

การกำจัดจุลินทรีย์ในกลุ่มเซลล์ยูคาริโอตในน้ำเสีย โดยใช้สนามไฟฟ้าความถี่สูงและแรงดันไฟฟ้าแรงสูง

ธีรวุฒิ แสงบุญ¹ อัครกิตติ ไชยธนกุลวัฒน์^{2*} ณัฐทิ ถึงสุข³ และมนัส ชะลูด⁴

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการกำจัดจุลินทรีย์ในกลุ่มเซลล์ยูคาริโอตในน้ำเสียโดยใช้สนามไฟฟ้าความถี่สูงและแรงดันไฟฟ้าแรงสูง หลักการและวิธีการกำจัดจุลินทรีย์กลุ่มนี้คือการใช้หลักการสร้างสนามไฟฟ้าแรงดันสูงและความถี่สูงให้กับวงจรสวิตซิ่งสำหรับจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าฟลายแบค หลังจากผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าฟลายแบคจะทำให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นระหว่าง 1-30 กิโลโวลต์ และความถี่ระหว่าง 1-30 กิโลเฮิร์ตซ์ เพื่อจ่ายให้กับชุดกลไกอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้น โดยชุดกลไกอิเล็กทรอนิกส์จะเกิดปรากฏการณ์ในสถานะโคโรนาเพื่อนำไปใช้สำหรับการกำจัดจุลินทรีย์ในกลุ่มเซลล์ยูคาริโอตในน้ำเสีย การวิจัยมีการทดสอบในหลายประเด็นประกอบด้วย การทดสอบวงจรควบคุมการทำงานของกลไกและการสร้างสัญญาณพัลส์วิธึมอดูแลชันความถี่สูงพบว่ากลไกที่ออกแบบสามารถควบคุมแรงดันอินพุตกับแรงดันเอาต์พุตเมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงได้ตามวัตถุประสงค์ เมื่อทดสอบความสัมพันธ์ของค่าแรงดันไฟฟ้าสูงคงที่และแปรผันค่าความถี่สูง และการทดสอบความสัมพันธ์ของค่าความถี่สูงคงที่และแปรผันค่าแรงดันไฟฟ้าสูงพบว่าความถี่ที่เหมาะสมคือ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ และค่าแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมคือ 30 กิโลโวลต์ซึ่งเพียงพอต่อการกำจัดจุลินทรีย์ในกลุ่มเซลล์ยูคาริโอตในน้ำเสีย

คำสำคัญ : โคโรนา หม้อแปลงไฟฟ้าฟลายแบค สนามไฟฟ้า จุลินทรีย์ เซลล์ยูคาริโอต

^{1,2,3} สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี

⁴ บริษัท The Cool Group

* ผู้ประสานงานหลัก e-mail: Akharakit.c@dru.ac.th

วันที่รับบทความ 9 เมษายน 2567

วันที่แก้ไขบทความ 11 กันยายน 2567

วันที่ตอบรับบทความ 27 พฤศจิกายน 2567

Elimination of Eukaryotic Microorganisms in wastewater Using High-frequency and High-voltage Electric Field

Teerawut Savangboon¹ Arckarakit Chaithanakulwat^{2*} Nuttee Thungsuk³
and Manut Chalood⁴

ABSTRACT

This paper presents the elimination of eukaryotic microorganisms in wastewater using high-frequency and high-voltage electric field. The principle and method for eliminating this group of microorganisms are to apply the principle of generating a high-voltage and high-frequency electric field to a switching circuit to supply DC voltage through a flyback transformer. After passing through the flyback transformer, it causes the voltage to rise between 1-30 kV and the frequency to rise between 1-30 kHz to supply a set of designed electrode chamber mechanism. This mechanism is phenomenal in coronal conditions to be used for the elimination of eukaryotic microorganisms in wastewater. The research has been conducted on several issues, including the testing of control circuits, the operation of mechanisms, and the generation of high-frequency PWM signals. It was found that the designed mechanism could control the input and output voltages when the frequency changed according to the purpose. After testing the relationship between constant high voltage values and varied high frequency values, and the relationship between constant high frequency values and varied high voltage values, it was found that the optimal frequency was 10 kHz and the optimal voltage was 30 kV, which were sufficient to eliminate eukaryotic microorganisms in wastewater.

Keywords : corona, flyback transformer, electric field, microorganisms, eukaryotic cell

^{1,2,3} Electrical Engineering Program, Faculty of Science and Technology, Dhonburi Rajabhat University

⁴ The Cool Co.,Ltd.

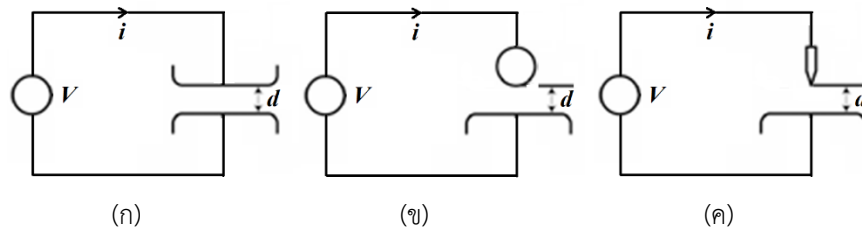
* Corresponding author e-mail: Akharakit.c@dru.ac.th

บทนำ

การเกิดสนามไฟฟ้ารอบประจุไฟฟ้าทำให้เกิดแรงกระทำต่อประจุที่นำเข้ามา ปรากฏการณ์ของประจุนี้เรียกว่าสนามไฟฟ้าจะมีมากหรือน้อยสามารถแสดงหรือวัดได้ในรูปของแรงที่เกิดขึ้นในทำนองเดียวกันจากกฎของคูลอมบ์ (Coulomb's law) ที่กล่าวไว้ว่ามีประจุ Q_1 และ Q_2 มีขนาดเล็กและเป็นจุดวางห่างกันเป็นระยะ r จะเกิดแรงกระทำต่อกันในแนวทิศทางที่เชื่อมโยงระหว่างสองประจุนั้น (Abadi et al., 2022; Wei et al., 2023) จึงสรุปได้ว่าแรงที่เกิดจาก Q_1 ที่มีตำแหน่งทางเวกเตอร์เทียบกับ Q_2 จะเท่ากับแรงในระยะ r ที่เกิดขึ้น

