



การจำลองการถ่ายเทความร้อนในไส้กรอกอีสานย่าง

Simulation of heat transfer inside grilled fermented sausage

ชุมพร หนูเมือง¹

¹ภาควิชาวิทยาศาสตร์การอาหารและโภชนาการ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดปัตตานี 94000

Chumphon Numuang¹

¹Department of Food Science and Nutrition, Faculty of Science and Technology, Prince of Songkla University, Pattani, 94000 Thailand

E-mail: chumphon.n@psu.ac.th

Received: 11 September 2020 | Revised: 10 December 2020 | Accepted: 11 December 2020

บทคัดย่อ

ไส้กรอกอีสานเป็นผลิตภัณฑ์ทำจากเนื้อหมูที่ผ่านกระบวนการหมักซึ่งมีโอกาสนปนเปื้อนจุลินทรีย์ก่อโรค วิธีปรุงสุกทำโดยการย่างในเตาไฟฟ้า อุณหภูมิและระยะเวลาของการย่างเป็นปัจจัยที่มีผลต่ออุณหภูมิจุดกึ่งกลางไส้กรอกซึ่งเป็นตำแหน่งร้อนช้าที่สุด การศึกษานี้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน เท่ากับ $0.35 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ในแบบจำลองการถ่ายเทความร้อน วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้ในการจำลองการถ่ายเทความร้อน ผลการจำลองที่ได้เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการทดลองย่างไส้กรอกที่อุณหภูมิ 3 ระดับ ได้แก่ 120°C 140°C และ 160°C เป็นเวลา 3600 – 7200 s พบว่าแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนในไส้กรอกอีสานย่างให้รูปแบบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจุดกึ่งกลางสอดคล้องกับผลการทดลอง แต่แบบจำลองไม่สามารถใช้ทำนายค่าอุณหภูมิจริงได้ ดังนั้นการจำลองการถ่ายเทความร้อนในอาหารยังคงมีความจำเป็นในการพัฒนาต่อไป

ABSTRACT

Fermented sausage is a meat product made from pork via anaerobic fermentation. From this process may having a pathogenic contamination. The cooking method is grilling in an electric stove. Temperature and time of cooking are affecting on the center-point temperature of sausage, which is the slowest heat transfer position. In this study, thermal diffusivity as $0.35 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ was applied in the heat transfer model. The finite element method was used for heat transfer simulation. Its result was compared with experiment of sausage grilling, which 3 level of temperatures as 120°C, 140°C and 160°C for 3600 – 7200 sec. The result was demonstrated that the simulation of heat transfer to the center point has increased according to an increase in temperature. However, the outcome from this model may not accurate and cannot be used to predict the actual temperature. Therefore, heat transfer models in food are still needed to develop further.

คำสำคัญ: ไส้กรอกอีสาน แบบจำลอง การถ่ายเทความร้อน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

Keywords: Fermented sausage, Simulation, Heat transfer, Temperature gradient

บทนำ

ไส้กรอกอีสาน หรือไส้กรอกเปรี้ยว เป็นอาหารพื้นบ้านทางภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย เป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำจากเนื้อหมูบด หนึ่งหมูผสมกับไขมันหมู ข้าวสุกหรือวุ้นเส้น เครื่องเทศและสมุนไพร เครื่องปรุงรส นวดคลุกผสมให้เข้ากันแล้วบรรจุในไส้ธรรมชาติหรือไส้เทียม มัดเป็นปลาสวยด้วยเชือก ผ่านกระบวนการหมักด้วยจุลินทรีย์ในกลุ่ม Lactic acid bacteria ที่มีอยู่ตามธรรมชาติซึ่งจะผลิตกรดแล็กติก ได้แก่ *Pediococcus* และ *Lactobacillus* เนื่องจากไส้กรอกอีสานผลิตจากเนื้อดิบจำเป็นต้องทำให้สุกก่อนบริโภค ถ้าวัตถุดิบเกิดการปนเปื้อนอาจพบจุลินทรีย์ก่อโรค เช่น *Salmonella* spp. *Staphylococcus aureus* *Bacillus cereus* *Clostridium perfringens* *Escherichia coli* สอดคล้องกับผลการศึกษาความเสี่ยงในอาหารของ Anal et al. (2020) ซึ่งกล่าวว่าจุลินทรีย์ก่อโรคอาจพบได้ในผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ที่ผ่านกระบวนการหมัก การทบทวนงานวิจัยของ Singh et al. (2016) ระบุว่าวิธีการปรุงอาหารมีผลต่อสาร Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) ในอาหาร โดยปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น ระยะห่างของแหล่งความร้อน ประเภทเชื้อเพลิงและระยะเวลาในการปรุง การเลือกวิธีการปรุงที่เหมาะสมมีผลทำให้ลดการเกิดสาร PAHs สำหรับไส้กรอกอีสานนิยมปรุงสุกด้วยวิธีย่างด้วยความร้อนจากเตาถ่านหรือเตาไฟฟ้า การย่าง คือการใช้ความร้อนแห้งเกิดการพาความร้อนด้วยกระแสนอากาศร้อนจากเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ในเตาหรือจากขดลวดทำความร้อนในเตาไฟฟ้าไปยังผิวภายนอกของไส้กรอก และเกิดการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนจากบริเวณผิวด้านนอกเข้าสู่เนื้อไส้กรอกด้านในจนกระทั่งมีอุณหภูมิเท่ากันทั้งชิ้น การปรุงสุกจะต้องทำด้วยความระมัดระวัง โดยต้องพลิกกลับด้านไส้กรอกให้เกิดการกระจายความร้อนอย่างทั่วถึงป้องกันรอยไหม้เกรียมและให้ความร้อนอย่างช้า ๆ เพื่อป้องกันไส้กรอกแตกในทางตรงกันข้ามถ้าไส้กรอกได้รับความร้อนไม่เพียงพอ จุลินทรีย์ก่อโรคอาจหลงเหลืออยู่ซึ่งเป็นอันตรายต่อผู้บริโภคเช่นกัน คำแนะนำของ USDA-FSIS (2015) กล่าวถึงการปรุงสุกอย่างปลอดภัยของผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ที่มีความหนาแน่นระหว่าง 2.0-3.0 cm ผ่านกระบวนการทำให้เนื้ออ่อนนุ่มโดยการทุบด้วยค้อน ทำให้เกิดการปนเปื้อนจุลินทรีย์จากด้านนอกเข้าสู่เนื้อด้านใน แนะนำให้หลีกเลี่ยงการปรุงระดับ Rare (ดิบ) และ Medium-rare (กึ่งสุกกึ่งดิบ) แต่จะต้องปรุงสุกอย่างสมบูรณ์คือมีอุณหภูมิ

