

การออกแบบอิเล็กโทรดแชมเบอร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการถนอมอาหารเหลว
Chamber Electrode Design by using Finite Element Method for Liquid Food Preservation

ณัฐวุฒิ โสมเกษตรินทร์ นิตพงษ์ ปานกลาง*

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

E-mail: p.nitipong@gmail.com*

Natthawuth Somakettarin Nitipong Panklang*

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

E-mail: p.nitipong@gmail.com*

บทคัดย่อ

บทความนี้ นำเสนอการออกแบบและพัฒนาอิเล็กโทรดแชมเบอร์ขนาดเล็กสำหรับการพาสเจอร์ไรซ์อาหารเหลวด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ อิเล็กโทรดแชมเบอร์ที่พัฒนาขึ้นเป็นแบบสนามไฟฟ้าร่วม ซึ่งเหมาะสมกับการพาสเจอร์ไรซ์อาหารเหลวแบบต่อเนื่อง การออกแบบและพัฒนาใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการวิเคราะห์ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในอิเล็กโทรดแชมเบอร์บริเวณ PEF Zone เพื่อศึกษาความเครียดสนามไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ จากการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า พบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าแปรผันโดยตรงกับแรงดัน 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) มีค่าเท่ากับ 30kV และความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณ PEF Zone มีค่ามากกว่า 1.2kV/mm ซึ่งมากกว่าสนามไฟฟ้าวิกฤติของเยื่อหุ้มเซลล์ของเชื้อแบคทีเรียเอสเชอริเชียโคไล

คำหลัก อิเล็กโทรโพรเซชัน, ไฟไนต์เอลิเมนต์, การพาสเจอร์ไรซ์

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. 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 bacteria and electric field strength at PEF Zone was more than 1.2kV/mm that also was more than critical electric field of E.coli membrane.

Keywords: Electroporation, Finite Element, Pasteurization

1. บทนำ

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

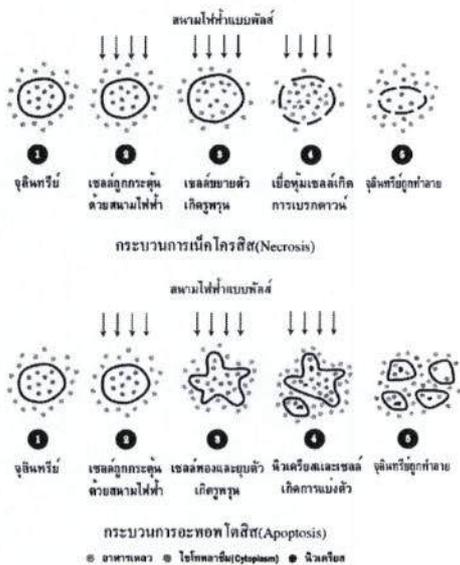
บทความนี้ นำเสนอการออกแบบอิเล็กโทรดแชมเบอร์ขนาดเล็กสำหรับใช้ในกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์แบบต่อเนื่องโดยไม่ใช้ความร้อน โดยการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารเหลวด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ (Pulse Electric Field) การออกแบบอิเล็กโทรดแชมเบอร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำการวิเคราะห์ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณแชมเบอร์สนามไฟฟ้า ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการสร้างสนามไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้ในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารเหลว

2. การกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ด้วยสนามไฟฟ้า

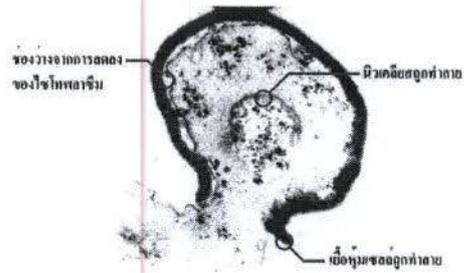
การกำจัดเชื้อจุลินทรีย์และแบคทีเรียที่เป็นอันตรายที่อยู่ในอาหารเหลว อาทิเช่น ซาลโมเนลลา (Salmonella), เอสเชอริเชีย โคไล