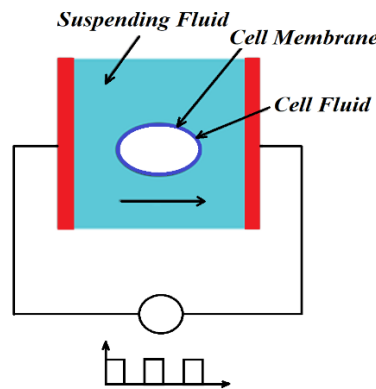
หากพิจารณาทิศทางของแรงที่กระทำต่อประจุบวกและวางอยู่ในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้า ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะแสดงถึงขนาดความเข้มของสนามไฟฟ้า ดังนั้นถ้าเส้นแรงแม่เหล็กมีความหนาแน่นมากนั้นก็คือมีค่าความเข้มสนามไฟฟ้ามากตามไปด้วย ในทำนองเดียวกันความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้าหรือเรียกอีกอย่างว่าดิสเพลสเมนต์ไฟฟ้า (electric displacement) ซึ่งเป็นเวกเตอร์ชนิดหนึ่งแสดงจำนวนฟลักซ์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ตั้งฉากกับแนวที่พิจารณา ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้จำนวนเส้นฟลักซ์และจำนวนคูลอมบ์ของประจุมีค่าเท่ากันตามกฎของกฎของเกาส์ (Gauss's law)

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงคุณลักษณะของสนามไฟฟ้าอาจแบ่งออกได้สองชนิดคือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอและสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ชนิดไม่สม่ำเสมอยังสามารถแบ่งเป็นสองแบบคือแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยและแบบไม่สม่ำเสมอสูง สนามไฟฟ้าจะมีลักษณะรูปแบบใดจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของอิเล็กโทรดดังรูปที่ 1 (ก) (ข) และ (ค) พิจารณารูปที่ 1 (ก) แสดงอิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ในขณะที่รูปที่ 1 (ข) แสดงอิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเพียงเล็กน้อย และรูปที่ 1 (ค) แสดงอิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมาก อย่างไรก็ตามหากป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับอิเล็กโทรดลักษณะต่าง ๆ ที่วางอยู่ในอากาศดังรูป 1 จะพบว่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์จะไม่เท่ากันถึงแม้จะมีระยะของ d เท่ากันก็ตาม สำหรับในกรณีการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้อิเล็กโทรดแล้วทำให้เกิดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจะเกิดเบรกดาวน์หรือที่เรียกว่าการสปาร์กทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากันทุกจุด ในขณะเดียวกันกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในทันทีทันใดค่ากระแสเบรกดาวน์นี้จะถูกจำกัดด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าหรือจากวงจรภายนอกเท่านั้น



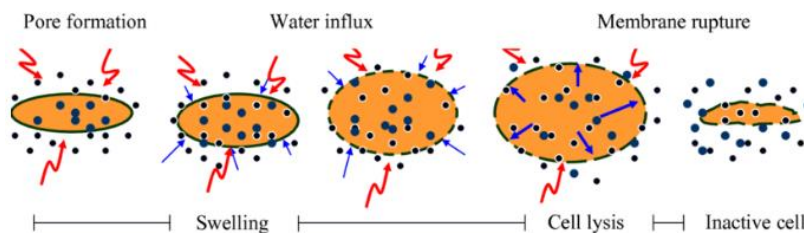
รูปที่ 1 ลักษณะของอิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าแตกต่างกัน

อย่างไรก็ตามหากพิจารณาหลักการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำด้วยสนามไฟฟ้าที่ประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ววางขนานกันโดยจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขั้วหนึ่งซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าอีกขั้วหนึ่งโดยให้อีกขั้วหนึ่งนั้นมียุทธศักย์ไฟฟ้าเป็นกราวด์ (ground) ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 หลักการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำด้วยสนามไฟฟ้า

จากรูปที่ 2 การฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำด้วยสนามไฟฟ้าคือการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโพเรชัน (electroporation) ซึ่งเป็นกระบวนการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ (ดวงพร คันธโชติ, 2545) ดังรูปที่ 3 กระบวนการนี้เป็นวิธีการเพิ่มปริมาณการนำไฟฟ้าและค่าสภาพนำไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์โดยการใช้สนามไฟฟ้าที่มีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับอิเล็กโทรดในปริมาณความเข้มสนามไฟฟ้าสูง (Kaur et al., 2023; Zhou, Hung & Xie, 2023) ซึ่งสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงนี้จะส่งผลทำให้แรงดันที่ตกคร่อมเยื่อหุ้มเซลล์มีค่าสูงเกินกว่าค่าความคงทนของไดอิเล็กทริกของเยื่อหุ้มเซลล์และทำให้เกิดรูพรุนเล็ก ๆ จำนวนมากขึ้นที่เยื่อหุ้มเซลล์ รูพรุนดังกล่าวนี้จะนำไปสู่กระบวนการตายของเซลล์ (Deshpande & Fahrenfeld, 2022; Furukawa et al., 2023)



รูปที่ 3 กระบวนการอิเล็กโทรโพรเซชันที่เกิดกับเซลล์ของจุลินทรีย์

จากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าความเข้มของสนามไฟฟ้าส่งผลกระทบกับเชื้อจุลินทรีย์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของเซลล์รวมถึงการหมุนของเซลล์เมื่ออยู่ภายใต้ความเข้มของสนามไฟฟ้า ในขณะที่เดียวกันเมื่อเซลล์มีขนาดลดลงจะมีความต้องการความเข้มสนามไฟฟ้าสูงขึ้น (Ji et al., 2023) หากเซลล์มีรูปร่างที่แตกต่างกันจำเป็นต้องใช้ความเข้มสนามไฟฟ้าที่สูงมากขึ้น ดังนั้นการเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้าจึงส่งผลทำให้ประสิทธิภาพดีขึ้น การยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ขึ้นอยู่กับค่าความทนทานของไดอิเล็กทริก (dielectric strength) นอกจากนี้ความเข้มสนามไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน การใช้สนามไฟฟ้าที่สูงมากจะเกิดการทำลายเซลล์มาก แต่ก็มีข้อเสียมากตามไปด้วย นั่นคือจะเกิดประกายไฟฟ้าจากกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดฟองอากาศจำนวนมาก ในขณะเดียวกันก็จะทำให้เกิดสนิมที่ขั้วอิเล็กโทรดและอาจเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีที่ไม่พึงประสงค์ได้

