

การศึกษาความเป็นไปได้ของสภาวะการอบแห้งด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ Feasibility Study of Drying Conditions by Finite Element Method

อาภาภรณ์ จอมหล้าพีรติกุล¹, ณัฐพล ภูมิสะอาด², ละมุล วิเศษ³, ประสิทธิ์ โสภา¹

Apaporn Jomlapelatikul¹, Nattapol Poomsa-ad², Lamul Wiset³, Prasit Sopa¹

Received: 15 October 2012 ;Accepted: 10 December 2012

บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อพิจารณาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการกระจายอุณหภูมิและความชื้นของผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในขอบเขตของการอบแห้งแบบการพาความร้อน ทำการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่อสภาวะการอบแห้ง 4 ตัวแปร คือ ค่าการนำความร้อน(k_m), สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (h_m), ค่าการแพร่ความชื้นที่ผิว (D_m) และ อัตราส่วนรูปทรง (AR) ซึ่งอยู่ในช่วง 1.29×10^{-8} ถึง 1.29×10^{-10} kg/m.s, 1.67×10^{-5} ถึง 1.67×10^{-7} kg/m².s, 5×10^{-9} ถึง 5×10^{-11} m²/s และ 0.5 ถึง 2 ตามลำดับ ใช้อุณหภูมิในการอบแห้ง 135 °C ผลการศึกษาพบว่า ค่าการนำความร้อน และ ค่าการแพร่ความชื้นที่ผิว ไม่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์ ส่วนการเพิ่มขึ้นของค่าการนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลมีผลทำให้การกระจายความชื้นในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น และ การเพิ่มขึ้นของค่าการแพร่ความชื้นที่ผิวไม่มีผลกระทบต่อกระจายความชื้นในผลิตภัณฑ์ สุดท้ายอัตราส่วนรูปทรงเพิ่มขึ้นจะทำให้การกระจายอุณหภูมิและความชื้นเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การพาความร้อน การนำความร้อน สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล การกระจายความชื้นที่ผิว

Abstract

The purpose of the study was to consider the factors affecting the distributions of temperature and moisture of a product after drying using the finite element method with a convective boundary. The four parameters of this study were the moisture conductivity (k_m), mass transfer coefficient (h_m), surface moisture diffusivity (D_m) and aspect ratio (AR) which are in the range of 1.29×10^{-8} to 1.29×10^{-10} kg/m.s, 1.67×10^{-5} to 1.67×10^{-7} kg/m².s, 5×10^{-9} to 5×10^{-11} m²/s and 0.5 to 2, respectively. The rather high drying temperature in this study was 135 °C. The results found that the effective moisture conductivity and surface moisture diffusivity does not affect the product temperature. However, the increase of moisture conductivity and mass transfer coefficient result in the increase of the moisture distribution of product. In addition, surface moisture diffusivity did not affect moisture distribution. Moreover, moisture and temperature distributions of a product are increased when the aspect ratios increased.

Keywords: Finite element method, Convective boundary, Moisture conductivity, Mass transfer coefficient, Surface moisture diffusivity

¹ อาจารย์, สาขาวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ต.ในเมือง อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40000.

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ³อาจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ต.ขามเรียง อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150

¹ Lecturer, Department of Post- Harvest and Processing Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan Khonkaen Campus, Khon Kaen 40000.

² Assist. Prof., ³Lecture, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University Mahasarakham 44150.

* Corresponding author; Apaporn Jomlapelatikul, Department of Post- Harvest and Processing Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan Khonkaen Campus, Khon Kaen 40000.Thailand. apapornjom@yahoo.com

บทนำ

ปัจจุบันการอบแห้งผลิตภัณฑ์อาหารเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากการยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ อีกทั้งเป็นการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ให้สูงขึ้นอีกด้วย แต่ในการอบแห้งมีปัจจัยและตัวแปรของผลิตภัณฑ์หลายตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์ในการกระจายความชื้นและอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์

