

การศึกษารูปแบบการไหลและการกระจายอุณหภูมิอากาศในโรงเรือนเพาะปลูก Study of Flow Pattern and Temperature Distribution of Air Inside Cultivable Greenhouse

องอาจ วิเศษสุข *

Ongarj Wisesook *

สาขาวิศวกรรมพลังงาน คณะเทคโนโลยี วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

Department of Energy Engineering, Faculty of Technology, Siam Technology College

*Corresponding author, E-mail: 9ongarj@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและปรับปรุงโรงเรือนให้มีการระบายความร้อนที่ดี โดยการคำนวณรูปแบบการไหลและการกระจายอุณหภูมิภายในโรงเรือนที่มีรูปร่างหลังคาแตกต่างกัน 5 แบบ คือ หลังคาทรงสี่เหลี่ยม หลังคาทรงโค้ง หลังคาทรงสามเหลี่ยมหน้าจั่ว หลังคาทรงโค้งต่างระดับ และหลังคาทรงสามเหลี่ยมต่างระดับ โรงเรือนแต่ละแบบจะมีช่องเปิดขนาด 0.5 เมตร 3 ลักษณะด้วยกันคือ ช่องเปิดด้านบน ช่องเปิดด้านข้าง และแบบผสม อัตราการถ่ายเทความร้อนจากพื้นของโรงเรือนที่ใช้ในงานวิจัยมีค่า 30-100 W/m² การคำนวณความเร็วและอุณหภูมิภายในโรงเรือนใช้วิธีคำนวณพลศาสตร์ของไหลแบบ 2 มิติ ผลที่ได้จากการคำนวณ พบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนและอัตราการระบายอากาศขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทความร้อน โรงเรือนที่มีช่องเปิดแบบผสมจะมีอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนต่ำกว่า โรงเรือนที่มีช่องเปิดด้านข้างและด้านบนเพียงอย่างเดียว โรงเรือนที่มีลักษณะหลังคาสี่เหลี่ยม ทรงโค้ง และสามเหลี่ยมหน้าจั่วจะมีอัตราการระบายอากาศที่ดีกว่าหลังคาทรงโค้งต่างระดับ และสามเหลี่ยมต่างระดับ

คำสำคัญ: การคำนวณพลศาสตร์ของไหล, การระบายอากาศ, โรงเรือน

Abstract

The objective of this research is to calculate flow pattern and temperature distribution inside different greenhouse geometries comprising of box, curve, triangle, different curve, and different triangle greenhouses. Three categories of vent design (width = 0.5m) are installed at roof, side, and both roof and side of the greenhouse. The range of heat flux from the floor considered in this research is between 30-100 W/m². Velocity and temperature inside the greenhouse are calculated by computational fluid dynamics technique in two dimensionally. The simulation results show that mean temperature and ventilation rate are depended on the heat flux. A vent on both roof and side performs the maximized ventilation compared with other cases. The box, curve, and triangle greenhouses have better ventilation rate than different curve and different triangle greenhouses.

