเงื่อนไข 2 ชั่วโมง อัตราการไหลของอากาศ 1.26 ลิตรต่อนาที เวลา กระดุน 90 นาที



รูปที่ ก.7 การเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ แบบ Total Plate Count (TPC) เงื่อนไขจุ่มล้างด้วยน้ำประปา

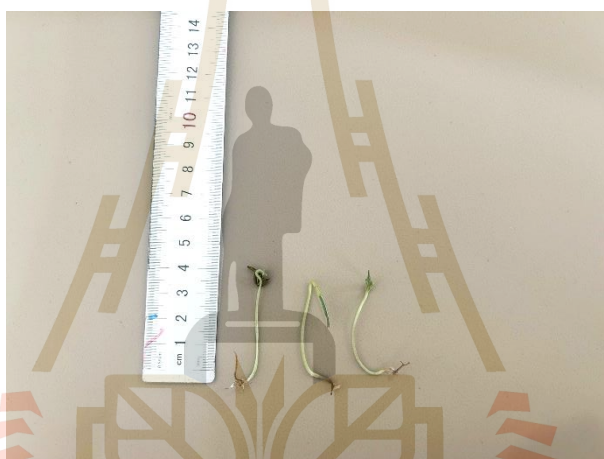
ตารางที่ ก.10 ความยาวต้นอ่อนและจำนวนเมล็ดถั่วเขียวที่งอกภายใต้เงื่อนไขการบำบัดด้วยน้ำ
กระตุ้นพลาสมาและน้ำประปา (Control)

เงื่อนไข	จำนวนหัว	อัตราการไหล ของอากาศ (L/min)	เวลา (นาที)	ความยาว ต้นอ่อน (cm)	การงอก วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3
PAW	1	0.78	60	7.0	25	0	0
PAW	1	0.78	90	6.0	25	0	0
PAW	1	1.02	60	10.0	25	0	0
PAW	1	1.02	90	12.5	25	0	0
PAW	1	1.26	60	6.0	25	0	0
PAW	1	1.26	90	6.0	25	0	0
PAW	2	0.78	60	9.5	25	0	0
PAW	2	0.78	90	1.5	25	0	0
PAW	2	1.02	60	11.5	25	0	0
PAW	2	1.02	90	2.0	25	0	0
PAW	2	1.26	60	10.0	25	0	0
PAW	2	1.26	90	6.5	25	0	0
Control (Tap water)				9	15	5	4

รูปความยาวต้นอ่อนของถั่วเขียวพันธุ์ผิวมันวันที่ 7 ที่งอกภายใต้เงื่อนไขการบำบัดด้วยน้ำ
กระตุ้นพลาสมา แสดงดังรูปที่ ก.8 ถึง ก.19



รูปที่ ก.8 เจริญไข 1 หัว อัตราการไหลของอากาศ 0.78 ลิตรต่อนาที เวลากระตุ้น 60 นาที



รูปที่ ก.9 เจริญไข 1 หัว อัตราการไหลของอากาศ 0.78 ลิตรต่อนาที เวลากระตุ้น 90 นาที



รูปที่ ก.10 เจริญไข 1 หัว อัตราการไหลของอากาศ 1.02 ลิตรต่อนาที เวลากระตุ้น 60 นาที



รูปที่ ก.11 เจริญไซ 1 หัว อัตราการไหลของอากาศ 1.02 ลิตรต่อนาที เวลากระตุ้น 90 นาที



รูปที่ ก.12 เจริญไซ 1 หัว อัตราการไหลของอากาศ 1.27 ลิตรต่อนาที เวลากระตุ้น 60 นาที



รูปที่ ก.13 เจริญไซ 1 หัว อัตราการไหลของอากาศ 1.27 ลิตรต่อนาที เวลากระตุ้น 90 นาที



