การศึกษาเชิงตัวเลขของพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตและทางไฟฟ้าสำหรับการฆ่าเชื้อด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์

นายธีร เกรียงไกรวุฒิ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558

NUMERICAL STUDY OF THE GEOMETRICAL AND ELECTRICAL PARAMETERS FOR THE PULSED ELECTRIC FIELD (PEF) TREATMENT

Mr. Teera Kriengkriwut

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2015

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเชิงตัวเลขของพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตและทางไฟฟ้าสำหรับการฆ่าเชื้อด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์
โดย	นายธีร เกรียงไกรวุฒิ
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย เตชะอำนาจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย เตชะอำนาจ)

....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.ณัฐพงศ์ ตัณฑนุช)

ธีร เกรียงไกรวุฒิ : การศึกษาเชิงตัวเลขของพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตและทางไฟฟ้าสำหรับการฆ่าเชื้อด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ (NUMERICAL STUDY OF THE GEOMETRICAL AND ELECTRICAL PARAMETERS FOR THE PULSED ELECTRIC FIELD (PEF) TREATMENT) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร.บุญชัย เตชะอำนาจ, 87 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้วิเคราะห์ สนามไฟฟ้า การไหล และอุณหภูมิ สำหรับการใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์ในห้องฆ่าเชื้อแบบสนามไฟฟ้าในทิศทางการไหลซึ่งมีฉนวนรูปครึ่งวงรีโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. วิทยานิพนธ์นี้เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าและการไหล ที่ได้จากการแปรผันความยาวของอิเล็กโทรดแรงสูงและความสูงของฉนวน. ห้องฆ่าเชื้อแบบสนามไฟฟ้าในทิศทางการไหลมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงบริเวณรอยต่อของฉนวนกับอิเล็กโทรดแรงสูงและฉนวนกับอิเล็กโทรดกราวนด์. สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากที่สุดเมื่อความยาวของอิเล็กโทรดยาวเป็นสองเท่าของรัศมีและความสูงของฉนวนมีค่าเท่ากับ 0.38, 0.32 และ 0.26 mm เมื่อรัศมีมีขนาด 1.2, 2.5 และ 5 mm ตามลำดับ. การไหลวนในห้องฆ่าเชื้อเกิดขึ้นบริเวณด้านหลังของฉนวน โดยมีขนาดการไหลวนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความสูงของฉนวนและเพิ่มความเร็วการไหลของห้องฆ่าเชื้อ. ด้วยศักย์ไฟฟ้า 25 kV รอบการทำงาน 60×10^{-6} และอุณหภูมิขาเข้า 20 °C ส่งผลให้อุณหภูมิสูงสุดในห้องฆ่าเชื้อเท่ากับ 72 และ 46 °C เมื่อมีการระบายความร้อนแบบปกติและแบบบังคับ ตามลำดับ. ดังนั้น การระบายความร้อนจึงสำคัญต่อการการฆ่าเชื้อแบบพัลส์ในห้องฆ่าเชื้อแบบสนามไฟฟ้าในทิศทางการไหล. นอกจากนี้ วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาการลดอุณหภูมิลงโดยการใช้บริเวณฆ่าเชื้อแบบอนุกรม. การอนุกรมบริเวณฆ่าเชื้อ 2 บริเวณ ทำให้อุณหภูมิลดลง 40 % เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีของ 1 บริเวณฆ่าเชื้อ.

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต ....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก ....

ปีการศึกษา 2558

5570234921 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEYWORDS: PULSED ELECTRIC FIELD / TREATMENT CHAMBER / PEF

TEERA KRIENGKRIWUT: NUMERICAL STUDY OF THE GEOMETRICAL AND ELECTRICAL PARAMETERS FOR THE PULSED ELECTRIC FIELD (PEF) TREATMENT. ADVISOR: PROF. BOONCHAI TECHAUMNAT, Ph.D., 87 pp.

This thesis presents the analysis of electric field, flow and temperature for the application of pulsed electric field in the co-field treatment chamber with the elliptic insulator type by using the finite element method. The thesis compares electric field and flow by varying the length of high-voltage electrode and the height of insulator. The co-field treatment chamber has highly non-uniform electric field at the junction between the insulator and the high-voltage/grounded electrode. The electric field is most uniform when the length of high-voltage electrode is 2 times of chamber radius and the height of insulator is 0.38, 0.32 and 0.26 mm when chamber radius is 1.2, 2.5 และ 5 mm respectively. The circulating flow of fluid exists at the rear side of the insulator, where the circulating flow size increases with the height of insulator and the food velocity. With an applied voltage of 25 kV, duty cycle of 60×10^{-6} and inlet temperature of 20 °C, the maximum temperature under free and forced convection is 72 and 46 °C, respectively. Therefore, the heat transfer is important for the co-field treatment chamber. Moreover, this thesis studies the reduction of temperature by using a series of treatment zones. The use of two treatment zones in series reduces the maximum temperature by 40% when compared with the case of single treatment zone.

Department:	Electrical Engineering	Student's Signature	....
Field of Study:	Electrical Engineering	Advisor's Signature	....
Academic Year:	2015		

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณคณาจารย์, เจ้าหน้าที่ปฏิบัติการ รวมถึง น้องนิสิตระดับปริญญา ใน ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สำหรับความรู้, ข้อคิดเห็น และให้คำที่ปรึกษา อันเป็นประโยชน์ต่อ ผู้เขียน ทำให้ผู้สามารถเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้

สารบัญ

หน้า

หน้า

หน้า

สารบัญตาราง

หน้า

สารบัญรูป

หน้า

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีผลิตผลทางการเกษตรมากมาย ซึ่งรวมถึงพืชอาหาร (ผักและผลไม้). ในช่วงเวลาที่ผลิตผลจากพืชอาหารชนิดหนึ่งมีปริมาณมากเกินความต้องการ ณ ขณะนั้น ผลิตผลจะมีราคาตกต่ำ และ/หรือเน่าเสีย ซึ่งเป็นการสูญเปล่าของอาหาร. การแปรรูปผลิตผลจากพืชอาหารเป็นผลิตภัณฑ์อื่น ๆ เป็นทางเลือกในการเพิ่มมูลค่าของพืชอาหารและเป็นการใช้ผลิตผลอย่างมีประสิทธิภาพ ตัวอย่างเช่น การแปรรูปเป็นน้ำผักหรือผลไม้ เป็นต้น. นอกจากเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและศักยภาพทางภาคเกษตรแล้ว การแปรรูปผลิตภัณฑ์จากพืชอาหารยังมีความสำคัญต่อความมั่นคงของประเทศ. ทั้งนี้ความต้องการอาหารมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามจำนวนประชากร ในขณะที่การผลิตพืชอาหารมีข้อจำกัดด้านพื้นที่ และยังได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะอากาศ. การรักษาความมั่นคงทางอาหารจึงเป็นสิ่งที่สำคัญ.

กระบวนการที่สำคัญอย่างหนึ่งสำหรับการแปรรูปพืชอาหารคือ การฆ่าเชื้อหรือทำลายเชื้อจุลินทรีย์ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์เก็บได้นานขึ้น. การฆ่าเชื้อสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้การเติมสารกันบูด หรือการให้ความร้อนเช่น การพาสเจอร์ไรซ์ (Pasteurization). การใช้สารกันบูดมีต้นทุนต่ำ แต่อาจมีสารเคมีตกค้างได้. การพาสเจอร์ไรซ์เป็นวิธีการให้ความร้อนกับเป้าหมายที่อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม ซึ่งข้อดีของการพาสเจอร์ไรซ์คือ ใช้เวลาในการฆ่าเชื้อน้อย. อย่างไรก็ตาม การพาสเจอร์ไรซ์เป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานสูง ทำให้เกิดการสูญเสียรสชาติและสารอาหารไปจากวัตถุดิบเนื่องจากความร้อน. ในปัจจุบันการใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์ (Pulsed electric field, PEF) สำหรับฆ่าเชื้อ เป็นวิธีที่ได้รับการศึกษาศักยภาพอย่างกว้างขวาง. การฆ่าเชื้อด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์เป็นกระบวนการไม่ใช้ความร้อน (Non-thermal processing) ทำโดยป้อนสนามไฟฟ้าความเข้มสูงให้กับเป้าหมายเป็นเวลาสั้นๆเพื่อฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ภายในผลิตภัณฑ์. ข้อดีของการใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์คือ เป็นวิธีที่ใช้ความร้อนต่ำจึงทำให้สารอาหารและคุณค่าทางอาหารสูญเสียน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับการพาสเจอร์ไรซ์.

พื้นฐานที่สำคัญของการฆ่าเชื้อด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์คือ การอัดประจุให้เมมเบรนของเซลล์สิ่งมีชีวิตเพื่อทำลายเมมเบรน [1]. เซลล์ที่อยู่ภายในตัวกลางนำไฟฟ้า เมื่อได้รับสนามไฟฟ้าจะเกิดกระแสไฟฟ้าอัดประจุเซลล์เมมเบรน ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเมมเบรนของเซลล์ ซึ่งเป็นชั้นไขมัน (lipid layer) มีความหนาในช่วงนาโนเมตร. เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ต่อไปนี้จะเรียกว่า “แรงดันเมม

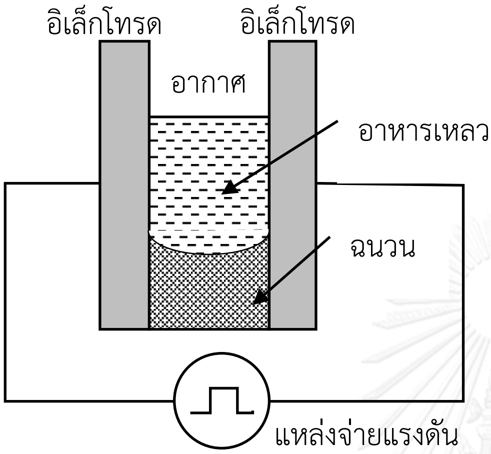
เบรน (Membrane voltage)” มีค่าสูงเกินกว่าค่าวิกฤตค่าหนึ่ง (ประมาณ 1 V) เมมเบรนของเซลล์จะเบรกดาวน์ ทำให้เกิดรู (Pore) ขึ้นที่เซลล์เมมเบรน. หากสนามไฟฟ้ามีความสูงเพียงพอ และมีเวลาในการคงอยู่นานพอ การเบรกดาวน์ของเมมเบรนจะเป็นแบบถาวร ทำให้เซลล์ตายได้ [2].

การใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์สามารถทำลายเชื้อจุลินทรีย์ในนมหรือเชื้อแบคทีเรียในน้ำผลไม้เพื่อยืดอายุของผลิตภัณฑ์ [1]. นอกจากนี้ กระบวนการใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์อาจใช้แยกเซลล์จากพืชเช่น การแยกเซลล์ขององุ่น [3] หรือ แยกน้ำมันออกจากเซลล์ผัก [1]. การเบรกดาวน์ของเมมเบรนยังสามารถช่วยเร่งกระบวนการขจัดน้ำ (Dehydration) ซึ่งใช้ในการแปรรูปผลิตผลพืชอาหารลักษณะของแข็งอีกด้วย [4]. เนื่องจากการฆ่าเชื้อด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ เป็นการทำลายจุลินทรีย์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้า หากเรามีการควบคุมความร้อนที่เกิดขึ้น (เป็นผลข้างเคียง) อย่างเหมาะสม ผลิตภัณฑ์จะสูญเสียรสชาติและคุณค่าทางโภชนาการน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับการพาสเจอร์ไรส์. นอกจากนี้ การฆ่าเชื้อด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ยังใช้พลังงานในการฆ่าเชื้อน้อยกว่าวิธีการทางความร้อนอีกด้วย. อย่างไรก็ดี ข้อจำกัดของการใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์ในปัจจุบันเป็นด้านการลงทุนในระบบ ซึ่งเกี่ยวโยงกับการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการฆ่าเชื้อ.

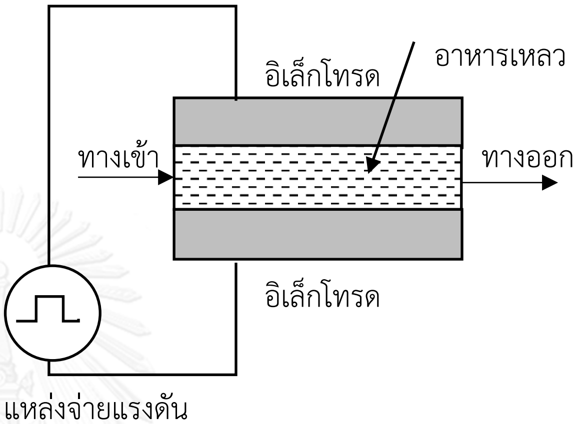
ระบบการฆ่าเชื้อด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์สำหรับเป้าหมายที่เป็นของเหลวเช่น นมหรือน้ำผลไม้ (ซึ่งจะอ้างอิงว่าเป็น “อาหารเหลว” ต่อไป) ประกอบด้วย (1) แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (2) ห้องฆ่าเชื้อ (Treatment chamber) และ (3) ระบบปั๊มและท่อสำหรับขับเคลื่อนอาหารเหลวในกรณีที่เป็นการฆ่าเชื้อแบบต่อเนื่อง. แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงให้แรงดันขาออกระดับกิโลโวลต์ ขึ้นกับเรขาคณิตของอิเล็กโตรดและห้องฆ่าเชื้อ. ห้องฆ่าเชื้อมีลักษณะเรขาคณิตและการจัดเรียงอิเล็กโทรดที่แตกต่างกันออกไป. เราสามารถแบ่งประเภทของห้องฆ่าเชื้อได้เป็น แบบที่ใช้กับอาหารที่อยู่กับที่ (Static treatment chamber) ดังรูปที่ 1.1 (ก) และแบบที่ของเหลวมีการไหลอย่างต่อเนื่อง (Continue treatment chamber) ดังรูปที่ 1.1 (ข). ห้องฆ่าเชื้อแบบแรก มักจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบคู่ขนานเพื่อให้สนามไฟฟ้ามีค่าสม่ำเสมอทั่วปริมาตรของเป้าหมาย. ห้องฆ่าเชื้อแบบที่สองมีการใช้อิเล็กโทรดหลายรูปแบบเช่น อิเล็กโทรดแบบคู่ขนาน อิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม อิเล็กโทรดแบบ Co-field (ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดต่อไป). ห้องฆ่าเชื้อแบบที่อาหารเหลวอยู่กับที่เหมาะสำหรับใช้ทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ เนื่องจากมีต้นทุนต่ำ แต่มีข้อจำกัดที่ต้องเปลี่ยนถ่ายอาหารเหลวระหว่างการทดลอง. ห้องฆ่าเชื้อแบบที่มีการไหลของอาหารเหลวอย่างต่อเนื่อง เหมาะสมสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมการผลิต เนื่องจากมีความสามารถในการจัดการอาหารเหลว (ต่อหนึ่งหน่วยเวลา) ที่สูงกว่า.

ลักษณะของห้องฆ่าเชื้อที่สำคัญคือ ความสามารถฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่อยู่ในอาหารเหลวได้อย่างทั่วถึง. ฉนวนไฟฟ้าที่ใช้ต้องทนต่อความร้อนเมื่อใช้สนามไฟฟ้าขณะที่ฆ่าเชื้อได้. ตัวนำและฉนวนต้อง

ไม่ทำให้เกิดการปนเปื้อนต่ออาหารเหลวที่ผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อ. สำหรับห้องฆ่าเชื้อแบบที่อาหารเหลวไหลอย่างต่อเนื่อง ลักษณะเรขาคณิตของ ท่อ ฉนวนและอิเล็กโทรด ต้องเหมาะสมกับความเร็วในการจัดการ (อัตราการไหลของอาหารเหลว) และไม่ทำให้เกิดการหมุนวนของอาหารเหลวภายใน. นอกจากนี้ ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในห้องฆ่าเชื้อ จะต้องไม่ทำให้เกิดผลกระทบที่ไม่ต้องการต่อรสชาติและสารอาหารของอาหารเหลว.



(ก) Static treatment chamber



(ข) Continuous-flow treatment chamber

รูปที่ 1.1 ประเภทของห้องฆ่าเชื้อ

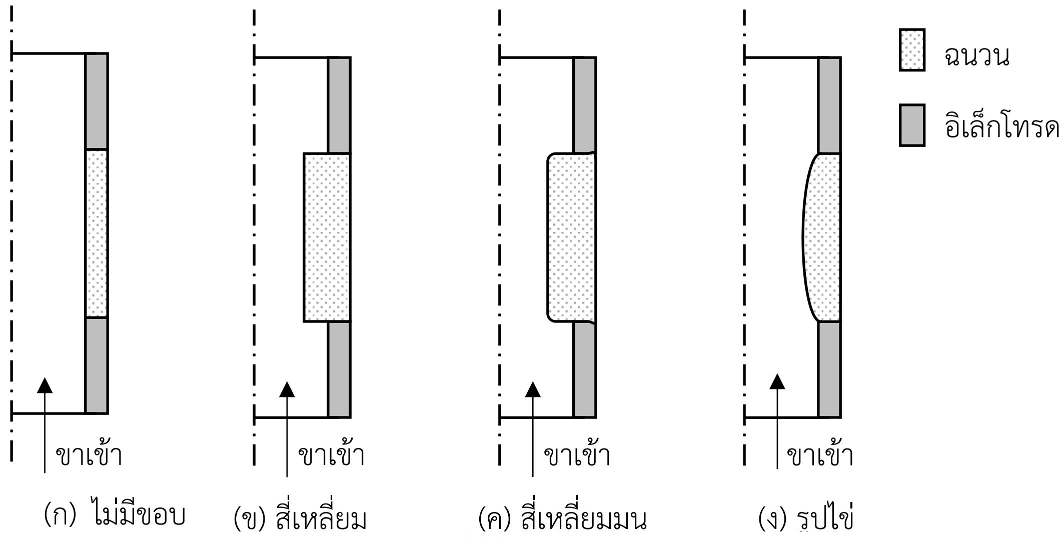
จากที่ได้กล่าวมา เราจะเห็นว่าการฆ่าเชื้อด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์มากมาย. ความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าขึ้นอยู่กับลักษณะของห้องฆ่าเชื้อ. ลักษณะของห้องฆ่าเชื้อที่ไม่เหมาะสมมีผลต่อการไหลของอาหารเหลวภายใน ทำให้อาหารถูกจัดการอย่างไม่สม่ำเสมอ แม้ว่าสนามไฟฟ้าจะกระจายสม่ำเสมอ. ลักษณะของการไหล, คุณสมบัติทางความร้อนของห้องฆ่าเชื้อรวมถึงวิธีการระบายความร้อน ล้วนมีผลกระทบต่อการเพิ่มอุณหภูมิของอาหารเหลวเมื่อผ่านการฆ่าเชื้อด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์. อาหารเหลวที่ต้องการจัดการยังเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งเนื่องจากมีลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า (สภาพนำ) ทางกล (ความหนืด) และทางความร้อน (สภาพนำความร้อน) ที่แตกต่างกันออกไป. วิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) ซึ่งเป็นวิธีเชิงเลขเพื่อจำลองสนามไฟฟ้า การไหลของอาหารเหลว และการกระจายของอุณหภูมิภายในห้องฆ่าเชื้อ เพื่อหาความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น เนื่องจากพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมา.

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์ในการจัดการผลิตภัณฑ์อาหารมีขึ้นตั้งแต่ปี 1960 และมีจำนวนงานวิจัยเพิ่มขึ้น [5]. ตัวอย่างของการประยุกต์ใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์ได้แก่ การฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ หรือแบคทีเรีย (Microbial Inactivation) ในอาหารเหลวเพื่อยืดอายุอาหาร ผลิตภัณฑ์ที่สามารถใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์ได้ได้แก่ นม [6] น้ำผลไม้ [7] เป็นต้น. การสกัด (Extraction) สารที่สำคัญบางชนิดที่อยู่ในเซลล์ออกมา โดยการใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์เจาะรูผนังเซลล์และเซลล์เมมเบรน แล้วนำสารออกมาจากเซลล์ เช่นการสกัดสารแอนโทไซยานิน (Anthocyanin) จากองุ่น [8] หรือสกัดเม็ดสีจากบีทรูท [9]. การนำน้ำออกจากเซลล์ (Dehydration) โดยใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์เจาะผนังของเซลล์เพื่อให้น้ำออกมาจากเซลล์ได้ง่ายขึ้น [10]. หากเทียบกับการใช้ความร้อน (เพียงอย่างเดียว) อบเซลล์เพื่อให้น้ำระเหย การใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์ช่วยลดอุณหภูมิที่ใช้อบเพื่อทำให้น้ำระเหยได้.

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการจำลองสนามประเภทต่างๆในห้องฆ่าเชื้อ ซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับวิทยานิพนธ์มีดังต่อไปนี้

M. Lindgren, K. Aronsson, S. Galt และ T. Ohlsson [11] ได้จำลองเปรียบเทียบความร้อนที่เกิดขึ้นจากการใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์แบบสนามไฟฟ้าในห้องฆ่าเชื้อแบบสนามไฟฟ้าทิศทางการไหล (Co-field) ที่มีฉนวนทั้ง 4 แบบ คือ แบบไม่มีขอบ, ขอบแบบสี่เหลี่ยม, ขอบสี่เหลี่ยมมน และ ขอบแบบเป็นรูปไข่ ตามรูปที่ 1.2 (ก) ถึง (ง) ตามลำดับ. การจำลองใช้ FEMLAB^{TM} ซึ่งเป็นซอฟท์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป. กำหนดการไหลเป็นราบเรียบมีตัวเลขเรย์โนลด์ช่วง 134 ถึง 423. สนามไฟฟ้าเฉลี่ยระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 2.4 kV/cm. ตัวอย่างของไหลมีค่าความหนืด 1.04 $\times 10^{-3}$ Ns/m^2 สภาพนำไฟฟ้า 0.4 S/m และสภาพนำความร้อน 0.6 W/mK. ในการจำลองปัญหาความร้อน อุณหภูมิขาเข้ากำหนดเท่ากับ 30 °C โดยอิเล็กโทรดมีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน 10 W/m^2 และเงื่อนไขฉนวนความร้อนถูกกำหนดบนขอบเขตส่วนที่เหลือ. ผลจากการจำลองคืออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ห้องฆ่าเชื้อแต่ละแบบจะอยู่บริเวณรอยต่อระหว่างฉนวนและอิเล็กโทรด แต่จะมีการกระจายของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงบนของไหลแตกต่างกัน โดยแบบไม่มีขอบจะมีอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงบริเวณกลางห้อง (ΔT_{cen} = อุณหภูมิขาออกบริเวณกลางห้องฆ่าเชื้อ – อุณหภูมิขาเข้าบริเวณกลางห้องฆ่าเชื้อ) 28 % เมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเฉลี่ย (ΔT_{avg} = อุณหภูมิขาออกเฉลี่ยของห้องฆ่าเชื้อ – อุณหภูมิขาเข้าเฉลี่ยของห้องฆ่าเชื้อ) ซึ่งมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับขอบสี่เหลี่ยมมนและขอบแบบเป็นรูปไข่ ซึ่งมีค่า 34 % และ 32 % ตามลำดับ.



รูปที่ 1.2 ประเภทของฉนวนในห้องฆ่าเชื้อแบบสนามไฟฟ้าทิศทางการไหล (Co-field)

R. Buckow, P. Baumann, S. Schroeder และ K. Knoerzer [12] ได้จำลองหาค่าประสิทธิภาพการใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์ในห้องฆ่าเชื้อแบบสนามไฟฟ้าในทิศทางการไหล ด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics™ ซึ่งใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของรูปทรงของฉนวนทั้ง 4 แบบเช่นเดียวกับงานของ Lindgren และคณะ [11]. เงื่อนไขขอบเขตให้อิเล็กโทรดแรงดันสูงมีความต่างศักย์ 22.18 kV. ตัวอย่างเป็นของเหลวที่มีสภาพนำไฟฟ้า 0.4 S/m ที่ 20 °C และเปลี่ยนแปลงสภาพนำไฟฟ้าตามอุณหภูมิ. กำหนดการไหลเป็นแบบปั่นป่วนด้วยความเร็วขาเข้า 4 m/s และกำหนดขอบเขตผนังท่อเป็นแบบลื่นไถล. ผลจากการจำลองแสดงให้เห็นว่าสนามไฟฟ้าสูงบริเวณรอยต่อระหว่างอิเล็กโทรดกับฉนวนไฟฟ้า และรูปทรงของฉนวนมีผลต่อการกระจายสนามไฟฟ้า. ของไหลมีความเร็วสูงบริเวณกลางท่อและจะไหลช้าบริเวณผนังท่อ. รูปทรงของฉนวนมีผลให้ของไหลหยุดนิ่งบริเวณขอบของฉนวนแข็ง ซึ่งคั่นระหว่างอิเล็กโทรดแรงดันสูงและอิเล็กโทรดกราวนด์ (ขอบแบบสี่เหลี่ยม, ขอบสี่เหลี่ยมมน). พลังงานที่ตัวอย่างได้รับมีประสิทธิภาพ (อัตราส่วนระหว่างผลคูณแรงดันและกระแสที่ใช้ป้อนให้อิเล็กโทรด กับ สนามไฟฟ้ากำลังสองคูณด้วยสภาพนำไฟฟ้าของของเหลว) ไม่เท่ากัน ซึ่งขอบฉนวนแบบสี่เหลี่ยมให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด และประสิทธิภาพจะแปรผันตามรัศมีของท่อต่อระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ซึ่งรัศมีต่อระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดมีค่าน้อยจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า.

M. Shynkaryk และ S. Sastry [13] ได้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองอาหารเหลวที่มีความหนืดสูงไหลผ่านท่อที่มีแผ่นอิเล็กโทรดวางคู่ขนานกัน. ผู้วิจัยได้เปรียบเทียบความร้อนที่เกิดขึ้นจากอิเล็กโทรดแบบที่ไม่มีฉนวน และแบบมีฉนวนอยู่ระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด. เนื่องจากอาหารเหลวมีความหนืดสูง จึงไม่สามารถใช้ความเร็วสูงได้ ทำให้เกิดความร้อนที่อาหารเหลวสูง. ผลการจำลองแสดงว่า

ท่อที่มีแผ่นอิเล็กโทรดวางคู่ขนานกันโดยไม่มีฉนวนระหว่างอิเล็กโทรดจะมีการกระจายอุณหภูมิที่สูงกว่าแบบที่มีฉนวนอยู่ระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารูปทรงของห้องฆ่าเชื้อมีผลต่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้า.

A. Fiala, P. Wouters, E. Bosch และ Y. Creyghton [14] ได้จำลองสนามไฟฟ้าในห้องฆ่าเชื้อที่ใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์แบบสนามไฟฟ้าในทิศทางการไหล. จำลองสนามไฟฟ้าและความเร็วของไหล ด้วยโปรแกรม ANSYS/Multiphysics ซึ่งเป็นโปรแกรมหาคำตอบโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. รัศมีของห้องฆ่าเชื้อมีขนาด 3 mm ขนาดระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดมีขนาด 3.4 mm. แรงดันที่อิเล็กโทรดเท่ากับ 8.48 kV (สนามไฟฟ้าเท่ากับ 24 kV/cm), อัตราการไหลของของไหลเท่ากับ 3.6 l/h (ความเร็วเฉลี่ย 0.035 m/s) และ อุณหภูมิขาเข้าของของไหลเท่ากับ 30 ℃. สภาพนำไฟฟ้าของของไหลเท่ากับ 16 mS/cm ที่ 30 ℃ ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหลเท่ากับ 0.22 W/mK. การจำลองจะเปลี่ยนค่าความถี่ของแรงดันคูณกับระยะเวลาคงอยู่ของสนามไฟฟ้า ($f\tau$) มาเปรียบเทียบกัน ซึ่งพบว่าปรับเพิ่มค่า $f\tau$ 6 % จะทำให้อุณหภูมิตรงกลางห้องฆ่าเชื้อเพิ่ม 0.1 °C.

M. Sack และ G. Muller [3] ได้จำลองสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ฟองอากาศภายในห้องสกัดเซลล์. มีวัตถุดิบเป็นองุ่น ซึ่งประกอบไปด้วยเมล็ด และฟองอากาศ. กำหนดค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ย 40 kV/cm โดยที่ภายในห้องสกัดเซลล์มีการเพิ่มความดันเป็น 4 bar (40 kPa) เพื่อให้ฟองอากาศเล็กลง. ผลการจำลองสนามไฟฟ้าบนฟองอากาศมีค่าสูงกว่าค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยไม่เกิน 5 % เท่านั้น.

จากที่ได้กล่าวมาในหัวข้อนี้ เราเห็นได้ว่าการจำลองสนามในงานวิจัยที่ผ่านมามักทำเป็นกรณีเฉพาะของห้องฆ่าเชื้อและของอาหารเหลว ที่สภาวะของการจัดการหนึ่งเท่านั้น. ในทางปฏิบัติ อาหารเหลวที่เป็นเป้าหมายของการฆ่าเชื้อด้วยวิธีสนามไฟฟ้าแบบพัลส์มีลักษณะสมบัติทางกายภาพแตกต่างกันไป และมีขนาดมิติของห้องฆ่าเชื้อก็แตกต่างกันไปตามอัตราการไหลผ่านของอาหารเหลวที่ต้องการ. ในวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยจึงทำการจำลองสนามทั้งสามโดยเน้นที่การหาผลกระทบของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ที่มีต่อลักษณะการกระจายของสนาม และหาการเปลี่ยนแปลงของลักษณะห้องฆ่าเชื้อที่เหมาะสม เพื่อให้กระบวนการฆ่าเชื้อด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์มีประสิทธิภาพ.

1.3 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ มีดังต่อไปนี้

1 ทำให้เข้าใจถึงผลของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเรขาคณิตของห้องฆ่าเชื้อที่มีต่อการกระจายของสนามไฟฟ้า และต่อพลังงานที่อาหารเหลวได้รับจากการไหลผ่านห้องฆ่าเชื้อ.

2 เพื่อให้สามารถปรับเปลี่ยนรูปร่างของห้องฆ่าเชื้อและพารามิเตอร์ของการจัดการอาหารด้วยพัลส์ไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม.

3 ตรวจสอบการเพิ่มอุณหภูมิของอาหารเหลวเนื่องจากความร้อนแบบจูล (Joule heating) ในสภาวะเงื่อนไขของตัวกลาง พัลส์ไฟฟ้า และรูปร่างของห้องฆ่าเชื้อต่างๆ.

4 ทดลองหาวิธีการควบคุมอุณหภูมิของอาหารเหลว

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ทำให้ได้องค์ความรู้พื้นฐานที่จะทำให้สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์อย่างเป็นระบบของอาหารเหลว. รูปร่างและมิติของห้องฆ่าเชื้อและพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์

- พลังงานที่อาหารเหลวได้รับ
- ลักษณะการไหล ซึ่งเป็นดัชนีบ่งชี้การจัดการเกิน (Over-treatment) และการจัดการขาด (Under-treatment) ที่เกิดขึ้นกับตัวกลาง
- การเพิ่มอุณหภูมิของอาหารเหลว เนื่องจากกระแสไฟฟ้า
- แนวทางการควบคุมการเพิ่มอุณหภูมิของอาหาร

ความรู้ที่ได้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการจัดการของเหลวด้วยสนามไฟฟ้าโดยไม่จำกัดที่การฆ่าเชื้อเท่านั้น

1.5 ระเบียบวิธีวิจัย

ระเบียบวิธีที่ใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างสนามต่างๆ และพารามิเตอร์มีดังต่อไปนี้

1 ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับสนามไฟฟ้า การไหลของของเหลวในท่อ และการวิเคราะห์อุณหภูมิ

2 ศึกษาทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์ กับอาหารเหลว และการจำลองสนาม

3 ศึกษาพื้นฐานวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการประยุกต์ใช้คำนวณสนามไฟฟ้า การไหล และอุณหภูมิ

4 คำนวณสนามไฟฟ้าในห้องฆ่าเชื้อโดยปรับเปลี่ยนรูปร่าง มิติของอิเล็กโทรดและฉนวนให้เหมาะสม

5 คำนวณการไหลของอาหารเหลวผ่านห้องฆ่าเชื้อด้วยสนามไฟฟ้า

6 ทดลองปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ในการจัดการอาหารเหลว วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสนามที่เกิดขึ้น และผลต่อกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์

1.6 ขอบเขตของการวิจัย

1 พิจารณาอาหารเหลวเป็นของเหลวและให้การไหลเป็นแบบราบเรียบ

2 วิเคราะห์สนามในสภาวะคงตัว (Steady state)

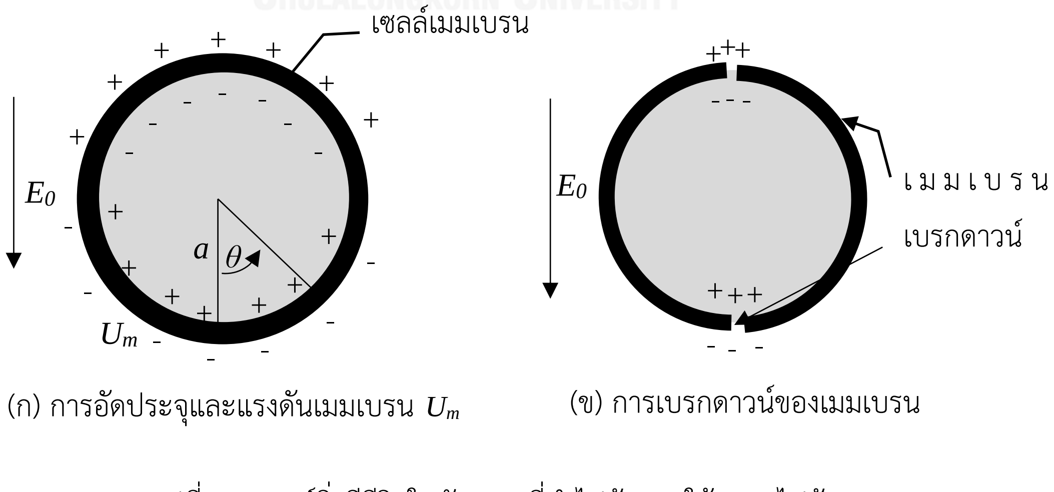
บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ผลของสนามไฟฟ้าที่มีต่อเมมเบรนของเซลล์สิ่งมีชีวิต

พิจารณาเซลล์สิ่งมีชีวิตที่อยู่ภายในตัวกลางที่นำไฟฟ้า. เมื่อเซลล์ได้รับสนามไฟฟ้าภายนอก E_0 เมมเบรนถูกอัดประจุและเกิดแรงดันตกคร่อมเมมเบรน U_m ซึ่งขึ้นอยู่กับมุม θ ที่กระทำกับสนามไฟฟ้าและรัศมีของเซลล์ a ตามรูปที่ 2.1 (ก).

$$U_m = 1.5 a E_0 \cos\theta \tag{2.1}$$

โดยเวลาคงตัวในการอัดประจุขึ้นกับ ขนาดของเซลล์ สภาพนำไฟฟ้าภายในเซลล์ สภาพนำภายนอกเซลล์ ความจุไฟฟ้าของเมมเบรน และสภาพนำไฟฟ้าของผนังเซลล์ (ในกรณีที่มีผนังเซลล์). เมื่อแรงดันเมมเบรนในสภาวะคงตัวมีค่าสูงกว่าแรงดันวิกฤต ซึ่งมีค่าประมาณ 1 V และเวลาป้อนสนามไฟฟ้ามากพอเมื่อเทียบกับเวลาคงตัวในการอัดประจุ จะเกิดการเบรกดาวน์บนเมมเบรน ณ ตำแหน่งที่มีค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด ทำให้เซลล์เมมเบรนเกิดเบรกดาวน์ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ข). ช่องที่เกิดขึ้นทำให้มีการถ่ายเทสารระหว่างภายในกับภายนอกเซลล์ ซึ่งการไหลของมวลจะเป็นไปตามความเข้มข้นของภายในเซลล์และภายนอกเซลล์. ถ้าเซลล์ยังคงอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า รูบนเซลล์มีขนาดใหญ่ขึ้น หรือเพิ่มจำนวนขึ้น. เมื่อหยุดป้อนสนามไฟฟ้า เราจำแนกพฤติกรรมการเบรกดาวน์ของเมมเบรนได้เป็นของเซลล์ได้ 2 กรณีคือ (1) การเบรกดาวน์แบบคืนสภาพกลับได้ (Reversible breakdown) (2) การเบรกดาวน์แบบคืนสภาพกลับไม่ได้ (Irreversible breakdown) ซึ่งทำให้เซลล์ตายอย่างสมบูรณ์.



(ก) การอัดประจุและแรงดันเมมเบรน U_m (ข) การเบรกดาวน์ของเมมเบรน

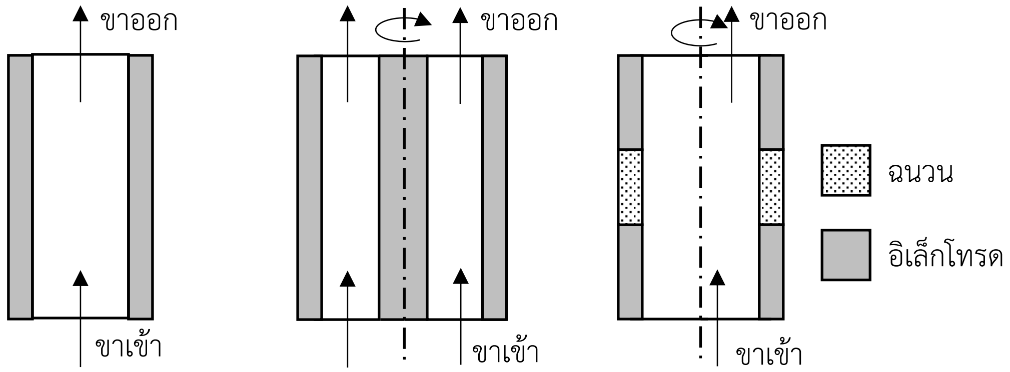
รูปที่ 2.1 เซลล์สิ่งมีชีวิตในตัวกลางที่นำไฟฟ้าภายใต้สนามไฟฟ้า E_0

2.2 การฆ่าเชื้อด้วยสนามไฟฟ้า

หัวข้อที่ผ่านมาได้เสนอว่า เราสามารถฆ่าเซลล์จุลินทรีย์ได้ โดยป้อนสนามไฟฟ้าให้กับเซลล์ด้วยความเข้มสนามไฟฟ้าและเวลาที่เพียงพอ. ขนาดสนามไฟฟ้าที่จำเป็นต้องใช้ในการฆ่าเชื้อขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อจุลินทรีย์ที่เป็นเป้าหมาย. จุลินทรีย์ที่เป็นเป้าหมายของการฆ่าเชื้อมีขนาดอยู่ในช่วงประมาณ 0.5 ถึง 10 μm และมีอาจมีรูปร่างไม่เป็นทรงกลม [5]. การป้อนสนามไฟฟ้าให้กับอาหารเหลวใช้พัลส์สนามไฟฟ้าที่มีเวลาคงอยู่ (Duration) สั้นๆ ขึ้นอยู่กับขนาดของสนามไฟฟ้าเช่น ถ้าการฆ่าเซลล์จุลินทรีย์ต้องใช้ความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วง 0.5 - 5 kV/mm สำหรับความกว้างพัลส์ในช่วง 100 – 10,000 μs เราสามารถใช้ความกว้างพัลส์น้อยกว่า 100 μs เมื่อสนามไฟฟ้าที่ขนาดมากกว่า 5 kV/mm [1]. จำนวนพัลส์หรือความถี่ของพัลส์แตกต่างกันออกไปตามชนิดของจุลินทรีย์ แต่ตามปกติสำหรับการฆ่าเชื้อจะต้องใช้จำนวนพัลส์ประมาณ 10 – 20 พัลส์ [1].

