บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ถูกออกแบบให้แบ่งออกเป็นสามส่วนหลัก โดยส่วนแรกมุ่งเน้นการออกแบบและพัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาและศึกษาผลของการปรับปรุงสภาพน้ำด้วยเทคนิคกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา ส่วนที่สองเป็นการศึกษาผลของการปรับคุณภาพน้ำด้วยวิธีการกระตุ้นด้วยพลาสมาต่อความสามารถในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ ในส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาอิทธิพลของน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาต่อการงอกของเมล็ด รายละเอียดการดำเนินการนำเสนอไว้ดังต่อไปนี้

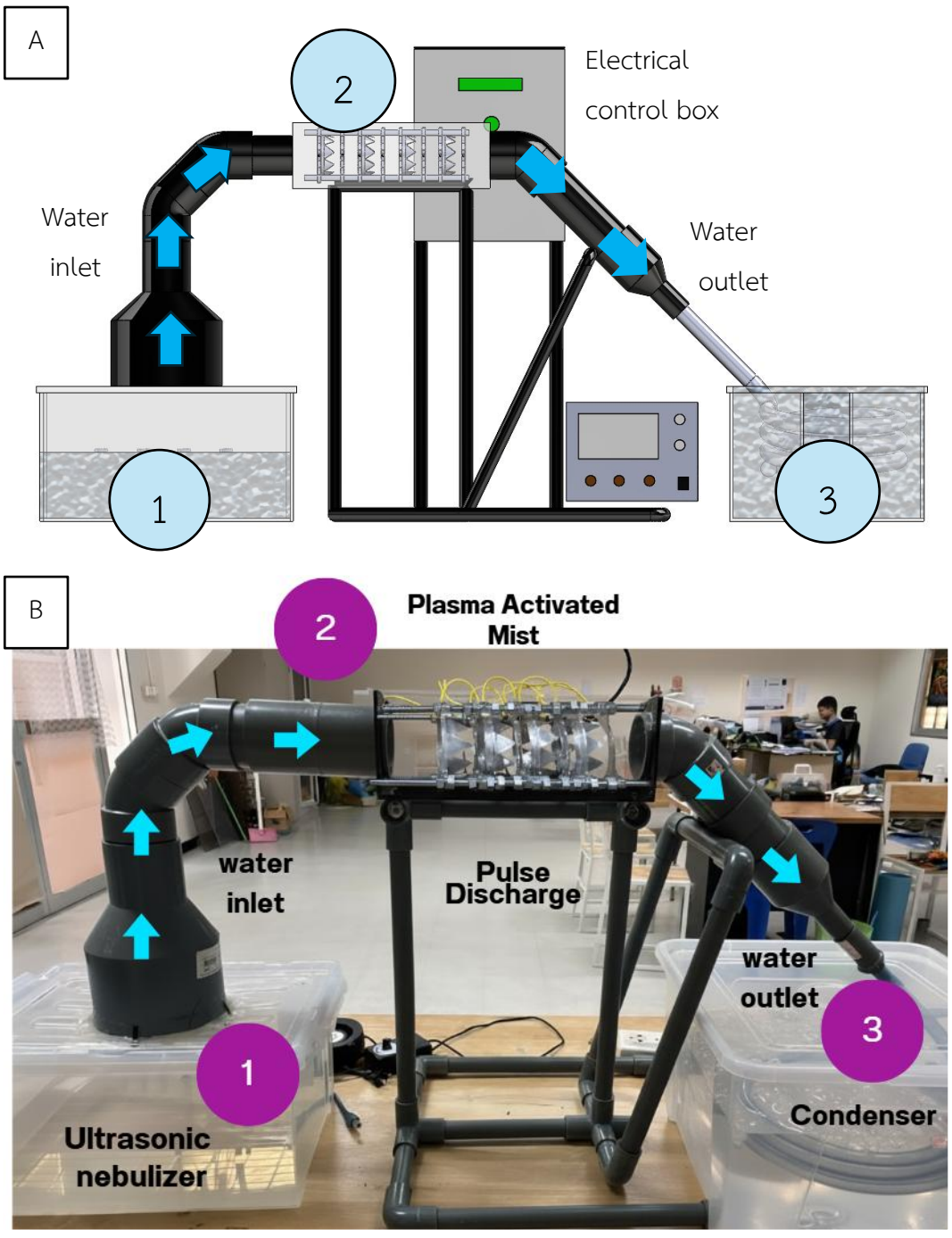
3.1 ผลของการปรับคุณภาพน้ำโดยเทคนิคกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา

การศึกษาส่วนแรกมุ่งเน้นการประเมินผลของการปรับคุณภาพน้ำด้วยเทคนิคการกระตุ้นน้ำด้วยพลาสมา ซึ่งครอบคลุมถึงการออกแบบและพัฒนาชุดกำเนิดลำพลาสมาพร้อมอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องตลอดจนการวิเคราะห์ผลการทดลองตามหัวข้อที่นำเสนอในลำดับถัดไป

งานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องต้นแบบผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาทั้งหมด 3 รูปแบบ กล่าวคือ รูปแบบที่หนึ่งเป็นชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบรอบเดียว รูปแบบถัดมาเป็นชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวนและรูปแบบสุดท้ายเป็นการประยุกต์ชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge โดยแต่ละรูปแบบมีส่วนประกอบดังนี้

3.1.1 ชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบรอบเดียว

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

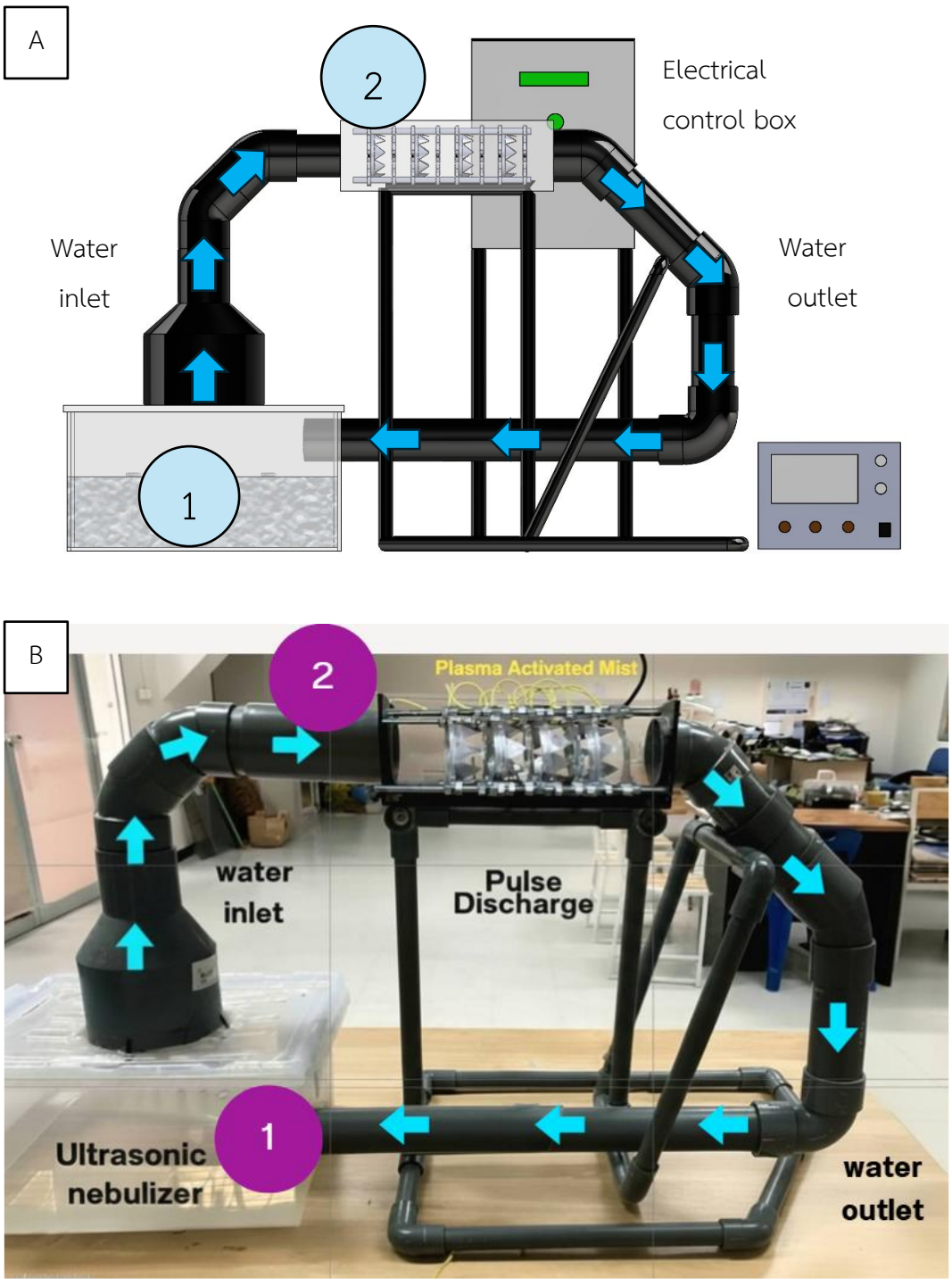


รูปที่ 3.1 (A) แผนภาพแสดงชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบรอบเดียว
(B) ชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบรอบเดียว

ใช้จำนวน 2 ชุด ความถี่ในการทำงานของเครื่องพ่นฝอยละอองอัลตราโซนิกคือ 108 $\pm$ 2 กิโลเฮิร์ซ โดยในส่วนที่ 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 และมีท่อขวางการไหลของละอองหมอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 24.25 มิลลิเมตร บรรจุอยู่กึ่งกลาง ซึ่งบริเวณดิสชาร์จพลาสมาถูกบรรจุอยู่ในกล่องอะคริลิคความยาว 25 เซนติเมตร ความกว้างและความสูง 6 เซนติเมตรและส่วนที่ 3 ละอองหมอกเหล่านี้ไหลผ่านแผงปล่อยพลาสมาในอากาศโดยตรง เมื่อละอองหมอกเหล่านี้ไหลผ่านโซนพลาสมา จะถูกทำการควบแน่นด้วยคอนเดนเซอร์ โดยใช้น้ำเย็นที่มีอุณหภูมิประมาณ 0 องซาเซลเซียส โดยทำการเปิดเครื่องผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบกระตุ้นน้ำพลาสมารอบเดียว 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

