บทที่ 4
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในบทนี้แสดงถึงผลการศึกษาของผลการปรับปรุงสภาพน้ำโดยนำน้ำที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์รวมแบบ Total Plate Count: TPC และการประยุกต์ใช้ทางด้านการเกษตรทั้งนี้ได้แบ่งผลการศึกษาออกเป็นสามส่วนคือในส่วนแรกมุ่งเน้นการออกแบบและ พัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาและศึกษาผลของการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยเทคนิคกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา ต่อมาในส่วนที่สองเป็นผลการศึกษาอิทธิพลของน้ำกระตุ้นพลาสมาต่อการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในผักสลัดกรีนโอ๊ค สายพันธุ์ *Lactuca sativa* var. *crispa* L. และในส่วนสุดท้ายเป็นผลการศึกษาอิทธิพลของน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาต่ออัตราการงอกของเมล็ดถั่วเขียวพันธุ์ผิวมัน

4.1 ผลการศึกษาการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบรอบเดียวและแบบหมุนวน

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 ได้ปริมาตรน้ำกระตุ้นพลาสมาจากการควบแน่นละอองหมอก 10 มิลลิลิตร พบว่าความเข้มข้นของ H_2O_2, NO_3^- และ NO_2^- เท่ากับ อยู่ในช่วง 0-1, 25 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในขณะที่การเปิดเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวน เป็นเวลา 30 นาที ได้ปริมาตรน้ำกระตุ้นพลาสมาจากการควบแน่นละอองหมอก 10 มิลลิลิตร โดยพบว่าความเข้มข้นของ H_2O_2 , NO_3^- และ NO_2^- เท่ากับ 30, 100 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับการเปิดเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบ Corona Discharge โดยกระตุ้นน้ำปริมาตร 20 มิลลิลิตรเป็นเวลา 30 นาที พบว่าความเข้มข้นของ H_2O_2 , NO_3^- และ NO_2^- เท่ากับ 100, 500 และ อยู่ในช่วง 40-80 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากการตรวจวัดความเข้มข้นของสารที่ทำปฏิกิริยาข้างต้น จะเห็นว่าการกระตุ้นน้ำ

พลาสมาแบบหมุนวนและการการฉายพลาสมาที่ผิวน้ำโดยตรงส่งผลทำให้สารมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น แต่มีข้อจำกัดของปริมาตรน้ำที่ได้ จากการตรวจสารโดยใช้กระดาษทดสอบมีการแสดงผลในลักษณะช่วงข้อมูล จึงอาจก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนของความเข้มข้นในการอ่านได้ อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลองสามารถยืนยันได้ว่าพลาสมามีอิทธิพลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงของสารอนุมูลอิสระออกซิเจน (Reactive Oxygen Species, ROS) และสารอนุมูลอิสระไนโตรเจน (Reactive Nitrogen Species, RNS) ซึ่งก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation-reduction) ของสารอนุมูลอิสระไฮดรอก (Hydroxyl radical, ·OH) อันมีความไวต่อชีวโมเลกุลภายในเซลล์โดยสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่ว่าสารอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล เป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง และอิทธิพลของพลาสมายังก่อให้เกิดองค์ประกอบอื่น 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		ผักสลัดกรีนโอ๊คปลูกแบบไฮโดรโปนิกส์	
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 หมายถึงค่าดังกล่าวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั้น 95% ($p < 0.05$)

จากตารางที่ 4.1 พบว่าการกระตุ้นน้ำที่ได้จากเปิดเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบรอบเดียวนั้นไม่ได้มีผลกระทบต่อค่ากรด-ด่างอย่างมีนัยสำคัญ จึงทำให้ค่าที่ได้จากการทดลองไม่มี

ความแตกต่างกันทางสถิติ (Yong et al., 2018) ทั้งนี้เป็นผลมาจากการสร้างน้ำกระตุ้นพลาสมาจากเครื่องต้นแบบที่นำน้ำกระตุ้นพลาสมามาใช้กระตุ้นน้ำพลาสมาเพียงรอบเดียว ไม่ได้เป็นระบบหมุนวนหรือกระตุ้นพลาสมาที่ผิวน้ำโดยตรง จึงควรทดสอบเพิ่มเติมเพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์กับน้ำกระตุ้นพลาสมาที่ได้จากเครื่องต้นแบบกระตุ้นน้ำพลาสมาแบบหมุนวนหรือกระตุ้นพลาสมาที่ผิวน้ำโดยตรง และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างผักสลัดที่ปลูกในระบบดิน (N) และระบบไฮโดรโปนิกส์ (H) ที่เวลาเดียวกัน พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$)