นอกจากสนามไฟฟ้าแล้ว งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิให้กับอาหารเหลวก่อนเข้ากระบวนการฆ่าเชื้อด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ ทำให้สามารถฆ่าเชื้อได้ด้วยความเข้มสนามไฟฟ้าที่ต่ำลง. ตัวอย่างเช่น Heinz และ Zhang ได้ฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในนมด้วยสนามไฟฟ้าที่เพิ่มอุณหภูมิก่อนฆ่าเชื้อเป็น 20 °C พบว่าเมื่อใช้สนามไฟฟ้า 40 kJ/kg ที่ 20 °C สามารถได้ผลการฆ่าเชื้อเทียบเท่ากับกรณีที่ใช้พลังงาน 100 kJ/kg ที่อุณหภูมิ 7 °C [1]. อย่างไรก็ตามงานวิจัยเดียวกันนี้ไม่พบผลของอุณหภูมิเมื่อปรับเพิ่มอุณหภูมิของนมจาก 20 °C เป็น 30 °C.

วิทยานิพนธ์นี้จำลองสนามในห้องฆ่าเชื้อสำหรับอาหารเหลว ซึ่งประกอบอิเล็กโทรดเข้ากับระบบท่อเพื่อใช้การจัดการอาหารเหลวอย่างต่อเนื่อง. ลักษณะที่นิยมใช้ได้แก่ อิเล็กโทรดแบบคู่ขนาน (Parallel configuration), ทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม (Coaxial configuration) และ สนามไฟฟ้าในทิศทางการไหล (Co-field or Co-linear configuration) ดังรูปที่ 2.2 (ก), (ข) และ (ค) ตามลำดับ. การใช้อิเล็กโทรดแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ทำให้กระแสไฟฟ้ามีค่าสูงในบางบริเวณ จึงอาจเกิดการจัดการเกิน (Over-treatment) และเกิดจุดร้อน (Hot spot) ภายในห้องฆ่าเชื้อได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของอิเล็กโทรดแบบสนามไฟฟ้าในทิศทางการไหล. ด้วยเหตุนี้ จึงมีการปรับรูปร่างของฉนวนที่คั่นระหว่างอิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูงกับอิเล็กโทรดกราวนด์ เพื่อลดปัญหาสนามไฟฟ้าสูงและจุดร้อนที่เกิดขึ้น. ลักษณะรูปแบบของฉนวนที่ได้มีการศึกษาได้แก่แบบไม่มีขอบ, ขอบแบบสี่เหลี่ยม, ขอบสี่เหลี่ยมมน และ ขอบแบบเป็นรูปไข่ [3, 13] ซึ่งกล่าวไปในหัวข้อที่ 1.2.



(ก) อิเล็กโทรดแบบคู่ขนาน (ข) ทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม (ค) สนามไฟฟ้าในทิศทางการไหล

รูปที่ 2.2 รูปแบบของห้องฆ่าเชื้อ

2.3 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์เป็นวิธีที่ใช้เงินลงทุนสูง. การจำลองก่อนสร้างต้นแบบจริงจะช่วยลดต้นทุนได้มาก. วิธีการจำลองเพื่อหาค่าต่างๆเช่น สนามไฟฟ้า, ความเร็ว หรือความร้อน มีอยู่หลายวิธี เช่น วิธีผลต่างสืบเนื่อง หรือ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นต้น. วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นตัวเลือกที่ดีในการหาคำตอบของขอบเขตที่ซับซ้อน สามารถหาผลลัพธ์ได้แม่นยำโดยที่ไม่ใช้เวลานานเกินไป.

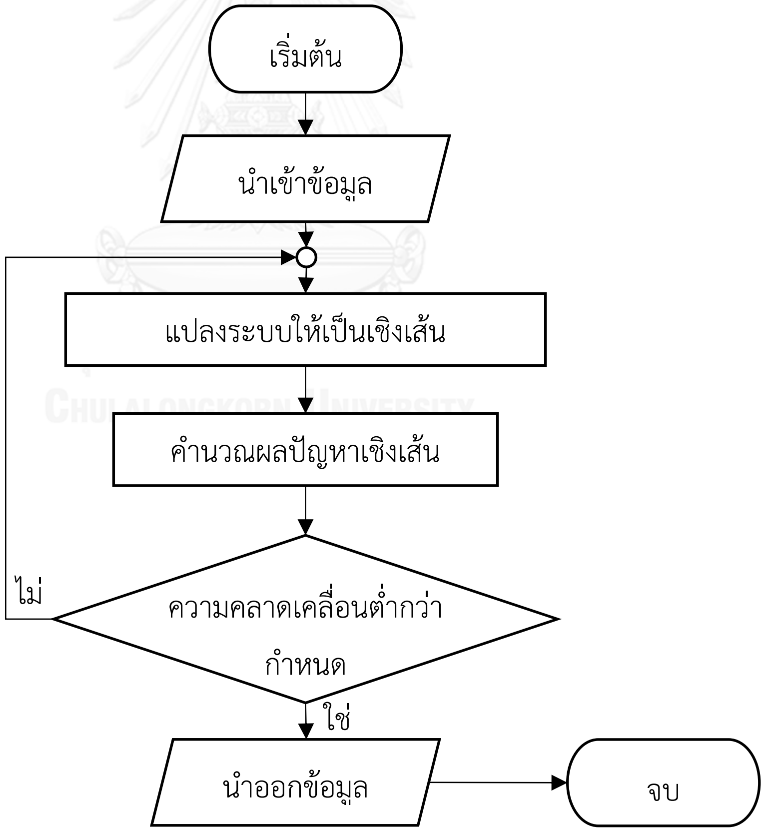
วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์หาคำตอบโดยประมาณของสมการเชิงอนุพันธ์ ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขต. ขั้นตอนการหาคำตอบโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนประกอบด้วย 1. สร้างแบบจำลอง 2. ประมวลผล และ 3. ตรวจสอบผล. ขั้นตอนที่ 1 สร้างแบบจำลองเป็นการจำลองบริเวณของปัญหาที่ต้องการหาคำตอบของสมการอนุพันธ์. แบบจำลองจะประกอบด้วยโหนด (Node) และ เมช (Mesh). การสร้างแบบจำลองเราสามารถเลือกชนิดเอลิเมนต์ของเมชได้ เช่น เอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยม หรือ เอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยมเป็นต้น. เมชที่สร้างขึ้นมาต้องเหมาะสม เช่น บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าของคำตอบมาก ควรมีจำนวนเอลิเมนต์จำนวนมาก เพื่อให้ผลที่ได้มีความคลาดเคลื่อนน้อยลง. ขั้นตอนที่ 2 การประมวลผล เป็นการนำจุดโหนดและเมชที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 มาหาคำตอบของสนามที่ต้องการคำนวณให้เป็นไปตามสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดไว้. ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบผล นำผลการคำนวณที่ได้แสดงการกระจายของสนามไฟฟ้า ความเร็วของของไหล อุณหภูมิของของไหล แนวเส้นสนามไฟฟ้าเท่า หากพบว่าความละเอียดของผลที่ได้ยังไม่เพียงพอ ก็สามารถเพิ่มจำนวนเอลิเมนต์ (และจำนวนโหนด) ที่ใช้ในการคำนวณ และคำนวณในขั้นตอนที่ 2 ซ้ำจนกว่าจะได้ความละเอียดของคำตอบที่ต้องการ. การจำลองในวิทยานิพนธ์นี้ใช้โปรแกรม GiD™ 11.0.8 ในขั้นตอนที่ 1 (สร้างแบบจำลอง) และ ขั้นตอนที่ 3 (ตรวจสอบผล) และใช้โปรแกรม Elmer 7.0 (rev6431) เพื่อคำนวณผลในขั้นตอนที่ 2. ทั้งนี้ ผู้เขียนวิทยานิพนธ์นี้ไม่แนะนำให้ใช้ Elmer

เวอร์ชันใหม่ เนื่องจากในขณะที่ศึกษายังพบปัญหาของ Elmerfem-8.0 (5 may 2015) ทำให้ไม่สามารถหาค่าสนามไฟฟ้าได้.

แบบจำลองห้องฆ่าเชื้อที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม และแบบสนามไฟฟ้าในทิศทางการไหล ดังแสดงในระบบพิกัดฉาก (Cartesian coordinates) สามมิติ ดังรูปที่ 2.2 (ข) และ (ค). วิทยานิพนธ์นี้เปลี่ยนระบบพิกัดฉากเป็นระบบพิกัดเชิงกระบอก (Cylindrical coordinates) ทำให้สามารถขึ้นใช้การจำลองแบบ 2 มิติสมมาตรรอบแกน ลดจำนวนโหนดและเอลิเมนต์ได้ ซึ่งส่งผลให้คำนวณผลได้เร็วขึ้น.

2.3.1 ลำดับขั้นตอนการคำนวณผลโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การคำนวณผลในวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้โปรแกรม Elmer เพื่อคำนวณเพื่อหาคำตอบของปัญหา ซึ่งลำดับขั้นตอนการทำงานของ Elmer จะเป็นดังนี้



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนทั่วไปการคำนวณผลของโปรแกรม Elmer

โปรแกรมเริ่มต้นจากการนำเข้าข้อมูลที่ต้องใช้สำหรับการคำนวณ เช่น รูปแบบการคำนวณ (พิกัดฉาก หรือ สมมาตรอบแกน), ตำแหน่งของโหนด, เอลิเมนต์, เงื่อนไขค่าขอบ, คุณสมบัติของ

ตัวกลาง และการลู่เข้าที่ยอมรับได้ (Convergence tolerance) เป็นต้น. จากนั้น โปรแกรมจะสร้างระบบสมการซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป (หัวข้อ 2.3.2- 2.3.4). ถ้าระบบสมการไม่เป็นเชิงเส้น (ไม่สามารถหาค่าได้โดยแก้ระบบสมการเชิงเส้นได้) เช่น ระบบสมการสำหรับการไหล โปรแกรมจะประมาณระบบไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้นโดย ระเบียบวิธีทำซ้ำพิการ์ด หรือ ระเบียบวิธีทำซ้ำนิวตัน (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก). เมื่อได้ระบบสมการเชิงเส้นแล้ว สามารถหาคำตอบของระบบสมการได้. จากนั้นนำคำตอบที่ได้เปรียบเทียบกับครั้งก่อนหน้า หากคำตอบยังมีการเปลี่ยนแปลงค่าสูงอยู่โปรแกรมจะย้อนไปทำซ้ำอีกครั้ง. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าที่กำหนดไว้ โปรแกรมจะส่งคำตอบครั้งล่าสุดออกมา.

การแก้สมการเชิงเส้นในปัจจุบันมีได้หลายวิธี เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้ใช้โปรแกรม Elmer เพื่อหาคำตอบของปัญหา. การแก้ปัญหาเชิงเส้นในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ Unsymmetrical Multi Frontal Package (UMFPACK) [15] ซึ่งเป็นชุดคำสั่งเพื่อหาคำตอบของสมการโดยตรง และสามารถใช้แก้ระบบสมการของเมตริกที่ไม่สมมาตร (Non symmetric linear systems) ได้. การแก้สมการโดยตรงจะใช้พื้นที่หน่วยความจำมาก แต่ปัจจุบันพื้นที่ของหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์มีมากขึ้น ประกอบกับ UMFPACK มีการจัดเก็บข้อมูลของเมทริกซ์เป็นแบบสปาส (sparse matrix) ซึ่งทำให้ใช้พื้นที่จัดเก็บน้อยลง.

2.3.2 ระบบสมการสำหรับสนามไฟฟ้า

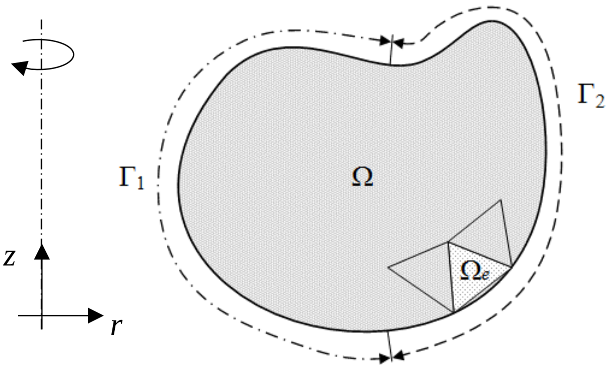
สมการอนุพันธ์ที่ใช้หาศักย์ไฟฟ้า ϕ เมื่อไม่มีผลของประจุค้างคือ

$$\nabla\cdot\left(\varepsilon_r \nabla\phi\right)=0 \tag{2.2}$$

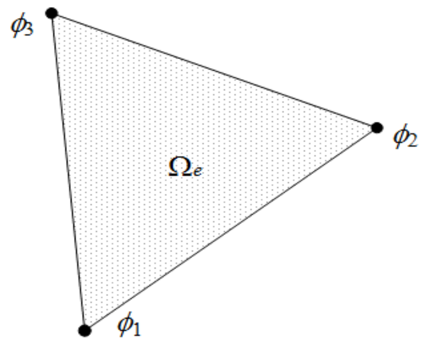
โดยที่ ε_r คือค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของตัวกลาง. เงื่อนไขขอบเขตของศักย์ไฟฟ้าคือทราบค่า ϕ บนขอบเขต Γ_1 และทราบค่าสนามไฟฟ้า $E = E_0$ บนขอบเขต Γ_2 เมื่อขอบเขตรวม $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2$ ปิดรอบบริเวณ $\mathbf{\Omega}$ ของปัญหา ดังรูปที่ 2.4. เอลิเมนต์ $\mathbf{\Omega}_e$ ซึ่งอยู่ภายในบริเวณ $\mathbf{\Omega}$ ดังรูปที่ 2.4 ประกอบด้วยโหนดที่มีค่าศักย์ไฟฟ้า ϕ_i และมีขอบเขต Γ_e ปิดรอบ $\mathbf{\Omega}_e$ ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.5 สำหรับเอลิเมนต์สามเหลี่ยมเชิงเส้น. ศักย์ไฟฟ้าภายในเอลิเมนต์ประมาณเป็น

$$\phi(r,z)=\sum_{j}^{n} N_j^e(r,z)\phi_j \tag{2.3}$$

โดยที่ n คือจำนวนโหนดในเอลิเมนต์, N_j^e เป็นฟังก์ชันประมาณของศักย์ไฟฟ้าภายในเอลิเมนต์ $\mathbf{\Omega}_e$ และ ϕ_j คือค่าศักย์ไฟฟ้าบนตำแหน่งโหนดที่ j ภายในเอลิเมนต์ $\mathbf{\Omega}_e$ ดังรูปที่ 2.5.



รูปที่ 2.4 แบบจำลองและเงื่อนไขขอบเขต



รูปที่ 2.5 เอลิเมนต์ $\boldsymbol{\Omega_e}$ แบบสามเหลี่ยมและศักย์ไฟฟ้าที่ปม

การหาคำตอบของสมการศักย์ไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถใช้วิธีถ่วงน้ำหนักเศษค้าง (Weighted residual method) กับสมการที่ (2.2). เมื่อใช้ระเบียบวิธีบับโนฟ-กาเลอร์คิน (Bubnov-Galerkin method) โดยมีฟังก์ชัน N_i^e ถ่วงน้ำหนักเศษค้าง. เราเขียนผลรวมของเศษค้าง $\boldsymbol{R}$ ภายในขอบเขต $\boldsymbol{\Omega}$ ที่ถ่วงน้ำหนักแล้วได้เป็น

$$R_i = \sum_e R_i^e = -\sum_e \int_{\Omega_e} N_i^e \nabla \cdot \left(\varepsilon_r \nabla \phi\right) \mathrm{d}\Omega = 0 \tag{2.4}$$

โดยที่ $\boldsymbol{R^e}$ เป็นผลการอินทิกรัลของเศษค้างที่ถ่วงน้ำหนักจากเอลิเมนต์ $\boldsymbol{e}$. สมการที่ (2.4) สามารถปรับรูปด้วยการอินทิกรัลทีละส่วนและทฤษฎีไดเวอร์เจนซ์ (Divergence theorem) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} R_i^e &= \varepsilon_r \int_{\Omega_e} (\nabla \phi) \cdot \nabla N_i^e \, \mathrm{d}\Omega - \varepsilon_r \int_{\Omega_e} \nabla \left(N_i^e \nabla \phi\right) \mathrm{d}\Omega \\ &= \varepsilon_r \int_{\Omega_e} (\nabla \phi) \cdot \nabla N_i^e \, \mathrm{d}\Omega - \varepsilon_r \oint_{\Gamma_e} N_i^e \nabla \phi \cdot \vec{a}_n \, \mathrm{d}\Gamma \end{aligned} \tag{2.5}$$

โดยที่ $\vec{a}_n$ คือเวกเตอร์ในทิศตั้งฉากและพุ่งออกจากผิวของเอลิเมนต์. เราประมาณคำตอบของศักย์ไฟฟ้าตามสมการที่ (2.3). อนุพันธ์ของศักย์อยู่ในรูป

$$\frac{\partial\phi}{\partial r}=\sum_{j}^{n}\frac{\partial N_j^e}{\partial r}\phi_j \tag{2.6}$$

$$\frac{\partial\phi}{\partial z}=\sum_{j}^{n}\frac{\partial N_j^e}{\partial z}\phi_j \tag{2.7}$$

สมการสนามไฟฟ้า E_n ในแนวตั้งฉากกับขอบเขต คือ

$$E_n=-\nabla\phi\cdot\vec{a}_n \tag{2.8}$$

นำสมการที่ (2.6), (2.7) และ (2.8) แทนในสมการที่ (2.5) ได้

$$R_i^e=\varepsilon_r\int_{\Omega_e}\frac{\partial N_i^e}{\partial r}\sum_{j=1}^{n}\frac{\partial N_j^e}{\partial r}\phi_j+\frac{\partial N_i^e}{\partial z}\sum_{j=1}^{n}\frac{\partial N_j^e}{\partial z}\phi_j\;\mathrm{d}\Omega+\varepsilon_r\int_{\Gamma_e}N_i^eE_n\;\mathrm{d}\Gamma \tag{2.9}$$

หรือเขียนในรูปเมตริกซ์ดังนี้

$$\begin{aligned}R_i^e=\varepsilon_r\int_{\Omega_e}\frac{\partial N_i^e}{\partial r}\begin{bmatrix}\frac{\partial N_1^e}{\partial r} & \cdots & \frac{\partial N_n^e}{\partial r}\end{bmatrix}+\frac{\partial N_i^e}{\partial z}\begin{bmatrix}\frac{\partial N_1^e}{\partial z} & \cdots & \frac{\partial N_n^e}{\partial z}\end{bmatrix}\mathrm{d}\Omega\begin{bmatrix}\phi_1\\ \vdots\\ \phi_n\end{bmatrix}\\ +\varepsilon_r\int_{\Gamma_e}N_i^eE_n\;\mathrm{d}\Gamma\end{aligned} \tag{2.10}$$

จากสมการที่ (2.10) เมื่อใช้ i กับแต่ละโหนดของเอลิเมนต์ เราเขียนสมการของเศษค้างจากการอินทิกรัลเอลิเมนต์ e ได้เป็น

$$\left[R^e\right]=\left[K_{elec}^e\right]\left[\phi\right]+\left[g_{elec}^e\right] \tag{2.11}$$

$$\left[K_{elec}^e\right]=\varepsilon_r\int_{\Omega_e}\begin{bmatrix}\frac{\partial N_1^e}{\partial r}\\ \vdots\\ \frac{\partial N_n^e}{\partial r}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\frac{\partial N_1^e}{\partial r} & \cdots & \frac{\partial N_n^e}{\partial r}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\frac{\partial N_1^e}{\partial z}\\ \vdots\\ \frac{\partial N_n^e}{\partial z}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\frac{\partial N_1^e}{\partial z} & \cdots & \frac{\partial N_n^e}{\partial z}\end{bmatrix}\mathrm{d}\Omega \tag{2.12}$$

โดยที่

$$\left[g_{elec}^e\right]=\varepsilon_r\int_{\Gamma_e}\begin{bmatrix}N_1^e & \cdots & N_n^e\end{bmatrix}^T E_n\;\mathrm{d}\Gamma \tag{2.13}$$

$$\left[\phi\right]=\begin{bmatrix}\phi_1 & \cdots & \phi_n\end{bmatrix}^T \tag{2.14}$$

สมาชิก (i, j) ของเมตริกมีค่าไม่เท่ากับศูนย์เมื่อ โหนด i และ j อยู่บนเอลิเมนต์ e. การอินทิกรัลในสมการที่ (2.12) และ (2.13) สามารถทำได้โดยการอินทิกรัลเชิงตัวเลขโดยวิธีของเกาส์ หรืออาจประมาณค่า r และ z ให้เป็นค่าคงที่ที่ใจกลางของเอลิเมนต์. เมื่อนำสมการที่ (2.11) มาประกอบเป็นระบบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับหาค่าศักย์ไฟฟ้าใน Ω เราได้ว่า

$$\sum_e\left[R^e\right]=0 \tag{2.15}$$

เมื่อใช้ค่าขอบเขตทั้งหมดกับสมการที่ (2.15) เราสามารถแก้ระบบสมการเชิงเส้นหาค่า ϕ ที่ไม่ทราบค่าออกมาได้.

สำหรับการคำนวณสนามไฟฟ้า $\vec{E}$, ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า $\vec{J}$ และกำลังไฟฟ้าที่เกิดเป็นพลังงานความร้อนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร h (Joule heating, W/m^3) ได้ตามสมการต่อไปนี้

$$\vec{E} = -\nabla\phi \tag{2.16}$$

$$\vec{J} = \sigma\vec{E} \tag{2.17}$$

โดยที่ σ คือสภาพนำไฟฟ้า (S/m)

$$h = \vec{J}\cdot\vec{E} \tag{2.18}$$

2.3.3 ระบบสมการสำหรับการไหล

การจำลองปัญหาของอาหารเหลวในห้องฆ่าเชื้อเป็นปัญหาการไหลแบบหนืดและไม่อัดตัว (Viscous incompressible flow). พิจารณากรณีที่อาหารเหลวมีการไหลแบบราบเรียบโดยมีเลขเรย์โนลด์ไม่เกิน 2100. สมการอนุพันธ์หลักของปัญหาคือสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier stokes) ซึ่งอธิบายได้ดังต่อไปนี้.

เงื่อนไขการอัดตัวไม่ได้ของความเร็ว $\bar{u}$ ของของไหลคือ

$$\nabla\cdot\bar{u} = 0 \tag{2.19}$$

สมการโมเมนตัมของของไหลในสถานะคงตัวสำหรับของไหลอัดตัวไม่ได้แบบนิวโตเนียน เขียนในรูป

$$\rho(\bar{u}\cdot\nabla\bar{u}) - \nabla\cdot\bar{\bar{\tau}} = 0 \tag{2.20}$$

โดยที่ ρ คือความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3) และ $\bar{\bar{\tau}}$ คือเทนเซอร์ของความเครียด (Pa).

$$\bar{\bar{\tau}} = -p\bar{\bar{I}} + 2\mu\bar{\bar{e}} \tag{2.21}$$

โดยที่ p คือความดัน (Pa), μ คือความหนืด (Pa s) และส่วนประกอบของเทนเซอร์คือ

$$e_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \tag{2.22}$$

สำหรับระบบ 3 มิติ i และ j เท่ากับ x, y และ z เป็นต้น

เงื่อนไขขอบเขตความเร็วที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้คือ (1) ทราบค่า $\bar{u}$ บนขอบเขต Γ_1 หรือ (2) ทราบค่าความเค้น τ_{nn} ในทิศตั้งฉากกับขอบเขต และความเร็ว u_t ในทิศขนานกับขอบเขตบนขอบเขต

Γ_2 หรือ (3) ทราบค่าความเค้นเฉือน τ_{nt} และความเร็วในทิศตั้งฉากกับขอบเขต u_n บนขอบเขต Γ_3. เมื่อขอบเขตรวม $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2 \cup \Gamma_3$ ปิดรอบบริเวณ $\boldsymbol{\Omega}$ ของปัญหา.

สำหรับการจำลองการไหล เราประมาณคำตอบของความเร็ว u_x, u_y, u_z และความดัน p ภายในเอลิเมนต์ $\boldsymbol{\Omega}_e$ ด้วย

$$u_x(x,y,z) = \sum_j^n N_j^u(x,y,z) u_{x,j} \tag{2.23}$$

$$u_y(x,y,z) = \sum_j^n N_j^u(x,y,z) u_{y,j} \tag{2.24}$$

$$u_z(x,y,z) = \sum_j^n N_j^u(x,y,z) u_{z,j} \tag{2.25}$$

$$p(x,y,z) = \sum_k^m N_k^p(x,y,z) p_k \tag{2.26}$$

โดยที่ N_j^u คือฟังก์ชันการประมาณความเร็วของไหลจากตำแหน่งโหนด j

N_j^p คือฟังก์ชันการประมาณความดันจากตำแหน่งโหนด j

$u_{x,j}$ $u_{y,j}$ และ $u_{z,j}$ คือความเร็วในทิศ x, y และ z ณ ตำแหน่งโหนด j

p_k คือความดันจากตำแหน่งโหนดที่ k และ m คือจำนวนโหนดภายในเอลิเมนต์สำหรับประมาณความดัน ซึ่งอาจมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ n ก็ได้

ระบบสมการเชิงอนุพันธ์เพื่อหาความเร็วของของไหลจะประกอบด้วย 2 ส่วน. ระบบสมการส่วนแรกหาได้โดย ใช้ฟังก์ชันกระจาย N_i^p เป็นฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักกับสมการที่ (2.19) ซึ่งได้

$$R_i^e = \int_{\Omega_e} N_i^p (\nabla \cdot \vec{u}) \, \mathrm{d}\Omega \tag{2.27}$$

แทนอนุพันธ์ของความเร็วลงในสมการที่ (2.27)

$$R_i^e = \int_{\Omega_e} N_i^p \left(\sum_{j=1}^n \frac{\partial N_j^u}{\partial x} u_{x,j} + \sum_{j=1}^n \frac{\partial N_j^u}{\partial y} u_{y,j} + \sum_{j=1}^n \frac{\partial N_j^u}{\partial z} u_{z,j} \right) \mathrm{d}\Omega \tag{2.28}$$

หรือเขียนอินทิกรัลบนเอลิเมนต์ในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} R_i^e = {} & \int_{\Omega_e} N_i^p \begin{bmatrix} \dfrac{\partial N_1^u}{\partial x} & \cdots & \dfrac{\partial N_n^u}{\partial x} \end{bmatrix} \mathrm{d}\Omega \begin{bmatrix} u_{x,1} \\ \vdots \\ u_{x,n} \end{bmatrix} + \int_{\Omega_e} N_i^p \begin{bmatrix} \dfrac{\partial N_1^u}{\partial y} & \cdots & \dfrac{\partial N_n^u}{\partial y} \end{bmatrix} \mathrm{d}\Omega \begin{bmatrix} u_{y,1} \\ \vdots \\ u_{y,n} \end{bmatrix} \\ & + \int_{\Omega_e} N_i^p \begin{bmatrix} \dfrac{\partial N_1^u}{\partial z} & \cdots & \dfrac{\partial N_n^u}{\partial z} \end{bmatrix} \mathrm{d}\Omega \begin{bmatrix} u_{z,1} \\ \vdots \\ u_{z,n} \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{2.29}$$

จากสมการที่ (2.29) เมื่อใช้ i กับแต่ละโหนดของเอลิเมนต์ เราเขียนสมการของเศษค้างจากการอินทิกรัลเอลิเมนต์ e ได้ว่า

$$\left[R^e\right]=\left[L_1^e\right]\left[u_x\right]+\left[L_2^e\right]\left[u_y\right]+\left[L_3^e\right]\left[u_z\right] \tag{2.30}$$

โดยที่
$$\left[L_1^e\right]=\int_{\Omega_e}\left[N_1^p \quad \cdots \quad N_m^p\right]^T\left[\frac{\partial N_1^u}{\partial x} \quad \cdots \quad \frac{\partial N_n^u}{\partial x}\right]\mathrm{d}\Omega \tag{2.31}$$

$$\left[L_2^e\right]=\int_{\Omega_e}\left[N_1^p \quad \cdots \quad N_m^p\right]^T\left[\frac{\partial N_1^u}{\partial y} \quad \cdots \quad \frac{\partial N_n^u}{\partial y}\right]\mathrm{d}\Omega \tag{2.32}$$

$$\left[L_3^e\right]=\int_{\Omega_e}\left[N_1^p \quad \cdots \quad N_m^p\right]^T\left[\frac{\partial N_1^u}{\partial z} \quad \cdots \quad \frac{\partial N_n^u}{\partial z}\right]\mathrm{d}\Omega \tag{2.33}$$

$$\left[u_x\right]=\left[u_{x,1} \quad \cdots \quad u_{x,n}\right]^T \tag{2.34}$$

$$\left[u_y\right]=\left[u_{y,1} \quad \cdots \quad u_{y,n}\right]^T \tag{2.35}$$

$$\left[u_z\right]=\left[u_{z,1} \quad \cdots \quad u_{z,n}\right]^T \tag{2.36}$$

ระบบสมการส่วนที่สองหาได้โดย ใช้เวกเตอร์ $\vec{w}$ ถ่วงน้ำหนักเศษค้างกับสมการที่ (2.20)

$$R^e=\int_{\Omega_e}\vec{w}\cdot\rho\left(\vec{u}\cdot\nabla\vec{u}\right)\mathrm{d}\Omega-\int_{\Omega_e}\vec{w}\cdot\left(\nabla\cdot\bar{\bar{\tau}}\right)\mathrm{d}\Omega \tag{2.37}$$

เมื่อใช้ $\vec{w}=N_i^u\vec{a}_x$ จะได้

$$R^e=\int_{\Omega_e}N_i^u\vec{a}_x\cdot\rho\left(\vec{u}\cdot\nabla\vec{u}\right)\mathrm{d}\Omega-\int_{\Omega_e}N_i^u\vec{a}_x\cdot\left(\nabla\cdot\bar{\bar{\tau}}\right)\mathrm{d}\Omega \tag{2.38}$$

หากเราใช้วิธีทำซ้ำของพิการ์ดกับพจน์ที่ 1 ทางขวามือของสมการที่ (2.38) โดยให้ $u_x=U_x$ เมื่อ U_x คือคำตอบของความเร็ว u_x ที่หาได้จากลำดับก่อนหน้า ดังที่รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก. จะได้

$$\begin{aligned}\int_{\Omega_e}N_i^u\vec{a}_x\cdot\rho\left(\vec{u}\cdot\nabla\vec{u}\right)\mathrm{d}\Omega&=\rho\int_{\Omega_e}N_i^u\left(u_x\frac{\partial u_x}{\partial x}+u_y\frac{\partial u_x}{\partial y}+u_z\frac{\partial u_x}{\partial z}\right)\mathrm{d}\Omega\\&=\rho\int_{\Omega_e}N_i^u\left(U_x\sum_{j=1}^{n}\frac{\partial N_j^u}{\partial x}u_{x,j}+U_y\sum_{j=1}^{n}\frac{\partial N_j^u}{\partial y}u_{x,j}+U_z\sum_{j=1}^{n}\frac{\partial N_j^u}{\partial z}u_{x,j}\right)\mathrm{d}\Omega\end{aligned} \tag{2.39}$$

พจน์ที่ 2 ทางด้านขวามือของสมการที่ (2.38) สามารถปรับรูปด้วยการอินทิกรัลทีละส่วนและทฤษฎีไดเวอร์เจนซ์

$$\begin{aligned}\int_{\Omega_e}N_i^u\vec{a}_x\cdot\left(\nabla\cdot\bar{\bar{\tau}}\right)\mathrm{d}\Omega&=-\int_{\Omega_e}\left[\bar{\bar{\tau}}\cdot\nabla\left(N_i^u\vec{a}_x\right)\right]\mathrm{d}\Omega+\int_{\Omega_e}\nabla\cdot\left(N_i^u\vec{a}_x\cdot\bar{\bar{\tau}}\right)\mathrm{d}\Omega\\&=-\int_{\Omega_e}\left[\bar{\bar{\tau}}\cdot\nabla\left(N_i^u\vec{a}_x\right)\right]\mathrm{d}\Omega+\oint_{\Gamma_e}N_i^u\left(\vec{a}_x\cdot\bar{\bar{\tau}}\right)\cdot\vec{a}_n\,\mathrm{d}\Gamma\end{aligned} \tag{2.40}$$

เขียน $\vec{a}_n=n_x\vec{a}_x+n_y\vec{a}_y+n_z\vec{a}_z$ จะได้

$$\oint_{\Gamma_e} N_i^u \left(\vec{a}_x \cdot \bar{\bar{\tau}}\right) \cdot \vec{a}_n \, \mathrm{d}\Gamma = \oint_{\Gamma_e} N_i^u \left(\tau_{xx}\vec{a}_x + \tau_{xy}\vec{a}_y + \tau_{xz}\vec{a}_z\right) \cdot \left(n_x\vec{a}_x + n_y\vec{a}_y + n_z\vec{a}_z\right) \mathrm{d}\Gamma$$
$$= \oint_{\Gamma_e} N_i^u \left(\tau_{xx}n_x + \tau_{xy}n_y + \tau_{xz}n_z\right) \mathrm{d}\Gamma \tag{2.41}$$

นำสมการที่ (2.21) แทนลงในพจน์ที่ 1 ขวามือของสมการที่ (2.40) ได้

$$\int_{\Omega_e} \left[\bar{\bar{\tau}} \cdot \nabla\left(N_i^u \vec{a}_x\right)\right] \mathrm{d}\Omega = \int_{\Omega_e} \left(-p\bar{\bar{I}} + 2\mu\bar{\bar{e}}\right) \cdot \nabla\left(N_i^u \vec{a}\right)_x \, \mathrm{d}\Omega$$
$$= -\int_{\Omega_e} p\bar{\bar{I}} \cdot \nabla\left(N_i^u \vec{a}_x\right) \mathrm{d}\Omega + \int_{\Omega_e} 2\mu\bar{\bar{e}} \cdot \nabla\left(N_i^u \vec{a}_x\right) \mathrm{d}\Omega \tag{2.42}$$
$$= -\int_{\Omega_e} p \frac{\partial N_i^u}{\partial x} \, \mathrm{d}\Omega + \int_{\Omega_e} 2\mu\bar{\bar{e}} \cdot \nabla\left(N_i^u \vec{a}_x\right) \mathrm{d}\Omega$$

แทนค่าประมาณคำตอบของความดันในพจน์ที่ 1 ขวามือของสมการที่ (2.42) ได้

$$\int_{\Omega_e} p \frac{\partial N_i^u}{\partial x} \, \mathrm{d}\Omega = \int_{\Omega_e} \left(\sum_{k=1}^{m} N_k^p p_k\right) \frac{\partial N_i^u}{\partial x} \, \mathrm{d}\Omega \tag{2.43}$$

นำสมการที่ (2.22) แทนลงในพจน์ที่ 2 ขวามือของสมการที่ (2.42) ได้

$$\int_{\Omega_e} 2\mu\bar{\bar{e}} \cdot \nabla N_i^u \vec{a}_x \, \mathrm{d}\Omega = \mu \int_{\Omega_e} 2\frac{\partial u_x}{\partial x}\frac{\partial N_i^u}{\partial x} + \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}\right)\frac{\partial N_i^u}{\partial y} + \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x}\right)\frac{\partial N_i^u}{\partial z} \mathrm{d}\Omega$$
$$= \mu \int_{\Omega_e} \frac{\partial u_x}{\partial x}\frac{\partial N_i^u}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y}\frac{\partial N_i^u}{\partial y} + \frac{\partial u_x}{\partial z}\frac{\partial N_i^u}{\partial z} \, \mathrm{d}\Omega \tag{2.44}$$
$$+ \mu \int_{\Omega_e} \frac{\partial u_x}{\partial x}\frac{\partial N_i^u}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial x}\frac{\partial N_i^u}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial x}\frac{\partial N_i^u}{\partial z} \, \mathrm{d}\Omega$$

นำอนุพันธ์ของความเร็วใส่ลงในสมการได้

$$\int_{\Omega_e} 2\mu\bar{\bar{e}} \cdot \nabla\vec{N}_{i,x}^u \, \mathrm{d}\Omega = \mu \int_{\Omega_e} \begin{pmatrix} \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial N_j^u}{\partial x} u_{x,j} \frac{\partial N_i^u}{\partial x} + \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial N_j^u}{\partial y} u_{x,j} \frac{\partial N_i^u}{\partial y} \\ + \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial N_j^u}{\partial z} u_{x,j} \frac{\partial N_i^u}{\partial z} \end{pmatrix} \mathrm{d}\Omega$$
$$+ \mu \int_{\Omega_e} \begin{pmatrix} \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial N_j^u}{\partial x} u_{x,j} \frac{\partial N_i^u}{\partial x} + \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial N_j^u}{\partial x} u_{y,j} \frac{\partial N_i^u}{\partial y} \\ + \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial N_j^u}{\partial x} u_{z,j} \frac{\partial N_i^u}{\partial z} \end{pmatrix} \mathrm{d}\Omega \tag{2.45}$$