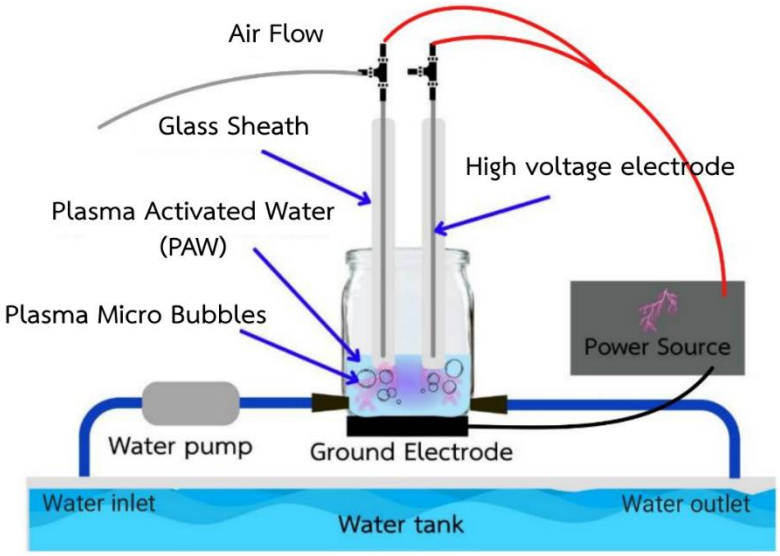


รูปที่ 3.2 (A) แผนภาพแสดงชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวน
(B) ชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวน

เปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ไนเตรต (NO_3^-) และไนไตรท์ (NO_2^-) กับรูปแบบ Corona Discharge ที่ใช้อิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูงทำจากทองแดง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 mm. และอิเล็กโทรดกราวด์ทำจากทองแดง โดยที่อิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูงอยู่ด้านบนและอิเล็กโทรดกราวด์จมอยู่ใต้น้ำ 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) จากเครื่องต้นแบบผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมารอบเดียวและผลการตรวจสอบเปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ไนเตรต (NO_3^-) และไนไตรท์ (NO_2^-) จากเครื่องต้นแบบผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาหมุนวนกับชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบ Corona Discharge จึงเป็นแนวคิดในการพัฒนาเครื่องต้นแบบผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาเป็นการประยุกต์ชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบหมุนวนร่วมกับ Corona Discharge เป็นรูปแบบที่สามที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ไขข้อจำกัดของปริมาตรน้ำในระบบก่อนหน้า ซึ่งได้ปริมาตรน้ำกระตุ้นพลาสมาเพียง 20 มิลลิลิตร โดยได้ปรับปรุงให้สามารถเพิ่มปริมาตรน้ำได้ตามความต้องการของการทดลอง 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

