

การออกแบบห้องฆ่าเชื้อแบบใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์สำหรับ กระบวนการพาสเจอร์ไรซ์อาหารเหลว

พิมพ์พร เสนอิน¹ แพรวพรรณ ปินไชย¹ อรพรรณ แซ่โก้¹

อาทิตย์ ยาวุฑฒิ² และ พานิช อินต๊ะ²

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ต.ป่าป้อง อ.ดอยสะเก็ด จ.เชียงใหม่ 50220

บทคัดย่อ

ในบทความฉบับนี้ได้ทำการออกแบบและคำนวณเชิงตัวเลขของห้องฆ่าเชื้ออาหารเหลวแบบท่อทรงกระบอกซ้อนกันร่วมสำหรับกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์อาหารเหลวที่ใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์ โดยได้พัฒนาแบบจำลองการคำนวณเชิงตัวเลขของห้องฆ่าเชื้อ เพื่อทำนายพฤติกรรมของสนามไฟฟ้าและสนามการไหลภายในห้องฆ่าเชื้อ นำสมการ Navier-Stokes แบบไม่ยุบตัวตามความดัน และสมการ Laplace's มาใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลขสำหรับสนามการไหลและสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการคำนวณทางด้านพลศาสตร์ของไหล CFDRCTM ที่ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบวิธีการปริมาตรสืบเนื่อง จากผลการคำนวณพบว่าค่าความเข้มของสนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุดภายในห้องฆ่าเชื้อที่ประมาณ 1.845×10^6 , 3.689×10^6 และ 5.534×10^6 V/m สำหรับที่แรงดันไฟฟ้าที่ชั่ววिल็กโทรด 10, 20 และ 30 kV ตามลำดับ และค่าความเร็วของของไหลสูงสุดภายในห้องฆ่าเชื้อมีค่าเท่ากับ 1.451, 4.214 และ 6.975 m/s สำหรับอัตราการไหลที่ 1, 3 และ 5 L/min ตามลำดับ โดยผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้จากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบและปรับปรุงห้องฆ่าเชื้อแบบท่อทรงกระบอกซ้อนกันร่วมสำหรับกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์อาหารเหลวต่อไป

คำสำคัญ : อาหารเหลว / การพาสเจอร์ไรซ์ / สนามไฟฟ้าแบบพัลส์ / การคำนวณเชิงตัวเลข / ไฟฟ้าแรงดันสูง

* Corresponding author. E-mail : panich_intra@yahoo.com

¹ นักศึกษาปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมอาหาร วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ

Design of a Pulsed Electric Field Treatment Chamber for a Liquid Foods Pasteurization Process

Pimporn Sen-in¹, Praewpan Pinchai¹, Oraphan Chaekoe¹,
Artit Yawootti², and Panich Intra^{2*}

Rajamangala University of Technology Lanna, Papong, Doi Saket, Chiang Mai 50220

Abstract

In this paper, a coaxial treatment chamber for a liquid foods pasteurization process using pulsed electric field was designed and numerical studied. A computational model of the treatment chamber was developed to investigate the behavior of flow and electric field distributions in this study. The incompressible Navier-Stokes equation and the Laplace's equation are numerically calculated with a commercial computational fluid dynamic software package, CFDRC™ for the flow and electric fields, respectively. The software was based on finite volume method. It was found from the calculations that the maximum of electric field strength inside the chamber was about 1.845×10^6 , 3.689×10^6 and 5.534×10^6 V/m for the inner electrode voltage of 10, 20 and 30 kV, respectively. For the maximum of flow velocity, it was about 1.451, 4.214 and 6.975 m/s for the food flow rate of 1, 3 and 5 L/min, respectively. Prediction of flow and electric field profiles was particularly useful in the design and modify of a coaxial treatment chamber for a liquid foods pasteurization process using pulsed electric field.

Keywords : Liquid Foods / Pasteurization / Pulsed Electric Field / Numerical Simulation / High Voltage

* Corresponding author. panich_intra@yahoo.com

¹ Undergraduate Student, College of Integrated Science and Technology.

² Assistant Professor, College of Integrated Science and Technology.

1. บทนำ

อาหารเหลวในปัจจุบันต้องผ่านกรรมวิธีต่างๆ ในการทำให้สะอาดและยังคงคุณค่าทางสารอาหารต่อผู้บริโภคให้มากที่สุด ซึ่งในปัจจุบันมีหลายวิธี เช่น การพาสเจอร์ไรซ์ (pasteurization) การสเตอริไรซ์ (sterilization) เป็นต้น การพาสเจอร์ไรซ์เป็นการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารเหลวโดยใช้ความร้อนทำลายเอนไซม์ต่างๆ รวมทั้งจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค อุณหภูมิที่ใช้ต้องไม่เกิน 100°C โดยส่วนใหญ่การพาสเจอร์ไรซ์อาหารเหลวจะใช้อุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 63°C และคงอยู่ที่อุณหภูมินี้ไม่น้อยกว่า 30 นาที (low temperature long time) จากนั้นอาหารเหลวจะถูกทำให้เย็นลงทันทีที่อุณหภูมิ 5°C หรือต่ำกว่า โดยสามารถป้องกันไม่ให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นในช่วงระยะเวลาหนึ่งแต่สารอาหารยังอยู่ครบถ้วน ดังนั้นจึงมีประโยชน์ต่ออาหารที่ต้องรับประทานเป็นประจำแต่ไม่สามารถเก็บไว้ได้นาน เช่น นม น้ำผลไม้ เป็นต้น อาหารเหลวที่ผ่านการพาสเจอร์ไรซ์ควรจัดเก็บที่อุณหภูมิต่ำกว่า 4°C หรือ อุณหภูมิตู้เย็น เพื่อยับยั้งการงอกของสปอร์ [1]

แต่ในกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์ที่ได้กล่าวมาในข้างต้นนั้นได้มีการใช้ความร้อนเป็นตัวกลางในการฆ่าเชื้อ จึงมีข้อเสียหลายประการ อาทิเช่น การใช้ความร้อนในการพาสเจอร์ไรซ์สูงเกินไปจะทำลายวิตามินหรือคุณค่าทางโภชนาการของอาหาร อีกทั้งยังมีขั้นตอนกระบวนการฆ่าเชื้อที่ค่อนข้างซับซ้อน ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนของระบบไม่ว่าจะเป็นพลังงานจากไฟฟ้าหรือจากน้ำมันเชื้อเพลิงและความยุ่งยากในการซ่อมบำรุงและรักษาระบบฯ ดังนั้นการพาสเจอร์ไรซ์แบบใช้พลังงานต่ำด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ (pulsed electric field) หรือ PEF (คือสนามไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นช่วงเวลาสั้นมาก μs) จึงเป็นวิธีการที่สามารถแก้ไขปัญหาการใช้พลังงานและความซับซ้อนของระบบการพาสเจอร์ไรซ์ดังกล่าวได้ รวมถึงสามารถประหยัดเวลาในการฆ่าเชื้อได้อีกด้วย [2 – 4] เนื่องจากการพาสเจอร์ไรซ์อาหารเหลวด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์เป็นกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์แบบไม่ใช้ความร้อน (non-thermal pasteurization) โดยอาหารที่ผ่านการพาสเจอร์ไรซ์จะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (มีความเข้มของพลังงานในช่วง $10^1 - 10^4 \text{ J/kg}$) ซึ่งข้อดีอย่างหนึ่งของการพาสเจอร์ไรซ์แบบสนามไฟฟ้าพัลส์คืออาหาร