แทนสมการที่ (2.39), (2.41), (2.42) และ (2.45) ลงในสมการที่ (2.38) ได้

$$
\begin{aligned}
R^e = {} & \rho \int_{\Omega_e} N_i^u \begin{pmatrix} U_x \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial N_j^u}{\partial x} u_{x,j} \\ + U_y \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial N_j^u}{\partial y} u_{x,j} \\ + U_z \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial N_j^u}{\partial z} u_{x,j} \end{pmatrix} \mathrm{d}\Omega + \mu \int_{\Omega_e} \begin{pmatrix} \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial N_j^u}{\partial x} u_{x,j} \frac{\partial N_i^u}{\partial x} \\ + \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial N_j^u}{\partial y} u_{x,j} \frac{\partial N_i^u}{\partial y} \\ + \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial N_j^u}{\partial z} u_{x,j} \frac{\partial N_i^u}{\partial z} \end{pmatrix} \mathrm{d}\Omega \\
& + \mu \int_{\Omega_e} \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial N_j^u}{\partial x} u_{x,j} \frac{\partial N_i^u}{\partial x} + \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial N_j^u}{\partial x} u_{y,j} \frac{\partial N_i^u}{\partial y} + \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial N_j^u}{\partial x} u_{z,j} \frac{\partial N_i^u}{\partial z} \, \mathrm{d}\Omega \\
& - \int_{\Omega_e} \sum_{k=1}^{m} N_k^p p_k \frac{\partial N_i^u}{\partial x} \mathrm{d}\Omega - \oint_{\Gamma_e} N_i^u \left(\tau_{xx} N_x + \tau_{xy} N_y + \tau_{xz} N_z \right) \mathrm{d}\Gamma
\end{aligned}
\tag{2.46}
$$

ทำนองเดียวกัน เมื่อเราใช้ $\vec{w} = N_i^u \vec{a}_y$ จะได้

$$
\begin{aligned}
R^e = {} & \rho \int_{\Omega_e} N_i^u \begin{pmatrix} U_x \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial N_j^u}{\partial x} u_{y,j} \\ + U_y \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial N_j^u}{\partial y} u_{y,j} \\ + U_z \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial N_j^u}{\partial z} u_{y,j} \end{pmatrix} \mathrm{d}\Omega + \mu \int_{\Omega_e} \begin{pmatrix} \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial N_j^u}{\partial x} u_{y,j} \frac{\partial N_i^u}{\partial x} \\ + \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial N_j^u}{\partial y} u_{y,j} \frac{\partial N_i^u}{\partial y} \\ + \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial N_j^u}{\partial z} u_{y,j} \frac{\partial N_i^u}{\partial z} \end{pmatrix} \mathrm{d}\Omega \\
& + \mu \int_{\Omega_e} \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial N_j^u}{\partial y} u_{x,j} \frac{\partial N_i^u}{\partial x} + \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial N_j^u}{\partial y} u_{y,j} \frac{\partial N_i^u}{\partial y} + \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial N_j^u}{\partial y} u_{z,j} \frac{\partial N_i^u}{\partial z} \, \mathrm{d}\Omega \\
& - \int_{\Omega_e} \sum_{k=1}^{m} N_k^p p_k \frac{\partial N_i^u}{\partial y} \mathrm{d}\Omega - \oint_{\Gamma_e} N_i^u \left(\tau_{yx} N_x + \tau_{yy} N_y + \tau_{yz} N_z \right) \mathrm{d}\Gamma
\end{aligned}
\tag{2.47}
$$

และเมื่อ $\vec{w} = N_i^u \vec{a}_z$ จะได้

$$
\begin{aligned}
R^e = {} & \rho \int_{\Omega_e} N_i^u \begin{pmatrix} U_x \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial N_j^u}{\partial x} u_{z,j} \\ + U_y \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial N_j^u}{\partial y} u_{z,j} \\ + U_z \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial N_j^u}{\partial z} u_{z,j} \end{pmatrix} \mathrm{d}\Omega + \mu \int_{\Omega_e} \begin{pmatrix} \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial N_j^u}{\partial x} u_{z,j} \frac{\partial N_i^u}{\partial x} \\ + \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial N_j^u}{\partial y} u_{z,j} \frac{\partial N_i^u}{\partial y} \\ + \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial N_j^u}{\partial z} u_{z,j} \frac{\partial N_i^u}{\partial z} \end{pmatrix} \mathrm{d}\Omega \\
& + \mu \int_{\Omega_e} \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial N_j^u}{\partial z} u_{x,j} \frac{\partial N_i^u}{\partial x} + \int_{\Omega_e} \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial N_j^u}{\partial z} u_{y,j} \frac{\partial N_i^u}{\partial y} + \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial N_j^u}{\partial z} u_{z,j} \frac{\partial N_i^u}{\partial z} \, \mathrm{d}\Omega \\
& - \int_{\Omega_e} \sum_{k=1}^{m} N_k^p p_k \frac{\partial N_i^u}{\partial z} \mathrm{d}\Omega - \oint_{\Gamma_e} N_i^u \left(\tau_{zx} N_x + \tau_{zy} N_y + \tau_{zz} N_z \right) \mathrm{d}\Gamma
\end{aligned}
\tag{2.48}
$$

ในลักษณะเดียวกับสมการของศักย์ไฟฟ้า โดยให้ i เป็นโหนดทุกโหนดบนเอลิเมนต์ เมื่อนำมาประกอบเป็นระบบสมการรวมได้

$$\sum_{e}\left[R^{e}\right]=0 \tag{2.49}$$

สมการที่ (2.49) แทนผลรวมทุกเอลิเมนต์ภายใน Ω. เมื่อใส่ขอบเขตทั้งหมดเราสามารถแก้ระบบสมการเชิงเส้นหาค่าความเร็ว $\vec{u}$ และความดัน p ที่ไม่ทราบค่าออกมาได้.

2.3.4 ระบบสมการสำหรับปัญหาความร้อน

กระแสไฟฟ้าที่ไหลในอาหารเหลวทำให้เกิดพลังงานสูญเสีย ซึ่งเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน. ความร้อนที่เกิดขึ้นจึงขึ้นอยู่กับตำแหน่งในห้องฆ่าเชื้อ และส่งผลให้อุณหภูมิของอาหารเหลวเพิ่มขึ้นอย่างไม่สม่ำเสมอได้. วิทยานิพนธ์นี้จำลองการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอาหารเหลว โดยละเลยความร้อนที่เป็นผลจากการเสียดสีของไหลด้วยกันและของไหลกับผนังท่อเนื่องจากมีผลน้อยกว่าความร้อนที่เกิดจากสนามไฟฟ้ามาก.

สมการอนุพันธ์สำหรับหาค่าอุณหภูมิ T ในสถานะคงตัว คือ

$$\rho c_{p}(\vec{u}\cdot\nabla)T-\nabla\cdot(k\nabla T)=h_{q} \tag{2.50}$$

โดยที่ c_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity, J/kg·K), κ คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity coefficient, W/mK) , h_j คือพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (Joule heating, W/m^3) ซึ่งได้จากการแก้สมการสนามไฟฟ้า และ $\vec{u}$ เป็นเวกเตอร์ความเร็วของของไหลทราบค่าที่ได้จากการแก้สมการของการไหลดังแสดงในหัวข้อที่ 2.3.2. ฟลักซ์ความร้อน q (Heat flux, W/m^2) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\vec{q}=-\kappa\nabla T \tag{2.51}$$

เงื่อนไขขอบเขตของการจำลองปัญหาความร้อนคือ ทราบค่า T บนขอบเขต Γ_1, ทราบค่าฟลักซ์ความร้อนในแนวตั้งฉากกับขอบเขต q_n บนขอบเขต Γ_2 หรือทราบค่าการพาความร้อนในรูปของ $q_n=\alpha(T-T_a)$ บนขอบเขต Γ_3 โดยที่ α คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Heat transfer coefficient, W/m^2) และ T_a คืออุณหภูมิของตัวกลางที่พาความร้อน. ขอบเขตรวม $\Gamma=\Gamma_1\cup\Gamma_2\cup\Gamma_3$ ปิดรอบบริเวณ Ω ของปัญหา.

การจำลองปัญหาความร้อน เราประมาณคำตอบของอุณหภูมิ T ในเอลิเมนต์ Ω_e ด้วย

$$T(r,z)=\sum_{j}^{n}N_{j}^{T}(r,z)T_{j} \tag{2.52}$$

โดยที่ N_j^T หมายถึง ฟังก์ชันการประมาณของอุณหภูมิภายในเอลิเมนต์ Ω_e

T_j หมายถึง อุณหภูมิบนตำแหน่งโหนด j ในเอลิเมนต์ Ω_e

เมื่อใช้ฟังก์ชันกระจาย N_i^T เป็นฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักกับสมการที่ (2.50) จะได้

$$R_i^e = \int_{\Omega_e} N_i^T \rho c_p (\vec{u}\cdot\nabla) T \,\mathrm{d}\Omega - \int_{\Omega_e} N_i^T \nabla\cdot(k\nabla T)\,\mathrm{d}\Omega - \int_{\Omega_e} N_i^T h_q \,\mathrm{d}\Omega \tag{2.53}$$

พจน์ที่ 2 ทางด้านขวามือของสมการที่ (2.53) สามารถปรับรูปด้วยการอินทิกรัลทีละส่วนและทฤษฎีไดเวอร์เจนซ์

$$\int_{\Omega_e} N_i^T \nabla\cdot(k\nabla T)\,\mathrm{d}\Omega = -\int_{\Omega_e} \nabla N_i^T \cdot (k\nabla T)\,\mathrm{d}\Omega + \oint_{\Gamma_e} N_i^T (k\nabla T)\cdot \vec{a}_n \,\mathrm{d}\Gamma \tag{2.54}$$

แทน $k\nabla T$ = $-q$ ในพจน์ที่ 2 ด้านขวามือของสมการ (2.54)

$$\int_{\Omega_e} N_i^T \nabla\cdot(k\nabla T)\,\mathrm{d}\Omega = -\int_{\Omega_e} \nabla N_i^T \cdot (k\nabla T)\,\mathrm{d}\Omega - \int_{\Gamma_e} N_i^T q_n \,\mathrm{d}\Gamma \tag{2.55}$$

จากเงื่อนไขขอบเขตที่ได้อธิบายไปก่อนหน้า พจน์ที่ 2 ทางขวามือในสมการที่ (2.55) สามารถแบ่งออกได้เป็น

$$\int_{\Gamma_e} N_i^T q_n \,\mathrm{d}\Gamma = \int_{\Gamma_e} N_i^T q_n \,\mathrm{d}\Gamma + \int_{\Gamma_e} N_i^T \alpha (T - T_a)\,\mathrm{d} \tag{2.56}$$

พจน์ที่ 2 ทางขวามือในสมการที่ (2.56) จะสามารถแยกได้เป็น

$$\alpha \int_{\Gamma_e} N_i^T (T - T_a)\,\mathrm{d}\Gamma = \alpha \int_{\Gamma_e} N_i^T T \,\mathrm{d}\Gamma - \alpha \int_{\Gamma_e} N_i^T T_a \,\mathrm{d}\Gamma \tag{2.57}$$

แทนสมการที่ (2.55), (2.56) และ (2.57) ลงในสมการที่ (2.53) ได้

$$\begin{aligned} R_i^e = & \int_{\Omega_e} N_i^T \rho c_p (\vec{u}\cdot\nabla) T \,\mathrm{d}\Omega + \int_{\Omega_e} \nabla N_i^T (k\nabla T)\,\mathrm{d}\Omega + \alpha \int_{\Gamma_e} N_i^T T \,\mathrm{d}\Gamma \\ & + \int_{\Gamma_e} N_i^T q_n \,\mathrm{d}\Gamma - \alpha \int_{\Gamma_e} N_i^T T_a \,\mathrm{d}\Gamma - \int_{\Omega_e} N_i^T h_q \,\mathrm{d}\Omega \end{aligned} \tag{2.58}$$

เมื่อแทนประมาณคำตอบของอุณหภูมิ และอนุพันธ์ของอุณหภูมิลงในสมการที่ (2.58) จะได้

$$\begin{aligned} R_i^e = & \rho c_p \int_{\Omega_e} N_i^T \left(\sum_j^n u_{r,j} \frac{\partial N_j^T}{\partial r} T_j + \sum_j^n u_{z,j} \frac{\partial N_j^T}{\partial z} T_j \right) \mathrm{d}\Omega \\ & + k \int_{\Omega_e} \frac{\partial N_i^T}{\partial r} \sum_j^n \frac{\partial N_j^T}{\partial r} T_j + \frac{\partial N_i^T}{\partial z} \sum_j^n \frac{\partial N_j^T}{\partial z} T_j \,\mathrm{d}\Omega + \alpha \int_{\Gamma_e} N_i^T \sum_j^n N_j^T T_j \,\mathrm{d}\Gamma \\ & + \int_{\Gamma_e} N_i^T q_n \,\mathrm{d}\Gamma - \alpha \int_{\Gamma_e} N_i^T T_a \,\mathrm{d}\Gamma - \int_{\Omega_e} N_i^T h_q \,\mathrm{d}\Omega \end{aligned} \tag{2.59}$$

หรือเขียนในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$R^e = \left\{ \begin{aligned} & \rho c_p \int_{\Omega_e} N_i^T \left[u_r \frac{\partial N_1^T}{\partial r} \quad \cdots \quad u_r \frac{\partial N_n^T}{\partial r} \right] + N_i^T \left[u_z \frac{\partial N_1^T}{\partial z} \quad \cdots \quad u_z \frac{\partial N_n^T}{\partial z} \right] \mathrm{d}\Omega \\ & + k \int_{\Omega_e} \frac{\partial N_i^T}{\partial r} \left[\frac{\partial N_1^T}{\partial r} \quad \cdots \quad \frac{\partial N_n^T}{\partial r} \right] + \frac{\partial N_i^T}{\partial z} \left[\frac{\partial N_1^T}{\partial z} \quad \cdots \quad \frac{\partial N_n^T}{\partial z} \right] \mathrm{d}\Omega \\ & + \alpha \int_{\Gamma_e} N_i^T \left[N_1^T \quad \cdots \quad N_n^T \right] \mathrm{d}\Gamma \end{aligned} \right\} \begin{bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_n \end{bmatrix} \tag{2.60}$$

$$+ \int_{\Gamma_e} N_i^T q_n \, \mathrm{d}\Gamma - \alpha \int_{\Gamma_e} N_i^T T_a \, \mathrm{d}\Gamma - \int_{\Omega_e} N_i^T h_q \, \mathrm{d}\Omega$$

เราเขียนสมการที่ได้จากการอินทิกรัลบนเอลิเมนต์สำหรับทุกโหนด i ของ e ได้เป็น

$$\left(\left[K_v^e\right] + \left[K_c^e\right] + \left[K_b^e\right] \right)\left[T\right] + \left[Q^e\right] + \left[S_v^e\right] = \left[R^e\right] \tag{2.61}$$

โดยที่
$$\left[K_v^e\right] = \rho c_p \int_{\Omega_e} \left(\begin{aligned} & \left[N_1^T \quad \cdots \quad N_n^T\right]^T \left[u_r \frac{\partial N_1^T}{\partial r} \quad \cdots \quad u_r \frac{\partial N_n^T}{\partial r} \right] \\ & + \left[N_1^T \quad \cdots \quad N_n^T\right]^T \left[u_z \frac{\partial N_1^T}{\partial z} \quad \cdots \quad u_z \frac{\partial N_n^T}{\partial z} \right] \end{aligned} \right) \mathrm{d}\Omega \tag{2.62}$$

$$\left[K_c^e\right] = \kappa \int_{\Omega_e} \left(\begin{aligned} & \left[\frac{\partial N_1^T}{\partial r} \quad \cdots \quad \frac{\partial N_n^T}{\partial r} \right]^T \left[\frac{\partial N_1^T}{\partial r} \quad \cdots \quad \frac{\partial N_n^T}{\partial r} \right] \\ & + \left[\frac{\partial N_1^T}{\partial z} \quad \cdots \quad \frac{\partial N_1^T}{\partial z} \right]^T \left[\frac{\partial N_1^T}{\partial z} \quad \cdots \quad \frac{\partial N_n^T}{\partial z} \right] \end{aligned} \right) \mathrm{d}\Omega \tag{2.63}$$

$$\left[K_b^e\right] = \alpha \int_{\Gamma_e} \left[N_1^T \quad \cdots \quad N_n^T\right]^T \left[N_1^T \quad \cdots \quad N_n^T\right] \mathrm{d}\Gamma \tag{2.64}$$

$$\left[Q^e\right] = \int_{\Gamma_e} \left[N_1^T \quad \cdots \quad N_n^T\right]^T \bar{q}_n \, \mathrm{d}\Gamma - \alpha \int_{\Gamma_e} \left[N_1^T \quad \cdots \quad N_n^T\right]^T T_a \mathrm{d}\Gamma \tag{2.65}$$

$$\left[S_v^e\right] = -h_q \int_{\Omega_e} \left[N_1^T \quad \cdots \quad N_n^T\right]^T \, \mathrm{d}\Omega \tag{2.66}$$

$$\left[T\right] = \left[T_1 \quad \cdots \quad T_n\right]^T \tag{2.67}$$

จากสมการที่ (2.61) เราเขียนเป็นสมการไฟไนต์เอลิเมนต์เชิงเส้นสำหรับหาค่าอุณหภูมิ T ภายใน Ω ได้ดังนี้.

$$\left(\left[K_v\right] + \left[K_c + \left[K_b\right]\right] \right)\left[T\right] + \left[Q\right] = \left[S_v\right] \tag{2.68}$$

ซึ่งนำมาแก้หาคำตอบของอุณหภูมิ T ในบริเวณปัญหาได้.

บทที่ 3
การตรวจสอบผลการจำลอง

3.1 ผลคำตอบแม่นตรงของของสนามในแบบจำลองทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

การใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถหาค่าสนามในแบบจำลองที่มีความซับซ้อน ซึ่งวิธีการหาค่าสนามโดยวิธีแม่นตรง (Exact Method) ไม่สามารถหาค่าได้หรือหาค่าได้ยาก. ผลจากวิธีเชิงตัวเลขเป็นค่าประมาณ ซึ่งควรตรวจสอบขั้นต้นว่า ผลลัพธ์จากวิธีการนี้เป็นผลที่ถูกต้องหรือไม่. ดังนั้น การใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์หาค่าสนามของแบบจำลองที่เราทราบผลผลเฉลยแม่นตรง จะทำให้ตรวจสอบได้ว่าวิธีเชิงถูกต้องหรือไม่. วิทยานิพนธ์นี้ ใช้แบบจำลองแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมสำหรับการตรวจสอบ. แบบจำลองแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมที่ใช้สำหรับฆ่าเชื้อมีแกนกลางเป็นอิเล็กโทรดแรงดันสูงรัศมี r_i และ มีอิเล็กโทรดกราวนด์ล้อมรอบโดยมีรัศมีจากแกนสมมาตร r_o. ของเหลวที่นำมาฆ่าเชื้อจะไหลอยู่ระหว่างอิเล็กโทรดแรงสูงและอิเล็กโทรดกราวนด์ ดังรูปที่ 3.1

รูปที่ 3.1 แบบจำลองห้องฆ่าเชื้อชนิดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

สนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดแรงสูงและอิเล็กโทรดกราวนด์ขึ้นอยู่กับศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับอิเล็กโทรดแรงสูงและระยะห่างของอิเล็กโทรด. สมการของสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดเป็นดังนี้

$$E_z(r) = \frac{V}{r\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \tag{3.1}$$

เราสามารถหากำลังไฟฟ้า P ที่ของเหลวได้รับจากการอินทิเกรตสนามไฟฟ้า E^2 และ สภาพนำไฟฟ้า σ ของของเหลวดังสมการ

$$P = \int \sigma E_z^2 \,\mathrm{d}V = -2\pi\sigma l \left(\frac{V}{\ln \frac{r_o}{r_i}} \right)^2 \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) \tag{3.2}$$

โดยที่ l คือ ความยาวของท่อทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

การไหลแบบราบเรียบในท่อทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมจะมีความเร็วบนขอบด้านในและด้านนอก ($r = r_i$ และ $r = r_o$) เท่ากับศูนย์. สมการความเร็วในทิศทางแกน z ในของเหลวที่มีสภาวะคงตัว, มีความหนืด μ, อัดตัวไม่ได้แบบนิวโตเนียน และไม่สนใจแรงโน้มถ่วง สามารถเขียนได้ดังนี้ (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.)

$$u_z(r) = \frac{1}{4\mu}\frac{\partial p}{\partial z}\left[\left(r^2 - r_o^2\right) - \frac{\left(r_o^2 - r_i^2\right)}{\ln\left(r_o/r_i\right)}\ln\frac{r}{r_o}\right] \tag{3.3}$$

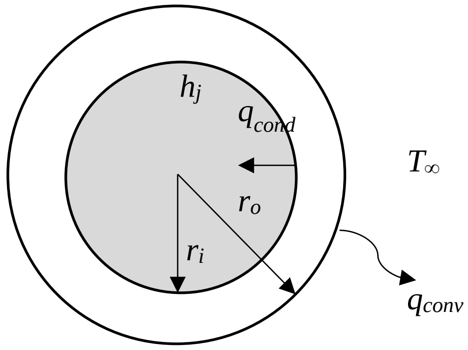
เราสามารถหาปริมาตรการไหล Q ได้จากการอินทิเกรตสมการที่ (3.3) ตั้งแต่ r_i ถึง r_o ซึ่งได้ดังนี้

$$Q = -\frac{\pi\left(r_o^2 - r_i^2\right)}{8\mu}\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)\left[r_o^2 + r_i^2 - \frac{r_o^2 - r_i^2}{\ln\left(r_o/r_i\right)}\right] \tag{3.4}$$

เราสามารถหาความเร็วเฉลี่ยได้โดยนำสมการที่ (3.4) หารด้วยพื้นที่หน้าตัดได้ดังนี้

$$u_{avg} = -\frac{1}{8\mu}\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)\left[r_o^2 + r_i^2 - \frac{r_o^2 - r_i^2}{\ln\left(r_o/r_i\right)}\right] \tag{3.5}$$

อุณหภูมิในแบบจำลองทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมในกรณีที่มีการไหล จะมีการกระจายอุณหภูมิเปลี่ยนไปตามระยะ z. เมื่อระยะ z มีความยาวมากเพียงพอ การกระจายอุณหภูมิในของเหลวตามแนวแกน r จะมีการกระจายของอุณหภูมิเข้าสู่จุดสมดุล (อุณหภูมิตามแนวแกน z ไม่เปลี่ยนแปลง). สมการการกระจายของอุณหภูมิในสภาวะสมดุลตามแนวแกน r ในของเหลวได้จากการพิจารณารูปที่ 3.2.



รูปที่ 3.2 ภาพตัดขวางห้องฆ่าเชื้อสำหรับพิจารณาอุณหภูมิในสภาวะของเหลวหยุดนิ่ง

รูปที่ 3.2 เป็นภาพตัดขวางของแบบจำลองทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมมีอิเล็กโทรดแรงสูงรัศมี r_i และ อิเล็กโทรดกราวนด์รัศมี r_o ในกรณีนี้จะสมมุติให้อิเล็กโทรดกราวนด์บางมาก. ของเหลวที่อยู่ระหว่างอิเล็กโทรดแรงสูงและกราวนด์มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อน κ. บริเวณสีเทามีแหล่งกำเนิดความร้อนคงที่ต่อหนึ่งหน่วยเวลาและปริมาตรเท่ากับ h_j ซึ่งอยู่ระหว่างอิเล็กโทรดแรงสูงและอิเล็กโทรดกราวนด์. กำหนดให้เป็นสภาวะคงตัว ฟลักซ์ความร้อนจะไม่มีการไหลผ่านผิวอิเล็กโทรดแรงสูงกับของเหลว (q_{cond} = 0 W/m^2) แต่ ฟลักซ์ความร้อน (q_{conv}) จะไหลออกจากอิเล็กโทรดกราวนด์ด้านนอกโดยการพาความร้อน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของตัวกลางที่พาความร้อน T_∞ และสัมประสิทธิ์การพาความร้อน α. อุณหภูมิที่กระจายอยู่ระหว่างอิเล็กโทรดดังนี้ (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ค.)

$$T(r) = \frac{h_j\left(r_o^2 - r^2\right)}{4\kappa} - \frac{h_j r_i^2}{2\kappa}\ln\left(\frac{r_o}{r}\right) + T_o \tag{3.6}$$

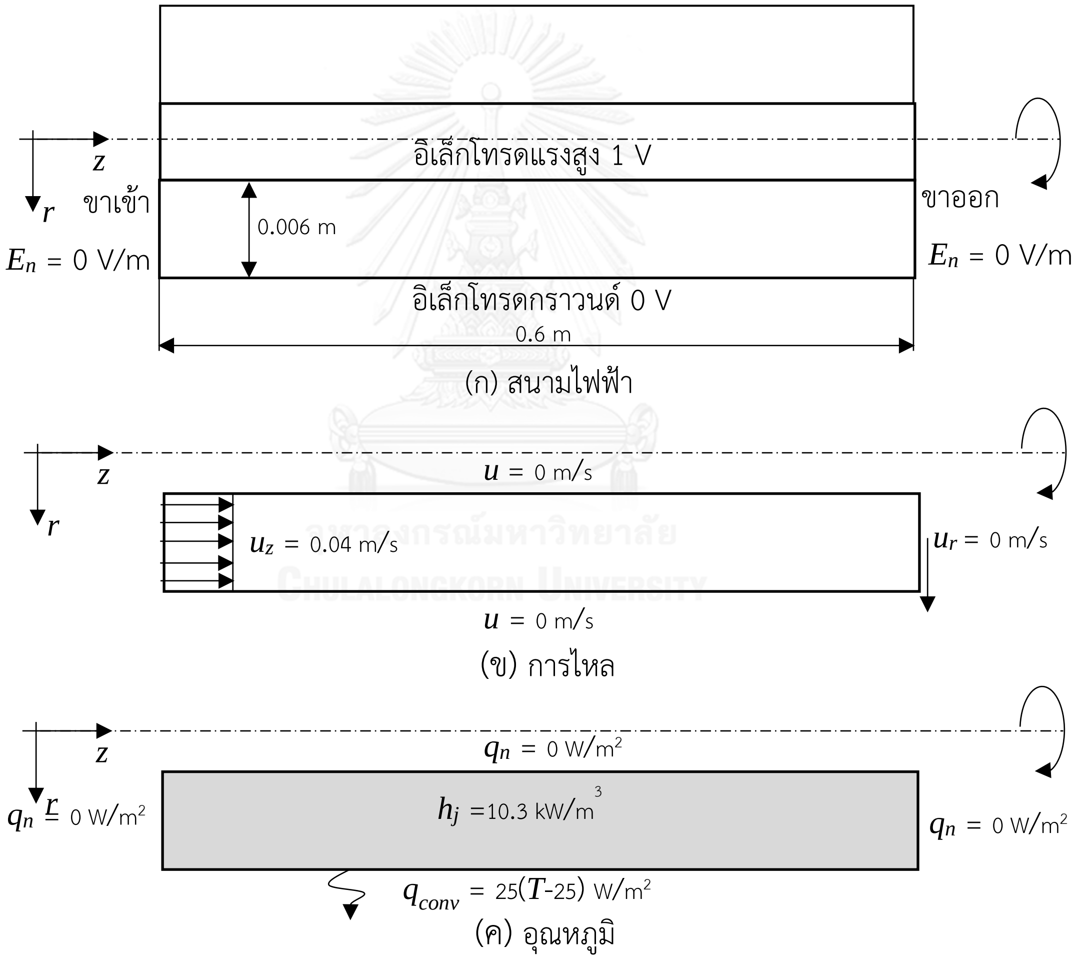
โดยที่

$$T_o = \frac{h\left(r_o^2 - r_i^2\right)}{2r_o b} + T_\infty \tag{3.7}$$

3.1.1 ผลการจำลองสนามไฟฟ้า, ความเร็วและอุณหภูมิ เมื่อแหล่งความร้อนเป็นค่าคงที่

แบบจำลองแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมสามารถสร้างได้ 2 แบบ คือ 1) ทรงกระบอกแบบภาพตัดตามยาว (รูปที่ 3.1) และ 2) ทรงกระบอกแบบภาพตัดขวาง (รูปที่ 3.2). สำหรับทรงกระบอกแบบภาพตัดตามยาว กำหนดรัศมีภายใน r_i = 0.01 m, รัศมีภายนอก r_o = 0.016 m และมีความยาว 0.6 m. เงื่อนไขขอบเขตสำหรับการกระจายของสนามไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 3.3 (ก) คือ กำหนดศักย์ไฟฟ้า 1 V ให้อิเล็กโทรดแรงสูง และ 0 V ที่อิเล็กโทรดกราวนด์. กำหนดสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับผิว E_n = 0 V/m ที่ขาเข้าและขาออก. เงื่อนไขขอบเขตสำหรับการจำลองการไหลแสดงดังรูปที่ 3.3 (ข)

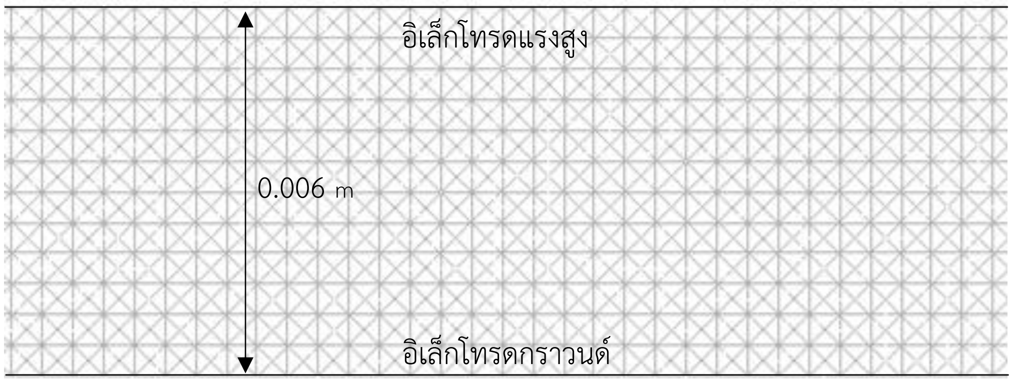
คือ กำหนดขาเข้าให้เป็นความเร็วคงที่ u_z = 0.04 m/s. ความเร็วบนอิเล็กโทรดแรงสูงและอิเล็กโทรดกราวนด์เท่ากับ 0 m/s. ความเร็วที่ขาออกกำหนดให้ความเร็วตามแนวแกน r u_r = 0 m/s. เงื่อนไขขอบเขตสำหรับการจำลองอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 3.3 (ค) คือ บนขอบเขตกำหนดให้มีอุณหภูมิขาเข้าเป็น T_{in} 25 °C, ขาออกและขอบเขตของอิเล็กโทรดแรงสูง กำหนดให้ฟลักซ์ในทิศตั้งฉากกับพื้นผิวมีค่า 0 W/m^2. ขอบเขตของอิเล็กโทรดกราวนด์กำหนดให้เป็นฟลักซ์ความร้อนโดยการพาความร้อนโดย กำหนดอุณหภูมิของตัวกลาง 25 °C และ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน 25 W/m^2. พลังงานความร้อนคงที่สร้างขึ้นระหว่างอิเล็กโทรด 10.3 kW/m^3. รูปที่ 3.4 แสดงการกระจายของเมชในแบบจำลอง โดยเอลิเมนต์เป็นชนิดสามเหลี่ยมอันดับสองมี 6 โหนด โดยมีจำนวนโหนดและเอลิเมนต์ทั้งหมด 117,625 และ 57,600 ตามลำดับ.



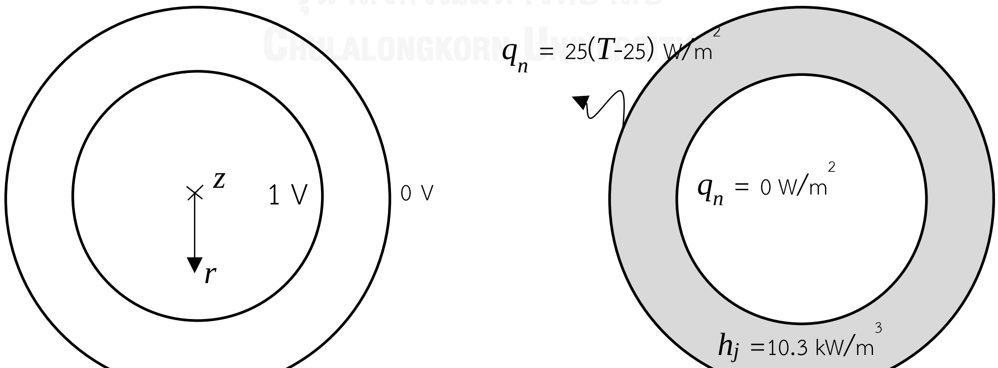
รูปที่ 3.3 เงื่อนไขขอบเขตสำหรับการจำลองทรงกระบอกแบบภาพตัดตามยาว

ทรงกระบอกแบบภาพตัดขวางจะคำนวณผลของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิเท่านั้นเนื่องจากไม่มีความเร็วในทิศทางแกน r. กำหนดรัศมีภายใน r_i = 0.01 m, รัศมีภายนอก r_o = 0.016 m เงื่อนไข

ขอบเขตสำหรับการกระจายของสนามไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 3.5 (ก) คือ กำหนดศักย์ไฟฟ้า 1 V ที่อิเล็กโทรดแรงสูง และ ศักย์ไฟฟ้า 0 V ที่อิเล็กโทรดกราวนด์. เงื่อนไขขอบเขตสำหรับการจำลองอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 3.5 (ข) คือ กำหนดให้ฟลักซ์ในทิศตั้งฉากกับพื้นผิวมีค่า 0 W/m^2 ที่ขอบเขตของอิเล็กโทรดแรงสูง. กำหนดให้เป็นฟลักซ์ความร้อนโดยการพาความร้อนที่ขอบเขตของอิเล็กโทรดกราวนด์ โดย กำหนดอุณหภูมิของตัวกลาง 25 ℃ และ สัมประสิทธ์การพาความร้อน 25 W/m^2. พลังงานความร้อนคงที่สร้างขึ้นระหว่างอิเล็กโทรด 10.3 kW/m^3. รูปที่ 3.6 แสดงเมชในแบบจำลองภาพตัดขวาง โดยเอลิเมนต์เป็นชนิดสามเหลี่ยมอันดับสองมี 6 โหนด โดยมีจำนวนโหนดและเอลิเมนต์ทั้งหมด 42,172 โหนด 20,434 เอลิเมนต์.

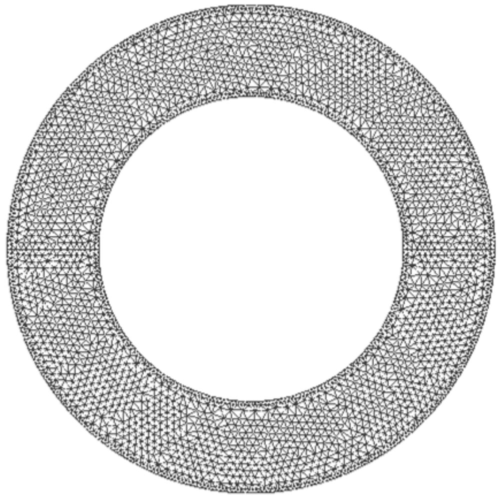


รูปที่ 3.4 ตัวอย่างเอลิเมนต์ในแบบจำลองทรงกระบอกแบบภาพตัดตามยาว



(ก) สนามไฟฟ้า (ข) อุณหภูมิ

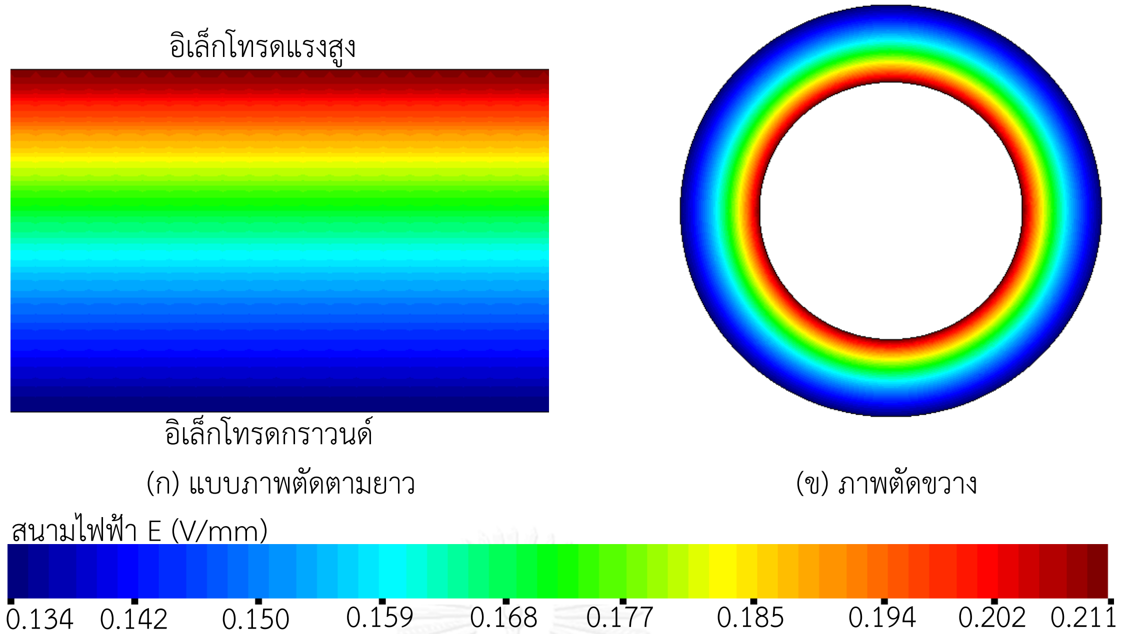
รูปที่ 3.5 เงื่อนไขขอบเขตสำหรับการจำลองสำหรับทรงกระบอกแบบภาพตัดขวาง



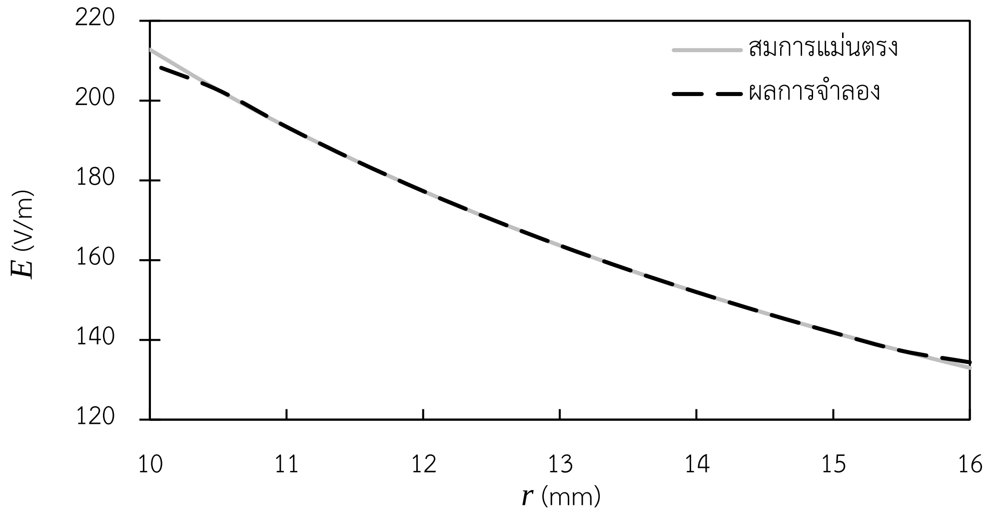
รูปที่ 3.6 เอลิเมนต์ในแบบจำลองทรงกระบอกแบบภาพตัดขวาง

กำหนดให้นมเป็นของไหลในการจำลองทั้งสองแบบ โดยมีคุณสมบัติความหนาแน่น 1030 kg/m^3, ความจุความร้อนจำเพาะ 3931 J/°C, สัมประสิทธิ์การนำความร้อน 0.559 W/m°C และความหนืด 2.127×10^{-3} kg/m·s.