(Escherichia Coli, E.Coli) ฯลฯ ด้วยกระบวนการฟาสเจอร์ไรซ์หรือการสเตอริไรซ์จำเป็นต้องอาศัยความร้อนที่อุณหภูมิสูง ความร้อนดังกล่าว นอกจากจะทำลายเชื้อจุลินทรีย์แล้ว ยังอาจมีผลต่อคุณค่าทางโภชนาการของอาหาร ทำให้รสชาติ สี กลิ่นเปลี่ยนแปลง และวิตามินถูกทำลาย การกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ด้วยสนามไฟฟ้าเป็นวิธีการฟาสเจอร์ไรซ์อาหารเหลวโดยที่ไม่ใช้ความร้อน โดยอาศัยกระบวนการอิเล็กโตรโพลีเซชัน(Electroporation) หรือเรียกอีกอย่างว่า Electroporation[1] ซึ่งเป็นกระบวนการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์(Cell Membrane) โดยการเพิ่มค่าความนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) และค่าสภาพยอม(Permeability) ของเยื่อหุ้มเซลล์ การเพิ่มค่าความนำไฟฟ้าและค่าสภาพยอมทำได้โดยใช้สนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงและมีลักษณะเป็นพัลส์ พัลส์สนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงนี้ จะส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้า(Electric Potential) ที่ตกคร่อมเยื่อหุ้มเซลล์มีค่าสูงเกินกว่าค่าความคงทนไดอิเล็กตริก (Dielectric Strength) ของเยื่อหุ้มเซลล์และทำให้เกิดรูพรุน(Pores) เล็ก ๆ จำนวนมากขึ้นที่เยื่อหุ้มเซลล์ รูพรุนดังกล่าวจะนำไปสู่กระบวนการตายของเซลล์(Programmed Cell Death) รูปที่ 1 แสดงขั้นตอนของกระบวนการอิเล็กโตรโพลีเซชันที่เกิดขึ้นกับเซลล์ของจุลินทรีย์แบบเนโครซิส(Necrosis) และอะพอโทสิส(Apoptosis)

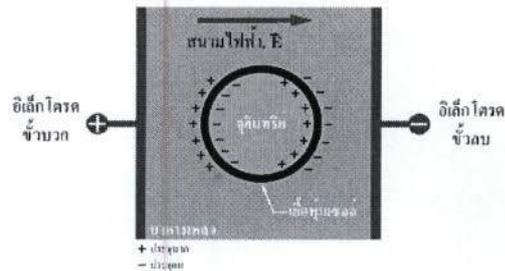
จากรูปที่ 1 เมื่อเยื่อหุ้มเซลล์เกิดรูพรุน จะทำให้เกิดการถ่ายเทระหว่างของเหลวภายนอกเซลล์กับไซโทพลาซึม(Cytoplasm) ซึ่งเป็นของเหลวภายในเซลล์ ทำให้เซลล์เกิดการขยายตัวเพิ่มขึ้นและนำไปสู่การเบรกดาวน์ของเยื่อหุ้มเซลล์ในที่สุด รูปที่ 2 แสดงลักษณะการเบรกดาวน์ของเยื่อหุ้มเซลล์ของยีสต์สายพันธุ์ S.Cerevisiae เนื่องจากพัลส์สนามไฟฟ้า 40kV/cm จำนวนพัลส์เท่ากับ 64 พัลส์



รูปที่ 1 ลำดับขั้นของกระบวนการอิเล็กโตรโพลีเซชันที่เกิดขึ้นกับเซลล์ของจุลินทรีย์



รูปที่ 2 เยื่อหุ้มเซลล์ของยีสต์สายพันธุ์ S.Cerevisiae ที่เกิดการเบรกดาวน์(กระบวนการเนโครซิส) เนื่องจากพัลส์สนามไฟฟ้า[2]