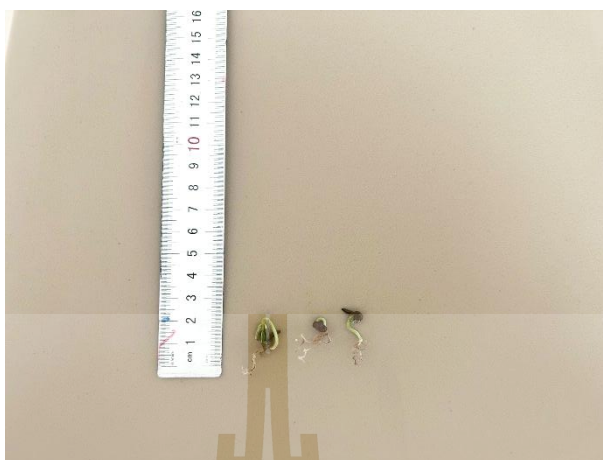
รูปที่ ก.14 เจริญไซ 2 หัว อัตราการไหลของอากาศ 0.78 ลิตรต่อนาที เวลากระตุ้น 60 นาที



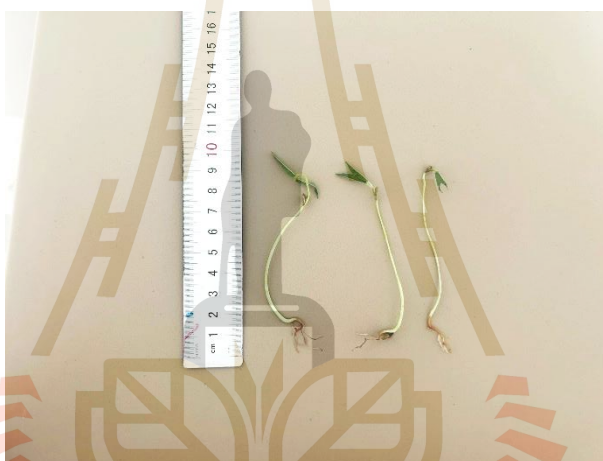
รูปที่ ก.15 เจริญไซ 2 หัว อัตราการไหลของอากาศ 0.78 ลิตรต่อนาที เวลากระตุ้น 90 นาที



รูปที่ ก.16 เจริญไซ 2 หัว อัตราการไหลของอากาศ 1.02 ลิตรต่อนาที เวลากระตุ้น 60 นาที



รูปที่ ก.17 เจริญไซ 2 หัว อัตราการไหลของอากาศ 1.02 ลิตรต่อนาที เวลากระตุ้น 90 นาที



รูปที่ ก.18 เจริญไซ 2 หัว อัตราการไหลของอากาศ 1.26 ลิตรต่อนาที เวลากระตุ้น 60 นาที



รูปที่ ก.19 เจริญไซ 2 หัว อัตราการไหลของอากาศ 1.26 ลิตรต่อนาที เวลากระตุ้น 90 นาที

ตารางที่ ก.11 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้และค่า SEC_{prod} ของระบบผลิตน้ำกระตุ้นพลาสติก ครั้งที่ 1

จำนวน หัว	อัตราการไหลของ อากาศ (L/min)	เวลา (นาที)	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า ที่ใช้ (kWh)	SEC_{prod} (kWh/L)
1	0.78	60	0.015	0.030
1	0.78	90	0.045	0.090
1	1.02	60	0.02	0.040
1	1.02	90	0.05	0.100
1	1.26	60	0.025	0.050
1	1.26	90	0.06	0.120
2	0.78	60	0.05	0.100
2	0.78	90	0.075	0.150
2	1.02	60	0.055	0.110
2	1.02	90	0.081	0.162
2	1.26	60	0.061	0.122
2	1.26	90	0.083	0.166

ตารางที่ ก.12 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้และค่า SEC_{prod} ของระบบผลิตน้ำกระตุ้นพลาสติก ครั้งที่ 2

จำนวน หัว	อัตราการไหลของ อากาศ (L/min)	เวลา (นาที)	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า ที่ใช้ (kWh)	SEC_{prod} (kWh/L)
1	0.78	60	0.02	0.040
1	0.78	90	0.047	0.094
1	1.02	60	0.026	0.052
1	1.02	90	0.055	0.110
1	1.26	60	0.032	0.064
1	1.26	90	0.063	0.126
2	0.78	60	0.054	0.108
2	0.78	90	0.078	0.156

ตารางที่ ก.12 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้และค่า SEC ของระบบผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมา ครั้งที่ 2 (ต่อ)