ยังคงมีรสชาติ คุณค่าทางโภชนาการ สี กลิ่น และรสชาติเหมือนก่อนที่จะผ่านกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์ฯ ดังกล่าว [2 – 4]

การฆ่าเชื้อในน้ำนมด้วย PEF เป็นสนามไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นพัลส์หรือเป็นช่วงเวลาเกิดจากการจ่ายพัลส์แรงดันไฟฟ้าให้กับอิเล็กโทรด (electrode) เป็นเทคโนโลยีที่ไม่ใช้ความร้อน (non-thermal) ในการฆ่าเชื้อในน้ำนม แต่เป็นการใช้กระแสไฟฟ้าที่มีความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงผ่านขั้วอิเล็กโทรดที่สัมผัสกับอาหารโดยตรง กระแสไฟฟ้าจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำบริเวณเยื่อหุ้มเซลล์ [2] และทำให้เยื่อหุ้มเซลล์แตกจากการเกิดรูพรุน รูพรุนดังกล่าวจะนำไปสู่กระบวนการตายของเซลล์ (programmed cell death) ในสองลักษณะคือ อะพอพโตสิส (apoptosis) และเนโครลิซิส (necrosis) โดยการศึกษาทางานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้มีการพัฒนาระบบ PEF อย่างต่อเนื่องโดยเริ่มจาก Qinghua *et al.* [5] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการพาสเจอร์ไรซ์ด้วย PEF โดยคำนึงถึงความเป็นฉนวนพลังงานและอุณหภูมิที่ให้แก่ระบบ Wu *et al.* [6] ทำการออกแบบตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจรกำเนิด PEF ที่เหมาะสม Engelko *et al.* [7] ได้พัฒนาวงจรกำเนิดพัลส์ความถี่สูง โดยสามารถปรับความถี่ตั้งแต่ 10 Hz ถึง 100 Hz ในปีเดียวกัน Heinz and Alvarez [8] ใช้ PEF ในการยืดอายุของอาหารเหลว Sato *et al.* [9] ทำการปรับปรุงอิเล็กโทรด และ Alkhafaji and Farid [10] ได้ทดสอบห้องฆ่าเชื้อโดยมีการควบคุมอุณหภูมิ ในปีเดียวกัน Chen *et al.* [11] สามารถสร้างพัลส์ได้โดยตรงจากแรงดันกระแสสลับรูปคลื่นไซน์ Gerlach *et al.* [12] ทำการจำลองเชิงตัวเลขของ PEF และ Kang and Jianping [13] ออกแบบห้องฆ่าเชื้ออาหารเหลวโดยมีการรักษาพารามิเตอร์ เพื่อให้บรรลุประสิทธิภาพที่ดีขึ้นของการประมวลผล ในปีเดียวกัน นิตพงศ์และคณะ [14] ได้พัฒนาวงจรกำเนิดพัลส์แรงดันไฟฟ้าเพื่อสร้าง PEF สำหรับอาหารเหลว และในปีต่อมา ทวีวรรณ [15] ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมในหัวข้อของ Heinz and Alvarez [8]

จากงานวิจัยที่ได้ศึกษายังมีการศึกษาที่ไม่ครอบคลุมสำหรับการออกแบบห้องฆ่าเชื้อด้วย PEF เนื่องจากขาดการวิเคราะห์สนามการไหล สนามไฟฟ้า และการออกแบบห้องฆ่าเชื้อ ซึ่งภายในห้องฆ่าเชื้อยังไม่มีควม

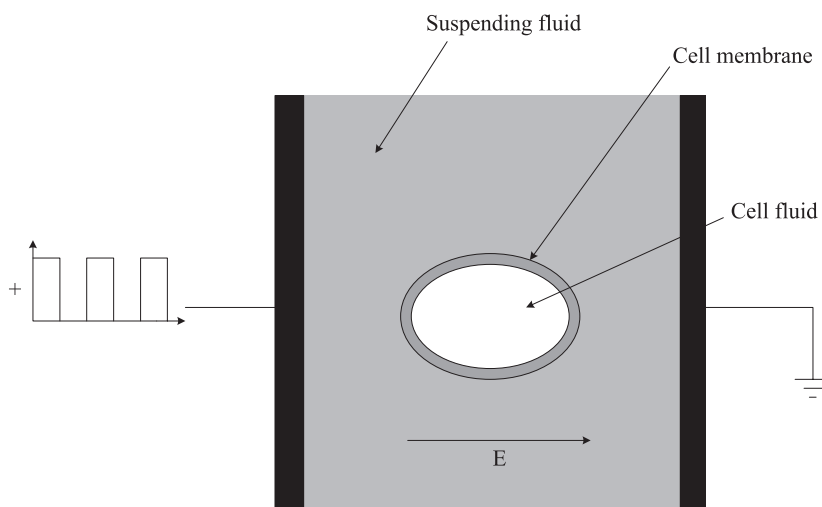
สม่าเสมอในการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า ทำให้โอกาสที่จุลินทรีย์ในอาหารที่ต้องการทำลายได้ทั้งหมดมีน้อย ในบทความฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบห้องฆ่าเชื้ออาหารเหลวแบบท่อทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม (coaxial treatment chambers) สำหรับกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์อาหารเหลวที่ใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์ โดยจะศึกษาพฤติกรรมและลักษณะการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและสนามการไหลของของไหลภายในห้องฆ่าเชื้อจากการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามการไหลของของไหลที่เกิดขึ้นภายในห้องฆ่าเชื้อด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการคำนวณทางด้านพลศาสตร์ของไหล (computational fluid dynamic, CFD) หรือ ที่เรียกว่า CFDRTM ที่ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบวิธีการปริมาตรสืบเนื่อง (finite volume method, FVD)

2. หลักการฆ่าเชื้อในอาหารเหลวด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์

