



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การวิเคราะห์สมรรถนะของฉนวนหลากหลายชนิดภายในเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติ โดยใช้วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ

Analysis of insulation performance in various types inside natural convection solar dryers by 3-D finite element method

อิสราภรณ์ อมรสวัสดิ์วัฒนา^{1*} สมศักดิ์ วัชรคุปต์²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมืองัดและอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

²สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000

Issaraporn Amornsawatwattana^{1*} Somsak Watcharakhup²

¹Department of Instrumentation and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok 10800

²Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima 30000

* Corresponding author.

E-mail: issaraporn.a@eng.kmutnb.ac.th; Telephone: 08 9453 8344

วันที่รับบทความ 18 พฤศจิกายน 2563; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 15 ธันวาคม 2563; วันที่ตอบรับบทความ 26 มกราคม 2564

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิภายในเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติ ซึ่งจะแสดงอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ได้ใช้วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ ซึ่งพัฒนาขึ้นเอง ด้วยโปรแกรม MATLAB พร้อมแสดงผลทางกราฟิกของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติ รวมทั้งประยุกต์ใช้การประมาณค่าแบบย้อนหลังที่ขึ้นกับเวลา ซึ่งพิจารณาฉนวนที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ ฉนวนโพลียูรีเทน ฉนวนโพลีสไตรีน และฉนวนใยแก้ว โดยได้ศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติ เมื่อเปลี่ยนชนิดของฉนวน และทำการวิเคราะห์สมรรถนะของฉนวนที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติ พบว่าการเลือกใช้ฉนวนโพลียูรีเทนทำให้อุณหภูมิภายในเตาอบเท่ากับ 64.92 °C และภายในเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติเท่ากับ 61.80 °C ซึ่งมีค่าสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับฉนวนโพลีสไตรีนและฉนวนใยแก้ว

คำสำคัญ

ฉนวน เตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติ อุณหภูมิ การถ่ายเทความร้อน วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ

Abstract

This paper proposes a mathematical model of temperature inside natural convection solar dryers that performed in a second-order partial difference equations. The simulation that was applied to the development 3-D finite element method using MATLAB program displayed graphically of the natural convection solar dryers. To solve this time-dependent system, a step-by-step numerical integration of the backward difference algorithm is applied. To compare used different

3 types of insulation are Polyurethane, Polystyrene and Glass wool. Changing the type of insulation and analyze the performance of insulation that affects the temperature distribution of food and natural convection solar dryers, It was found that polyurethane insulation made the temperature of food is 64.92°C and natural convection solar dryers is 61.80°C at the highest temperature compared with polystyrene insulation and glass wool insulation.

Keywords

insulation; natural convection solar dryers; temperature; heat transfer; 3-D finite element method

1. คำนำ

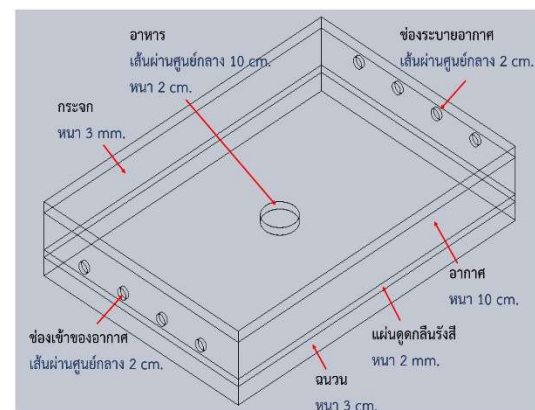
การอบอาหารด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เป็นการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ในรูปความร้อนรูปแบบหนึ่งที่มีประสิทธิภาพ ไม่เสียค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงในการใช้งาน ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และลดการใช้พลังงานได้ [1] ซึ่งการเลือกชนิดของฉนวนในการผลิตเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาตินั้นเป็นสิ่งสำคัญมาก เนื่องจากคุณสมบัติของฉนวนกันความร้อนที่ดีจะมีค่าการนำความร้อนต่ำ ทำให้ไม่นำความร้อนจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่งได้ และทำหน้าที่เป็นตัวกั้นกลางแยกระหว่างความร้อนและความเย็นให้อยู่คนละฝั่ง ปัจจัยหนึ่งที่สำคัญมากที่ทำให้อุณหภูมิของอาหารและเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติภายในเตาอบพลังงานสูง คือการเลือกใช้ฉนวนกันความร้อนที่เหมาะสม [2]

การวิเคราะห์ปัญหาของอุณหภูมินั้นโดยปกติแล้วจะสามารถอธิบายได้ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อย เป็นไปได้ยากที่จะหาผลเฉลยแม่นยำตรงได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข อีกทั้งสมรรถนะของคอมพิวเตอร์ที่สูงขึ้นจึงทำให้การคำนวณเชิงตัวเลขสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ (finite element method: FEM) เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างมากและมีประสิทธิภาพสูงสุด จะใช้กับสมการที่อยู่ในรูปอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation: PDE) เช่น สมการของอุณหภูมิ ซึ่งในบทความวิจัยนี้ได้ใช้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ (3-D FEM) [3,4] ดังนั้นบทความนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะของฉนวนภายในอาหารและเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติ เมื่อใช้ฉนวนที่แตกต่างกัน โดยใช้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ มาคำนวณ เพื่อวิเคราะห์ว่าฉนวนชนิดใดนั้นสามารถทำให้อุณหภูมิภายในอาหารและเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติมีอุณหภูมิสูงที่สุด

2. เตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติ

เตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติ หลักการทำงานคือ เมื่อแสงอาทิตย์ส่องผ่านกระจก ซึ่งกระจกนั้นจะทำหน้าที่ป้องกันฝุ่นและยังป้องกันการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อน จากนั้นแผ่นดูดกลืนรังสีทำหน้าที่สะสมความร้อนและดูดกลืนความร้อน และถ่ายเทความร้อนไปที่อาหาร ทำให้อาหารมีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยอากาศร้อนจะลอยตัวออกทางช่องด้านบนของเตาอบ อากาศเย็นภายนอกจะไหลเข้าทางช่องด้านล่างของเตาอบไปแทนที่อากาศร้อน ภายในเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติจะมีอุณหภูมิประมาณ 60°C [1,5] ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดของอาหาร ชนิดของแผ่นดูดกลืนรังสี และคุณสมบัติของฉนวน ซึ่งบทความวิจัยนี้จะวิเคราะห์สมรรถนะของฉนวนเพื่อเปรียบเทียบว่าฉนวนชนิดใดนั้นสามารถทำให้อุณหภูมิของอาหารภายในเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติมีอุณหภูมิสูงที่สุด

เตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติ มีขนาดความยาว 100 ซม. กว้าง 70 ซม. แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติ [1,5]

จากรูปที่ 1 มีส่วนประกอบของเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติ ดังนี้ [1,5]