จำนวน หัว	อัตราการไหลของ อากาศ (L/min)	เวลา (นาที)	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า ที่ใช้ (kWh)	SEC _{prod} (kWh/L)
2	1.02	60	0.058	0.116
2	1.02	90	0.085	0.170
2	1.26	60	0.069	0.138
2	1.26	90	0.091	0.182

ตารางที่ ก.13 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้และค่า SEC_{prod} ของระบบผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมา ครั้งที่ 3

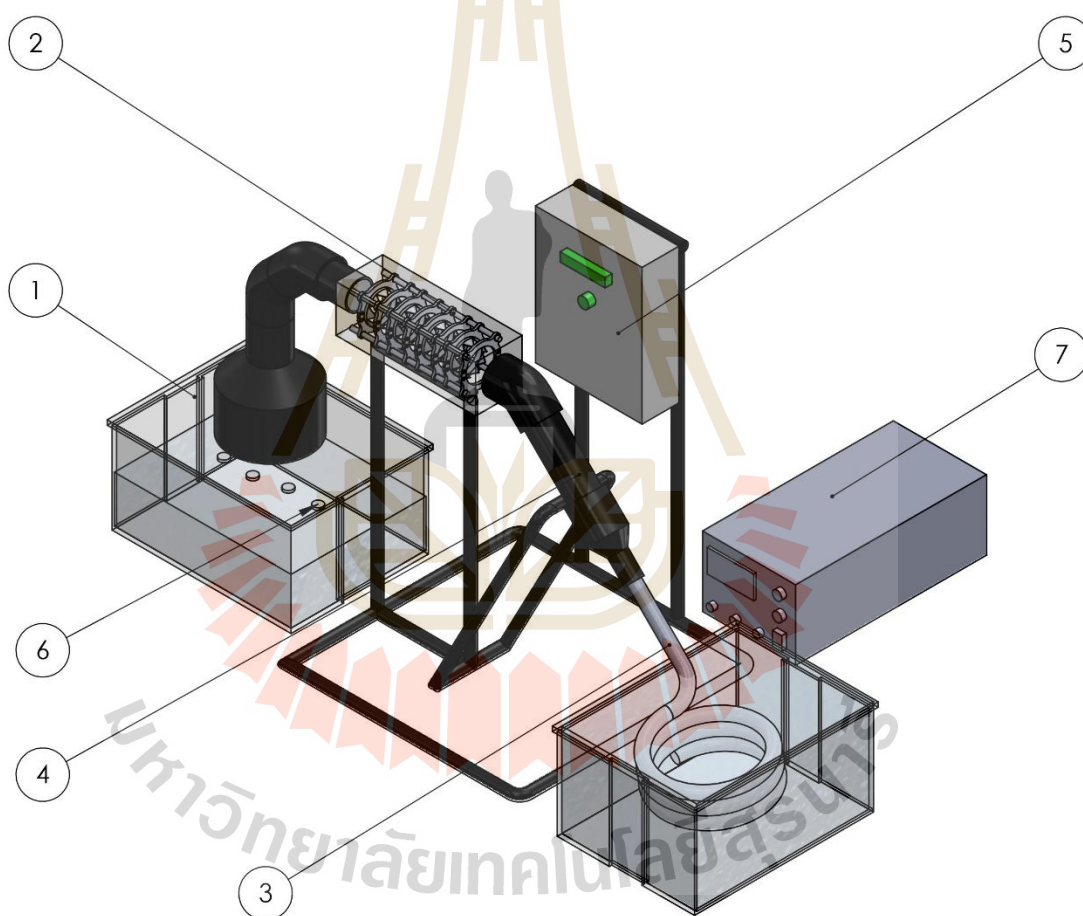
จำนวน หัว	อัตราการไหลของ อากาศ (L/min)	เวลา (นาที)	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า ที่ใช้ (kWh)	SEC _{prod} (kWh/L)
1	0.78	60	0.017	0.034
1	0.78	90	0.051	0.102
1	1.02	60	0.023	0.046
1	1.02	90	0.057	0.114
1	1.26	60	0.028	0.056
1	1.26	90	0.068	0.136
2	0.78	60	0.053	0.106
2	0.78	90	0.081	0.162
2	1.02	60	0.061	0.122
2	1.02	90	0.087	0.174
2	1.26	60	0.064	0.128
2	1.26	90	0.085	0.170