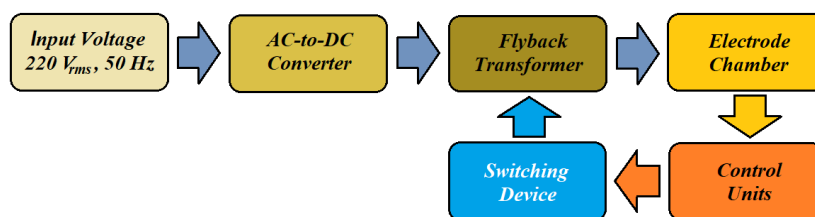
อย่างไรก็ตาม วิธีการสำหรับการทำให้เกิดอิเล็กโทรโพรเซชันในเยื่อหุ้มเซลล์ซึ่งได้ระบุไว้ในงานวิจัยทั่วไปว่าแรงดันไฟฟ้าจะอยู่ในช่วง 0.1-1 โวลต์ และปรากฏการณ์นี้ยังทำให้เกิดพลังงานพัลส์ซึ่ง เนื่องจากระดับของสนามไฟฟ้าแรงดันสูงที่เพิ่มขึ้น (Wills et al., 2023) ในทำนองเดียวกันระดับของสนามไฟฟ้าที่สูงมากจะทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าสูงตามไปด้วย เมื่อเทียบกับระยะทางที่ตั้งฉากกับเส้นศักย์ไฟฟ้าในสนามไฟฟ้าและพลังงานที่เกิดจากรูปคลื่นพัลส์จะเน้นพลังงานที่เป็นรูปคลื่นพัลส์ไฟฟ้าแรงสูงในช่วงสั้น ๆ ซึ่งมักจะใช้ระยะเวลาหลายสิบนานโนวินาทีถึงมิลลิวินาที จากการทดลองพบว่าอิเล็กโทรโพรเซชันสามารถเกิดขึ้นได้เฉพาะในช่วงรูปคลื่นพัลส์แรงดันไฟฟ้าสูง (Mirshahi et al., 2024) และยังคงแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของระดับสนามไฟฟ้าทำให้ประสิทธิภาพของอิเล็กโทรโพรเซชันเพิ่มขึ้นตามข้อจำกัดคือระยะเวลาของรูปคลื่นพัลส์ ซึ่งบ่งชี้ว่ารูปคลื่นพัลส์ไฟฟ้าแรงสูงในระยะสั้น ๆ จะทำให้การกำจัดจุลินทรีย์เกิดเร็วขึ้น ระดับสนามไฟฟ้าแรงดันสูงและการเกิดอิเล็กโทรโพรเซชันในรูปคลื่นพัลส์สั้น ๆ ยังทำให้พลังงานพัลส์ซึ่งเป็นตัวเลือกในอุดมคติสำหรับการกำจัดจุลินทรีย์ (Pirc et al., 2021) การเพิ่มขึ้นของอัตราการเกิดอิเล็กโทรโพรเซชันจะทำให้ปริมาณพลังงานที่จำเป็นสำหรับการกำจัดจุลินทรีย์เกิดขึ้นในระดับที่กำหนด

จากการศึกษาวิจัยนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพของระบบสนามไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้าสูงความถี่สูง (high voltage high frequency: HVHF) สำหรับการกำจัดจุลินทรีย์ในน้ำเสียโดยใช้โหมดพลังงาน

พลังซึ่ง ระบบสนามไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้าสูงความถี่สูงได้รับการพิสูจน์แล้วว่า มีประสิทธิภาพอย่างมาก ในการกำจัดแบคทีเรีย ไวรัส และโปรโตซัวที่มีอยู่ในน้ำโดยใช้โหมดความต่อเนื่อง แต่มีข้อจำกัด เนื่องจากต้องใช้พลังงานสูง (Shahi et al., 2021; Yahaghi & Bazargan, 2022) การใช้พลังงาน เป็นผลมาจากไฟฟ้าแรงสูงที่จำเป็นในการผลิตสนามไฟฟ้าในน้ำ และนำไปสู่การตรวจสอบในโหมด พลังงานพัลส์ซึ่งมีประสิทธิภาพมากขึ้น

วิธีดำเนินการวิจัย

อุปกรณ์และวิธีดำเนินการในงานวิจัยนี้ จะเริ่มจากการออกแบบสร้างวงจรสวิตชิงเพาเวอร์ ซัพพลายแรงดันไฟฟ้าสูงและความถี่สูง (Kularatna, 2018) เพื่อให้เกิดสนามไฟฟ้าโดยใช้สภาวะ โครโรนาในการกำจัดจุลินทรีย์ในกลุ่มเซลล์ยูคาริโอตในน้ำเสีย ที่พิกัดแรงดันไฟฟ้าสูงในช่วง 1-30 กิโลโวลต์ และความถี่สวิตซ์สูงที่ใช้งานในช่วง 1-30 กิโลเฮิร์ตซ์ใช้กับแรงดันไฟฟ้าอินพุตกระแสตรง ในช่วง 1-50 V ซึ่งสามารถแสดงไดอะแกรมของฟังก์ชันการทำงานได้ดังรูปที่ 4

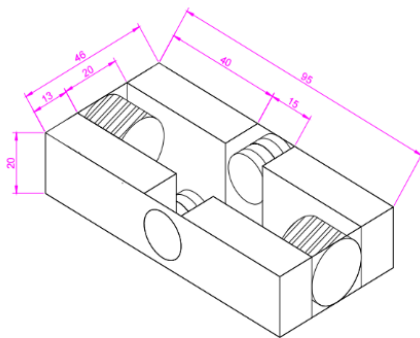


รูปที่ 4 ไดอะแกรมการทำงานของสนามไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้าสูงและความถี่สูง

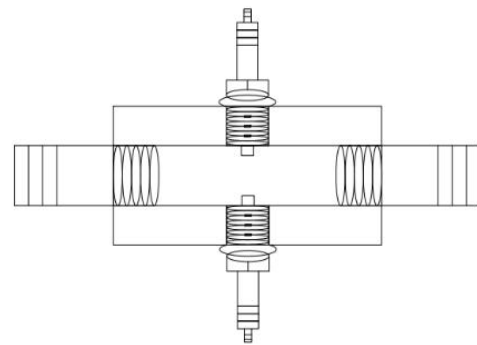
พิจารณาจากรูปที่ 4 อินพุตที่ใช้จะมีแรงดันไฟฟ้าใช้งาน (rms) เท่ากับ 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ จ่ายเข้าสู่ชุด AC-to-DC converter เพื่อแปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นพลังงานไฟฟ้า กระแสตรง (ชัยชนา ตั้งวงศ์ศานต์ และคณะ, 2556) โดยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าอินพุตนี้สามารถปรับ ระดับแรงดันไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 1-50 โวลต์ ในทำนองเดียวกันหลังจากการแปลงพลังงานไฟฟ้า กระแสสลับเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง แล้วจะผ่านการกรองระลอกคลื่นเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้า ที่มีระลอกคลื่นน้อยที่สุดก่อนจ่ายเข้าหม้อแปลงไฟฟ้าฟลายแบค (flyback transformer) เพื่อเพิ่ม ระดับแรงดันไฟฟ้าให้สูงและที่ความถี่สูง จากนั้นจะจ่ายให้กับชุดอุปกรณ์ที่เรียกว่า อิเล็กโทรดแชมเบอร์ (electrode chamber) สำหรับนำไปใช้กับท่อบำบัดน้ำเสียที่ต้องการกำจัดจุลินทรีย์ในกลุ่ม เซลล์ยูคาริโอตยกเว้นจุลินทรีย์จำพวกสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน ในทำนองเดียวกันสำหรับชุดควบคุม (control units) จะมีการตรวจจับปริมาณแรงดันไฟฟ้าสูงและความถี่สูงเพื่อควบคุมให้มีปริมาณ