รูปที่ 1 แสดงหลักการฆ่าเชื้อในอาหารเหลวด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ที่ประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ววางซ้อนกันโดยจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์ให้กับขั้วหนึ่งและให้อีกขั้วหนึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นกราวด์ (ground) โดยการฆ่าเชื้อในอาหารเหลวด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์

(pulsed electric field treatment) คือการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในอาหารเหลวด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโพลชัน (electroporation) ซึ่งเป็นกระบวนการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ (cell membrane) โดยการเพิ่มค่าความนำไฟฟ้า (electrical conductivity) และค่าสภาพยอมไฟฟ้า (permeability) ของเยื่อหุ้มเซลล์ โดยการเพิ่มค่าความนำไฟฟ้าและสภาพยอมไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์สามารถทำได้โดยใช้สนามไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นพัลส์หรือเป็นช่วงเวลาเกิดจากการจ่ายพัลส์แรงดันไฟฟ้าให้กับอิเล็กโทรดที่มีความเข้มสนามไฟฟ้า (electric field strength) สูงประมาณ 4×10^6 V/m และมีลักษณะเป็นพัลส์ในช่วงประมาณ 10 ns ถึง 20 μ s ซึ่งสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ที่มีความเข้มสูงนี้จะส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมเยื่อหุ้มเซลล์มีค่าสูงเกินกว่าค่าความคงทนของไดอิเล็กตริก (dielectric strength) ของเยื่อหุ้มเซลล์และทำให้เกิดรูพรุน (pores) เล็กๆ จำนวนมากขึ้นที่เยื่อหุ้มเซลล์ รูพรุนดังกล่าวจะนำไปสู่กระบวนการตายของเซลล์ (programmed cell death) ในที่สุด โดยแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมเยื่อหุ้มเซลล์สามารถคำนวณได้จาก [16]

$$V_{\text{cell}} = f r_{\text{cell}} E_{\text{cell}} \quad (1)$$



รูปที่ 1 หลักการฆ่าเชื้อในอาหารเหลวด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์

เมื่อ V_{cell} คือแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ตกคร่อมที่เยื่อหุ้มเซลล์ f คือค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับรูปร่างของเซลล์ r_{cell} คือรัศมีวงนอกสุดของเยื่อหุ้มเซลล์ และ E_{cell} คือค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เยื่อหุ้มเซลล์ สำหรับห้องฆ่าเชื้อที่มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกซ้อนกันรวม ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เยื่อหุ้มเซลล์สามารถหาได้จาก [17]

$$E_{cell} = \frac{V}{r \ln(r_2/r_1)} \quad (2)$$

เมื่อ V คือแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วอิเล็กโทรดของห้องฆ่าเชื้อ r คือระยะรัศมี และ r_1 และ r_2 คือระยะรัศมีของขั้วอิเล็กโทรดด้านใน (inner) และด้านนอก (outer)

3. การออกแบบห้องฆ่าเชื้ออาหารเหลว

3.1 ความต้องการในการออกแบบ

เป้าหมายในการออกแบบในงานวิจัยนี้ คือเพื่อออกแบบห้องฆ่าเชื้อในอาหารเหลวด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์สำหรับกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์ที่ใช้พลังงานต่ำที่เหมาะสมต่อการทำงานระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานภายในประเทศ และลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ ดังนั้น เพื่อให้บรรลุเป้าหมายที่ตั้งไว้ห้องฆ่าเชื้อฯ ที่ออกแบบนั้นจะต้องสามารถกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารเหลวที่ทำให้เกิดโรคพื้นฐานได้แก่ *Escherichia coli*, *Listeria* และ *Salmonella* spp. จากกระบวนการอิเล็กโทรโพรเซชันที่ได้กล่าวมาในช่วงต้นค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าภายในห้องฆ่าเชื้อฯ ต้องมีค่ามากกว่า 4×10^6 V/m [2 – 4]

ตารางที่ 1 เงื่อนไขในการออกแบบโดยรวมของห้องฆ่าเชื้อฯ

เงื่อนไขในการออกแบบ	คุณสมบัติ
ความเข้มของสนามไฟฟ้า	4×10^6 V/m
แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอิเล็กโทรด	10 - 30 kV
ความถี่ของพัลส์	10 - 20 kHz
ศักย์ไฟฟ้า	ขั้วบวก
เชื้อจุลินทรีย์ที่กำจัด	<i>Escherichia coli</i> , <i>Listeria</i> และ <i>Salmonella</i> spp.
ความดันของเหลวทำงาน	1 bar
อัตราการไหลของอาหารเหลว	1 - 5 L/min
ขนาดมิติและลักษณะ	เป็นท่อทรงกระบอกซ้อนกันรวม มีขนาดเล็ก และสามารถถอด และติดตั้งได้ง่าย
การซ่อมบำรุง	ชั่วโมงในการทำงานอย่างน้อย 24 ชั่วโมง หลังจากทำความสะอาดแล้ว

เนื่องจากข้อจำกัดของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มีอยู่ ดังนั้น ในการศึกษานี้จะกำหนดให้แรงดันที่จ่ายให้ขั้วอิเล็กโทรดอยู่ในช่วง 0 ถึง 30 kV ที่ความถี่ของพัลส์ในช่วง 10 ถึง 20 kHz และกำหนดให้มีอัตราการไหลของอาหารเหลวอยู่ในช่วง 1 ถึง 5 L/min ที่ความดันของอาหารเหลวภายในเท่ากับความดันบรรยากาศคือ 1 bar ต้นแบบจะต้องสามารถถอดประกอบและติดตั้งได้ง่าย และมีราคาต้นทุนในการสร้างถูก และนอกจากนี้ห้องฆ่าเชื้อฯ

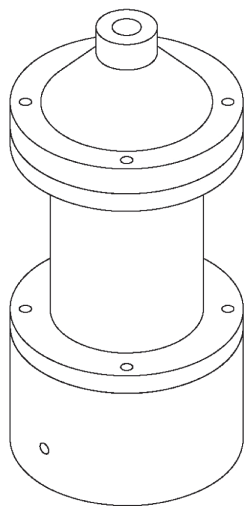
ที่ออกแบบจะต้องมีความปลอดภัยในการใช้งานและมีการบำรุงรักษาต่ำ โดยอันตรายอันดับแรกที่จะเกิดขึ้นจากห้องฆ่าเชื้อฯ เองคือเนื่องจากไฟฟ้าแรงสูง (high voltage) ที่จ่ายให้กับขั้วอิเล็กโทรดที่อยู่ด้านในเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าที่มีความเครียดสูงภายในห้องฆ่าเชื้อฯ โดยอันตรายจากไฟฟ้าแรงสูงสามารถทำให้ลดลงได้โดยการทำฉนวนไฟฟ้า ทั้งสายไฟฟ้าแรงสูงและจุดที่มีการเชื่อมต่อกัน การแยกอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงใดๆ ออกจากกัน และการใช้วัสดุ

