

การออกแบบอิเล็กโทรดแชมเบอร์ขนาดเล็กสำหรับการพาสเจอร์ไรซ์อาหารเหลว ด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์

นิติพงษ์ ปานกลาง*

บทคัดย่อ

บทความนี้ นำเสนอการออกแบบและพัฒนาอิเล็กโทรดแชมเบอร์ขนาดเล็กสำหรับการใช้ในการพาสเจอร์ไรซ์อาหารเหลวด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ อิเล็กโทรดแชมเบอร์ที่พัฒนาขึ้นเป็นแบบสนามไฟฟ้าร่วม ซึ่งเหมาะสมกับการพาสเจอร์ไรซ์อาหารเหลวแบบต่อเนื่อง อิเล็กโทรดแชมเบอร์มีแชมเบอร์สำหรับสร้างสนามไฟฟ้าบริเวณ PEF Zone ในลักษณะทรงกระบอกรัศมีเท่ากับ 5 mm และมีปริมาตรเท่ากับ 785 mm³ จากการคำนวณในทางทฤษฎี การสร้างสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ที่ระดับแรงดัน V_0 เท่ากับ 30kV และความกว้างของพัลส์เท่ากับ 1.5 μ s ต้องใช้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 15MW/mL หรือคิดเป็นพลังงาน 22.5J/mL เมื่อตัวกลางของเหลวมีความนำไฟฟ้า 0.3S/m การออกแบบและพัฒนาประยุกต์ใช้วิธีไฟโนอิเล็กเมนต์ช่วยในการวิเคราะห์ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในอิเล็กโทรดแชมเบอร์บริเวณ PEF Zone เพื่อศึกษาความเครียดสนามไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ จากการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า พบว่า ความเครียดสนามไฟฟ้าแปรผันโดยตรงกับแรงดัน V_0 ที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรด แรงดัน V_0 ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณ PEF Zone เพิ่มขึ้นด้วย เมื่อจ่ายแรงดัน V_0 ที่ค่าระหว่าง 10kV จนถึง 100kV ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดมีค่าอยู่ระหว่าง 2.36kV/mm ถึง 23.58kV/mm ทั้งนี้ ระดับแรงดัน V_0 ที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเอสเชอริเชียโคไล (E.Coli), แบคทีเรียสแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส (S.Aureus), แบคทีเรียซูโดโมแนส ฟลูออเรสเซนส์ (P.Fluorescens) และยีสต์แซคโคโรไมซิส ซีเรวิสiae (S.Cerevisiae) มีค่าเท่ากับ 30kV/mm และความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณ PEF Zone มีค่ามากกว่า 1.5kV/mm ซึ่งมากกว่าสนามไฟฟ้าวิกฤติของเยื่อหุ้มเซลล์ของเชื้อแบคทีเรียและยีสต์ดังกล่าว

คำสำคัญ: อิเล็กโทรดโพเรซัน ไฟโนอิเล็กเมนต์ การพาสเจอร์ไรซ์ สนามไฟฟ้าแบบพัลส์

Design of Small Chamber Electrode for Liquid Food Pasteurization by Using Pulse-Electric Field

Nitipong Panklang*

Abstract

This paper presents the design and development of small electrode chamber for liquid food pasteurization by using pulse electric field. The developed co-field chamber is suitable for continue pasteurization process. Electric field chamber for buildup electric field inside an electrode chamber at PEF Zone has radius and volume equal to 5mm and 785mm³ respectively. From theoretical computation, power and energy was used to generate the electric field at PEF Zone about 15MW/mL and 22.5J/mL respectively, when the value of V_0 is 30kV, 1.5 μ s pulse width and conductivity 0.3S/m of liquid medium. The finite element method is used for electric-field strength analysis at PEF Zone - inner electrode chamber. Therefore, the purpose of this paper is to study intensity of electric field, which is suitable for microorganism inactivation. From the analysis results show that, the electric-field strength was directly proportional to voltage V_0 of electrode. When value of applied voltage V_0 is between 10kV and 100kV, the electric field strength was equal to 2.36kV/mm - 23.58kV/mm. In order that, at 30kV of voltage V_0 can be used to inactivate the E.coli, S.Aureus, P.Fluorescens and S.Cerevisiae. Electric field strength at PEF Zone was more than 1.5kV/mm that also was more than critical electric field of those bacteria and yeast membrane.

Keywords: electropolation, finite element, pasteurization, pulsed electric field

* Lecture, Department of Electrical Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumtani 12110, Email: p.nitipong@gmail.com