รูปที่ 3 ประจุไฟฟ้าที่สะสมบริเวณเยื่อหุ้มเซลล์

รูพรุนที่เกิดขึ้นบริเวณเยื่อหุ้มเซลล์ต้องเป็นแบบไฮโดรโฟบิก และมีขนาดใหญ่พอที่จะนำไปสู่การตายของเซลล์ โดยปกติรูพรุนจะมีขนาดประมาณ 1 - 3 nm และเกิดครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 0.01 - 0.1% ของพื้นที่เยื่อหุ้มเซลล์ทั้งหมด เยื่อหุ้มเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์จะมีลักษณะเป็นชั้นฉนวน(Insulator) ที่ห่อหุ้ม ไซโตพลาซึมไว้ภายใน ซึ่งไซโตพลาซึมเป็นตัวนำไฟฟ้าและมีความนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) มากกว่าเยื่อหุ้มเซลล์ประมาณ 6 - 8 เท่า[3] ด้วยเหตุนี้บริเวณเยื่อหุ้มเซลล์จึงสามารถพิจารณาในรูปของตัวเก็บประจุที่คั่นด้วยฉนวนที่มีค่าคงตัวของไดอิเล็กตริก(Dielectric Constant, ϵ_r) ต่ำประมาณ 2 เท่า เมื่อเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ที่อยู่ในอาหารเหลวได้รับสนามไฟฟ้าจากภายนอกจะทำให้เกิดการเรียงตัวของประจุตามทิศทางของสนามไฟฟ้าบริเวณผนังของเยื่อหุ้มเซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 3 ประจุดังกล่าวทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเยื่อหุ้มเซลล์และแรงทางกลในรูปของความเค้นทางไฟฟ้า (Electromechanical Stress) ขึ้น

แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเยื่อหุ้มเซลล์สามารถคำนวณได้จากสมการ[4]

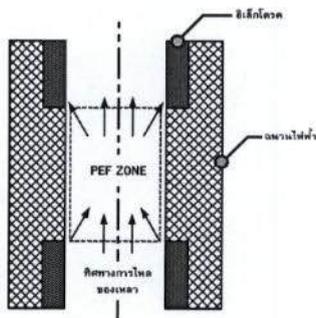
$$U_c = f a_0 E_c \quad (1)$$

เมื่อ U_c คือแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ตกคร่อมเยื่อหุ้มเซลล์, f คือค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างของเซลล์, a_0 คือรัศมีวงนอกสุดของเซลล์ และ E_c คือความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติ

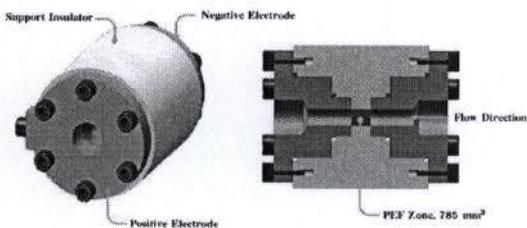
3. การออกแบบอิเล็กโทรดแชมเบอร์

อิเล็กโทรดแชมเบอร์เป็นอุปกรณ์สำหรับสร้างสนามไฟฟ้าในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารเหลว อิเล็กโทรดแชมเบอร์ประกอบด้วยอิเล็กโทรดขั้วบวกและขั้วลบที่ถูกยึดติดอยู่บนฉนวน โดยให้มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง อาหารเหลวที่เราต้องการพาสเจอร์ไรซ์จะถูกส่งผ่านช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด ในขณะที่เราจ่ายแรงดันให้กับอิเล็กโทรด อิเล็กโทรดแชมเบอร์แบ่งออกเป็น 3 ชนิดได้แก่ อิเล็กโทรดแชมเบอร์แบบกลุ่ม (Batch Chamber), อิเล็กโทรดแชมเบอร์แบบสนามไฟฟ้าตัดขวาง (Cross-Field Chamber) และอิเล็กโทรดแชมเบอร์แบบสนามไฟฟ้าร่วม (Co-Field Chamber)

