

การจำลองสถานการณ์เพื่อหาการระบายอากาศที่เหมาะสมที่สุดในโรงเรือนเปิดดอกเห็ดหลินจือ ที่มุงหลังคาแบบจั่วสองชั้นโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

พลเทพ เวงสูงเนิน^{1*}, ทยาวิร์ หนูบุญ¹, จาริณี จงปลื้มปิติ¹, สนั่น จันทรพรหม² และณัฐดนัย พรรณูเจริญวงศ์³

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร ²สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา 30000

³ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ 12120

ผู้เขียนติดต่อ: พลเทพ เวงสูงเนิน E-mail: ponthep.ve@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะจำลองสถานการณ์เพื่อหาการระบายอากาศที่เหมาะสมที่สุดในโรงเรือนเปิดดอกเห็ดหลินจือที่มุงหลังคาแบบจั่วสองชั้นโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ขนาดของโรงเรือนมีมิติกว้าง x ยาว x สูง อยู่ระหว่าง 2500 - 4000 mm, 2500 - 4000 mm และ 2000-2500 mm ตามลำดับ โดยให้ช่องเปิดด้านบนระหว่างผนังและหลังคาของหน้าจั่วชั้นแรกมีค่าระหว่าง 100-200 mm และชั้นที่สองระหว่าง 150 - 300 mm ช่องเปิดให้อากาศเข้าด้านล่างมีขนาด กว้าง x ยาว อยู่ระหว่าง 500 - 800 m และ 500 - 800 m ตามลำดับ เงื่อนไขที่ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 303.50 K คือเงื่อนไขที่โรงเรือนมีความกว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 2500 x 3591 x 2500 mm มีช่องเปิดระหว่างหน้าจั่วชั้นแรกเท่ากับ 200 mm และช่องเปิดระหว่างหน้าจั่วชั้นที่สองเท่ากับ 291 mm ช่องเปิดที่พื้นมีขนาดกว้าง x ยาวเท่ากับ 800 x 800 mm ตามลำดับ

คำสำคัญ: การระบายอากาศ, การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด, หลังคาหน้าจั่วสองชั้น, เห็ดหลินจือ

Ventilation Optimization Simulation for a Double Gable Roof Lingzhi Mushroom House Using Computational Fluid Dynamics

Ponthep Vengsungne^{1*}, Thayawee Nuboon¹, Jarinee Jongpluempiti¹ Sanan Janprom² and Nattadon Pannucharoenwong³

¹Department of Agricultural Machinery Engineering ²Department of Computer Engineering Faculty of Engineering and Architecture,
Rajamangala of Technology Isan, Nakhonratchasima 30000.

³Department of Mechanical Engineering Faculty of Engineering, Thammasat University, Thailand 12120.

Abstract

The purpose of this research is to simulate for optimize ventilation conditions in a double gable roof of Lingzhi house using computational fluid dynamics. The size of the house is dimension x width x height between 2500 - 4000 mm, 2500 - 4000 mm and 2000-2500 mm, respectively. The top gap between the walls and roof of the first gable is between 100-200 mm and the second gap is between 150 - 300 mm. The air intake is below the width x between 500 - 800 m and 500 - 800 m, respectively. The minimize average temperature inside the house is 303.50 K when the house of width x length x height is 2500 x 3591 x 2500 mm, the gap between the first gable is 200 mm, the gap between the second gable is 291 mm, the intake width x length is 800 x 800 mm. respectively.

Keywords: Ventilation, Optimization, double gable roof, Lingzhi mushroom.

1. บทนำ

การออกแบบโรงเรือนให้มีการไหลเวียนของอากาศแบบธรรมชาติ (natural ventilation หรือ passive ventilation) (Passive ventilation, 2017) เป็นส่วนที่สำคัญในการสร้างโรงเรือนให้เหมาะสมกับพืชในแต่ละชนิด เนื่องจากพืชมีความต้องการปัจจัยที่จำเป็นหลายๆ ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ ปริมาณออกซิเจน การไหลเวียนของอากาศ เป็นต้น (Hopper, 2012) การควบคุมอากาศภายใน

โรงเรือนเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งถึงแม้พืชจะต้องการความชื้นแต่หากไม่มีการระบายความชื้นส่วนเกินออกจากโรงเรือนบ้างอาจส่งผลให้เกิดโรคพืชขึ้นได้ (Oyster Mushroom Cultivation, 2004) นอกจากการไหลเวียนของอากาศจะช่วยควบคุมความชื้นแล้วยังสามารถควบคุมปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในโรงเรือนได้เช่นเดียวกันเพราะในการเปิดดอกเห็ดนั้นหากมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงจะส่งผลต่อความสมบูรณ์ของดอกเห็ด ทำให้เห็ดเสียรูปและราคาไม่ได้ตามมาตรฐาน (Lambert, 1993; Lee, et

al., 2012; Briones, et al., 1992) การเพาะเห็ดหลินจือในประเทศไทยมีลักษณะของโรงเรือนเปิดดอกที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับความชำนาญของเกษตรกรแต่จะมีกระบวนการเพาะที่คล้ายคลึงกันได้แก่ การหมักวัสดุทางการเกษตร การนึ่งฆ่าเชื้อ การบ่มก้อนเชื้อ การเปิดดอก และเก็บเกี่ยว (Fungiculture, 2017) ซึ่งขั้นตอนที่จำเป็นต้องมีโรงเรือนได้แก่การบ่มก้อนเชื้อ และการเปิดดอก ในสองขั้นตอนนี้จะมีปัจจัยที่ต้องควบคุมแตกต่างกันโดยในบทความนี้จะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาการจำลองสถานะการณ์เพื่อหาการระบายอากาศที่เหมาะสมที่สุดในโรงเรือนเปิดดอกเห็ดหลินจือที่มุ่งหลังคาแบบจั่วสองชั้นโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ในปี Mistriotis และคณะ (1997) ได้นำเอาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาใช้ในการวิเคราะห์อากาศที่ไหลแบบบังคับผ่านโรงเรือนที่มีการออกแบบที่แตกต่างกัน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่ารูปทรงของโรงเรือนส่งผลต่อการไหลเวียนของอากาศภายในโรงเรือนซึ่งเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิที่ได้รับจากภายนอก โดยงานวิจัยนี้ยังแสดงให้เห็นว่าการใช้สมการ k-ε ยังให้ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของอากาศที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริงอีกด้วย (Mistriotis, Bot, Picuno, and Scarascia-Mugnozza, 1997; Mistriotis, Arcidiacono, Picuno, Bot, and Scarascia Mugnozza, 1997) สอดคล้องกับงานของNorton และคณะ (2007) ก็แสดงให้เห็นว่ารูปทรงของโรงเรือนและโครงสร้างภายในโรงเรือนมีผลต่อการไหลเวียนของอากาศภายในและภายนอกโรงเรือนทั้งสิ้น ซึ่งพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณนั้นมีแนวโน้มจะถูกนำมาใช้ในการประเมินและออกแบบโรงเรือนมากขึ้น (Sørensen and Nielsen, 2003) เนื่องจากเทคนิคถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงและคอมพิวเตอร์ในยุคปัจจุบันเอื้ออำนวยให้สามารถนำเอาเทคนิคนี้มาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

จากที่กล่าวมานั้นจึงเป็นที่มาของการจำลองสถานะการณ์เพื่อหาการระบายอากาศที่เหมาะสมที่สุดในโรงเรือนเปิดดอกเห็ดหลินจือที่มุ่งหลังคาแบบจั่วสองชั้นโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

การวิเคราะห์การไหลเวียนของอากาศภายในโรงเรือนเปิดดอกเห็ดหลินจือในงานวิจัยนี้ใช้สมการพื้นฐานทั่วไปในการวิเคราะห์ ได้แก่ สมการอนุรักษ์มวล (conservation of mass) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (conservation of momentum) และสมการอนุรักษ์พลังงาน (conservation of energy) ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ **ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งอ้างอิง** ถึงสมการที่ **ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งอ้างอิง** ตามลำดับ ซึ่งสมการเหล่านี้ที่อยู่ภายใต้สมการการอนุรักษ์จะถูกใช้ในการทำนายพฤติกรรมต่างๆ ของของไหลทั้งหมด (Petrla, Trif, and Brezinski, 2005; Wendt, 2009; Pozrikidis, 2011; H. K. and Malalasekera, 2007) ซึ่งหน่วยวัดของตัวแปรที่นำมาใช้ในการคำนวณคือ ความหนาแน่น, ρ , มีหน่วยเป็น kg m^{-3}

ความเร็ว, u_i , มีหน่วยเป็น m s^{-1} เวลา, t , มีหน่วยเป็น s อุณหภูมิ, T , มีหน่วยเป็น K ความหนืดพลวัต, μ , มีหน่วยเป็น Pa s ความดัน, P , มีหน่วยเป็น Pa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-p \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (3)$$