ฉนวนที่มีความเป็นฉนวนไฟฟ้าเพียงพอเพื่อป้องกันการเกิดประกายไฟฟ้าและการลัดวงจรไฟฟ้าในขณะปฏิบัติงาน เงื่อนไขในการออกแบบโดยรวมของห้องฆ่าเชื้อในบทความนี้ เป็นดังตารางที่ 1

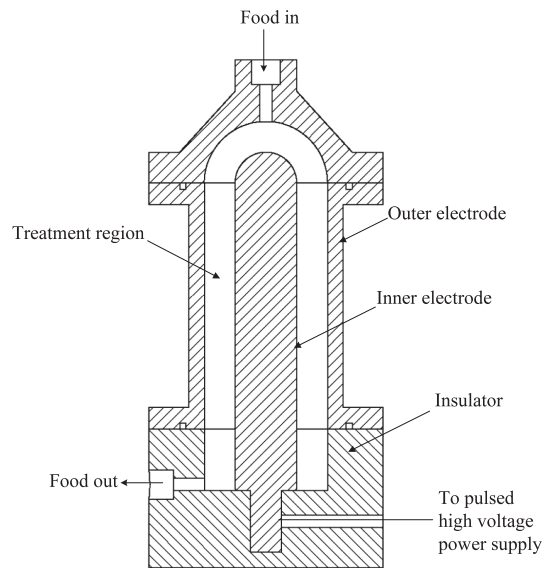
3.2 รายละเอียดในการออกแบบ

รูปที่ 2 แสดงลักษณะโครงสร้างของห้องฆ่าเชื้อฯ ที่ออกแบบไว้ โดยในบทความนี้ได้สนใจห้องฆ่าเชื้อฯ ที่มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกซ้อนกันเนื่องจากโครงสร้างง่ายและไม่ซับซ้อน ซึ่งข้อดีของรูปทรงแบบทรงกระบอกนี้ก็คือความผิวด้านของเส้นสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับรูปทรงแบบอื่น [17] เนื่องจากไม่มีผลของขอบมุม จากสมการที่ 1-2 เมื่อกำหนดให้ความเข้มสนามไฟฟ้าภายในห้องฆ่าเชื้อมีค่าเท่ากับ 4×10^6 V/m และแทนค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วอิเล็กโทรดด้านในในช่วง 10 - 30 kV จะทำให้

ได้ห้องฆ่าเชื้อฯ ที่ออกแบบประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้วที่มีการจัดวางแบบทรงกระบอกซ้อนกันร่วมทำจากสแตนเลส (stainless) เนื่องจากมีความคงทนต่อการกัดกร่อนสูง และไม่ทำปฏิกิริยากับกรดหรือเกลือที่มีอยู่ในอาหาร มีผิวเรียบทำความสะอาดง่ายและทนความร้อนและความเย็นได้ดี รวมถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยฉับพลัน โดยขั้วอิเล็กโทรดที่อยู่ด้านในมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. และขั้วอิเล็กโทรดที่อยู่ด้านนอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มม. ความยาวของขั้วอิเล็กโทรดด้านในเท่ากับ 100 มม. โดยออกแบบปลายของขั้วอิเล็กโทรดให้โค้งมนและพื้นผิวของขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองจะถูกขัดให้มีพื้นผิวที่มีความเรียบและเงางามอย่างสมบูรณ์ ซึ่งถ้ามีรอยขีดหรือพื้นผิวไม่สมบูรณ์จะมีผลทำให้เส้นสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอทำให้เกิดการเบรกดาวนได้ง่าย



(ก) ลักษณะโดยรวม



(ข) ภาพตัดขวาง

รูปที่ 2 ลักษณะโครงสร้างของห้องฆ่าเชื้อฯ ที่ได้ออกแบบไว้

นอกจากนี้เพื่อป้องกันการเกาะตัวของอาหารเหลวและลดการรวมตัวของแบคทีเรีย และเพื่อให้ทำความสะอาดได้ง่ายถูกหลักอนามัย โดยภายในห้องฆ่าเชื้อฯ นี้มีช่องว่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดด้านในและด้านนอกเท่ากับ 10 มม. สำหรับฉนวนไฟฟ้าที่ใช้แยกขั้วอิเล็กโทรดด้านในและนอกออกจากกันทำจากเทฟลอน (teflon) หรือที่เรียกว่า polytetrafluoroethylene (PTFE) โดยเทฟลอนมีค่าความต้านทานเชิงปริมาตร (volume resistivity) มากกว่า 10^{18} ohm-cm และมีค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกเท่ากับ 2.1

4. การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามการไหลในห้องฆ่าเชื้อฯ

4.1 สนามไฟฟ้า

สนามไฟฟ้า (electric field) และการไหลของกระแสไฟฟ้า (current flow) สามารถอธิบายได้จากสมการของ Maxwell's ที่ครอบคลุมสมการปัวส์ซอง (Poisson's equation) ของศักย์ไฟฟ้า V คือ [17]

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (3)$$

เมื่อ ρ คือความหนาแน่นของประจุ (C/m^3) และ ϵ_0 คือค่าเปอร์มิตติวิตีของสุญญากาศหรือที่ว่าง (Free-space permittivity) มีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m ซึ่งสมการนี้ใช้ได้สำหรับแก๊สภายใต้สภาวะปกติ ดังนั้นสมการที่ 3 สามารถเขียนเป็นสมการของลาปลาซ (Laplace's equation) ในระบบพิกัดทรงกระบอกแบบ 2 มิติ คือ

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} + \frac{\rho(r, z)}{\epsilon_0} = 0 \quad (4)$$

ดังนั้นความต่างศักย์ไฟฟ้า (electric potential) ที่ได้ในแนวแกน z และแนวรัศมี r สามารถคำนวณได้จาก

$$E_r = -\frac{\partial V}{\partial r}, \quad E_z = -\frac{\partial V}{\partial z} \quad (5)$$

4.2 สนามการไหลของของไหล

การไหลของของไหล (fluid flow) ภายในห้องฆ่าเชื้ออาหารเหลวในการศึกษานี้ จะสมมุติให้การไหล

ภายในเป็นการไหลแบบสมมาตรกับแกน (axisymmetric) แบบรูปร่างของความเร็วยังพัฒนาไปจากเดิมอย่างเต็มที่ (fully developed) และแบบไม่ยุบตัวตามความดัน (incompressible) โดยสมการความต่อเนื่อง (continuity equation) และสมการ Navier-Stokes แบบไม่ยุบตัวตามความดัน (incompressible Navier-Stokes equation) ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในระบบพิกัดทรงกระบอกแบบ 2 มิติได้ดังนี้ [17]