1. บทนำ

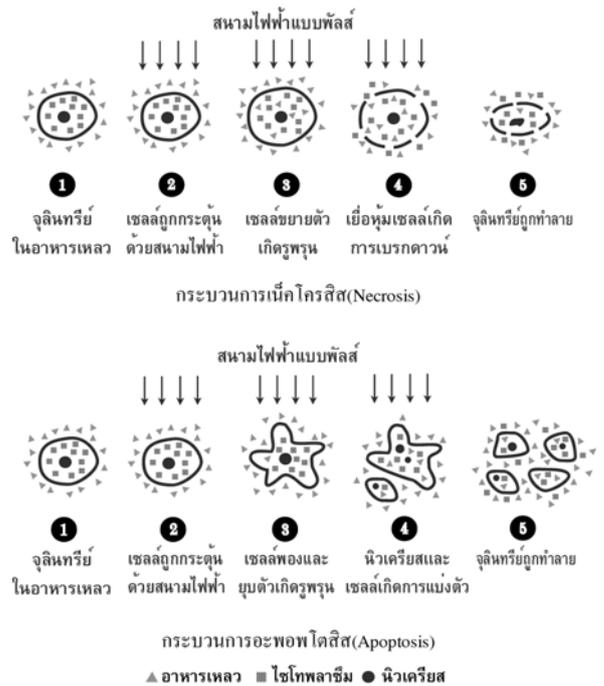
การถนอมอาหารด้วยกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์ (Pasteurization) และการสเตอริไรซ์ (Sterilization) เป็นวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการถนอมอาหารที่เป็นของเหลว อาทิเช่น นม น้ำผลไม้ เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ เป็นต้น การถนอมอาหารด้วยวิธีพาสเจอร์ไรซ์จะใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 - 80 องศาเซลเซียสในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่เป็นอันตรายในอาหาร ส่วนการสเตอริไรซ์ การฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ต้องใช้อุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ขอบเสียอย่างหนึ่งของการใช้ความร้อนในการถนอมอาหารหรือกำจัดเชื้อจุลินทรีย์คือ อาหารจะเสียคุณค่าทางโภชนาการเนื่องจากความร้อนได้ ความร้อนที่เราใช้ฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ยังอาจทำให้ กลิ่น สี รสชาติของอาหารมีการเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนั้นความร้อนยังทำลายเอนไซม์ (Enzymes) บางชนิดที่เป็นประโยชน์อีกด้วย

บทความนี้ นำเสนอการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์โทรดแชมเบอร์ขนาดเล็กสำหรับการพาสเจอร์ไรซ์แบบต่อเนื่องโดยไม่ใช้ความร้อน ซึ่งเป็นการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารเหลวโดยทำให้เกิดการเบรกดาวน์ของเยื่อหุ้มเซลล์ด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ (Pulse Electric Field) ตามกระบวนการอิเล็กโทรโพเรชัน (Electroporation) การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์โทรดแชมเบอร์ดังกล่าว อาศัยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ทำการวิเคราะห์ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในแชมเบอร์สนามไฟฟ้า ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการสร้างสนามไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้ในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารเหลว นอกจากนั้น การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ายังแสดงให้เห็นถึงระดับความเครียดสนามไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้กับการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ แบคทีเรียและยีสต์ชนิดต่างๆ ด้วย

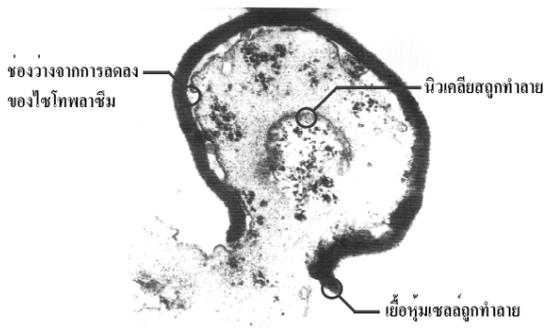
2. การกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ด้วยสนามไฟฟ้า

การกำจัดเชื้อจุลินทรีย์และแบคทีเรียที่เป็นอันตรายในอาหารเหลว อาทิเช่น ซาลโมเนลลา (Salmonella), เอสเชอริเชีย โคไล (Escherichia Coli, E.Coli) ฯลฯ ด้วยกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์หรือการสเตอริไรซ์จำเป็นต้องอาศัยความร้อนที่อุณหภูมิสูง ความร้อนดังกล่าว นอกจาก

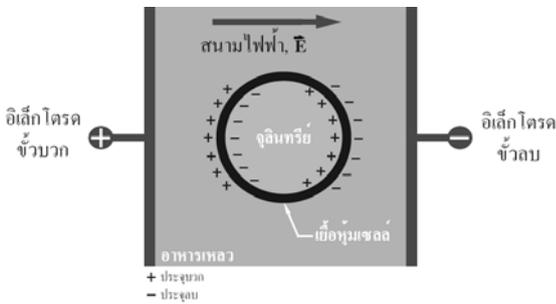
จะทำลายเชื้อจุลินทรีย์แล้ว ยังมีผลต่อคุณค่าทางโภชนาการของอาหาร ทำให้รสชาติ สี กลิ่นเปลี่ยนแปลงและวิตามินบางชนิดถูกทำลาย การกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ด้วยสนามไฟฟ้าเป็นวิธีการพาสเจอร์ไรซ์อาหารเหลวโดยไม่ใช้ความร้อน โดยอาศัยกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โทรโพเรชันหรือเรียกอีกอย่างว่า *Electropermeabilization* (Huub และคณะ, 2007) ซึ่งเป็นกระบวนการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ (Cell Membrane) โดยใช้สนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงและมีลักษณะเป็นพัลส์ สนามไฟฟ้าแบบพัลส์ที่มีความเข้มสูงนี้จะทำให้แรงดันไฟฟ้า (Electric Potential) ที่ตกคร่อมเยื่อหุ้มเซลล์มีค่าสูงเกินกว่าค่าความคงทนไดอิเล็กตริก (Dielectric Strength) ของเยื่อหุ้มเซลล์และทำให้เกิดรูพรุนแบบไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic Pores) จำนวนมากขึ้นที่เยื่อหุ้มเซลล์ รูพรุนแบบไฮโดรโฟบิกทำให้เกิดการถ่ายเทระหว่างของเหลวภายนอกเซลล์กับไซโทพลาซึม (Cytoplasm) ซึ่งเป็นของเหลวภายในเซลล์ เซลล์จะเกิดการขยายตัวและนำไปสู่การเบรกดาวน์ของเยื่อหุ้มเซลล์ ในที่สุด รูปที่ 1 แสดงขั้นตอนของกระบวนการอิเล็กโทรโพเรชันที่เกิดขึ้นกับเซลล์ของจุลชีพแบบเนโครลิซิส (Necrosis) และอะพอพอโตสิส (Apoptosis)