2.2 การออกแบบโรงเรือนเพาะเห็ด

การออกแบบโรงเรือนเพาะเห็ดในงานวิจัยนี้เป็นโรงเรือนแบบหน้าจั่วสองชั้นดัง **ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งอ้างอิง** โดยการศึกษา กำหนดตัวแปรออกแบบ (design variable) หรือตัวแปรอิสระที่ต้องการศึกษาออกเป็น 7 ตัวแปรได้แก่ ขนาดของโรงเรือนมีมิติ กว้าง x ยาว x สูง อยู่ระหว่าง 2500 - 4000 mm, 2500-4000 mm และ 2000-2500 mm กำหนดให้เป็นตัวแปร x_1, x_2 และ x_3 ตามลำดับ โดยให้ช่องเปิดด้านบนระหว่างผนังและหลังคาของหน้าจั่วชั้นแรกมีค้ำระหว่าง 100-200 mm และชั้นที่สองระหว่าง 150 - 300 mm กำหนดให้เป็นตัวแปร x_4 และ x_5 ตามลำดับ ซึ่งแสดงได้ดัง **ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งอ้างอิง** ช่องเปิดด้านล่างมีขนาด กว้าง x ยาว อยู่ระหว่าง 500 - 800 m และ 500 - 800 m กำหนดให้เป็นตัวแปร x_6 และ x_7 ตามลำดับ ซึ่งแสดงได้ดัง **ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งอ้างอิง** แบบจำลองที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์เป็นแบบจำลองของอากาศภายในโรงเรือนซึ่งแสดงได้ดัง **ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งอ้างอิง** กำหนดให้อุณหภูมิเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 303.13 K และโรงเรือนได้รับพลังงานจากการแผ่รังสีและการพาความร้อนโดยมีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเท่ากับ $100 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ และมีอุณหภูมิของอากาศภายนอกเท่ากับ 308.13 K

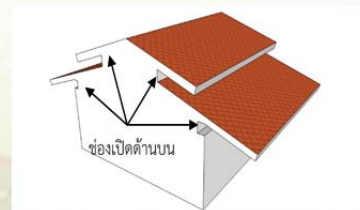


Figure 1 the double gable Lingzhi house.

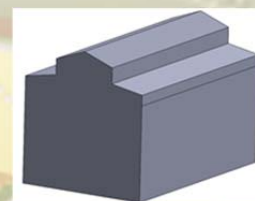


Figure 2 a fluid domain of the double gable Lingzhi house.

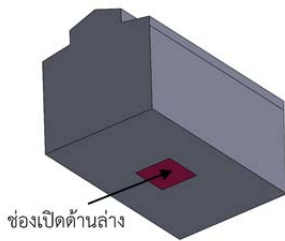


Figure 3 bottom iso view of the double gable Lingzhi house.

2.3 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจะกระทำได้เมื่อมีฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (independent parameter) และตัวแปรผลตอบสนอง (respond parameter) เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์เงื่อนไขที่ทำให้ฟังก์ชันจุดประสงค์ (objective function) มีค่าที่เหมาะสมที่สุดที่สอดคล้องกับเงื่อนไขที่ต้องการ (Li and Zheng, 2017) ในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology ,RSM) ซึ่งเป็นเทคนิคทางสถิติมาใช้ในการออกแบบเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Bezerra, Santelli, Oliveira, Villar, and Escalera, 2008) ทำให้ทราบความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ แล้วนำมาสร้างเป็นสมการ การกำหนดตัวแปรต้นใช้การออกแบบการทดลองแบบ central composite design โดยพิจารณา 7 ปัจจัย 5 ระดับ จากนั้นหาความสัมพันธ์ของฟังก์ชันในรูปแบบฟังก์ชันพหุนาม (polynomial function) และผลตอบสนองคืออุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนตั้งสมการที่ **ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง** จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้อุณหภูมิภายในโรงเรือนมีค่าต่ำที่สุด การศึกษาเริ่มจากการสุ่มค่าตัวแปรออกแบบ $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ และ x_7 จำนวน 79 ตัวอย่างเพื่อนำมาใช้ในการหาค่าผลตอบสนอง หรือค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือน จากนั้นนำมาวิเคราะห์เพื่อหาพื้นผิวตอบสนอง ขั้นตอนต่อมาเป็นการวิเคราะห์หาค่าการตอบสนองของแต่ละตัวแปรว่าส่งผลต่ออุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนอย่างไร ส่วนขั้นตอนสุดท้ายเป็นการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนมีค่าต่ำที่สุด

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j \leq k} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (4)$$

3. ผลการศึกษา

ผลการจำลองสถานการณ์เพื่อหาการระบายอากาศที่เหมาะสมที่สุดในโรงเรือนเปิดดอกเห็ดหลินจือที่มุ่งหลังคาแบบจั่วสองชั้นโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเมื่อทำการวิเคราะห์แล้วสามารถแสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ที่ได้ดัง Figure 4-9 ซึ่งผลการวิเคราะห์จะแสดงออกมาเป็นแผนที่ของอุณหภูมิ (temperature contour) ดัง Figure 4-6 และเวกเตอร์ความเร็ว (velocity vector) Figure 7-9

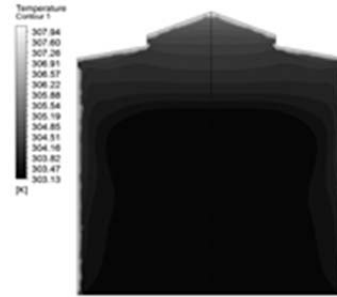


Figure 4 temperature contour of house domain in front view.

