

## การประยุกต์ใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์สำหรับการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำนม

วิกานดา ปัญญาเมืองใจ<sup>1</sup> สุวิมล จันทระระ<sup>1</sup> รัตติกาล กุสุยะ<sup>1</sup>

อาทิตย์ ยาวุฑฒิ<sup>2</sup> และ พานิช อินต๊ะ<sup>3</sup>

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ดอยสะเก็ด เชียงใหม่ 50220

### บทคัดย่อ

ในบทความฉบับนี้ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์สำหรับการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำนม โดยได้ทำการพัฒนาระบบการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำนมด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ในระดับห้องปฏิบัติการที่ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์ ห้องฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ ระบบการไหลของของไหล โดยน้ำนมจะถูกลำเลียงจากถังบรรจุน้ำนมเข้าสู่ห้องฆ่าเชื้อที่อัตราการไหล 2 L/min ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการสร้างสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ที่มีความเข้มสูง  $5.53 \times 10^3$  kV/m โดยอาหารเหลวจะไหลผ่านระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่ถูกจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบพัลส์ 30 kV ที่ความถี่ 10 kHz ตามลำดับในการศึกษานี้ได้ทำการทดสอบการทำงานเบื้องต้นของระบบด้วยน้ำนมไขมันต่ำที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วผสมกับเชื้อ *E.coli* ซึ่งจากการทดสอบพบว่าเชื้อ *E.coli* มีการลดลงจากปริมาณเชื้อเริ่มต้นจาก  $3.28 \times 10^5$  cells/ml ไปเป็น  $1.09 \times 10^4$  cells/ml ที่ระยะเวลาที่น้ำนมไหลผ่านภายในห้องฆ่าเชื้อประมาณ 30 นาที โดยน้ำนมจะมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นหลังจากผ่านห้องฆ่าเชื้อ 2 - 3°C จากอุณหภูมิของน้ำนมก่อนเข้าห้องฆ่าเชื้อและระบบมีการใช้พลังงานทั้งหมดเท่ากับ  $2.73 \times 10^3$  J/kg

**คำสำคัญ :** อาหารเหลว / การพาสเจอร์ไรซ์ / สนามไฟฟ้าแบบพัลส์ / ไฟฟ้าแรงดันสูง

\* Corresponding author : E-mail : panich\_intra@yahoo.com

<sup>1</sup> นักศึกษาปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมอาหาร วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ

<sup>2</sup> อาจารย์ วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ

<sup>3</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ

## Application of Pulsed Electric Field for Milk Pasteurization

Vikanda Panyamuangjai<sup>1</sup>, Suwimon Janthara<sup>1</sup>, Rattikarn Kusuya<sup>1</sup>,  
Artit Yawootti<sup>2</sup> and Panich Intra<sup>3\*</sup>

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

### Abstract

In this study, pasteurization of milk using pulsed electrical field (PEF) was applied and presented. A laboratory-scale milk pasteurization system using pulsed electric field technique was developed and consisted of a DC pulsed high voltage power supply, a treatment chamber and a fluid flow system. Milk was transported from the milk tank into the treatment chamber at a flow rate of 2 L/min. In the chamber, a DC pulsed high voltage was applied to the electrodes of about 30 kV with frequency of about 30 kHz, therefore, the high electric field strength was found  $5.53 \times 10^3$  kV/m. In this study, the developed system was preliminary tested with a low-fat and sterilized milk mixed with an *E.coli*. It was found from the preliminary test that the *E.coli* was reduced from about  $3.28 \times 10^5$  cells/ml to  $1.09 \times 10^4$  cells/ml with the residence time of about 30 min. The milk temperature was increased after the chamber of about 2 - 3°C from the room temperature. The energy of the system was equivalent to about  $2.73 \times 10^3$  J/kg.

**Keywords :** Liquid Foods / Pasteurization / Pulsed Electric Field / High Voltage.

---

\* Corresponding author. Email : panich\_\_intra@yahoo.com

<sup>1</sup> Undergraduate Student, College of Integrated Science and Technology.

<sup>2</sup> Lecturer, College of Integrated Science and Technology.

<sup>3</sup> Assistant Professor, College of Integrated Science and Technology.

## 1. บทนำ

การฆ่าเชื้อในอาหารเหลวด้วยความร้อนนั้น เพื่อทำลายเอนไซม์ (enzyme) ต่างๆ และทำลายจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค และเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ให้เก็บไว้ได้นานขึ้น ส่วนใหญ่นิยมใช้วิธีการพาสเจอร์ไรซ์ (pasteurization) และการสเตอริไรซ์ (sterilization) โดยการพาสเจอร์ไรซ์เป็นการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 60 - 80°C ในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์บางส่วนและยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ แต่การพาสเจอร์ไรซ์จะสามารถรักษาคุณลักษณะของอาหารรวมถึงยังสามารถรักษาสารอาหารไว้ได้อย่างครบถ้วน ซึ่งการพาสเจอร์ไรซ์แบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ การพาสเจอร์ไรซ์แบบใช้ความร้อนต่ำ - เวลานาน (LTLT : Low Temperature - Long Time) และการพาสเจอร์ไรซ์แบบใช้ความร้อนสูง - เวลาสั้น ส่วนการสเตอริไรซ์เป็นการฆ่าเชื้อโดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 100°C ในเวลาที่เหมาะสม อาหารที่ทำการสเตอริไรซ์แล้วจะต้องเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องหรือต่ำกว่า 45°C [1]

จากวิธีการที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นจะเห็นว่าเป็นระบบที่ใช้ความร้อนเป็นตัวกลางในการฆ่าเชื้อ ซึ่งหากใช้ความร้อนในกระบวนการสูงเกินไป ความร้อนจะไปทำลายวิตามินหรือคุณค่าทางโภชนาการและนอกจากนี้ระบบดังกล่าวยังประกอบด้วยส่วนประกอบต่างๆ มากมาย ทั้งในส่วนการเก็บ การลำเลียงและการฆ่าเชื้ออาหาร ทั้งยังมีขั้นตอนการผลิตที่ค่อนข้างซับซ้อน เป็นเหตุให้สิ้นเปลืองเวลาที่ใช้ในกระบวนการฆ่าเชื้อและพลังงานที่ใช้ในการทำงานของระบบ ไม่ว่าจะเป็นพลังงานจากไฟฟ้าหรือน้ำมันเชื้อเพลิง รวมทั้งอุปกรณ์บางชิ้นส่วนที่ต้องมีการนำเข้าจากต่างประเทศ เพื่อให้ระบบการฆ่าเชื้อมีคุณภาพและตรงตามมาตรฐานสากล ซึ่งเป็นที่แน่นอนว่าการนำเข้าของอุปกรณ์แต่ละชนิดต้องมีราคาสูง ตลอดจนมีความยุ่งยากในเรื่องการบำรุงรักษา ในกรณีที่การทำงานของเครื่องจักรหรือชิ้นส่วนของอุปกรณ์เกิดการชำรุด ดังนั้นระบบการพาสเจอร์ไรซ์แบบใช้พลังงานต่ำด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ (Pulsed Electric Field : PEF) จึงเป็นวิธีการที่สามารถแก้ไขปัญหาค่าการใช้พลังงานและความซับซ้อนของระบบดังกล่าวได้ รวมถึงการประหยัดเวลาในการฆ่าเชื้อ (น้อยกว่า 1 วินาที) จึงทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำประมาณ 0.9 -