รูปที่ 1 ลำดับขั้นตอนของกระบวนการอิเล็กโทรโพเรชันที่เกิดขึ้นกับเซลล์ของจุลชีพ



รูปที่ 2 เยื่อหุ้มเซลล์ของยีสต์แซคโคโรไมซิส ซีรีวิเซียที่ เกิดการเบรกดาวน์ เนื่องจากสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ (Gustavo และคณะ, 1999)



รูปที่ 3 ประจุไฟฟ้าที่สะสมบริเวณเยื่อหุ้มเซลล์ เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า E

จากรูปที่ 1 กระบวนการตายของเซลล์แบบเนโครซิสเกิดขึ้นเมื่อเซลล์ได้รับความเครียดสนามไฟฟ้า เยื่อหุ้มเซลล์จะเกิดรูพรุน(Pore) โดยรูพรุนดังกล่าว ต้องเป็นรูพรุนแบบไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) ซึ่งทำให้เกิดการถ่ายเทระหว่างของเหลวภายนอกเซลล์กับของเหลวภายในเซลล์หรือไซโทพลาซึม (Cytoplasm) ทำให้เซลล์เกิดการขยายตัวเพิ่มขึ้น การขยายตัวอย่างต่อเนื่องทำให้เยื่อหุ้มเซลล์เบรกดาวน์เป็นส่วนเล็กๆ และนำไปสู่การตายของเซลล์ในที่สุด ในส่วนของกระบวนการตายของเซลล์แบบอะพอพโตซิส เมื่อเซลล์ได้รับความเครียดสนามไฟฟ้า เยื่อหุ้มเซลล์จะเกิดรูพรุนแบบไฮโดรโฟบิก การถ่ายเทระหว่างของเหลวภายนอกเซลล์กับไซโทพลาซึมทำให้เซลล์เกิดการขยายตัวเช่นเดียวกับกระบวนการเนโครซิส แต่การเบรกดาวน์ของเซลล์ตามการอะพอพโตซิส จะเกิดจากการแตกตัวของกรดดีออกซีไรโบนิวคลีอิก (Deoxyribonucleic

Acid) หรือดีเอ็นเอ(DNA) และนิวเคลียส (Nucleus) ภายในเซลล์ กลายเป็นเซลล์ชิ้นเล็กๆ ซึ่งทำให้เซลล์เกิดการเสียหายไม่สามารถคงสภาพและนำไปสู่การตายของเซลล์ รูปที่ 2 แสดงลักษณะการเบรกดาวน์ของเยื่อหุ้มเซลล์ของยีสต์แซคโคโรไมซิส ซีรีวิเซีย (S.Cerevisiae) ตามกระบวนการเนโครซิสเนื่องจากสนามไฟฟ้าพัลส์ 40kV/cm และจำนวนพัลส์เท่ากับ 64 พัลส์

จากโครงสร้างทางชีวภาพของเชื้อจุลินทรีย์ เราสามารถพิจารณาเยื่อหุ้มเซลล์ในลักษณะของชั้นฉนวนไฟฟ้า (Electric Insulator) ที่ห่อหุ้มไซโทพลาซึมไว้ภายในไซโทพลาซึมจะเป็นตัวนำไฟฟ้าและมีความนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) มากกว่าเยื่อหุ้มเซลล์ประมาณ 6 - 8 เท่า (Chen และ Lee, 1994) ด้วยเหตุนี้ บริเวณเยื่อหุ้มเซลล์จึงมีลักษณะคล้ายกับตัวเก็บประจุ (Capacitor) ซึ่งมีฉนวนไฟฟ้าคั่นอยู่ตรงกลาง เมื่อเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ที่อยู่ในอาหารเหลวได้รับสนามไฟฟ้าจากภายนอก ประจุบริเวณเยื่อหุ้มเซลล์จะเกิดการเรียงตัวตามทิศทางของสนามไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3 ประจุดังกล่าวทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเยื่อหุ้มเซลล์และแรงทางกลในรูปของความเค้นทางไฟฟ้า(Electromechanical Stress) ขึ้น แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเยื่อหุ้มเซลล์สามารถคำนวณได้จากสมการ (Schoenbach และคณะ, 1997)

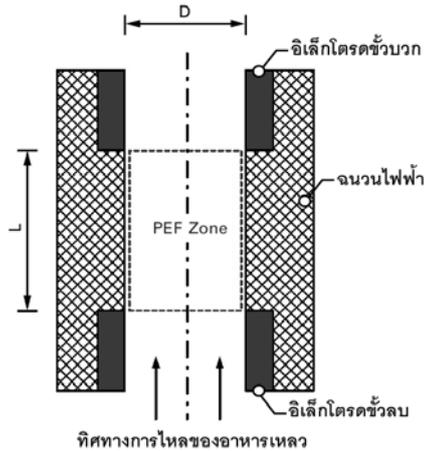
$$U_c = f a_0 E_c \tag{1}$$

เมื่อ U_c คือแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ตกคร่อมเยื่อหุ้มเซลล์, f คือค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างของเซลล์, a_0 คือรัศมีวงนอกสุดของเซลล์และ E_c คือความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติ

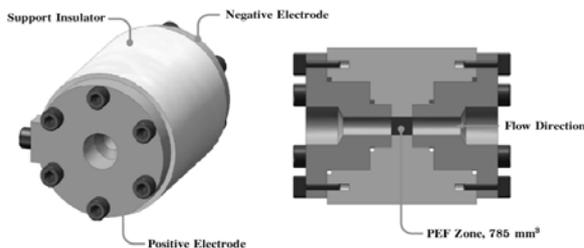
3. การออกแบบอิล็กโตรดแชมเบอร์

อิล็กโตรดแชมเบอร์เป็นอุปกรณ์สำหรับสร้างสนามไฟฟ้าในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารเหลว ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ชนิดได้แก่ อิล็กโตรดแชมเบอร์แบบกลุ่ม (Batch Chamber), อิล็กโตรดแชมเบอร์แบบสนามไฟฟ้าตัดขวาง (Cross-Field Chamber) และ อิล็กโตรดแชมเบอร์แบบสนามไฟฟ้าร่วม (Co-Field Chamber) งานวิจัยนี้ ทำการออกแบบและพัฒนาอิล็กโตรดแชมเบอร์แบบ

สนามไฟฟ้าร่วม โดยมีโครงสร้างพื้นฐานดังแสดงในรูปที่ 4 อิเล็กโทรดแชมเบอร์จะประกอบด้วย อิเล็กโทรดขั้วบวก และขั้วลบที่ถูกยึดติดอยู่บนฉนวน โดยให้มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง ซึ่งเป็นบริเวณที่ใช้สร้างสนามไฟฟ้า เพื่อกำจัดเชื้อจุลินทรีย์หรือเรียกว่า PEF Zone อาหารเหลวที่เราต้องการพาสเจอร์ไรซ์จะถูกส่งผ่านบริเวณ PEF Zone ในขณะที่เราจ่ายแรงดันให้กับอิเล็กโทรด



รูปที่ 4 โครงสร้างพื้นฐานของอิเล็กโทรดแชมเบอร์แบบสนามไฟฟ้าร่วม



รูปที่ 5 แบบจำลอง 3 มิติของอิเล็กโทรดแชมเบอร์แบบสนามไฟฟ้าร่วม



รูปที่ 6 อิเล็กโทรดแชมเบอร์แบบสนามไฟฟ้าร่วม

การกำหนดขนาดของอิเล็กโทรดแชมเบอร์และขนาดของแชมเบอร์บริเวณ PEF Zone จะถูกกำหนดด้วยพารามิเตอร์สองตัวได้แก่ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด

ขั้วบวกและขั้วลบ(L) และเส้นผ่านศูนย์กลางวงในของอิเล็กโทรดแชมเบอร์(D) ในการออกแบบอัตราส่วน $L/D > 1$ เพื่อป้องกันการเบรกดาวนระหว่างอิเล็กโทรดที่อาจจะเกิดขึ้น แต่อัตราส่วน L/D ก็ต้องไม่มากเกินไป จนทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าต่ำหรือต้องใช้แรงดันไฟฟ้าที่สูงมากเพื่อให้มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงๆ บทความนี้ออกแบบอิเล็กโทรดแชมเบอร์ให้มีระยะ L เท่ากับ 10 mm และระยะ D เท่ากับ 10 mm ซึ่งมีอัตราส่วน $L/D = 1.0$

วัสดุที่เลือกมาทำฉนวนและอิเล็กโทรดได้แก่ โพลีเอไมด์ (Polyamide) และเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 (Stainless Steel, SUS316L) เนื่องจากต้องสัมผัสกับอาหารโดยตรง แบบจำลอง 3 มิติของอิเล็กโทรดแชมเบอร์มีลักษณะดังรูปที่ 5 อิเล็กโทรดแชมเบอร์ประกอบด้วยอิเล็กโทรดขั้วบวก (Positive Electrode) และอิเล็กโทรดขั้วลบ (Negative Electrode) ที่ถูกยึดติดกับฉนวนโพลีเอไมด์ภายในฉนวนมีแชมเบอร์ทรงกระบอกรัศมีเท่ากับ 5 mm และมีปริมาตรเท่ากับ 785 mm^3 รูปที่ 6 แสดงส่วนประกอบต่างๆ และลักษณะของอิเล็กโทรดแชมเบอร์แบบสนามไฟฟ้าร่วมที่พัฒนาเสร็จเรียบร้อยแล้ว ข้อจำกัดอย่างหนึ่งของอิเล็กโทรดแชมเบอร์แบบสนามไฟฟ้าร่วม คือ สนามไฟฟ้าภายในอิเล็กโทรดแชมเบอร์บริเวณ PEF Zone จะค่อนข้างไม่สม่ำเสมอ แต่มีความเหมาะสมกับการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์แบบกระบวนการต่อเนื่อง