4.1.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของน้ำกระตุ้นพลาสมาต่อการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์

จากการทดสอบการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ในผักสลัดกรีนโอ๊คที่ทำการทดสอบจากผักสลัดกรีนโอ๊คที่ปลูกแบบบนดิน N และไฮโดรโปนิกส์ 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	$1.53 \times 10^{6\ a}$
	N5	$7.98 \times 10^{5\ b}$
	N10	$5.64 \times 10^{5\ b}$
	N15	$5.00 \times 10^{5\ b}$
ผักสลัดกรีนโอ๊คที่ปลูกแบบไฮโดรโปนิกส์ (H)	HC	$1.77 \times 10^{6\ a}$
	H5	$9.12 \times 10^{5\ b}$
	H10	$6.56 \times 10^{5\ b}$
	H15	$5.61 \times 10^{5\ b}$

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 ผลดังกล่าวบ่งชี้ว่าผักตัวอย่างมีการปนเปื้อนในระดับที่เกินค่าที่ปลอดภัยต่อการบริโภคโดยตรงแต่เมื่อได้จุ่มล้างด้วยน้ำกระตุ้นพลาสมาทุกกรรมวิธี พบว่าน้ำกระตุ้นพลาสมามีสมบัติในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่มีผลต่อการเน่าเสียของผักสลัด และมีปริมาณของจุลินทรีย์ต่ำกว่ามาตรฐาน เนื่องจากน้ำกระตุ้นพลาสมามีสมบัติความเป็นอนุมูลอิสระที่สามารถทำลายผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ โดยสารเหล่านี้จะทำให้เกิดปฏิกิริยา Peroxidation กับ Phospholipid Cell Membrane ของ Aerobic Bacteria ที่ทำให้ผักผลไม้เราเกิดการเน่าเสีย เช่น *E.coli* หรือ *Staphylococcus* ทำให้แบคทีเรียถูกทำลาย (Rastogi et al., 2012) โดยสังเกตจากค่าปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดที่ได้จากการทดลองตัวอย่างผักสลัดกรีนโอ๊คในสภาวะที่ใช้น้ำกระตุ้นพลาสมาจุ่มล้าง 15 นาที N15 และ H15 ได้ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด 5.00×10^5 CFU/g และ 5.61×10^5 CFU/g ตามลำดับ จะเห็นว่าน้ำกระตุ้นพลาสมาสามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ของผักสลัดกรีนโอ๊คที่ปลูกแบบ 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) ได้จากการจุ่มล้างด้วยน้ำประปาและผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบรอบเดียว

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]
ผักสลัดกรีนโอ๊คที่ปลูกแบบไฮโดรโปนิกส์ (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 หมายถึงค่าดังกล่าวแตกต่างกันอย่างมี นัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$)

จากตารางที่ 4.3 ทดลองนำผักสลัดกรีนโอ๊คที่ปลูกในระบบดิน (N) และระบบไฮโดรโปนิกส์ (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 ซึ่งถือว่ามีปริมาณน้อยเกินไปเมื่อเปรียบเทียบกับความต้องการใช้งานจริง เนื่องจากปริมาณดังกล่าวไม่เพียงพอสำหรับการจุ่มล้างตัวอย่างผักสลัดกรีนโอ๊ค ขนาด 3 × 3 ตารางเซนติเมตร อย่างทั่วถึง ข้อจำกัดนี้จึงสะท้อนถึงความจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงรูปแบบหรือกลไกการผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมา เพื่อให้ได้ปริมาตรที่มากขึ้นและเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในระดับปฏิบัติการ

4.1.4 การวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของผักสลัดกรีนโอ๊ค

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

เป็นอาหารที่เสื่อมเสียง่ายเนื่องจากมีปริมาณน้ำสูง มีสารอาหารที่เหมาะสมกับการเจริญของจุลินทรีย์เมื่อมีแรงกระแทกจากการเก็บเกี่ยว การปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยวที่ไม่เหมาะสมอาจจะทำให้จุลินทรีย์นั้นเจริญและส่งผลต่อสีของวัตถุดิบได้ สังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงของสีของผักสลัดกรีนโอ๊ค ดังตารางที่ 4.4

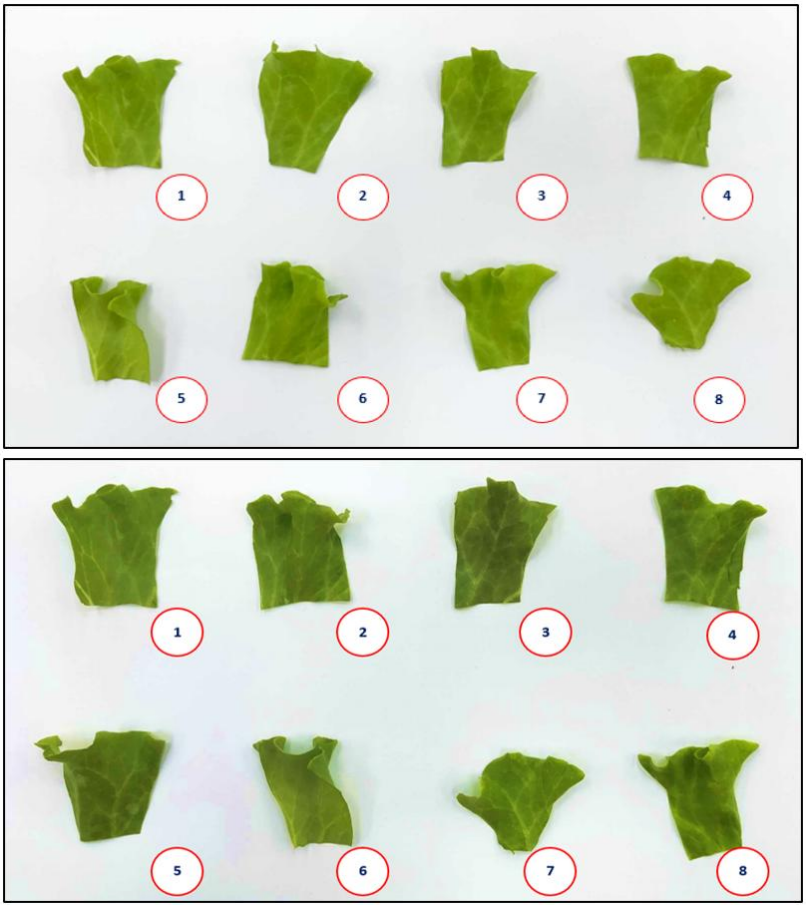
ตารางที่ 4.4 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของผักสลัดกรีนโอ๊คที่เปลี่ยนไปในแต่ละวัน ของตัวอย่างผักสลัดกรีนโอ๊คที่ปลูกแบบไฮโดรโปนิกส์และการปลูกแบบธรรมดา

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 ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงสีของผักสลัดกรีน โอ๊คตลอดระยะการเก็บรักษาพบว่า 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 ที่ได้จากการจุ่มล้างด้วยน้ำประปาและน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบกระตุ้นน้ำพลาสมารอบเดียวทำให้ทราบว่าระบบการปลูกไม่มีอิทธิพลเชิงสถิติ ขณะที่ระยะเวลาจุ่มล้าง 10 นาที ให้ประสิทธิภาพการลดจุลินทรีย์สูงสุดอย่างเพียงพอโดยไม่ต่างจาก 15 นาที อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น งานวิจัยต่อเนื่องในลำดับถัดไปจึงกำหนดเวลา 10 นาที เป็นเงื่อนไขเหมาะสมเพื่อใช้เป็นฐานในการทดสอบกับเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบกระตุ้นน้ำพลาสมาหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge

4.2 ผลการศึกษาการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge

โดยในงานวิจัยต่อเนื่องนี้ทำการทดสอบปรับปรุงคุณภาพน้ำกระตุ้นพลาสมาปริมาตร 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 (หัว)	B (L/min)	C (min)	NO_3^- (รหัส [IQR]; ช่วงจริง)	NO_2^- (รหัส [IQR]; ช่วงจริง)	H_2O_2 (รหัส [IQR]; ช่วงจริง)	n
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 ที่ได้จากเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge (ต่อ)