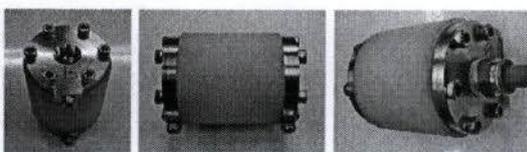
อิเล็กโทรดแชมเบอร์แต่ละแบบมีคุณสมบัติและลักษณะของสนามไฟฟ้าที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้ ทำการออกแบบและพัฒนาอิเล็กโทรดแชมเบอร์แบบสนามไฟฟ้าร่วม โดยมีโครงสร้างพื้นฐานและทิศทางของสนามไฟฟ้างดรูปที่ 4 สนามไฟฟ้าภายในอิเล็กโทรดแชมเบอร์แบบสนามไฟฟ้าร่วมบริเวณ PEF Zone จะค่อนข้างไม่สม่ำเสมอ แต่มีความเหมาะสมกับการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์แบบกระบวนการต่อเนื่อง



รูปที่ 4 โครงสร้างเบื้องต้นของแชมเบอร์แบบสนามไฟฟ้าร่วม



รูปที่ 5 แบบจำลอง 3 มิติของอิเล็กโทรดแชมเบอร์แบบสนามไฟฟ้าร่วม



รูปที่ 6 อิเล็กโทรดแชมเบอร์แบบสนามไฟฟ้าร่วม

งานวิจัยนี้ ประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและสร้างแบบจำลอง 3 มิติ วัสดุที่เลือกมาทำฉนวนและอิเล็กโทรดได้แก่ โพลีเอไมด์ (Polyamide) และเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 (Stainless Steel, SUS316L) ตามลำดับ แบบจำลอง 3 มิติของอิเล็กโทรดแชมเบอร์มีลักษณะดังรูปที่ 5 อิเล็กโทรดแชมเบอร์ประกอบด้วยอิเล็กโทรดขั้วบวก (Positive Electrode) และอิเล็กโทรดขั้วลบ (Negative Electrode) ที่ถูกยึดติดกับฉนวนโพลีเอไมด์ภายในฉนวนมีช่องว่างหรือแชมเบอร์ทรงกระบอกรัศมีเท่ากับ 10 mm และมีปริมาตรเท่ากับ 785 mm³ ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้สร้างสนามไฟฟ้าเพื่อกำจัดเชื้อจุลินทรีย์หรือเรียกว่า PEF Zone รูปที่ 6 แสดงลักษณะของอิเล็กโทรดแชมเบอร์แบบสนามไฟฟ้าร่วมที่พัฒนาเสร็จเรียบร้อยแล้ว

อาหารเหลวที่ไหลผ่านอิเล็กโทรดแชมเบอร์จะได้รับสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดขั้วบวกและขั้วลบบริเวณ PEF Zone รวมถึงมีกระแสไฟฟ้าบางส่วนไหลผ่านอาหารเหลว อิมพีแดนซ์ของอาหารเหลวบริเวณ PEF Zone สามารถคำนวณได้จากสมการ

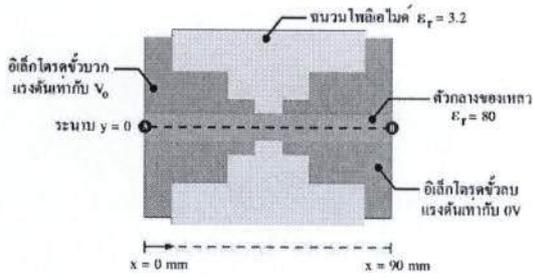
$$Z = \frac{(L + 0.254D)}{\frac{1}{4} \sigma \pi D^2} \quad (2)$$

เมื่อ Z คืออิมพีแดนซ์ของตัวกลางของเหลวบริเวณ PEF Zone (Ω/m^2), L คือระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดบริเวณ PEF Zone (m), D คือเส้นผ่าศูนย์กลางภายในบริเวณ PEF Zone (m) และ σ คือค่าความนำไฟฟ้าของตัวกลางของเหลว (S/m^{-1})