อาหารเหลวที่ไหลผ่านอิเล็กโทรดแชมเบอร์จะได้รับสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดขั้วบวกและขั้วลบ บริเวณ PEF Zone รวมถึงมีกระแสไฟฟ้าบางส่วนไหลผ่านอาหารเหลว อิมพีแดนซ์ของอาหารเหลวบริเวณ PEF Zone สามารถคำนวณได้จากสมการ(Huub และคณะ, 2007)

$$Z = \frac{(L + 0.254D)}{\frac{1}{4} \sigma \pi D^2} \quad (2)$$

เมื่อ Z คืออิมพีแดนซ์ของตัวกลางของเหลวบริเวณ PEF Zone (Ω/m^2), L คือระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดบริเวณ PEF Zone(m), D คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายในบริเวณ PEF

Zone(m) และ σ คือค่าความนำไฟฟ้าของตัวกลางของเหลว(S/m)

การสร้างสนามไฟฟ้าภายในอิเล็กโทรดแชมเบอร์บริเวณ PEF Zone ทำโดยการจ่ายแรงดันที่มีลักษณะเป็นพัลส์ให้กับอิเล็กโทรดแชมเบอร์ เมื่อเราไม่คำนึงถึงอัตราการไหลของตัวกลางของเหลวที่ไหลผ่าน PEF Zone กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างสนามไฟฟ้าต่อพัลส์แรงดันหนึ่งรูปคลื่นสามารถคำนวณได้จากสมการ (Huub และคณะ, 2007)

$$P_{\text{pulse}} = \sigma E^2 V_{\text{CH}} \quad (3)$$

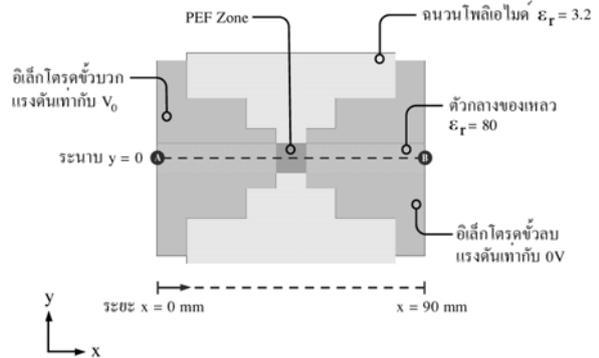
เมื่อ P_{pulse} คือกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างสนามไฟฟ้าต่อพัลส์หนึ่งลูก (W), σ คือความนำไฟฟ้าของตัวกลางของเหลว(S/m), E คือความเครียดสนามไฟฟ้า (V/m) และ V_{CH} คือปริมาตรของอิเล็กโทรดแชมเบอร์บริเวณ PEF Zone (m^3)

4. การวิเคราะห์ผลด้วยคอมพิวเตอร์

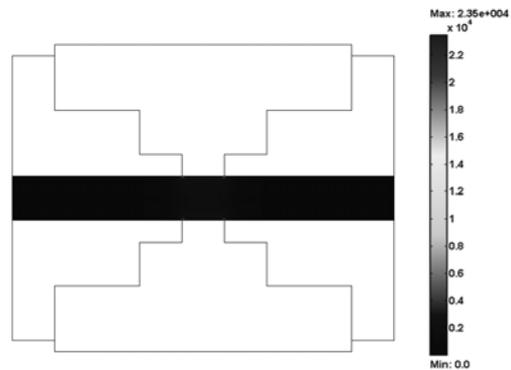
จากอิเล็กโทรดแชมเบอร์ที่ได้ออกแบบและพัฒนาผู้เขียนได้สร้างแบบจำลอง 2 มิติเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในอิเล็กโทรดแชมเบอร์แบบจำลองประกอบด้วยส่วนต่างๆ คือ อิเล็กโทรดขั้วบวกมีแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ V_0 อิเล็กโทรดขั้วลบมีแรงดันไฟฟ้าเท่ากับศูนย์โวลต์ ฉนวนโพลีเอไมด์ที่รองรับอิเล็กโทรดทั้งสองมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) เท่ากับ 3.2(Philippe, 1988) ตัวกลางของเหลวภายในอิเล็กโทรดแชมเบอร์กำหนดให้เป็นน้ำ ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 80 แบบจำลองจะละเลยส่วนที่เป็นโอรังและบริเวณรอยต๋ยอิเล็กโทรดขั้วบวกและลบ การคำนวณไม่คิดประจุค้าง (ρ_0) ที่เกิดขึ้นบริเวณตัวนำและฉนวน องค์ประกอบต่างๆ ของแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 7

การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าใช้วิธีไฟไนเอลเมนต์ (Reece และ Preston, 2000) และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยินยอม (Tolerance) ของผลเฉลยเท่ากับ $1 \times 10^{-6} \%$ การคำนวณแบบจำลองจะถูกแบ่งออกเป็น

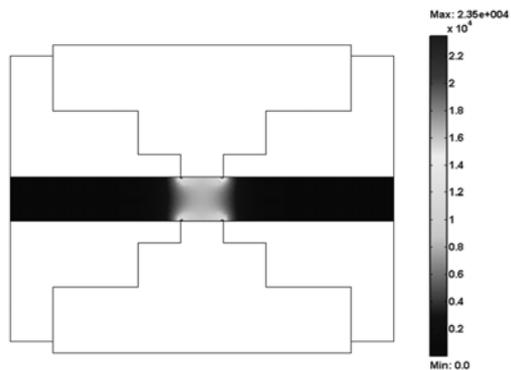
เอลิเมนต์สามเหลี่ยมกำลังสองลากรองจ์ (Lagrange-Quadratic Triangular Element) จำนวน 10,024 เอลิเมนต์ และการแก้สมการเพื่อหาผลเฉลยใช้วิธีตกค้างต่ำสุดแบบวางนัยทั่วไป (Generalized Minimal Residual Method, GMRES)