ผลการจำลองการกระจายของสนามไฟฟ้าในทรงกระบอกซ้อนแกนในแนวภาพตัดตามยาว และ แนวภาพตัดขวาง ได้แสดงดัง รูปที่ 3.7 (ก) และ (ข) ตามลำดับ. ความเข้มสนามไฟฟ้าบนอิเล็กโทรดแรงสูงมีค่าสูงที่สุด ความเข้มสนามไฟฟ้าลดลงจนกระทั่งความเข้มต่ำที่สุดบนอิเล็กโทรดกราวนด์. รูปที่ 3.8 แสดงความเข้มของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน r ตั้งแต่อิเล็กโทรดแรงสูงจนถึงแรงต่ำ โดยเส้นทึบสีเทาผลที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่ (3.1) และเส้นประสีดำได้จากการจำลองโดยโปรแกรม Elmer. ช่วง r ตั้งแต่ 10.5 mm จนถึง 16 mm ผลจากค่าแม่นตรงและผลจากการจำลองมีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่ช่วง 10 mm ถึง 10.5 mm จะเห็นค่าที่ต่างกันเล็กน้อย. ค่าสนามไฟฟ้าที่จุด 10 mm จากสมการแม่นตรงเท่ากับ 212.76 V/m และ ค่าสนามไฟฟ้าที่จุดเดียวกันนี้จากผลการจำลองคือ 209.28 V/m ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนจากการจำลองอยู่ที่ 1.6 %.



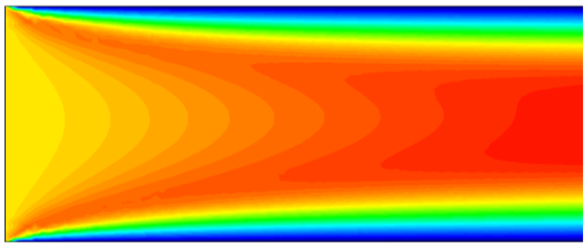
รูปที่ 3.7 การกระจายของสนามไฟฟ้าในทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม (V/m)



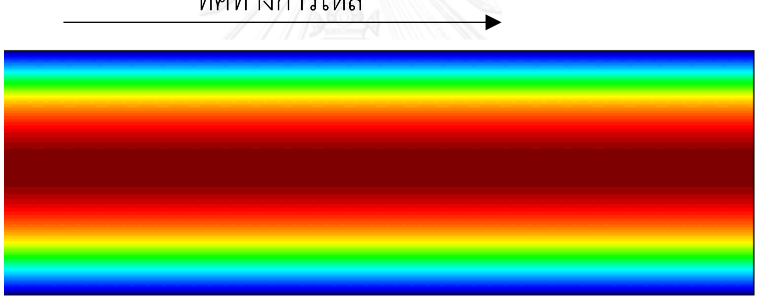
รูปที่ 3.8 การกระจายของสนามไฟฟ้าในทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

ผลการจำลองการกระจายความเร็วบริเวณขาเข้าแสดงดังรูปที่ 3.9 (ก) จะเห็นว่าความเร็วบนขอบเขตขาเข้ามีการกระจายที่เป็นสีเดียว เนื่องจากกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้มีค่าเท่ากับ 0.04 m/s. เมื่อของเหลวไหลตามแนวแกน z ความเร็วใกล้กับบริเวณผิวด้านนอกและด้านในจะเริ่มลดลงเนื่องจากการกำหนดความเร็วบนผิวด้านนอกและด้านในให้เท่ากับ 0 m/s แต่ความเร็วบริเวณกึ่งกลางระหว่างอิเล็กโทรดจะเพิ่มขึ้นตามระยะ z ที่เพิ่มขึ้น. รูปที่ 3.9 (ข) แสดงการกระจายความเร็วบริเวณขาออก แสดงให้เห็นว่าบริเวณใกล้กับกึ่งกลางระหว่างอิเล็กโทรดจะมีความเร็วสูงสุด ซึ่งมีค่าประมาณ 0.06 m/s. รูปที่ 3.10 เปรียบเทียบความเร็วตามแนวแกน r เทียบระหว่างความเร็วที่ได้จากการ

จำลองโดยโปรแกรม Elmer ที่ขาเข้าและที่ขาออก เปรียบเทียบกับความเร็วจากการสมการที่ (3.3) (ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.04 m/s, $\dfrac{\partial p}{\partial z}$ = -28 N/m^3). จากกราฟที่ จะเห็นว่าความเร็วของไหลโดยโปรแกรม Elmer มีค่าใกล้เคียงกับค่าแม่นตรง. ความแตกต่างของความเร็วของเหลวที่ได้จากการจำลองได้จากค่าของสมการแม่นตรง ได้แสดงดังรูปที่ 3.11 (Δu_z = ผลจากการจำลอง - ผลจากสมการแม่นตรง). ความเร็วสูงสุดที่ได้จากการจำลองมีค่าความผิดพลาดจากค่าแม่นตรงเพียง 0.8 %.

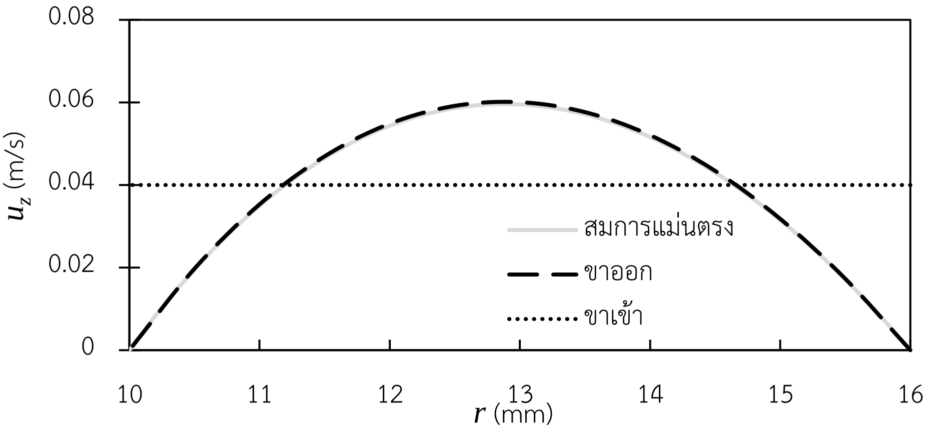


(ก) บริเวณขาเข้า

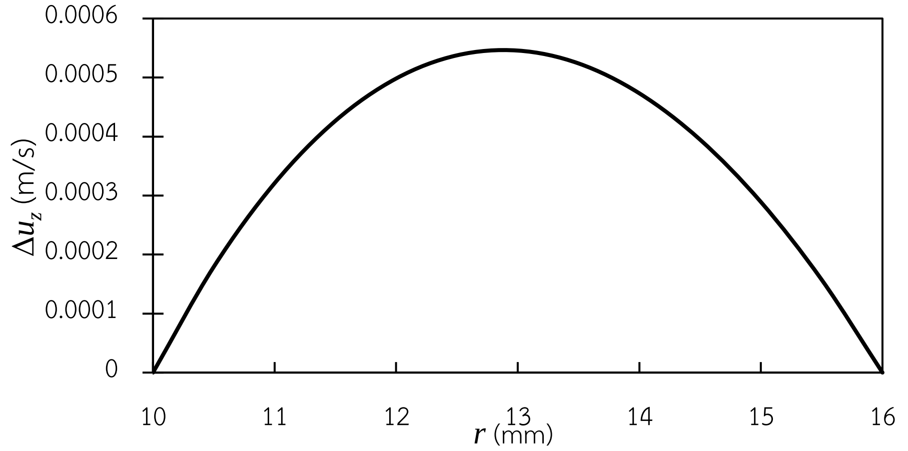


(ข) บริเวณขาออก

รูปที่ 3.9 ผลการกระจายความเร็ว (m/s)

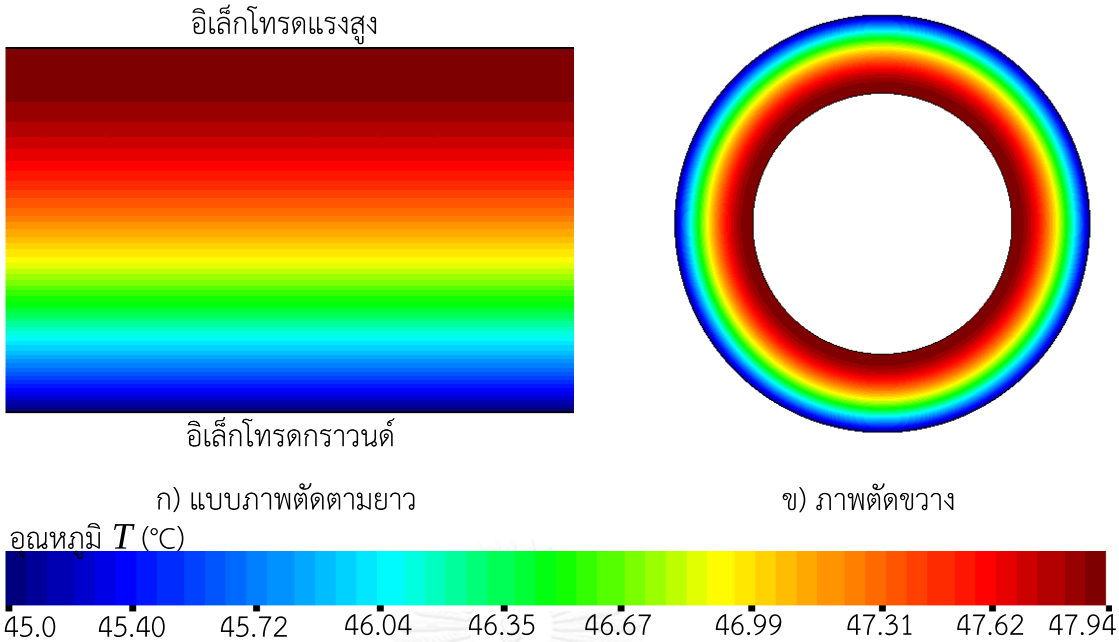


รูปที่ 3.10 ผลการจำลองความเร็วของไหล u_z ที่ขาเข้าและขาออกของห้องฆ่าเชื้อแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

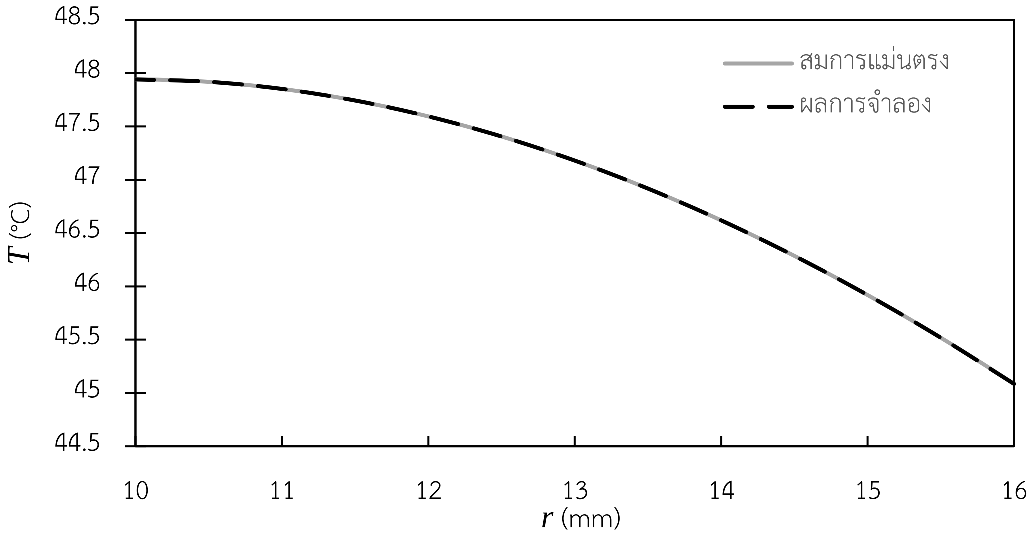


รูปที่ 3.11 ผลความแตกต่างระหว่างการจำลองความเร็วของไหล u_z ที่ขาออก และค่าแม่นตรงของห้องฆ่าเชื้อแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

การกระจายของอุณหภูมิในทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมในแนวภาพตัดตามยาว และแนวภาพตัดขวางที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรม Elmer แสดงดังรูปที่ 3.12 (ก) และ (ข) ตามลำดับ. เราจะเห็นว่าบริเวณอิเล็กโทรดแรงสูงมีอุณหภูมิสูงที่สุด และผิวอิเล็กโทรดกราวนด์มีอุณหภูมิต่ำที่สุด. รูปที่ 3.13 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายของอุณหภูมิตามแนวแกน r โดยเส้นประสีดำแสดงอุณหภูมิที่ได้จากการจำลองโดย Elmer และ เส้นสีเทาทึบแสดงอุณหภูมิที่ได้จากการแทนค่าลงในสมการที่ (3.3).

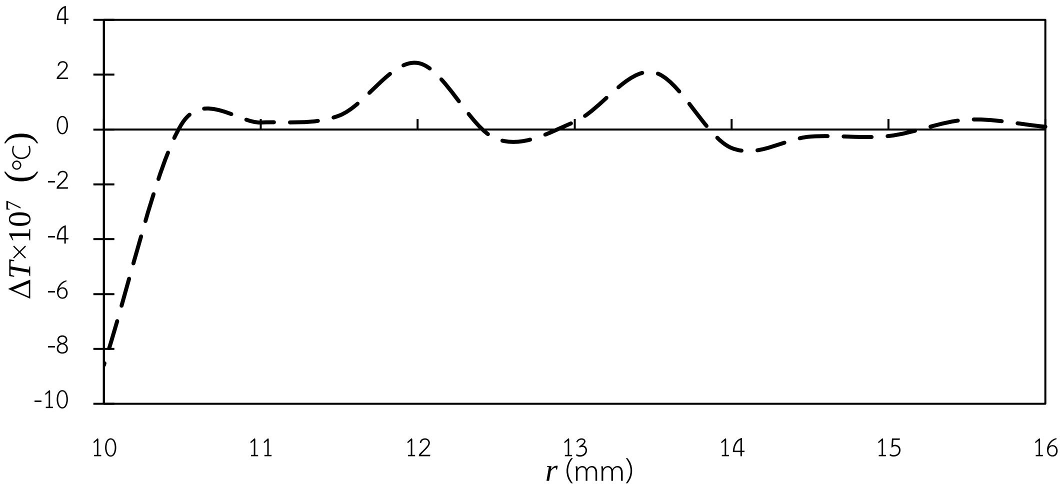


รูปที่ 3.12 การกระจายอุณหภูมิในห้องฆ่าเชื้อแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม



รูปที่ 3.13 การกระจายอุณหภูมิตามแนวแกน r

รูปที่ 3.14 แสดงกราฟผลต่างระหว่างอุณหภูมิที่ได้จากการจำลอง และ ค่าจากสมการแม่นตรง (ΔT = ผลจากการจำลอง – ผลจากสมการแม่นตรง). ค่าความแตกต่างสูงสุดจากกราฟคือจุด r = 10 mm ซึ่งมีค่าความต่างของอุณหภูมิ 8.59×10^{-7} °C.



รูปที่ 3.14 ผลต่างของอุณหภูมิที่ได้จากการจำลองและสมการแม่นตรง

3.1.2 ผลการจำลองสนามไฟฟ้า, ความเร็วและอุณหภูมิ ภายใต้สภาวะของเหลวเคลื่อนที่โดยไม่มีการระบายความร้อน

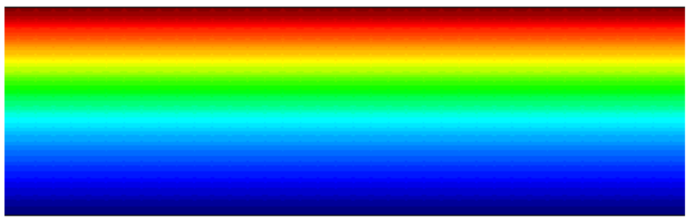
การจำลองก่อนหน้านี้แสดงผลการจำลองภายในห้องฆ่าเชื้อชนิดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมโดยของเหลวระหว่างอิเล็กโทรดหยุดนิ่งและมีแหล่งให้ความร้อน h_j คงที่. หัวข้อนี้ตรวจสอบความถูกต้องของการนำความร้อนของของเหลวในขณะที่ของเหลวเคลื่อนที่ เมื่ออุณหภูมิของของเหลวเปลี่ยนแปลงเกิดจากสนามไฟฟ้า. เราจะเปรียบเทียบจากการจำลองกับสมการแม่นตรงพลังงานที่ทำให้อุณหภูมิในของเหลวเปลี่ยนไป. แบบจำลองเป็นรูปแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมยาว 0.6 m ดังรูปที่ 3.1, รัศมีอิเล็กโทรดแรงสูง r_i เท่ากับ 0.01 m และ รัศมีอิเล็กโทรดกราวนด์ r_o เท่ากับ 0.016 m. เงื่อนไขขอบเขตการจำลองสนามไฟฟ้าคือ กำหนดอิเล็กโทรดแรงดันสูงให้มีแรงดัน V เท่ากับ 20 V, อิเล็กโทรดกราวนด์มีแรงดัน 0 V. กำหนดให้สนามไฟฟ้าตั้งฉากเท่ากับศูนย์ที่ของเขตขาเข้าและขาออกของแบบจำลอง.

เงื่อนไขขอบเขตการจำลองการไหลคือ กำหนดความเร็วเท่ากับศูนย์บนผิวอิเล็กโทรดแรงต่ำและบนผิวอิเล็กโทรดแรงสูง. กำหนดให้ความเร็วในทิศทางแกน z ที่ขาเข้าเป็นไปตามสมการที่ (3.3) โดยมีความดันต่อหน่วยความยาวเท่ากับ -28 Pa/m ซึ่งทำให้ความเร็ว u_z ตามแนวแกน r ดังรูปที่ 3.10. ความเร็วในทิศทางแกน r เท่ากับ 0 m/s ที่ขอบเขตขาเข้าและขาออก.

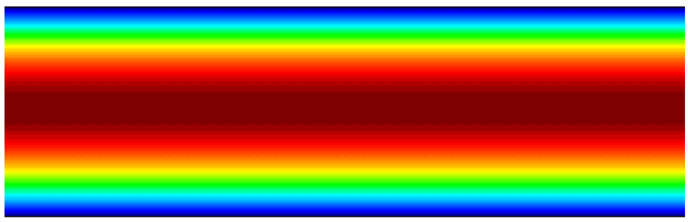
เงื่อนไขขอบเขตการจำลองอุณหภูมิ คือ 1) ขาเข้ามีอุณหภูมิ 25 °C. 2) กำหนดให้ฟลักซ์ความร้อนที่ตั้งฉากกับผิวเท่ากับศูนย์ที่ขาออก. 3) กำหนดให้ฟลักซ์ความร้อนที่ตั้งฉากกับผิวเท่ากับศูนย์ที่ผิว

อิเล็กโทรดแรงสูง และ ผิวอิเล็กโทรดกราวนด์. กำหนดให้แหล่งกำเนิดความร้อน h_j มีค่าไม่คงที่ เกิดจากสนามไฟฟ้าและสภาพนำไฟฟ้าของของเหลว. ของเหลวกำหนดให้มีคุณสมบัติเหมือนหัวข้อที่แล้ว คือ ความหนาแน่น 1030 kg/m^3, สภาพนำไฟฟ้า 0.5 S/m, ความจุความร้อนจำเพาะ 3931 J/°C, สัมประสิทธิ์การนำความร้อน 0.559 W/m°C และ ความหนืด 2.127×10^{-3} kg/m·s. เอลิเมนต์ในการจำลองเป็นแบบสามเหลี่ยมอันดับสอง 6 โหนด ประกอบด้วยโหนดและเอลิเมนต์ทั้งหมด 117,625 และ 57,600 ตามลำดับ.

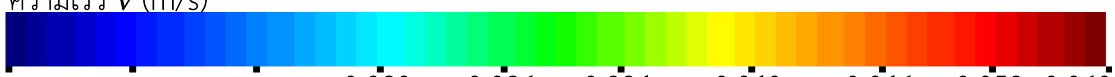
ผลการจำลองของสนามไฟฟ้าและความเร็วของไหลในทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมแสดงดังรูปที่ 3.15 (ก) และ (ข) ตามลำดับ. จากสมการที่ (3.2) จะสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้า P ที่ป้อนให้กับของเหลวทั่วบริเวณตั้งแต่ขาเข้าจนถึงขาออกทั้งหมดเท่ากับ 1.604 kW. ผลการจำลองความเร็วของไหลได้ความเร็วสูงสุดประมาณ 0.06 m/s ซึ่งได้ค่าความเร็วเท่ากับการจำลองการไหลที่ขาออกก่อนหน้านี้.



(ก) การกระจายสนามไฟฟ้า



(ข) การกระจายของความเร็วในของเหลว



รูปที่ 3.15 ผลการจำลองในแบบจำลองทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

รูปที่ 3.16 แสดงการกระจายอุณหภูมิจากขาเข้าจนถึงขาออกโดยที่ของเหลวมีการไหลจากซ้ายไปขวา ตัวอักษร ก, ข และ ค คือตำแหน่งเดียวกัน. ของเหลวไหลจากขาเข้าผ่านจุด ก, ข, ค ไปยัง

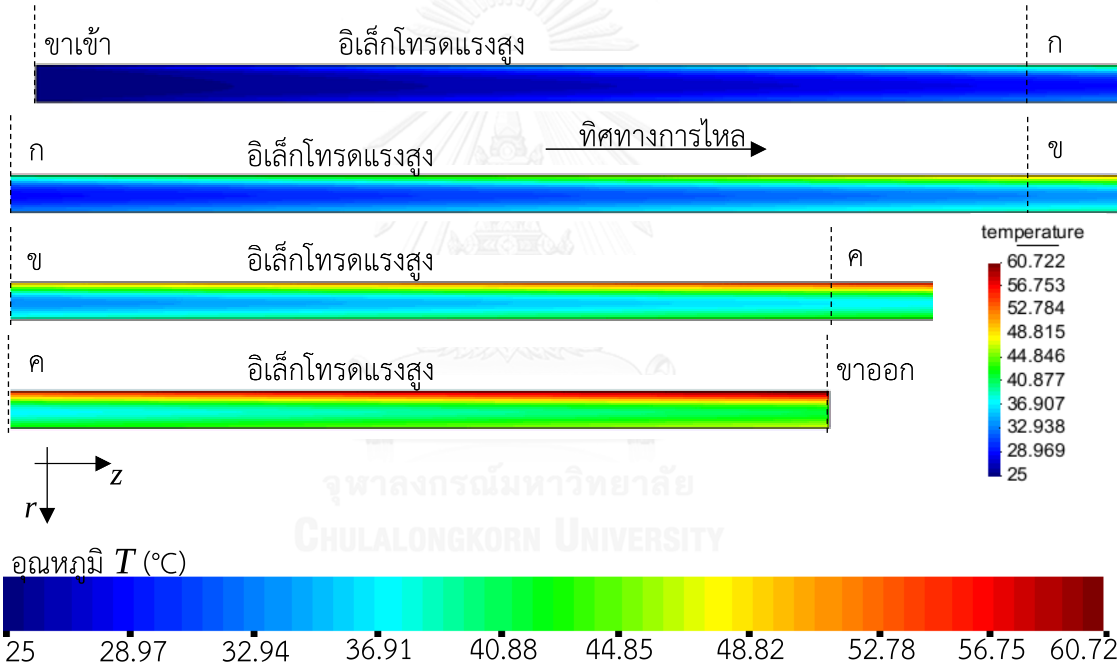
ขาออกตามลำดับ. ของเหลวที่ขาเข้ามีอุณหภูมิเริ่มต้น 25 °C ระหว่างที่ของเหลวไหลจากขาเข้าไปยังขาออก อุณหภูมิของของเหลวค่อยๆเพิ่มขึ้นตามระยะทางที่ของเหลวไหลเนื่องจากสนามไฟฟ้า จนกระทั่งของเหลวไหลไปยังขาออกจะมีอุณหภูมิที่สูงสุดที่ 60 °C. การกระจายอุณหภูมิที่ขาออกได้แสดงดังรูปที่ 3.17 ซึ่งอุณหภูมิเฉลี่ยขาออกเท่ากับ 45.4 °C.

กำลังไฟฟ้าที่ของเหลวได้รับ สามารถคำนวณได้จากอัตราการไหลเชิงมวล $\dot{m}$ ดังนี้

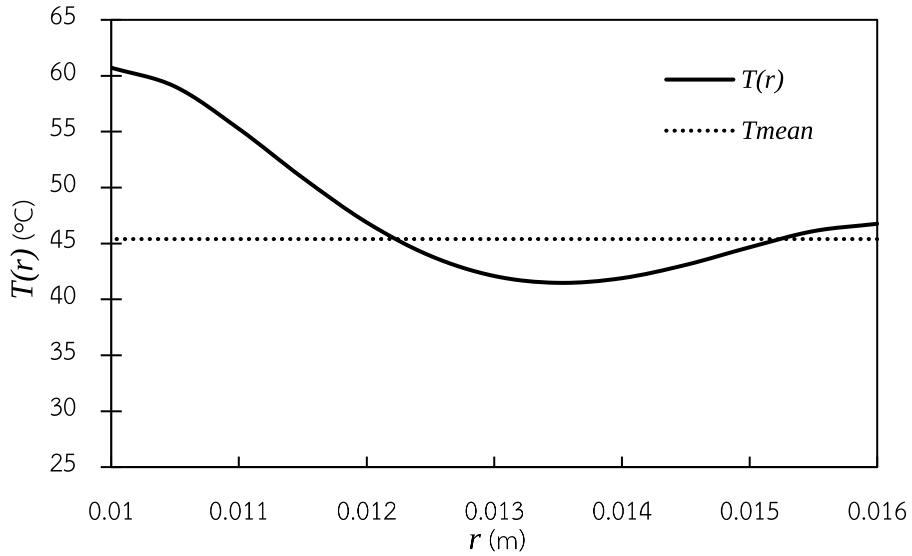
$$P = \dot{m}c_p\left(T_{m,o} - T_{m,i}\right) = \rho Q c_p\left(T_{m,o} - T_{m,i}\right) \tag{3.8}$$

โดยที่ $T_{m,i}$ และ $T_{m,o}$ คือ อุณหภูมิเฉลี่ยที่ขาเข้าและขาออกตามลำดับ

เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (3.8) จะได้ค่ากำลัง P = 1.604 kW. เมื่อเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้า P ที่ของเหลวได้รับโดยคำนวณจากสนามไฟฟ้า พบว่ามีค่าเท่ากัน.



รูปที่ 3.16 การกระจายอุณหภูมิในทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมแบบไม่มีการระบายความร้อน



รูปที่ 3.17 การกระจายอุณหภูมิและอุณหภูมิเฉลี่ยที่ขาออกของแบบจำลอง

3.1.3 ผลการจำลองอุณหภูมิ ภายใต้สภาวะของเหลวเคลื่อนที่ เมื่อมีการระบายความร้อน

พิจารณาปัญหาอุณหภูมิ เมื่อมีการระบายความร้อนบนผิวอิเล็กโทรดกราวนด์. แบบจำลองเป็นรูปแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมดังรูปที่ 3.1 มิติเรขาคณิต และเงื่อนไขขอบเขตของศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าเป็นไปตามหัวข้อที่ 3.1.2. เงื่อนไขขอบเขตการจำลองการไหล กำหนดความเร็วเท่ากับศูนย์บนผิวอิเล็กโทรดแรงต่ำและบนผิวอิเล็กโทรดแรงสูง. ความเร็วในทิศทางแกน z ที่ขาเข้ากำหนดให้เป็นไปตามสมการที่ (3.3) โดยมีการเปลี่ยนแปลงความดันต่อหน่วยความยาวเท่ากับ -0.3 Pa/m เพื่อให้อุณหภูมิของของเหลวเข้าสู่สภาวะคงตัวโดยใช้ระยะทางน้อยลง. ความเร็วในทิศทางแกน r เท่ากับ 0 m/s ที่ขอบเขตขาเข้าและขาออก. เงื่อนไขขอบเขตการจำลองอุณหภูมิ คือ 1) ขาเข้ามีอุณหภูมิ 25 °C 2) ผิวอิเล็กโทรดแรงสูงและขาออกมีฟลักซ์ความร้อนที่ตั้งฉากกับผิวเท่ากับศูนย์ 3) ผิวอิเล็กโทรดกราวนด์มีสัมประสิทธิ์การพาความร้อน 2000 W/m^2 และอุณหภูมิพื้นหลังตัวกลาง 25 °C. กำหนดให้แหล่งให้ความร้อน h_j มีค่าไม่คงที่ ซึ่งเกิดจากสนามไฟฟ้า. กำหนดของเหลวให้มีคุณสมบัติเหมือนกับหัวข้อที่ 3.1.2. จำนวนโหนดและเอลิเมนต์ทั้งหมดคือ 117,625 และ 57,600 ตามลำดับ.

ผลการจำลองสนามไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 3.18 (ก) ซึ่งเหมือนกับหัวข้อที่ผ่านมา. ผลการจำลองความเร็วของเหลวแสดงดังรูปที่ 3.18 (ข) มีความเร็วต่ำกว่าหัวข้อที่ผ่านมา เนื่องจากลดความดันต่อหน่วยความยาวลง แต่ยังคงมีรูปแบบของการกระจายความเร็วเหมือนเดิม.

การกระจายอุณหภูมิในแบบจำลองห้องฆ่าเชื้อแสดงดังรูปที่ 3.19. ของเหลว ณ ตำแหน่งขาเข้ามีอุณหภูมิ 25 ℃ จากนั้นอุณหภูมิของเหลวที่ไหลจากขาเข้าผ่านจุด ก ไป ข มีค่าสูงขึ้นตามลำดับ. อุณหภูมิของของเหลวจากจุด ข ไปยังจุด ค เปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้น ข จึงเป็นจุดที่ของเหลวเริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัว. อุณหภูมิ $T(r_o)$ ที่ผิวอิเล็กโทรดกราวนด์ และ $T(r_i)$ ที่ผิวอิเล็กโทรดแรงสูง ตามทิศทางแกน z แสดงในรูปที่ 3.20. อุณหภูมิที่ผิวอิเล็กโทรดทั้งสองมีค่า 25 ℃ ที่จุดเริ่มต้น (z = 0 m) และเพิ่มขึ้นตามค่า z จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ z ประมาณ 0.3 m ซึ่งมี $T(r_o)$ = 38.28 ℃ และ $T(r_i)$ = 217.0 ℃. อุณหภูมิตามแนวแกน r ที่ปลายขาออกแสดงดังรูปที่ 3.21 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 152 ℃. ในสภาวะคงตัวกำลังไฟฟ้าที่ของเหลวทั่วบริเวณได้รับจะเท่ากับ ฟลักซ์ความร้อนที่ไหลตั้งฉากกับผิวอิเล็กโทรดกราวนด์รวมกับพลังงานสะสมของของเหลวที่ทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนไป. ดังนั้นจึงได้สมการดังนี้

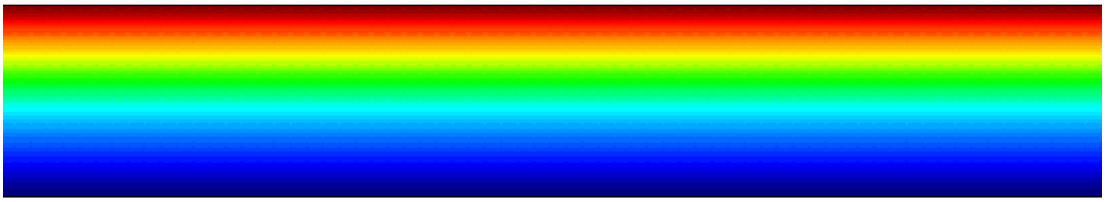
$$\int \sigma E_z^2 \,\mathrm{d}V = \int b\big(T(r_o)-25\big)dA + \rho Q c_p \big(T_{m,o}-T_{m,i}\big) \qquad (3.9)$$

จากการคำนวณ พจน์แรกทางขวามือมีค่าเท่ากับ 1.496 kW และ พจน์ที่สองเท่ากับ 107 W รวมกันได้ 1.603 kW ซึ่งสอดคล้องกับ 1.604 kW ที่ได้จากทางซ้ายมือของ (3.9).

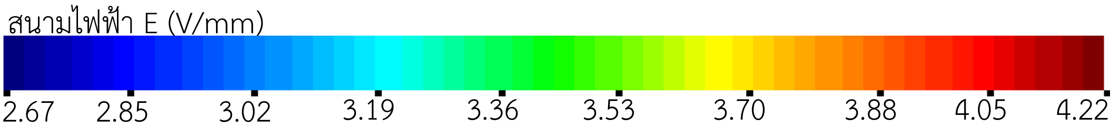
นอกจากนี้เราสามารถยืนยันอุณหภูมิที่สภาวะคงตัวด้วยสมการที่ (3.10) ซึ่งให้ค่า $T(r_o)$ = 38.3 ℃.

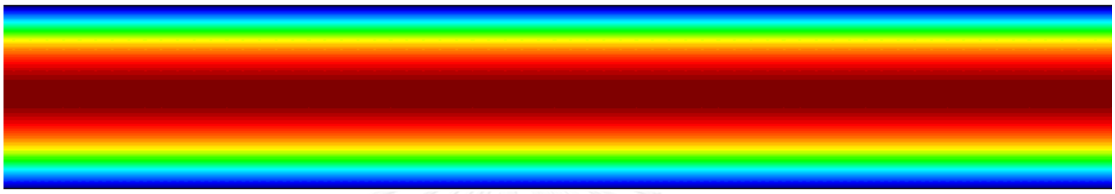
$$-2\pi\sigma\left(\frac{V}{\ln\left(r_o/r_i\right)}\right)^2 \ln\left(r_o/r_i\right) = 2\pi r_o b\big(T(r_o)-25\big) \qquad (3.10)$$

อุณหภูมิมีค่าใกล้เคียงกับผลการจำลองที่ผิวอิเล็กโทรดกราวนด์ขณะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ได้ ในรูปที่ 3.20.