สมการความต่อเนื่อง :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru_r) + \frac{\partial}{\partial z} (u_z) = 0 \quad (6)$$

สมการ Navier-Stokes:

สำหรับในแนวแกน r

$$u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{u_\theta^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru_r) \right) + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} \right) - \mu \frac{1}{r^2} u_r \quad (7)$$

สำหรับในแนวแกน z

$$u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) \quad (8)$$

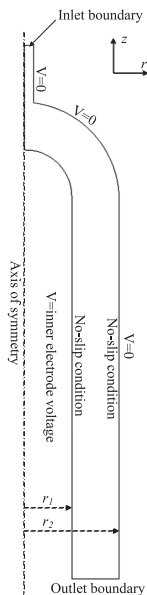
เมื่อ u_r และ u_z คือความเร็วของของไหลในแนวแกน r และ z ตามลำดับ p คือความดันของของไหล และ μ คือความหนืดของของไหล (kinematic viscosity of air)

4.3 ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข

สมการที่ 3 - 8 จะใช้ในการคำนวณสนามไฟฟ้าและการไหลภายในห้องฆ่าเชื้อฯ นี้ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) โดยในการศึกษานี้ได้นำโปรแกรมคำนวณทางด้านพลศาสตร์ของไหลสำเร็จรูป CFDRC™ เข้ามาช่วยในการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยวิธีการหาปริมาตรสืบเนื่อง [18] ซึ่งเป็นโปรแกรมแก้ไขปัญหาทางด้านพลศาสตร์ของไหล (computational fluid dynamic) พัฒนาขึ้นโดยบริษัท CFD Research

Corporation สำหรับวิธีปริมาตรสืบเนื่องที่ใช้การคำนวณของโปรแกรม CFDCR™ เป็นระเบียบวิธีการเชิงตัวเลขเพื่อทำการหาผลเฉลยของปัญหาที่กำหนดมาให้ โดยการแบ่งโดเมน (domain) ปัญหาออกเป็นหลายเซลล์หรือที่เรียกว่าปริมาตรควบคุม (control volume) ซึ่งมีขนาดต่างๆ กัน แล้วสร้างสมการควบคุม (governing equation) ของแต่ละปริมาตรควบคุมที่สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยและเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ต่างๆ ที่กำหนดมาให้สำหรับปัญหานั้นๆ จากนั้นจึงนำเอาสมการของแต่ละปริมาตรควบคุมที่สร้างขึ้นมานี้มาประกอบกันเข้า ก่อให้เกิดระบบสมการพร้อมกันขึ้น (system of simultaneous equations) และจึงทำการต้องการตามตำแหน่งต่างๆ ของรูปร่างปัญหานั้น โปรแกรม CFDCR™ ใช้วิธีการจัดตัวแปรที่อยู่ศูนย์กลางของเซลล์

ที่ตั้งร่วมกัน (co-located cell-centered variable arrangement) ซึ่งหมายความว่าตัวแปรตาม (dependent variable) และคุณสมบัติของวัสดุ (material properties) ทั้งหมดจะถูกเก็บไว้ที่จุดศูนย์กลางของเซลล์ โดยค่าเฉลี่ยของจำนวนใดๆ ภายในปริมาตรควบคุมจะถูกส่งให้โดยค่าที่จุดศูนย์กลางของเซลล์ ในการศึกษานี้จะแบ่งแบบจำลองออกเป็น 2 ส่วน คือ แบบจำลองสนามการไหล (flow field model) แบบจำลองสนามไฟฟ้า (electric field model) เนื่องจากรูปร่างของปัญหามีความสมมาตร จึงได้ทำการวิเคราะห์ครึ่งหนึ่งของแบบจำลอง โดยโดเมนและเงื่อนไขขอบเขตของสนามการไหลและสนามไฟฟ้าของห้องฆ่าเชื้อฯ ที่ใช้ในการศึกษานี้แสดงไว้ในรูปที่ 3 มีคอมพิวเตอร์ชั่งนอลกริด (computational grids) ของการคำนวณเท่ากับ 9,997 เซลล์



(ก) โดเมนและเงื่อนไขขอบเขต



(ข) คอมพิวเตอร์ชั่งนอลกริด

รูปที่ 3 เงื่อนไขขอบเขตและคอมพิวเตอร์ชั่งนอลกริดในการคำนวณ

5. ผลการคำนวณและวิจารณ์ผล

โดยคุณสมบัติของของไหลที่ใช้ในการคำนวณนี้กำหนดให้อาหารเหลวมีความหนาแน่น (density) เท่ากับ 1035 kg/m^3 และความหนืดจลน์ (kinematic viscosity) เท่ากับ $1.13 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ [19] และกำหนดให้อัตราการไหลของ

อาหารเหลวทางเข้าเท่ากับ $1 - 5 \text{ L/min}$ หรือมีความเร็วเท่ากับ $1.327 - 6.631 \text{ m/s}$ ให้รูปร่างของความเร็วสม่ำเสมอ (uniform velocity profile) ตลอดพื้นที่หน้าตัดของทางเข้า ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วอิเล็กโทรดอยู่ในช่วง $10 - 30$ กิโลโวลต์ และค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของอาหาร

เหลวโดยในการศึกษานี้สมมุติให้เป็นน้ำมันม้วดิบซึ่งมีค่าเท่ากับ 30 ซึ่งมีผลการคำนวณดังต่อไปนี้