รูปที่ 7 แบบจำลองอิเล็กโทรดแชมเบอร์ 2 มิติ

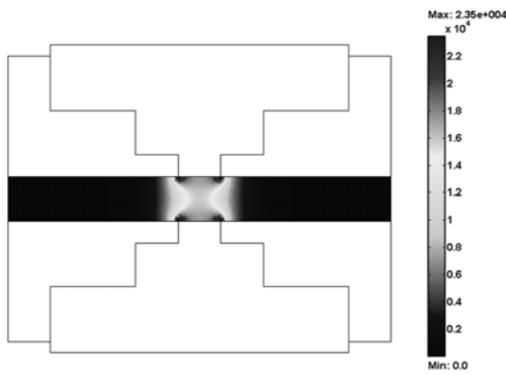


(ก) แรงดัน V_0 เท่ากับ 10kV



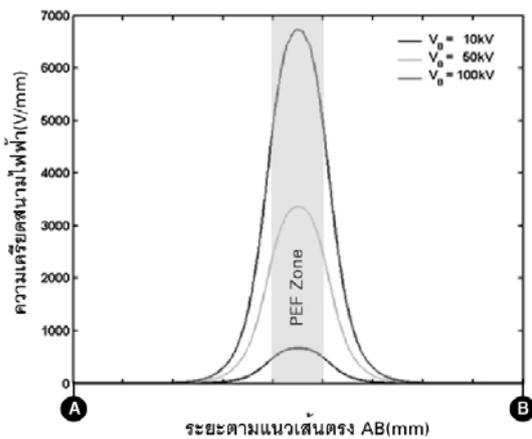
(ข) แรงดัน V_0 เท่ากับ 50kV

รูปที่ 8 ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณภายในอิเล็กโทรดแชมเบอร์ที่ระดับแรงดัน V_0 ต่างๆ

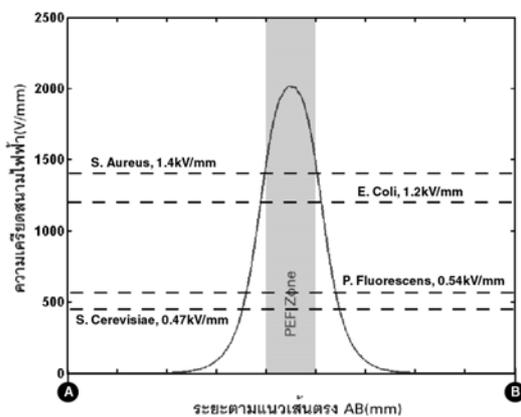


(ค) แรงดัน V_0 เท่ากับ 100kV

รูปที่ 8 ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณภายในอิเล็กโทรดแชมเบอร์ที่ระดับแรงดัน V_0 ต่างๆ (ต่อ)



รูปที่ 9 ความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวแกน x ที่ระนาบ $y=0$ ระหว่างจุด A กับจุด B ที่ระดับแรงดัน 10kV, 50kV และ 100kV



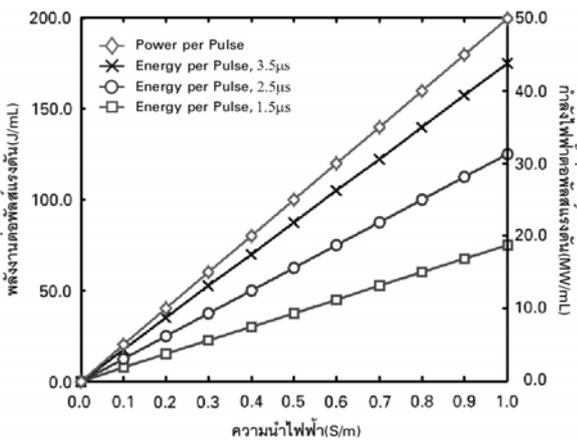
รูปที่ 10 ความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวแกน x ที่ระนาบ $y=0$ ระหว่างจุด A กับจุด B ที่ระดับแรงดัน 30kV

รูปที่ 8 แสดงผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในอิเล็กโทรดแชมเบอร์ เมื่อจ่ายแรงดัน V_0 เท่ากับ 10 kV, 50 kV และ 100 kV ตามลำดับ ส่วนความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวแกน x ที่ระนาบ $y=0$ ระหว่างจุด A กับจุด B ที่ระดับแรงดัน V_0 เท่ากับ 10 kV, 50 kV และ 100 kV แสดงดังรูปที่ 9 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะแปรผันโดยตรงกับแรงดัน V_0 โดยการเพิ่มแรงดัน V_0 ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณ PEF Zone เพิ่มขึ้นด้วยและยังมีความสม่ำเสมอมากกว่าที่แรงดัน V_0 ที่ต่ำๆ