Keywords: Computational Fluid Dynamics, Ventilation, Greenhouse

1. บทนำ

ประเทศไทยจัดเป็นประเทศกสิกรรม เพราะมีพื้นที่เพาะปลูกคิดเป็นร้อยละ 54 ต่อพื้นที่ภายในประเทศ ดังนั้นการผลิตพืชผลทางการเกษตรจึงถือเป็นธุรกิจที่สำคัญของคนไทย นอกเหนือจากการผลิตเพื่อบริโภคภายในประเทศแล้วยังสามารถส่งออกเพื่อทำรายได้ให้แก่ประเทศในปีหนึ่ง ๆ เป็นจำนวนหลายพันล้านบาท อย่างไรก็ตามการปลูกพืชเพื่อการส่งออกหรือการจำหน่ายภายในประเทศนั้นมักประสบปัญหาในการผลิตและการควบคุมคุณภาพเพื่อให้ได้มาตรฐานอยู่เสมอเนื่องจากลักษณะภูมิประเทศ, ลักษณะภูมิอากาศ และความแปรปรวนของสภาพอากาศไม่ว่าจะเป็น ฝนแล้ง น้ำท่วม หรือโรคระบาดที่เกิดจากแมลง ดังนั้นหากมีการควบคุมสภาวะแวดล้อมให้เหมาะสมกับการเพาะปลูกพืชก็จะส่งผลดีต่อปริมาณและคุณภาพการผลิต หนึ่งในเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมจากเกษตรกรที่จะช่วยรักษาและควบคุมสภาวะแวดล้อมให้เหมาะสมในการเพาะปลูกพืช คือ การเพาะปลูกภายในโรงเรือน ซึ่งนอกจากจะช่วยป้องกันโรคแมลง และฝนได้แล้ว สำหรับโรงเรือนที่ดีจะสามารถควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น การระบายอากาศตลอดจนสภาวะอากาศที่เหมาะสมต่อการเพาะปลูกพืชนั้นๆ ด้วย แต่เนื่องจากลักษณะของภูมิประเทศเป็นตัวแปรที่จะส่งผลต่อลักษณะของภูมิอากาศ ดังนั้นแต่ละพื้นที่ที่ทำการเพาะปลูกก็จะมีสภาวะอากาศที่แตกต่างกันไป ทำให้ลักษณะรูปร่างของโรงเรือนแต่ละที่มีความแตกต่างกันออกไปไม่สามารถที่จะนำมาใช้แทนกันได้ ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงได้มีการคิดค้นและปรับปรุงโรงเรือนให้เหมาะสมกับภูมิประเทศและสภาวะอากาศ ซึ่งสำหรับในประเทศไทยนั้นสภาวะอากาศโดยทั่วไปจัดอยู่ในเขตร้อนชื้นจะพบว่าในฤดูร้อนอุณหภูมิภายในโรงเรือนสูงเกินความต้องการของพืช เนื่องจากการสะสมความร้อนภายในโรงเรือนแต่ไม่มีกระบวนการระบายอากาศออกสู่ภายนอกทำให้เกิดผลกระทบต่อการเจริญเติบโต จึงต้องปรับปรุงในส่วนของการระบายอากาศเป็นสำคัญ ไม่ว่าจะเป็นการระบายอากาศแบบธรรมชาติ (Natural Ventilation) หรือ การนำพัดลมมาช่วยในการระบายอากาศ (Force Ventilation) ข้อดีของการระบายอากาศแบบธรรมชาตินั้น หากออกแบบโรงเรือนให้ดีและเหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศจะทำให้เกิดการไหลเวียนของอากาศร้อนที่ดี ไม่เกิดการสะสมของความร้อนภายในโรงเรือนทั้งยังช่วยประหยัดพลังงาน เนื่องจากไม่มีอุปกรณ์จักรกลหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าใด ๆ ส่วนการระบายอากาศอีกชนิดหนึ่งนั้นได้แก่การใช้พัดลมเพื่อช่วยในการระบายอากาศ ซึ่งหากมีการระบายอากาศมากเกินไปจะทำให้พืชมีอัตราการหายใจมากขึ้น ส่งผลให้พืชคายน้ำออกไปเพิ่มขึ้นทำให้ความชื้นที่ต้นลดลง ทำให้มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชเช่นกัน และการระบายอากาศแบบใช้พัดลมมาช่วยนั้นจะมีการสิ้นเปลืองพลังงานมากกว่าการระบายอากาศแบบธรรมชาติ ในงานวิจัยนี้เป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษารูปแบบการไหลและการกระจายอุณหภูมิของอากาศในโรงเรือนเพาะปลูกที่มีลักษณะหลังคาแตกต่างกัน 5 แบบ โรงเรือนแต่ละแบบมีช่องเปิด 3 ลักษณะ คือ ช่องเปิดด้านข้าง, ช่องเปิดด้านบน และช่องเปิดแบบผสม โดยใช้วิธีคำนวณพลศาสตร์ของไหลแบบ 2 มิติในการออกแบบโรงเรือนให้มีการระบายอากาศและการกระจายอุณหภูมิที่เหมาะสม

2. ลักษณะและการจัดวางโรงเรือนที่ใช้ในทดสอบ

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาการระบายอากาศแบบธรรมชาติ กับโรงเรือน 5 ชนิด ดังแสดงตามรูปที่ 1 โดยมีการวางตำแหน่งช่องระบายอากาศที่แตกต่างกัน เพื่อหาว่าโรงเรือนชนิดใดที่มีอัตราการระบายอากาศ (Air Change) และอุณหภูมิเหมาะสมที่สุด