2.1 บาทต่อลิตร และใช้พลังงานน้อยประมาณ  $10^1 - 10^4$  จูลต่อกิโลกรัม และยังสามารถรักษาคุณค่าทางโภชนาการของอาหารด้วย [2 - 5] การฆ่าเชื้อในอาหารเหลวด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ สามารถทำลายเชื้อจุลินทรีย์ได้โดยไม่ใช้ความร้อน (non-Thermal) จึงไม่ทำลายคุณลักษณะของอาหารตลอดจนโภชนาการของอาหารไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยการฆ่าเชื้อด้วยสนามไฟฟ้าแรงดันสูงเป็นจังหวะแบบพัลส์นั้นเป็นเทคนิคการใช้กระแสไฟฟ้าที่มีความเข้มของสนามไฟฟ้าสูง โดยปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการฆ่าเชื้อนี้ ได้แก่ ความเข้มของสนามไฟฟ้า เวลาในการผ่านสนามไฟฟ้า อุณหภูมิของกระบวนการ ค่าความนำไฟฟ้า ผลของฟองอากาศ และคุณสมบัติของเชื้อจุลินทรีย์ ดังนั้น วิธีการฆ่าเชื้อแบบนี้เหมาะกับอาหารและผลิตภัณฑ์อาหารที่อยู่ในรูปของเหลว เช่น นม โยเกิร์ต ซุปชนิดต่างๆ น้ำผลไม้ และไซ้ แต่จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในต่างประเทศพบว่ามีมีการพัฒนาระบบดังกล่าวอย่างต่อเนื่องและมีการผลิตเพื่อเชิงพาณิชย์ แต่สำหรับประเทศไทยมีการศึกษาค่อนข้างน้อย [6 - 15]

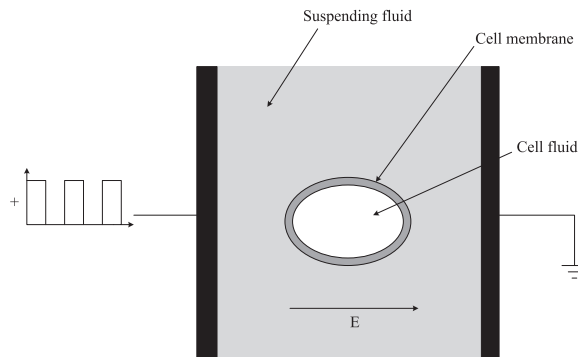
จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาโดยพิมพ์พร เสนอิน [16] ได้ทำการออกแบบและคำนวณเชิงตัวเลขของห้องฆ่าเชื้ออาหารเหลวแบบท่อทรงกระบอกซ้อนกันแนวมุมสำหรับกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์อาหารเหลวที่ใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์ โดยได้พัฒนาแบบจำลองการคำนวณเชิงตัวเลขของห้องฆ่าเชื้อ เพื่อทำนายพฤติกรรมของสนามไฟฟ้าและสนามการไหลภายในห้องฆ่าเชื้อ โดยผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้จากการศึกษาที่ผ่านมาจะได้นำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบระบบห้องฆ่าเชื้อแบบท่อทรงกระบอกซ้อนกันแนวมุมสำหรับกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์อาหารเหลว ดังนั้น ในบทความฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์สำหรับการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำนมซึ่งเป็นการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำนมแบบการใช้พลังงานต่ำหรือแบบไม่ใช้ความร้อนทำให้คุณค่าทางโภชนาการของน้ำนมเกิดการสูญเสียน้อยที่สุด โดยได้ทำการพัฒนาต้นแบบในระบบการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำนมโดยใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์ระดับห้องปฏิบัติการที่ใช้วัสดุที่ทำได้ภายในประเทศที่ราคาไม่แพงและต้องไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค ซึ่งจะช่วยลดการใช้พลังงานใน

กระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์ รวมไปถึงลดต้นทุนการผลิต ลดระยะเวลาในการฆ่าเชื้อ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อภาคอุตสาหกรรมและเป็นประโยชน์ต่อผู้บริโภคทางด้านคุณค่าทางโภชนาการของอาหาร

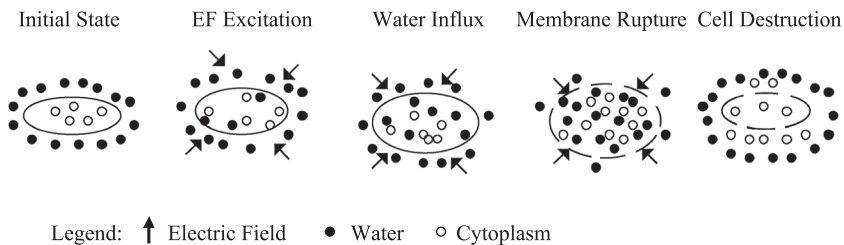
**2. หลักการฆ่าเชื้อในอาหารเหลวด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์**

รูปที่ 1 แสดงหลักการฆ่าเชื้อในอาหารเหลวด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ที่ประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ววางขนานกันโดยจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์ให้กับขั้วหนึ่งและให้อีกขั้วหนึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นกราวด์ (ground) โดยการฆ่าเชื้อในอาหารเหลวด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ (pulsed electric field treatment) คือการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในอาหารเหลวด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโพเรชัน (electroporation) ซึ่งเป็นกระบวนการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ (cell membrane) โดยการเพิ่มค่าความนำไฟฟ้า (electrical conductivity) และค่าสภาพยอมไฟฟ้า

(permeability) ของเยื่อหุ้มเซลล์ โดยการเพิ่มค่าความนำไฟฟ้าและสภาพยอมไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์สามารถทำได้ โดยการใช้สนามไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นพัลส์หรือเป็นช่วงเวลาเกิดจากการจ่ายพัลส์แรงดันไฟฟ้าให้กับอิเล็กโทรดที่มีความเข้มสนามไฟฟ้า (electric field strength) สูง ประมาณ  $4 \times 10^6$  V/m และมีลักษณะเป็นพัลส์ในช่วงประมาณ 10 ns ถึง 20  $\mu$ s ซึ่งสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ที่มีความเข้มสูงนี้จะส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมเยื่อหุ้มเซลล์มีค่าสูงเกินกว่าค่าความคงทนของไดอิเล็กทริก (dielectric strength) ของเยื่อหุ้มเซลล์และทำให้เกิดรูพรุน (pores) เล็กๆ จำนวนมากขึ้นที่เยื่อหุ้มเซลล์ รูพรุนดังกล่าวจะนำไปสู่กระบวนการตายของเซลล์ (programmed cell death) ซึ่งมีสองลักษณะคืออะพอพโตสิส (apoptosis) และเนโครซิส (necrosis) โดยลำดับขั้นของกระบวนการอิเล็กโทรโพเรชันที่เกิดขึ้นกับเซลล์ของจุลินทรีย์แสดงไว้ในรูปที่ 2