ด้านในผลิตภัณฑ์เท่ากับ 63°C เป็นเวลา 3 min ซึ่งจะปลอดภัยจากจุลินทรีย์ก่อโรค โดยสามารถใช้เป็นวิธีปรุงสุกที่ปลอดภัยกับเนื้อทุกประเภท และในกรณีมีสารพิษ Botulinum toxin ที่สร้างจาก *Clostridium botulinum* ภายในอาหารต้องมีอุณหภูมิเท่ากับ 85°C เป็นเวลา 5 min หรือมากกว่า (WHO, 2018; Peck, 2010) หรือเท่ากับ 100°C เป็นเวลา 10 min (ปิยะดาและคณะ, 2558) เพื่อทำลายสารพิษ เช่นเดียวกับผลิตภัณฑ์ไส้กรอกอีสานในการศึกษานี้ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการถ่ายเทความร้อนในระหว่างการปรุงสุกที่เหมาะสมมีความสำคัญต่อทั้งผู้ผลิตด้านประสิทธิภาพการผลิตและการควบคุมคุณภาพ ผู้บริโภคด้านความปลอดภัยในอาหาร

ในปัจจุบันด้วยประสิทธิภาพที่สูงขึ้นของคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลและการพัฒนาโปรแกรม OpenFOAM, Open Source Field Operation and Manipulation (The OpenFOAM Foundation, 2017) เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับแก้ปัญหาเชิงคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) ในงานวิจัยนี้ใช้ชุดคำสั่ง laplacianFoam สำหรับแก้ปัญหาการถ่ายเทความร้อนซึ่งได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางและอนุญาตให้ใช้อย่างเสรี (Malekjani and Jafari, 2018) ข้อมูลผลการจำลองที่ได้มีความถูกต้องทัดเทียมกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาเพื่อการพาณิชย์ (Zhang et al., 2018) สามารถใช้เป็นแนวทางกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในการให้ความร้อนแก่อาหารในระดับอุตสาหกรรมซึ่งมีประโยชน์อย่างยิ่งในการช่วยลดจำนวนการทดลอง ประหยัดเวลา ค่าใช้จ่ายและทรัพยากร (Xia and Sun, 2002)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาแบบจำลองจากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่ออธิบายการถ่ายเทความร้อนในไส้กรอกอีสานที่ปรุงสุกด้วยการย่างที่อุณหภูมิแตกต่างกัน และใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนในอาหาร เปรียบเทียบผลอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลอง ผลที่คาดว่าจะได้รับคือได้แบบจำลองและค่าการแพร่ความร้อนที่สามารถอธิบายการถ่ายเทความร้อนในไส้กรอกอีสาน เพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดอุณหภูมิและเวลาของสภาวะการปรุงสุกที่เหมาะสมต่อไป

วิธีการดำเนินการวิจัย

การสร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อน

1. สมการควบคุมในกลศาสตร์ของไหลและการถ่ายเทความร้อน คือ ความสัมพันธ์ในรูปคณิตศาสตร์แบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equation) ของกฎการอนุรักษ์มวล กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม และกฎการอนุรักษ์พลังงาน ใช้อธิบายคุณสมบัติการไหลและการถ่ายเทความร้อนซึ่งคุณสมบัติขึ้นกับเวลาและตำแหน่ง โดยพิจารณาของไหลขนาดเล็กเป็นระบบ (System) ที่วางตัวนิ่งอยู่กับที่ในกระแสน้ำไหลระบุตำแหน่งด้วยระบบพิกัดฉาก (X, Y, Z) เมื่อมีของไหลไหลข้ามผ่านขอบเขต (Boundary) เกิดการเปลี่ยนแปลงของระบบด้านมวล ด้านโมเมนตัม และด้านพลังงาน (Versteeg and Malalasekera, 1995)

สมการอนุรักษ์มวล (Versteeg and Malalasekera, 1995)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

เมื่อ $\rho[\text{kg/m}^3]$ คือ ความหนาแน่น
 $t[\text{s}]$ คือ เวลา
 $\mathbf{u}[\text{m/s}]$ คือ เวกเตอร์ความเร็ว
 ∇ คือ Del operator โดยที่

$$\nabla \equiv \frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{k}$$

เทอมแรกแสดงการเปลี่ยนแปลงมวลใน 1 หน่วยปริมาตรต่อเวลา และเทอมที่สองแสดงการเปลี่ยนแปลงมวลที่มีผลมาจากการไหล แต่เนื่องจากในระบบที่ศึกษาใช้สมมุติฐานว่ามวลของระบบมีค่าคงที่และไม่มีกระแสไหลข้ามผ่านขอบเขตของระบบ ดังนั้นจึงละทิ้งสมการอนุรักษ์มวล

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Versteeg and Malalasekera, 1995)

x-momentum

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \nabla u) + S_{Mx} \quad (2)$$

y-momentum

$$\frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \nabla v) + S_{My} \quad (3)$$

z-momentum

$$\frac{\partial (\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \nabla w) + S_{Mz} \quad (4)$$

เมื่อ $u, v, w[\text{m/s}]$ คือ ความเร็วในแกน x, y, z

$p[\text{kg/m s}^2]$ คือ ความดัน

$x, y, z[\text{m}]$ คือ ระยะทางในแกน x, y, z

$\mu[\text{kg/m s}]$ คือ Dynamic viscosity

$S_M[\text{kg/m}^2 \text{ s}^2]$ คือ แรงเนื่องจากมวล โดยที่

$$S_{Mx} = 0, S_{My} = 0, S_{Mz} = -\rho g$$

แสดงการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมใน 1 หน่วยปริมาตรต่อเวลาที่เป็นผลมาจากการไหล ความดันจากภายนอกที่กระทำต่อพื้นผิว ความหนืดและแรงเนื่องจากมวลในทิศทางแนวแกน แต่เนื่องจากระบบที่ศึกษาอยู่นิ่งกับที่และใช้สมมุติฐานว่าแรงต่าง ๆ ที่กระทำต่อระบบมีผลต่อระบบน้อยมาก ดังนั้นจึงละทิ้งสมการอนุรักษ์โมเมนตัม

สมการอนุรักษ์พลังงาน สมการการนำความร้อน (Berk, 2009)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho C_p} \nabla \cdot (k \nabla T) + \frac{q}{\rho C_p} \quad (5)$$

เมื่อ $T[\text{K}]$ คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์
 $q[\text{W/m}^3]$ คือ อัตราการเกิดพลังงานต่อปริมาตร
 $k[\text{W/(m.K)}]$ คือ ค่าการนำความร้อน
 $C_p[\text{J/(kg.K)}]$ คือ ค่าความร้อนจำเพาะ