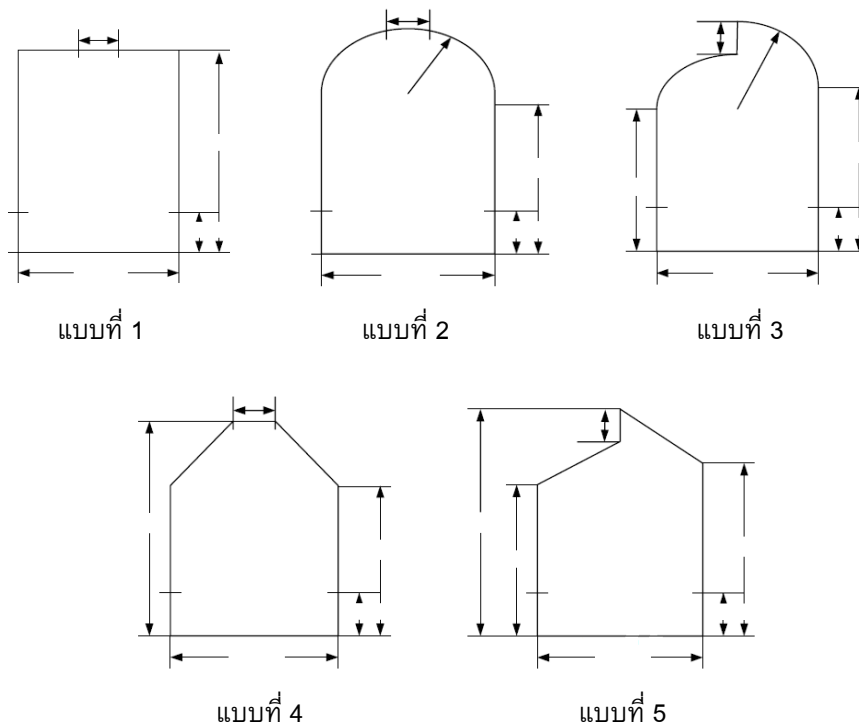
แบบที่ 1 โรงเรือนหลังคาแบบทรงสี่เหลี่ยม

แบบที่ 2 โรงเรือนหลังคาแบบทรงโค้ง

แบบที่ 3 โรงเรือนหลังคาแบบทรงโค้งต่างระดับ

แบบที่ 4 โรงเรือนหลังคาแบบทรงสามเหลี่ยม

แบบที่ 5 โรงเรือนหลังคาแบบทรงสามเหลี่ยมต่างระดับ



รูปที่ 1 แสดงลักษณะรูปแบบโรงเรือนที่ใช้ทดลอง

3. ทฤษฎี

3.1 สมการสภาวะต่อเนื่อง (Continuity Equation)

จากกฎของการอนุรักษ์มวล (Law of conservation of mass)

$$\frac{dm}{dt} = 0$$

จะได้สมการสภาวะต่อเนื่องในรูปทั่วไปคือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0$$

หรือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

3.2 สมการโมเมนตัม (Momentum Equation)

จากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน (Newton's second law of motion)

$$F = \frac{dM}{dt} = 0$$

สามารถเขียนสมการโมเมนตัมรูปแบบทั่วไปคือ

$$x: \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u V) = f_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \nabla u) \quad (2a)$$

$$y: \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v V) = f_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \nabla v) \quad (2b)$$

$$z: \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w V) = f_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \nabla w) \quad (2c)$$

3.3 สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Equation)

จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Energy's Conservation)

สมการพลังงานจะเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไป คือ

$$\rho C \frac{DT}{Dt} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi + S_\phi \quad (3)$$

เมื่อ

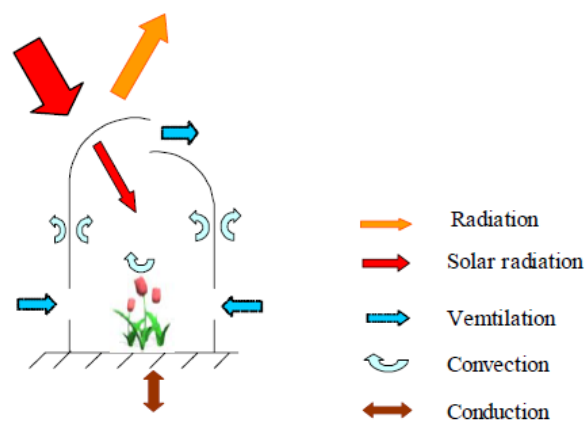
$$\frac{D}{Dt} \equiv \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} \quad (4)$$

$$\nabla \cdot (k \nabla T) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (5)$$

$$\Phi = 2\mu \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (6)$$

และ

$$S_\phi = \sum Q_{wall} + \sum Q_{roof} + Q_{ventilation} + Q_{ground} + Q_{plant} + Q_{rg} + Q_{solar} \quad (7)$$



รูปที่ 2 แสดงลักษณะสมดุลความร้อนภายในโรงเรือน

3.4 สมมติฐานที่ใช้ในงานวิจัย

1. ของไหลอัดตัวไม่ได้
 2. ของไหลเป็นประเภท Newtonian Fluid
 3. ละทิ้ง f_x , f_z เนื่องจาก f_x , $f_z \ll f_y$
 4. ของไหลมีความหนืด
 5. สมบัติทางกายภาพของของไหลคงตัว
 6. ไม่มีการแผ่รังสีความร้อนระหว่างผนัง พื้นดิน หลังคา และต้นไม้
- จากสมมติฐานทั้ง 6 ข้อสามารถเปลี่ยนรูปสมการควบคุมใหม่ได้เป็น