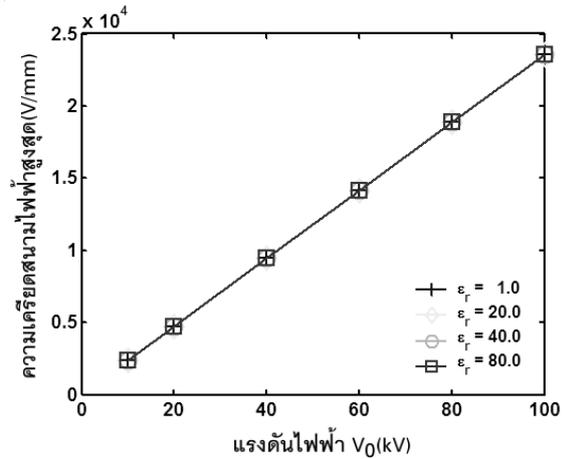
การเลือกแรงดัน V_0 ที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ สามารถพิจารณาจากสนามไฟฟ้าวิกฤติของเยื่อหุ้มเซลล์ (Critical Electric Field of Membrane) โดยเชื้อแบคทีเรียเอสเชอริเชียโคไล (E.Coli) มีสนามไฟฟ้าวิกฤติของเยื่อหุ้มเซลล์ประมาณ 1.2 kV/mm (Grahl และ Markl, 1996) ดังนั้นแรงดัน V_0 ที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเอสเชอริเชียโคไลด้วยอิเล็กโทรดแชมเบอร์ที่พัฒนาขึ้นเท่ากับ 30kV ซึ่งเป็นแรงดันที่ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณ PEF Zone ตามแนวเส้นตรง AB มีค่ามากกว่า 1.5 kV/mm และมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดตรงรอยต่อระหว่างฉนวนกับอิเล็กโทรดขั้วบวกและขั้วลบเท่ากับ 7.065 kV/mm นอกจากนี้ ที่ระดับแรงดัน V_0 เท่ากับ 30 kV ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณ PEF Zone ตามแนวเส้นตรง AB ยังมีค่ามากกว่าสนามไฟฟ้าวิกฤติของเยื่อหุ้มเซลล์ของเชื้อแบคทีเรียสแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส (S.Aureus), แบคทีเรียซูโดโมแนสฟลูออเรสเซนส์ (P.Fluorescens) และยีสต์แซคโคโรไมซิสซีรีวิเซีย (S.Cerevisiae) ดังแสดงในรูปที่ 10 จากสมการที่ (3) เมื่อเราจ่ายแรงดัน V_0 เท่ากับ 30 kV ให้กับอิเล็กโทรดแชมเบอร์ โดยกำหนดให้แรงดัน V_0 มีลักษณะเป็นพัลส์สี่เหลี่ยมที่มีความกว้างเท่ากับ 1.5 μ s และตัวนำของเหลวมีความนำไฟฟ้าเท่ากับ 0.3S/m กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างสนามไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับ 15MW/mL คิดเป็นพลังงาน 22.5J/mL หรือเท่ากับ 0.0000625kWh/mL จากการคำนวณจะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างสนามไฟฟ้ามีค่าสูงถึง 15MW/mL แต่ในทางปฏิบัติกำลังไฟฟ้า

เฉลี่ยที่ใช้จริงจะมีค่าต่ำกว่า เนื่องจากแรงดันที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรดแชมเบอร์มีระยะเวลาต่อครั้งสั้นมาก รูปที่ 11 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าและพลังงานที่ใช้ในการสร้างสนามไฟฟ้าที่ค่าความนำไฟฟ้าของตัวกลางของเหลว $0.1 \leq \sigma \leq 1.0$ เมื่อกำหนด $E = 7.065 \text{ kV/mm}$ และพัลส์แรงดัน V_0 เป็นพัลส์สี่เหลี่ยมที่มีความกว้างเท่ากับ $1.5 \mu\text{s}$, $2.5 \mu\text{s}$ และ $3.5 \mu\text{s}$ ตามลำดับ

รูปที่ 12 แสดงความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดภายในอิเล็กโทรดแชมเบอร์ที่ระดับแรงดัน V_0 ต่างๆ เมื่อตัวกลางของเหลวมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) เท่ากับ 1, 20, 40 และ 80 ตามลำดับ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดบริเวณจุดต่อระหว่างอิเล็กโทรดขั้วบวกกับฉนวนโพลีเอไมด์และระหว่างอิเล็กโทรดขั้วลบกับฉนวนโพลีเอไมด์ เมื่อจ่ายแรงดัน V_0 ที่ค่าระหว่าง 10kV จนถึง 100kV ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดมีค่าอยู่ระหว่าง 2.36 kV/mm ถึง 23.58 kV/mm นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์สนามไฟฟ้ายังพบว่า การเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของตัวกลางของเหลวไม่มีผลต่อความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณอิเล็กโทรดแชมเบอร์หรือบริเวณ PEF Zone แต่อย่างใด



รูปที่ 11 กำลังไฟฟ้าและพลังงานที่ใช้ในการสร้างสนามไฟฟ้าที่ค่าความนำไฟฟ้าของตัวกลางของเหลว $0.1 \leq \sigma \leq 1.0$



รูปที่ 12 ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดภายในอิเล็กโทรดแชมเบอร์ที่ระดับแรงดัน V_0 ต่างๆ เมื่อ ϵ_r เท่ากับ 1, 20, 40 และ 80 ตามลำดับ