พิจารณาค่าความร้อนจำเพาะมีค่าเท่ากันตลอด และเขียนให้อยู่ในรูปค่าการแพร่ความร้อน ดังนี้

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\alpha \nabla T) + \frac{q}{\rho C_p} \quad (6)$$

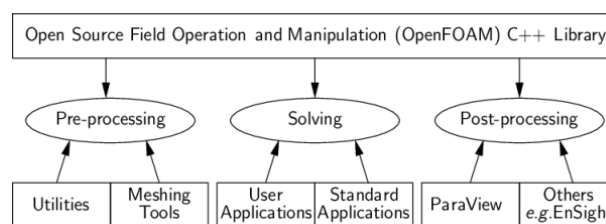
เมื่อ $\alpha = k/\rho C_p [\text{m}^2/\text{s}]$ คือ ค่าการแพร่ความร้อน และระบบที่ศึกษาไม่เกิดความร้อนขึ้นด้วยตัวเอง ดังนั้นสมการการนำความร้อนจึงลดรูปเหลือ ดังสมการ (7)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\alpha \nabla T) \quad (7)$$

2 อุปกรณ์และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลซึ่งประกอบด้วยหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) AMD FX-6300 ความเร็ว 3500 MHz หน่วยความจำชั่วคราว (RAM) ความจุ 16 GB ติดตั้งระบบปฏิบัติการ Linux 4.15.0-101-generic แบบ 64 bit ในรูปของ Ubuntu 18.04.4 LTS (Bionic Beaver) ติดตั้งโปรแกรมที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้แก่ โปรแกรม OpenFOAM version 7 ซึ่งเป็นชุดคำสั่งภาษา C++ ที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้แก้ปัญหาการคำนวณเชิงตัวเลข ที่มีโครงสร้าง

การทำงานประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่ กระบวนการก่อนแก้ปัญา (Pre) การแก้ปัญา (Solve) และกระบวนการหลังแก้ปัญา (Post) ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งการถ่ายเทข้อมูลในแต่ละขั้นตอนสามารถทำได้ภายในตัวเอง สำหรับแก้ปัญาเชิงกลของระบบต่อเนื่อง (Continuum mechanics problems) เช่น ปัญหาการคำนวณพลศาสตร์ของไหล ปัญหาการถ่ายเทความร้อน (The OpenFOAM Foundation, 2017) โปรแกรม SALOME version 9.3.0 ใช้สร้างกลุ่มของปัญา (Domain) ทางกายภาพที่ต้องการศึกษาที่ได้จากการวาดรูปทรง 3 มิติแล้วเปลี่ยนให้อยู่ใน

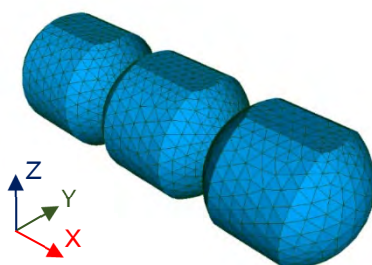
รูปขององค์ประกอบย่อย (Finite element mesh) ประเมินคุณภาพของ Mesh Domain เพื่อป้อนเข้าสู่กระบวนการแก้ปัญาเชิงตัวเลข OPEN CASCADE, (2020) ผลเฉลยที่ได้จากการแก้ปัญาจะถูกป้อนเข้าสู่โปรแกรม Paraview version 5.6.0 64 bit ซึ่งแสดงผลด้วยภาพและสีเพื่อการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยสามารถแสดงผลในรูป 3 มิติ แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของระบบที่เกิดขึ้นตามเวลา (National Technology & Engineering Solution of Sandia, 2020)



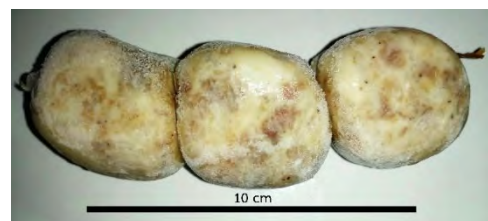
รูปที่ 1 โครงสร้างของ OpenFOAM (The OpenFOAM Foundation, 2017)

3. การจำลองการถ่ายเทความร้อน ในการศึกษาการจำลองการถ่ายเทความร้อนใช้สมมุติฐานต่อไปนี้ อาหารแข็งมีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกันและมีสมบัติทางกลเหมือนกันทุกทิศทาง มีสมบัติทางความร้อนมีค่าคงที่ มีรูปร่างเป็นทรงกลมเชื่อมต่อกัน อุณหภูมิเริ่มต้นมีค่าเท่ากันตลอดทั้งชิ้น การถ่ายเทความร้อนของตัวกลางให้ความร้อนมีค่าคงที่และอาหารไม่เปลี่ยนแปลงสถานะ

ใช้โปรแกรม SALOME ซึ่งมีพื้นที่ทำงานภายใต้ระบบพิกัดฉาก (X,Y,Z) สร้างรูปร่างเสมือนไส้กรอก (Mesh) เป็นรูปทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 cm จำนวน 3 ลูกเชื่อมต่อกัน



(a)



(b)

รูปที่ 2 (a) Mesh ของไส้กรอก (b) ไส้กรอกอีสาน

ค่าการแพร่ความร้อน (α) คือ คุณสมบัติทางความร้อน แสดงความเร็วของการถ่ายเทความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง

ไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ มีความสำคัญต่อกระบวนการให้ความร้อน อาหารที่มีค่าการแพร่ความร้อนสูงจะการถ่ายเทความร้อน

เร็วกว่า ค่าการแพร่ความร้อนสัมพันธ์กับค่าการนำความร้อน ความร้อนจำเพาะ ความหนาแน่นของอาหารและองค์ประกอบในอาหาร ตัวอย่างค่าการแพร่ความร้อนในอาหารแสดงในตารางที่ 1 สำหรับการศึกษาที่กำหนดค่าการแพร่ความร้อนเท่ากับ $0.35 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ซึ่งได้จากการประยุกต์ใช้แนวคิดของ Erdogan (2008) Mohamed (2010) และ Betta et al. (2009) ที่ศึกษาวิธีการกำหนดค่าการแพร่ความร้อนด้วยการเปรียบเทียบผลการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลอง ค่าการแพร่ความร้อนที่ให้รูปแบบ (Temperature

ตารางที่ 1 ค่าการแพร่ความร้อนในอาหาร

Foodstuffs	$\alpha \times 10^{-7} [\text{m}^2/\text{s}]$	Reference
Lyoner sausage	1.435	Markowski et al., 2004
Cylindrically sausage	3.846	Dincer and Yildiz, 1996
Bulgaria sausage	1.15	Akterian, 1997
Ham, smoked	1.38	Singh and Heldman, 2014
Beef chuck	1.23	Singh and Heldman, 2014
Fermented sausage	0.35	This work