สมการสภาวะต่อเนื่อง

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

สมการโมเมนตัม

$$X: \quad \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (9a)$$

$$Y: \quad \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (9b)$$

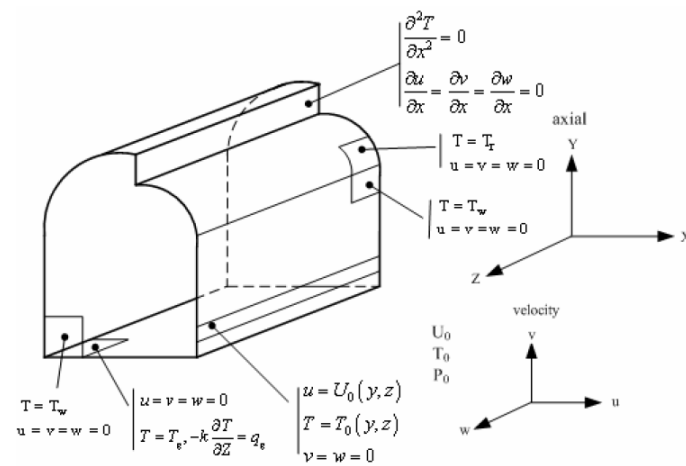
$$Z: \quad \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho g - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (9c)$$

สมการอนุรักษ์พลังงาน

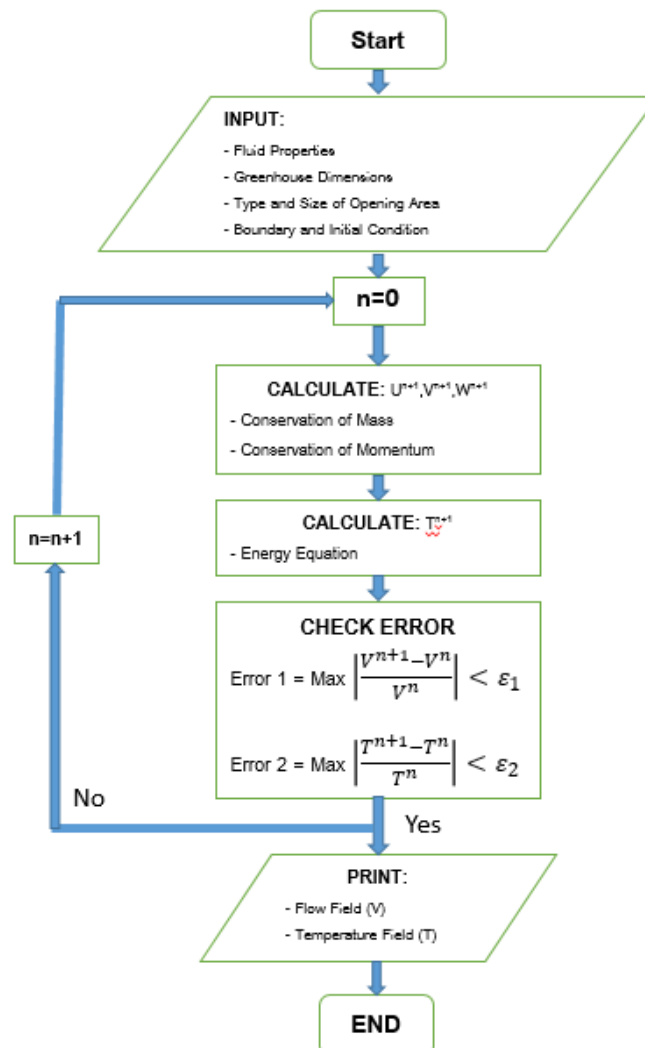
$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + S_\phi \quad (10)$$

$$S_\phi = \sum Q_{wall} + \sum Q_{roof} + Q_{ventilation} + Q_{solar} \quad (11)$$

ใช้สมการที่ (8)-(11) ร่วมกับเงื่อนไขที่ขอบตามรูปที่ 3 เพื่อคำนวณหาอุณหภูมิและความเร็วของอากาศ ตามขั้นตอนการคำนวณจากรูปที่ 4