5. สรุป

งานวิจัยนี้ นำเสนอการออกแบบและพัฒนาอิเล็กโทรดแชมเบอร์แบบสนามไฟฟ้าร่วมขนาดเล็กที่สามารถนำไปใช้สำหรับการพาสเจอร์ไร้อาหารเหลวด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ อิเล็กโทรดแชมเบอร์ประกอบด้วยอิเล็กโทรดขั้วบวก (Positive Electrode) และอิเล็กโทรดขั้วลบ (Negative Electrode) ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 อิเล็กโทรดทั้งสองจะถูกยึดติดกับฉนวนโพลีเอไมด์ ที่ภายในฉนวนมีช่องว่างหรือแชมเบอร์ทรงกระบอกรัศมีเท่ากับ 5 mm และมีปริมาตรเท่ากับ 785 mm^3 การออกแบบได้ประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการวิเคราะห์ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในบริเวณ PEF Zone จากการวิเคราะห์พบว่า ความเครียดสนามไฟฟ้าจะแปรผันโดยตรงกับแรงดัน V_0 ที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรด โดยการเพิ่มแรงดัน V_0 ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณ PEF Zone เพิ่มขึ้นด้วย ระดับแรงดัน V_0 ที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเอสเชอริเชียโคไล, แบคทีเรียสแตฟีโลคอคคัส ออเรียส, แบคทีเรียซูโดโมแนส ฟลูออเรสเซนส์ และยีสต์แซคโครโมนิส ซีริวิซิอี มีค่าเท่ากับ 30 kV/mm ซึ่งเป็นแรงดันที่ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณ PEF Zone มีค่ามากกว่าสนามไฟฟ้าวิกฤติของเยื่อหุ้มเซลล์ของเชื้อแบคทีเรียและยีสต์ดังกล่าว

ในส่วนของกำลังไฟฟ้าและพลังงานที่ใช้ในการสร้างสนามไฟฟ้าแบบพัลส์เพื่อกำจัดเชื้อจุลินทรีย์แปรผันตรงกับความนำไฟฟ้าของตัวกลางของเหลวและความกว้างของพัลส์แรงดัน V_0 ที่จ่ายให้กับอิเล็กทรอนิกส์โทรดแชมเบอร์ โดยที่ระดับแรงดัน V_0 เท่ากับ 30kV และลักษณะแรงดัน V_0 เป็นพัลส์สี่เหลี่ยมที่มีความกว้างเท่ากับ 1.5 μ s กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างสนามไฟฟ้าเพื่อกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในตัวกลางของเหลวที่มีความนำไฟฟ้า 0.3S/m จะมีค่าเท่ากับ 15MW/mL หรือคิดเป็นพลังงาน 22.5J/mL

ทั้งนี้ อิเล็กทรอนิกส์โทรดแชมเบอร์ที่ออกแบบและพัฒนาในบทความนี้ เป็นเพียงอุปกรณ์ส่วนหนึ่งสำหรับการพาสเจอร์ไร้อาหารเหลวและต้องนำไปพัฒนาต่อยอดร่วมกับอุปกรณ์สร้างสัญญาณพัลส์ไฟฟ้าแรงสูง อุปกรณ์วัดและควบคุมแรงดัน อุปกรณ์จัดเก็บและควบคุมการไหลของอาหารเหลว เพื่อเป็นระบบสำหรับการพาสเจอร์ไร้อาหารเหลวที่สมบูรณ์ต่อไป ซึ่งผู้เขียนกำลังอยู่ระหว่างการวิจัยและพัฒนา

6. เอกสารอ้างอิง

- Chen, W. and Lee, R. (1994). Altered ion channel conductance and ionic selectivity induced by large imposed membrane potential pulse. *Biophysical Journal*. Vol.67, Issue 2, 603 - 612.
- Grahl, T. and Markl, H. (1996). Killing of Microorganisms by Pulse Electric Fields. *Applied Microbiology and Biotechnology*. Vol.45, 148 - 157.
- Gustavo V. Barbosa-Canovas, Usha R. Pothakamury, M. Marcela Gongora-Nieto, Barry G. Swanson (1999). Preservation of Foods with Pulsed Electric Fields, in Chapter 3, 1st ed., Academic Press.
- Huub Lelieveld, Servé Notermans, Sjoerd de Haan (2007). Food Preservation by Pulse Electric Field: From Research to Application, in Chapter 2, 1st ed., Woodhead Publishing Limited.
- Huub Lelieveld, Servé Notermans, Sjoerd de Haan (2007). Food Preservation by Pulse Electric Field: From Research to Application, in Chapter 3, 1st ed., Woodhead Publishing Limited.
- Huub Lelieveld, Servé Notermans, Sjoerd de Haan (2007). Food Preservation by Pulse Electric Field: From Research to Application, in Chapter 4, 1st ed., Woodhead Publishing Limited.
- Philippe Robert (1988). Electrical and Magnetic Properties of Materials, in Chapter 4, 1st ed., Artech House Inc.
- Reece, A.B.J. and Preston, T.W. (2000). Finite Element Methods in Electrical Power Engineering, in Chapter 4, 1st ed., Oxford University Press Inc.
- Schoenbach, K. H., Peterkin, F. E., Alden, R. W., Beebe, S.J. (1997). The effect of pulsed electric field on biological cell: Experiment and application. *IEEE Transactions Plasma Science*. Vol.25, No.2, 284 - 292.