**รูปที่ 1** หลักการฆ่าเชื้อในอาหารเหลวด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์



**รูปที่ 2** ลำดับขั้นของกระบวนการอิเล็กโทรโพเรชันที่เกิดขึ้นกับเซลล์ของจุลินทรีย์ [17]

ตารางที่ 1 ขนาดของเซลล์แรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ตกคร่อมเยื่อหุ้มเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ [13]

เชื้อจุลินทรีย์	เส้นผ่านศูนย์กลาง ( $\mu\text{m}$ )	ความยาว ( $\mu\text{m}$ )	แรงดันสูงสุด (V)
<i>E. coli.</i>	1.15	6.9	0.26
<i>K. pseudomona</i>	0.83	3.2	1.26
<i>P. aeruginosa</i>	0.73	3.9	1.25
<i>S. aureus</i>	1.03	-	1.00
<i>L. momocytogenesl</i>	0.76	1.7	0.99
<i>C. albicans</i>	4.15	-	2.63

โดยแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมเยื่อหุ้มเซลล์สามารถคำนวณได้จาก [13]

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

เมื่อ  $V_{\text{cell}}$  คือแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ตกคร่อมที่เยื่อหุ้มเซลล์  $f$  คือค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับรูปร่างของเซลล์  $r_{\text{cell}}$  คือรัศมีวงนอกสุดของเยื่อหุ้มเซลล์ และ  $E_{\text{cell}}$  คือค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เยื่อหุ้มเซลล์ ตารางที่ 1 แสดงขนาดของเซลล์และแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ตกคร่อมเยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์ เมื่อเยื่อหุ้มเซลล์เกิดรูพรุนจะทำให้เกิดการถ่ายเทระหว่างของเหลวภายนอกเซลล์กับไซโทพลาซึม (cytoplasm) ซึ่งเป็นของเหลวภายในเซลล์ ทำให้เซลล์เกิดการขยายตัวเพิ่มขึ้นและนำไปสู่การแตกตัวของเยื่อหุ้มเซลล์การเกิดรูพรุนที่บริเวณเยื่อหุ้มเซลล์อันเนื่องมาจากความเครียดสนามไฟฟ้า รูพรุนที่เกิดขึ้นต้องมีขนาดใหญ่พอที่จะนำไปสู่การตายของเซลล์ โดยลักษณะของการเกิดรูพรุนที่บริเวณเยื่อหุ้มเซลล์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ รูพรุนแบบไฮโดรฟิลิก (hydrophilic) และไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) โดยพลังงานที่ใช้ในกระบวนการจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย อาทิเช่น ความนำไฟฟ้า อัตราการไหลของอาหารเหลวและความเข้มข้นของไฟฟ้า ซึ่งในทางทฤษฎีสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $P_{\text{max}}$ ) ที่ใช้ในการสร้างพัลส์สนามไฟฟ้าของห้องฆ่าเชื้อได้จากสมการ [13]

$$P_{\text{max}} = 2k\pi\sigma E^2 \left(\frac{Q}{\pi v}\right)^{3/2} \quad (2)$$

เมื่อ  $P_{\text{max}}$  คือกำลังไฟฟ้าสูงสุด  $Q$  คืออัตราการไหลของ

อาหารเหลว  $E$  คือความเข้มข้นไฟฟ้าของห้องฆ่าเชื้อ  $\sigma$  คือค่าความนำไฟฟ้าของอาหารเหลว  $v$  คือความเร็วในการไหลอาหารเหลวและ  $k$  คือสัดส่วนของความยาว ( $L$ ) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $D$ ) ของห้องฆ่าเชื้อคือ

$$k = \frac{L}{D} \quad (3)$$

สำหรับห้องฆ่าเชื้อที่มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม (coaxial treatment chambers) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสามารถหาได้จาก [18]

$$E = \frac{V}{r \ln(r_2/r_1)} \quad (4)$$

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

### 3. ระบบการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำนม

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบระบบการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารเหลวด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์สำหรับกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์ที่ใช้พลังงานต่ำที่เหมาะสมต่อการทำงานระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานภายในประเทศ และลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ ดังนั้น เพื่อให้บรรลุเป้าหมายที่ตั้งไว้ห้องฆ่าเชื้อฯ ที่ออกแบบนั้นจะต้องสามารถกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารเหลวที่ทำให้เกิดโรคคือ *Escherichia coli* จากกระบวนการอิเล็กโทรโพรเซชันที่ได้กล่าวมาในข้างต้น ค่าความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าภายในห้องฆ่าเชื้อจะต้องมีค่า

มากกว่าหรือเท่ากับ  $4 \times 10^3$  kV/m และมีลักษณะเป็นพัลส์ในช่วงประมาณ 10 ns ถึง 20  $\mu$ s [2 – 5] ดังนั้น ในการศึกษานี้จะกำหนดให้แรงดันที่จ่ายให้ขั้วอิเล็กโทรดคงที่เท่ากับ 30 kV และสามารถความถี่ของพัลส์ในช่วง 10 ถึง 20 kHz และกำหนดให้มีอัตราการไหลของอาหารเหลวอยู่ในช่วง 1 ถึง 5 L/min ที่ความดันของอาหารเหลวภายในเท่ากับความดันบรรยากาศคือ 1 bar ต้นแบบจะต้องสามารถถอดประกอบและติดตั้งได้ง่าย และมีราคาต้นทุนในการสร้างถูก และนอกจากนี้ห้องฆ่าเชื้อฯ ที่ออกแบบจะ

ต้องมีความปลอดภัยในการทำงานและมีการบำรุงรักษาต่ำ โดยอันตรายอันดับแรกที่จะเกิดขึ้นจากห้องฆ่าเชื้อฯ เองคือเนื่องจากไฟฟ้าแรงดันสูง (high voltage) ที่จ่ายให้กับขั้วอิเล็กโทรดที่อยู่ด้านในเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าที่มีความเครียดสูงภายในห้องฆ่าเชื้อฯ โดยอันตรายจากไฟฟ้าแรงดันสูงสามารถทำให้ลดลงได้โดยทำการฉนวนไฟฟ้าทั้งสายไฟฟ้าแรงดันสูงและจุดที่มีการเชื่อมต่อกัน การแยกอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงดันสูงใดๆ ออกจากกัน และ