- กระฉกใส ทำหน้าที่ป้องกันฝุ่นและยังป้องกันการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อน
- ช่องระบายอากาศ โดยอากาศร้อนจะลอยตัวออกจากช่องระบายอากาศด้านบนของเตาอบ
- ช่องเข้าของอากาศ ทำหน้าที่นำอากาศเย็นจากภายนอกเข้าทางช่องด้านล่างของเตาอบ
- แผ่นดูดกลืนรังสีทำจากอะลูมิเนียม ทำหน้าที่เป็นตัวดูดกลืนพลังงานความร้อนภายในเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ จากนั้นจะถ่ายเทความร้อนไปให้อากาศ และอากาศจะถ่ายเทความร้อนไปให้อาหาร
- ฉนวน ทำหน้าที่ป้องกันการสูญเสียความร้อนออกภายนอกเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์

3. แบบจำลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิภายในเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติ

ปัญหาการถ่ายเทความร้อนนั้นจะแสดงอยู่ในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การกระจายตัวของอุณหภูมิแบบ 3 มิติ แสดงดังสมการที่ (1) [6,7]

$$k \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} - \rho c \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

โดยที่

Q คือ ปริมาณความร้อนที่ผลิตได้เอง (W/m^3)

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($W/m.K$)

T คือ อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)

c คือ ความร้อนจำเพาะ ($J/kg.K$)

ρ คือ ความหนาแน่นมวล (kg/m^3)

u คือ ความเร็วในทิศทาง x (m/s)

v คือ ความเร็วในทิศทาง y (m/s)

w คือ ความเร็วในทิศทาง z (m/s)

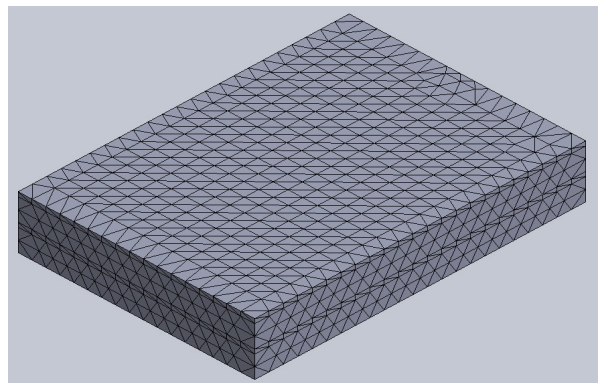
4. การคำนวณอุณหภูมิด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ

ในการคำนวณอุณหภูมิภายในเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น จะต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิที่อยู่ใน

รูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ซึ่งแสดงไว้ในสมการที่ (1) ดังนั้นการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึงถูกนำมาใช้ ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

4.1 อิลลิเมนต์ของระบบศึกษา

ในการออกแบบพื้นที่ศึกษาที่ใช้ในการจำลองผลค่าอุณหภูมิภายในเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะครอบคลุมทั้งหมดของแบบจำลอง โดยการแบ่งพื้นที่ของปัญหาเป็นอิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อ (tetrahedron) ตลอดปริมาตรเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติที่ศึกษา ด้วยโปรแกรมการสร้างกริดชื่อว่า Solidworks ประกอบด้วยจำนวนจุดต่อ 2,954 จุดต่อ และจำนวนอิลลิเมนต์ 13,919 อิลลิเมนต์ ซึ่งเป็นจำนวนจุดต่อและอิลลิเมนต์ที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากถ้ามีจำนวนจุดต่อและอิลลิเมนต์มากกว่าค่าดังกล่าว ผลการจำลองจะไม่เปลี่ยนแปลงจากเดิม และทำให้ใช้เวลาในการจำลองผลนานขึ้น ส่วนถ้าจำนวนจุดต่อและอิลลิเมนต์น้อยกว่าค่าดังกล่าว จะทำให้ผลการจำลองไม่เป็นไปตามทฤษฎี แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การแบ่งอิลลิเมนต์เตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติรูปทรงสี่หน้า

4.2 การสร้างสมการของอิลลิเมนต์

การสร้างสมการระดับอิลลิเมนต์ได้ประยุกต์ใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (method of weighted residuals) ของกาเลอร์คิน (Galerkin) โดยฟังก์ชันน้ำหนักจะมีค่าเท่ากับฟังก์ชันประมาณภายใน (shape function) โดยผลลัพธ์ที่พิกัดใด ๆ แสดงดังสมการที่ (2) [3,4]

$$T(x, y, z) = T_1 N_1 + T_2 N_2 + T_3 N_3 + T_4 N_4 \quad (2)$$

โดยที่ N_n , $n = 1, 2, 3$, และ 4 คือฟังก์ชันการประมาณภายในอีลิเมนต์

T_n , $n = 1, 2, 3$, และ 4 คือ ผลลัพธ์ของอุณหภูมิในแต่ละจุดต่อ
ซึ่งในกรณีอีลิเมนต์รูปทรงสี่เหลี่ยมที่แสดงในสมการที่ (3)

$$N_i = \frac{1}{6V} (a_i + b_i x + c_i y + d_i z) \quad (3)$$

และ V คือปริมาตรของรูปทรงสี่เหลี่ยมของแต่ละอีลิเมนต์หาได้จากดีเทอร์มิแนนต์ของสัมประสิทธิ์แสดงในสมการที่ (4)

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad (4)$$

สมการที่ (5) เป็นสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่ง โดยค่าของอุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เกิดจากการอินทิเกรตและจะได้ผลลัพธ์ของอุณหภูมิซึ่งแสดงอยู่ในรูปของเมตริกซ์ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้การแก้ปัญหาภายใต้สถานะชั่วคราวนี้ด้วยวิธีผลต่างสลับเบื้องย้อนหลัง [8-10]

$$[C]_{4 \times 4} \left\{ \dot{T} \right\}_{4 \times 1} + [K_c] + [K_v] + [K_h]_{4 \times 4} \{T\}_{4 \times 1} = \{Q_o\}_{4 \times 1} + \{Q_h\}_{4 \times 1} \quad (5)$$

$$[C]_{4 \times 4} = \frac{\rho c V}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$[K_c]_{4 \times 4} = \frac{k}{36V} \begin{bmatrix} b_1 b_1 + c_1 c_1 + d_1 d_1 & b_1 b_2 + c_1 c_2 + d_1 d_2 & b_1 b_3 + c_1 c_3 + d_1 d_3 & b_1 b_4 + c_1 c_4 + d_1 d_4 \\ b_2 b_2 + c_2 c_2 + d_2 d_2 & b_2 b_3 + c_2 c_3 + d_2 d_3 & b_2 b_4 + c_2 c_4 + d_2 d_4 \\ b_3 b_3 + c_3 c_3 + d_3 d_3 & b_3 b_4 + c_3 c_4 + d_3 d_4 \\ b_4 b_4 + c_4 c_4 + d_4 d_4 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Sym

$$[K_h]_{4 \times 4} = \frac{hV}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$[K_v]_{4 \times 4} = \frac{\rho c}{36} \begin{bmatrix} ub_1 + vc_1 + wd_1 & ub_2 + vc_2 + wd_2 & ub_3 + vc_3 + wd_3 & ub_4 + vc_4 + wd_4 \\ ub_1 + vc_1 + wd_1 & ub_2 + vc_2 + wd_2 & ub_3 + vc_3 + wd_3 & ub_4 + vc_4 + wd_4 \\ ub_1 + vc_1 + wd_1 & ub_2 + vc_2 + wd_2 & ub_3 + vc_3 + wd_3 & ub_4 + vc_4 + wd_4 \\ ub_1 + vc_1 + wd_1 & ub_2 + vc_2 + wd_2 & ub_3 + vc_3 + wd_3 & ub_4 + vc_4 + wd_4 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\{Q_h\}_{4 \times 1} = \frac{hT_\infty V}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\{Q_o\}_{4 \times 1} = \frac{QV}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