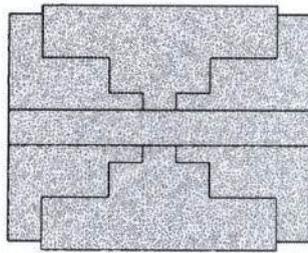
4. การวิเคราะห์ผลด้วยคอมพิวเตอร์

จากอิเล็กโทรดแชมเบอร์ที่ได้ออกแบบและพัฒนา ผู้เขียนได้สร้างแบบจำลอง 2 มิติเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในอิเล็กโทรดแชมเบอร์ แบบจำลองประกอบด้วยส่วนต่างๆ คือ อิเล็กโทรดขั้วบวกมีแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ V_0 อิเล็กโทรดขั้วลบมีแรงดันไฟฟ้าเท่ากับศูนย์โวลต์ ฉนวนโพลีเอไมด์ที่รองรับอิเล็กโทรดทั้งสองมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) เท่ากับ 3.2 [5] ตัวกลางของเหลวภายในอิเล็กโทรดแชมเบอร์กำหนดให้เป็นน้ำ ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 80 แบบจำลองจะละเลยส่วนที่เป็นโอรังและบริเวณนอตยึดอิเล็กโทรดขั้วบวกและลบ การคำนวณไม่คิดประจุค้าง (ρ_0) ที่เกิดขึ้นบริเวณตัวนำและฉนวน องค์ประกอบต่างๆ ของแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 7

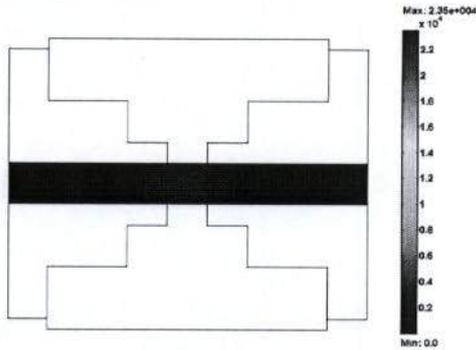
การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [6] และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับ (Tolerance) ของผลเฉลยเท่ากับ $1 \times 10^{-6} \%$ การคำนวณแบบจำลองจะถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมจำนวน 10,024 เอลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 8 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมที่ใช้เป็นเอลิเมนต์กำลังสองลากรองจ์ (Lagrange-Quadratic Element) และการแก้สมการเพื่อหาผลเฉลยใช้วิธีตกค้างต่ำสุดแบบวางนัยทั่วไป (Generalized Minimal Residual Method, GMRES)



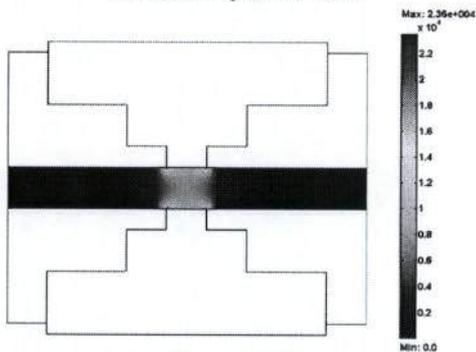
รูปที่ 7 แบบจำลองอิเล็กโทรดแซมเบอร์ 2 มิติ



รูปที่ 8 การแบ่งพื้นที่ของแบบจำลองเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยม จำนวน 10,024 เอลิเมนต์

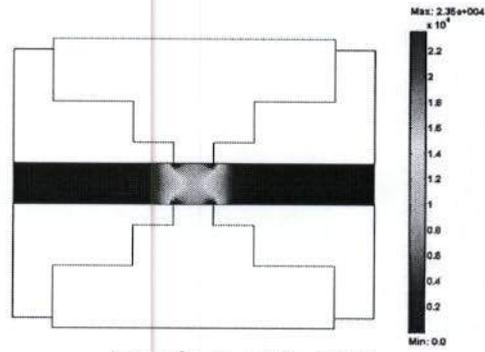


(ก) แรงดัน V_0 เท่ากับ 10kV



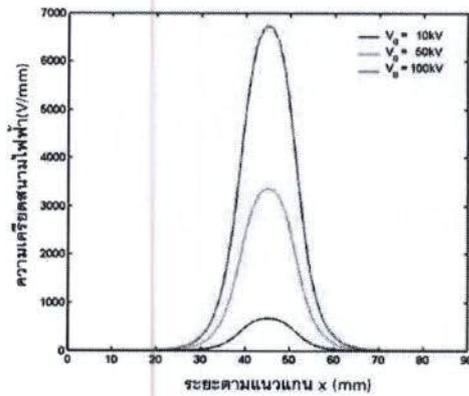
(ข) แรงดัน V_0 เท่ากับ 50kV

รูปที่ 9 ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณภายในอิเล็กโทรดแซมเบอร์ ที่ระดับแรงดัน V_0 ต่างๆ