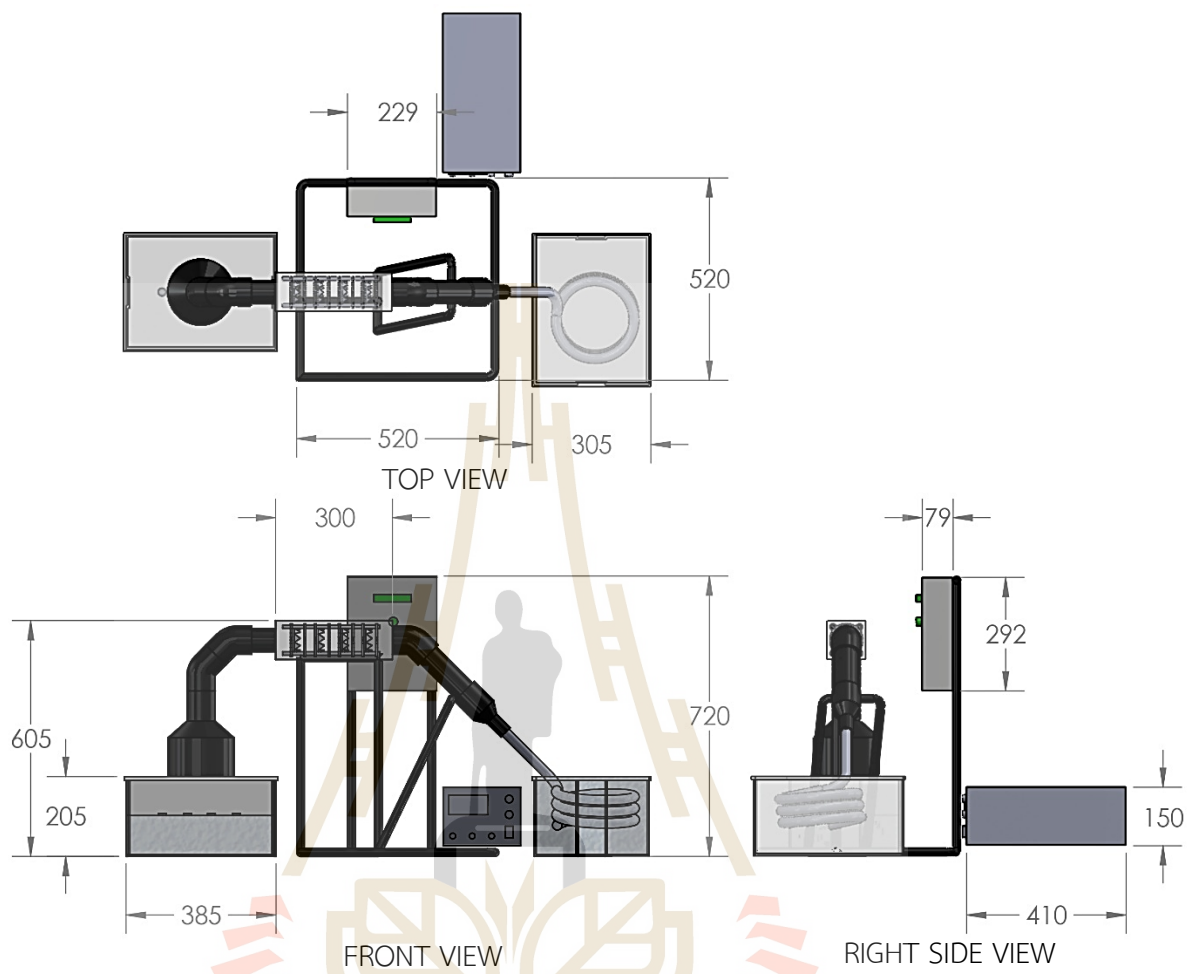
ภาคผนวก ข

แบบวิศวกรรมเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสติก

ITEM NO.	PART NAME	QTY.
1	Plastic box	2
2	Discharge area	1
3	Rubber tube	1
4	System structure	1
5	Electrical control box	1
6	Ultrasonic Nebulizer	4
7	power supply	1