2. อุปกรณ์ให้ความร้อนและวัดอุณหภูมิ ใช้เตาอบไฟฟ้ายี่ห้อ SHARP รุ่น EO-19K กำลัง 1300 W ซึ่งมีหลอดทำความร้อนอยู่ทั้งด้านบนและด้านล่างของตำแหน่งวางอาหาร ใช้เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิ ยี่ห้อ Wisco รุ่น DL2200 เชื่อมต่อเซ็นเซอร์อุณหภูมิ (Thermocouple Type K) เซ็นเซอร์มีความยาว 15 mm เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm มีช่วงการวัดอุณหภูมิระหว่าง -250 ถึง 1300°C จำนวน 8 ตัว (TC1 – TC8) ตั้งค่าการบันทึกอุณหภูมิทุก 30 s การทดลอง (1) เซ็นเซอร์อุณหภูมิ (TC1-TC8) ถูกวางกระจายบนตะแกรงวางอาหารในเตาอบเปล่าเพื่อหาค่าการกระจายความร้อนในเตาอบ การทดลอง (2) เสียบเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิอยู่ตรงกึ่งกลางของไส้กรอก 7 ลูก (TC1-TC7) เพื่อหาค่าอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางไส้กรอกพร้อมกับวางเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิใน

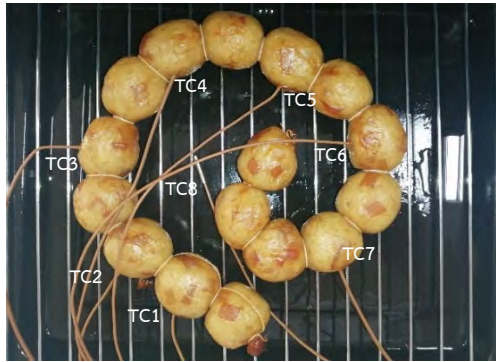
profile) การถ่ายเทความร้อนสอดคล้อง (Fit) เข้ากับข้อมูลผลการทดลองการถ่ายเทความร้อนมากที่สุดเป็นผลการศึกษา

การทดลองให้ความร้อนไส้กรอกอีสาน

1. ไส้กรอกอีสาน ไส้กรอกอีสานชนิดที่มีส่วนผสมเป็นเนื้อหมู หนักรู ข้าว ซื้อมาจากผู้ผลิตใน อ.เมือง จ.ปัตตานี ขนาดน้ำหนัก 500 g เป็นพวงมัดแบ่งเป็นลูก 14-16 ลูก เก็บรักษาในอุณหภูมิแช่เยือกแข็งจนกว่าจะนำมาใช้ทดลอง ด้วยการละลายน้ำแข็งโดยเก็บไว้ในอุณหภูมิ 4°C นานข้ามคืน

กลางเตาอบ 1 เซ็น (TC8) ตั้งค่าอุณหภูมิเตาอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3

3. การทดลองให้ความร้อนไส้กรอกอีสาน วางไส้กรอกที่เสียบเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิไว้บนตะแกรงย่างซึ่งอยู่กลางเตาอบระหว่างชุดหลอดให้ความร้อนด้านบนและด้านล่าง ตั้งอุณหภูมิเตาอบที่ 120°C ตั้งเวลาเตาอบ 60 min อ่านค่าอุณหภูมิในจุดกึ่งกลางไส้กรอกที่แสดงผลโดยเครื่องวัดอุณหภูมิและยึดเวลาการย่างออกไปจนกว่าอุณหภูมิจุดกึ่งกลางไส้กรอกจะเท่ากับ 100°C วัดและบันทึกอุณหภูมิทุก ๆ 30 s ด้วยเครื่องบันทึกยี่ห้อ Wisco รุ่น DL2200 ที่จุดกึ่งกลางไส้กรอก (TC1-TC7) อุณหภูมิกลางเตาอบ (TC8) ทดลองซ้ำ 3 ซ้ำโดยใช้ไส้กรอกใหม่ทุกครั้ง หลังจากนั้นเปลี่ยนระดับอุณหภูมิเป็น 140°C และ 160°C ตามลำดับ



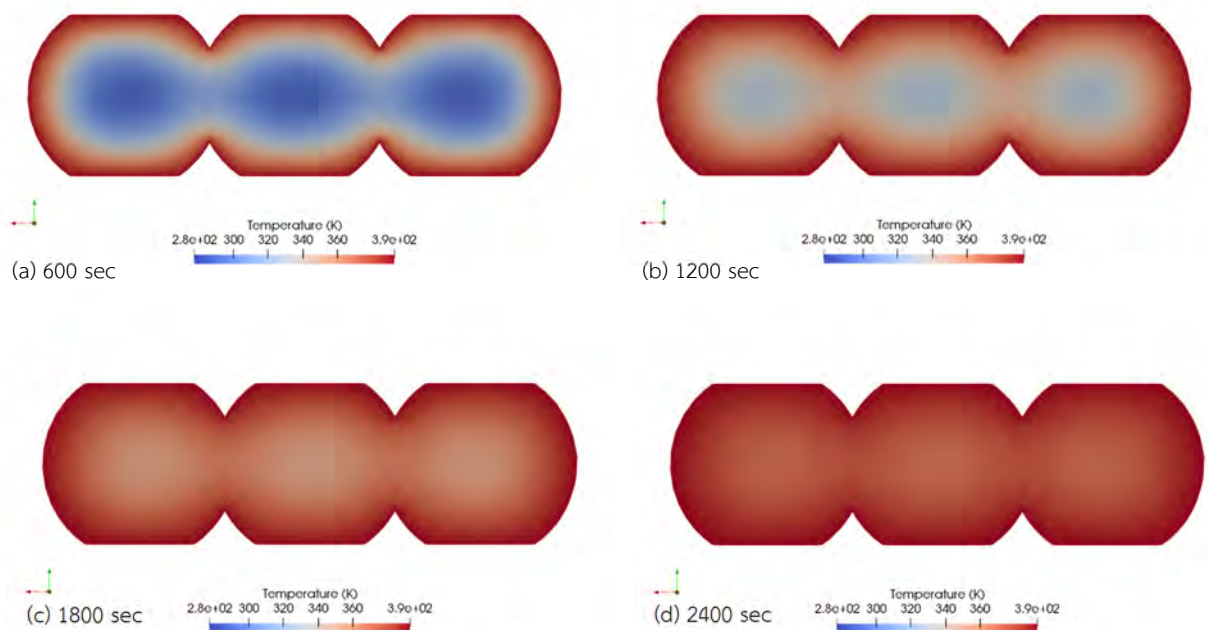
รูปที่ 3 การเสียบเข็มวัดอุณหภูมิจุดกึ่งกลางลำกรอกอีสานอย่าง (TC1-TC7) และเข็มวัดอุณหภูมิในกลางเตาอบ (TC8)