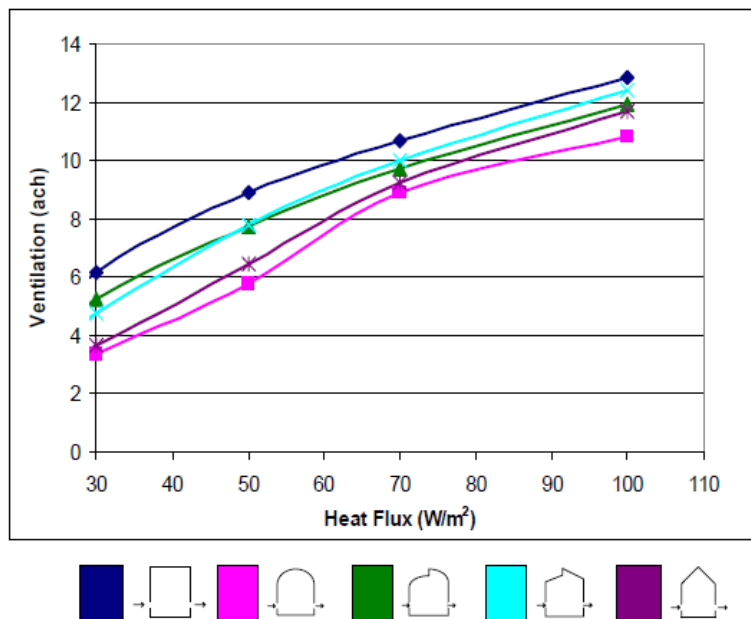
รูปที่ 3 แสดงเงื่อนไขที่ขอบ



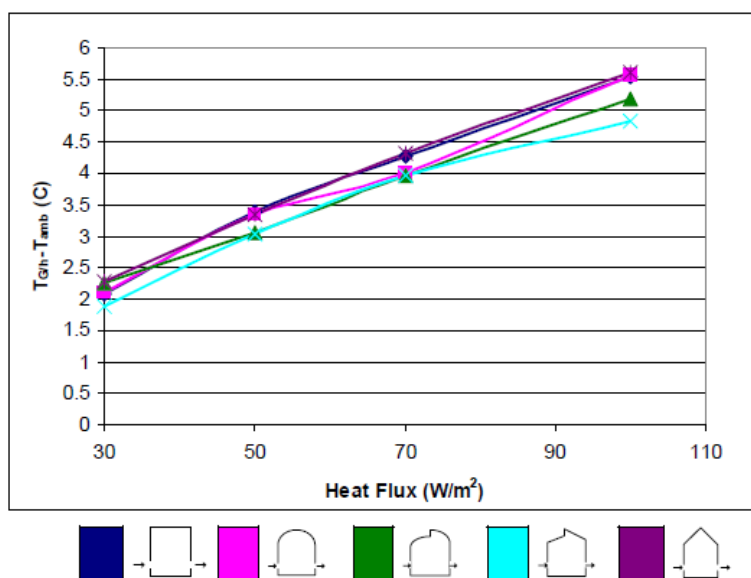
รูปที่ 4 แสดงขั้นตอนการคำนวณ

4. ผลการทดลอง

การระบายอากาศโดยอาศัยแรงลอยตัวของอากาศที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของความหนาแน่นภายในโรงเรือน เมื่อมีอัตราการถ่ายเทความร้อนของดินที่พื้นของโรงเรือน ปริมาณ 30, 50, 70, 100 วัตต์ โดยที่อุณหภูมิของผนังคงที่ ณ ขณะเวลาหนึ่ง