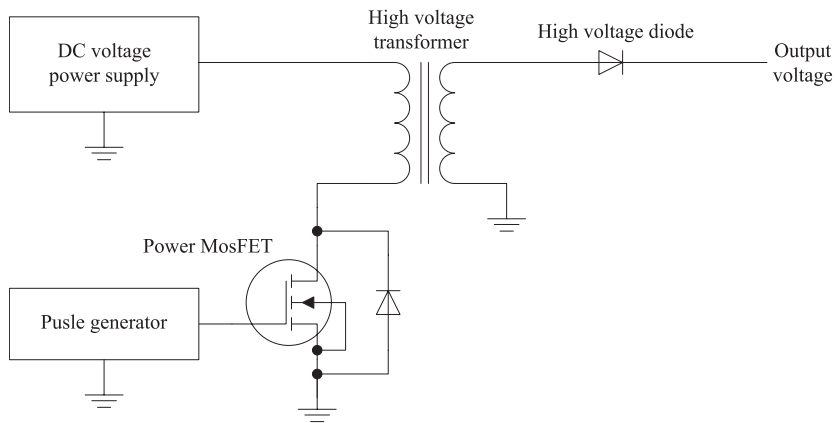
รูปที่ 3 ต้นแบบระบบฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำนมฯ พัลส์ที่พัฒนาขึ้น

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของระบบการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ฯ ที่พัฒนาขึ้น

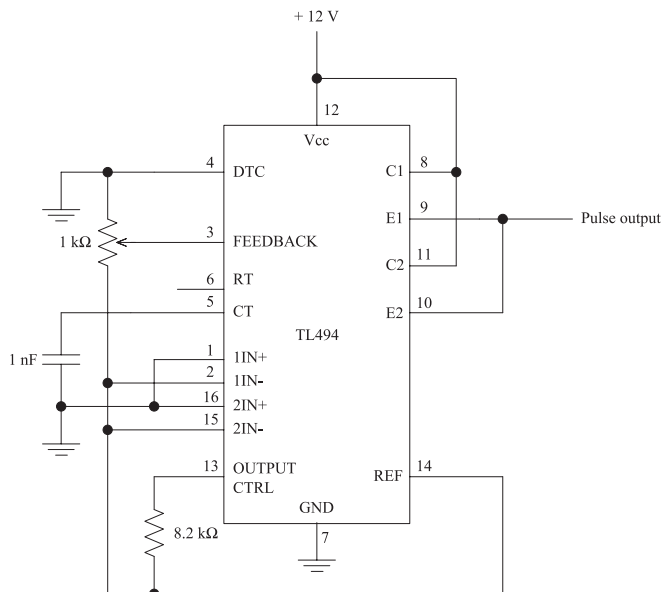
เงื่อนไขในการออกแบบ	คุณสมบัติ
ความเข้มของสนามไฟฟ้า	$4 \times 10^6$ V/m
แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอิเล็กโทรด	30 kV
ความถี่ของพัลส์	10 - 30 kHz
ศักย์ไฟฟ้า	ชั่วบวก
พลังงาน	$2.73 \times 10^3$ J/ kg
เชื้อจุลินทรีย์ที่กำลังจัด	<i>Escherichia coli</i>
ความดันของเหลวทำงาน	1 bar
อัตราการไหลของอาหารเหลว	1 - 5 L/min
ขนาดมิติและลักษณะ	เป็นท่อทรงกระบอกซ้อนกัน มีขนาดเล็ก และสามารถถอดและติดตั้งได้ง่าย
การซ่อมบำรุง	ชั่วโมงในการทำงานอย่างน้อย 24 ชั่วโมง หลังจากทำความสะอาดแล้ว

การใช้วัสดุฉนวนที่มีความเป็นฉนวนไฟฟ้าเพียงพอเพื่อป้องกันการเกิดประกายไฟฟ้าและการลัดวงจรไฟฟ้าในขณะปฏิบัติงาน รูปที่ 3 แสดงต้นแบบระบบฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำนมพาสต์ที่พัฒนาขึ้น โดยระบบที่พัฒนาขึ้นจะประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์ (DC pulsed high voltage power supply) ห้องฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ (treatment chamber) ระบบการไหลของของไหล (fluid flow system) การทำงานของระบบจะเริ่มต้นโดยการใช้น้ำนมจากถังเก็บ

นม (milk tank) เข้าสู่ห้องฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกซ้อนกันแนบแน่นและที่ขั้วอิเล็กโทรดจะถูกจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงภายในห้องฆ่าเชื้อฯ ส่งผลให้จุลินทรีย์ที่ผ่านเข้าไปในห้องฆ่าเชื้อฯ ถูกทำลายด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโพรเซชันและหลังจากผ่านห้องฆ่าเชื้อฯ แล้วน้ำนมจะถูกนำไปเก็บไว้ในถังเก็บนม ตารางที่ 2 คุณสมบัติของระบบการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ฯ ที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 4 โดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์ [19]



รูปที่ 5 วงจรสร้างสัญญาณพัลส์ความถี่สูง [19]

### 3.1 แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์

แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์ที่พัฒนาขึ้นในการศึกษานี้สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าขาออกชั่วคราวได้ในช่วง 10 - 30 kV และมีความถี่อยู่ในช่วง 10 - 30 kHz โดยวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์นี้จะประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC voltage power supply) ตัวสร้างสัญญาณพัลส์ความถี่สูง (pulse generator) มอสเฟตกำลัง (power MosFET) หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง (high voltage transformer) และไดโอดเรียงแรงดันสูง (high voltage diode) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4 ในการศึกษานี้ใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12V จ่ายที่ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่นำหลักการทำงานของ Flyback transformer มาผลิตแรงดันสูงประมาณ 10 - 30 kV โดยมีชุดสร้างสัญญาณพัลส์ความถี่สูง ในการกำเนิดสัญญาณพัลส์ในการผลิตความถี่จะใช้ไอซีเบอร์ TL494 เป็นตัวกำหนดและผลิตความถี่ ตัวต้านทาน 8.2 k $\Omega$  ความต้านทานปรับค่าได้ 1 k $\Omega$  และตัวเก็บประจุ 1 nF เป็นตัวกำหนดความถี่ประมาณ 10 ถึง 30 kHz โดยความถี่ที่ต้องการจะอาศัยการปรับตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ รูปที่ 5 แสดงวงจรสร้างสัญญาณพัลส์ความถี่สูงเมื่อได้ค่าความถี่ตามความต้องการแล้ว ก็จะส่งสัญญาณดังกล่าวไปยังขา 9 และขา 10 ของไอซีเบอร์ TL494 ไปยังมอสเฟตกำลังเบอร์ IRF640 เพื่อป้อนกำลังไฟฟ้าแบบพัลส์ให้แก่ขดลวดทางปฐมภูมิของหม้อแปลงทำให้เกิดการพองตัวและยุบตัวของสนามแม่เหล็กที่ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงแรงดันสูง จากการพองตัวและยุบตัวของสนามแม่เหล็กที่ขดลวดปฐมภูมิ มีผลทำให้เกิดการพองตัวและยุบตัว (induce) ที่ขดลวดทุติยภูมิด้วย ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้าแรงดันสูงทางด้านขาออกและแรงดันสูงทางด้านขาออกนี้จะถูกเรียงกระแสด้วยไดโอดแรงดันสูงเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรง ซึ่งระดับแรงดันสูงขาออก ( $V_2$ ) จะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของการพันขดลวดทางทุติยภูมิ ( $N_2$ ) และการปรับความถี่ โดยสามารถหาอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงได้จาก