ที่เหมาะสมกับการกำจัดจุลินทรีย์ในกลุ่มเซลล์ยูคาริโอตเพื่อควบคุมอุปกรณ์สวิตชิง (switching device) ให้ทำงานสัมพันธ์กันกับการผลิตแรงดันไฟฟ้าสูงและความถี่สูงในช่วง 1-30 กิโลโวลต์และความถี่ในช่วง 1-30 กิโลเฮิร์ตซ์หรือตามที่กำหนดไว้

สำหรับกลไกต้นแบบที่สร้างขึ้นสามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 5 (ก) (ข) และ (ค) กลไกนี้กำหนดระยะห่างของอิเล็กโทรดแชมเบอร์เพื่อทำให้เกิดปรากฏการณ์การเกิดสนามไฟฟ้าและกระแสเบรกดาวนคังที่เท่ากับ 1 เซนติเมตร โดยไม่มีการปรับระยะห่างของอิเล็กโทรดแชมเบอร์ในการทดลองนี้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5 กลไกอิเล็กโทรดแชมเบอร์ต้นแบบที่สร้างขึ้น

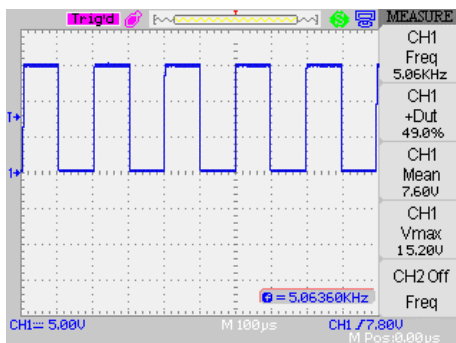
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การกำจัดจุลินทรีย์ในกลุ่มเซลล์ยูคาริโอตในน้ำเสียโดยใช้สนามไฟฟ้าความถี่สูงและแรงดันไฟฟ้าแรงสูงนี้ จะมีการทดลองในประเด็นหลัก 4 ประเด็น ประกอบด้วย การทดสอบวงจรควบคุมการ

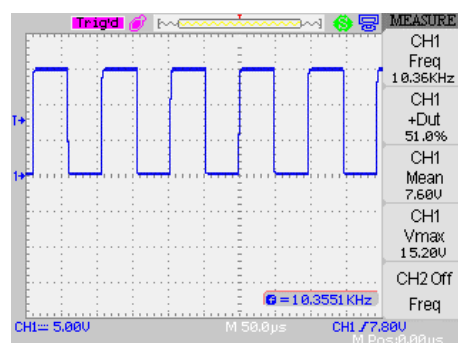
ทำงานของกลไกและการสร้างสัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชัน (pulse width modulation: PWM) ความถี่สูง การทดสอบความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุตกับแรงดันเอาต์พุตเมื่อความถี่เปลี่ยนแปลง การทดสอบความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าสูงคงที่แปรผันตามการเปลี่ยนแปลงความถี่สูง และการทดสอบความสัมพันธ์ความถี่สูงคงที่แปรผันตามการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าสูง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การทดสอบวงจรควบคุมการทำงานของกลไกและการสร้างสัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชัน

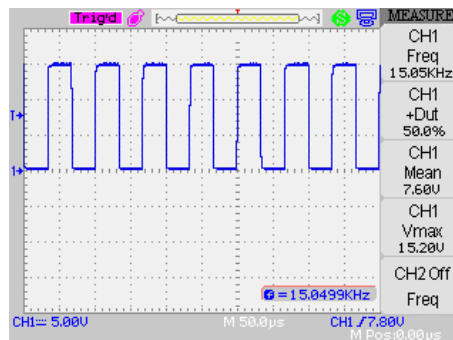
การทดสอบวงจรควบคุมโดยทำการใช้ IC-TL494 สำหรับการสร้างสัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชัน เพื่อนำไปจ่ายให้กับหม้อแปลงฟลายแบคโดยมีช่วงความถี่ระหว่าง 1-30 กิโลเฮิร์ตซ์



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 6 รูปคลื่นสัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชันที่ความถี่ต่าง ๆ

ผลจากการทดสอบการทำงานของหม้อแปลงฟลายแบคในช่วงความถี่ 5 10 และ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่าสามารถวัดรูปคลื่นสัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชันที่ความถี่ต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 6 (ก) (ข) และ (ค)

พิจารณาจากรูปที่ 6 (ก) (ข) และ (ค) ยังพบว่าจากการทดสอบการทำงานของวงจรควบคุมสามารถควบคุมอัตราส่วนของ duty ได้ตามความต้องการของผู้ใช้งาน จากการทดสอบนี้จะเห็นได้ว่าที่ความถี่ 5 กิโลเฮิร์ตซ์ อัตราส่วนของ duty เท่ากับ 0.49 ที่ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ อัตราส่วนของ

duty เท่ากับ 0.51 และที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ อัตราส่วนของ duty เท่ากับ 0.5 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมและยังทำให้อุปกรณ์ไม่เสียหายเนื่องจากการทำงานของอุปกรณ์สร้างสัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชันทำงานเพียง 50% ของพิกัดที่กำหนดไว้สำหรับการจ่ายโหลดอิเล็กทรอนิกส์