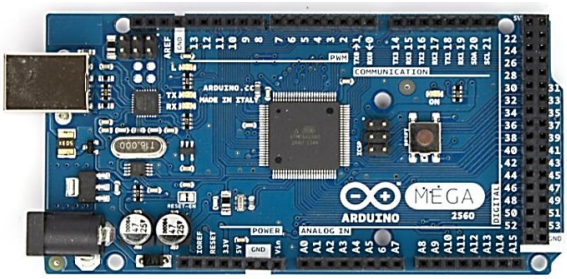
3.1.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

3.1.4.1 แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้นน้ำพลาสมา

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

รูปที่ 3.5 แหล่งจ่ายไฟฟ้า ATTEN 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 °C จนถึง 1,260 °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 แล้วป้อนเข้าสู่หม้อแปลงเฟอร์ไรต์ที่พันขดลวดทุติยภูมิหลายพันรอบ ส่งผลให้ได้แรงดันไฟฟ้าขาออกสูงในระดับกิโลโวลต์ นอกจากนี้ ยังมีการเสริมวงจร Cockcroft – Walton multiplier ซึ่งถูกเสนอครั้งแรกโดย Cockcroft และ Walton (1932) โดยอาศัยการต่อชุดตัวเก็บประจุและไดโอดต่อเนื่องกันหลายขั้นเพื่อคูณแรงดันไฟฟ้า 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)

A

B

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 เป็นเครื่องมือวิเคราะห์กึ่งปริมาณที่ได้รับความนิยมในงานวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม อาหารและการวิจัย เนื่องจากมีคุณสมบัติที่โดดเด่นด้านความสะดวก ความรวดเร็ว และประสิทธิภาพในการตรวจสอบเบื้องต้น (Macherey-Nagel, 2020) กล่าวคือกระดาษทดสอบสามารถใช้งานได้อย่างง่ายดาย โดยไม่จำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือวิเคราะห์ที่ซับซ้อน ทำให้ผู้ปฏิบัติงานในห้องทดลองหรือภาคสนามสามารถตรวจสอบตัวอย่างได้ทันทีโดยไม่ต้องอาศัยความเชี่ยวชาญเฉพาะทางสูง (Kumar et al., 2019) อีกทั้งกระดาษทดสอบให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็ว โดยทั่วไปสามารถแสดงผลภายในไม่กี่นาที ทำให้เหมาะสมต่อการประเมินคุณภาพตัวอย่างในกระบวนการผลิตหรืองานวิจัยที่ต้องการข้อมูลเบื้องต้นอย่างทันท่วงที (Hossain et al., 2022) นอกจากนั้นกระดาษทดสอบมีความคุ้มค่า 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 จากนั้นจุ่มหัววัดที่ต้องการลงไปในน้ำตัวอย่างแต่ละชนิด โดยไม่ให้สัมผัสกับก้นหรือผนังภาชนะ 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) ซึ่งเป็นเครื่องมือมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณลักษณะด้านสีของวัตถุอาหาร 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 ดังนี้ดังแสดงในรูปที่ 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 วัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษาผลของการปรับคุณภาพน้ำ