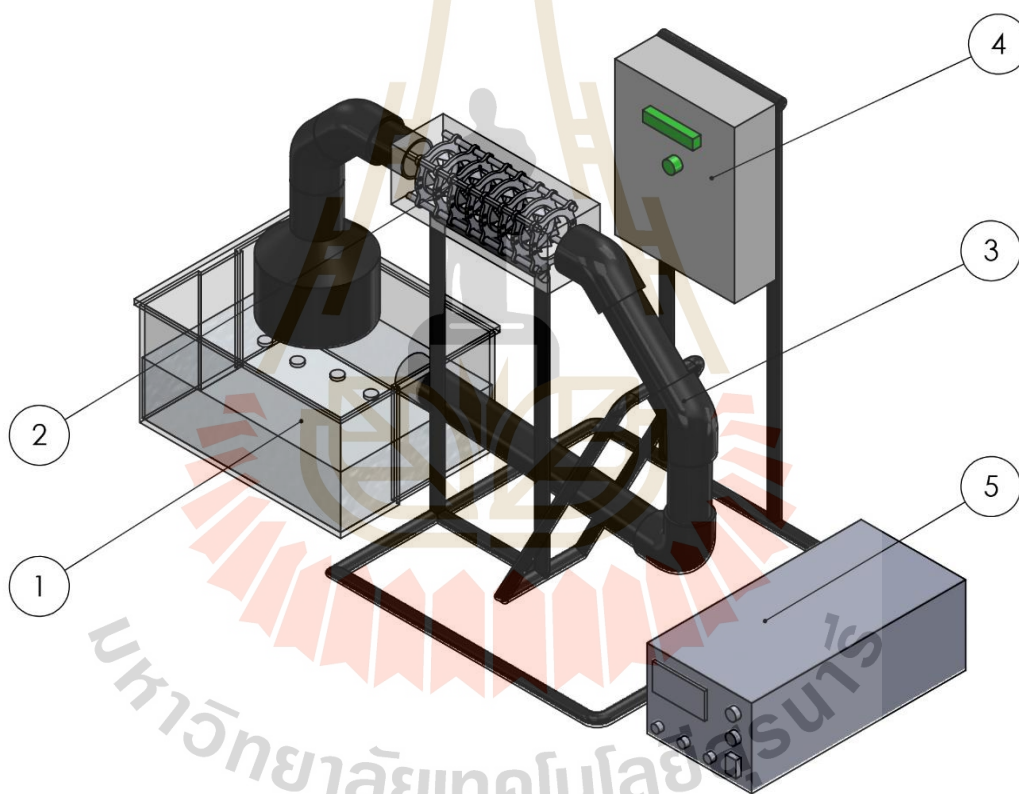


รูปที่ ข.1 ส่วนประกอบเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบรอบเดียว