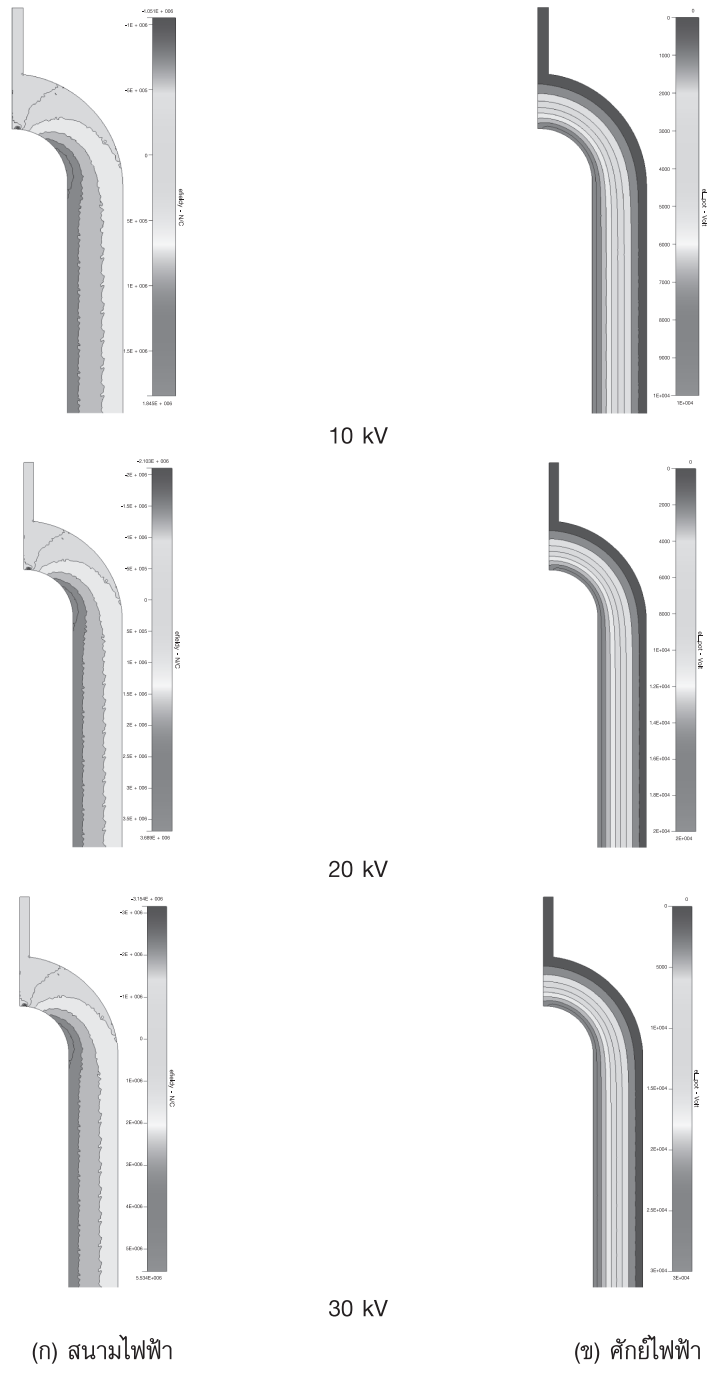
5.1 สนามไฟฟ้า

รูปที่ 4 แสดงผลการคำนวณเชิงตัวเลขของสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าภายในห้องฆ่าเชื้อฯ โดยแถบสีม่วงแดง เหลือง เขียว ฟ้ำ และขาว แสดงถึงค่าสูงสุดไปจนถึงต่ำสุด ตามลำดับ รูปที่ 4 (ก) แสดงลักษณะของสนามไฟฟ้าภายในห้องฆ่าเชื้อฯ ที่แรงดันไฟฟ้า 10, 20 และ 30 kV จากรูปแสดงให้เห็นว่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในมีความเข้มสูงสุดที่บริเวณปลายโค้งของขั้วอิเล็กโทรดด้านในคือ $1.845 \cdot 10^6$, $3.689 \cdot 10^6$ และ $5.534 \cdot 10^6$ V/m สำหรับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอิเล็กโทรด 10, 20 และ 30 kV ตามลำดับ และพบว่ามีการกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอตามระยะรัศมีที่ห่างจากปลายขั้วอิเล็กโทรดด้านใน โดยศักย์ไฟฟ้าภายในห้องฆ่าเชื้อฯ จะมีความเข้มสูงสุดบริเวณขั้วอิเล็กโทรดด้านในและต่ำสุดที่บริเวณขั้วอิเล็กโทรดด้านนอก รูปที่ 5 แสดงค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าตามแนวระยะรัศมี r_1 และ r_2 ภายในห้องฆ่าเชื้อฯ ห่างจากทางเข้าประมาณ 50 เซนติเมตร ที่แรงดันไฟฟ้า 10, 20 และ 30 kV จากรูปพบว่าค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้ามีค่าลดลงตามระยะรัศมี และสนามไฟฟ้ามักมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วอิเล็กโทรดที่เพิ่มขึ้น โดยค่าความเข้มของสนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุดที่ประมาณ $1.378 \cdot 10^6$, $2.756 \cdot 10^6$ และ $4.134 \cdot 10^6$ V/m สำหรับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอิเล็กโทรด 10, 20 และ 30 kV ตามลำดับ ซึ่งจากผลการคำนวณเชิงตัวเลขของสนามไฟฟ้าจะทำให้ทราบถึงแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับห้องฆ่าเชื้อฯ ที่ได้ออกแบบนี้คือ 30 kV รูปที่ 6 แสดงเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าภายในห้องฆ่าเชื้อฯ จากรูปจะเห็นว่าเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้ามีทิศทางพุ่งออกจากรั้วอิเล็กโทรดด้านในไปตามแนวรัศมีเข้าหาขั้วอิเล็กโทรดด้านนอกค่อนข้างสม่ำเสมอและสอดคล้องกับผลการคำนวณสนามการไหลในรูปที่ 4

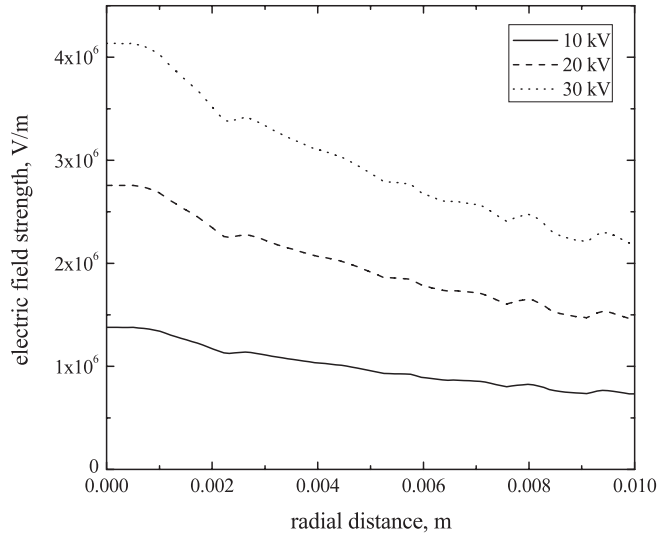
5.2 สนามการไหลของไหล

รูปที่ 7 แสดงลักษณะของสนามการไหลและเวกเตอร์การไหลภายในห้องฆ่าเชื้อฯ ที่อัตราการไหลของ