A (หัว)	B (L/min)	C (min)	NO_3^- (รหัส [IQR]; ช่วงจริง)	NO_2^- (รหัส [IQR]; ช่วงจริง)	H_2O_2 (รหัส [IQR]; ช่วงจริง)	n
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 เนื่องจากมีสมมติฐานว่าข้อมูลต้องมีการแจกแจงปกติและมีความแปรปรวนที่สม่ำเสมอ (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	A×B	A×C	B×C	A×B×C
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

<u>หมายเหตุ</u>

- การวิเคราะห์ความแตกต่างทำโดยใช้ สถิติไม่อิงการแจกแจง (Mann – Whitney U test สำหรับ A และ C และ Kruskal–Wallis test สำหรับ B)
- ผลการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ (A×B, A×C, B×C, A×B×C) 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 มีผลต่อการเพิ่มการสะสมของสารออกซิแดนท์ในน้ำกระตุ้นพลาสมาอย่างชัดเจน ขณะที่อัตราการไหลของอากาศก็มีค่า $p < 0.05$ เช่นกัน สะท้อนให้เห็นว่าเป็นปัจจัยสำคัญต่อการควบคุมปริมาณ

ของ Reactive Species ที่เกิดขึ้น ทั้งนี้ การวิเคราะห์ผลปฏิสัมพันธ์โดยใช้แบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป (General Linear Model: GLM) พบว่าผลส่วนใหญ่ไม่แสดงนัยสำคัญ ยกเว้นบางกรณี เช่น การทำงานร่วมกันระหว่างจำนวนหัวและเวลา (A × 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 และไนไตรต์ (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 เพิ่มเป็น 30 mg/L ซึ่งอาจเกิดจากการสัมผัสระหว่างละอองหมอกกับพลาสมาอย่างต่อเนื่อง ทำให้มีการละลายของชนิดออกซิแดนต์ เช่น -OH, -NO และ $-O_2^-$ มากขึ้น (Thirumdas et al., 2018) นำไปสู่การสร้างสารประกอบอนินทรีย์ออกซิเดชัน เช่น H_2O_2และ 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 เนื่องจากการเกิดคอร์โรนาอิเล็กทริกดิสชาร์จ 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) ซึ่งระบุว่าการเพิ่มพลังงานดิสชาร์จหรือเพิ่มพื้นที่สัมผัสของพลาสมากับน้ำจะช่วยเพิ่มความเข้มข้นของสารออกซิแดนต์ใน PAW อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะ H_2O_2 และ NO_3^- ซึ่งเป็นสารสำคัญที่มีบทบาทในการยับยั้งจุลินทรีย์และกระตุ้นกระบวนการออกซิเดชันในพืชและอาหาร โดยสรุประบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge จึงให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาที่มีความเข้มข้นของสารออกซิแดนต์สูง 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 (μS/cm)	อุณหภูมิ (°C)
1	0.78	60	5.00 ± 0.03^{g}	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 (μS/cm)	อุณหภูมิ (℃)
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 ± 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 ส่งผลให้เกิดกรดไนตริกและกรดไนตรัส (Thirumdas et al., 2018) การเปลี่ยนแปลงนี้ไม่เพียงแต่ลดความเหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์ แต่ยังช่วยเสริมฤทธิ์ของอนุภาคออกฤทธิ์ (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) การเปลี่ยนแปลงนี้ไม่เพียงบ่งบอกถึงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น 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 สามารถแสดงผลการวิเคราะห์ได้ดังตารางที่ 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 × Flow	2.00	65.81	0.0000	***
pH	Head × Time	1.00	0.00	1.0000	n.s.
pH	Flow × 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 × Flow	2.00	90.58	0.0000	***
ORP	Head × Time	1.00	0.05	0.8165	n.s.
ORP	Flow × 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 × 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 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มจำนวนหัวและเวลาการกระตุ้นน้ำพลาสมา 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) ค่าการนำไฟฟ้าที่สูงขึ้นจึงเป็นหลักฐานยืนยันถึงการสร้างและการละลายของสารอนิน ทรีย์ในระบบ 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	อัตราการป้อนอากาศ (L/min)	เวลา (นาที)	ซ้ำที่	Colonies Calculated Result	ค่าเฉลี่ย ± SD
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) ที่ได้จากการจุ่มล้างด้วยน้ำประปาและผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge (ต่อ)