ผลการวิจัยและวิจารณ์

1. ผลการจำลองการถ่ายเทความร้อน

รูปร่างเสมือนลำกรอกที่มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่าย (Mesh) มีขนาด (Size) ขององค์ประกอบย่อย (Elements) ระหว่าง 0.05 – 0.5 cm ใน Mesh ประกอบด้วย 3890 จุดเชื่อม (Nodes) และ 21532 องค์ประกอบ (Elements) โดยประกอบกันเป็นหน้า (Faces) รูปสามเหลี่ยม (Triangles) จำนวน 2996

หน้า และปริมาตร (Volume) ทรงสี่หน้าหรือปริมาตรฐานสามเหลี่ยม (Tetrahedrons) จำนวน 18140 ปริมาตร อุณหภูมิของขอบเขต (Boundary) ซึ่งเป็นผิวด้านนอกของรูปร่างเสมือนลำกรอกเท่ากับอุณหภูมิจำลองการย่าง หลังจากใช้คำสั่ง laplacianFoam คอมพิวเตอร์คำนวณหาผลเฉลยซึ่งก็คืออุณหภูมิภายในรูปร่างเสมือนลำกรอก โดยถูกกำหนดให้บันทึกผลเฉลยทุก 30 s ของระยะเวลาจำลองการให้ความร้อนนาน 3600 - 7200 s

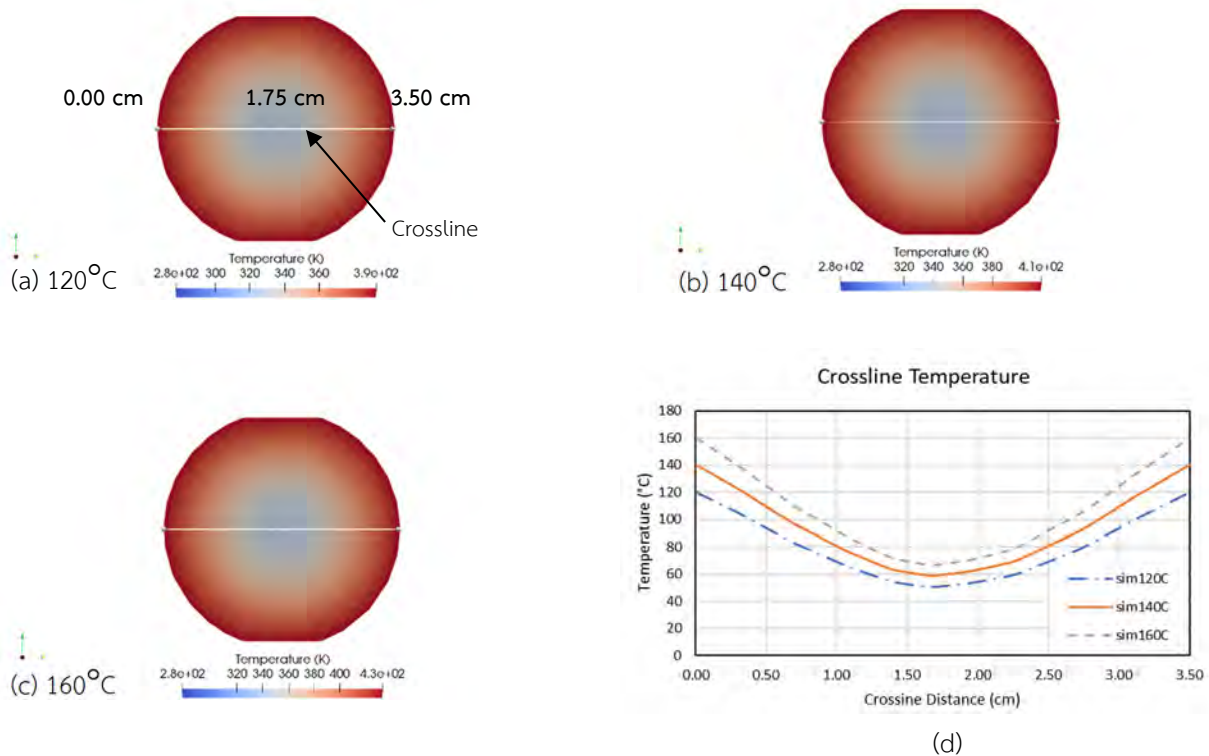


รูปที่ 4 ภาพหน้าตัดขวาง (X-Z plane) ตามยาวของภาพเสมือนลำกรอกที่อุณหภูมิ 120°C เมื่อเวลาผ่านไป 600(a) 1200(b) 1800(c) และ 2400(d) s ตามลำดับ

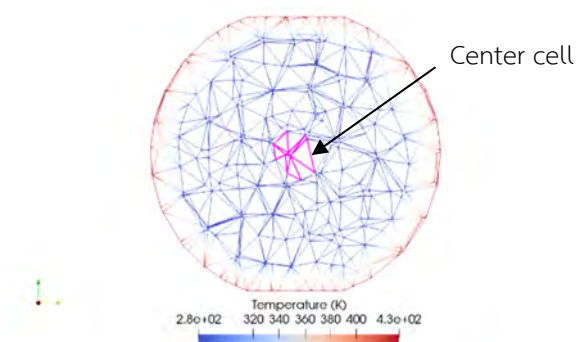
ภาพหน้าตัดขวางตามยาวของ Mesh แสดงการถ่ายเทความร้อนจากบริเวณผิวด้านนอกที่มีอุณหภูมิสูงเข้าสู่ด้านในของไส้กรอกเมื่อเวลาผ่านไป 600 1200 1800 2400 s ของการจำลองที่อุณหภูมิ 120°C ดังแสดงในรูปที่ 4 บริเวณสีน้ำเงินด้านในหมายถึงบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ ส่วนบริเวณสีแดงด้านนอกหมายถึงบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ในส่วนเนื้อไส้กรอกมีเฉดสีแสดงระดับความแตกต่างของอุณหภูมิและมีลักษณะทำนองเดียวกันในการจำลองที่อุณหภูมิ 140°C และ 160°C โดยที่การจำลองในสภาวะอุณหภูมิสูงกว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะเกิดขึ้นเร็วกว่า