การศึกษาที่ผ่านมาจะศึกษาในส่วนของผลกระทบของค่าการกระจายความชื้น ซึ่งเป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อการกระจายความชื้นของผลิตภัณฑ์ในลักษณะ โดยรวม^{1,2,3} แต่ไม่ได้ศึกษาตัวแปรในเชิงลึกเช่น ค่าการนำความชื้น,สัมประสิทธิ์การส่งถ่ายมวล ค่าการแพร่ความชื้นที่ผิว และ อัตราส่วนรูปทรง การวิเคราะห์แบบจำลองสำหรับการเปลี่ยนแปลงของการกระจายความชื้นต่อการหดตัวของผลิตภัณฑ์อาหาร การวิเคราะห์แบบจำลองบนพื้นฐานการกระจายตัวของ Fick's second law มีการพัฒนาควบคู่ไปกับค่าคุณสมบัติการถ่ายเทมวล และ อธิบายจลศาสตร์การอบแห้งของการหดตัวของผลิตภัณฑ์อาหาร⁴ ค่าการกระจายที่พบว่าลดลงตามปริมาณความชื้นของใบชา ($p < 0.05$) ด้วยสภาวะการทดลองค่าเฉลี่ยการกระจายความชื้นอยู่ในช่วงของ 4.44×10^{-10} ถึง $8.60 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ จากผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองและการทดลองสามารถพิสูจน์ได้ว่าแบบจำลองสามารถประยุกต์ใช้ได้อย่างแม่นยำ สามารถทำนายเส้นกราฟการอบแห้งได้ขึ้นอยู่กัคุณสมบัติการถ่ายเทมวลในการหดตัวของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด เช่น ชา⁵

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อกระบวนการกระจายความชื้นและอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์อบแห้ง ได้แก่ ค่าการนำความชื้น สัมประสิทธิ์การส่งถ่ายมวล ค่าการแพร่ความชื้นที่ผิว และ อัตราส่วนรูปทรง โดยการสร้างแบบจำลอง ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ในแบบ 2 มิติ ซึ่งจะทำให้เห็นผลกระทบของตัวแปรในแต่ละตัวแปรต่อการกระจายความชื้นและอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์ ระหว่างการอบแห้งได้อย่างละเอียดและชัดเจน

วิธีการศึกษา

สมมติฐานสำหรับแบบจำลอง

แบบจำลองนี้สำหรับการเลียนแบบเพื่อประยุกต์ใช้กับแบบจำลองที่ขึ้นกับเวลาของอุณหภูมิและความชื้น กระบวนการกระจายภายในผลิตภัณฑ์อธิบายด้วยการส่งถ่ายความร้อนและการส่งถ่ายความชื้น

สมมติฐานหลักของแบบจำลองในการศึกษางานวิจัยนี้คือ

1. ไม่คิดปริมาตรการหดตัวของผลิตภัณฑ์
2. รูปทรงผลิตภัณฑ์เป็นทรงกระบอกสั้นและเป็นเนื้อเดียวกันทั้งผลิตภัณฑ์
3. การเคลื่อนที่ของความชื้นและการส่งถ่ายความร้อนเป็นแบบ 2 มิติ โดยพิจารณาในแนวรัศมีและแนวแกน
4. พิจารณาหนึ่งในสี่ส่วนของปริมาตรทรงกระบอกสั้น ตาม Figure 1
5. อุณหภูมิอากาศอบแห้งสัมผัสกับผิวผลิตภัณฑ์คงที่ เนื่องจากอัตราการไหลจำเพาะของอากาศสูง คุณสมบัติทางเทอร์โม-ฟิสิกส์ ในการส่งถ่ายสู่ผิวผลิตภัณฑ์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดทิศทางการไหลของอากาศ
6. ผลิตภัณฑ์สัมผัสกับอากาศอบแห้งอย่างทั่วถึงทุกด้าน

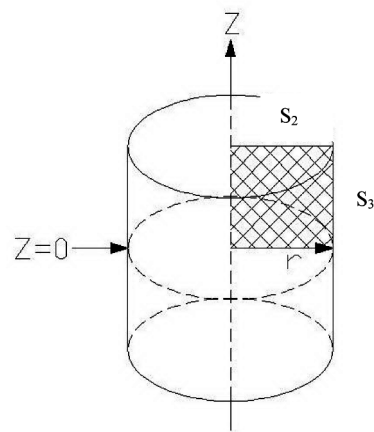


Figure 1 Geometry of the product

แบบจำลองการส่งถ่ายมวลและความร้อน

บนพื้นฐานของสมมติฐาน สมการทั่วไปของการส่งถ่ายมวลและความร้อน เงื่อนไขขอบเขตและสภาวะเริ่มต้นสำหรับปัญหาแบบ 2 มิติ ดังสมการต่อไปนี้