โดยที่

h คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (W/m^2K)

T_∞ คือ อุณหภูมิของตัวกลางสำหรับการพาความร้อน ($^{\circ}C$)

5. การแก้ปัญหาในสถานะชั่วคราว

เนื่องจากอุณหภูมิมักมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ในบทความนี้เป็นการแก้ปัญหาภายใต้สถานะชั่วคราว ซึ่งใช้วิธีความสัมพันธ์เวียนบังเกิด โดยจะมีลักษณะของผลลัพธ์ขึ้นอยู่กับค่า β ที่เลือกใช้ แสดงในสมการที่ (12) โดย Δt คือค่าของช่วงเวลา (time step) โดยให้ $\beta = 1$ เรียกว่าวิธีผลต่างสลับเบื้องย้อนหลัง (backward difference) แสดงดังสมการที่ (13) เนื่องจากวิธีนี้รับประกันการลู่เข้าของผลลัพธ์ และผลลัพธ์จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง [8-10]

$$\beta \left\{ \dot{T} \right\}^{t+\Delta t} + (1/\beta) \left\{ \dot{T} \right\}^t = \frac{\{T\}^{t+\Delta t} - \{T\}^t}{\Delta t} \quad (12)$$

$$\left\{ \dot{T} \right\}^{t+\Delta t} = \frac{\{T\}^{t+\Delta t} - \{T\}^t}{\Delta t} \quad (13)$$

จากการเลือกใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องย้อนหลังสมการที่ (5) จึงพัฒนามาเป็นสมการที่ (14) จากนั้นแทนค่าสมการที่ (13) ลงในสมการที่ (14) จะได้สมการเชิงเส้นเมื่อพิจารณาปัญหา ภายใต้สถานะชั่วคราว ดังสมการที่ (15)

$$[C]\{\dot{T}\}^{t+\Delta t} + [[K_c] + [K_h] + [K_r]]\{T\}^{t+\Delta t} = \{\{Q_o\} + \{Q_h\}\}^{t+\Delta t} \quad (14)$$

$$\left(\frac{1}{\Delta t}[C] + [[K_c] + [K_h] + [K_r]]\right)\{T\}^{t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta t}[C]\{T\}^t + \{\{Q_o\} + \{Q_h\}\}^{t+\Delta t} \quad (15)$$

6. พารามิเตอร์และเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการจำลองผล

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผลแสดงในตารางที่ 1 และ เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการจำลองผลแสดงในตารางที่ 2

จากตารางที่ 2 ปริมาณความร้อนที่ผลิตได้เองในแผ่น ดูดกลืนรังสี เท่ากับ $241,428 \text{ W/m}^3$ ซึ่งได้จากการวัดความเข้มแสงอาทิตย์ด้วยไพรานอมิเตอร์ ซึ่งค่าความเข้มแสงมีค่าเท่ากับ 507 W/m^2 แล้วนำไปหารด้วยปริมาตรของกระจก ซึ่ง กระจกมีความกว้าง 70 cm. ยาว 100 cm. และหนา 3 mm. [7,12]

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผล [2,6,7]

วัสดุ	k (W/m·K)	c (J/kg·K)	ρ (kg/m ³)
กระจก	1.05	840	2,600
แผ่นดูดกลืนรังสี (อะลูมิเนียม)	205	896	2,700
อากาศ	0.024	1,005	1.2
อาหาร (น้ำ)	0.6	4,187	1,000
ฉนวนโพลียูรีเทน	0.017	1,590	35
ฉนวนโพลีสไตรีน	0.035	1,430	34
ฉนวนใยแก้ว	0.041	840	65

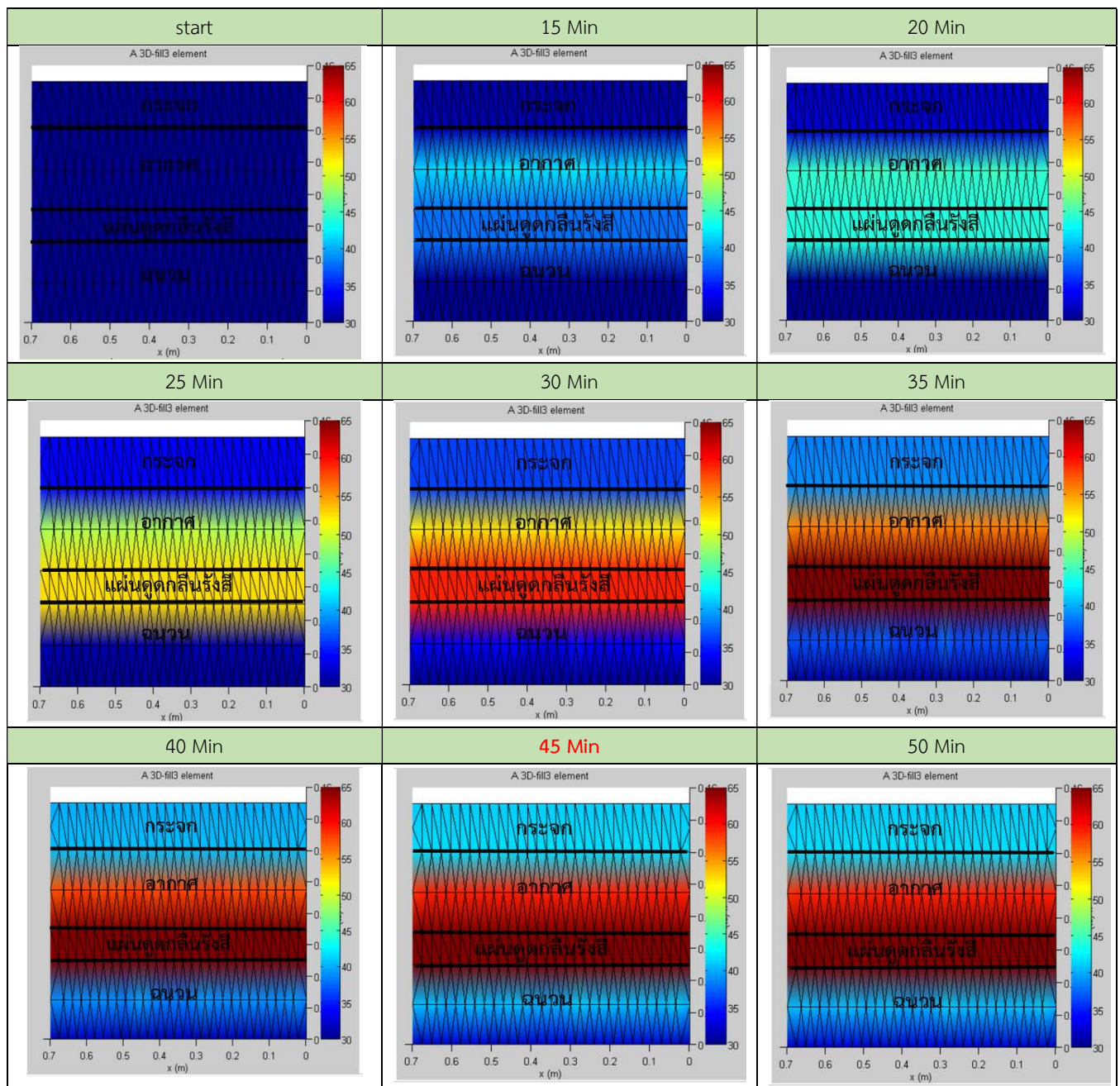
ตารางที่ 2 เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการจำลองผล