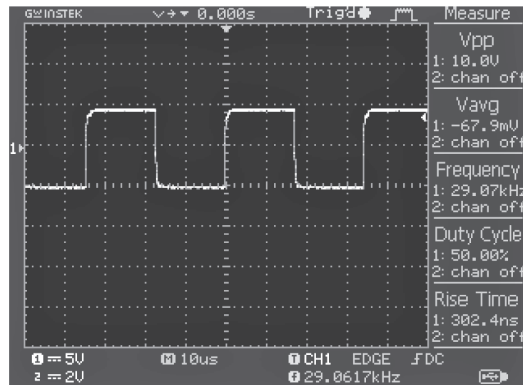
$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (5)$$

เมื่อ  $V_1$  และ  $N_1$  คือแรงดันไฟฟ้าและจำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิ ทำให้สามารถประมาณอัตราส่วนของแรงดัน  $V_1/V_2$  ได้ รูปที่ 6 (ก) เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ขาออกของเพาเวอร์มอสเฟต ซึ่งพบว่ายังมีสัญญาณที่ผิดเพี้ยนไปจากอุดมคติเนื่องจากการใช้งานเป็นสวิตช์ความถี่สูงให้กับหม้อแปลงที่มีโหลดเป็นขดลวดตัวเหนี่ยวนำ และ รูปที่ 6 (ข) เป็นลักษณะแรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง สัญญาณที่ได้มีลักษณะคล้ายกับรูปคลื่นไซน์ที่มีการเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นเนื่องมาจากผลของค่าความเหนี่ยวนำที่ขดลวดด้านทุติยภูมิ

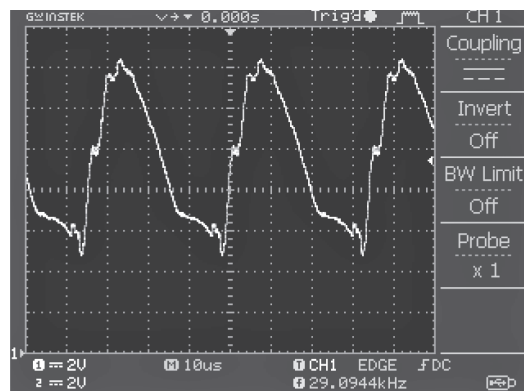
### 3.2 ห้องฆ่าเชื้ออาหารเหลว

รูปที่ 7 แสดงลักษณะโครงสร้างของห้องฆ่าเชื้อฯ ที่ออกแบบไว้ในผลงานวิจัยที่ผ่านมาโดยพิมพ์พร เสนอิน และคณะ [16] ซึ่งการออกแบบห้องฆ่าเชื้อของพิมพ์พร เสนอินและคณะ [16] มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกซ้อนกันเนื่องมาจากโครงสร้างง่ายและไม่ซับซ้อน ซึ่งข้อดีของรูปทรงแบบทรงกระบอกนี้ก็คือความผิดเพี้ยนของเส้นสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับรูปทรงแบบอื่น [18] เนื่องจากไม่มีผลของขอบมุม จากสมการที่ 1 - 2 เมื่อกำหนดให้ความเข้มสนามไฟฟ้าภายในห้องฆ่าเชื้อมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ  $4 \times 10^3$  kV/m และแทนค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วอิเล็กโทรดด้านในในช่วง 10 - 30 kV จะทำให้ได้ห้องฆ่าเชื้อฯ ที่ออกแบบประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้วที่มีการจัดวางแบบทรงกระบอกซ้อนกันร่วมทำจากสแตนเลส (stainless) เนื่องจากมีความคงทนต่อการกัดกร่อนสูง และไม่ทำปฏิกิริยากับกรดหรือเกลือที่มีอยู่ในอาหาร มีผิวเรียบทำความสะอาดง่ายและทนความร้อนและความเย็นได้ดี รวมถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยฉับพลัน โดยขั้วอิเล็กโทรดที่อยู่ด้านใน (inner electrode) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm และขั้วอิเล็กโทรดที่อยู่ด้านนอก (outer electrode) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm ความยาวของขั้วอิเล็กโทรดด้านในเท่ากับ 100 mm



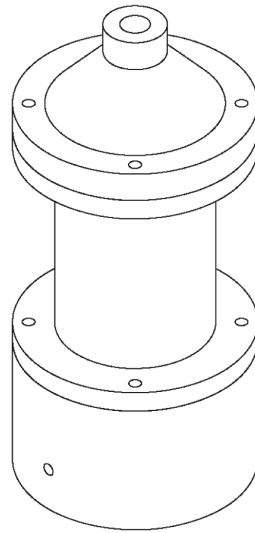


(ก) มอสเฟटकำลัง

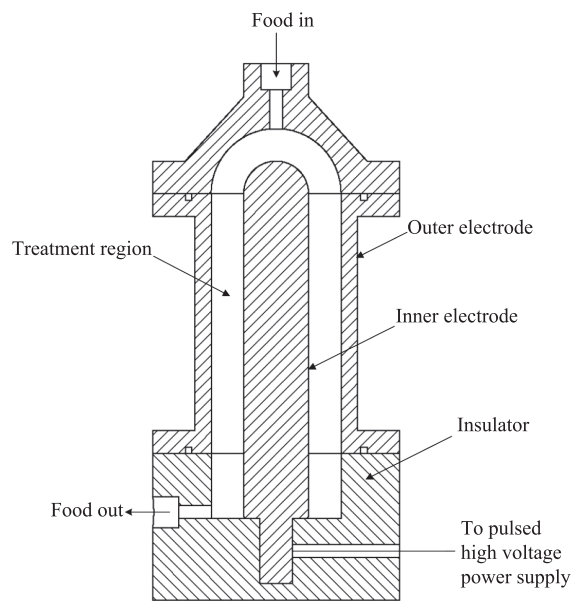


(ข) แรงดันไฟฟ้าขาออก

รูปที่ 6 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มอสเฟटकำลังและแรงดันเอาต์พุตของเครื่องกำเนิด