การส่งถ่ายความร้อน

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{k_T}{c_T} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k_T}{c_T} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right) \quad (1)$$

การส่งถ่ายความชื้น

$$\rho \frac{\partial m}{\partial t} = \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{k_m}{c_m} \frac{\partial m}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k_m}{c_m} \frac{\partial m}{\partial z} \right) \right) \quad (2)$$

สภาวะเริ่มต้น

$$T(r, Z)|_{t=0} = T_0 \quad (3)$$

$$m(r, Z)|_{t=0} = m_0 \quad (4)$$

สภาวะเงื่อนไขขอบเขต

ที่ผิวผลิตภัณฑ์ (s_2 และ s_3) ตั้งสมมุติฐานให้มีการสูญเสียความร้อนและความชื้นด้วยการพาความร้อน ตามสมการ (5) และ (6)

$$k_T \frac{\partial T}{\partial n} = h_T (T_a - T) + D_m \rho \lambda \frac{\partial m}{\partial n} \quad (5)$$

$$k_m \frac{\partial m}{\partial n} = h_m (m_e - m) \quad (6)$$

เมื่อ c_T คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ [J/(kg °C)], c_m คือ ค่าความจุความชื้นจำเพาะ [kg_{moisture}/kg_{product}], D_m คือ การแพร่ความชื้น [m²/s], h_T คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน [W/(m²°C)], h_m คือ สัมประสิทธิ์การส่งถ่ายมวล [kg/(m²s)], k_m คือ การนำความชื้น [kg_{moisture}/(m s)], k_T คือ การนำความร้อน [W/(m °C)], m และ m_0 คือ ความชื้นที่เวลา t และ เวลา 0 วินาทีตามลำดับ [เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก], m_0 คือ ปริมาณความชื้นสมดุลของอากาศ [เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก], n คือ แกรเดียนต์แนวตั้งฉากกับผิว, r และ z คือ ทิศทางตามทรงกระบอกในแนวรัศมีและแนวแกน [mm], t คือ เวลา [วินาที], T และ T_0 คือ อุณหภูมิที่เวลา t และ 0 วินาที [°C], T_a คือ อุณหภูมิอากาศ [°C], r คือ ความหนาแน่น [kg/m³], I คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ [J/kg]

แบบจำลองเหล่านี้มีการกระจายอุณหภูมิและความชื้นเริ่มต้นสม่ำเสมอตามสมการ (3) และ (4) มีการพาความร้อนที่ผิวพร้อมกับการสูญเสียความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอ ดังสมการ (5) และการส่งถ่ายมวลที่ผิว ดังสมการ (6) ผลิตภัณฑ์ตัวอย่างที่ใช้ เป็นทรงกระบอกที่มีความสูงกับรัศมี มีพื้นที่เท่ากับ 25 ตารางมิลลิเมตร ตามขอบเขตดังกล่าว ได้ทำการประมวลผลหาจำนวนกริดที่เหมาะสมที่ความแตกต่างของจำนวน กริด 4x4, 5x5, 8x4 และ 8x8 พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิและความชื้นไม่มีความแตกต่างกัน อาจจะเป็นเนื่องจากผลิตภัณฑ์มีขนาดเล็กมาก ดังนั้น จำนวนกริดจึงไม่มีผลกระทบต่อกระจายตัวของอุณหภูมิและความชื้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้จำนวนกริด 4x4 เนื่องจากทำให้การประมวลผลมีความรวดเร็ว

ผลและอภิปราย

ผลกระทบของการนำความชื้น (k_m) ต่อการกระจายอุณหภูมิและความชื้นภายในผลิตภัณฑ์

Figure 2 แสดงอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์หลังจากการอบแห้ง 900 วินาที ที่ความชื้นเริ่มต้น 85.8 เปอร์เซ็นต์