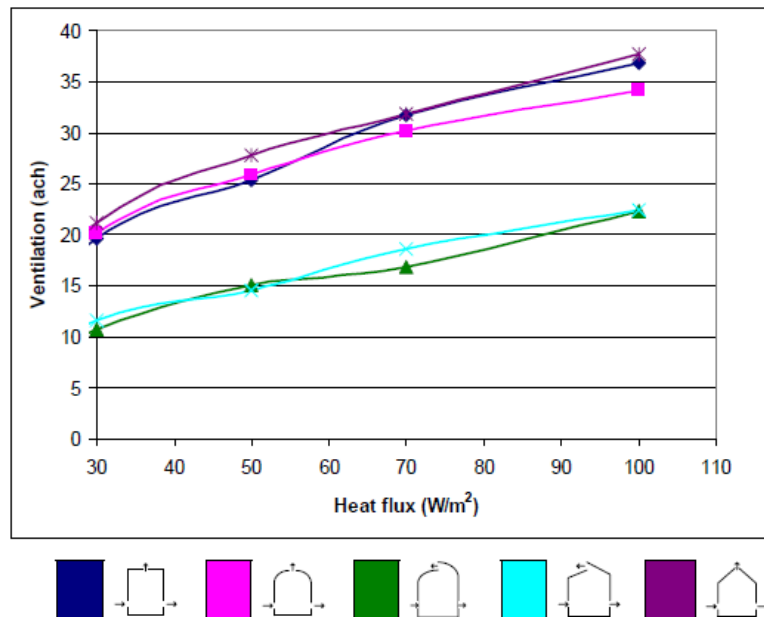


รูปที่ 5 แสดงอัตราการระบายอากาศ สำหรับโรงเรือนที่มีช่องเปิดด้านข้าง

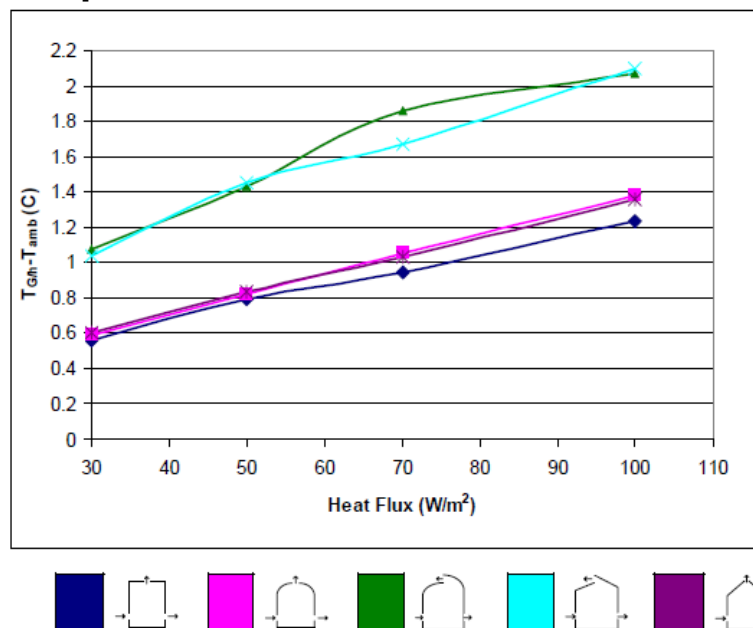


รูปที่ 6 แสดงความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยในโรงเรือนกับสิ่งแวดล้อม สำหรับโรงเรือนที่มีช่องเปิดด้านข้าง

จากรูปที่ 5 และรูปที่ 6 เป็นกราฟแสดงอัตราการระบายอากาศและความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยในโรงเรือนกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม สำหรับโรงเรือนที่มีช่องเปิดด้านข้างตามลำดับ พบว่าอัตราการระบายอากาศและอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนขึ้นอยู่กับ อัตราการถ่ายเทความร้อน และโรงเรือนที่มีหลังคาทรงสี่เหลี่ยมจะให้อัตราการระบายอากาศสูงที่สุด ที่ทุกๆ อัตราการถ่ายเทความร้อนของพื้นดิน เมื่อเทียบกับแบบอื่นๆ ส่วนโรงเรือนที่มีหลังคาแบบทรงโค้งต่างระดับและทรงสามเหลี่ยมต่างระดับมีค่าใกล้เคียงกันแต่มีอัตราการระบายอากาศน้อยกว่าโรงเรือนหลังคาทรงสี่เหลี่ยม และโรงเรือนที่มีอัตราการระบายอากาศต่ำที่สุดคือโรงเรือนแบบหลังคาทรงโค้ง ส่วนค่าอุณหภูมิของแต่ละโรงเรือนมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

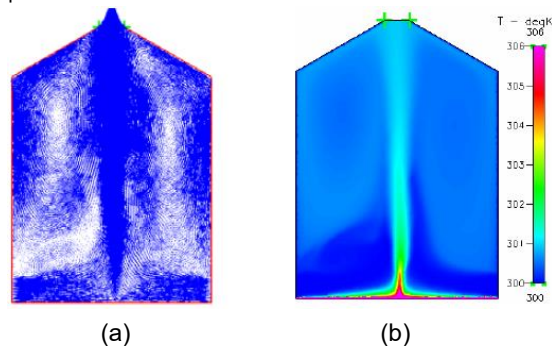


รูปที่ 7 แสดงอัตราการระบายอากาศ สำหรับโรงเรือนแบบผสม



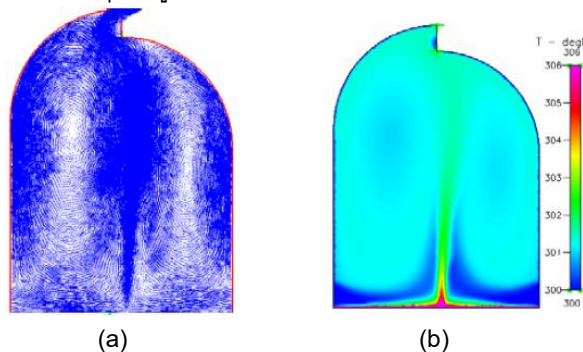
รูปที่ 8 แสดงความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยในโรงเรือนกับสิ่งแวดล้อมสำหรับโรงเรือนแบบผสม