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

3.2.2 ขั้นตอนการจุ่มล้างผักสลัดกรีนโอ๊ค

ทำการเตรียมตัวอย่างผักสลัดใบกรีนโอ๊คขนาด 3 x 3 cm. โดยในการทดสอบแบ่งการดำเนินการเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์จากการผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบกระตุ้นน้ำพลาสมารอบเดียว โดยนำผักสลัดใบกรีนโอ๊คขนาด 3 x 3 cm. วิธีการปลูก 2 รูปแบบคือ แบบไฮโดรโปนิกส์ (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. แบบไฮโดรโปนิกส์ (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 x10^0) จากนั้นนำตัวอย่างจากหลอด 10^0 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ไปทำการเจือจางเพิ่มโดยใส่หลอดถัดไปที่มีสารละลาย Peptone 0.1 (%w/v) ปริมาตร 90 มิลลิลิตร เตรียมไว้ในหลอดทดลอง จากนั้นทำการเจือจางเพิ่มในหลอดถัดไป ทั้งนี้การทำความเจือจางเนื่องจากไม่ให้เชื้อที่เลี้ยงเจริญในจานเพาะเชื้อมากจนเกินไปจนนับเชื้อที่เจริญไม่ได้

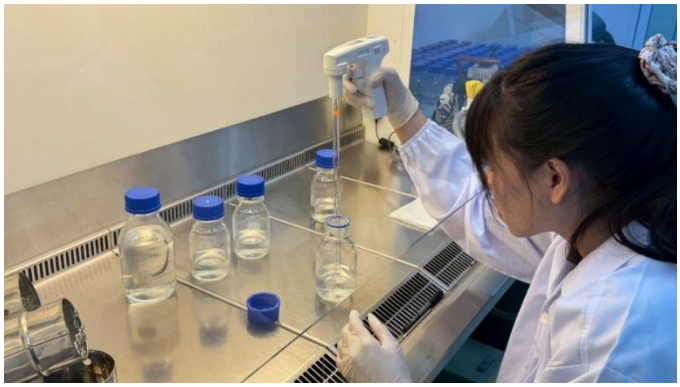
3.2.3.2 การเตรียมสารละลาย Peptone 0.1 (%w/v)

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 จากนั้นนำตัวอย่างจุ่มล้างด้วยน้ำประปาและน้ำกระตุ้นพลาสมาปริมาตร 50 มิลลิลิตร จากนั้นนำน้ำหลังกระบวนการจุ่มล้างปริมาตร 10 มิลลิลิตร เติมน้ำเจือจาง (Diluent) เช่น Buffered Peptone Water (BPW) หรือสารละลาย 0.1% peptone water ปริมาตร 90 มิลลิลิตร แล้วเขย่าเบา ๆ เพื่อให้จุลินทรีย์ที่อยู่บนผิวใบกระจายเข้าสู่สารละลายอย่างสม่ำเสมอ หลอดแรกคือตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเจือจางความเข้มข้นที่ 10^0 (Dilution $x10^0$) 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) หลังจากหยดตัวอย่างเจือจางลงบนฟิล์มในปริมาตรที่กำหนด 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 โดยแสดงผลในรูปของ 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 = ปริมาณกลุ่มเชื้อจุลินทรีย์ที่นับได้จากจานเพาะเชื้อ (CFU)
Quantity plated = ปริมาณเชื้อจากสารละลายตัวอย่าง (ml)
Dilution = ปริมาณการเจือจางความเข้มข้นของเชื้อแต่ละหลอดทดลอง

ผักสลัดกรีนโอ๊คหลังจุ่มล้างน้ำประปาและน้ำกระตุ้นพลาสมา 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 = ค่าเชื้อจุลินทรีย์ของกรรมวิธีจุ่มล้างด้วยน้ำกระตุ้นพลาสมา

หากคิดเป็นร้อยละที่ลดลง สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.4

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

3.3 อิทธิพลของน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาต่อการงอกของเมล็ด

3.3.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาต่อการงอกของเมล็ด

เมล็ดถั่วเขียวที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาต่อการงอกของเมล็ดคือถั่วเขียวพันธุ์ผิวมัน (*Vigna radiata*) จากบริษัทเจียไต๋ซีด จำกัด โดยเลือกใช้เมล็ดที่มีคุณภาพตรงตามเกณฑ์การทดสอบความงอก ≥ 80% เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่มีความน่าเชื่อถือ

3.3.1.1 ขั้นตอนการคัดแยกเมล็ด (Seed Selection Procedure)

โดยการคัดเลือกเมล็ดพันธุ์ก่อนการทดสอบความงอกมีความสำคัญ เนื่องจากช่วยลดความแปรปรวนของข้อมูล และทำให้ผลที่ได้สะท้อนคุณภาพของเมล็ดได้อย่างแท้จริง ขั้นตอนการคัดแยกสามารถดำเนินการได้ดังนี้