อุณหภูมิเริ่มต้น $T(t=0)$ [1]	30 °C
อุณหภูมิของตัวกลางสำหรับการพาความร้อน (T_∞) [1]	30 °C
สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ของอากาศภายใน [11]	5 W/m ² K
สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ของอากาศภายนอก [11]	20 W/m ² K
ความเร็วลม [1]	0.45 m/s
ปริมาณความร้อนที่ผลิตได้เอง ในแผ่นดูดกลืนรังสี [7,12]	241,428 W/m ³

จากตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนอากาศ ภายนอกมีค่าเท่ากับ $20 \text{ W/m}^2\text{K}$ ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ และสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศภายใน $5 \text{ W/m}^2\text{K}$ เนื่องจากภายในเตามีการกำหนดลมเข้าทางช่องเข้าอากาศและลมออกช่องระบายอากาศ [11]

7. ผลการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิเตาอบ พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติ

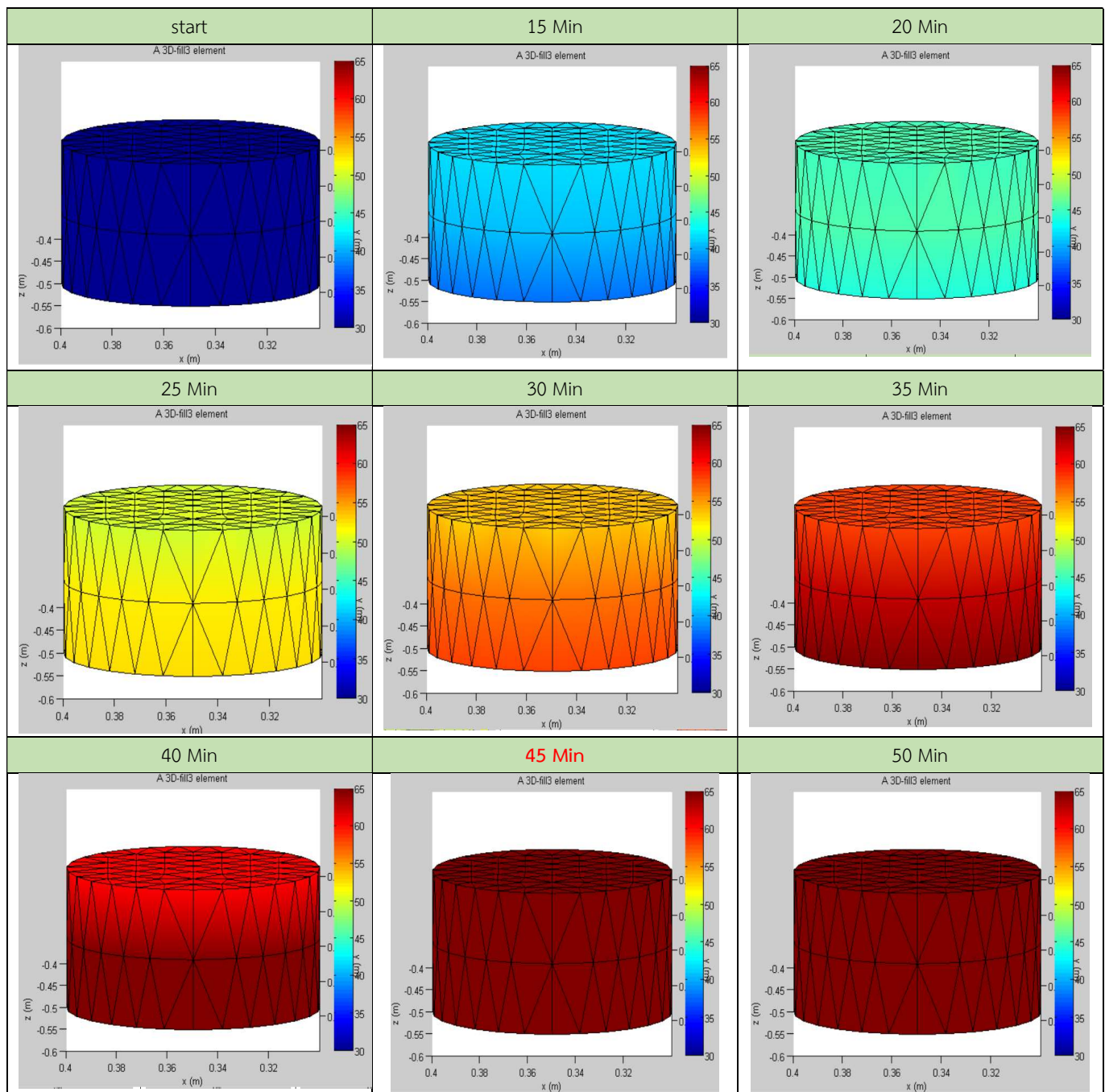
การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์จะใช้ MATLAB ในการพัฒนาโปรแกรมไพน์ทอลลิเมนต์ เพื่อกำหนดการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติ พร้อมผลทางกราฟิกของอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ซึ่งแปรตามเวลา ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติ แสดงดังรูปที่ 3, รูปที่ 5, และรูปที่ 7 เมื่อพิจารณาฉนวนโพลียูรีเทน ฉนวนโพลีสไตรีน และฉนวนใยแก้ว ตามลำดับ และผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอาหารแสดงดังรูปที่ 4, รูปที่ 6, และรูปที่ 8 เมื่อพิจารณาฉนวนโพลียูรีเทน ฉนวนโพลีสไตรีน และฉนวนใยแก้ว ตามลำดับ และผลการกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ยของอาหารภายในเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติ เมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว ณ เวลา 45 นาที แสดงดังตาราง ที่ 3