มาตรฐานเปียก อุณหภูมิต่ำที่สุด อยู่ที่มุมล่างซ้าย โดยมีอุณหภูมิประมาณ 114 °C และอุณหภูมิสูงสุดที่บริเวณมุมบนขวา จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มค่าการนำความชื้น อุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์ไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากการนำความชื้นไม่ได้เป็นตัวแปรในเทอมของการส่งถ่ายความร้อน ที่แสดงดังสมการที่ (1) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าการนำความชื้นจึงไม่มีผลกระทบต่อกระจายอุณหภูมิ Figure 3 แสดงการกระจายความชื้น ที่มีค่าการนำความชื้นที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าการนำความชื้นต่ำจะทำให้แห้งที่ผิวขอบผลิตภัณฑ์อย่างเดียว โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่มุม ส่วนภายในยังมีความชื้นสูงอยู่ สาเหตุมาจากการส่งถ่ายความร้อนคงที่ทำให้การระเหยคงที่ ดังนั้นถ้ามีการนำความชื้นภายในผลิตภัณฑ์น้อยการกระจายความชื้นจากในผลิตภัณฑ์ไปสู่ขอบนอกก็เกิดขึ้นได้ยาก ดังนั้นการระเหยจึงเกิดขึ้นได้ดีเฉพาะที่ขอบนอกผลิตภัณฑ์ เมื่อเปรียบเทียบ Figure 3 (a) และ 3(b) การนำความชื้นของ Figure 3 (a) มากกว่า Figure 3 (b) 10 เท่า แต่ทำให้ความชื้นที่ศูนย์กลางผลิตภัณฑ์ลดลงต่ำกว่าความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์

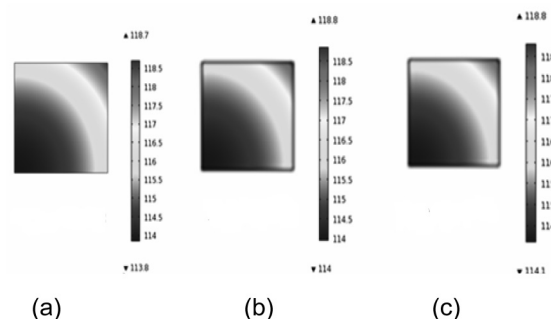


Figure 2 Temperature field after 900 s at different moisture conductivities (k_m): (a) $k_m = 1.29 \times 10^{-8}$ kg/(m s), (b) $k_m = 1.29 \times 10^{-9}$ kg/(m s) and (c) $k_m = 1.29 \times 10^{-10}$ kg/(m s)

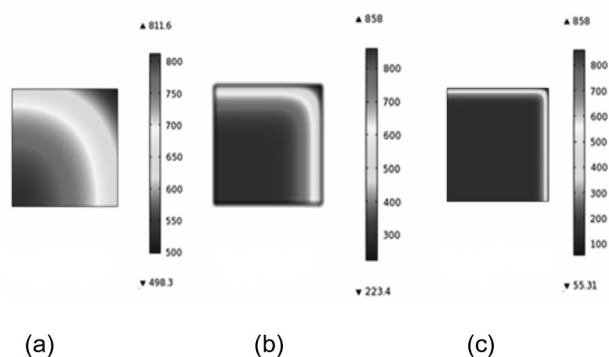


Figure 3 Moisture concentration field after 900 s at different moisture conductivities (k_m): (a) $k_m = 1.29 \times 10^{-8}$ kg/(m s), (b) $k_m = 1.29 \times 10^{-9}$ kg/(m s) and (c) $k_m = 1.29 \times 10^{-10}$ kg/(m s)

ผลกระทบของสัมประสิทธิ์การส่งถ่ายมวล (h_m) ต่อการกระจายอุณหภูมิและความชื้นภายในผลิตภัณฑ์

การเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลมีผลทำให้มีพื้นที่ที่มีอุณหภูมิสูงน้อยกว่า ดังแสดงใน Figure 4 สัมประสิทธิ์การส่งถ่ายสูงขึ้น ทำให้เกิดการระเหยได้ดี ดังนั้น ความร้อนจึงมีผลกระทบน้อยต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ผิว Figure 5 แสดงปริมาณความชื้นของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลที่แตกต่างกัน การเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเป็นสาเหตุทำให้การกระจายความชื้นเพิ่มขึ้น

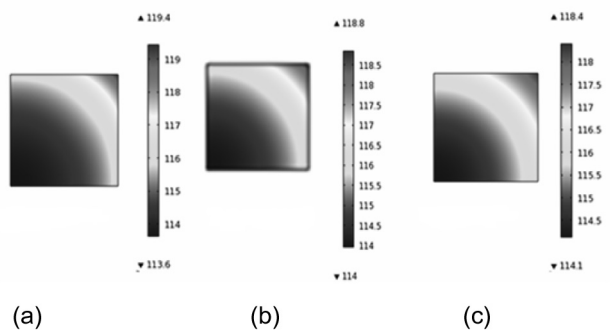


Figure 4 Temperature field after 900 s at different mass transfer coefficients (h_m): (a) $h_m = 1.67 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$, (b) $h_m = 1.67 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ and (c) $h_m = 1.67 \times 10^{-7} \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$