การคัดเลือกเมล็ดสำหรับการทดลองเริ่มจากการตรวจสอบด้วยสายตาเพื่อเลือกเมล็ดที่มีรูปร่างสมบูรณ์ ขนาดใกล้เคียงกัน และมีสีสม่ำเสมอ ขณะที่เมล็ดที่แตกหัก ซีด ขึ้นรา หรือมีลักษณะผิดปกติจะถูกคัดออก จากนั้นกำจัดสิ่งปนเปื้อน เช่น เศษดิน กรวด เปลือกเมล็ด และฝุ่นละออง เพื่อป้องกันการรบกวนต่อการงอกและลดความเสี่ยงจากการเจริญของจุลินทรีย์ที่ไม่พึงประสงค์ นอกจากนี้ยังมีการตรวจสอบสุขภาพของเมล็ด โดยคัดทิ้งเมล็ดที่มีร่องรอยการทำลายจากแมลงหรือโรคพืช รวมถึงเมล็ดที่เสื่อมคุณภาพจากการเก็บรักษาไม่เหมาะสม เพื่อให้มั่นใจว่าเมล็ดที่เหลือมีความมีชีวิตและมีโอกาสงอกสูง เมื่อได้เมล็ดที่ผ่านเกณฑ์แล้วจึงจัดเตรียมจำนวนตามที่กำหนดในแต่ละซ้ำการทดลอง เพื่อให้ได้มาตรฐานเดียวกันและสะดวกต่อการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ทั้งนี้หากจำเป็นสามารถล้างเมล็ดด้วยน้ำสะอาดหรือน้ำยาฆ่าเชื้อเจือจางในระยะเวลาสั้นเพื่อกำจัดจุลินทรีย์บนผิว ก่อนล้างด้วยน้ำปราศจากเชื้อและซับให้หมาด เพื่อเตรียมเข้าสู่ขั้นตอนการเพาะเลี้ยงในห้องปฏิบัติการต่อไป ซึ่งการคัดเลือกใบสลัดกรีนโอ๊คที่นำมาใช้ทดลองมีความสำคัญเช่นเดียวกับการคัดเลือกเมล็ดพันธุ์ก่อนการทดสอบความงอก 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 ยังมีการบันทึกค่าความยาวรากและลำต้นอ่อน (shoot) เฉลี่ย รวมทั้งอาจมีการชั่งน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของต้นกล้าในวันสุดท้ายของการทดลอง เพื่อนำมาใช้เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของกล้า (seedling vigor) ค่าตัวแปรที่ใช้ประเมินผลประกอบด้วยดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตารางสรุปตัวแปรและสูตรคำนวณการงอกของเมล็ด

ตัวแปร	คำจำกัดความ (ความหมาย)	สูตรคำนวณ	อ้างอิง
GP – Germination Percentage (เปอร์เซ็นต์การงอก)	สัดส่วนเมล็ดที่งอกสำเร็จเมื่อสิ้นสุดการทดสอบ	$GP = \frac{\sum_{\text{เมล็ดงอก}}}{N_{\text{ทั้งหมด}}} \times 100$	ISTA. (2015).
GI – Germination Index (ดัชนีการงอก)	ดัชนีสะท้อนความเร็วการงอก	$GI = \sum \frac{G_t}{D_t}$ โดยที่ G_t = เมล็ดงอกใหม่ในวันที่ t, D_t = เลขลำดับของวัน	AOSA. (1983).
MGT – Mean Germination Time (เวลาเฉลี่ยการงอก)	เวลาที่เมล็ดโดยเฉลี่ยใช้ในการเริ่มงอก	$MGT = \frac{\sum(n_t)}{\sum n_t}$ n_t คือจำนวนเมล็ดที่งอกในวัน t	Ellis, R. H. (1981).
GR – Germination Rate (อัตราการงอก)	ความเร็วเชิงผกผันของ MGT	$GR = \frac{1}{MGT}$	Ranal, M. A. (2006).
VI – Vigor Index (ดัชนีความแข็งแรงของกล้า)	ดัชนีคุณภาพกล้ารวมข้อมูลปริมาณและความยาวกล้า	VI = (ค่าเฉลี่ยของความยาว ราก + ลำต้นอ่อน) x 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

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

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

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

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