รูปที่ 3 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติ เมื่อพิจารณาฉนวนโพลียูรีเทน

รูปที่ 3 คือผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติ เมื่อพิจารณาฉนวนโพลียูรีเทน โดยกำหนดให้ค่าเงื่อนไขเริ่มต้นเท่ากับ 30°C พบว่าเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติ จะทำงานเมื่อมีแสงอาทิตย์ส่องลงมาผ่านแผ่นกระฉก มายังแผ่นดูดกลืนรังสีเพื่อดูดกลืนความร้อน แผ่นดูดกลืนรังสีจะเริ่มสะสมความร้อน และถ่ายเทความร้อนไปให้

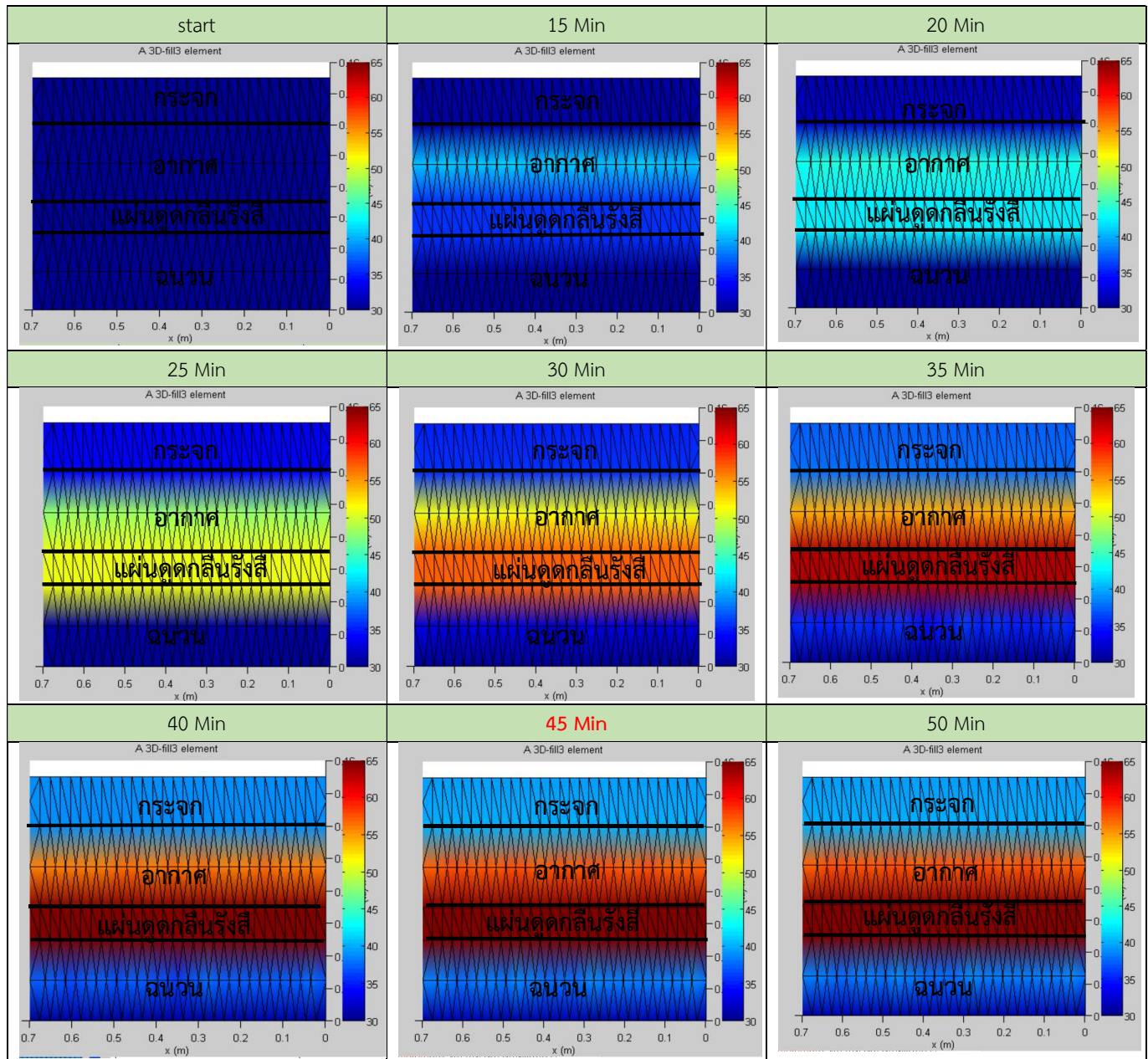
ที่อากาศด้านบน จากนั้นอากาศจะถ่ายเทความร้อนไปยังอาหารทำให้อาหารมีอุณหภูมิสูงขึ้น และฉนวนทำหน้าที่ป้องกันการสูญเสียความร้อนออกสู่ภายนอก และจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 45 นาที ที่อุณหภูมิของอากาศ 61.80°C ซึ่งผลการจำลองนั้นสอดคล้องกับหลักการทำงานของเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ [1,5] และเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์โดยทั่วไปมีอุณหภูมิประมาณ 60°C [1,5]



รูปที่ 4 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอาหาร เมื่อพิจารณาณนวนโพลียูรีเทน

รูปที่ 4 คือผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอาหาร เมื่อพิจารณาณนวนโพลียูรีเทน โดยกำหนดให้ค่าเงื่อนไข เริ่มต้นเท่ากับ 30°C จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของอาหารจะ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนของแผ่นดुकกลืน รังสีมายังอากาศ จากนั้นอากาศจะถ่ายเทความร้อนไปยัง