(ค) แรงดัน V_0 เท่ากับ 100kV

รูปที่ 9 ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณภายในอิเล็กโทรดแซมเบอร์ ที่ระดับแรงดัน V_0 ต่างๆ(ต่อ)



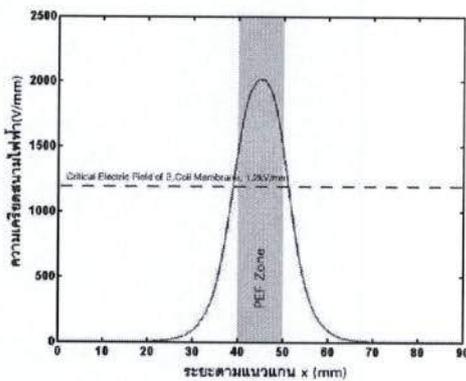
รูปที่ 10 ความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวแกน x ที่ระนาบ $y=0$ ระหว่างจุด A กับจุด B ที่ระดับแรงดัน 10kV, 50kV และ 100kV

รูปที่ 9 แสดงความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในอิเล็กโทรดแซมเบอร์ เมื่อจ่ายแรงดัน V_0 เท่ากับ 10kV, 50kV และ 100kV ตามลำดับ ส่วนความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวแกน x ที่ระนาบ $y=0$ ระหว่างจุด A กับจุด B ที่ระดับแรงดัน V_0 เท่ากับ 10kV, 50kV และ 100kV แสดงดังรูปที่ 10 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะแปรผันโดยตรงกับแรงดัน V_0 โดยการเพิ่มแรงดัน V_0 ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณ PEF Zone (ระยะ $40 \leq x \leq 50$ mm) เพิ่มขึ้นด้วย และยังมีค่าความสม่ำเสมอมากกว่าที่แรงดัน V_0 ที่ต่ำๆ

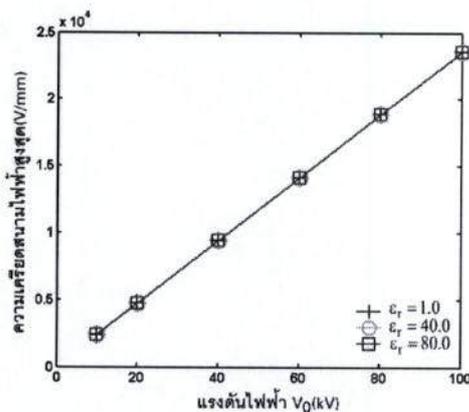
การเลือกแรงดัน V_0 ที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์สามารถพิจารณาจากสนามไฟฟ้าวิกฤติของเยื่อหุ้มเซลล์ (Critical Electric Field of Membrane) โดยเชื้อแบคทีเรียเอสเชอริเชียโคไล (E.Coli) มีสนามไฟฟ้าวิกฤติของเยื่อหุ้มเซลล์ประมาณ 12.1kV/cm หรือประมาณ 1.2kV/mm [7] ดังนั้นแรงดัน V_0 ที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเอสเชอริเชียโคไลด้วยอิเล็กโทรดแซมเบอร์ที่พัฒนาขึ้นเท่ากับ 30kV ซึ่งเป็นแรงดันที่ทำให้

ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณ PEF Zone ตามแนวระนาบ $y = 0$ มีค่ามากกว่า 1.2kV/mm ดังแสดงในรูปที่ 11