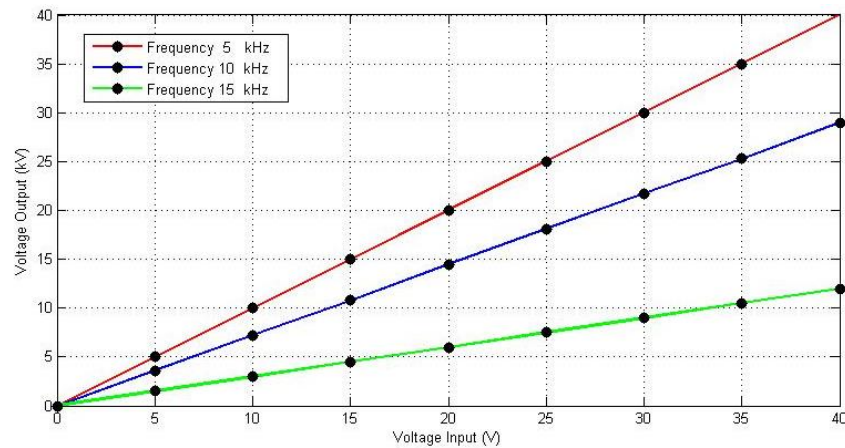
2. การทดสอบความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุตกับแรงดันเอาต์พุตเมื่อความถี่เปลี่ยนแปลง

จากการทดสอบความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าสูงคงที่แปรผันตามการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงเพื่อใช้สำหรับการกำจัดจูลินทรีย์ในน้ำเสียโดยใช้สนามไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้าสูงและความถี่สูงนี้ได้ศึกษาค้นคว้าจากรวบรวมที่เกี่ยวข้อง พร้อมกับค้นคว้าและนำหลักการดังกล่าวเพื่อนำไปสู่การออกแบบและสร้างกลไกต้นแบบโดยทดสอบสมรรถนะการทำงานของกลไกในภาพรวมได้ผลของการทดสอบความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุตต่อแรงดันเอาต์พุต สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1

จากตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าการทดสอบปรับแรงดันอินพุตในช่วงระหว่าง 5-40 โวลต์ จะได้แรงดันเอาต์พุตที่ความถี่ 5 10 และ 15 กิโลเฮิร์ตซ์เป็นสัดส่วนเชิงเส้น และเมื่อวิเคราะห์การทำงานในช่วงความถี่ต่าง ๆ ยังพบว่าเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้แรงดันลดลงส่งผลทำให้การควบคุมความถี่มีผลกระทบต่อการจัดจูลินทรีย์ ในทำนองเดียวกันจากตารางที่ 1 สามารถแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุตต่อแรงดันอินพุต $V_{out} = f(V_{in})$ ได้ดังรูปที่ 7

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุตต่อแรงดันเอาต์พุต

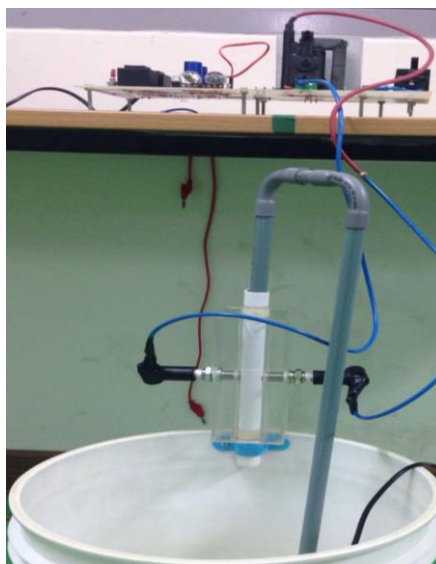
| แรงดันอินพุต (โวลต์) | แรงดันเอาต์พุต (กิโลโวลต์) | | |
|-------------------------|----------------------------|--------------------|--------------------|
| | 5 กิโลเฮิร์ตซ์ | 10 กิโลเฮิร์ตซ์ | 15 กิโลเฮิร์ตซ์ |
| 5 | 5 | 3.6 | 1.5 |
| 10 | 10 | 7.2 | 3.0 |
| 15 | 15 | 10.8 | 4.5 |
| 20 | 20 | 14.5 | 6.0 |
| 25 | 25 | 18.1 | 7.5 |
| 30 | 30 | 21.7 | 9.0 |
| 35 | 35 | 25.3 | 10.5 |
| 40 | 40 | 29.0 | 12.0 |



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของหม้อแปลงฟลายแบคที่ความถี่ต่าง ๆ

3. การทดสอบความสัมพันธ์ของค่าแรงดันไฟฟ้าสูงคงที่และแปรผันค่าความถี่สูง

การทดสอบความสัมพันธ์ของค่าแรงดันไฟฟ้าสูงคงที่และแปรผันค่าความถี่สูงนี้ กำหนดวิธีการทดสอบโดยต้องวงจรสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายแรงดันไฟฟ้าสูงความถี่สูงเข้ากับชุดอิเล็กโทรดแชมเบอร์ และกำหนดให้มีอัตราการไหลของน้ำที่มีจุลินทรีย์หลากหลายชนิดประมาณ 3.3 ลิตรต่อนาที ผ่านท่อน้ำที่ต่อร่วมกับชุดอิเล็กโทรดแชมเบอร์ ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 อิเล็กโทรดแชมเบอร์ต้นแบบ

สำหรับการทดสอบนี้จะใช้น้ำที่มีจุลินทรีย์ที่หลากหลายจำนวน 10 ลิตร ให้น้ำไหลผ่านท่อและชุดอิเล็กทรอนิกส์โทรดอิเล็กทรอนิกส์ โดยจะทดสอบที่ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงคงที่เท่ากับ 20 กิโลโวลต์ และปรับค่าความถี่สูงที่ 5 และ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ เพื่อให้เกิดสนามไฟฟ้าในปริมาณที่เพียงพอและเหมาะสมกับการกำจัดจุลินทรีย์โดยทำให้เกิดสภาวะโคโรนาจากการเกิดสนามไฟฟ้าแรงดันสูง ตารางที่ 2 แสดงปริมาณจุลินทรีย์ก่อนการกำจัดและปริมาณจุลินทรีย์หลังการกำจัด จากการกำหนดเวลาที่ใช้ในการกำจัดจุลินทรีย์ที่แรงดันไฟฟ้า/ความถี่ที่กำหนด

ตารางที่ 2 การทดสอบความสัมพันธ์ของค่าแรงดันไฟฟ้าสูงคงที่และแปรผันค่าความถี่สูง

| ปริมาณจุลินทรีย์ ก่อนการกำจัด (CFU/ml) | เวลาที่ใช้ ในการกำจัด จุลินทรีย์ (นาที่) | ปริมาณจุลินทรีย์หลังการกำจัด (CFU/ml) | |
|--|---|--|----------------------------------|
| | | แรงดันไฟฟ้า/ความถี่ | |
| | | 20 กิโลโวลต์ /5 กิโลเฮิร์ตซ์ | 20 กิโลโวลต์ /15 กิโลเฮิร์ตซ์ |
| 6.7×10^3 | 20 | 3.4×10^3 | 3.8×10^3 |
| 6.7×10^3 | 40 | 1.9×10^3 | 2.6×10^3 |
| 6.7×10^3 | 60 | 1.2×10^3 | 1.4×10^3 |