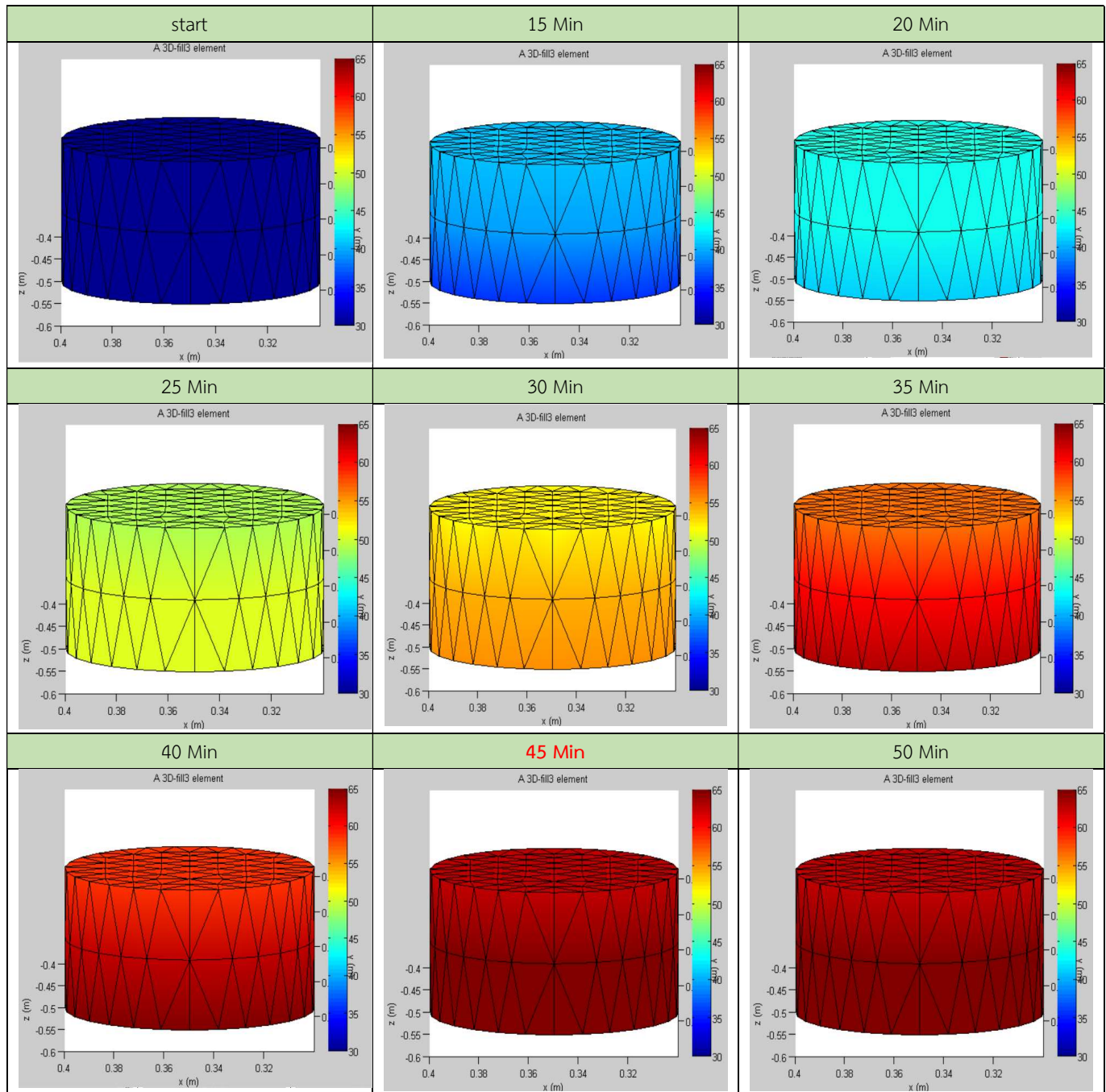
อาหาร และอาหารจะสะสมความร้อนตลอดเวลาที่แสงแดด ส่องลงมายังเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบ ธรรมชาติ และจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 45 นาที ที่อุณหภูมิ 64.92°C



รูปที่ 5 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติ เมื่อพิจารณาฉนวนโพลีสไตรีน

รูปที่ 5 คือผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติ เมื่อพิจารณาฉนวนฉนวนโพลีสไตรีน โดยกำหนดให้ค่าเงื่อนไขเริ่มต้นเท่ากับ 30°C พบว่าเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติ จะทำงานเมื่อมีแสงอาทิตย์ส่องลงมาผ่านแผ่นกระเจก มายังแผ่นดูดกลืนรังสีเพื่อดูดกลืนความร้อน แผ่นดูดกลืนรังสีจะเริ่มสะสมความร้อนและถ่ายเทความร้อน

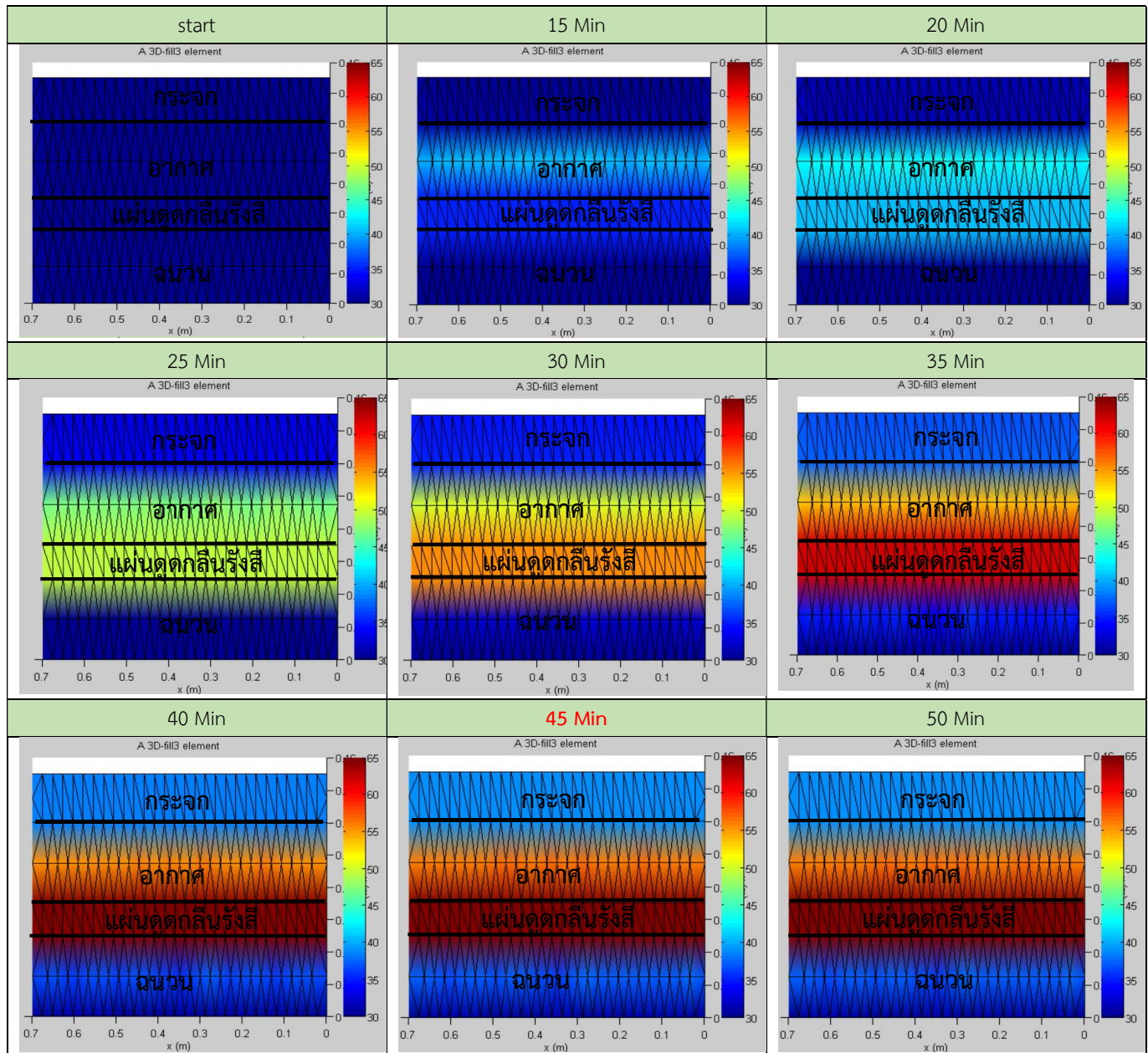
ไปให้อากาศด้านบน จากนั้นอากาศจะถ่ายเทความร้อนไปยังอาหารทำให้อาหารมีอุณหภูมิสูงขึ้น และฉนวนทำหน้าที่ป้องกันการสูญเสียความร้อนออกสู่ภายนอก และจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 45 นาที ที่อุณหภูมิของอากาศ 58.17°C ซึ่งผลการจำลองนั้นสอดคล้องกับหลักการทำงานของเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ [1,5] และเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์โดยทั่วไปมีอุณหภูมิประมาณ 60°C [1,5]