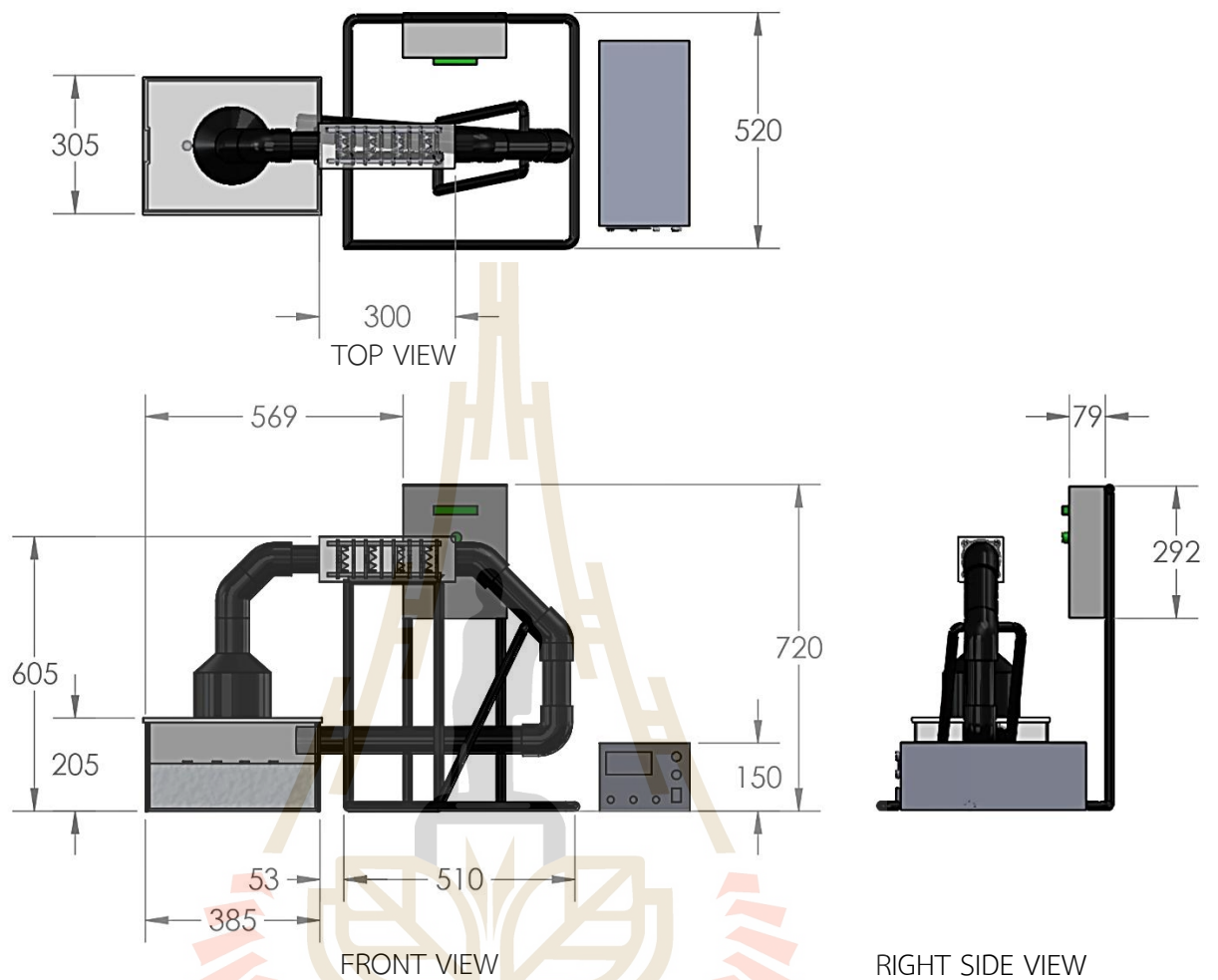


รูปที่ ข.2 แบบเครื่องผลิตน้ำกระดุนพลาสติกแบบรอบเดียว

ITEM NO.	PART NAME	QTY.
1	Plastic box	1
2	Discharge area	1
3	Recirculation pipe	1
4	Electrical control box	1
5	power supply	1