ในสภาวะโคโรนาจากการเกิดสนามไฟฟ้าแรงดันสูงคงที่และแปรผันค่าความถี่สูงจะส่งผลทำให้เยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์ที่อยู่ในน้ำและไหลผ่านท่อสัมผัสกับสนามไฟฟ้าแรงดันสูง 20 กิโลโวลต์ที่มีความถี่สูง 5 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ มีอัตราส่วนปริมาณจุลินทรีย์ก่อนการกำจัดและปริมาณจุลินทรีย์หลังการกำจัดลดลงในเวลาต่าง ๆ ดังนี้ ที่สนามไฟฟ้าแรงดันสูง 20 กิโลโวลต์ ความถี่สูง 5 กิโลเฮิร์ตซ์ เวลาที่ใช้ในการกำจัดจุลินทรีย์ 20 นาที่ ทำให้จุลินทรีย์ถูกกำจัดเหลือ 3.4×10^3 CFU/ml จากจำนวนทั้งหมด 6.7×10^3 CFU/ml คิดเป็นร้อยละ 50.75 ของจำนวนเริ่มต้น เมื่อใช้เวลามากขึ้นเป็น 40 นาที่ จุลินทรีย์ถูกกำจัดเหลือ 1.9×10^3 CFU/ml คิดเป็นร้อยละ 28.36 ของจำนวนเริ่มต้น และที่เวลา 60 นาที่ จุลินทรีย์ถูกกำจัดเหลือ 1.2×10^3 CFU/ml คิดเป็นร้อยละ 17.91 ของจำนวนเริ่มต้น อย่างไรก็ตามหากเพิ่มความถี่ให้มากขึ้นเป็น 15 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่แรงดันไฟฟ้าสูง 20 กิโลโวลต์เท่าเดิม พบว่า เวลาที่ใช้ในการกำจัดจุลินทรีย์ 20 นาที่ ทำให้จุลินทรีย์ถูกกำจัดเหลือ 3.8×10^3 CFU/ml คิดเป็นร้อยละ 56.72 ของจำนวนเริ่มต้น ที่เวลา 40 นาที่ จุลินทรีย์ถูกกำจัดเหลือ 2.6×10^3 CFU/ml คิดเป็นร้อยละ 38.81 ของจำนวนเริ่มต้น และที่เวลา 60 นาที่ จุลินทรีย์ถูกกำจัดเหลือ 1.4×10^3 CFU/ml คิดเป็นร้อยละ 20.90 ของจำนวนเริ่มต้น

เมื่อพิจารณาในภาพรวมของการกำหนดสนามไฟฟ้าแรงดันสูงให้คงที่เท่ากับ 20 กิโลโวลต์ และแปรผันค่าความถี่สูงที่ 5 และ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ จะพบว่าที่ความถี่สูง 5 กิโลเฮิร์ตซ์ ทำให้อัตราการลดลงของจุลินทรีย์สูงกว่าที่ความถี่สูง 15 กิโลเฮิร์ตซ์ ดังนั้นจากการทดสอบความสัมพันธ์ของค่าแรงดันไฟฟ้าสูงคงที่และแปรผันค่าความถี่สูงจึงสามารถสรุปได้ว่าที่สนามไฟฟ้าแรงดันสูง 20 กิโลโวลต์ และความถี่สูง 5 กิโลเฮิร์ตซ์ สามารถกำจัดจุลินทรีย์ที่อยู่ในน้ำและไหลผ่านท่อให้ลดลงได้มากกว่าสนามไฟฟ้าแรงดันสูง 20 กิโลโวลต์ และความถี่สูง 15 กิโลเฮิร์ตซ์

4. การทดสอบความสัมพันธ์ของค่าความถี่สูงคงที่และแปรผันค่าแรงดันไฟฟ้าสูง

การทดสอบความสัมพันธ์ของค่าความถี่สูงคงที่และแปรผันค่าแรงดันไฟฟ้าสูงนี้ กำหนดวิธีการทดสอบโดยต่อวงจรสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายแรงดันไฟฟ้าสูงความถี่สูงเข้ากับชุดอิเล็กทรอนิกส์และกำหนดให้มีอัตราการไหลของน้ำที่มีจุลินทรีย์หลากหลายชนิดประมาณ 3.3 ลิตรต่อนาที ผ่านท่อน้ำที่ต่อร่วมกับชุดอิเล็กทรอนิกส์ ดังรูปที่ 8 และใช้น้ำที่มีจุลินทรีย์ที่หลากหลายจำนวน 10 ลิตร ให้น้ำไหลผ่านท่อและชุดอิเล็กทรอนิกส์เหมือนกันกับการทดสอบความสัมพันธ์ของค่าแรงดันไฟฟ้าสูงคงที่และแปรผันค่าความถี่สูง จากการทดสอบพบว่า ผลลัพธ์แสดงได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การทดสอบความสัมพันธ์ของค่าความถี่สูงคงที่และแปรผันค่าแรงดันไฟฟ้าสูง

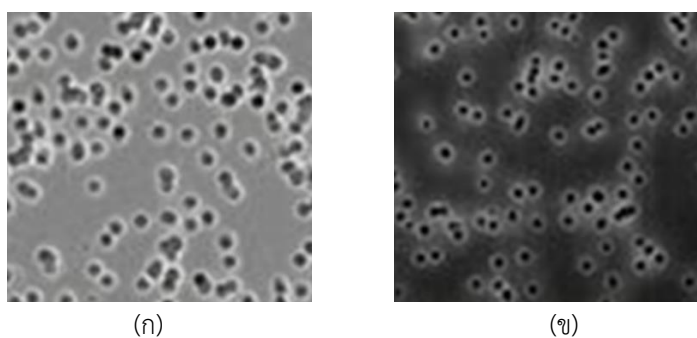
| ปริมาณจุลินทรีย์ ก่อนการกำจัด (CFU/ml) | เวลาที่ใช้ ในการกำจัด จุลินทรีย์ (นาที) | ปริมาณจุลินทรีย์หลังการกำจัด (CFU/ml) | |
|--|--|--|----------------------------------|
| | | แรงดันไฟฟ้า/ความถี่ | |
| | | 20 กิโลโวลต์ /10 กิโลเฮิร์ตซ์ | 30 กิโลโวลต์ /10 กิโลเฮิร์ตซ์ |
| 6.7×10^3 | 20 | 3.2×10^3 | 3.4×10^3 |
| 6.7×10^3 | 40 | 2.1×10^3 | 1.9×10^3 |
| 6.7×10^3 | 60 | 1.8×10^3 | 1.2×10^3 |