ภาพหน้าตัดขวางตามขวางของ Mesh เมื่อเวลาผ่านไป 1200 s ของการจำลองให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120°C 140°C และ 160°C ดังแสดงในรูปที่ 5(a)-(c) เฉดสีแสดงบริเวณอุณหภูมิที่แตกต่างกันโดยจุดกึ่งกลางไส้กรอกบริเวณสีน้ำเงินยังคงมีอุณหภูมิต่ำในขณะที่ส่วนรอบนอกบริเวณสีแดงมีอุณหภูมิสูง และข้อมูลอุณหภูมิที่อยู่บนตำแหน่งของเส้นตัดตามขวาง (Crossline) ที่ลากผ่านจากขอบด้านหนึ่งที่ตำแหน่ง 0.00 cm ผ่านจุดศูนย์กลางที่ตำแหน่ง 1.75 cm ไปยังขอบอีกด้านหนึ่งที่ตำแหน่ง 3.50 cm ในภาพเสมือนซึ่งแสดงอุณหภูมิสูงบริเวณผิว

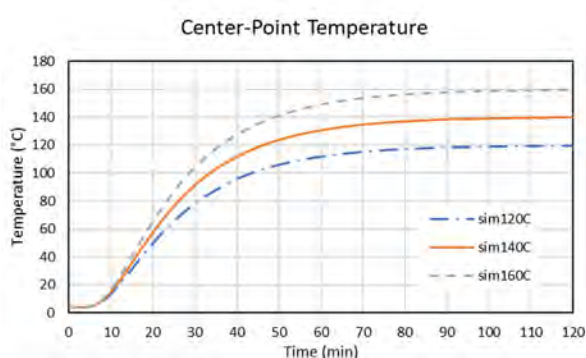
ด้านนอกและอุณหภูมิต่ำในบริเวณกึ่งกลางถูกนำมาเขียนแผนภูมิดังแสดงในรูปที่ 5(d) โดยเมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิจุดกึ่งกลางจะเพิ่มสูงขึ้นจนอุณหภูมิสมดุลกับผิวด้านนอก ข้อมูลของผลการจำลองอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางไส้กรอก ได้จากการอ่านค่าอุณหภูมิจากปริมาตร (Cell) ที่อยู่จุดกึ่งกลางไส้กรอกดังแสดงในรูปที่ 6 โดยอ่านค่าอุณหภูมิตั้งแต่เวลาเริ่มต้นที่ 0 s จนถึงสิ้นสุดการจำลอง 7200 s แผนภูมิแสดงผลการจำลองระหว่างอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางไส้กรอกกับเวลา ที่อุณหภูมิ 120°C 140°C และ 160°C ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่าอุณหภูมิจุดกึ่งกลางมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาให้ความร้อนดำเนินไป การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเป็นผลมาจากการถ่ายเทความร้อนจากผิวด้านนอกที่มีอุณหภูมิสูงเข้าสู่จุดกึ่งกลางที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า และถ้ามีความแตกต่างของอุณหภูมิสูงอัตราการถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นสูงกว่า โดยอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาระหว่าง 600 – 2400 s (10 – 40 min) และเข้าสู่สมดุลกับอุณหภูมิที่ผิวที่เวลา 4800 s (80 min) การจำลองที่อุณหภูมิสูงมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจุดกึ่งกลางสูงกว่าการจำลองที่อุณหภูมิต่ำกว่า



รูปที่ 5 ภาพหน้าตัดขวาง (Y-Z plane) ตามขวางของภาพเสมือนไส้กรอกเมื่อเวลาผ่านไป 1200 s ของการจำลองที่ 120°C (a) 140°C (b) 160°C (c) และแผนภูมิผลจำลองระดับอุณหภูมิบนเส้นตัดตามขวาง (d)



รูปที่ 6 ภาพเซลล์จุดกึ่งกลาง (Y-Z plane) ที่ใช้อ่านข้อมูลผลการจำลองอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของภาพเสมือนไส้กรอก



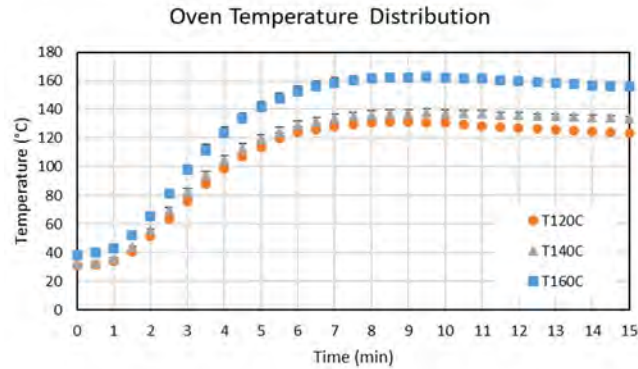
รูปที่ 7 แผนภูมิผลการจำลองอุณหภูมิจุดกึ่งกลางรูปเสมือนไส้กรอกกับเวลา ตั้งแต่ 0-120 min ที่อุณหภูมิ 120°C 140°C และ 160 °C

2. ผลการให้ความร้อนไส้กรอกอีสาน

ผลการวัดการกระจายความร้อนในเตาอบเปล่า

ผลการทดลองวัดอุณหภูมิในเตาอบเปล่าซึ่งไม่มีการบรรจุตัวอย่างไส้กรอก เพื่อวิเคราะห์การกระจายความร้อนในเตาอบเปล่า พบว่าอุณหภูมิในเตาอบเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายใน 5 min แล้วมีค่าเข้าสู่อุณหภูมิที่กำหนด ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งระยะเวลาช่วงแรกที่รอคอยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในเตาอบสั้นมากเมื่อเทียบกับเวลาในการย่างที่ยาวนาน (60 – 120 min) และพบว่าอุณหภูมิมียุ่ช่วงค่าต่ำสุด-ค่าสูงสุด (SD min, SD max) และค่าเฉลี่ย (SD avg) ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานตลอด 15 min

ได้จากเซ็นวัดอุณหภูมิ TC1-TC8 ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยที่การตั้งค่าอุณหภูมิเตาอบ 120°C อุณหภูมิภายในมีความสม่ำเสมอมาก (SD 1.54°C) กว่าที่ตั้งค่าที่อุณหภูมิเตาอบ 160°C (SD 2.47°C) ซึ่งมีความแตกต่างของอุณหภูมิในเตาอบสูงกว่า อย่างไรก็ตามการเบี่ยงเบนของอุณหภูมิในเตาอบมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับอุณหภูมิการย่างที่สูงมาก (120°C – 160°C, อุณหภูมิการย่างหมายถึงอุณหภูมิภายในเตาอบที่กำหนดและบรรจุไส้กรอกเป็นภาระความร้อน) จึงกล่าวได้ว่าเตาอบเปล่ามีอุณหภูมิภายในเตาอบสม่ำเสมอ