รูปที่ 12 แสดงความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดภายในอิเล็กโทรดแชมเบอร์ที่ระดับแรงดัน V_0 ต่างๆ เมื่อตัวกลางของเหลวมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) เท่ากับ 1, 20, 40 และ 80 ตามลำดับ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดบริเวณจุดต่อระหว่างอิเล็กโทรดขั้วบวกกับฉนวนโพลีเอไมด์และระหว่างอิเล็กโทรดขั้วลบกับฉนวนโพลีเอไมด์ดังแสดงในรูปที่ 9 เมื่อจ่ายแรงดัน V_0 ที่ค่าระหว่าง 10kV จนถึง 100kV ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดมีค่าอยู่ระหว่าง 2.36kV/mm ถึง 23.58kV/mm นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์สนามไฟฟ้ายังพบว่า การเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของตัวกลางของเหลวไม่มีผลต่อความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณอิเล็กโทรดแชมเบอร์หรือบริเวณ PEF Zone แต่อย่างใด



รูปที่ 11 ความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวแกน x ที่ระนาบ $y = 0$ ระหว่างจุด A กับจุด B ที่ระดับแรงดัน 30kV



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

สรุป

งานวิจัยนี้ นำเสนอการออกแบบและพัฒนาอิเล็กโทรดแชมเบอร์แบบสนามไฟฟ้าพร้อมขนาดเล็กที่สามารถนำไปใช้สำหรับการพาสเจอร์ไรซ์อาหารเหลวด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ อิเล็กโทรดแชมเบอร์ประกอบด้วยอิเล็กโทรดขั้วบวก(Positive Electrode) และอิเล็กโทรดขั้วลบ(Negative Electrode) ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 อิเล็กโทรดทั้งสองจะถูกยึดติดกับฉนวนโพลีเอไมด์ ที่ภายในฉนวนมีช่องว่างหรือแชมเบอร์ทรงกระบอกรัศมีเท่ากับ 10 mm และมีปริมาตรเท่ากับ 785 mm³ การออกแบบได้ประยุกต์ใช้วิธีไฟโนเอลิเมนต์ช่วยในการวิเคราะห์ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในบริเวณ PEF Zone จากการวิเคราะห์ พบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะแปรผันโดยตรงกับแรงดัน V_0 ที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรด โดยการเพิ่มแรงดัน V_0 ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณ PEF Zone เพิ่มขึ้นด้วย ระดับแรงดัน V_0 ที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเอสเชอริเชียโคไล มีค่าเท่ากับ 30kV ซึ่งเป็นแรงดันที่ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณ PEF Zone มีค่ามากกว่าสนามไฟฟ้าวิกฤติของเยื่อหุ้มเซลล์ของเชื้อแบคทีเรียเอสเชอริเชียโคไล นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์สนามไฟฟ้ายังพบว่า การเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของตัวกลางของเหลวไม่มีผลต่อความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณอิเล็กโทรดแชมเบอร์หรือบริเวณ PEF Zone แต่อย่างใด

เอกสารอ้างอิง

- [1] Electroporation. From : <http://en.wikipedia.org/wiki/Electroporation>.
- [2] Barbosa-Canovas G.V. and et al. 1999. Preservation of Foods with Pulsed Electric Fields, Academic Press, California.
- [3] Chen, W. and Lee, R. 1994. Altered ion channel conductance and ionic selectivity induced by large imposed membrane potential pulse. Biophysical Journal, 67: 603 - 612.
- [4] Schoenbach, K.H. and et al. 1997. The effect of pulsed electric field on biological cell: Experiment and application. IEEE Trans. Plasma Sci., 25: 284 - 292.
- [5] Robert, P. 1988. Electrical and Magnetic Properties of Materials, Artech House Inc., Massachusetts.
- [6] Reece, A.B.J. and Preston, T.W. 2000. Finite Element Methods in Electrical Power Engineering, Oxford, New York.
- [7] Grahl, T. and Markl, H. 1996. Killing of Microorganisms by Pulse Electric Fields. Appl. Microbiol. Biotechnol., 45: 148 - 157.