(ก) ลักษณะโดยรวม



(ข) ภาพตัดขวาง

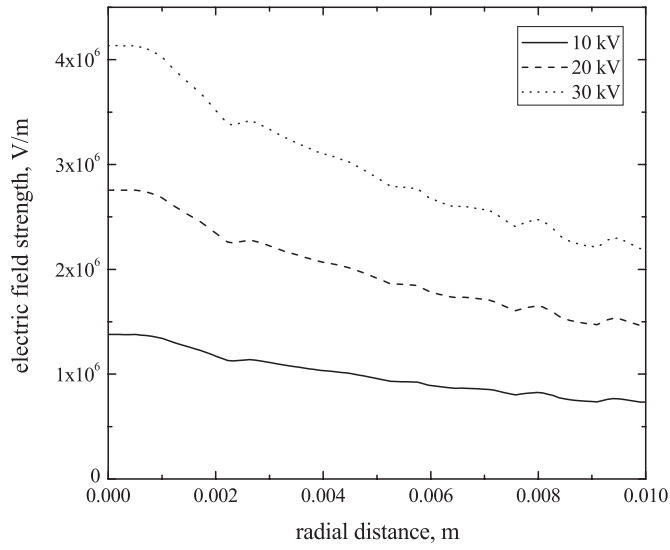
รูปที่ 7 ลักษณะโครงสร้างของห้องฆ่าเชื้อฯ ที่ได้ออกแบบไว้ [16]

โดยออกแบบปลายของขั้วอิเล็กโทรดให้โค้งมนและพื้นผิวของขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองจะถูกขัดให้มีพื้นผิวที่มีความเรียบและเงางามอย่างสมบูรณ์ ซึ่งถ้ามีรอยขีดหรือพื้นผิวไม่สมบูรณ์จะมีผลทำให้เส้นสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอทำให้เกิดการเบรกดาวน์ได้ง่าย นอกจากนี้เพื่อป้องกันการเกาะตัวของอาหารเหลวและลดการรวมตัวของเชื้อแบคทีเรีย และเพื่อให้ทำความสะอาดได้ง่ายถูกหลักอนามัย โดยภายในห้องฆ่าเชื้อฯ นี้มีช่องว่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดด้านในและด้านนอกเท่ากับ 10 มิลลิเมตร สำหรับฉนวนไฟฟ้าที่ใช้แยกขั้วอิเล็กโทรดด้านในและนอกออกจากกันทำจากเทพลอน (teflon) หรือที่เรียกว่า polytetrafluoroethylene (PTFE) โดยเทพลอนมีค่าความต้านทานเชิงปริมาตร (volume resistivity) มากกว่า  $10^{18}$  ohm-cm และมีค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกเท่ากับ 2.1 ในการศึกษาที่ผ่านมาจึงสร้างแบบจำลองการคำนวณเชิงตัวเลขของห้องฆ่าเชื้อฯ เพื่อทำนายพฤติกรรมของสนามไฟฟ้าและสนามการไหลภายในห้องฆ่าเชื้อฯ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการคำนวณทางด้านพลศาสตร์ของไหลที่ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบวิธีการปริมาตรสืบเนื่องในการคำนวณเชิงตัวเลขสำหรับสนามการไหลและสนามไฟฟ้า ซึ่งจากผลการคำนวณพบว่าที่แรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมคือ 30 kV และอัตราการไหลน้อยกว่า 3 L/min จะให้ค่าสนามไฟฟ้าและความเร็วของของไหลภายในห้องฆ่าเชื้อฯ มีค่าสูงสุดประมาณ  $5.534 \times 10^6$  V/m และ 6.975 m/s ตามลำดับ [16] รูปที่ 8 แสดงผลการคำนวณสนามไฟฟ้าและสนามการไหลภายในห้องฆ่าเชื้อฯ จากรูปพบว่าค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้ามีค่าลดลงตามระยะรัศมี และสนามไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วอิเล็กโทรดที่เพิ่มขึ้น โดยค่าความเข้มของสนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุดที่ประมาณ  $1.378 \times 10^6$ ,  $2.756 \times 10^6$  และ

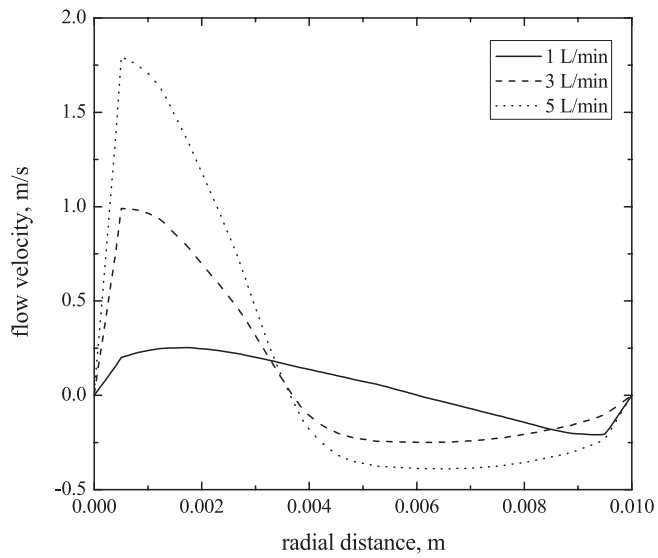
$4.134 \times 10^6$  V/m สำหรับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอิเล็กโทรด 10, 20 และ 30 kV ตามลำดับ และยังพบว่าความเร็วจะแปรผันตรงกับอัตราการไหล ค่าความเร็วของของไหลภายในห้องฆ่าเชื้อฯ มีการเปลี่ยนแปลงตามแนวระยะรัศมี