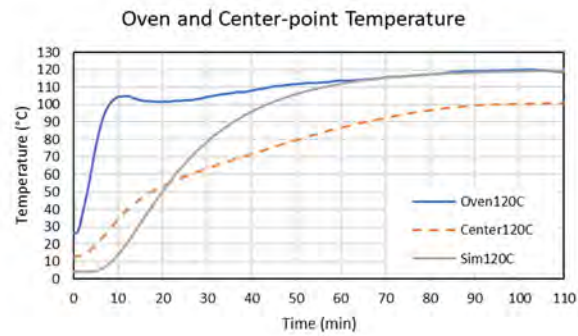
รูปที่ 8 แผนภูมิการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเตาอบเปล่าที่อุณหภูมิ 120°C 140°C และ 160°C

ผลการให้ความร้อนไส้กรอกอีสาน ผลการทดลองวัดอุณหภูมิจุดกึ่งกลางไส้กรอกอีสาน (Center) ผลการจำลองการถ่ายเทความร้อน (Sim) และอุณหภูมิเตาอบ (Oven) ที่ 120°C 140°C และ 160°C กับระยะเวลาการให้ความร้อน (Time) ดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่าอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางไส้กรอกมีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเตาอบ โดยเฉพาะที่สภาวะการย่างที่อุณหภูมิเตาอบ 160°C มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเตาอบและอุณหภูมิจุดกึ่งกลางไส้กรอกเร็วที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองการถ่ายเทความร้อน แต่ในการทดลองที่สภาวะการย่างที่อุณหภูมิเตาอบ 140°C และ 160°C เมื่อบรรจุไส้กรอกเป็นภาระการทำความร้อนเตาอบไม่สามารถทำอุณหภูมิให้ถึงระดับที่กำหนด (โดยสามารถทำอุณหภูมิได้เพียง 134°C และ 141°C ตามลำดับ) อาจเป็นผลมาจากกำลังของเตาอบไม่เพียงพอและเกิดการถ่ายเทความร้อนให้ไส้กรอกและให้สิ่งแวดล้อมรอบเตาอบ ในขณะที่ผลการจำลองยังคงมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจุดกึ่งกลางไส้กรอกจนสอดคล้องกับอุณหภูมิจำลองของการย่าง เมื่อพิจารณาระยะเวลาการรอคอยที่เตาอบใช้เพื่อทำให้มีอุณหภูมิตามที่กำหนด (120°C) พบว่าเตาอบที่บรรจุไส้กรอกใช้เวลามากกว่ากรณีที่เป็นเตาอบเปล่า โดยใช้เวลา 98 min กว่าอุณหภูมิการย่างจะเท่ากับ 120°C และเตาอบไม่สามารถทำอุณหภูมิการย่างให้เท่ากับ 140°C และ 160°C ได้ โดยสามารถทำอุณหภูมิได้เพียง 134°C และ 141°C ตามลำดับ สำหรับระยะเวลาที่ใช้เพื่อทำให้อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางไส้กรอกเท่ากับ 100°C พบว่าอุณหภูมิการย่างที่ 160°C ใช้เวลาสั้นที่สุดเท่ากับ 39 min

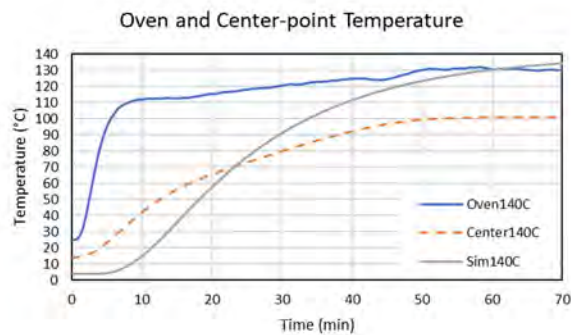
ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางไส้กรอกมีค่าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 101°C ที่สภาวะอุณหภูมิการย่าง 160 °C เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง พบว่า ผลการจำลอง (Sim) ให้ระยะเวลาที่สั้นกว่าการทดลอง (Center) ในทุกระดับอุณหภูมิ มีสาเหตุมาจากในไส้กรอกอีสานประกอบด้วยองค์ประกอบหลายชนิดซึ่งมีคุณสมบัติการแพร่ความร้อนแตกต่างกัน โดยรวมมีค่าการแพร่ความร้อนต่ำและอาจเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ จึงทำให้ใช้เวลานานกว่าที่ความร้อนจะแพร่ถึงตำแหน่งจุดกึ่งกลางไส้กรอก และใช้เวลานานกว่าผลการจำลองซึ่งกำหนดให้คุณสมบัติการแพร่ความร้อนมีค่าคงที่ อย่างไรก็ตามรูปแบบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมีลักษณะสอดคล้องกัน เมื่อเปรียบเทียบการทดลองทุกสภาวะอุณหภูมิการย่างพบว่า ที่ 120°C มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางช้าที่สุด ในขณะที่ 140°C และ 160°C มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเร็วใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 10 เป็นผลมาจากภายใต้สภาวะอุณหภูมิการย่างที่สูง (140-160°C) ส่งผลต่อน้ำในไส้กรอกที่ไม่สามารถแทรกออกมาได้ทันจึงมีน้ำเหลืออยู่ในไส้กรอกในปริมาณมากส่งผลต่อไปยังคุณสมบัติการแพร่ความร้อนในไส้กรอกทำให้มีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนสูงใกล้เคียงกัน แต่ในขณะที่ภายใต้สภาวะอุณหภูมิการย่างที่ต่ำกว่า (120°C) ส่งผลให้น้ำในไส้กรอกสามารถแทรกออกมาได้ จึงมีน้ำเหลืออยู่ในไส้กรอกในปริมาณน้อยส่งผลต่อไปยังคุณสมบัติการแพร่ความร้อนทำให้มีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนต่ำ และเป็นผลรวมมาจากกับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเตาอบกับอุณหภูมิจุดกึ่งกลางไส้กรอกที่มีระดับแตกต่างกัน

ตารางที่ 2 ช่วงและค่าเฉลี่ยของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าอุณหภูมิในเตาอบเปล่า 8 ตำแหน่ง ตลอด 15 min

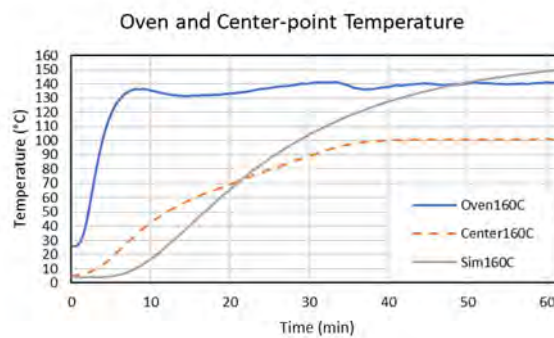
Temp (°C)	min SD (°C)	max SD (°C)	avg SD (°C)
120	0.13	4.15	1.54
140	0.38	3.34	1.96
160	0.55	4.07	2.47