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

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย ± 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) ได้จากการจุ่มล้างด้วยน้ำประปาและผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge

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

หมายเหตุ: ค่าแสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n = 3)
ตัวอักษรยกกำลังที่แตกต่างกันภายในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $p < 0.05$ (Tukey HSD test)

จากตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า การใช้น้ำที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลาสมาสามารถลดจำนวนจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเปรียบเทียบกับการล้างด้วยน้ำประปา โดยค่าที่ได้จากตารางแสดงให้เห็นว่าทุกเงื่อนไขมีค่า Log reduction มากกว่า 2 log และบางเงื่อนไขสูงกว่า 4 log ซึ่งหมายถึงการลดจำนวนจุลินทรีย์ได้ตั้งแต่ 99% จนถึงมากกว่า 99.99% การเปลี่ยนแปลงนี้ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพที่ชัดเจนของน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา ในการยับยั้งจุลินทรีย์ เมื่อพิจารณาในรายละเอียดพบว่า การเพิ่มเวลาในการกระตุ้นน้ำพลาสมา คือ 90 นาที มีแนวโน้มให้ค่า Log

reduction และ % reduction สูงกว่าที่ 60 นาที ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน สะท้อนให้เห็นว่าระยะเวลาที่นานขึ้นมีผลต่อการสะสมของสารอนุภาคออกซิแดนท์ (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 (≥ 99.99%) ผลนี้สอดคล้องกับกลไกที่ว่าการเพิ่มจำนวนหัวจะเพิ่มพื้นที่และปริมาตรของการสัมผัสพลาสมา ทำให้เกิดการสร้าง RONS มากขึ้น (Joshi et al., 2018) ในขณะที่ที่อัตราการไหลของอากาศสูงสุด (1.26 L/min) ภายใต้จำนวนหัวเดียว พบว่าค่าการลดลงต่ำกว่าเงื่อนไขอื่น โดยมีค่าเพียง 2 log reduction (≈ 99%) สะท้อนให้เห็นถึงความเป็นไปได้ว่าการป้อนอากาศมากเกินไปอาจส่งผลต่อเสถียรภาพของพลาสมาและลดประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานลงในน้ำ (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 ± SD)
รอบเดียว	47.84–68.31
หมุนวนร่วมกับ Corona Discharge	99.07-99.99

จากตารางที่ 4.12 พบว่า การล้างผักสลัดกรีนโอ๊คด้วยน้ำกระตุ้นพลาสมาให้ผลการลดจำนวนจุลินทรีย์แบบ Total Plate Count (TPC) แตกต่างกันอย่างชัดเจนในแต่ละเงื่อนไข โดยระบบกระตุ้นพลาสมาแบบรอบเดียว สามารถลดจำนวนจุลินทรีย์ได้เพียง 47.84–68.31% ขณะที่ระบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge ให้ค่าการลดลงสูงถึง 99.07–99.99% ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพของการกระตุ้นที่สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ การเพิ่มประสิทธิภาพในระบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge สืบเนื่องจากการสร้างและคงอยู่ของอนุมูลออกซิแดนต์และไนโตรเจนชนิดต่าง 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; Pawłat et al., 2020) นอกจากนี้ กระบวนการ Corona Discharge ยังทำให้เกิดโอโซน (O_3), ไนตริกออกไซด์ (NO-) และอนุมูลไฮดรอกซิล (-OH) ในปริมาณสูง ซึ่งมีพลังในการออกซิไดซ์สูงและสามารถซึมผ่านผิวผักได้ดี ส่งผลให้เกิดการยับยั้งจุลินทรีย์ได้ในระดับใกล้เคียงกับกระบวนการฆ่าเชื้อเชิงพาณิชย์ ขณะเดียวกัน การกระตุ้นร่วมกับการหมุนเวียนยังช่วยรักษาค่าความเข้มข้นของสารออกซิแดนต์ให้คงที่ ส่งผลให้คุณสมบัติของน้ำกระตุ้นพลาสมามีเสถียรภาพมากขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ (Thirumdas et al., 2018) ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานของ 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 ในการศึกษานี้จึงมุ่งเน้นการประเมินอิทธิพลของน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาจากเครื่องผลิตแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge ต่ออัตราการงอกของเมล็ดถั่วเขียวพันธุ์ผิวมัน (*Vigna radiata*) ซึ่งส่งผลต่ออัตราการงอกและความแข็งแรงของต้นกล้า สะท้อนผ่านค่าเปอร์เซ็นต์การงอก (GP), ดัชนีการงอก (GI), เวลาเฉลี่ยการงอก (MGT), อัตราการงอก (GR) และดัชนีความแข็งแรงของต้นกล้า (VI) แสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ผลการศึกษาการงอกของเมล็ดถั่วเขียวพันธุ์ผิวมัน