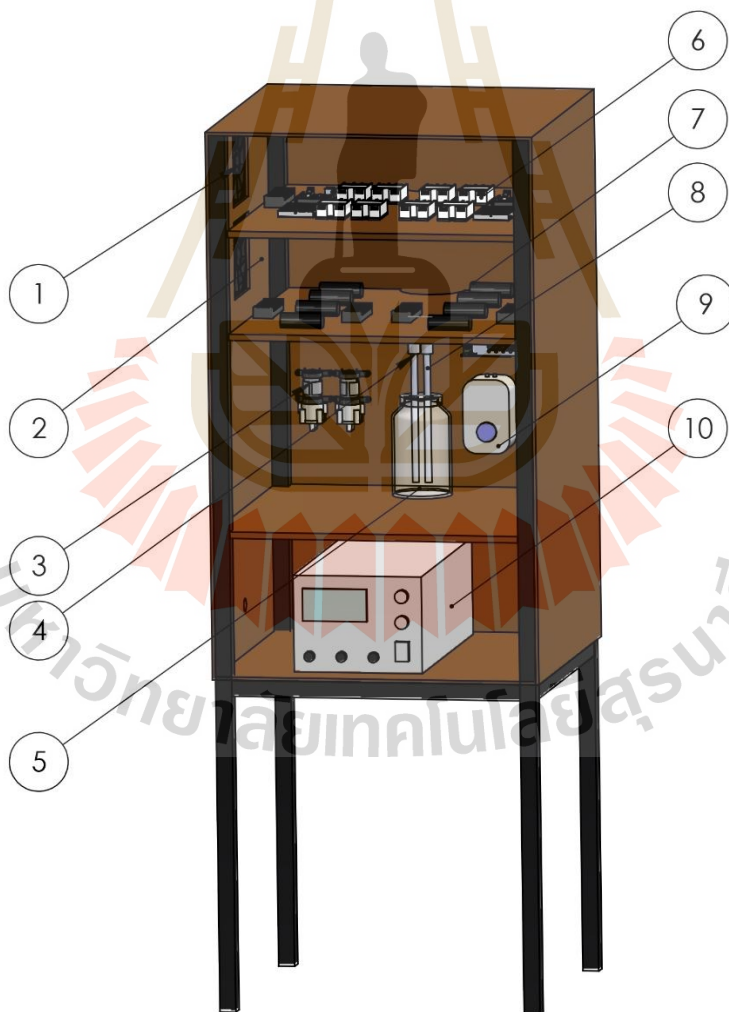
รูปที่ ข.3 ส่วนประกอบเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวน



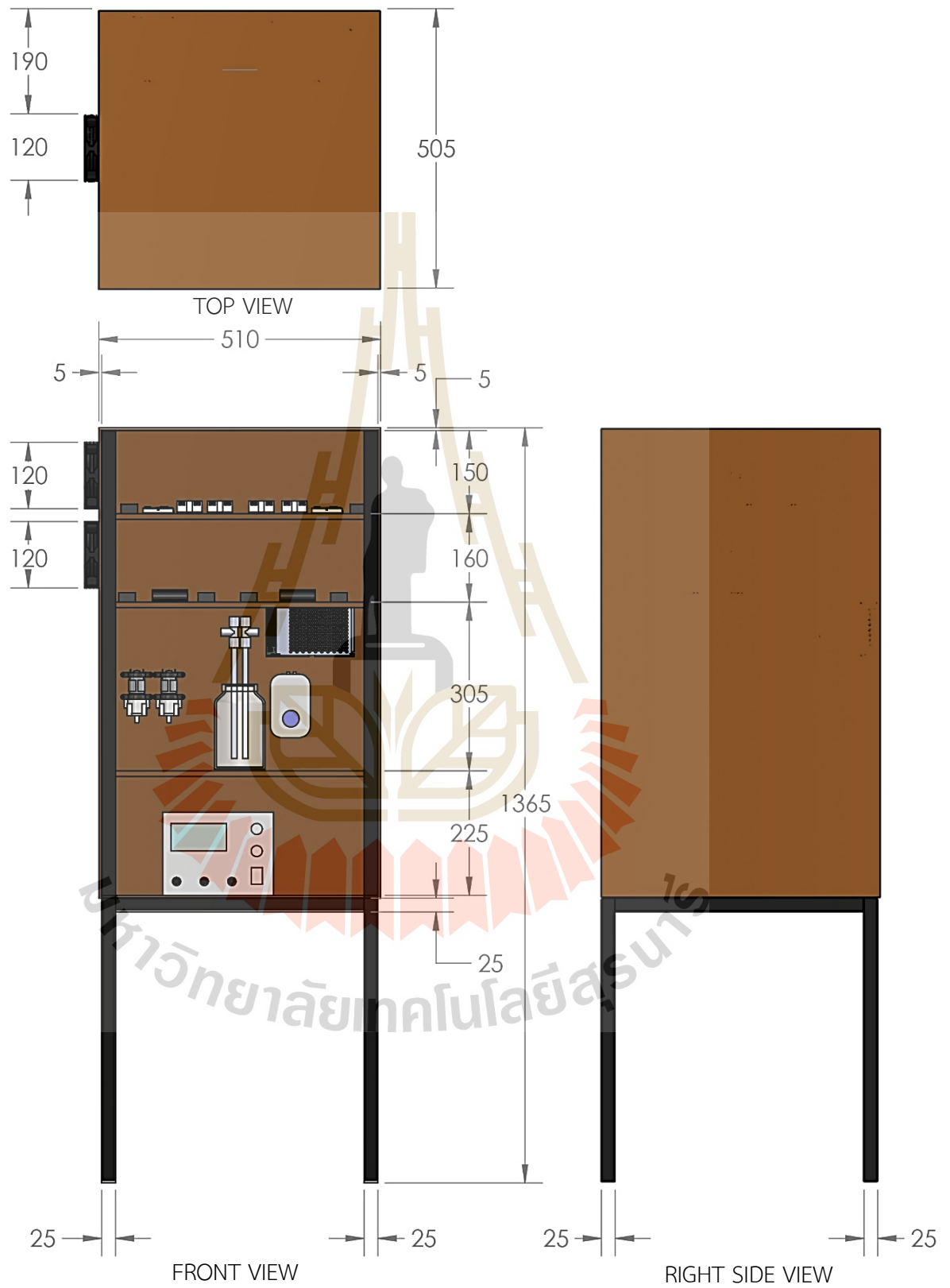
รูปที่ ข.4 แบบเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ITEM NO.	PART NAME	QTY.
1	Cooling Fan 12V	2
2	Electrical cabinet	1
3	Diaphragm Pumps 12V	2
4	Ground Electrode	1
5	Discharge area	1
6	Solid State Relay (SSR)	8
7	High Voltage Generator 8kV	8
8	Electrode	1
9	Air Pump	1
10	Power Supply	1