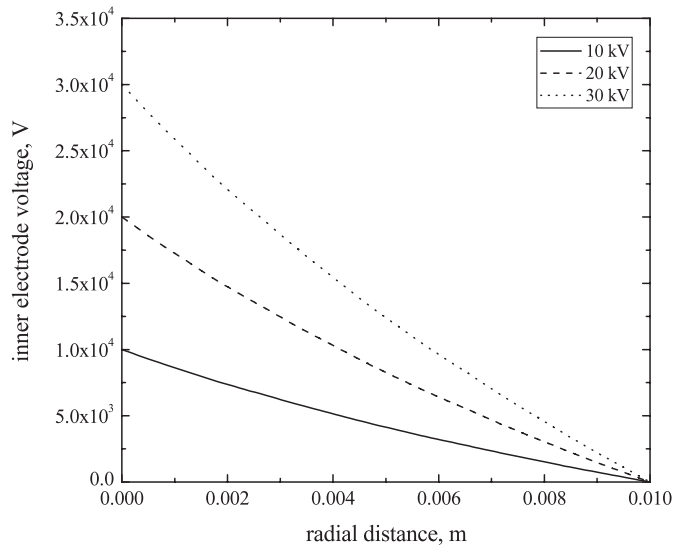
อาหารเหลว 1, 3 และ 5 L/min จากรูปที่ 7 (ก) พบว่าความเร็วในการไหลสูงสุดบริเวณทางเข้าของอาหารเหลวคือ 1.451, 4.214 และ 6.975 m/s สำหรับอัตราการไหลที่ 1, 3 และ 5 L/min ตามลำดับ หลังจากนั้นจะมีความเร็วลดลง โดยที่อัตราการไหล 1 L/min มีการกระจายตัวของความเร็วค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดแนวแกน ส่วนที่อัตราการไหล 3 และ 5 L/min มีการกระจายตัวของสนามการไหลไม่สม่ำเสมอค่อนข้างสูง ซึ่งอาจเนื่องมาจากมีความเร็วสูงทางด้านทางเข้าจึงทำให้เกิดความเร็วต่ำบริเวณใกล้กับขั้วอิเล็กโทรดด้านนอกและทำให้เกิดการไหลวน รูปที่ 7 (ข) แสดงเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าภายในห้องฆ่าเชื้อฯ เวกเตอร์ของสนามการไหลมีการปั่นป่วนเกิดขึ้นบริเวณส่วนโค้งของขั้วอิเล็กโทรดด้านใน ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเร็วต่ำและมีการไหลวนของของไหลและสอดคล้องกับผลการคำนวณที่ได้กล่าวมาในรูปที่ 7 (ก) รูปที่ 8 แสดงค่าความเร็วของการไหลตามแนวระยะรัศมี r_1 และ r_2 ที่อัตราการไหล 1, 3 และ 5 L/min ห่างจากทางเข้าประมาณ 50 เซนติเมตร จากรูปจะพบว่าความเร็วจะแปรผันตรงกับอัตราการไหล ค่าความเร็วของของไหลภายในห้องฆ่าเชื้อมีการเปลี่ยนแปลงตามแนวระยะรัศมี ที่อัตราการไหล 1 L/min ความเร็วตามแนวรัศมีจะมีลักษณะคล้ายกับรูปพาราโบลาที่มีความเร็วสูงสุดใกล้บริเวณจุดกึ่งกลางระหว่างรัศมี r_1 และ r_2 แต่ที่อัตราการไหล 3 และ 5 L/min ค่าความเร็วจะมีค่าลดลงบริเวณใกล้กับขั้วอิเล็กโทรดด้านนอก ซึ่งการลดลงของความเร็วในบริเวณนี้จะทำให้เกิดการปั่นป่วน (wake) เป็นสิ่งที่ไม่ต้องการในการปฏิบัติเนื่องจากอาจทำให้เกิดฟองอากาศขึ้นภายในห้องฆ่าเชื้อฯ ซึ่งบริเวณผิวของฟองอากาศความเข้มสนามไฟฟ้าจะลดลง ความเข้มสนามไฟฟ้าในบริเวณที่ผ่านสนามไฟฟ้าลดลง จะทำให้ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ลดลงไปด้วย โดยค่าความเร็วของของไหลสูงสุดภายในห้องฆ่าเชื้อมีค่าเท่ากับ 0.253, 0.991 และ 1.795 m/s สำหรับอัตราการไหลที่ 1, 3 และ 5 L/min ตามลำดับ จากผลการคำนวณเชิงตัวเลขของสนามการไหลทำให้ทราบถึงอัตราการไหลที่เหมาะสมสำหรับห้องฆ่าเชื้อฯ ที่ได้ออกแบบในการศึกษานี้คืออัตราการไหลควรจะน้อยกว่า 3 L/min



รูปที่ 4 ลักษณะของสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าภายในห้องฆ่าเชื้อ

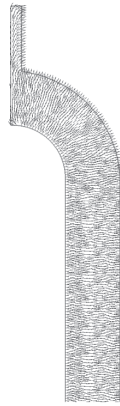


(ก) สนามไฟฟ้า



(ข) ศักย์ไฟฟ้า

รูปที่ 5 สนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าตามแนวระยะรัศมี r_1 และ r_2



10 kV

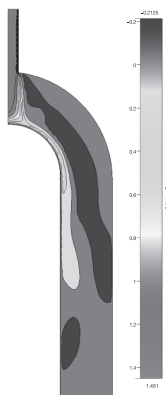


20 kV

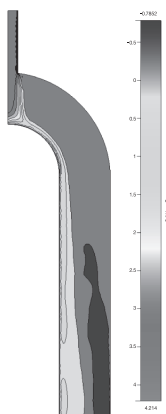


30 kV

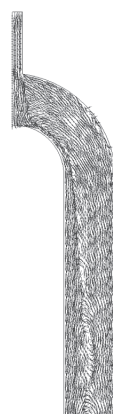
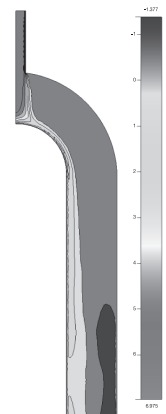
รูปที่ 6 เวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าภายในห้องฆ่าเชื้อฯ