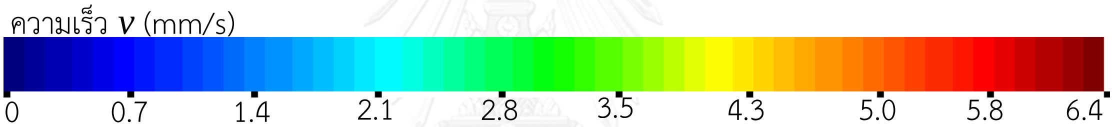


(ก) การกระจายของสนามไฟฟ้า

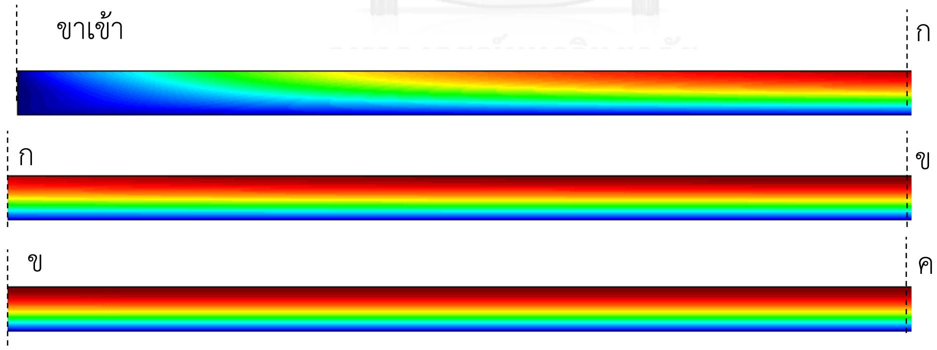


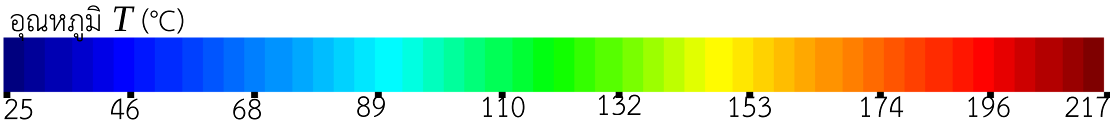


(ข) การกระจายของความเร็วในของเหลว

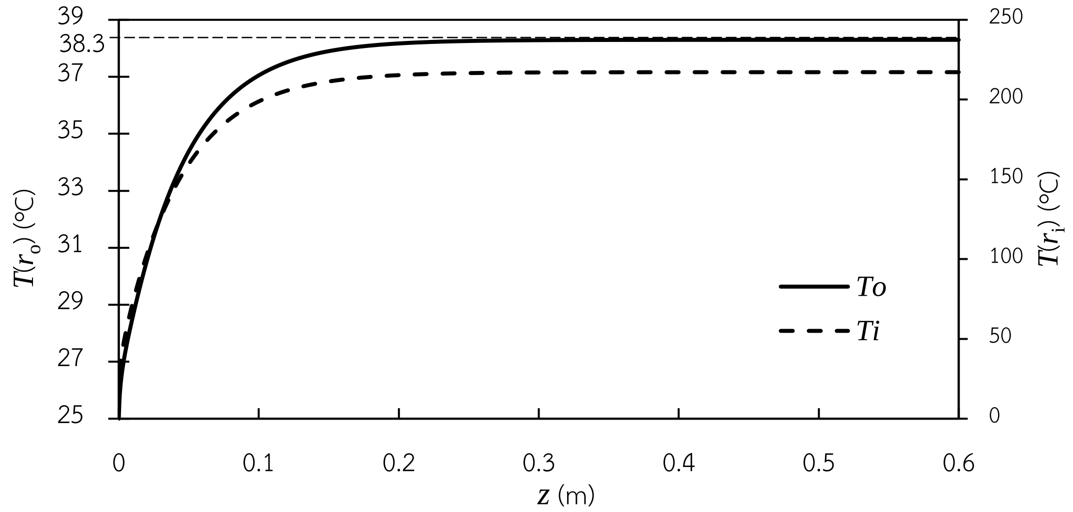


รูปที่ 3.18 ผลการจำลองในแบบจำลองทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมแบบมีการระบายความร้อน

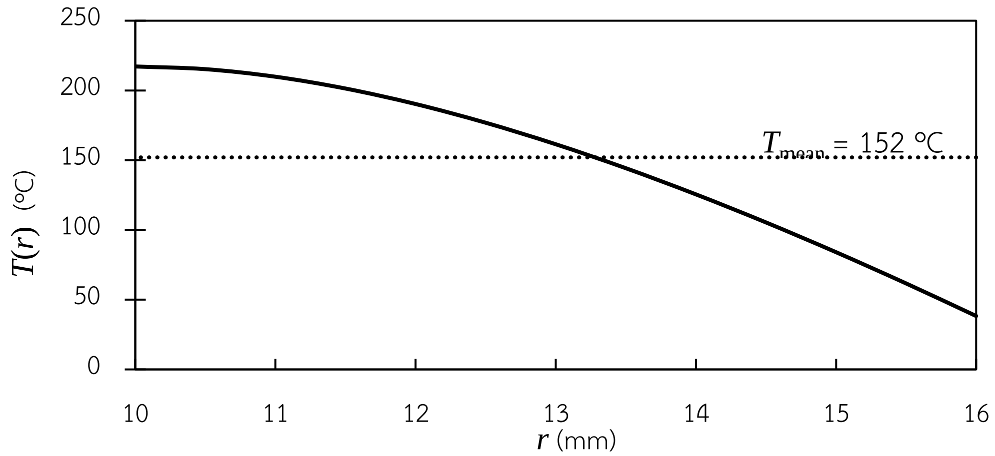




รูปที่ 3.19 อุณหภูมิในห้องฆ่าเชื้อทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมแบบมีการระบายความร้อน



รูปที่ 3.20 อุณหภูมิที่ผิวอิเล็กโทรดแรงสูง และอุณหภูมิที่ผิวอิเล็กโทรดกราวนด์



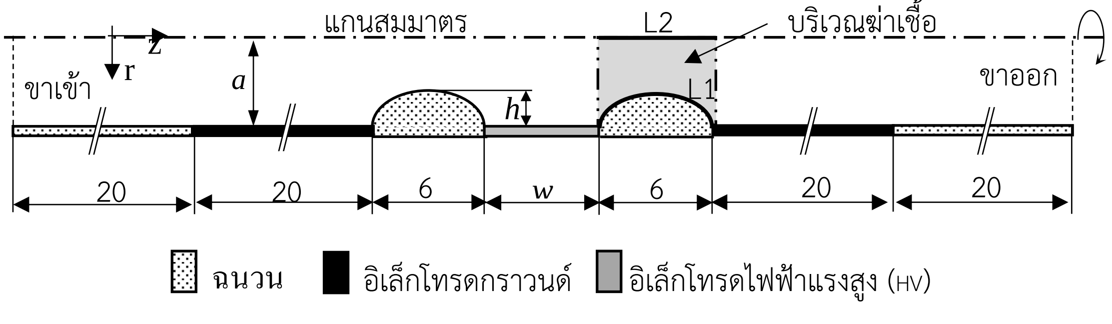
รูปที่ 3.21 อุณหภูมิที่ขาออกของห้องฆ่าเชื้อชนิดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมแบบมีการระบายความร้อน

บทที่ 4
ผลการจำลองในห้องฆ่าเชื้อแบบสนามไฟฟ้าในทิศทางการไหล

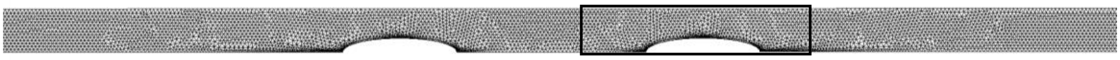
4.1 แบบจำลอง

แบบจำลองห้องฆ่าเชื้อแบบสนามไฟฟ้าในทิศทางการไหลแสดงดังรูปที่ 4.1. แบบจำลองประกอบด้วย ฉนวนบริเวณขาเข้าและขาออกยาว 20 mm, อิเล็กโทรดกราวนด์ยาว 20 mm และฉนวนยาว 6 mm กั้นระหว่างอิเล็กโทรดแรงสูงและอิเล็กโทรดกราวนด์ โดยรูปแบบฉนวนเป็นแบบครึ่งวงรี (ellipse). รัศมีของห้องฆ่าเชื้อ a, ความสูงฉนวน h และความยาวอิเล็กโทรดแรงสูง w เป็นมิติและขนาดที่จะปรับเพื่อหาค่าที่เหมาะสม. สำหรับผลของสนามไฟฟ้า ผู้วิจัยพิจารณาสนามไฟฟ้าที่อยู่บนแนวเส้น L1 ตามผิวฉนวน และเส้น L2 ที่แกนกลางห้องฆ่าเชื้อ ดังรูปที่ 4.1. พิจารณาบริเวณสีเทาอ่อนเป็นบริเวณฆ่าเชื้อ. สำหรับการไหลของของไหล ผู้วิจัยพิจารณาการไหลวนของของไหล และนำลักษณะการไหลที่ได้ไปวิเคราะห์ปัญหาอุณหภูมิต่อไป. สำหรับอุณหภูมิ ผู้วิจัยคำนวณการเพิ่มอุณหภูมิของของไหลที่เกิดขึ้นจากความร้อนจูลและการไหล โดยพิจารณาอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นบนของไหล และอุณหภูมิเฉลี่ยที่ขาออก.

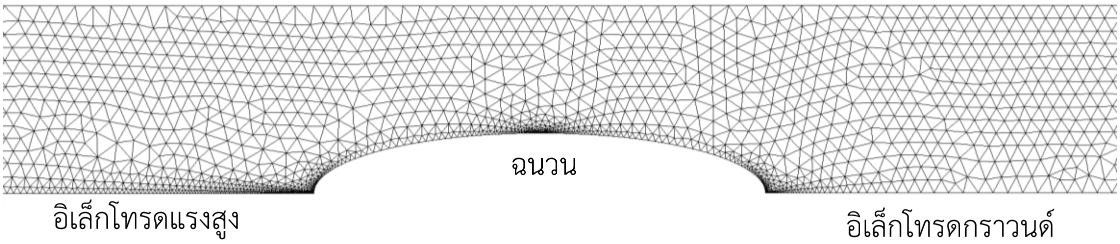
ตัวอย่างที่ใช้เป็นต้นแบบในการจำลองคือ นมที่อุณหภูมิ 20 °C ซึ่งมีคุณสมบัติแสดงในตารางที่ 1. ทั้งนี้ ผู้วิจัยสมมุติให้คุณสมบัติต่างๆของของไหลมีค่าคงที่ ไม่แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิของของไหล. รูปที่ 4.2 (ก) แสดงตัวอย่างเมชของแบบจำลองเมื่อกำหนด a = 2.5 mm, h = 0.8 mm และ w = 10 mm. แบบจำลองกรณีนี้มีจำนวนทั้งหมด 30,130 เอลิเมนต์ โดยมีจำนวนโหนดเท่ากับ 63,031. แบบจำลองความยาวอื่นๆ มีจำนวนโหนดแตกต่างกันตามพื้นที่ของห้องฆ่าเชื้อ. รูปที่ 4.2 (ข) เป็นรูปขยายบริเวณฆ่าเชื้อและอิเล็กโทรดด้านข้าง แสดงความหนาแน่นของเอลิเมนต์บริเวณรอยต่อของอิเล็กโทรดกับฉนวน ซึ่งมีมากกว่าบริเวณอื่นๆ เนื่องจากบริเวณนี้ความเข้มสนามไฟฟ้าสูงกว่าในบริเวณอื่นๆ.



รูปที่ 4.1 แบบจำลองห้องฆ่าเชื้อแบบสนามไฟฟ้าทิศในทางการไหล (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)



(ก) แบบจำลองภาพรวม



(ข) รูปขยายบริเวณผิวฉนวนวงรี

รูปที่ 4.2 ตัวอย่างการแบ่งเอลิเมนต์ในห้องฆ่าเชื้อเมื่อ a = 2.5 mm, h = 0.8 mm และ w = 10 mm

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของตัวกลาง (นมอุณหภูมิ 20 ℃) [16]

คุณสมบัติ	ตัวแปร	ค่า
ความหนาแน่น	ρ	1030 kg/m^3
ความจุความร้อนจำเพาะ	c_p	3931 J/kg·℃
สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	κ	0.559 W/m℃
สภาพการนำไฟฟ้า	σ	0.5 S/m
ความหนืด	μ	2.127×10^{-3} kg/m·s

4.2 สนามไฟฟ้าในห้องฆ่าเชื้อ

เงื่อนไขขอบเขตสำหรับการจำลองสนามไฟฟ้าที่กำหนดในแบบจำลองรูปที่ 4.1 คือ

1) กำหนดศักย์ไฟฟ้า 1 V ที่อิเล็กโทรดแรงดันสูง

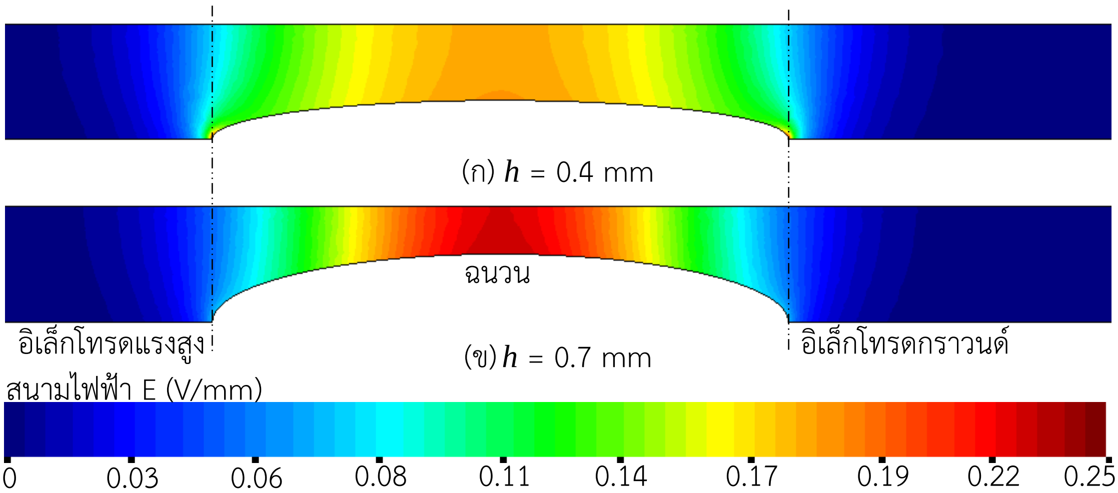
2) กำหนดศักย์ไฟฟ้า 0 V ที่อิเล็กโทรดกราวนด์

3) กำหนดสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับขอบเขต E_n = 0 V/m ที่ ผิวฉนวน, ขอบเขตด้านขาเข้าขอบเขตด้านขาออก และแกนสมมาตร.

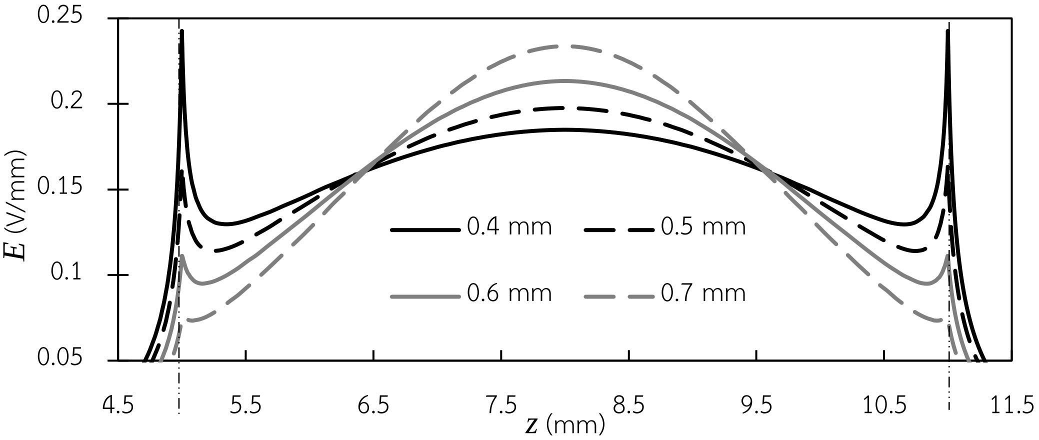
4.2.1 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าในห้องฆ่าเชื้อเมื่อความสูงฉนวน

พิจารณาแบบจำลองห้องฆ่าเชื้อที่มีรัศมี a = 1.2 mm, 2.5 mm และ 5.0 mm และความยาวอิเล็กโทรดแรงสูง w = 10 mm. การกระจายของสนามไฟฟ้าบริเวณฆ่าเชื้อและอิเล็กโทรดในห้องฆ่าเชื้อที่มีรัศมี a = 1.2 mm และ w 10 mm แสดงในรูปที่ 4.3. เส้นประในรูปแสดงตำแหน่ง z ที่รอยต่อระหว่างอิเล็กโทรดและฉนวน. แบบจำลองมีความสูงฉนวน h = 0.4 mm และ h = 0.7 mm ในรูปที่ 4.3 (ก) และ (ข) ตามลำดับ. เราจะเห็นว่า เมื่อแบบจำลองที่มี h = 0.7 mm มีความเข้มของสนามไฟฟ้าบริเวณกลางผิวฉนวนสูงกว่าแบบจำลองที่มี h = 0.4 mm แต่เมื่อใกล้บริเวณรอยต่อของฉนวนกับอิเล็กโทรด สนามไฟฟ้ามีความเข้มมากกว่าเมื่อ h = 0.4 mm. รูปที่ 4.4 แสดงความเข้มสนามไฟฟ้าบนผิวฉนวน (เส้น L1 ในรูปที่ 4.1) เมื่อ h เท่ากับ 0.4 mm ถึง 0.7 mm โดยมีเส้นประในแนวดิ่งแสดงรอยต่อระหว่างอิเล็กโทรดและฉนวน. รูปที่ 4.4 แสดงว่า ความเข้มสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อระหว่างอิเล็กโทรดและฉนวนจะมีค่าสูงเมื่อ h มีค่าน้อย ซึ่งมีค่าประมาณ 0.25 V/mm เมื่อ h = 0.4 mm. ความเข้มสนามไฟฟ้าบนกลางผิวฉนวนจะมีค่าสูงเมื่อ h มีค่ามาก. ลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าตามแนวแกนสมมาตร (บนเส้น L2) เมื่อ h เท่ากับ 0.4 mm ถึง 0.7 mm แสดงดังรูปที่ 4.5 (ก). ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดบนแกนสมมาตรอยู่ที่กึ่งกลางของเส้น L2 เสมอ. ขนาดของสนามไฟฟ้าสูงสุดเพิ่มขึ้นเมื่อฉนวนสูงมากขึ้น. รูปที่ 4.5 (ข) แสดงสนามไฟฟ้าเฉลี่ยบนแนวแกนสมมาตรได้จากการอินทิเกรตสนามไฟฟ้าบริเวณฆ่าเชื้อ ซึ่งมีค่าสูงขึ้นเป็นเชิงเส้นโดยประมาณ เมื่อความสูงของฉนวน h เพิ่มขึ้น.

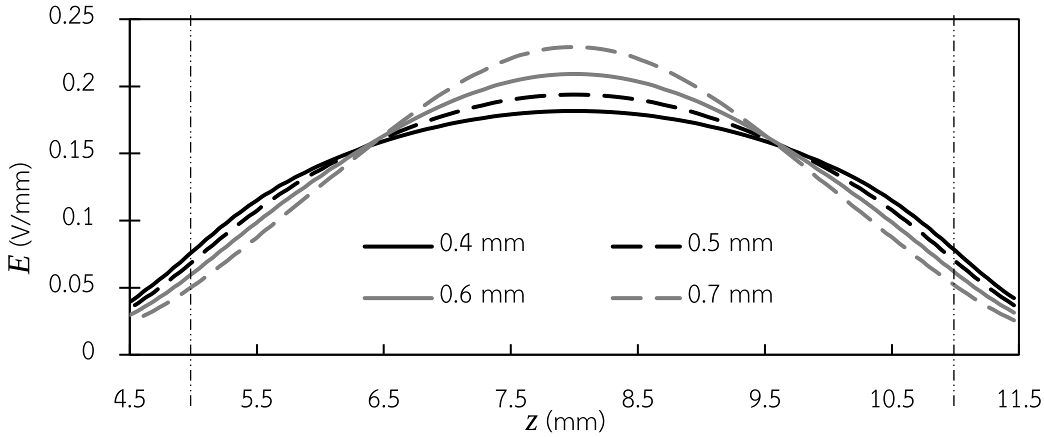
รูปที่ 4.6 และ รูปที่ 4.7 แสดงสนามไฟฟ้าเมื่อมีรัศมี a เพิ่มขึ้นเป็น 2.5 mm และ 5.0 mm ตามลำดับ โดยที่แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้อิเล็กโทรดมีค่าเท่าเดิม. รูปที่ 4.8 และ รูปที่ 4.9 แสดงสนามไฟฟ้าบนผิวฉนวนเมื่อมีรัศมี a เท่ากับ 2.5 mm และ 5.0 mm



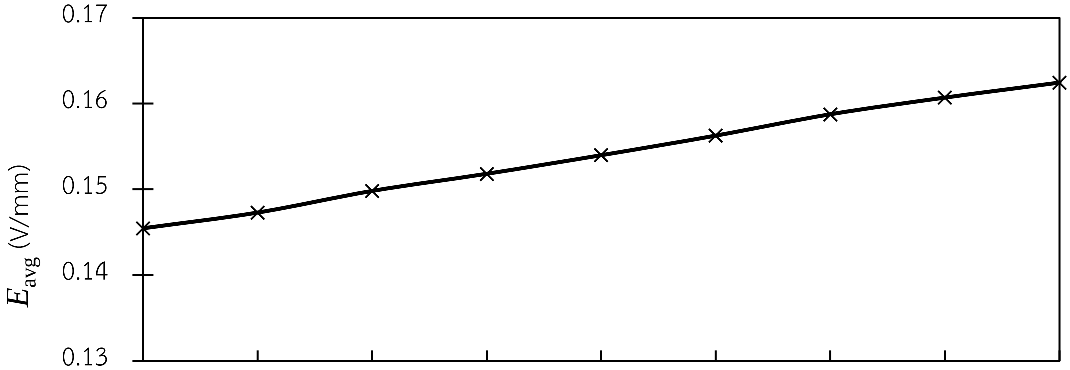
รูปที่ 4.3 การกระจายของสนามไฟฟ้าบริเวณฆ่าเชื้อ เมื่อ a = 1.2 mm และ w = 10 mm



รูปที่ 4.4 สนามไฟฟ้าบนผิวฉนวน (เส้น L1) เมื่อ a = 1.2 mm และ h = 0.4 - 0.7 mm

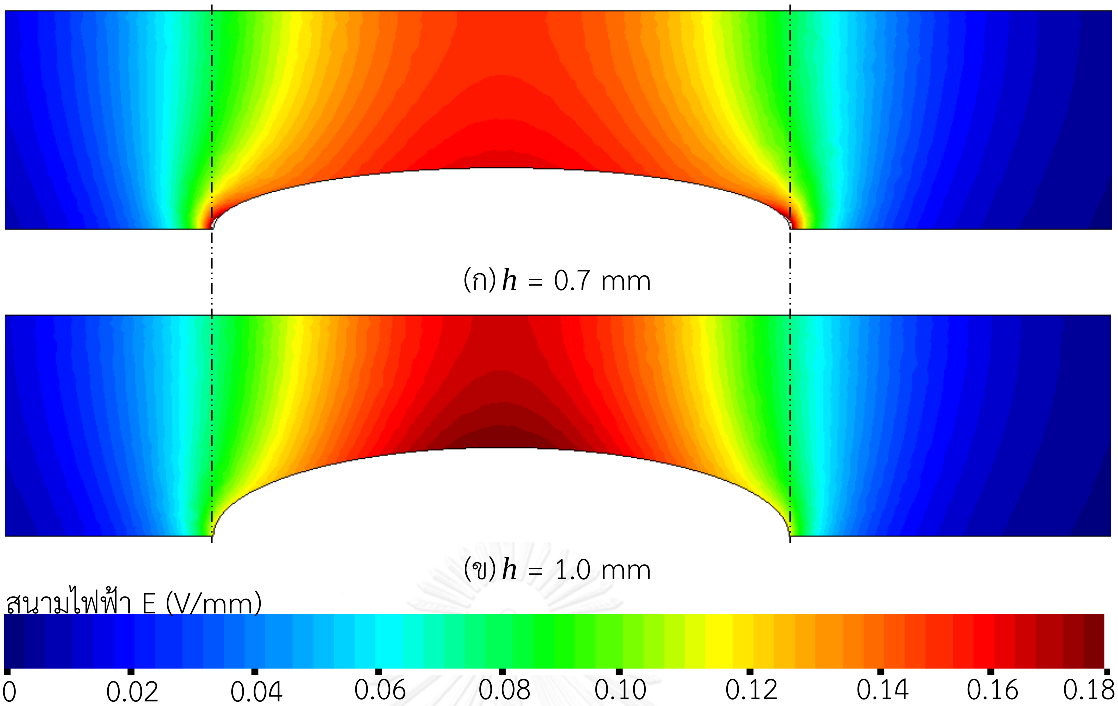


(ก) การกระจายสนามไฟฟ้า

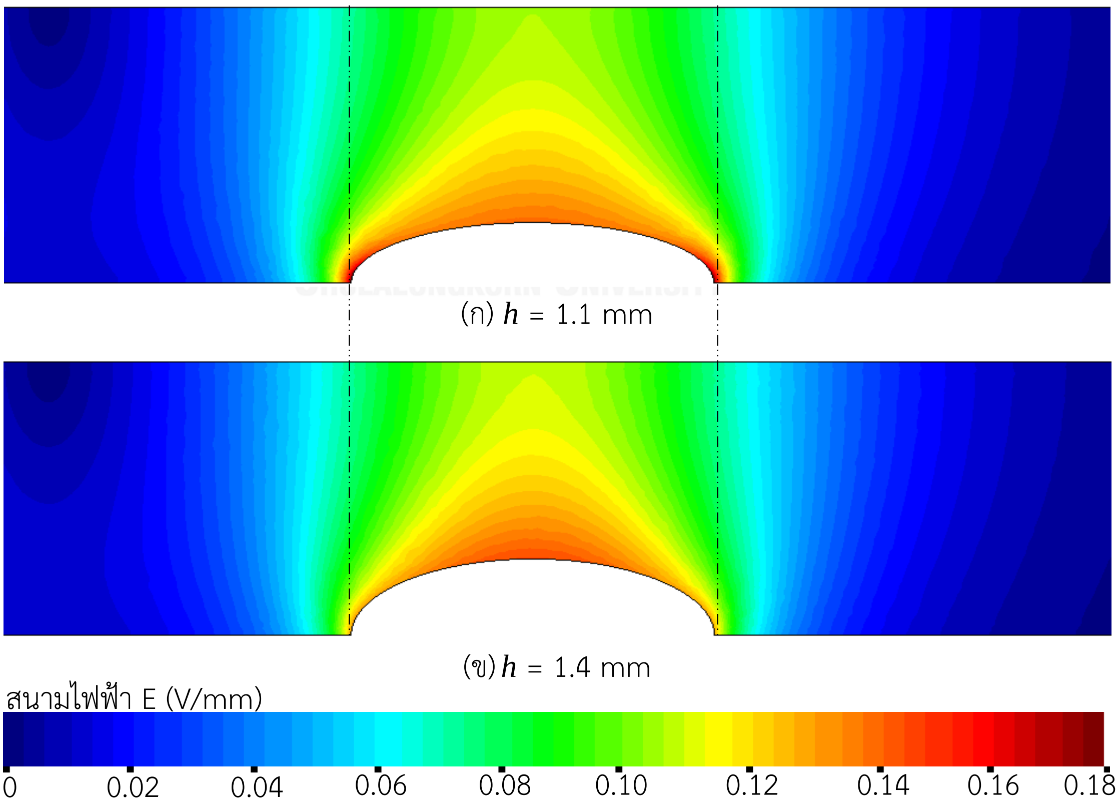


(ข) สนามไฟฟ้าเฉลี่ย

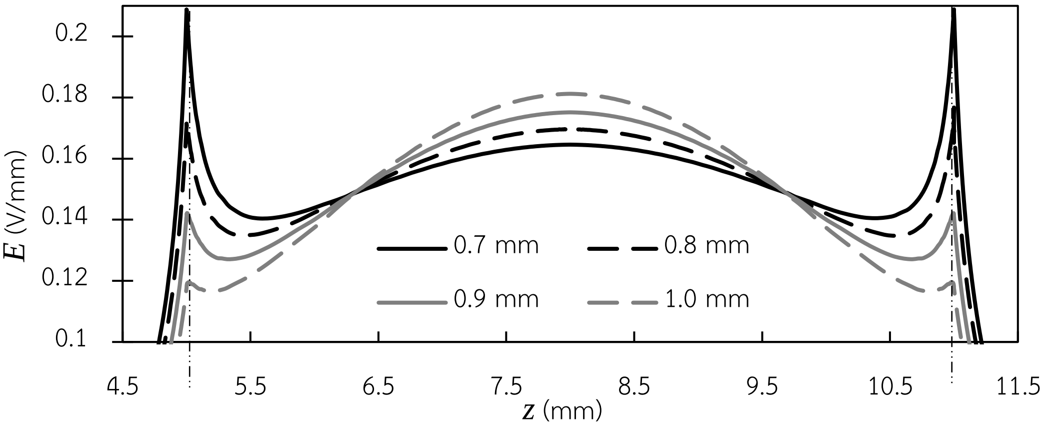
รูปที่ 4.5 สนามไฟฟ้ากลางห้องฆ่าเชื้อ (เส้น L2) เมื่อ a = 1.2 mm.



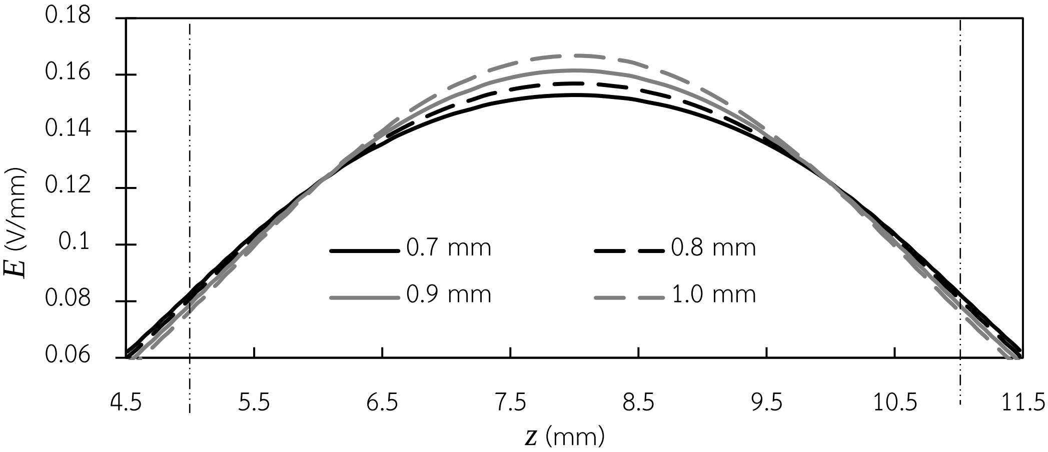
รูปที่ 4.6 การกระจายของสนามไฟฟ้าบริเวณฆ่าเชื้อเมื่อ a = 2.5 mm และ w = 10 mm



รูปที่ 4.7 การกระจายของสนามไฟฟ้าบริเวณฆ่าเชื้อเมื่อ a = 5.0 mm และ w = 10 mm



(ก) สนามไฟฟ้าบนผิวฉนวน

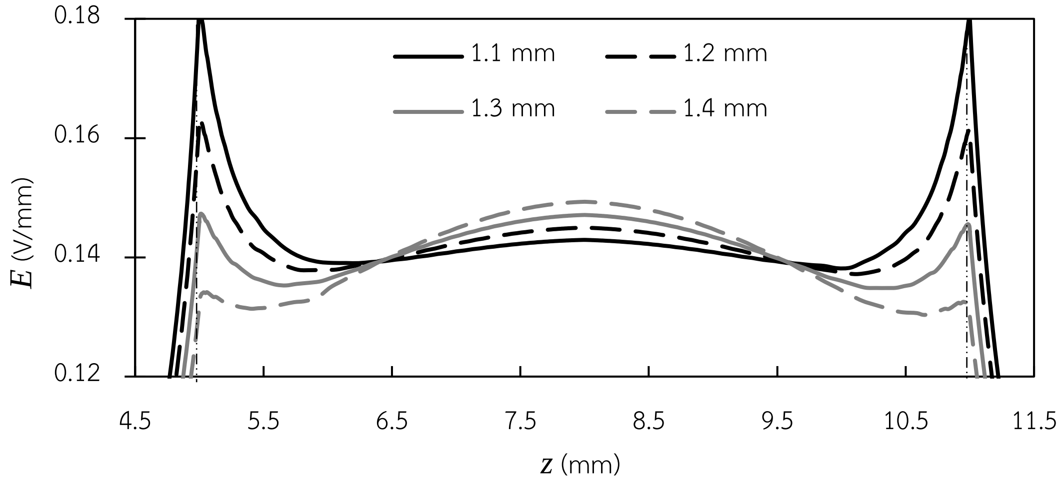


(ข) สนามไฟฟ้าบนแกนสมมาตร

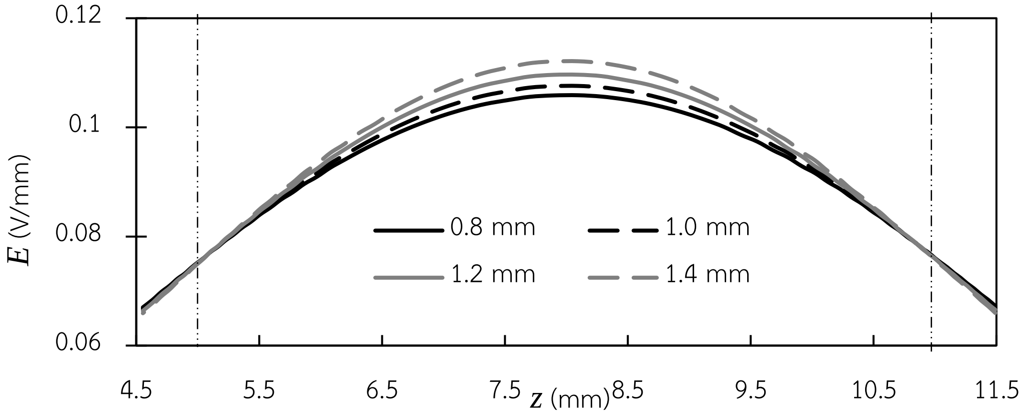
รูปที่ 4.8 การกระจายของสนามไฟฟ้าเมื่อ a = 2.5 mm

รูปที่ 4.6 ถึง รูปที่ 4.9 เราสามารถเห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าบนผิวฉนวนและกลางห้องฆ่าเชื้อ ในแนวทางเดียวกับกรณีที่ a = 1.2 mm นั่นคือ เมื่อฉนวนมีความสูงเพิ่มขึ้นจะทำให้สนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อของฉนวนและอิเล็กโทรดลดลง แต่สนามไฟฟ้ากลางผิวฉนวนจะเพิ่มขึ้น. ดังนั้น สรุปว่าการใช้ฉนวนที่มีพื้นผิวโค้ง ซึ่งยื่นเข้าไปภายในบริเวณฆ่าเชื้อสามารถลดความเข้มสูงสุดของสนามไฟฟ้าที่รอยต่อระหว่างอิเล็กโทรดและฉนวน. อย่างไรก็ตาม ถ้ามีฉนวนความสูง h มากเกินไป จะทำให้ความเข้มสนามไฟฟ้าบริเวณกลางเส้น L1 (ผิวฉนวน) มีค่าเพิ่มขึ้น. ในการใช้งานจริง เราต้องการหลีกเลี่ยงห้องฆ่าเชื้อที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง เนื่องจากทำให้ของไหลบางส่วนได้รับพลังงานมากเกินไป หรือของไหลบางส่วนได้รับพลังงานไม่เพียงพอ. ความเร็วการไหลของของไหลใกล้บริเวณผิวฉนวนมีความเร็วต่ำ ถ้าหากได้รับความเข้มสนามไฟฟ้าสูงจะทำให้เกิดความร้อนสะสมมากเกินไป. ในทางกลับกันบริเวณเส้นสมมาตรความเร็วของไหลจะมีค่าสูงสุด ซึ่งอาจได้รับ

พลังงานจากสนามไฟฟ้าน้อยลง. ดังนั้นเพื่อให้สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณผิวฉนวนมีความสม่ำเสมอ ผู้วิจัยจึงทดลองหาค่าที่เหมาะสมของห้องฆ่าเชื้อจากการแปรผันของ สนามไฟฟ้าบนรอยต่อระหว่างฉนวนกับอิเล็กโทรด ($E_{junction}$) และ สนามไฟฟ้าที่กลางผิวฉนวน (E_{center}) กับอัตราส่วนความสูงฉนวนต่อรัศมี (h/a). รูปที่ 4.10 (ก), (ข) และ (ค) แสดงการแปรผันของค่าสนามไฟฟ้าสำหรับห้องฆ่าเชื้อที่มี a = 1.2, 2.5 และ 5.0 mm ตามลำดับ. จากผลทั้ง 3 รูปเราเห็นจุดที่ $E_{junction}$ และ E_{center} ตัดกัน ซึ่งเป็นจุดที่ทำให้ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนผิวฉนวนมีความสม่ำเสมอที่สุดโดยประมาณ. อัตราส่วน h/a ที่เกิดจุดตัดกันของห้องฆ่าเชื้อที่มี a = 1.2, 2.5 และ 5.0 mm คือ 0.38, 0.32 และ 0.26 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าอัตราส่วนจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มรัศมี a ของห้องฆ่าเชื้อ. ผู้วิจัยใช้ความสูงฉนวน h ดังกล่าว สำหรับการจำลองผลในหัวข้อต่อไป. นั่นคือ h = 0.455, 0.8 และ 1.3 mm สำหรับ ห้องฆ่าเชื้อที่มี a = 1.2, 2.5 และ 5.0 mm ตามลำดับ.