รูปที่ 6 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอาหาร เมื่อพิจารณาณวินโพลีสไตรีน

รูปที่ 6 คือผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอาหาร เมื่อพิจารณาณวินโพลีสไตรีนโดยกำหนดให้ค่าเงื่อนไขเริ่มต้นเท่ากับ 30°C จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของอาหารจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนของแผ่นดुकกลืนรังสีมายังอากาศ จากนั้นอากาศจะถ่ายเทความร้อนไปยังอาหาร

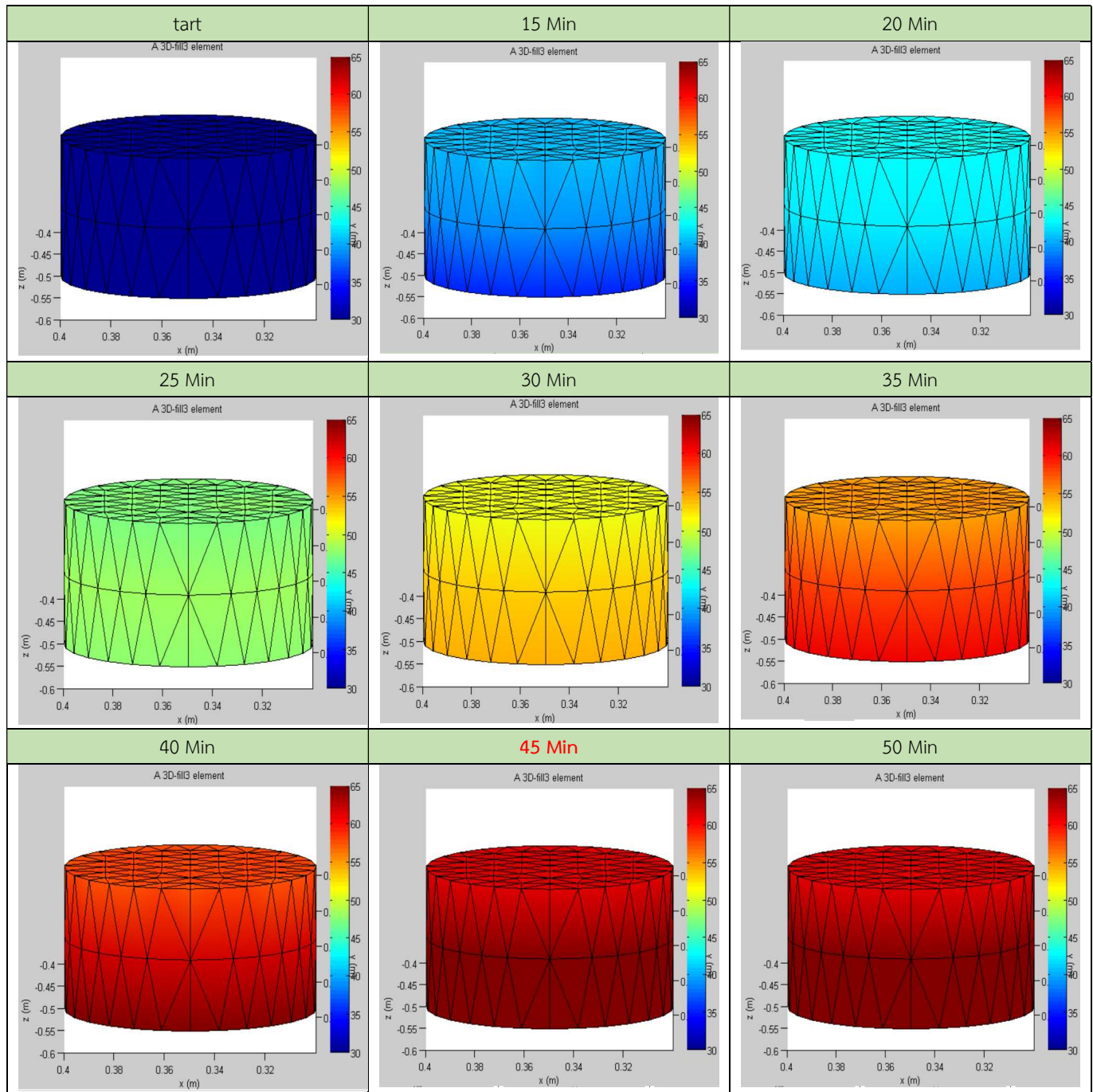
และอาหารจะสะสมความร้อนตลอดเวลาที่แสงแดดส่องลงมายังเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติ และจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 45 นาที ที่อุณหภูมิ 61.38°C



รูปที่ 7 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติ เมื่อพิจารณาฉนวนใยแก้ว

รูปที่ 7 คือผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติ เมื่อพิจารณาฉนวนใยแก้ว โดยกำหนดให้ค่าเงื่อนไขเริ่มต้นเท่ากับ 30°C พบว่าเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติ จะทำงานเมื่อมีแสงอาทิตย์ส่องลงมาผ่านแผ่นกระเจก มายังแผ่นดูดกลืนรังสีเพื่อดูดกลืนความร้อน แผ่นดูดกลืนรังสีจะเริ่มสะสมความร้อนและถ่ายเทความร้อนไปให้

ที่อากาศด้านบน จากนั้นอากาศจะถ่ายเทความร้อนไปยังอาหารทำให้อาหารมีอุณหภูมิสูงขึ้น และฉนวนทำหน้าที่ป้องกันการสูญเสียความร้อนออกสู่ภายนอก และจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 45 นาที ที่อุณหภูมิของอากาศ 57.68°C ซึ่งผลการจำลองนั้นสอดคล้องกับหลักการทำงานของเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ [1,5] และเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์โดยทั่วไปมีอุณหภูมิประมาณ 60°C [1,5]



รูปที่ 8 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอาหาร เมื่อพิจารณาณวินาที

รูปที่ 8 คือผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอาหาร เมื่อพิจารณาณวินาที โดยกำหนดให้ค่าเงื่อนไขเริ่มต้น เท่ากับ 30°C จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของอาหารจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนของแผ่นดัดกลิ้งรังสี