(a) 120°C



(b) 140 °C

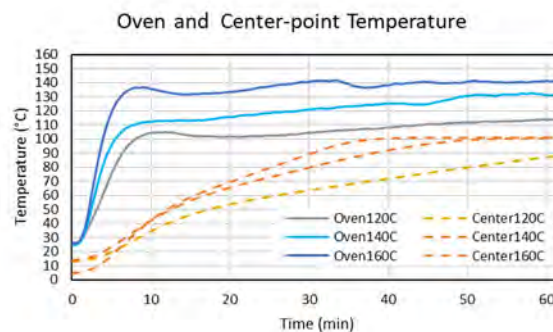


(c) 160°C

รูปที่ 9 แผนภูมิการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเตาอบและอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางไส้กรอก และผลการจำลองที่อุณหภูมิการย่าง 120 °C (a) 140 °C (b) และ 160 °C (c)

ตารางที่ 3 ระยะเวลาสั้นที่สุดของเตาอบที่อุณหภูมิตั้งค่า (Set) และของจุดกึ่งกลางไส้กรอกที่มีอุณหภูมิ 100°C

Temperature Set / Actual (°C)	Oven Time (min)	Center Time (min)	Sim Time (min)
120 / 120	98	94	45
140 / 134	72	53	35
160 / 141	62	39	28



รูปที่ 10 แผนภูมิการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเตาอบและอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางไส้กรอกที่ 120°C 140°C และ 160°C

สรุปผลการวิจัย

ผลการจำลองการถ่ายเทความร้อนกับผลการทดลองให้ความร้อนไส้กรอกอีสานมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ผลการจำลองกับผลการทดลองมีความแตกต่างกันเนื่องจากองค์ประกอบของไส้กรอกมีผลต่อค่าการแพร่ความร้อนและความสามารถในการทำความร้อนของเตาอบที่มีจำกัด ดังนั้นจึงยังคงมีความจำเป็นในการพัฒนาการจำลองการถ่ายเทความร้อนในอาหารที่มีความซับซ้อนเพื่อให้ผลการจำลองมีความถูกต้องแม่นยำเพื่อสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้

เอกสารอ้างอิง

- ปิยะดา หวังรุ่งทรัพย์ ชุตินา จิตตประสาฬส และ ธนิตชัย คำแถลง. (2558). คู่มือการตรวจวินิจฉัยเชื้อ *Clostridium botulinum* ในห้องปฏิบัติการ. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์สาธารณสุข กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์. กระทรวงสาธารณสุข. กรุงเทพฯ: เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล พับลิเคชั่น จำกัด. หน้า 11.
- Akterian, S. G. (1997). Control Strategy using Function of Sensitivity for Thermal Processing of Sausage. *Journal of Food Engineering* 31: 449-455.
- Anal, A. K., Perpetuini, G., Petchkongkaew, A., Tan, R., Avallone, S., Tofalo, R., Nguyen, H. V., Chu-Ky, S., Ho, P. H., Phan, T. T. and Wache, Y. (2020). Food safety risk in traditional fermented food from South-East Asia. *Food Control* 109: 106922.

- Berk Z. (2009). *Food Process Engineering and Technology*. New York: Academic Press. pp. 69-81.
- Betta, G., Rinaldi, M., Barbanti, D. and Massini, R. (2009). A quick method for thermal diffusivity estimation: Application to several foods. *Journal of Food Engineering* 91: 34-41.
- Dincer, I. and Yildiz, M. (1996). Modelling of Thermal and Moisture Diffusions in Cylindrically Shaped Sausages during Frying. *Journal of Food Engineering* 28:35-43.
- Erdogdu, F. (2008). A review on simultaneous determination of thermal diffusivity and heat transfer coefficient. *Journal of Food Engineering* 86: 543-549.
- Malekjani, N. and Jafari, S. M. (2018). Simulation of food drying processes by Computational Fluid Dynamics (CFD); recent advances and approaches. *Trends in Food Science and Technology* 78: 206-223.
- Markowski, M., Bialobrzewski, I., Cierach, M. and Paulo, A. (2004). Determination of thermal diffusivity of Lyoner type sausages during water bath cooking and cooling. *Journal of Food Engineering* 65: 591-598.
- Mohamed, I. O. (2010). Development of a simple and robust inverse method for determination of thermal diffusivity of solid foods. *Journal of Food Engineering* 101: 1-7.
- National Technology & Engineering Solutions of Sandia. (2020). ParaView Documentation. แหล่งข้อมูล <https://>

- docs.paraview.org/en/latest/ ค้นเมื่อวันที่ 9 กันยายน 2563.
- OPEN CASCADE. (2020). Introduction to Mesh module. แหล่งข้อมูล <https://docs.salome-platform.org/latest/gui/SMESH/index.html> ค้นเมื่อวันที่ 9 กันยายน 2563.
- Peck, M. W. (2010) *Clostridium botulinum*. Pathogens and Toxins in Foods. Challenges and Interventions. Washington, DC: ASM Press. pp. 31-52.
- Singh, L., Varshney, J. G. and Agarwal, T. (2016). Polycyclic aromatic hydrocarbons' formation and occurrence in processed food. Food Chemistry 199: 768-781.
- Singh, R. P. and Heldman D. R. (2014). Introduction to Food Engineering. 5th Edit. New York: Elsevier. pp. 802.
- The OpenFOAM Foundation. (2017). OpenFOAM v7 User Guide. แหล่งข้อมูล <https://cfd.direct/openfoam/user-guide-v7/> ค้นเมื่อวันที่ 11 มิถุนายน 2563
- United States Department of Agriculture's Food Safety and Inspection Service (USDA-FSIS). FSIS Compliance Guideline for Validating Cooking Instructions for Mechanically Tenderized Beef Products. (2015).
- แหล่งข้อมูล https://www.fsis.usda.gov/wps/wcm/connect/606919b6-5192-40bd-a32b-99a41c75eeb6/Comp_Guide_MTB.pdf?MOD=AJPERES ค้นเมื่อ 17 กรกฎาคม 2563
- Versteeg, H. K. and Malalasekera, W. (1995). An introduction to computational fluid dynamics: The Finite volume method. Malaysia: Longman Scientific & Technical. pp. 10-40.
- WHO. (2018). Botulism. Foodborne botulism. World Health Organization. แหล่งข้อมูล <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/botulism> ค้นเมื่อ 7 ธันวาคม 2563
- Xia, B. and Sun, D. W. (2002). Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: a review. Computers and Electronics in Agriculture 34(1-3): 5-24.
- Zhang, K., Wang, C. A. and Tan, J. Y. (2018). Numerical study with OpenFOAM on heat conduction problems in heterogeneous media. International Journal of Heat and Mass Transfer 124: 1156-1162.