### 3.3 ระบบการไหลของของไหล

ในการศึกษานี้ระบบการไหลของของไหลจะประกอบด้วย ตัววัดควบคุมการไหล (flowmeter) บั๊มแบบหมุนเวียน (circulation pump) และท่อลำเลียงอาหาร (pipeline) โดยตัววัดอัตราการไหลแบบหมุนเวียน (rotameter) ของ Blue Point รุ่น S-4 series ใช้สำหรับการวัดอัตราการไหลภายในท่อของระบบการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำนมฯ ซึ่งมีการใช้ร่วมกับวาล์วเพื่อปรับอัตราการไหลให้คงที่ตรงตามที่กำหนดไว้ โดยสามารถปรับอัตราการไหลของน้ำนมได้ในช่วง 1 – 10 L/min สำหรับบั๊มแบบหมุนเวียนภายในระบบการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำนมฯ ในการลำเลียงน้ำนมในการส่งผ่านไปยังอุปกรณ์ต่างๆ ภายในระบบที่อัตราการไหลในช่วง 0 – 30 L/min ในการศึกษานี้ได้เลือกใช้บั๊มแบบหมุนเวียนยี่ห้อ Sanso รุ่น PMD -311 โดยระบบต้นกำเนิดจากแกนมอเตอร์ถูกแยกขาด (Isolate) จากชุดใบพัดที่สัมผัสกับน้ำนมด้วยระบบแม่เหล็กถาวรและการลำเลียงน้ำนมไปยังส่วนต่างๆ ของระบบจะใช้สายใยลวดต่อเชื่อมโยงในการทำงานเพื่อเกิดการไหลที่สมบูรณ์ต่อเนื่อง สายใยลวดที่ใช้สามารถใช้กับอาหารได้มีลักษณะโปร่งใสง่ายต่อการมองเห็น และเมื่อประกอบกับระบบทำให้ดูสะอาด ถอดล้างทำความสะอาดได้ง่าย สามารถฆ่าเชื้อโดยใช้ความร้อนสูงได้ เลือกใช้ท่อสายใยลวดแบบไสยี่ห้อ Toyox Toyospring (PVC) รุ่น 040 Stock ขนาดรูภายใน 12 mm. และขนาดรูภายนอก 18 mm. สามารถทนแรงดันได้ถึง 0.5 MPa ทนความร้อนได้สูงถึง 100 °C

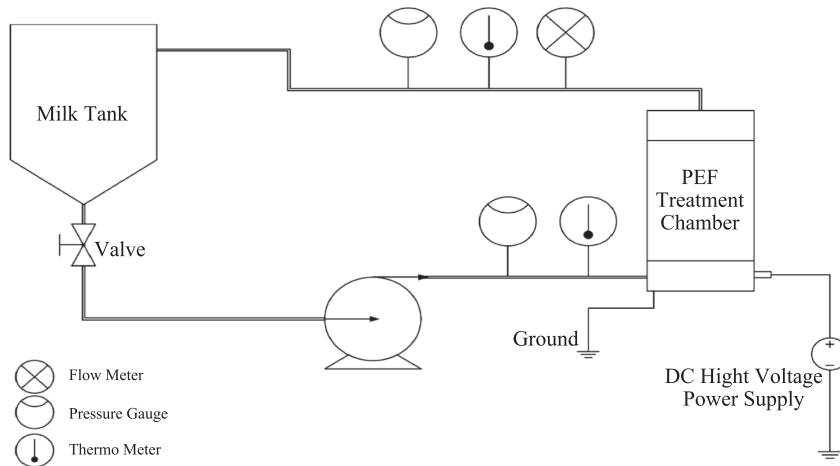


(ก) สนามไฟฟ้า



(ข) สนามการไหล

รูปที่ 8 สนามไฟฟ้าและสนามการไหลตามแนวระยะรัศมี  $r_1$  และ  $r_2$



รูปที่ 9 โดอะแกรมการทดสอบการทำงานเบื้องต้นของระบบต้นแบบ

#### 4. การทดสอบการทำงานเบื้องต้นและวิจารณ์ผล

ในการศึกษานี้ได้ทำการทดสอบการทำงานเบื้องต้นของระบบต้นแบบฯ รูปที่ 9 แสดงโดอะแกรมการทดสอบการทำงานเบื้องต้นของระบบต้นแบบ จะประกอบด้วยถังบรรจุน้ำนมขนาด 6 ลิตร ทำหน้าที่บรรจุน้ำนม บีมแบบหมุนเวียน อุปกรณ์วัดอุณหภูมิและความดันทำหน้าที่วัดอุณหภูมิ น้ำนมและความดันของน้ำนมทั้งก่อนและหลังเข้าห้องฆ่าเชื้อ อุปกรณ์วัดอัตราการไหลทำหน้าที่ปรับอัตราการไหลของน้ำนมรวมถึงท่อสายใยลวดทำหน้าที่เชื่อมต่ออุปกรณ์ทุกตัวของระบบ และห้องฆ่าเชื้อทำหน้าที่ฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่มีในน้ำนมโดยจะทำงานร่วมกับแหล่งจ่ายและวัดไฟฟ้าแรงดันสูง ในการทดสอบนี้ จะทำการนำเชื้อจุลินทรีย์ *E.Coli* ปริมาณ 8.57 CFU/ml เติมลงในน้ำนมสเตอริไรซ์ขนาด 4 ลิตรและนำลงถังบรรจุน้ำนมและจะให้อัตราการไหลของน้ำนมและแรงดันไฟฟ้าคงที่ที่ 2 L/min และ 30 kV ตามลำดับ แต่ให้ระยะเวลาการฆ่าเชื้อมีค่าเพิ่มขึ้น โดยทำการเก็บตัวอย่างที่เวลาน้ำนมไหลผ่านภายในห้องฆ่าเชื้อฯ เป็นเวลา 10, 20 และ 30 นาที ตามลำดับ ปริมาณ 10 ml ในหลอดทดลอง นำตัวอย่างที่เก็บมา มาทำการเจือจางและเพาะเชื้อลงบนอาหารเลี้ยงเชื้อที่ใช้เป็นอาหารเลี้ยงเชื้อชนิด Nutrient Aga (NA) และ Eosin-Methylene Blue Agar (EMB) สำหรับเลี้ยงเชื้อ *E.coli* ในจานเพาะเชื้อด้วยวิธีการ Spread Plate บนที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 – 48 ชั่วโมง จากนั้น

จึงนำไปนับจำนวนเชื้อจุลินทรีย์โดยการเก็บตัวอย่างเชื้อ Bacteria ที่ต้องการวัดค่า OD (Optical Density) A620 ในอาหาร NB และ EMB ปริมาณ 3 มิลลิเมตร และนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Spectrophotometer เพื่อวัดค่า OD A620

ตารางที่ 3 แสดงปริมาณ *E. coli* พสมกับน้ำนมหลังผ่านห้องฆ่าเชื้อที่เวลาต่างๆ เมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์ที่ประมาณ 30 kV อัตราการไหล 2 L/min ใช้นมยูเอชทีไขมันต่ำปริมาณ 4 L พสมเชื้อ *E.coli* จากผลการทดสอบพบว่าเชื้อ *E. coli* เริ่มต้นที่มีปริมาณเชื้อ  $3.28 \times 10^5$  cells/ml เมื่อทำการทดสอบเครื่องฯ โดยระยะเวลาที่ห้องฆ่าเชื้อผ่านไป 10 นาที ปริมาณเชื้อ *E. coli* เหลือในอาหาร NA มีปริมาณเชื้อ *E. coli*  $8.10 \times 10^4$  cells/ml และในอาหาร EMB มีปริมาณเชื้อ *E. coli*  $7.10 \times 10^4$  cells/ml หรือมีการลดลงของเชื้อ 75.30 และ 78.35% ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการฆ่าเชื้อให้มีระยะเวลานานขึ้นไปถึง 30 นาที ปริมาณเชื้อ *E. coli* เหลือในอาหาร NA มีปริมาณเชื้อ *E. coli*  $6.05 \times 10^4$  cells/ml และในอาหาร EMB มีปริมาณเชื้อ *E. coli*  $1.09 \times 10^4$  cells/ml หรือมีการลดลงของเชื้อ 81.55 และ 96.67% ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่าจำนวนจุลินทรีย์สามารถลดลงได้ถึง 1-log Reduction โดยน้ำนมจะมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นหลังจากผ่านห้องฆ่าเชื้อ 2 - 3°C จากอุณหภูมิของน้ำนมก่อนเข้าห้องฆ่าเชื้อ ในส่วนของพลังงาน