ในสภาวะโคโรนาจากการเกิดสนามไฟฟ้าที่แปรผันค่าแรงดันไฟฟ้าและค่าความถี่สูงคงที่จะส่งผลทำให้เยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์ที่อยู่ในน้ำและไหลผ่านท่อสัมผัสกับสนามไฟฟ้าแรงดันสูง 20 และ 30 กิโลโวลต์ ที่มีความถี่สูงคงที่เท่ากับ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ มีอัตราส่วนปริมาณจุลินทรีย์ก่อนการกำจัดและปริมาณจุลินทรีย์หลังการกำจัดลดลงในเวลาต่าง ๆ ดังนี้ ที่สนามไฟฟ้าแรงดันสูง 20 กิโลโวลต์ ความถี่สูง 10 กิโลเฮิร์ตซ์ เวลาที่ใช้ในการกำจัดจุลินทรีย์ 20 นาที ทำให้จุลินทรีย์ถูกกำจัด

จากจำนวนเริ่มต้น 6.7×10^3 CFU/ml เหลือ 3.2×10^3 CFU/ml คิดเป็นร้อยละ 57.76 ที่เวลา 40 นาที จุลินทรีย์ถูกกำจัดเหลือ 2.1×10^3 CFU/ml คิดเป็นร้อยละ 31.34 ของจำนวนเริ่มต้น และที่เวลา 60 นาที จุลินทรีย์ถูกกำจัดเหลือ 1.8×10^3 CFU/ml คิดเป็นร้อยละ 26.87 ของจำนวนเริ่มต้น อย่างไรก็ตามหากเพิ่มแรงดันให้มากขึ้นเป็น 30 กิโลโวลต์ และกำหนดให้ความถี่คงที่เท่ากับ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่าที่เวลา 20 นาที ทำให้จุลินทรีย์ถูกกำจัดเหลือ 3.4×10^3 CFU/ml คิดเป็นร้อยละ 50.74 ของจำนวนเริ่มต้น ที่เวลา 40 นาที จุลินทรีย์ถูกกำจัดเหลือ 1.9×10^3 CFU/ml คิดเป็นร้อยละ 28.36 ของจำนวนเริ่มต้น และที่เวลา 60 นาที จุลินทรีย์ถูกกำจัดเหลือ 1.2×10^3 CFU/ml คิดเป็นร้อยละ 17.91 ของจำนวนเริ่มต้น

เมื่อพิจารณาในภาพรวมของการกำหนดความถี่สูงให้คงที่เท่ากับ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ และแปรผันค่าแรงดันไฟฟ้าสูงที่ 20 และ 30 กิโลโวลต์ จะพบว่าที่แรงดันสูง 20 กิโลโวลต์ทำให้อัตราการลดลงของจุลินทรีย์น้อยกว่าที่แรงดันสูง 30 กิโลโวลต์ ดังนั้นจากการทดสอบความสัมพันธ์ของค่าความถี่สูงคงที่และแปรผันค่าแรงดันไฟฟ้าสูงจึงสามารถสรุปได้ว่าที่สนามไฟฟ้าแรงดันสูง 30 กิโลโวลต์ และความถี่สูง 10 กิโลเฮิร์ตซ์ สามารถกำจัดจุลินทรีย์ที่อยู่ในน้ำและไหลผ่านท่อให้ลดลงได้มากกว่าสนามไฟฟ้าแรงดันสูง 20 กิโลโวลต์ และความถี่สูง 10 กิโลเฮิร์ตซ์

จากการทดสอบสภาวะโคโรนาจากการเกิดสนามไฟฟ้าแรงดันสูงและความถี่สูงยังพบว่าเยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์ที่อยู่ในน้ำและไหลผ่านท่อสัมผัสกับสนามไฟฟ้าแรงดันสูงและความถี่สูงเกิดการแตกตัว และมีรูพรุนเล็ก ๆ จำนวนมากแตกต่างกันไป ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 จุลินทรีย์เกิดแตกตัวและมีรูพรุนเล็ก ๆ

จากรูปที่ 9 จุลินทรีย์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แสดงให้เห็นว่าเยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์เกิดการแตกตัวและมีรูพรุนเล็ก ๆ จำนวนมาก โดยรูปที่ 9 (ก) คือการเปลี่ยนแปลงของเซลล์เมื่อปรับความถี่สูง 5 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่สนามไฟฟ้าแรงดันสูง 20 กิโลโวลต์ และรูปที่ 9 (ข) เมื่อทำการปรับความถี่สูง 10 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่สนามไฟฟ้าแรงดันสูง 30 กิโลโวลต์ ซึ่งปรากฏการณ์เกิดรูพรุนดังกล่าวนี้

จะทำให้วัฏจักรของจุลินทรีย์ถูกย่อยสลายและเซลล์ตายทำให้จุลินทรีย์ในกลุ่มเซลล์ยูคาริโอตในน้ำเสียถูกกำจัดไปได้มากกว่าจุลินทรีย์ชนิดอื่น ๆ

จากการทดสอบครั้งนี้ได้ทำการนำกลไกต้นแบบที่สร้างขึ้นสำหรับการทดลองเก็บตัวอย่างน้ำและทวนสอบโดยการนำน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวข้างต้นพบว่าจุลินทรีย์ในกลุ่มเซลล์ยูคาริโอตจำนวนมากที่เซลล์เกิดแตกตัวและมีรูพรุนเล็ก ๆ ซึ่งวัดโดยเครื่องมือจากการวิเคราะห์ทดสอบจุลินทรีย์ในอาหารและเครื่องดื่ม (ศูนย์ทดสอบและมาตรวิทยา) ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่ากลไกต้นแบบที่สร้างขึ้นสามารถลดจำนวนจุลินทรีย์ในกลุ่มเซลล์ยูคาริโอตในน้ำเสียได้ผลเป็นที่น่าพอใจและเชื่อถือได้