มายังอาหาร และอาหารจะสะสมความร้อนตลอดเวลาที่ แสงแดดส่องลงมายังเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติ และจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 45 นาที ที่ อุณหภูมิ 61.16°C

ตารางที่ 3 ผลการกระจายตัวอุณหภูมิเฉลี่ยของอาหารภายในเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติ เมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว ณ เวลา 45 นาที [1,5]

ผลการจำลอง	อุณหภูมิเฉลี่ยของอาหารภายในเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ (°C)
ฉนวนโพลียูรีเทน	64.92
ฉนวนโพลีสไตรีน	61.38
ฉนวนใยแก้ว	61.16

จากตารางที่ 3 แสดงผลการกระจายตัวอุณหภูมิเฉลี่ยของอาหารภายในเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติ เมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว ณ เวลา 45 นาที เมื่อพิจารณาฉนวนโพลียูรีเทน ฉนวนโพลีสไตรีน และฉนวนใยแก้ว มีอุณหภูมิอาหารเฉลี่ยเท่ากับ 64.92 °C, 61.38 °C, และ 61.16 °C ซึ่งผลการจำลองนั้นสอดคล้องกับหลักการทำงานของเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ [1,5] และเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์โดยทั่วไปมีอุณหภูมิประมาณ 60 °C [1,5] และสามารถอธิบายเหตุผลที่ฉนวนกันความร้อนแต่ละชนิดมีผลต่อการกระจายตัวของอาหารภายในเตาอบได้จากค่าความสามารถในการแพร่ความร้อน thermal diffusivity (α) [4] ดังสมการที่ (15)

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} \quad (15)$$

เมื่อ α ค่าความสามารถในการแพร่ความร้อน (m²/s)

จากสมการที่ (15) ค่าความสามารถในการแพร่ความร้อนมีค่าพารามิเตอร์ ρ , c และ k มาเกี่ยวข้อง ซึ่งฉนวนกันความร้อนที่ดีที่ควรมีค่าแพร่กระจายความร้อนน้อย พบว่าเมื่อพารามิเตอร์ของฉนวนกันความร้อนเปลี่ยนไปจะมีผลทำให้ผลการจำลองเปลี่ยนไปเช่นกัน จากตารางที่ 1 เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ ρ , c และ k ของฉนวนกันความร้อนทั้ง 3 ชนิด แทนลงในสมการที่ 15 จะได้ค่าความสามารถในการแพร่ความร้อนของฉนวนโพลียูรีเทน ฉนวนโพลีสไตรีนและฉนวนใยแก้ว เท่ากับ 3.055×10^{-7} m²/s, 7.199×10^{-7} m²/s และ 7.509×10^{-7} m²/s ตามลำดับ โดยฉนวนโพลียูรีเทนนั้นมีค่า

ความสามารถในการแพร่ความร้อนที่น้อยที่สุด ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนจากภายในเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติ ไม่สามารถถ่ายเทความร้อนออกไปข้างได้หรือถ่ายเทออกไปได้น้อย ส่งผลให้การกระจายตัวอุณหภูมิของอาหารเมื่อพิจารณาฉนวนโพลียูรีเทนสูงที่สุดรองมาเป็นฉนวนโพลีสไตรีนและฉนวนใยแก้ว ตามลำดับ [2]

8. สรุป

บทความนี้ได้ศึกษาถึงการกระจายตัวอุณหภูมิภายในเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติ การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ได้ประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ ที่พัฒนาขึ้นเองด้วยโปรแกรม MATLAB ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองพบว่า การเลือกใช้ฉนวนโพลียูรีเทนทำให้การกระจายตัวอุณหภูมิภายในอาหารมีค่าเท่ากับ 64.92 °C และภายในเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติมีค่าเท่ากับ 61.80 °C ซึ่งมีค่าสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับฉนวนโพลีสไตรีนและฉนวนใยแก้ว เนื่องจากค่าความสามารถในการแพร่ความร้อนของฉนวนโพลียูรีเทนนั้นมีค่าน้อยที่สุด ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนจากภายในเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติ ไม่สามารถถ่ายเทความร้อนออกไปข้างได้หรือถ่ายเทออกไปได้น้อย ซึ่งจากการจำลองนั้นสอดคล้องกับหลักการทำงานของเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ [1,5] และเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์โดยทั่วไปมีอุณหภูมิประมาณ 60 °C [1,5]

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือวัดและอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สถานที่ทดลอง และอำนวยความสะดวกในการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] อนิรุทธิ์ ต่ายขาว, สมบัติ ทิฆมทรัพย์. เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบธรรมชาติและชนิดพาความร้อนแบบบังคับ. *วารสารมหาวิทยาลัยอิสรชนเอเชีย*. 2556;7(1): 56-64.
- [2] Natthawut S, Padej P. Analysis of insulation performance in various types inside freezer of the refrigerator by 3-D finite element method. *Proceeding of the 14th Conference on Energy network of Thailand (E-NETT)*. 2018. pp. 16-19.
- [3] ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ไฟไนต์อิลลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2547.
- [4] ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ไฟไนต์อิลลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2549.
- [5] โครงการสนับสนุนการลงทุนติดตั้งใช้งานระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (พาราโบลาคอม) ประจำปี 2560. กระทรวงพลังงาน. เข้าถึงได้จาก: <http://www.solar-dryerdede.com/?p=1823> [เข้าถึงเมื่อ 19 มีนาคม 2562].
- [6] Padej P, Issaraporn A. Analysis of temperature in solar thermal by 3-D finite element method. *Proceeding of 5th International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, Pattaya, Thailand, 8-10 March 2017. pp. 1-4.
- [7] Issaraporn A, Padej P. Analysis of water temperature distribution in various type of absorber in solar thermal by 3-D finite element method. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*. SGCE. 2019; 8(6).
- [8] Lewis RW, Nithiarasu P, Seetharamu KN. *Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow*. USA: John Wiley & Sons; 2004.
- [9] Bhatti MA. *Advanced Topics in Finite Element Analysis of Structures*. USA: John Wiley & Sons; 2006.
- [10] Byron R, Stewart WE, Lightfoot EN. *Transport Phenomena*. 2nd edition. New York: John Wiley & Sons; 1924.
- [11] อีลีหย๊ะ สนิโซ, ร่อฮานี วานี, นาอีหม๊ะ หะมะ. สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ ของการทำแห้งพริก. *วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา*. 2556; 8(2): 118-129.
- [12] ปทุมพร วงศ์ใหญ่. ระบบควบคุมพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการตามรอยจุดกำลังสูงสุด ด้วยวิธีรบกวนและล้นเกด. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2558.
- [13] Kaewdew J, Dussadee N, ThararuxNigran C, Homdoun N, Ramaraj R. Performance evaluation of solar dryer for fish product. *Proceedings of the 24th Tri- University International Joint Seminar and Symposium*. 2017, Mie University. pp. 1-5.