จำนวนหัว	อัตราการไหลของอากาศ (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 ผลการทดลองการเพาะเมล็ดถั่วเขียวพันธุ์ผิวมันในสภาวะที่ใช้น้ำกระตุ้นพลาสมา พบว่าเมล็ดทุกเงื่อนไขสามารถงอกครบ 100% ภายในวันแรก แสดงว่าน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาไม่ได้ยับยั้งการเริ่มต้นกระบวนการงอก 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) ที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการกระตุ้นเมแทบอลิซึมที่เกี่ยวข้องกับการยืดตัวของรากและยอด ทำให้ต้นกล้าแข็งแรงและมีความยาวมากกว่าเงื่อนไขอื่น ขณะที่เงื่อนไขที่ใช้ 2 หัวร่วมกับเวลาในการกระตุ้นน้ำพลาสมานาน (90 นาที) กลับให้ค่า VI ต่ำสุดเพียง 150–200 และต้นกล้ามีความยาวเฉลี่ยเพียง 1.5–2.0 ซม. ซึ่งบ่งชี้ถึงผลกระทบจาก RONS ที่สะสมมากเกินไปจนก่อให้เกิดภาวะความเครียดออกซิเดชั่นและยับยั้งการเจริญเติบโต ปรากฏการณ์ดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานของ Sivachandiran และ Khacef (2017) ที่พบว่าความเข้มของน้ำกระตุ้นพลาสมา มีผลสองทาง กล่าวคือ หากความเข้มอยู่ในระดับเหมาะสมจะช่วยส่งเสริม

การงอกและการเจริญของพืช แต่หากเกินขีดจำกัดจะกลับส่งผลลบต่อการเจริญเติบโต นอกจากนี้ Guo et al. (2019) ยังชี้ว่าการสะสมของ ROS และ RNS ในระดับสูงสามารถทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างเซลล์และกระบวนการสังเคราะห์ชีวโมเลกุลของพืช ผลการศึกษานี้จึงยืนยันว่า การปรับสมดุลของจำนวนหัว อัตราการไหลของอากาศ และเวลาในการกระตุ้นน้ำพลาสมา เป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดประสิทธิภาพของน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาต่อการงอกและความแข็งแรงของต้นกล้า

4.4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) กับประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมา

การประเมินการใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นขั้นตอนสำคัญในการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมา เนื่องจากพลังงานที่จ่ายเข้าสู่ระบบจะเป็นตัวกำหนดทั้งต้นทุนการดำเนินงานและความคุ้มค่าในการประยุกต์ใช้งานจริง การวัดค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh) จึงกระทำโดยการอ่านค่าจากมิเตอร์ไฟฟ้าก่อนและหลังการเดินเครื่องในแต่ละเงื่อนไขทดลอง จากนั้นนำค่าความแตกต่างมาคำนวณเป็นปริมาณพลังงานที่ใช้ไปในรอบการทำงาน 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 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ของระบบผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาจากเครื่องแบบหมุนวนร่วมกับ 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} เพิ่มสูงขึ้นตามการเพิ่มจำนวนหัวพลาสมา ระยะเวลาในการกระตุ้น และ อัตราการไหลของอากาศ 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 ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มของค่าการยับยั้งจุลินทรีย์ (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 แต่หากเงื่อนไขมีความเข้มข้นสูงเกินไปอาจก่อให้เกิดภาวะความเครียดออกซิเดชั่นจนทำให้ค่า 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 ที่เหมาะสมจะกระตุ้นเมแทบอลิซึมและการยืดตัวของรากและยอด แต่หากสูงเกินไปจะยับยั้งการเจริญของพืช