รูปที่ ข.5 ส่วนประกอบเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge



รูปที่ ข.6 แบบเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge

ประวัติผู้เขียน

นางสาวกมลทิพย์ ปรีเปรม เกิดเมื่อวันที่ 3 มิถุนายน พ.ศ. 2538 ที่อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ศึกษาในระดับชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนมารีย์วิทยา จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล (หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2561 และในปี พ.ศ.2566 เข้าศึกษาต่อในสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล (หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยในขณะศึกษาได้เป็นผู้ช่วยสอนของสาขาวิศวกรรมเครื่องกลในหลายรายวิชา เช่น วิชาเขียนแบบทางวิศวกรรม 1 วิชาเขียนแบบทางวิศวกรรม 2 วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 1 และปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 2

ผลงานวิจัยในระดับปริญญาโท ได้นำเสนอบทความวิชาการดังนี้

1. การประชุมวิชาการระดับชาติ

กมลทิพย์ ปรีเปรม, กระจวี ตรีอำนาจ, เทวรัตน์ ตรีอำนาจ และวิชาญณรงค์ วงศ์บับพา. (2567). ผลของน้ำกระตุ้นพลาสมาต่อการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ในผักสลัดใบกรีนโอ๊ค. การประชุมวิชาการระดับชาติเชิงสร้างสรรค์ครั้งที่ 9 (CreTech 2024), โรงแรมเคป ราชา ศรีราชา จังหวัดชลบุรี, 21-23 สิงหาคม พ.ศ. 2567 และได้รับรางวัลบทความวิจัยดีเด่น

2. การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

Kamontip Preeprem, Krawee Treamnuk, Tawarat Treamnuk and Wichannarong Wongbubpa. (2024). Effect of Plasma Activated Water on Inactivation of Microbial Cells in Green Oak Lettuce. 7th Global Conference on Engineering and Applied Science (GCEAS 2024), Taipei Taiwan, 21 - 23 November 2024.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ขณะที่กำลังศึกษาในระดับปริญญาโท

กมลทิพย์ ปรีเปรม, ขจรเดช ลาบุตร, กระจวี ตรีอำนาจ, เทวรัตน์ ตรีอำนาจ และวิชาญณรงค์ วงศ์บับพา. (2025). ผลของน้ำกระตุ้นพลาสมาต่อการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ในผักสลัดใบกรีนโอ๊ค. วารสารวิจัย มทร. กรุงเทพ, 19(1), 16 - 23.