1 L/min



3 L/min

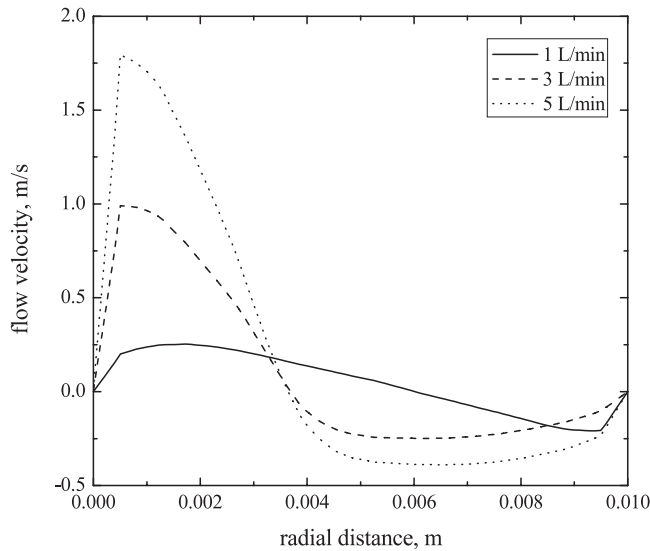


5 L/min

(ก) สนามการไหล

(ข) เวกเตอร์

รูปที่ 7 ลักษณะของสนามการไหลและเวกเตอร์ของการไหลภายในห้องฆ่าเชื้อฯ



รูปที่ 8 สนามการไหลตามแนวระยะรัศมี r_1 และ r_2

6. สรุปผลการวิจัย

ในบทความฉบับนี้ได้ทำการออกแบบห้องฆ่าเชื้ออาหารเหลวแบบท่อทรงกระบอกซ้อนกันร่วมสำหรับกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์อาหารเหลวโดยใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์ โดยได้สร้างแบบจำลองการคำนวณเชิงตัวเลขของห้องฆ่าเชื้อฯ เพื่อทำนายพฤติกรรมของสนามไฟฟ้าและสนามการไหลภายในห้องฆ่าเชื้อฯ แบบท่อทรงกระบอกซ้อนกันร่วม โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการคำนวณทางด้านพลศาสตร์ของไหล CFDRC™ ที่ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบวิธีการปริมาตรสืบเนื่องในการคำนวณเชิงตัวเลขสำหรับสนามการไหลและสนามไฟฟ้า ซึ่งจากผลการคำนวณพบว่าที่แรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมคือ 30 kV และอัตราการไหลน้อยกว่า 3 L/min จะให้ค่าสนามไฟฟ้าและความเร็วของของไหลภายในห้องฆ่าเชื้อมีค่าสูงสุดประมาณ 5.534×10^6 V/m และ 6.975 m/s ตามลำดับ โดยผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้จากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบและปรับปรุงห้องฆ่าเชื้ออาหารเหลวแบบท่อทรงกระบอกซ้อนกันร่วมสำหรับการศึกษาในอนาคตจะได้ทำการสร้างต้นแบบห้องฆ่าเชื้อขึ้นมาเพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ต่อไป

7. กิตติกรรมประกาศ

ผลการวิจัย พัฒนา และวิศวกรรมภายใต้โครงการนี้ได้รับการสนับสนุนจากจากโครงการส่งเสริมการผลิตงานวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (รหัสโครงการ HR2L-010)

8. เอกสารอ้างอิง

1. <http://web.ku.ac.th/schoolnet/snet4/cell/past.htm>, *Pasteurization*, access on June 2011. (In Thai)
2. Barbosa-canovas, G.V., Pothakamury, U.R., Palou, E., and Swanson, B.G., 1998, *Non-thermal Preservation of Food*, Marcel Dekker, Inc., New York.
3. Jeyamkondan, S., Jayas, D.S., and Holley, R.A., 1999, "Pulsed Electric Field Processing of Foods: A Review", *J. Food Prod.*, Vol. 62, pp. 1088 – 1096.
4. Kang, H. and Jianping, W., 2009, "Designs of Pulsed Electric Fields Treatment Chambers for Liquid Foods Pasteurization Process: A Review",

J. Food Eng., Vol. 95, pp. 227 – 239.

5. Qinghua, Z., Gustav, O. V., Cánovas, B. and Swansonb, B. G., 1995, “Engineering Aspects of Pulsed Electric Field Pasteurization”, *J. Food Eng.*, Vol. 25, pp. 261-281.

6. Wu, T.-F., Tseng, S.Y., Wu, M.-W. and Chen, Y.-M., 2006, “Narrow Pulse Voltage Generator for Liquid Food Sterilization”, *Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC '06*, Twenty-First Annual IEEE, 19-23 March.

7. Engelko, V.I., Bolshakov, E.P., Istomin, U.A. and Pechersky, O.P., 2002, “High Frequency Multi-purpose Pulse Generator”, *Power Modulator Symposium, 2002 and 2002 High-Voltage Workshop. Conference Record of the Twenty-Fifth International*, 30 June-3 July.

8. Heinz, V. and Alarez, I., 2001, “Preservation of Liquids Food by High Intensity Pulse Electric Fields: Basic Concept for Process Design,” *Trend In Food Science and Technology*, Vol. 12, pp. 103 – 111.

9. Sato, M., Ishida, N.M., Sugiarto, A.T., Ohshima, T. and Taniguchi, H., 2001, “High - Efficiency Sterilizer by High-Voltage Pulse Using Concentrated-Field Electrode System”, *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 37, No. 6, pp. 1646 - 1650.

10. Alkhafaji, S. R. and Farid. M., 2007. “An Investigation on Pulsed Electric Fields Technology using New Treatment Chamber Design”, *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, Vol. 8, pp. 205 – 212.

11. Chen, L.-R. and Chu, N.-Y., 2006, “AC-

Powered Pulse Generator”, *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 34, No. 5, pp. 1858 - 1865.

12. Gerlach, D., Alleborn, N., Baars, A., Delgado, A., Moritz J., and Knorr, D., 2008, “Numerical Simulations of Pulsed Electric Fields for Food Preservation: A Review”, *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, Vol. 9, pp. 408–417.

13. Kang, H. and Jianping, W., 2009, “Designs of Pulsed Electric Fields Treatment Chambers for Liquid Foods Pasteurization Process: A Review”, *Journal of Food Engineering*, Vol. 95, pp. 227 –239.

14. Pan-klang, N., Biansoongnern, S., Apiratikul, P. and SubsinghaPreliminary, W., 2008, “Study of PEF Application for Energy-Save Preservation of Foods”, *The 4th Conference on Energy Network of Thailand*, 14 – 16 May. (In Thai)

15. Kangsadan, T., 2011, “Food Preservation using High Electrical Field Pulse (HELP) Technique”, *Journal of KMUTNB*, Vol. 21, No. 1, pp. 198 - 207. (In Thai)

16. <http://en.wikipedia.org/wiki/Electroporation>, Wikipedia, access on February 2011.

17. Intra, P. and Tippayawong, N., 2005, “Numerical Simulation of Flow and Electric Fields in an Electrical Mobility Spectrometer”, *International Symposium on Nanotechnology in Environmental Protection and Pollution*, Bangkok, Thailand, 12 – 14 January.

18. CFDRRC 2004 Manual, *CFDRRC User's Guide*, 2004.

19. <http://en.wikipedia.org/wiki/Viscosity>, Viscosity, access on January 2012.