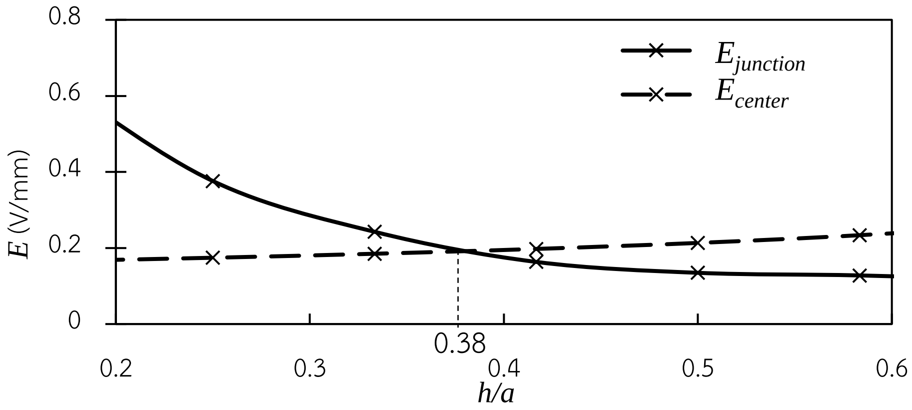


(ก) สนามไฟฟ้าบนผิวฉนวน

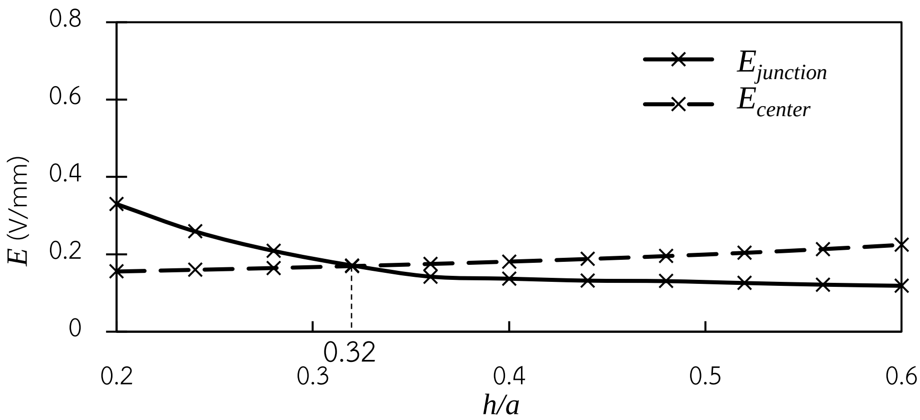


(ข) สนามไฟฟ้าบนแกนสมมาตร

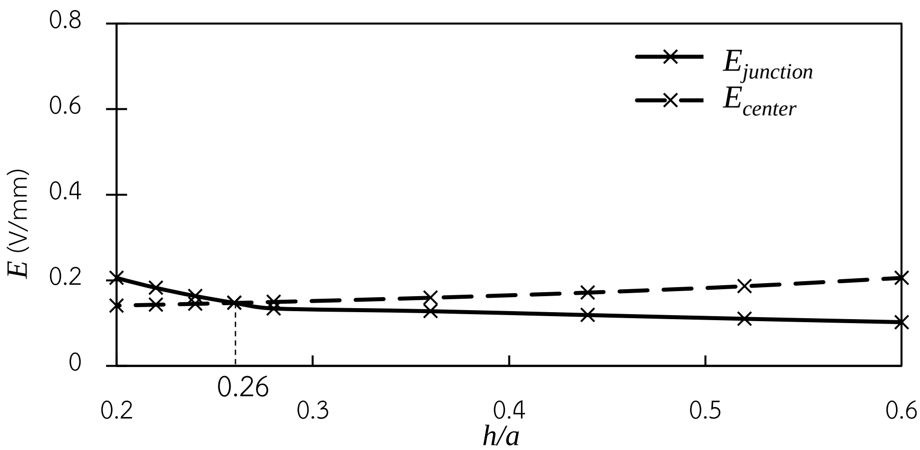
รูปที่ 4.9 การกระจายของสนามไฟฟ้าเมื่อ a = 5.0 mm



(ก) a = 1.2 mm



(ข) a = 2.5 mm



(ค) a = 5.0 mm

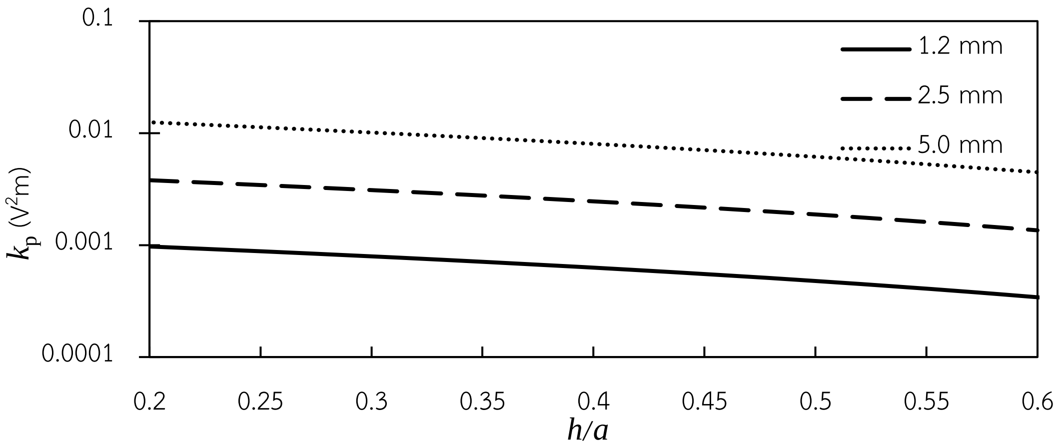
รูปที่ 4.10 การแปรผันของสนามไฟฟ้า $E_{junction}$ และ E_{center} ตามอัตราส่วน h/a

พลังงานที่เกิดขึ้นในของเหลวแปรผันตามขนาดสภาพนำไฟฟ้าและกำลังสองของสนามไฟฟ้า. ดังนั้น เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของพลังงานเมื่อห้องฆ่าเชื้อมีมิติต่างๆจึงเปรียบเทียบโดย สัมประสิทธิ์พลังงานของสนามไฟฟ้า k_p (V^2m) ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการดังนี้

$$k_p = \int_{V_o} E^2 dV \tag{4.1}$$

V_o คือปริมาตรของห้องฆ่าเชื้อทั้งหมด

รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ของ k_p และอัตราส่วน h/a ของห้องฆ่าเชื้อขนาด 1.2, 2.5 และ 5.0 mm. เราได้เห็นว่า การเพิ่มอัตราส่วน h/a จะทำให้พลังงานจากสนามไฟฟ้ามีค่าลดลง.



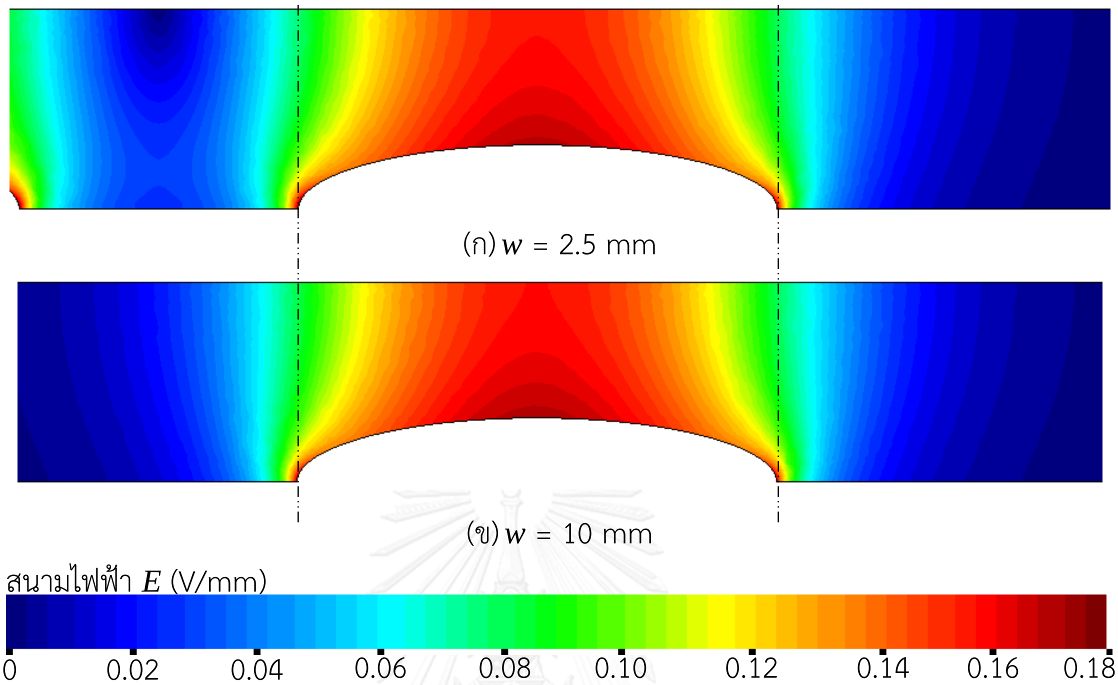
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง k_p และ อัตราส่วน h/a ของห้องฆ่าเชื้อขนาด a = 1.2 – 5.0 mm

4.2.2 ผลของความยาวอิเล็กโทรดแรงสูง

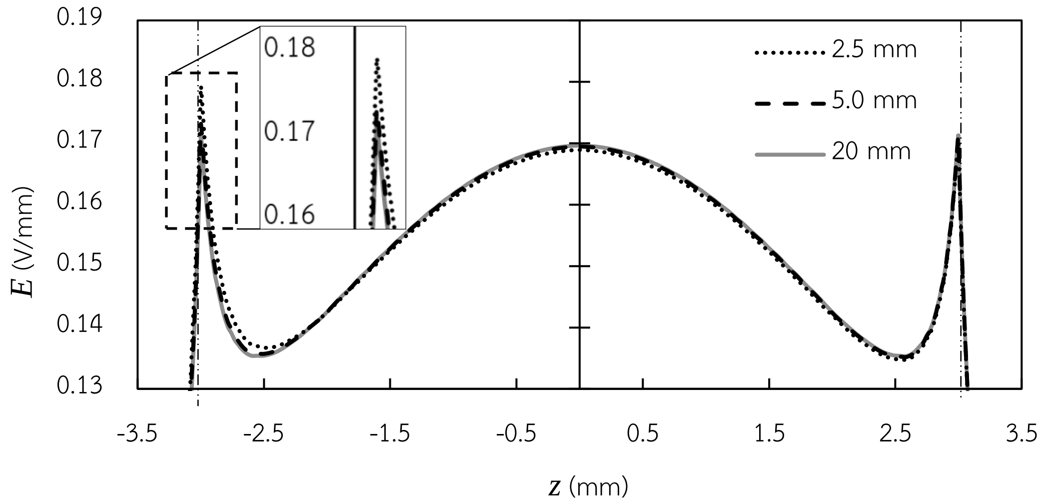
หัวข้อนี้เปรียบเทียบการกระจายของสนามไฟฟ้าบริเวณใกล้กับฉนวนวงรีเมื่อความยาวอิเล็กโทรดแรงสูงแตกต่างกัน. ผู้วิจัยกำหนดความยาว w ของอิเล็กโทรดแรงสูง ในช่วง 2.5 mm ถึง 20 mm. กำหนดให้ความสูงของ h ฉนวนเท่ากับ 0.8 mm และ 1.3 mm เมื่อ a = 2.5 mm และ 5.0 mm ตามลำดับ ซึ่งค่า h ได้จากผลการจำลองในหัวข้อที่ 4.2.1.

รูปที่ 4.12 แสดงการกระจายสนามไฟฟ้าบริเวณฆ่าเชื้อเมื่อ a = 2.5 mm และ h = 0.8 mm. รูปที่ 4.12 (ก) และ (ข) เป็นกรณีที่ w = 2.5 mm และ 10 mm ตามลำดับ. เราเห็นได้ว่า การกระจายของสนามไฟฟ้าแตกต่างกันไม่มากนัก สำหรับค่า w ทั้งสองค่า. รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบความเข้มของสนามไฟฟ้าบนผิวฉนวน ระหว่างแบบจำลองที่มี w = 2.5 mm, 5.0 mm และ 20 mm. สนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อระหว่างฉนวนและอิเล็กโทรดแรงสูงเมื่อ w = 2.5 mm มีค่าสูงกว่ากรณีที่ w = 5 mm และ 10 mm. รูปที่ 4.14 แสดงความเข้มสนามไฟฟ้าบนแนวแกนสมมาตร เมื่อ w = 2.5

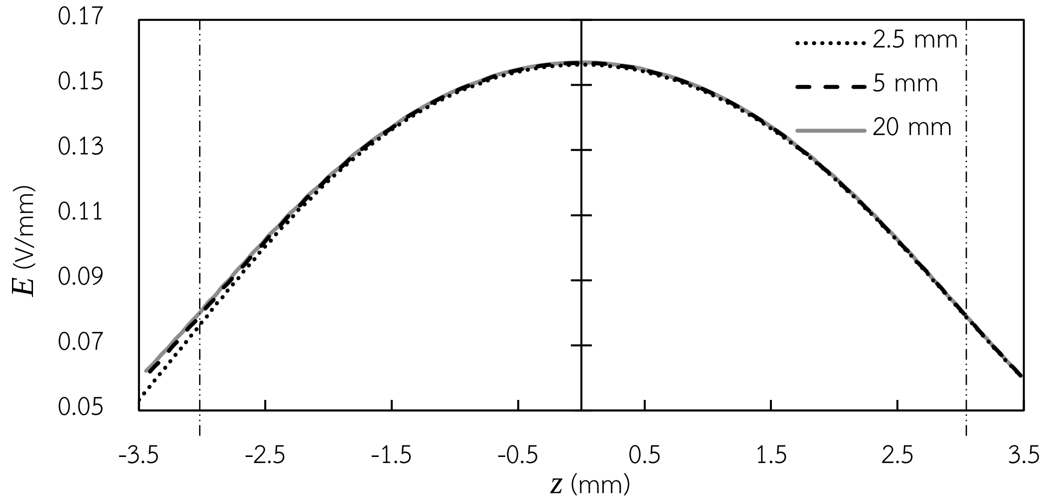
mm, 5.0 mm และ 20 mm. สนามไฟฟ้าในรูปที่ 4.14 มีขนาดใกล้เคียงกันตลอดเส้น ยกเว้นบริเวณ (z = -3 mm) ซึ่งกรณี w = 2.5 mm มีสนามไฟฟ้าต่ำกว่ากรณีที่ w = 5 mm และ 10 mm เล็กน้อย.



รูปที่ 4.12 การกระจายของสนามไฟฟ้าบริเวณฆ่าเชื้อเมื่อ a = 2.5 mm และ h = 0.8 mm



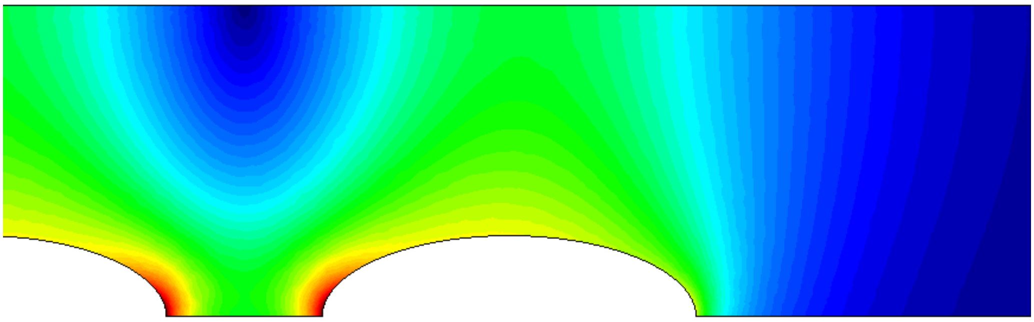
รูปที่ 4.13 การกระจายของสนามไฟฟ้าบนผิวฉนวนเมื่อ a = 2.5 mm, h = 0.8 และ w ตั้งแต่ 2.5 ถึง 20 mm



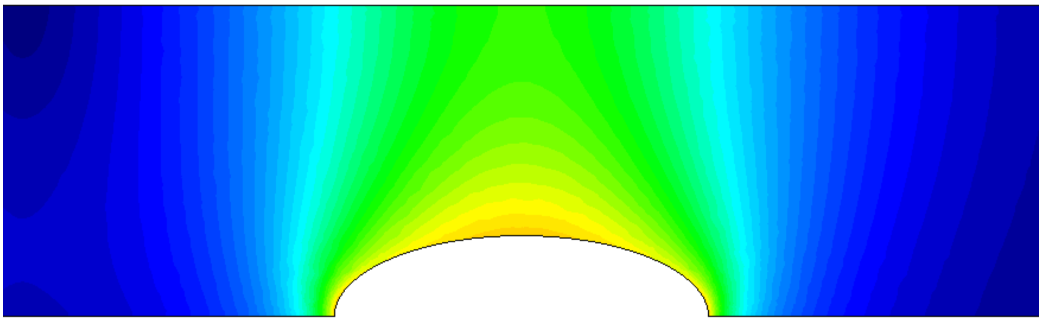
รูปที่ 4.14 การกระจายของสนามไฟฟ้าบนแนวเส้นสมมาตรเมื่อ a = 2.5 mm, h = 0.8 และ w ตั้งแต่ 2.5 ถึง 20 mm

ผลการคำนวณของห้องฆ่าเชื้อที่มีรัศมี a = 5 mm และความสูงฉนวน h = 1.3 mm แสดงในรูปที่ 4.15 ถึง รูปที่ 4.17. เราจะเห็นว่าแบบจำลองที่มี w = 2.5 mm มีค่าสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อระหว่างอิเล็กโทรดแรงสูงและกราวนด์สูงถึง 0.21 V/mm ซึ่งมากกว่าแบบจำลองที่มี w = 10 mm อย่างมาก. นอกจากนี้ เมื่อ w = 2.5 mm สนามไฟฟ้าที่กลางผิวฉนวนต่ำกว่าเมื่อ w = 10 mm อย่างเห็นได้ชัด. รูปที่ 4.16 แสดงความเข้มของสนามไฟฟ้าบนผิวฉนวนของแบบจำลองที่มีความยาวอิเล็กโทรดแรงสูงเท่ากับ 2.5 mm, 5.0 mm, 10 mm และ 20 mm. เมื่อความยาว w ของอิเล็กโทรดแรงสูงเพิ่มขึ้นเป็น 5 mm และ 10 mm สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งรอยต่อมีค่าลดลงเป็น 0.16 และ 0.15 V/mm ตามลำดับ. อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความยาวจาก 10 mm เป็น 20 mm เราเห็นได้ว่าสนามไฟฟ้าบนรอยต่อของฉนวนและอิเล็กโทรดไม่เปลี่ยนแปลง. รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบความเข้มสนามไฟฟ้าบนแกนสมมาตรของแบบจำลอง เมื่อ w = 2.5 mm, 5.0 mm และ 20 mm. จากผลการจำลอง เราเห็นได้ว่าสนามไฟฟ้าบนแกนสมมาตรมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความยาวอิเล็กโทรดแรงสูงเพิ่มจาก 2.5 mm เป็น 10 mm แต่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเพิ่มความยาวจาก 10 mm เป็น 20 mm.

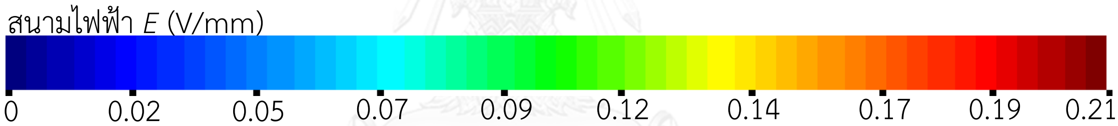
ความสัมพันธ์ของพลังงาน k_p ในห้องฆ่าเชื้อแสดงดังรูปที่ 4.18 โดยที่ $k_{p,10}$ คือสัมประสิทธิ์พลังงาน k_p ที่ได้จาก w = 10 mm ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.00296 และ 0.0110 V^2m เมื่อ ห้องฆ่าเชื้อมีขนาด a = 2.5 mm และ 5.0 mm ตามลำดับ. จากกราฟเราจะเห็นว่า k_p เมื่อห้องฆ่าเชื้อขนาด a = 2.5 mm มีพลังงานไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อเปลี่ยนแปลงความยาวอิเล็กโทรด w ในช่วง 2.5 – 20 mm แต่ห้องฆ่าเชื้อขนาด a = 5.0 mm จะมี k_p เมื่อ w = 2.5 mm จะมีค่าน้อยกว่า เมื่อ w = 10 mm ประมาณ 5 %. แต่เมื่อ w > 10 mm k_p ไม่เปลี่ยนแปลง.



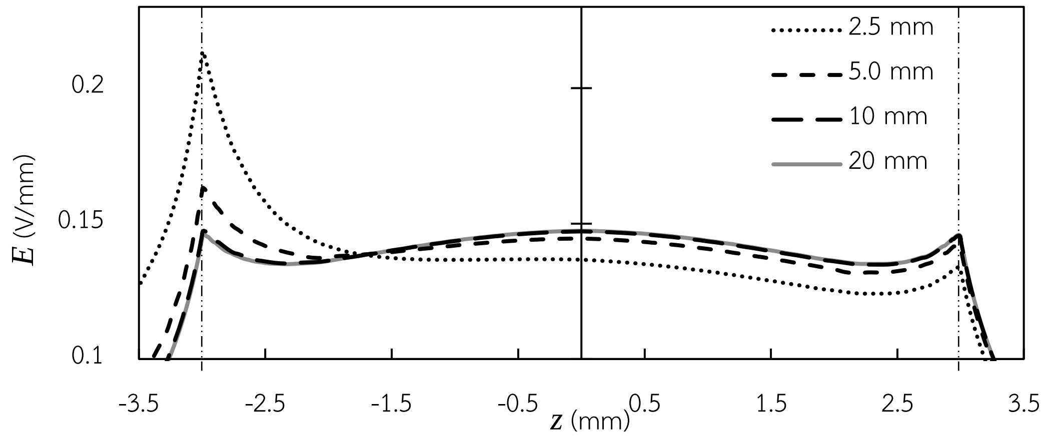
(ก) w = 2.5 mm



(ข) w = 10 mm

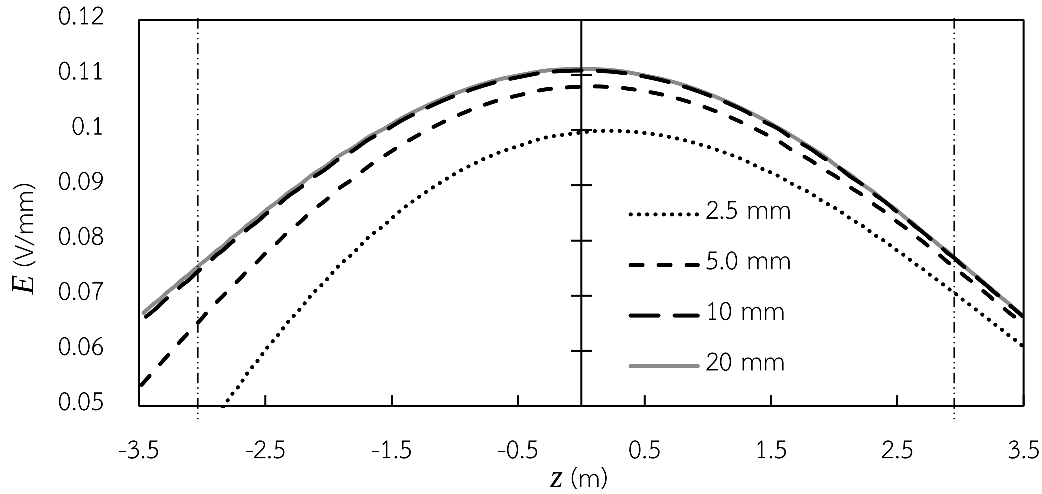


รูปที่ 4.15 การกระจายของสนามไฟฟ้าบริเวณฆ่าเชื้อเมื่อ a = 5.0 mm และ h = 1.3 mm

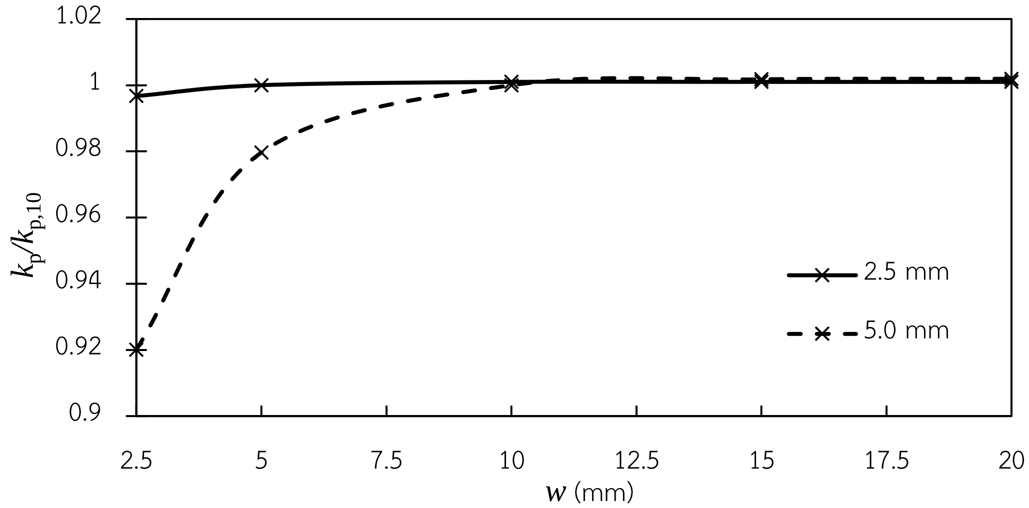


รูปที่ 4.16 การกระจายของสนามไฟฟ้าบนผิวฉนวนเมื่อ a = 5.0 mm, h = 1.3 mm

และ w ตั้งแต่ 2.5 ถึง 20 mm



รูปที่ 4.17 การกระจายของสนามไฟฟ้าบนแนวเส้นสมมาตรเมื่อ a = 5.0 mm, h = 1.3 mm และ w ตั้งแต่ 2.5 ถึง 20 mm



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของ $k_p/k_{p,10}$ และ w เมื่อห้องฆ่าเชื้อขนาด a = 2.5 และ 5.0 mm

จากผลการจำลองในหัวข้อนี้ ผู้วิจัยสรุปได้ว่า หากอิเล็กโทรดมีความยาว w ไม่เพียงพอ สนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อระหว่างอิเล็กโทรดและฉนวนจะมีค่าสูงมาก และสนามไฟฟ้าบนแกนสมมาตรจะลดลง. สำหรับห้องฆ่าเชื้อที่มีรัศมี a = 2.5 และ 5.0 mm ความยาว $w \geq 5$ และ 10 mm (สองเท่าของรัศมี) ตามลำดับ จะมีการเปลี่ยนแปลงการกระจายของสนามไฟฟ้าในบริเวณฆ่าเชื้อน้อยมาก. ดังนั้น สำหรับการจำลองในหัวข้อต่อไปจะเลือกใช้ความยาวอิเล็กโทรดดังกล่าว.

4.3 การไหลในห้องฆ่าเชื้อ

แบบจำลองของห้องฆ่าเชื้อแสดงในรูปที่ 4.1 โดยมีรัศมี a = 5 mm และ ความยาวอิเล็กโทรดแรงสูง w = 10 mm. เงื่อนไขขอบเขตสำหรับการจำลองการไหลคือ

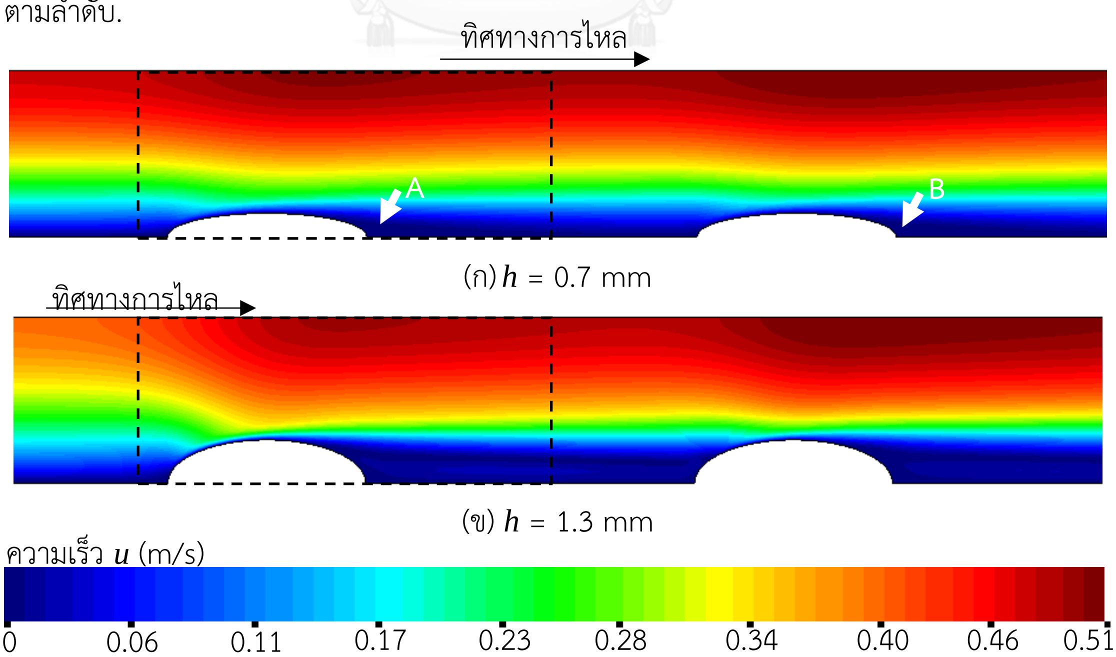
1) ที่ขอบเขตขาเข้า การไหลเป็นแบบราบเรียบในแนวแกน z ,ความเร็วในทิศ r = 0 และมีความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ v_{avg}

2) ที่ขอบเขตขาออก ความความเร็วในแนวแกน r เท่ากับศูนย์

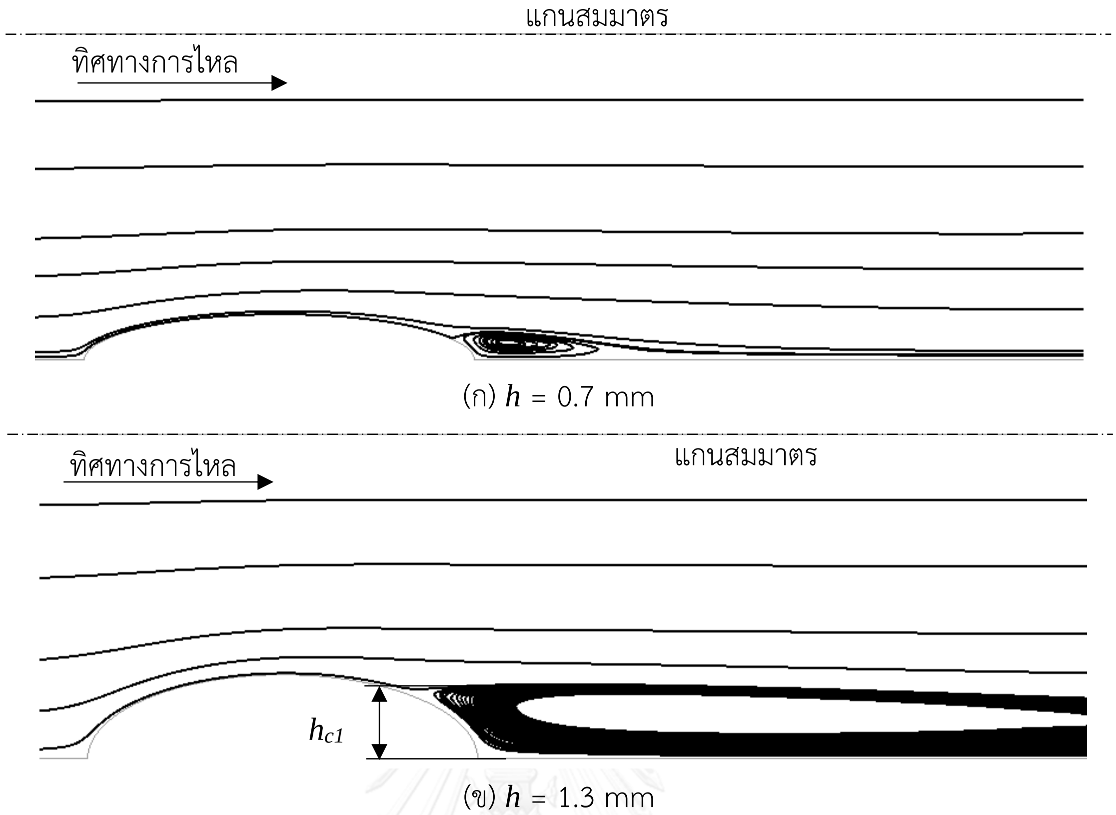
3) ที่ผิวของฉนวน, อิเล็กโทรดแรงสูง และอิเล็กโทรดกราวนด์ ความเร็วเท่ากับศูนย์.

4.3.1 ผลของความสูงฉนวนต่อการไหลวน

กำหนดความสูงของฉนวน h อยู่ในช่วง 0.7 mm ถึง 1.4 mm. กำหนด v_{avg} = 0.2 m/s. ผลการจำลองความเร็วการไหลของของไหลในห้องฆ่าเชื้อแสดงดังรูปที่ 4.19. รูปที่ 4.19 (ก) และ (ข) คือความเร็วของไหลในห้องฆ่าเชื้อเมื่อความสูงฉนวน h = 0.7 mm และ h = 1.3 mm ตามลำดับ. ลักษณะการไหลแบบราบเรียบคือ ความเร็วเป็นศูนย์บนผิวอิเล็กโทรดหรือผิวฉนวน และความเร็วสูงสุดเกิดขึ้นบนแกนสมมาตร. บริเวณที่มีฉนวนแบบวงรี ความเร็วบนแกนสมมาตรจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งความเร็วที่เพิ่มขึ้นจะมีขนาดมากขึ้นตามความสูงของฉนวน. เส้นกระแสของความเร็วในของไหลแสดงดังรูปที่ 4.20 (ก) และ (ข) สำหรับห้องฆ่าเชื้อที่มีความสูงฉนวน h = 0.7 mm และ h = 1.3 mm ตามลำดับ.

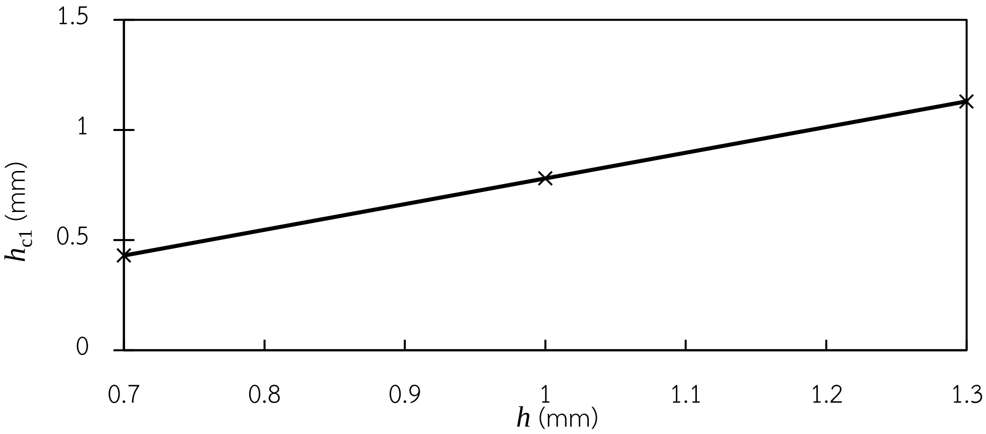


รูปที่ 4.19 การกระจายความเร็วบริเวณโซนฆ่าเชื้อ (m/s) เมื่อความเร็วขาเข้าเฉลี่ยเท่ากับ 0.2 m/s



รูปที่ 4.20 เส้นกระแสของความเร็วบริเวณจุด A เมื่อ v_{avg} = 0.2 m/s

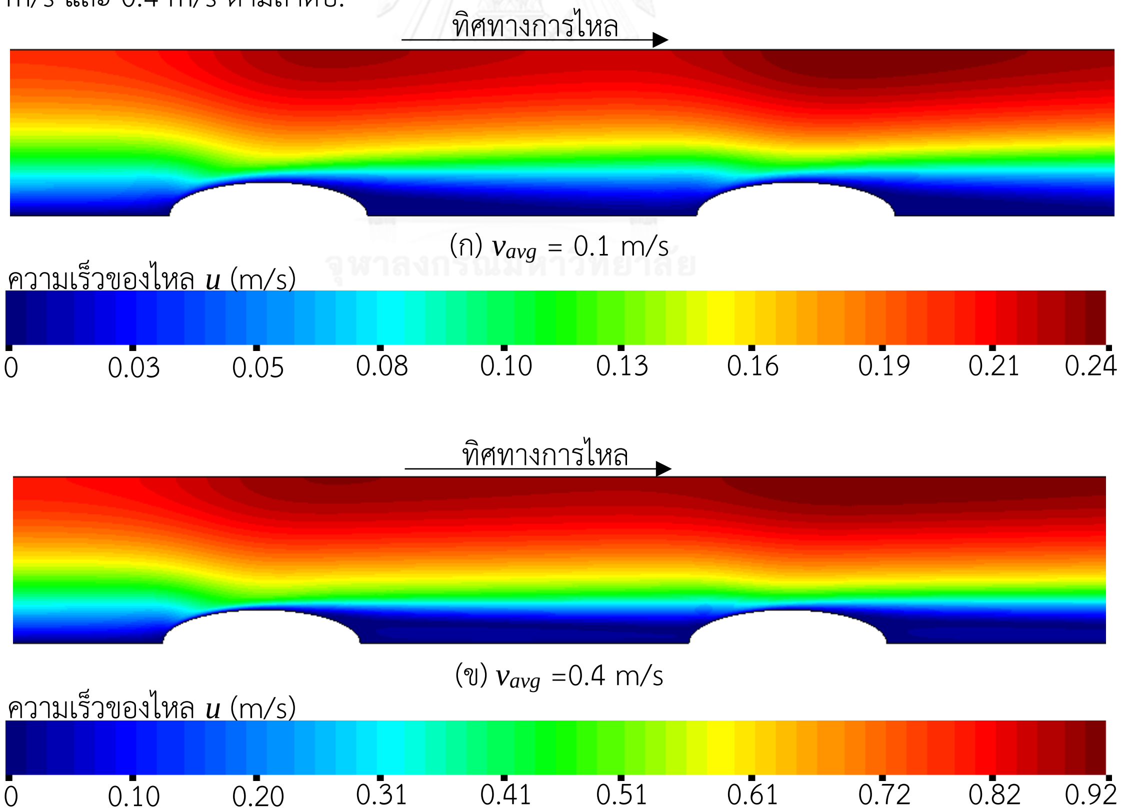
จากรูปที่ 4.20 เราสามารถเห็นได้ว่าเกิดการไหลวนขึ้นใกล้กับรอยต่อของอิเล็กโทรดและฉนวน ซึ่งเป็นจุดที่ผิวอิเล็กโทรดและผิวฉนวนทำมุมกัน 90°. ขนาดการหมุนวนในแบบจำลองเมื่อมีความสูงฉนวน h = 1.3 mm จะมีขนาดใหญ่กว่า แบบจำลองที่มีความสูงฉนวน h = 0.7 mm. จากเส้นกระแสเราสามารถหาขนาดของการหมุนวน h_{c1} ที่บริเวณจุด A ดังรูปที่ 4.20 ซึ่งเป็นระยะตั้งฉากกับอิเล็กโทรด จากรอยต่อของอิเล็กโทรดและฉนวนจนถึงเส้นกระแสเส้นแรกที่ไม่เกิดการหมุนวน. ความสัมพันธ์ระหว่าง h_{c1} และ h แสดงดังรูปที่ 4.21. เราเห็นได้ว่า ขนาดการหมุนวนเพิ่มขึ้นตามความสูงฉนวนเป็นแบบเชิงเส้น. ความสูงของ h_{c2} การไหลวนที่บริเวณจุด B ดังรูปที่ 4.20 มีค่าใกล้เคียงกันมากกับ h_{c1} ในแต่ละกรณี จึงไม่ได้นำมาแสดงด้วย.