ที่ใช้ไปทั้งระบบจะเท่ากับ  $2.73 \times 10^3$  J/kg อย่างไรก็ตามมาตรฐานปฏิบัติการ 5-log Reduction ที่กฎหมายบังคับใช้ในการผลิตอาหารเหลวจะต้องสามารถลดจำนวนของจุลินทรีย์ได้อย่างน้อยถึง 100,000 เท่า (0 % หรือ เหลืออย่างน้อย 1 – 2 เซลล์) ภายใต้กฎหมายนี้ 5-log Reduction จะต้องฆ่าเชื้อโรคที่เป็นปัญหาอย่าง

แท้จริงในการผลิตอาหารเหลวจึงจะเป็นที่ยอมรับ [14] ดังนั้นในการศึกษาต่อไปควรมีการศึกษาเกี่ยวกับการปรับเปลี่ยนคุณลักษณะทางไฟฟ้าและการไหลของระบบเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้า ความเข้มของสนามไฟฟ้า และอัตราการไหลที่เหมาะสมกับการทำงานของระบบ

ตารางที่ 3 ปริมาณ *E. coli* ผสมกับน้ำมันหลังผ่านห้องฆ่าเชื้อที่เวลาต่างๆ

เวลา (นาที)	NA (cell/ml)	EMB (cell/ml)	% การลดลงของ NA	% การลดลงของ EMB
0	$3.28 \times 10^5$	$3.28 \times 10^5$	0	0
10	$8.10 \times 10^4$	$7.10 \times 10^4$	75.30	78.35
20	$6.20 \times 10^4$	$5.55 \times 10^4$	81.09	83.23
30	$6.05 \times 10^4$	$1.09 \times 10^4$	81.55	96.67

## 5. สรุปและแนวทางในการพัฒนาต่อในอนาคต

ในบทความฉบับนี้ได้นำเสนอการพัฒนากระบวนการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำมันด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งเป็นการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำมันแบบการใช้พลังงานต่ำหรือแบบไม่ใช้ความร้อน โดยระบบฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ฯ ประกอบ แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์ ห้องฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ฯ ระบบการไหลของของไหลในการศึกษานี้ได้ทำการทดสอบการทำงานเบื้องต้นของ

ระบบด้วยน้ำมันไขมันดำที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วผสมกับเชื้อ *E.coli* ซึ่งจากการทดสอบพบว่าเชื้อ *E.coli* มีการลดลงจากปริมาณเชื้อเริ่มต้นจาก  $3.28 \times 10^5$  cells/ml ไปเป็น  $1.09 \times 10^4$  cells/ml ที่ระยะเวลาที่น้ำมันไหลผ่านภายในห้องฆ่าเชื้อประมาณ 30 นาที โดยน้ำมันจะมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นหลังจากผ่านห้องฆ่าเชื้อ 2 - 3 °C จากอุณหภูมิของน้ำมันก่อนเข้าห้องฆ่าเชื้อ

**ตารางที่ 4** การเปรียบเทียบคุณสมบัติของระบบการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่พัฒนาขึ้นกับระบบทั่วไป

รายละเอียด	ระบบที่ใช้ความร้อน	Clark and Peter [14]	ระบบที่พัฒนาขึ้น
อุณหภูมิในการฆ่าเชื้อ	71.1 °C สำหรับแบบความร้อนสูง 62.8 - 65.6 °C สำหรับแบบความร้อนต่ำ	น้อยกว่า 40 °C	น้อยกว่า 40 °C
เวลาในการฆ่าเชื้อ	15 วินาที สำหรับแบบความร้อนสูง 30 นาที สำหรับแบบความร้อนต่ำ	น้อยกว่า 5 วินาที	น้อยกว่า 30 นาที
กำลังการผลิต	ไม่มีข้อมูล	1,000 ถึง 5,000 L/hr	120 L/hr
ต้นทุนการผลิต	ไม่มีข้อมูล	0.9 – 2.1 Baht/L	ไม่มีข้อมูล
พลังงานที่ใช้	ไม่มีข้อมูล	$10^1 - 10^4$ J/kg	$2.73 \times 10^3$ J/kg

ในส่วนของพลังงานที่ใช้ไปทั้งระบบจะเท่ากับ  $2.73 \times 10^3$  J/kg ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของระบบการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่พัฒนาขึ้นกับระบบทั่วไป ในการศึกษาต่อไปควรมีปรับปรุงการศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของระบบต้นแบบฯ เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อให้ดียิ่งขึ้น และควรมีการทดสอบการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในของเหลวชนิดอื่นด้วย ซึ่งอาจจะมียังมีประกอบที่แตกต่างกันออกไป เช่น น้ำผลไม้ หรือน้ำผลไม้ที่มีเกลือเนื้อผสมอยู่ด้วย เป็นต้น

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ผลการวิจัย พัฒนาและวิศวกรรมภายใต้โครงการนี้ ได้รับการสนับสนุนจากโครงการส่งเสริมการผลิตงานวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (รหัสโครงการ HR2L-010)

## 7. 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 Swanson, 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. Pan-klang, N., Biansoongnern, S., Apiratikul, P. and SubsinghaPreliminary, W., 2008, "Study of PEF Application for Energy-Save Preservation of Foods", The 4<sup>th</sup> *Conference on Energy Network of Thailand*, 14 – 16 May. (in Thai)
14. Clark, J.P., 2006, "Pulsed electric field processing", *Food Technology*, Vol. 60, No. 1, pp. 66 – 67.
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. Sen-in, P., Pinchai, P., Chaekoe, O., Yawootti, A. and Intra, P., 2012, "Design of a pulsed electric field treatment chamber for a liquid foods pasteurization process", *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 35, No. 2, pp. 253 - 267 (in Thai)
17. <http://en.wikipedia.org/wiki/Electroporation>, Wikipedia, access on February 2011.
18. 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.
19. Yawootti, A., Asanavijit, V., Premrudeepreechacharn, S., and Intra, P., 2011, "A low-cost high-voltage pulse generator for electrostatic applications", *3<sup>rd</sup> Science Research Conference*, Phitsanulok, Thailand, 14 – 15 March. (in Thai)