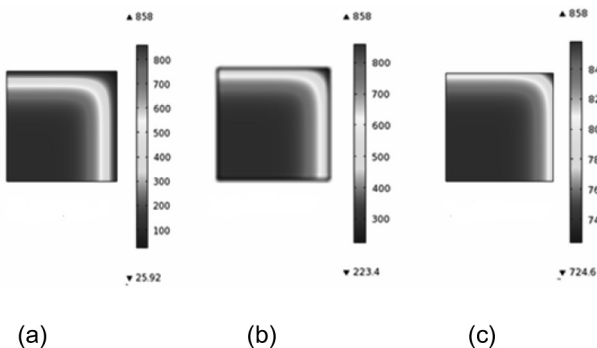


Figure 5 Moisture Concentration field after 900s at different mass transfer coefficients (h_m): (a) $h_m = 1.67 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$, (b) $h_m = 1.67 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ and (c) $h_m = 1.67 \times 10^{-7} \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$

ผลกระทบของการกระจายความชื้นที่ผิว (D_m) ต่อการกระจายอุณหภูมิและความชื้นภายในผลิตภัณฑ์

การกระจายความชื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นแต่อุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง Figure 6 เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีขนาดเล็ก และ

การกระจายความชื้นที่ผิวจะมีผลกระทบเฉพาะที่ผิวอย่างเดียว ดังนั้นการกระจายความชื้นที่ผิวจึงไม่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์ Figure 7 แสดงปริมาณความชื้นของการกระจายความชื้นที่ผิวที่แตกต่างกัน การกระจายความชื้นที่ผิวมากขึ้นแต่ปริมาณความชื้นไม่แตกต่างกัน มีผลมาจากขนาดของผลิตภัณฑ์เล็กจึงไม่มีผลกระทบต่อการกระจายความชื้น

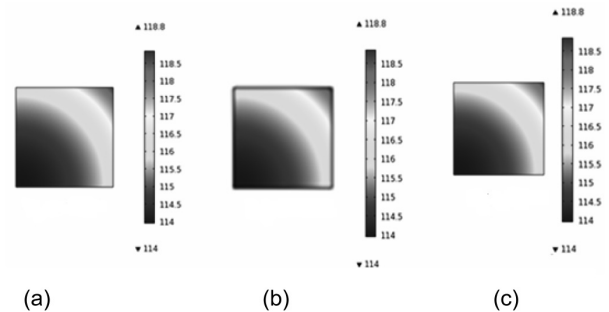


Figure 6 Temperature field after 900 s at different surface moisture diffusivities (D_m): (a) $D_m = 5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, (b) $D_m = 5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ and (c) $D_m = 5 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$

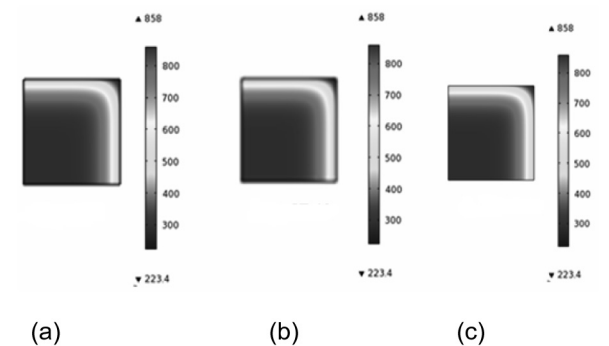


Figure 7 Moisture concentration field after 900 s at different surface moisture diffusivities (D_m): (a) $D_m = 5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, (b) $D_m = 5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ and (c) $D_m = 5 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$