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของการหมุนวนและความสูงของฉนวนเมื่อ v_{avg} = 0.2 m/s

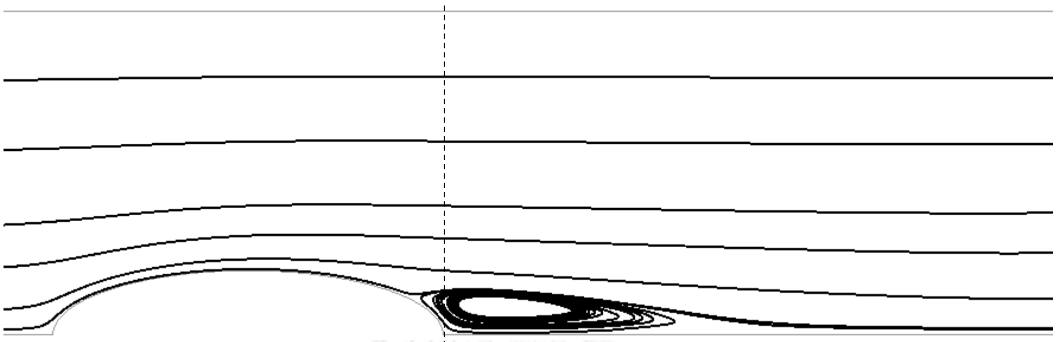
4.3.2 ผลของความเร็วขาเข้าต่อการไหลวน

แบบจำลองความสูงของฉนวน h = 1.0 mm. กำหนด v_{avg} = 0.1, 0.2 และ 0.4 m/s. ผลการกระจายความเร็วการไหลของของไหลในห้องฆ่าเชื้อแสดงดังรูปที่ 4.22 (ก) และ (ข) มี v_{avg} = 0.1 m/s และ 0.4 m/s ตามลำดับ.

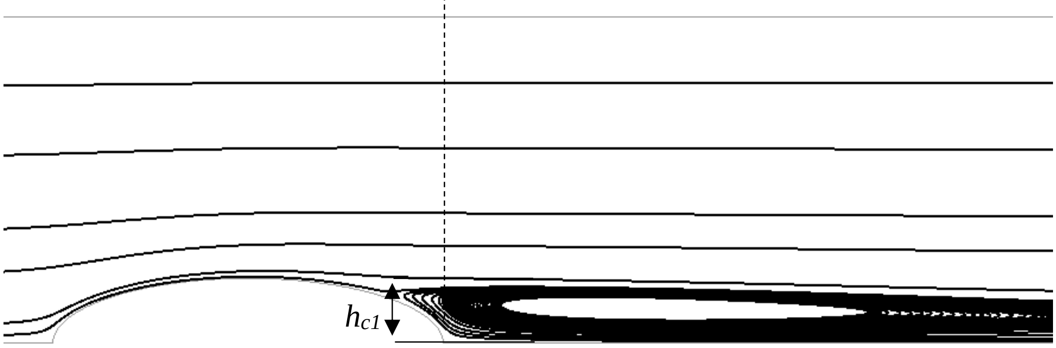


รูปที่ 4.22 การกระจายความเร็วบริเวณโซนฆ่าเชื้อ เมื่อ h = 1.0 mm

จากผลการจำลอง รูปแบบการกระจายของความเร็วมีลักษณะคล้ายคลึง แต่มีขนาดความเร็วที่แตกต่างกัน. เส้นกระแสของความเร็วในของไหลแสดงดังรูปที่ 4.23 (ก) และ (ข) มี v_{avg} = 0.1 m/s และ 0.4 m/s ตามลำดับ. จากกการการสังเกตการหมุนวนที่เกิดขึ้นจะเห็นว่า การไหลวนที่ v_{avg} = 0.4 m/s มีขนาดใหญ่กว่า เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ v_{avg} = 0.1 m/s. รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ของขนาดการไหลวน h_{c1} กับความเร็ว. ขนาดของการไหลวนในรูปที่ 4.24 เพิ่มขึ้นตามความเร็ว โดยที่ h_{c1} ยังคงมีขนาดน้อยกว่าความสูงฉนวน h และเราจะเห็นว่าความสัมพันธ์จะไม่เป็นเชิงเส้น.

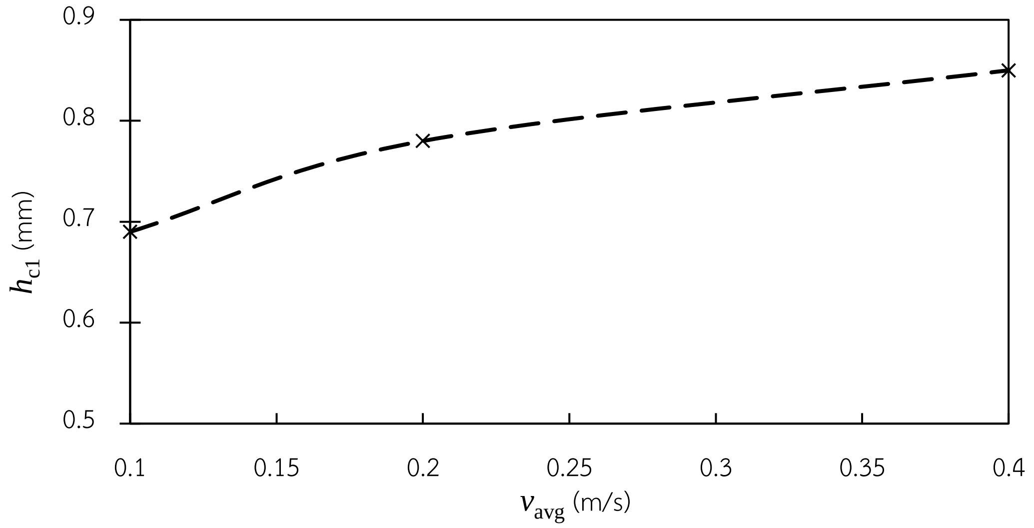


(ก) v_{avg} = 0.1 m/s



(ข) v_{avg} = 0.4 m/s

รูปที่ 4.23 เส้นกระแสของความเร็วบริเวณจุด A เมื่อ h = 1.0 mm



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดหมุนวนและความเร็วขาเข้าเมื่อความสูงฉนวน h = 1.3 mm

4.4 ผลการจำลองปัญหาความร้อนในห้องฆ่าเชื้อ

การจำลองปัญหาความร้อนจะรวมการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าเพื่อคำนวณความร้อนที่เกิดขึ้น วิเคราะห์การไหลเพื่อคิดผลของการพาความร้อนด้วยเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดคือ

- ϕ = 25 kV หรือ 50 kV บนขอบเขตผิวอิเล็กโทรดแรงสูง
- ϕ = 0 V บนขอบเขตผิวอิเล็กโทรดกราวนด์
- สนามไฟฟ้า E_n = 0 V/m ในแนวตั้งฉากกับขอบเขต บนขอบเขตผิวฉนวน, ขาเข้า, ขาออก และแกนสมมาตร
- การไหลเป็นแบบราบเรียบในแนวแกน z มี v_{avg} = 0.1 หรือ 0.2 m/s บนขอบเขตขาเข้า (มวลการไหล $\dot{m}$ เท่ากับ 2.022×10^{-3} kg/s และ 4.045×10^{-3} kg/s)
- u_r = 0 m/s บนขอบเขตขาออก
- $\vec{u}$ = 0 m/s บนขอบเขตผิวอิเล็กโทรดและฉนวน
- อุณหภูมิบนขอบเขตขาเข้า T_i ของของไหล = 20 °C
- ฟลักซ์ความร้อน q_n = 0 W/m^2 บนขอบเขตขาออก และผิวฉนวน

กำหนดให้ความร้อน h_j เกิดจากสนามไฟฟ้าและสภาพนำไฟฟ้าของของไหล โดยมีรอบการทำงาน (duty cycle, D) ของการป้อนสนามไฟฟ้าเท่ากับ 60×10^{-6} ซึ่งหมายถึงระยะเวลาที่ป้อนสนามไฟฟ้าใน 1 วินาที. ทั้งนี้ความกว้างพัลส์ควรจะเพียงพอที่ทำให้สามารถฆ่าเชื้อได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น E.coli ต้องใช้ความกว้างพัลส์มากกว่า 11.1 μS [17] ขึ้นไป.

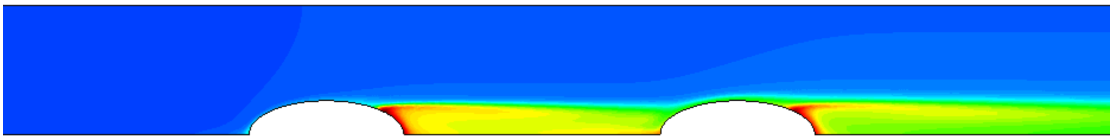
บนผิวอิเล็กโทรด การคำนวนทดลองใช้เงื่อนไขการพาความร้อน 2 แบบคือ

1) การพาความร้อนแบบธรรมชาติ กำหนดให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อน α = 15 W/m^2 °C และ อุณหภูมิตัวกลาง T_∞ = 20 °C

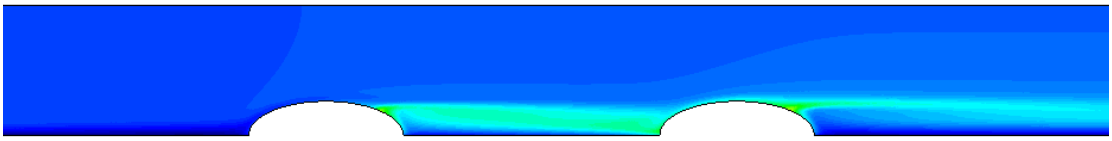
2) การพาความร้อนแบบบังคับ กำหนดให้ α = 2000 W/m^2 °C และ T_∞ = 3 °C.

4.4.1 ผลของการระบายความร้อนแบบธรรมชาติและแบบบังคับ

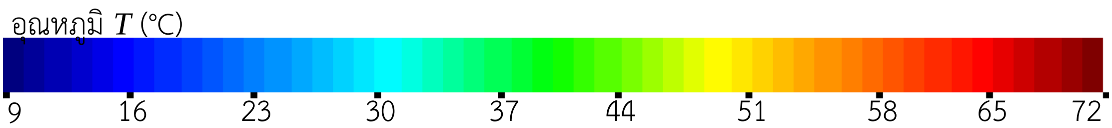
การคำนวณใช้แบบจำลองของห้องฆ่าเชื้อดังรูปที่ 4.1 โดยกำหนด a = 5 mm, w = 10 mm และ h = 1.3 mm ซึ่งเป็นค่าเหมาะสมที่ได้จากการจำลองสนามไฟฟ้าในหัวข้อที่ 4.2. ผลการจำลองการกระจายของอุณหภูมิของไหลในห้องฆ่าเชื้อ แสดงดังรูปที่ 4.25. รูปที่ 4.25 (ก) และ (ข) แสดงอุณหภูมิภายในห้องฆ่าเชื้อเมื่อใช้การระบายความร้อนแบบธรรมชาติ และเมื่อใช้การระบายความร้อนแบบบังคับ ตามลำดับ.



(ก) อิเล็กโทรดการระบายความร้อนแบบธรรมชาติ



(ข) อิเล็กโทรดการระบายความแบบบังคับ



รูปที่ 4.25 อุณหภูมิในห้องฆ่าเชื้อรัศมี 5 mm

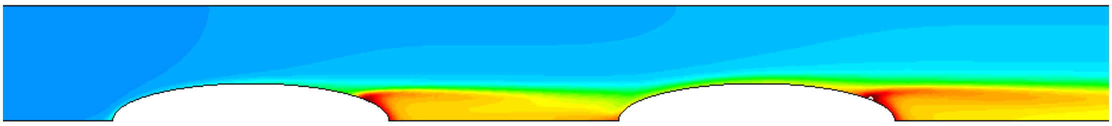
จากรูปที่ 4.25 เราเห็นได้ว่า อุณหภูมิสูงสุดในห้องฆ่าเชื้ออยู่บนครึ่งหลังของผิวฉนวนที่กั้นระหว่างอิเล็กโทรดแรงสูงและอิเล็กโทรดกราวนด์. ถ้าระบายความร้อนเป็นแบบธรรมชาติ อุณหภูมิ

สูงสุด T_{max} คือ 72 °C. ถ้าระบายความร้อนแบบบังคับ T_{max} ลดลงเหลือ 46 °C. เราอาจหาอุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่ขาออก $T_{m,o}$ จากห้องฆ่าเชื้อได้จาก

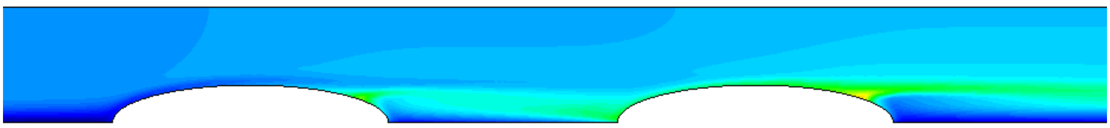
$$T_{m,o} = \frac{2\pi \int T_o r dr}{\pi r_o^2} \tag{4.2}$$

การระบายแบบธรรมชาติ และแบบบังคับ มี $T_{m,o}$ = 23.38 และ 22.50 °C ตามลำดับ. อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่ขาออกแตกต่างจากขาเข้าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อเทียบกับอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้น.

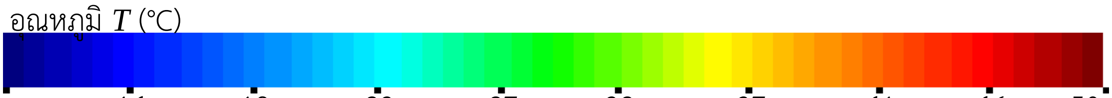
เนื่องจากอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการคำนวณมีค่าสูงถึง 72 °C ผู้วิจัยจึงจำลองลดขนาดรัศมี a ห้องฆ่าเชื้อเป็น 2.5 mm. การจำลองใช้เงื่อนไขขอบเขตเช่นเดียวกับกรณีที่ผ่านมา ยกเว้น w = 5 mm และ h = 0.8 mm ซึ่งได้วิเคราะห์ไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.2 ว่าเป็นมิติที่เหมาะสมทางไฟฟ้า. ผลการจำลองได้แสดงดังรูปที่ 4.26 (ก) และ (ข) แสดงอุณหภูมิของของไหลเมื่อระบายความร้อนแบบธรรมชาติ และ เมื่อระบายความร้อนแบบบังคับ ตามลำดับ. ผลการจำลองแสดงว่าอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นในแบบจำลองที่ระบายความร้อนแบบธรรมชาติลดลงเป็น 50 °C และ เมื่อใช้การระบายความร้อนแบบบังคับ T_{max} จะลดลงเหลือ 37 °C ดังนั้น การลดขนาดรัศมีของห้องฆ่าเชื้อจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถใช้ลดอุณหภูมิของของไหลที่เกิดจากกำลังสูญเสียจูลได้.



(ก) อิเล็กโทรดระบายความร้อนแบบธรรมชาติ



(ข) อิเล็กโทรดระบายความร้อนแบบบังคับ



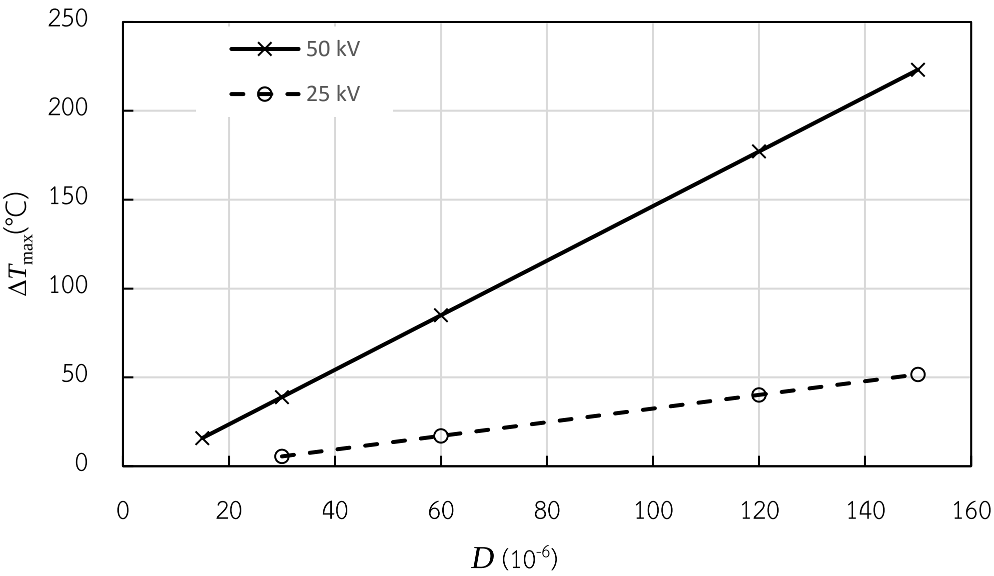
รูปที่ 4.26 อุณหภูมิในห้องฆ่าเชื้อรัศมี 2.5 mm

4.4.2 ผลของแรงดันไฟฟ้า

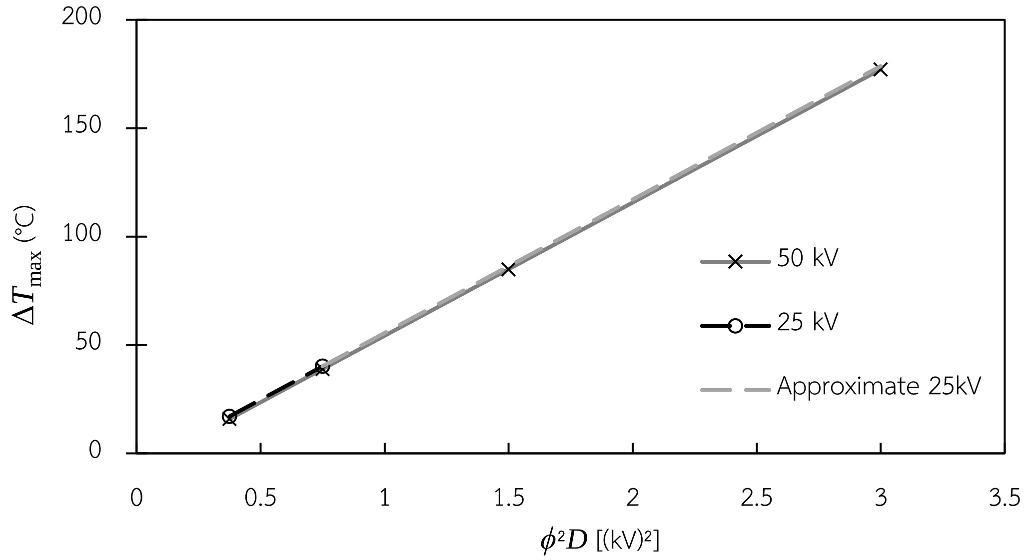
พิจารณาอุณหภูมิในห้องฆ่าเชื้อที่มี a = 2.5 mm โดยมีการระบายความร้อนแบบบังคับ. หัวข้อนี้ตรวจสอบผลของแรงดัน ϕ ที่อิเล็กโทรดแรงสูง และรอบการทำงาน ที่มีต่ออุณหภูมิในห้องฆ่า

เชื้อ. แบบจำลองของห้องฆ่าเชื้อขนาด a = 2.5 mm เป็นไปตามหัวข้อที่ 4.4.1 โดยใช้ ϕ = 25 kV หรือ 50 kV และ D อยู่ในช่วง 15×10^{-6} ถึง 150 ×10^{-6}.

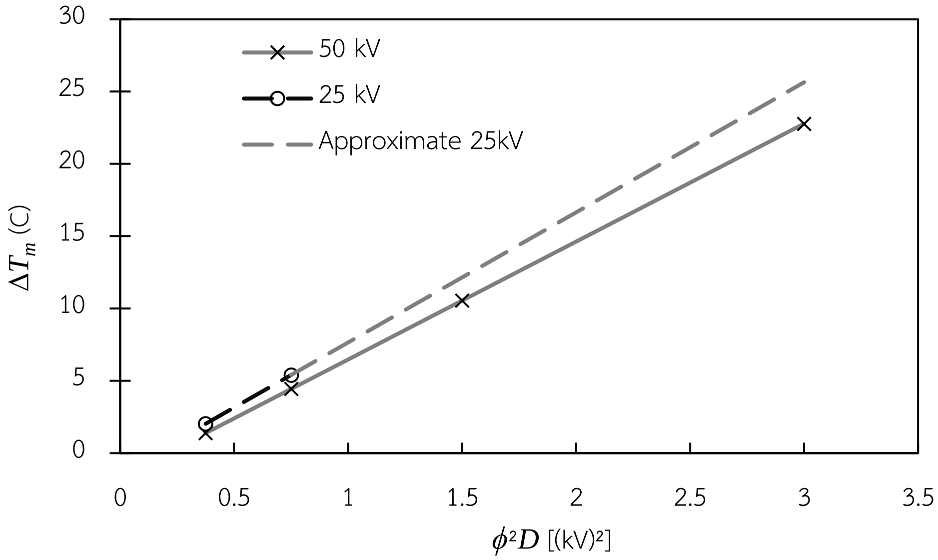
ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เพิ่มสูงสุด ($\Delta T_{\max} = T_{max} - T_i$) ในห้องฆ่าเชื้อ และ D แสดงในรูปที่ 4.27 โดยที่เส้นประและเส้นทึบแสดงค่าเมื่อ ϕ = 25 kV และ 50 kV ตามลำดับ. ข้อสังเกตที่เห็นได้ชัดจาก รูปที่ 4.27 คือ $\Delta T_{\max}$ มีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของแรงดัน และเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตามรอบการทำงานที่แต่ละค่าแรงดัน เนื่องจากพลังงานที่ป้อนให้กับของไหลในห้องฆ่าเชื้อมีค่าแปรผันตาม ϕ^2 และ D เราอาจพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกับ $\phi^2 D$. รูปที่ 4.28 และรูปที่ 4.29 แสดง $\Delta T_{\max}$ และ $\Delta T_{\mathrm{m}} (T_{m,o} - T_i)$ เป็นฟังก์ชันของ $\phi^2 D$. จากรูปที่ 4.28 เราจะเห็นว่า การใช้ศักย์ไฟฟ้า 25 และ 50 kV อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นในห้องฆ่าเชื้อมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อ $\phi^2 D$ เท่ากัน. นอกจากนี้ เราสามารถประมาณอุณหภูมิสูงสุดที่จะของการใช้ศักย์ไฟฟ้า 25 kV จากความความชันของกราฟ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประเมิณอุณหภูมิสูงสุดที่จะเกิดขึ้นเมื่อใช้ $\phi^2 D$ อื่นๆได้.



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta T_{\max}$ และ D ที่แรงดัน ϕ = 25 kV และ 50 kV



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ของ $\Delta T_{\max}$ และ $\phi 2D$



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ของ ΔT_{m} และ $\phi 2D$

4.4.3 ผลของความเร็วของไหล

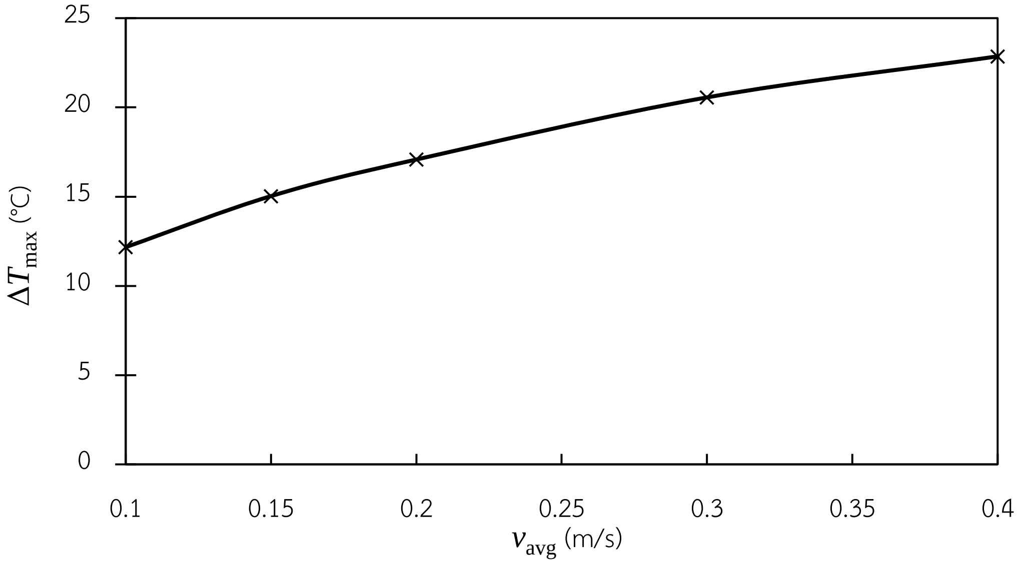
จากหัวข้อที่ 4.4.2 แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิเพิ่มขึ้นของของไหลมีค่ามากขึ้น เมื่อรอบการทำงานเพิ่มขึ้นสูงขึ้น. ในทางปฏิบัติ ประสิทธิภาพของการฆ่าเชื้อขึ้นอยู่พลังงานที่ของไหลได้รับจากสนามไฟฟ้า นั่นคือประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับรอบการทำงานและความเร็วของของไหล. หัวข้อนี้จะ

พิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อของไหลได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าเท่ากัน โดยการรักษาผลคูณของความเร็วเฉลี่ย v_{avg} กับรอบการทำงาน D คงที่. การจำลองแปรค่าให้ v_{avg} = 0.1, 0.2 และ 0.4 m/s (D = 30×10^{-6}, 60×10^{-6} และ 120×10^{-6} ตามลำดับ). สำหรับพลังงานที่ของไหลได้รับต่อหนึ่งหน่วยมวล W_m (J/kg) สามารถหาค่าได้จาก

$$W_m = \frac{\phi^2 D \sigma k_p}{\dot{m}} \tag{4.3}$$

ซึ่งพลังงานที่ของไหลได้ในรับหัวข้อนี้คือ 13.7 kJ/kg. เราสามารถประมาณการพลังงานที่ป้อนให้กับของเหลวได้ และสามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางด้านพลังงานในการฆ่าเชลล์ได้.

รูปที่ 4.30 แสดงอุณหภูมิเพิ่มสูงสุด $\Delta T_{\max}$ เมื่อปรับความเร็วการไหล โดยรักษาให้ v_{avg}/D คงที่. จากรูปเราเห็นได้ว่า การลดความเร็วลงทำให้สามารถลด $\Delta T_{\max}$ ลงจาก 17 °C เป็น 12 °C ได้. อย่างไรก็ตาม การลดความเร็วทำให้ความเร็วในการจัดการฆ่าเชื้อลดลงตามด้วย. ทั้งนี้ ผู้วิจัยพบปัญหาการลู่เข้าคำตอบในการวิเคราะห์การไหลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จึงจำกัดความเร็วต่ำที่สุดของของไหล ไว้ที่ 0.1 m/s สำหรับห้องฆ่าเชื้อขนาด a = 2.5 mm.



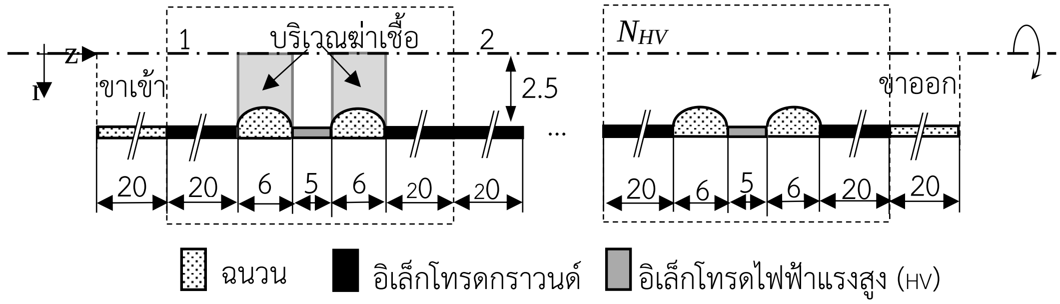
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสูงสุด และความเร็วขาเข้า

บทที่ 5
ห้องฆ่าเชื้อแบบสนามไฟฟ้าในทิศทางการไหลแบบอนุกรมอิเล็กโทรด

จากบทที่ 4 เราทราบถึงอุณหภูมิที่เกิดจากสนามไฟฟ้า, รอบการทำงาน และสภาพนำของของไหล. อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นบนบริเวณผิวฉนวนเป็นจุดด้อยของห้องฆ่าเชื้อแบบสนามไฟฟ้าในทิศทางการไหล. การใช้ PEF สำหรับฆ่าเชื้ออาจต้องเพิ่มสนามไฟฟ้าหรือรอบการทำงาน จึงทำให้อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นในห้องฆ่าเชื้อมีค่าสูงขึ้น. การควบคุมอุณหภูมิสูงสุดไม่ให้สูงจนเกินไปจึงเป็นสิ่งจำเป็น. ในบทนี้ เรานำเสนอการอนุกรมห้องฆ่าเชื้อแบบสนามไฟฟ้าในทิศทางการไหล. การเพิ่มจำนวนบริเวณฆ่าเชื้อทำให้เวลาที่ของไหลใช้ผ่านบริเวณฆ่าเชื้อจะเพิ่มมากขึ้น รวมถึงพื้นที่สำหรับระบายความร้อนออกจากระบบก็เพิ่มขึ้นด้วย. เราสามารถลดค่า D ที่ป้อนให้กับของไหลลงได้ในกรณีที่ป้อนพลังงานให้กับของไหลคงเดิม ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นในห้องฆ่าเชื้อมีค่าลดลง.

5.1 แบบจำลองและเงื่อนไขขอบเขต

แบบจำลองห้องฆ่าเชื้อแสดงดังรูปที่ 5.1. แบบจำลองมีรัศมี 2.5 mm ประกอบด้วย ฉนวนบริเวณขาเข้า, ขาออกยาว 20 mm และ บริเวณฆ่าเชื้อที่ได้จากชุดอิเล็กโทรดจำนวน N_{HV} ชุดต่ออนุกรมกัน. แต่ละชุดอิเล็กโทรดแสดงในกรอบเส้นประในรูปที่ 5.1 โดยประกอบด้วย อิเล็กโทรดแรงสูงยาว 5 mm และ อิเล็กโทรดกราวดน์ยาว 20 mm จำนวน 2 ชุด ซึ่งคั่นด้วยฉนวนแบบครึ่งวงรียาว 6 mm สูง 0.8 mm. มิติของห้องฆ่าเชื้อดังกล่าวได้จากผลการจำลองของสนามไฟฟ้าในบทที่ 4. ผู้วิจัยพิจารณาจำนวนอิเล็กโทรดแรงสูง N_{HV} = 1, 2, 3, 6 และ 9 ชุด.



รูปที่ 5.1 ห้องฆ่าเชื้อแบบสนามไฟฟ้าทิศในทางการไหลแบบอนุกรม (หน่วยเป็น mm)

เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในห้องฆ่าเชื้อมีดังนี้

- ϕ = 25 kV บนขอบเขตผิวอิเล็กโทรดแรงสูง

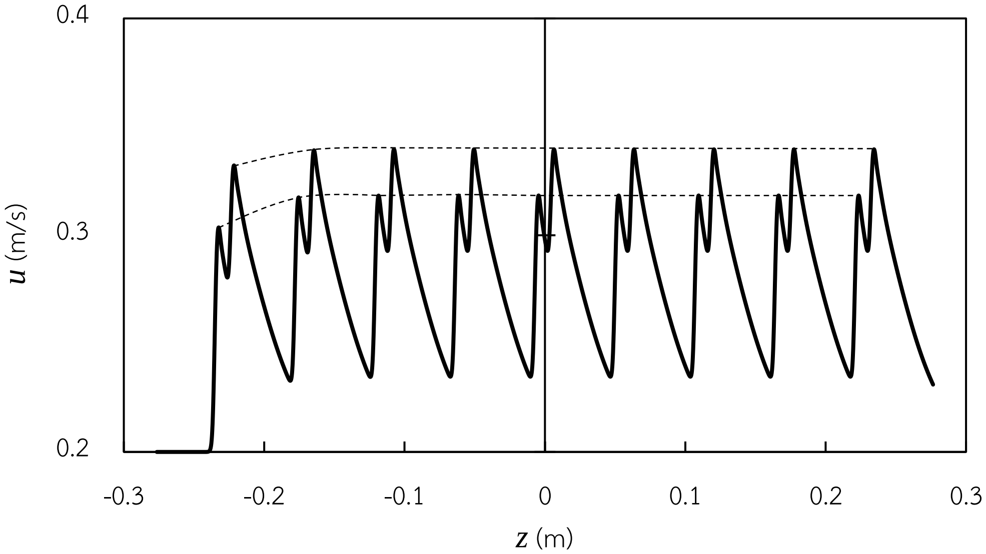
- ϕ = 0 V บนขอบเขตผิวอิเล็กโทรดกราวนด์
- สนามไฟฟ้า E_n = 0 V/m ในแนวตั้งฉากกับขอบเขต บนขอบเขตผิวฉนวน, ขาเข้า, ขาออก และแกนสมมาตร
- การไหลเป็นแบบราบเรียบในแนวแกน z มี v_{avg} = 0.1 m/s บนขอบเขตขาเข้า (ปริมาตรการไหลเท่ากับ 0.0162 m^3/s)
- u_r = 0 m/s บนขอบเขตขาออก
- u = 0 m/s บนขอบเขตผิวอิเล็กโทรดและฉนวน
- อุณหภูมิ T_i บนขอบเขตขาเข้า ของของไหล = 20 ℃
- ฟลักซ์ความร้อน q_n = 0 W/m^2 บนขอบเขตขาออก และผิวฉนวน
- ฟลักซ์ความร้อน $q_n = \alpha(T-T_\infty)$ W/m^2 บนขอบอิเล็กโทรดแรงสูงและกราวนด์

พลังงานที่ของไหลได้รับ W_m เกิดจากสนามไฟฟ้า, สภาพนำไฟฟ้าของของไหล และ D. การปรับ D เพื่อให้ W_m ของห้องฆ่าเชื้อที่มีจำนวน N_{HV} ต่างกันได้รับพลังงานเท่ากัน. กำหนดให้ DN_{HV} ในการจำลองเท่ากับ 300×10^{-6}, 150×10^{-6} และ 60×10^{-6} ซึ่ง W_m เท่ากับ 137.2 kJ/kg, 68.6 kJ/kg และ 27.44 kJ/kg ตามลำดับ. คุณสมบัติของของไหลกำหนดให้เป็นนมที่อุณหภูมิ 20 ℃ เหมือนบทที่ 4 ซึ่งคุณสมบัติแสดงดังตารางที่ 1.

5.2 ผลการจำลอง

การกระจายของสนามไฟฟ้าในบริเวณฆ่าเชื้อของแบบจำลองที่มี N_{HV} ต่างๆ ขึ้นอยู่กับลักษณะของฉนวนรูปวงรี และ ความยาวของอิเล็กโทรด. เนื่องจากมิติบริเวณฆ่าเชื้อเหมือนกันจึงทำให้มีลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าเหมือนกันกับผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าในหัวข้อที่ 4.2.2. การกระจายความเร็วของของไหลบนแกนสมมาตรสำหรับ N_{HV} = 9 แสดงดังรูปที่ 5.2 ซึ่งมีความเร็วขาเข้าเท่ากับ 0.2 m/s จากนั้นความเร็วจะเพิ่มขึ้นเมื่อเข้าสู่บริเวณฆ่าเชื้อ. เส้นประแสดงความเร็วสูงสุดเมื่อของไหลผ่านบริเวณฆ่าเชื้อ ซึ่งความเร็วสูงสุดเมื่อของไหลผ่านบริเวณฆ่าเชื้อที่ 1 มีความเร็วสูงสุด 0.3 m/s และเมื่อของไหลผ่านบริเวณฆ่าเชื้อที่ 2 มีความเร็วสูงสุดเท่ากับ 0.33 m/s จากนั้นความเร็วสูงสุดจะมีความเร็วสูงต่ำสลับกัน. เนื่องจากระยะห่างระหว่างบริเวณฆ่าเชื้อที่ 1 และบริเวณฆ่าเชื้อที่ 2 ห่างกัน 5 mm แต่ระยะห่างระหว่างบริเวณฆ่าเชื้อที่ 2 และบริเวณฆ่าเชื้อที่ 3 หา

กัน 40 mm จึงทำให้ของเหลวคือตัวเป็นแบบราบเรียบได้ไม่เท่ากัน จึงส่งผลให้มีความเร็วบริเวณแกนกลางต่างกัน. ความเร็วสูงสุดที่เพิ่มขึ้นทำให้ของเหลวมีเวลารับพลังงานจากสนามไฟฟ้าน้อยลง.