จากรูปที่ 7 และ 8 เป็นกราฟแสดงอัตราการระบายอากาศและความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยกับสิ่งแวดล้อม สำหรับโรงเรือนที่มีช่องเปิดแบบผสม จะพบว่ากราฟมีความสัมพันธ์คล้ายกับกรณีของโรงเรือนที่มีช่องเปิดด้านข้าง คือ อัตราการระบายอากาศ และอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนมีความสัมพันธ์โดยตรง กับอัตราการถ่ายเทความร้อน ทั้งนี้อัตราการระบายอากาศจะแบ่งออกเป็นสองกลุ่มด้วยกันคือกลุ่มที่หลังคาโรงเรือนมีลักษณะสมมาตร คือ หลังคาทรงสี่เหลี่ยม, หลังคาทรงโค้ง และหลังคาทรงสามเหลี่ยม ซึ่งมีช่องระบายอากาศด้านบนตั้งฉากกับพื้นของโรงเรือนทำให้ อากาศที่ได้รับความร้อนจากพื้นดิน สามารถลอยออกนอกโรงเรือนได้สะดวก สังเกตได้จากรูปที่ 9(a) โดยโรงเรือนแบบหลังคาทรงสามเหลี่ยม จะมีอัตราการระบายอากาศสูงสุด เป็นผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนต่ำ ดังรูปที่ 9(b) และโรงเรือนแบบหลังคาทรงสี่เหลี่ยมและทรงโค้ง จะมีอัตราการระบายอากาศลดต่ำลงมาตามลำดับ ส่วนกลุ่มที่สอง คือกลุ่มที่มีช่องระบายอากาศขนานกับพื้นของโรงเรือน ได้แก่ โรงเรือนหลังคาทรงสามเหลี่ยมต่างระดับและทรงโค้งต่างระดับ จะมีอัตราการระบายอากาศต่ำเนื่องจากอากาศที่ลอยตัวจะต้องไหลปะทะหลังคาก่อนจะไหลออกสู่ภายนอก สังเกตได้จากรูปที่ 10(a) และ 10(b) โดยจะมีอากาศบางส่วนเกิดการหมุนวนลงมาด้านล่าง



รูปที่ 9 (a) แสดงเวกเตอร์ความเร็วของการไหล

รูปที่ 9 (b) แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในโรงเรือนหลังคาทรงโค้งต่างระดับที่มีช่องเปิดแบบผสม



รูปที่ 10 (a) แสดงเวกเตอร์ความเร็วของการไหล

รูปที่ 9 (b) แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในโรงเรือนหลังคาทรงโค้งต่างระดับที่มีช่องเปิดแบบผสม

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิภายในโรงเรือน พบว่าโรงเรือนแบบหลังคาทรงสามเหลี่ยม แบบทรงสี่เหลี่ยม และแบบทรงโค้ง มีอุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งก็สอดคล้องกันเมื่ออัตราการระบายอากาศมีค่าสูงก็จะทำให้อุณหภูมิภายในโรงเรือนเฉลี่ยมีค่าต่ำ แต่สำหรับโรงเรือนหลังคาทรงโค้งต่างระดับ และทรงสามเหลี่ยมต่างระดับ จะมีอุณหภูมิสูงกว่าแต่ไม่มากนัก ก็เนื่องมาจากอากาศร้อนบางส่วนเกิดปะทะหลังคาแล้วหมุนวนลงมาด้านล่าง มารับความร้อนจากพื้นดิน จึงทำให้อากาศภายในโรงเรือนมีอุณหภูมิสูงขึ้น

5. สรุป

จากการทดสอบเรื่องการระบายอากาศโดยอาศัยแรงลอยตัวของอากาศ สำหรับโรงเรือนที่มีลักษณะหลังคาแตกต่างกัน 5 แบบ แต่ละแบบมีช่องเปิด 3 ลักษณะด้วยกัน พบว่าโรงเรือนที่มีช่องเปิดแบบผสม จะมีอัตราการระบายอากาศมากกว่าแบบอื่น และโรงเรือนที่มีหลังทรงสามเหลี่ยมจะมีอัตราการระบายอากาศสูงที่สุด และมีอุณหภูมิภายในโรงเรือนต่ำกว่าแบบอื่นเช่นกัน แต่เนื่องจากโรงเรือนแบบหลังคาทรงสามเหลี่ยม จะมีข้อจำกัดในการใช้งานจริง เพราะหากเข้าฤดูฝน น้ำฝนจะไหลตกลงมาภายในโรงเรือนทำให้พืชผลเสียหายเช่นเดียวกันโรงเรือนหลังคาทรงสี่เหลี่ยม และทรงโค้งก็จะประสบปัญหาการฉีกตัวเช่นกัน และโรงเรือนทั้ง 3 แบบข้างต้นก็ไม่น่าเป็นที่นิยมนำมาใช้งานจริง เราจึงมุ่งเน้นที่จะพิจารณา โรงเรือนแบบหลังคาทรงโค้งต่างระดับ และทรงสามเหลี่ยมต่างระดับแทน เนื่องจากมีการใช้งานจริงในปัจจุบัน และสามารถที่จะป้องกันน้ำฝนไม่ให้ตกลงมาภายในโรงเรือนได้ ถึงแม้ว่าอัตราการระบายอากาศจะมีค่าต่ำกว่าก็ตาม