ผลกระทบของอัตราส่วนรูปทรง (AR) ต่อการกระจายอุณหภูมิและความชื้นภายในผลิตภัณฑ์

การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนรูปทรงทำให้การกระจายอุณหภูมิและความชื้นสูงขึ้น สิ่งนี้สามารถอธิบายได้ว่าอัตราส่วนรูปทรงสูงจะมีพื้นที่ผิวของทรงกระบอกสั้นมากกว่า ดังแสดงใน Figure 8 และ 9 ใน Figure 8 ให้แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนรูปทรงมากมีผลทำให้อุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์สูง สามารถอธิบายได้ว่าอัตราส่วนรูปทรงสูงจะมีพื้นที่สัมผัสกับความร้อนมากเมื่อคิดเป็นพื้นที่ที่ทรงกระบอก สำหรับการกระจายความชื้นก็มีเหตุผลเดียวกันกับการกระจายอุณหภูมิ

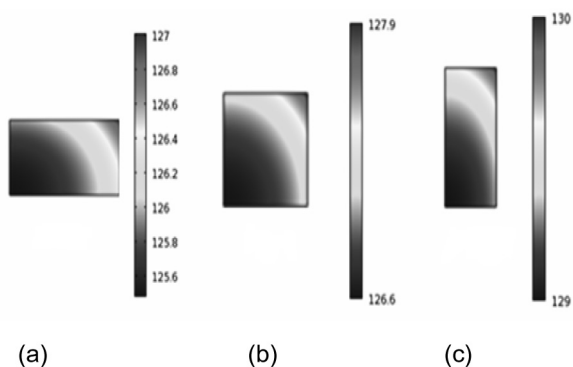


Figure 8 Temperature field after 900 s at different aspect ratios (AR): (a) AR = 0.5 (b) AR = 1 and (c) AR = 2

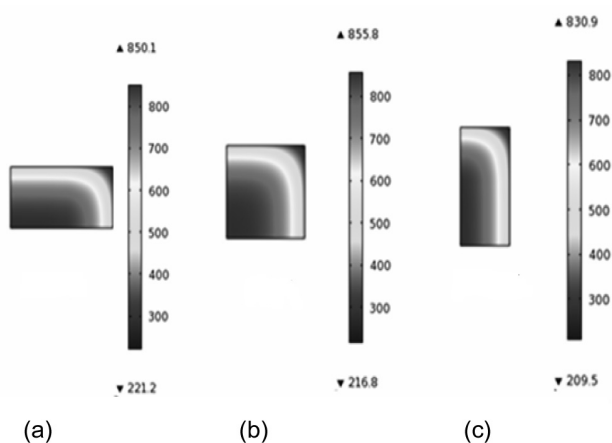


Figure 9 Moisture concentration field after 900 s at different aspect ratios (AR): (a) AR = 0.5 (b) AR = 1 and (c) AR = 2

สรุป

จากการศึกษา สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ค่าการนำความร้อน (k_m) เพิ่มขึ้น มีผลทำให้อุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์ไม่แตกต่างกัน แต่จะมีผลทำให้การกระจายตัวความชื้นสูงขึ้น
2. การเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์การส่งถ่ายมวล (h_m) มีผลทำให้พื้นที่ที่มีอุณหภูมิสูง มีพื้นที่น้อยลง และเป็นสาเหตุทำให้การกระจายตัวของความชื้นสูงขึ้น
3. การเพิ่มขึ้นของการกระจายความชื้นที่ผิว (D_m) ไม่มีผลกระทบต่อการกระจายอุณหภูมิและความชื้นภายในผลิตภัณฑ์
4. การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนรูปทรง (AR) นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของการกระจายอุณหภูมิและความชื้นภายในผลิตภัณฑ์

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม และ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานวิทยาเขตขอนแก่น ที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

1. Ahmet, K. Orhan, A. and Cevdet, D. Experimental and theoretical analysis of drying carrot . Journal of Food Engineering. 2009; pp. 285–295.
2. Haiqing Chen, Bradley P. Marks, and Rong Y. Murphy, Modeling coupled heat and mass transfer for convection cooking of chicken patties, USA. 1999; pp. 139–146.
3. Kolawole O. et al. Effect of pretreatment and temperature on air-drying of Dioscorea alata and Dioscorea rotundata slices. Journal of Food Engineering . 2007; pp. 1002–1010.
4. Shilpi, G. Sabrina, C. and Nissreen, A. Effect of different drying temperatures on the moisture and phytochemical constituents of edible Irish brown seaweed, Food Science and Technology. 2011; pp. 1266–127.
5. Ruiz, A. Cuadros, F. and Lopez, F. Convective drying characteristics of sludge from treatment plants in tomato processing industries, Food and Bio products Processing, Spain. 2012; pp. 224–234.