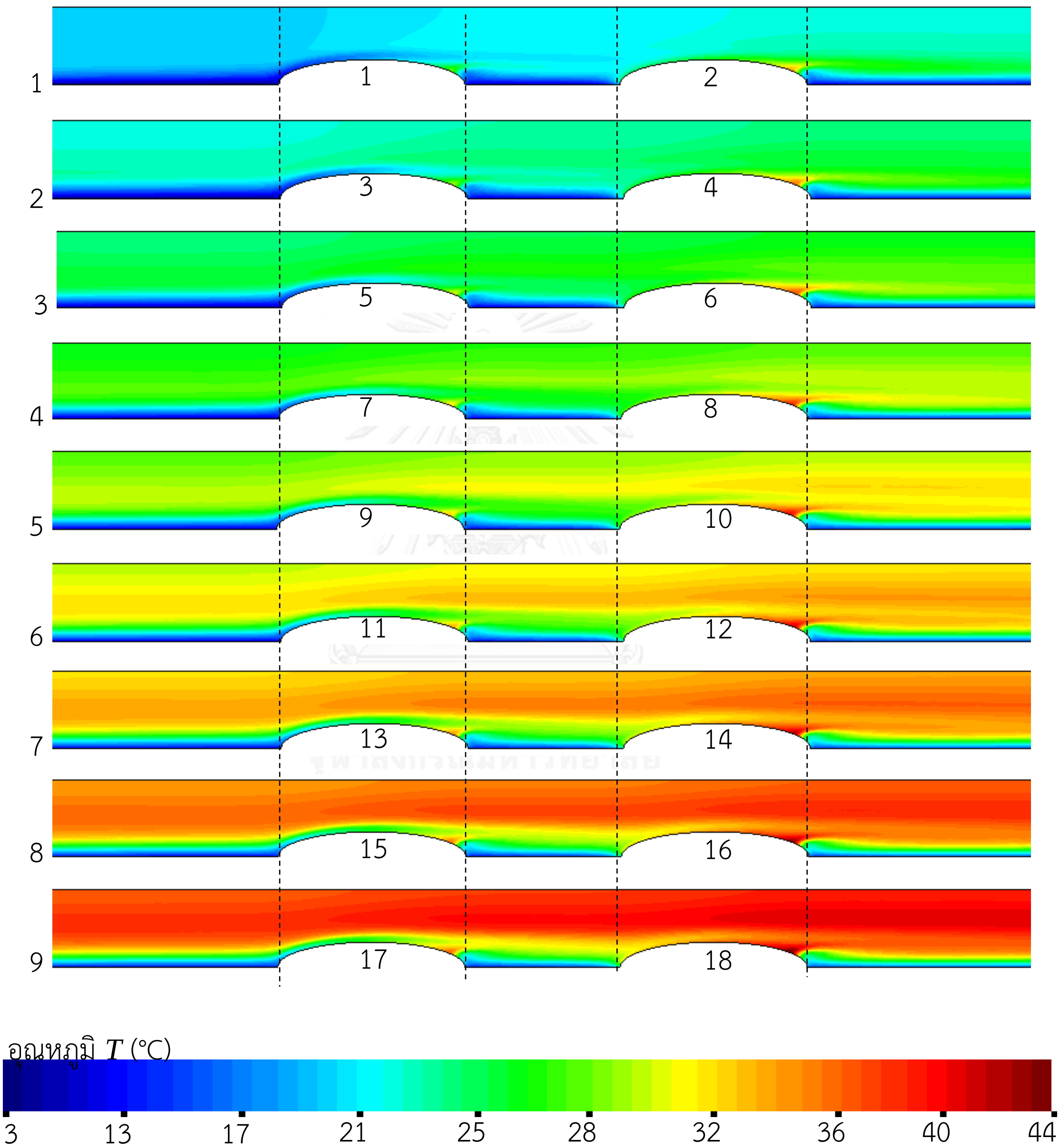


รูปที่ 5.2 ความเร็วบนแกนสมมาตรของห้องฆ่าเชื้อแบบอนุกรม เมื่อ N_{HV} = 9

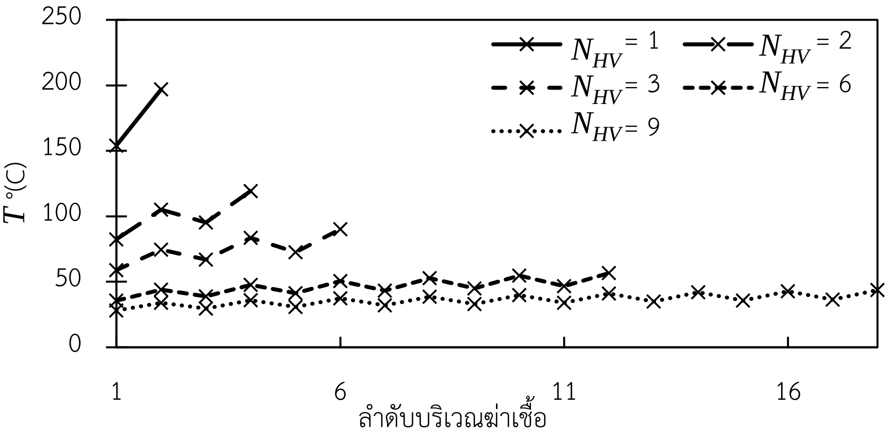
ผลการจำลองอุณหภูมิของแบบจำลองเมื่อ N_{HV} = 9 และ DN_{HV} = 300×10^{-6} แสดงดังรูปที่ 5.3 โดยที่ตัวเลขกำกับทางด้านซ้ายมือแสดงลำดับที่ของอิเล็กโทรดแรงสูง และตัวเลขกำกับบริเวณฉนวนวงรีคือลำดับบริเวณฆ่าเชื้อ. อุณหภูมิสะสมในแต่ละบริเวณฆ่าเชื้ออยู่บนด้านหลังของผิวฉนวนเหมือนกับผลที่ได้ในบทที่ 4. อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นอยู่ที่บริเวณฆ่าเชื้อสุดท้าย ซึ่งอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 44 °C. ของไหลไหลจากบริเวณฆ่าเชื้อที่ 1 ไปยังบริเวณฆ่าเชื้อที่ 2 มีระยะการระบายความร้อนจากอิเล็กโทรดแรงสูงเพียง 5 mm จึงทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น แต่การไหลจากบริเวณฆ่าเชื้อที่ 2 ไปยังบริเวณฆ่าเชื้อที่ 3 มีระยะการระบายความร้อนจากอิเล็กโทรดกราวดน์รวม 40 mm จึงทำให้อุณหภูมิลดลง. กราฟแสดงอุณหภูมิสูงสุดในแต่ละบริเวณฆ่าเชื้อเมื่อใช้ DN_{HV} = 300×10^{-6}, 150×10^{-6} และ 60×10^{-6} แสดงดังรูปที่ 5.4 โดยที่ (ก) (ข) และ (ค) ตามลำดับ. อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดในบริเวณฆ่าเชื้อเพิ่มขึ้นสลับลดลง เนื่องจากระยะการระบายความร้อนของอิเล็กโทรดกราวดน์มากกว่าอิเล็กโทรดแรงสูง. นอกจากนี้ อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นในแต่ละแบบจำลองจะอยู่ที่บริเวณฆ่าเชื้อสุดท้าย ยกเว้น DN_{HV} = 60×10^{-6} กรณี N_{HV} = 6 และ 9 ซึ่งอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ บริเวณฆ่าเชื้อที่ 2. เนื่องจากการระบายความร้อนมากกว่าพลังงานจากสนามไฟฟ้า.

ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงสูงสุดกับ N_{HV} แสดงดังรูปที่ 5.5. การเพิ่มจำนวนอิเล็กโทรดจาก N_{HV} = 1 เป็น 2 เมื่อ DN_{HV} เท่ากับ 300×10^{-6}, 150×10^{-6} และ 60×10^{-6} ทำให้อุณหภูมิลดลง 40%, 37%และ 33% ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มจำนวนอิเล็กโทรด N_{HV} = 6 เป็น 9 ทำให้

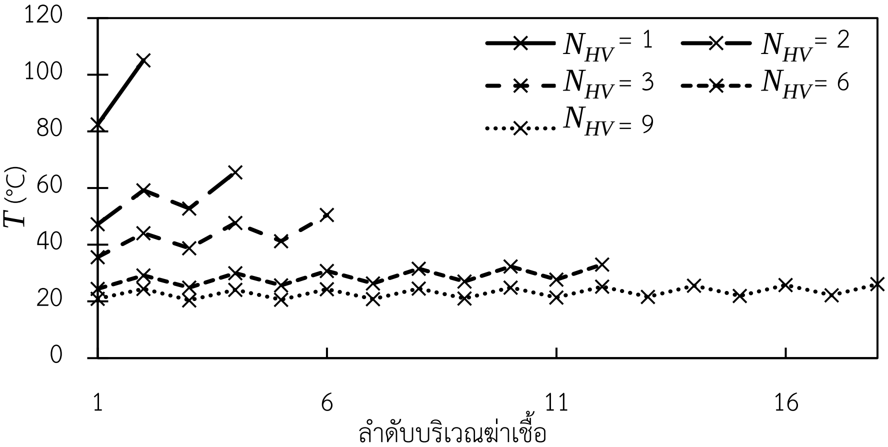
อุณหภูมิลดลง 22%, 21%และ 17% เท่านั้น. จากผลข้างต้นเราทราบว่า การเพิ่มจำนวนอิเล็กโทรด จาก 1 เป็น 2 สามารถทำให้ลดอุณหภูมิสูงสุดเป็นผลอย่างมาก แต่เมื่อเพิ่มจำนวนอิเล็กโทรดมากขึ้น การเพิ่มจำนวนอิเล็กโทรดจะส่งผลต่ออุณหภูมิสูงสุดลดลง.



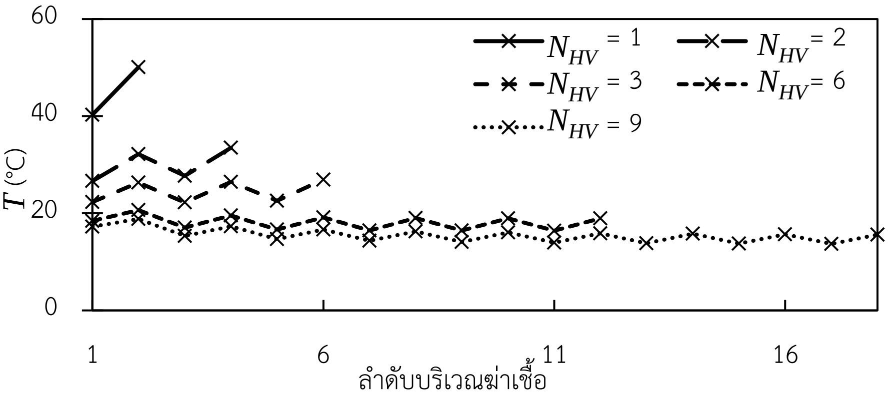
รูปที่ 5.3 การกระจายของอุณหภูมิเมื่อ เมื่อ N_{HV} = 9, DN_{HV} = 300×10^{-6}



(ก) DN_{HV} = 300×10^{-6}

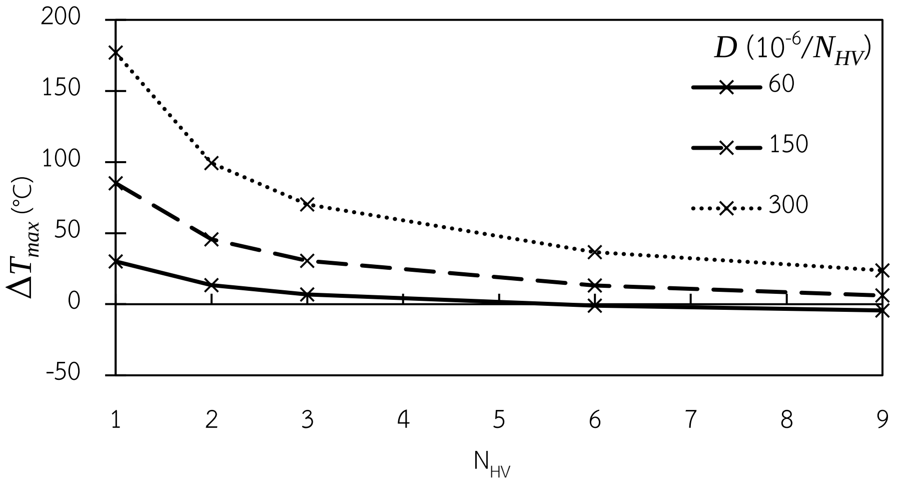


(ข) DN_{HV} =150×10^{-6}



(ค) DN_{HV} =60×10^{-6}

รูปที่ 5.4 อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นแต่ละบริเวณฆ่าเชื้อภายในห้องฆ่าเชื้อ



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสูงสุดและ N_{HV} เมื่อใช้ D ต่างกัน

5.3 การประมาณผลการฆ่าเชื้อ

เราอาจสามารถประมาณอัตราการอยู่รอด S ของเซลล์ (จุลชีพ) [18] จากการฆ่าเชื้อในของเหลวด้วยความสัมพันธ์

$$S = \frac{t}{t_c}^{-\frac{(E-E_c)}{k}} \tag{5.1}$$

t คือ ระยะเวลาที่เซลล์ได้รับสนามไฟฟ้า (จำนวนพัลส์×ความยาวคลื่น)

E คือ สนามไฟฟ้าที่ป้อนให้เซลล์

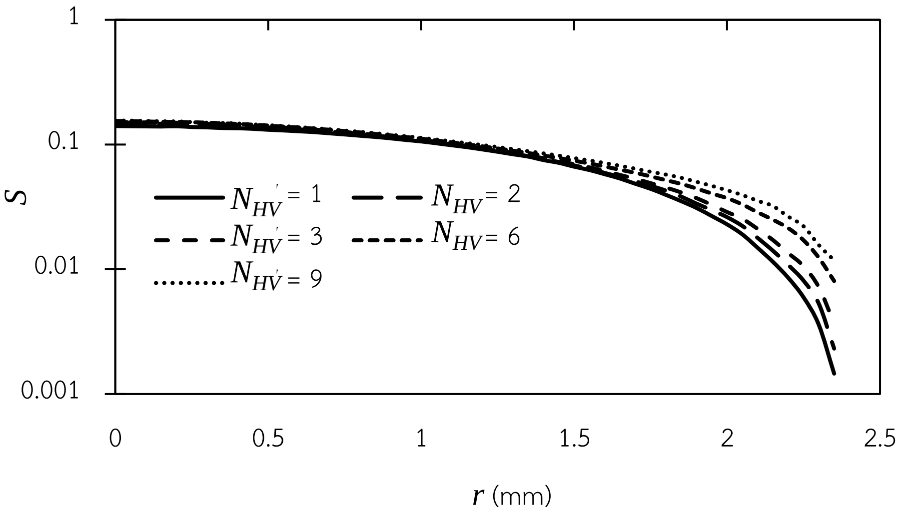
t_c คือ ระยะเวลาวิกฤติของเซลล์ (ขึ้นอยู่กับชนิดของเซลล์)

E_c คือ สนามไฟฟ้าวิกฤติเซลล์ (ขึ้นอยู่กับชนิดของเซลล์)

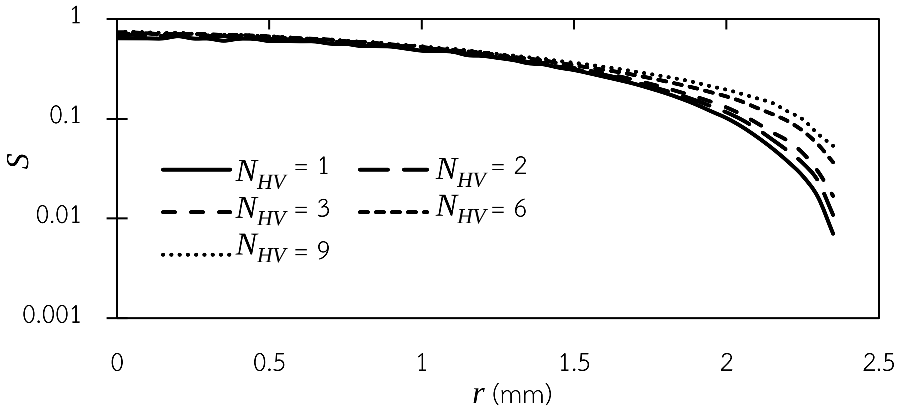
k คือ ตัวประกอบเพิ่มเติม (Additional factor) ขึ้นอยู่กับชนิดของเซลล์

S = 1 หมายถึงเซลล์อยู่รอดทั้งหมด หาก S = 0 จะหมายถึง ไม่มีเซลล์อยู่รอด.

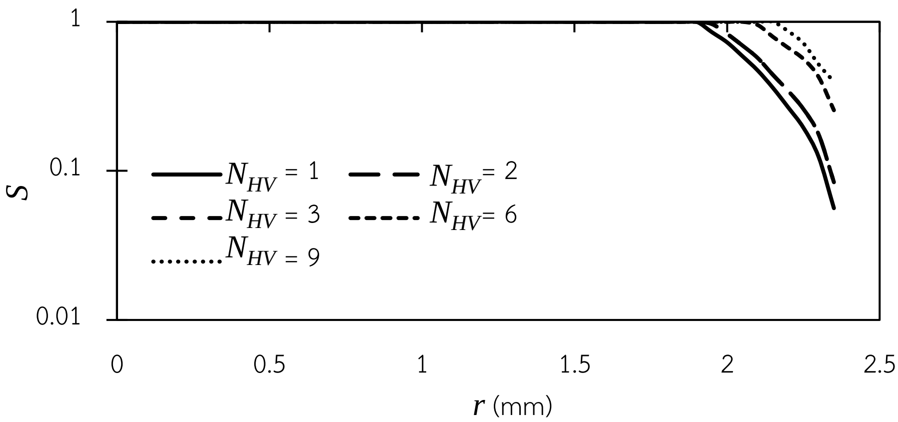
เราสามารถคำนวณหาค่า t จากเส้นกระแสซึ่งเป็นผลที่ได้จากความเร็วของไหล โดยแบ่งเส้นกระแสเป็นช่วง แต่ละช่วงใช้เวลาเท่ากัน ซึ่งเราจะทราบพิกัดแต่ละช่วงบนเส้นกระแส. นำข้อมูลของสนามไฟฟ้าบนพิกัดแต่ละช่วง และระยะเวลาที่ของไหลเคลื่อนในแต่ละช่วงบนเส้นกระแส แล้วแทนลงไปในสมการที่ (5.1) จะสามารถประมาณอัตราการอยู่รอดบนเส้นกระแสแต่ละเส้นได้. ให้แบบจำลองในหัวข้อ 5.1 เป้าหมายของการฆ่าเชื้อเป็น E.coli มี t_c = 11×10^{-6} s, E_c = 0.7 kV/cm, k = 6.3 [17]. รูปที่ 5.6 (ก), (ข) และ (ค) แสดงความอยู่รอดของเซลล์ที่ขาออกของห้องฆ่าเชื้อเมื่อ DN_{HV} =



(ก) DN_{HV} = 300×10^{-6}



(ข) DN_{HV} =150×10^{-6}



(ค) DN_{HV} =60×10^{-6}

รูปที่ 5.6 อัตราความอยู่รอดของเซลล์ตามแนวแกน r ที่ขาออกของห้องฆ่าเชื้อ

300×10^{-6}, 150×10^{-6} และ 60×10^{-6} ตามลำดับ. ผลของความสัมพันธ์ของความอยู่รอดของเซลล์กับค่า r ตั้งแต่ 0 ถึง 2.3 mm เท่านั้น เนื่องจากความเร็วของของไหลเมื่อบริเวณผิวห้องฆ่าเชื้อ มีค่า 0 m/s จึงไม่สามารถคำนวณหาเส้นกระแสได้. อย่างไรก็ตาม บริเวณที่ของไหลไม่มีความเร็วค่าความอยู่รอดของเซลล์จะมีค่าเท่ากับ 0 เนื่องจากเวลา t มีค่าลู่เข้า ∞. รูปที่ 5.6 (ก) S บริเวณแกนสมมาตร (r = 0 mm) ห้องฆ่าเชื้อมีค่าประมาณ 0.15 และลดลงเมื่อ r เพิ่มขึ้น. จากกราฟเราสามารถเปรียบเทียบอัตราการฆ่าเชื้อเมื่อมีการอนุกรมห้องฆ่าเชื้อได้ แสดงให้เห็นว่า การอนุกรมห้องฆ่าเชื้อทำให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อต่อพลังงานที่ป้อนให้ของไหลลดลง. จากการจำลองการไหลของของไหล ความเร็วของของไหลเมื่ออนุกรมห้องฆ่าเชื้อจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้ระยะเวลาที่ของไหลได้รับพลังงานลดลง. สำหรับ S ของห้องฆ่าเชื้อเมื่อ DN_{HV} = 150×10^{-6} ในรูปที่ 5.6 (ข) เราจะเห็นว่ามีแนวโน้มเหมือนกับรูปที่ 5.6 (ก) แต่อัตราความอยู่รอดของเซลล์มีค่ามากกว่าเนื่องจากพลังงานจากสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้ของไหลมีค่าน้อย. สำหรับรูปที่ 5.6 (ค) อัตราความอยู่รอดของเซลล์ตั้งแต่ r = 0 ถึง 1.95 mm มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งหมายถึงไม่สามารถใช้ฆ่าเซลล์ได้ เนื่องจากพลังงานที่จ่ายให้ของไหลมีค่าไม่พอสำหรับทำลายเซลล์.

บทที่ 6
สรุปผล

วิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ สนามไฟฟ้า, ความเร็วการไหล และ อุณหภูมิ ในห้องฆ่าเชื้อแบบสนามไฟฟ้าในทิศทางการไหล โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. เนื่องจากโครงสร้างในห้องฆ่าเชื้อมีส่วนที่เป็นจุดต่อระหว่าง ฉนวน, อิเล็กโทรด และ ของไหล จึงทำให้สนามไฟฟ้ามีความไม่สม่ำเสมอสูง. การลดความไม่สม่ำเสมอให้น้อยลง ผู้วิจัยใช้ฉนวนแบบครึ่งวงรี เพราะมีรูปแบบไม่ซับซ้อนและเป็นมาตรฐาน. ผู้วิจัยแปรผันความยาวของอิเล็กโทรดแรงสูงและความสูงของฉนวนเพื่อให้ได้มิติที่ส่งผลให้สนามไฟฟ้ามีความสม่ำเสมอมากที่สุด.

ผลการจำลองสนามไฟฟ้าในห้องฆ่าเชื้อ ความยาวของอิเล็กโทรดแรงสูงควรยาวกว่าสองเท่าของรัศมี. การใช้อิเล็กโทรดแรงสูงสั้นเกินไป ทำให้สนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อระหว่าง อิเล็กโทรดและฉนวนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น รวมถึงทำให้สนามไฟฟ้าบริเวณแกนสมมาตรของห้องฆ่าเชื้อลดลง. อัตราส่วนความสูงของฉนวนต่อรัศมีของห้องฆ่าเชื้อที่ทำให้สนามไฟฟ้าเกิดความสม่ำเสมอมากที่สุด ของห้องฆ่าเชื้อรัศมี 1.2, 2.5 และ 5 mm คือ 0.38, 0.32 และ 0.26 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่า อัตราส่วนดังกล่าวมีแนวโน้มลดลงเมื่อรัศมีของห้องฆ่าเชื้อใหญ่ขึ้น. จากผลการจำลองของสนามไฟฟ้าผู้วิจัยจึงใช้มิติดังกล่าวสำหรับการจำลองการไหล และ อุณหภูมิ.

การจำลองการไหลวนในห้องฆ่าเชื้อ ผู้วิจัยจำลองโดยกำหนดคุณสมบัติของไหลคือนมที่อุณหภูมิ 20 °C. การไหลวนเกิดขึ้นด้านหลังของฉนวนครึ่งวงรี เนื่องจากฉนวนครึ่งวงรีและอิเล็กโทรดทำมุม 90° ซึ่งขนาดของการไหลวนจะขึ้นอยู่กับความสูงของอิเล็กโทรดและความเร็วการไหลเฉลี่ย. การเพิ่มความสูงของอิเล็กโทรดและการเพิ่มความเร็วการไหลเฉลี่ยส่งผลให้ขนาดการไหลวนใหญ่ขึ้น. ในการจำลองอุณหภูมิ ผู้วิจัยป้อนแรงดัน 25 kV ให้อิเล็กโทรดแรงสูง ด้วยรอบการทำงานเท่ากับ 60×10^{-6}, อุณหภูมิขาเข้า 20 °C และเปรียบเทียบการระบายความร้อนแบบปกติและแบบบังคับ. อุณหภูมิสูงสุดเกิดขึ้นด้านหลังของฉนวน เนื่องจากการไหลวนของของไหลทำให้เกิดอุณหภูมิสะสมเป็นจุดร้อน. อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อมีการระบายความร้อนแบบปกติและแบบบังคับคือ 72 °C และ 46 °C ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยที่ขาออกที่มีค่าประมาณ 23 °C. การระบายความร้อนออกจากห้องฆ่าเชื้อแบบบังคับจึงจำเป็นสำหรับลดอุณหภูมิของจุดร้อน. นอกจากนี้การลดรัศมีของห้องฆ่าเชื้อหรือความเร็วเฉลี่ยของของไหล สามารถลดอุณหภูมิสูงสุดลงได้ แต่ส่งผลให้อัตราการจัดการลดลงด้วยเช่นกัน.

การใช้ PEF สำหรับฆ่าเชื้อให้มีประสิทธิภาพอาจต้องเพิ่มพลังงานเพื่อให้ฆ่าเชื้อได้ ซึ่งพลังงานที่ป้อนให้กับของไหลขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าและรอบการทำงาน อาจทำให้จุดร้อนมีอุณหภูมิสูงมากเกินไป. เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดจุดร้อน ผู้วิจัยจึงเพิ่มพื้นที่การฆ่าเชื้อโดยนำห้องฆ่าเชื้อมาต่ออนุกรมกันเพื่อให้ระยะเวลาที่ของไหลใช้ผ่านบริเวณฆ่าเชื้อจะเพิ่มมากขึ้น และเพิ่มพื้นที่สำหรับระบายความร้อนออกจากระบบด้วย. เวลาที่ของไหลผ่านบริเวณฆ่าเชื้อเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถลดรอบการทำงานของสนามไฟฟ้าให้น้อยลง เพื่อให้อุณหภูมิจุดร้อนมีค่าลดลง. จากการจำลองแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิของจุดร้อนจะลดลงอย่างมากเมื่ออนุกรมห้องฆ่าเชื้อจาก 1 เป็น 2 แต่เมื่อเพิ่มจำนวนอิเล็กโทรดมากขึ้นจะส่งผลต่ออุณหภูมิของจุดร้อนลดลง. การอนุกรมห้องฆ่าเชื้อทำให้อณหภูมิของจุดร้อนลดลงได้มาก แต่อัตราการฆ่าเซลล์ต่อพลังงานที่ป้อนให้ของไหลลดลงตามด้วย ดังนั้นจึงไม่ควรอนุกรมห้องฆ่าเชื้อมากเกินไป.

รายการอ้างอิง

[1] E. Puertolas, E. Luengo, I. Alvarez, and J. Raso, "Improving Mass Transfer to Soften Tissues by Pulsed Electric Fields: Fundamentals and Applications," *Annual Review of Food Science and Technology, Vol 3,* vol. 3, pp. 263-282, 2012.

[2] G. Saulis, "Electroporation of Cell Membranes: The Fundamental Effects of Pulsed Electric Fields in Food Processing," *Food Engineering Reviews,* vol. 2, pp. 52-73, Jun 2010.

[3] M. Sack and G. Muller, "Optimisation of an Electroporation Device for Mash," in *11th International Conference on*, Brasov, 2008, pp. 113 - 118.

[4] B. I. O. Ade-Omowaye, N. K. Rastogi, A. Angersbach, and D. Knorr, "Osmotic dehydration of bell peppers: influence of high intensity electric field pulses and elevated temperature treatment," *Journal of Food Engineering,* vol. 54, pp. 35-43, Aug 2002.

[5] V. Heinz, I. Alvarez, A. Angersbach, and D. Knorr, "Preservation of liquid foods by high intensity pulsed electric fields - basic concepts for process design," *Trends in Food Science & Technology,* vol. 12, pp. 103-111, Mar-Apr 2001.

[6] S. Bendicho, G. V. Barbosa-Canovas, and O. Martin, "Milk processing by high intensity pulsed electric fields," *Trends in Food Science & Technology,* vol. 13, pp. 195-204, Jun-Jul 2002.

[7] C. J. McDonald, S. W. Lloyd, M. A. Vitale, K. Petersson, and F. Innings, "Effects of pulsed electric fields on microorganisms in orange juice using electric field strengths of 30 and 50 kV/cm," *Journal of Food Science,* vol. 65, pp. 984-989, Sep 2000.

[8] M. Corrales, S. Toepfl, P. Butz, D. Knorr, and B. Tauscher, "Extraction of anthocyanins from grape by-products assisted by ultrasonics, high hydrostatic pressure or pulsed electric fields: A comparison," *Innovative Food Science & Emerging Technologies,* vol. 9, pp. 85-91, Jan 2008.

[9] M. Fincan, F. DeVito, and P. Dejmek, "Pulsed electric field treatment for solid-liquid extraction of red beetroot pigment," *Journal of Food Engineering,* vol. 64, pp. 381-388, Sep 2004.

[10] B. I. O. Ade-Omowaye, A. Angersbach, K. A. Taiwo, and D. Knorr, "Use of pulsed electric field pre-treatment to improve dehydration characteristics of plant based foods," *Trends in Food Science & Technology,* vol. 12, pp. 285-295, Aug 2001.

[11] M. Lindgren, K. Aronsson, S. Galt, and T. Ohlsson, "Simulation of the temperature increase in pulsed electric field (PEF) continus flow treatment chambers," *Innovative Food Science and Emerging Technologies,* vol. 3, pp. 233-245, 13 May 2002 2002.

[12] R. Buckow, P. Baumann, S. Schroeder, and K. Knoerzer, "Effect of dimensions and geometry of co-field and co-linear pulsed electric field treatment chambers on electric field strength and energy utilisation," *Journal of Food Engineering,* vol. 105, pp. 545-556, Aug 2011.

[13] M. Shynkaryk and S. K. Sastry, "Simulation and optimization of the ohmic processing of highly viscous food product in chambers with sidewise parallel electrodes," *Journal of Food Engineering,* vol. 110, pp. 448-456, Jun 2012.

[14] A. Fiala, P. C. Wouters, E. Bosch, and Y. Creyghton, "Coupled electrical-fluid model of pulsed electric field treatment in a model food system," *Innovative Food Science and Emerging Technologies,* vol. 2, pp. 229-238, 2001.

[15] T. A. Davis, "Algorithm 832: UMFPACK V4.3---an unsymmetric-pattern multifrontal method," *ACM Trans. Math. Softw.,* vol. 30, pp. 196-199, 2004.

[16] P. F. Fox, T. Uniacke-Lowe, P. L. H. McSweeney, and J. A. O'Mahony, "Physical Properties of Milk," in *Dairy Chemistry and Biochemistry*, ed Cham: Springer International Publishing, 2015, pp. 321-343.

[17] H. Hülsheger, J. Potel, and E.-G. Niemann, "Electric field effects on bacteria and yeast cells," *Radiation and environmental biophysics,* vol. 22, pp. 149-162, 1983.

[18] H. Hülsheger, J. Potel, and E.-G. Niemann, "Killing of bacteria with electric pulses of high field strength," *Radiation and Environmental Biophysics,* vol. 20, pp. 53-65, 1981.

ภาคผนวก

ก. วิธีทำซ้ำพิการ์ดและวิธีทำซ้ำนิวตัน

สมการโมเมนตัมสำหรับการไหลมีพจน์ทีเราไม่สามารถใช้การแก้ปัญหาเชิงเส้นโดยตรงได้ จึงต้องใช้ระเบียบวิธีทำซ้ำพิการ์ด (Picard iteration method) และระเบียบวิธีทำซ้ำนิวตัน (Newton iteration method). ตัวอย่างระเบียบวิธีทำซ้ำพิการ์ดเช่น

$$
\begin{aligned}
u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial y} &= U_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + U_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + U_z \frac{\partial u_x}{\partial z} \\
&= U_x \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial N_j^u}{\partial x} u_{x,j} + U_y \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial N_j^u}{\partial y} u_{x,j} + U_z \sum_{j=1}^{n} \frac{\partial N_j^u}{\partial z} u_{z,j}
\end{aligned}
\tag{1}
$$

โดยที่ U_x, U_y และ U_z หมายถึง คำตอบของความเร็ว u_x u_y และ u_z ที่หาได้จากลำดับก่อนหน้า (Previous iteration) หรือ ค่าเริ่มต้นสำหรับกรณีเริ่มระเบียบวิธีทำซ้ำครั้งแรก ซึ่งสามารถประมาณคำตอบของความเร็วได้ เช่น

$$
U_x = \sum_{j=1}^{n} N_j^u U_{x,j} \tag{2}
$$

สำหรับระเบียบวิธีการทำซ้ำนิวตันจะมีความซับซ้อนกว่าดังตัวอย่างนี้

$$
\begin{aligned}
u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial y} &= \left(U_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + U_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + U_z \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) \\
&+ \left(u_x \frac{\partial U_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial U_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial U_r}{\partial z} \right) \\
&- \left(U_x \frac{\partial U_x}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial y} + U_z \frac{\partial U_x}{\partial z} \right)
\end{aligned}
\tag{3}
$$

ช่วงเริ่มต้นของการคำนวณจะใช้ระเบียบวิธีทำซ้ำพิการ์ด เพราะมีโอกาสลู่เข้ามากกว่าวิธีการทำซ้ำนิวตัน. ข้อดีของวิธีการทำซ้ำนิวตันคือมีความเร็วลู่เข้าที่มากกว่าวิธีทำซ้ำพิการ์ด ซึ่งนำไปใช้ในช่วงที่คำตอบมีการเปลี่ยนแปลงค่าต่ำ. ในวิทยานิพนธ์นี้จะเริ่มใช้ระเบียบวิธีทำซ้ำพิการ์ดช่วงแรกของการคำนวน และเปลี่ยนเป็นวิธีการทำซ้ำนิวตันเมื่อการเปลี่ยนแปลงของคำตอบต่ำกว่า 10^{-5} หรืออาจน้อยกว่าในบางแบบจำลอง.

ข. สมการความเร็วการไหลในทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

การไหลในท่อแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมจะมีความเร็วบนขอบด้านในและด้านนอก ($r = r_i$ และ $r = r_o$) เท่ากับศูนย์. สมการโมเมนตัมในของไหลที่มีสภาวะคงตัว, มีความหนืด μ, อัดตัวไม่ได้แบบนิวโตเนียน และไม่สนใจแรงโน้มถ่วง จะเหลือแต่สมการโมเมนตัมในทิศทางแกน z คือ

$$\mu\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial u_z(r)}{\partial r}\right)\right] = \frac{\partial p}{\partial z} \qquad (1)$$

โดยที่ $u_{z(r)}$ คือความเร็วของของไหลในแนวแกน z (m/s)

อินทิเกรตสมการที่ (1) สองครั้งจะได้ดังนี้

$$r\frac{\partial u_z(r)}{\partial r} = \frac{1}{2\mu}\frac{\partial p}{\partial z}r^2 + c_1$$

$$u_z(r) = \frac{1}{4\mu}\frac{\partial p}{\partial z}r^2 + c_1\ln r + c_2 \qquad (2)$$

จากเงื่อนไขขอบเขตความเร็วเป็นศูนย์บนขอบด้านนอก ดังนั้นแทน $u_z(r_o)$ = 0 m/s ในสมการที่ (2) จะได้ว่า

$$0 = \frac{1}{4\mu}\frac{\partial p}{\partial z}r_o^2 + c_1\ln r_o + c_2$$

$$c_2 = -\frac{1}{4\mu}\frac{\partial p}{\partial z}r_o^2 - c_1\ln r_o \qquad (3)$$

นำสมการ c_2 แทนในสมการที่ (2)

$$u_z(r) = \frac{1}{4\mu}\frac{\partial p}{\partial z}r^2 + c_1\ln r - \frac{1}{4\mu}\frac{\partial p}{\partial z}r_o^2 - c_1\ln r_o \qquad (4)$$

จากเงื่อนไขขอบเขตความเร็วเป็นศูนย์บนขอบด้านใน ดังนั้นแทน $u_{z(r_i)}$ = 0 m/s ในสมการที่ (4) จะได้

$$0 = \frac{1}{4\mu}\frac{\partial p}{\partial z}r_i^2 + c_1\ln r_i - \frac{1}{4\mu}\frac{\partial p}{\partial z}r_o^2 - c_1\ln r_o$$

$$c_1 = -\frac{1}{4\mu}\frac{\partial p}{\partial z}\frac{\left(r_o^2 - r_i^2\right)}{\ln\left(r_o/r_i\right)} \qquad (5)$$

นำ c_1 แทนในสมการที่ (4) จะได้

$$u_z(r) = \frac{1}{4\mu}\frac{\partial p}{\partial z}r^2 - \frac{1}{4\mu}\frac{\partial p}{\partial z}\frac{\left(r_o^2 - r_i^2\right)}{\ln\left(r_o/r_i\right)}\ln r - \frac{1}{4\mu}\frac{\partial p}{\partial z}r_o^2 + \frac{1}{4\mu}\frac{\partial p}{\partial z}\frac{\left(r_o^2 - r_i^2\right)}{\ln\left(r_o/r_i\right)}\ln r_o$$

$$u_z(r) = \frac{1}{4\mu}\frac{\partial p}{\partial z}\left(r^2 - r_o^2\right) - \frac{1}{4\mu}\frac{\partial p}{\partial z}\frac{\left(r_o^2 - r_i^2\right)}{\ln\left(r_o/r_i\right)}\ln\frac{r}{r_o}$$

$$u_z(r) = \frac{1}{4\mu}\frac{\partial p}{\partial z}\left[\left(r^2 - r_o^2\right) - \frac{\left(r_o^2 - r_i^2\right)}{\ln\left(r_o/r_i\right)}\ln\frac{r}{r_o}\right] \quad (6)$$

ค. สมการอุณหภูมิของกระบอกซ้อนแกนร่วม

สมการการกระจายของอุณหภูมิในสภาวะสมดุลตามแนวแกน r ในของเหลวได้จากการอินทิเกรตสมการพลังงานดังนี้

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\kappa\frac{\partial T(r)}{\partial r}\right)+h=0$$

$$r\kappa\frac{\partial T(r)}{\partial r}+\frac{hr^2}{2}+c_1=0 \qquad (7)$$

ซึ่ง

$$\kappa\frac{\partial T(r)}{\partial r}=q_{cond} \qquad (8)$$

ที่ $r= r_i$ ฟลักซ์ความร้อนมีค่าเป็นศูนย์. ดังนั้น แทนค่า q_{cond} = 0 W/m^2

$$c_1=-\frac{hr_i^2}{2} \qquad (9)$$

แทน c_1 ในสมการที่ (7) แล้วอินทิเกรตจะได้

$$\frac{\partial T(r)}{\partial r}+\frac{hr}{2\kappa}-\frac{hr_i^2}{2\kappa r}=0$$

$$T(r)+\frac{hr^2}{4\kappa}-\frac{hr_i^2}{2\kappa}\ln(r)+c_2=0 \qquad (10)$$

ที่ r = r_o อุณหภูมิบนผิวด้านนอกจะมีค่า T_o. ดังนั้นแทนค่า $T(r_o)$ = ได้

$$T_o+\frac{hr_o^2}{4\kappa}-\frac{hr_i^2}{2\kappa}\ln(r_o)+c_2=0$$

$$c_2=-T_o-\frac{hr_o^2}{4\kappa}+\frac{hr_i^2}{2\kappa r}\ln(r_o) \qquad (11)$$

แทน c_2 ในสมการที่ (10) จะได้

$$T(r)+\frac{hr^2}{4\kappa}-\frac{hr_i^2}{2\kappa}\ln(r)-T_o-\frac{hr_o^2}{4\kappa}+\frac{hr_i^2}{2\kappa}\ln(r_o)=0$$

$$T(r)=\frac{h\left(r_o^2-r^2\right)}{4\kappa}-\frac{hr_i^2}{2\kappa}\ln\left(r_o/r\right)+T_o \qquad (12)$$

ในสภาวะคงตัว พลังงานความร้อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดจะไหลผ่านผิวอิเล็กโทรดกราวนด์โดยการพาความร้อน ซึ่งสมการพาความร้อนคือ

$$q_{cond}=2\pi r_o b\left(T_o-T_\infty\right)=\pi(r_o^2-r_i^2)h$$

$$T_o=\frac{h\left(r_o^2-r_i^2\right)}{2r_o b}+T_\infty \qquad (13)$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธีร เกรียงไกรวุฒิ เกิดวันที่ 27 ธันวาคม 2531 กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาในระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาไฟฟ้ากำลัง จากมหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปี 2554