สรุปผล

การกำจัดจุลินทรีย์ในกลุ่มเซลล์ยูคาริโอตในน้ำเสียโดยใช้สนามไฟฟ้าความถี่สูงและแรงดันไฟฟ้าแรงสูง ที่มีจุดเริ่มต้นจากการออกแบบและสร้างกลไกต้นแบบที่ประกอบด้วยวงจรสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายแรงดันไฟฟ้าสูงและความถี่สูงด้วยการจ่ายรูปคลื่นพัลส์ให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าหลายแบบ จะพบว่าเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าอินพุตให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าหลายแบบสามารถวัดแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้ จากการทดสอบการใช้สนามไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้าสูงความถี่สูง เพื่อกำจัดจุลินทรีย์ในกลุ่มเซลล์ยูคาริโอตในน้ำเสีย พบว่าจากการทดสอบความสัมพันธ์ของค่าแรงดันไฟฟ้าสูงคงที่และแปรผันค่าความถี่สูง สรุปได้ว่าที่สนามไฟฟ้าแรงดันสูง 20 กิโลโวลต์ และความถี่สูง 5 กิโลเฮิร์ตซ์ สามารถกำจัดจุลินทรีย์ที่อยู่ในน้ำให้ลดลงได้มากกว่าสนามไฟฟ้าแรงดันสูง 20 กิโลโวลต์ และความถี่สูง 15 กิโลเฮิร์ตซ์ และจากการทดสอบความสัมพันธ์ของค่าความถี่สูงคงที่และแปรผันค่าแรงดันไฟฟ้าสูง สรุปได้ว่าที่สนามไฟฟ้าแรงดันสูง 30 กิโลโวลต์ และความถี่สูง 10 กิโลเฮิร์ตซ์ สามารถกำจัดจุลินทรีย์ที่อยู่ในน้ำให้ลดลงได้มากกว่าสนามไฟฟ้าแรงดันสูง 20 กิโลโวลต์ และความถี่สูง 10 กิโลเฮิร์ตซ์ และเมื่อนำกลไกต้นแบบที่สร้างขึ้นไปทวนสอบโดยการนำน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวข้างต้นพบว่าจุลินทรีย์ในกลุ่มเซลล์ยูคาริโอตจำนวนมากที่เซลล์เกิดแตกตัวและมีรูพรุนเล็ก ๆ ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่ากลไกต้นแบบที่สร้างขึ้นสามารถลดจำนวนจุลินทรีย์ในกลุ่มเซลล์ยูคาริโอตในน้ำเสียได้ผลเป็นที่น่าพอใจและเชื่อถือได้

กิตติกรรมประกาศ

นักวิจัยและคณะทำงานขอแสดงความขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี สมุทรปราการ และศูนย์วิเคราะห์ทดสอบจุลินทรีย์ในอาหารและเครื่องดื่ม (ศูนย์ทดสอบและมาตรวิทยา) ที่ให้การสนับสนุนห้องปฏิบัติการและเครื่องมือวิจัย ทำให้งานวิจัยนี้บรรลุวัตถุประสงค์

เอกสารอ้างอิง

- ดวงพร คันธโชติ. (2545). **นิเวศวิทยาของจุลินทรีย์**. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- ชัยชนา ตั้งวงศ์ศานต์, อาภรณ์ ชีรมงคลรัมย์, ชาญชัย ปลื้มปิติวิริยะเวช, ลัญฉกร วุฒิสีทธิกุลกิจ, มานะ ศรียุทธศักดิ์, ชุมพล อันตรเสน, สุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร และเทียนชัย ประดิศถายน. (2556). **ทฤษฎีวงจรไฟฟ้า ภาควงจรกระแสตรง**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Abadi, M. R. Q. R., Marzebali, M. H., Abolghasemi, V., & Anisi, M. H. (2022). High-voltage pulse generators for electroporation applications: A systematic review. **IEEE Access**, 10, 64933-64951. Retrieved April 5, 2024, from <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3184015>
- Deshpande, A. S., & Fahrenfeld, N. L. (2022). Abundance, diversity, and host assignment of total, intracellular, and extracellular antibiotic resistance genes in riverbed sediments. **Water Research**, 217, 118363. Retrieved April 5, 2024, from <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118363>
- Furukawa, T., Ueno, T., Matsumura, M., Amarasiri, M., & Sei, K. (2022). Inactivation of antibiotic resistant bacteria and their resistance genes in sewage by applying pulsed electric fields. **Journal of Hazardous Materials**, 424, 127382. Retrieved April 5, 2024, from <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127382>
- Ji, Y., Wang, J., Liu, Y., Liu, S., Jiang, X., & Huang, H. (2024). **Isolation and Identification of Postharvest Rot Pathogens in Tangelo and their Potential Inhibition with Acidic Electrolyzed Water**. Retrieved April 5, 2024, from <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3946109/v1>
- Kaur, M., Kumar, S., Samota, M. K., & Lalremmawii. (2023). Ohmic heating technology systems, factors governing efficiency and its application to inactivation of pathogenic microbial, enzyme inactivation, and extraction of juice, oil, and bioactive compounds in the food sector. **Food and Bioprocess Technology**, 17, 299-307. Retrieved April 5, 2024, from <https://doi.org/10.1007/s11947-023-03126-w>
- Kularatna, N. (2018). **DC Power Supplies: Power Management and Surge Protection for Power Electronic Systems**. CRC Press.

- Mirshahi, S., Vahedi, B., Yazdani, S. O., Golab, M., & Sazgarnia, A. (2024). **Calculating Transmembrane Voltage on the Electric Pulse-affected Cell Membrane: Using Molecular Dynamics and Finite Element Simulations**. Retrieved April 5, 2024, from <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3861412/v1>
- Pirc, E., Miklavčič, D., Uršič, K., Serša, G., & Reberšek, M. (2021). High-frequency and high-voltage asymmetric bipolar pulse generator for electroporation based technologies and therapies. **Electronics**, 10(10), 1203. Retrieved April 5, 2024, from <https://doi.org/10.3390/electronics10101203>
- Shahi, S., Khorvash, R., Goli, M., Ranjbaran, S. M., Najarian, A., & Nafchi, A. M. (2021). Review of proposed different irradiation methods to inactivate food processing viruses and microorganisms. **Food Science & Nutrition**, 9(10), 5883-5896. Retrieved April 5, 2024, from <https://doi.org/10.1002/fsn3.2539>
- Wei, S., Chen, T., Hou, H., & Xu, Y. (2023). Recent advances in electrochemical sterilization. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, 937, 117419. Retrieved April 5, 2024, from <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2023.117419>
- Wills, R. C., Doyle, C. P., Zewe, J. P., Pacheco, J., Hansen, S. D., & Hammond, G. R. (2023). A novel homeostatic mechanism tunes PI (4, 5) P2-dependent signaling at the plasma membrane. **Journal of Cell Science**, 136(16). Retrieved April 5, 2024, from <https://doi.org/10.1242/jcs.261494>
- Yahaghi, J., & Bazargan, A. (2022). The synergetic effects of radio-frequency electromagnetic field and pH adjustment on landfill leachate microbial inactivation. **Process Safety and Environmental Protection**, 167, 516-526. Retrieved April 5, 2024, from <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.09.003>
- Zhou, J., Hung, Y. C., & Xie, X. (2023). Application of electric field treatment (EFT) for microbial control in water and liquid food. **Journal of Hazardous Materials**, 445, 130561. Retrieved April 5, 2024, from <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130561>