6. สัญลักษณ์ที่ใช้

C	คือ ความจุความร้อนจำเพาะ ($J/kg \cdot K$)
f_x	คือ แรงเนื่องจากน้ำหนัก (Body force) ในทิศ X (N/m^3)
f_y	คือ แรงเนื่องจากน้ำหนัก (Body force) ในทิศ Y (N/m^3)
f_z	คือ แรงเนื่องจากน้ำหนัก (Body force) ในทิศ Z (N/m^3)
g	คือ ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (m/s^2)
M	คือ โมเมนตัม ($kg \cdot m/s$)
m	คือ น้ำหนัก (kg)
P	คือ ความดัน (Pa)
P_0	คือ ความดันอ้างอิง (Pa)
P_r	คือ ตัวเลขพรานเดิล (Prandtl number)
Q_{wall}	คือ อัตราความร้อนที่สะสมที่ผนังโรงเรือน (W/m^3)
Q_{roof}	คือ อัตราความร้อนที่สะสมที่หลังคาโรงเรือน (W/m^3)
$Q_{ventilation}$	คือ อัตราความร้อนสัมผัสเนื่องจากการระบายอากาศเข้าสู่โรงเรือน (W/m^3)
Q_{ground}	คือ อัตราความร้อนที่สูญเสียผ่านพื้นของโรงเรือน (W/m^3)
Q_{plant}	คือ อัตราความร้อนที่เกิดจากต้นไม้ (W/m^3)
Q_{rg}	คือ การแผ่รังสีความร้อนจากพื้นไปยังผนังและหลังคาภายในโรงเรือน (W/m^3)
Q_{solar}	คือ อัตราความร้อนที่เกิดจากรังสีดวงอาทิตย์ (W/m^3)
S_ϕ	คือ แหล่งความร้อน (W/m^3)
T	คือ อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)
T_r	คือ อุณหภูมิหลังคา ($^{\circ}C$)
T_w	คือ อุณหภูมิผนัง ($^{\circ}C$)
T_0	คือ อุณหภูมิอ้างอิง ($^{\circ}C$)
ΔT	คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิ (K)
t	คือ เวลา (sec)
U_0	คือ ความเร็วอ้างอิง (m/s)

u	คือ ความเร็วในทิศแกน X (m/s)
V	คือ เวกเตอร์ความเร็ว (m/s)
v	คือ ความเร็วในทิศแกน Y (m/s)
w	คือ ความเร็วในทิศแกน Z (m/s)
W	คือ ความกว้างของช่องเปิด (m)
β	คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร (K^{-1})
ν	คือ ความหนืดจลน์ (m^2/s)
μ	คือ ความหนืดพลศาสตร์ ($kg/m \cdot s$)
ρ	คือ ความหนาแน่น (kg/m^3)
Φ	คือ ฟังก์ชันการคายความร้อนเนื่องจากความหนืด

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Montero, J.I., Anton, A., Kamaruddin, R.K., and Bailey, B.J., 2001, "Analysis of Thermally Driven Ventilation in Tunnel Greenhouses using Small Scale Models", **Journal of Agricultural Engineering Research**, Vol.79, No.2, pp.213-222.
- [2] Wang, S., Boulard, T., and Haxaire, R., 1999, "Air Speed Profiles in A Naturally Ventilated Greenhouse with A Tomato Crop", **Agricultural and Forest Meteorology**, Vol.96, pp.181-188.
- [3] Perez, P.J., Baeza, E., Montero, J.I., and Bailey, B.J., 2004, "Natural Ventilation of Parral Greenhouses", **Biosystems Engineering**, Vol.87, No.3, pp.355-366.
- [4] Sase, S., Reiss, E., Both, A.J., and Roberts, W.J., 2002, **Developing a Natural Ventilation Model for Open-Roof Greenhouse**, Center for Controlled Environment Agriculture, pp. 1-9.
- [5] Sbita, L., Boulard, T., and Mermier, M., 1999, "Natural Ventilation Performance of A Greenhouse Tunnel in South Tunisia", **Agricultural Engineering**, Vol.76, pp.109-118.
- [6] Kakac, S., and Yener, Y., 1995, **Convective Heat Transfer**, Second Edition, Boca Raton Ann Arbor, London, pp.23-46.
- [7] ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, 2531, อนุกรมพลังงานออกแบบและการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ เล่มที่ 1 การแผ่รังสีและตัวรับรังสี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, หน้า 1-25.
- [8] จงจิตร หิรัญลาภ, 2541, กระบวนการพลังงานแสงอาทิตย์ในรูปความร้อน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, หน้า 1-26.
- [9] Duffie, J.A. and Beckman, W.A., 1991, **Solar Engineering of Thermal Processes**, John Wiley & Sons, New York, pp. 1-146.
- [10] Holman, J.P., 2001, **Heat Transfer**, McGraw-Hill, New York, pp. 225-231.