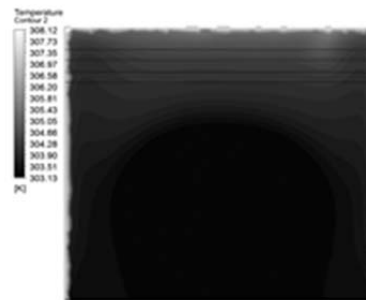


Figure 5 temperature contour of house domain in side view.

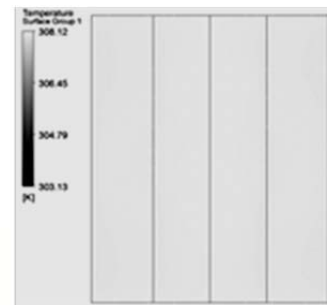


Figure 6 temperature contour of house domain in top view.

แผนที่ใน **ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง** แสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในโรงเรือนที่มุมด้านหน้าจะเห็นว่าการกระจายตัวของอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำอยู่ด้านล่างส่วนอากาศที่มีอุณหภูมิสูงจะลอยตัวอยู่ด้านบนซึ่งสอดคล้องกันกับ **ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง** และ **ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง**

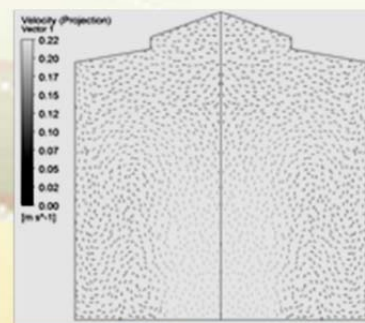


Figure 7 velocity vector of house domain in front view.

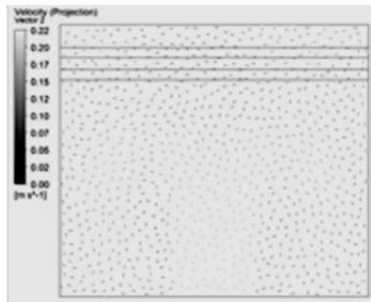


Figure 8 velocity vector of house domain in side view.

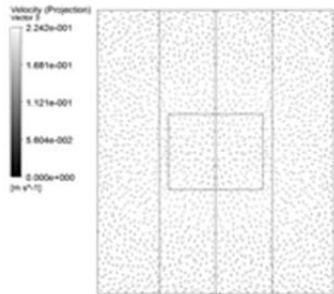


Figure 9 velocity vector of house domain in top view.

ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง - 9 แสดงให้เห็นถึงทิศทางการไหลของอากาศภายในโรงเรือนโดยแสดงเป็นเวกเตอร์ของความเร็วซึ่งจากผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง จะเห็นได้ว่าอากาศมีทิศทางการไหลหมุนวนออกด้านข้างโรงเรือน อีกส่วนหนึ่งลอยขึ้นสู่จั่วด้านบน ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง แสดงให้เห็นเวกเตอร์ความเร็วของอากาศมุมมองด้านข้างแสดงให้เห็นว่าอากาศมีทิศทางการเคลื่อนที่ออกจากช่องเปิดอากาศด้านล่าง และหมุนวนไปในพื้นที่ด้านข้างและด้านบนโรงเรือน ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง แสดงให้เห็นว่าการเปิดช่องรับอากาศด้านล่างยังส่งผลให้เกิดการไหลเวียนของอากาศจากจุดศูนย์กลางโรงเรือนไปรอบตัวโรงเรือน จากนั้นดำเนินเปลี่ยนแปลงตัวแปร x_1 ถึง x_7 เพื่อทดสอบผลการตอบสนอง โดยมีค่าเริ่มต้นดัง ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง

Table 1 parameter of respond surface.

parameter	parameter names	response point
x_1	width of house	3,250
x_2	length of house	3,250
x_3	height of house	2,250
x_4	gap of bottom air	150
x_5	gap of top air	225
x_6	width of hole	650
x_7	length of hole	650

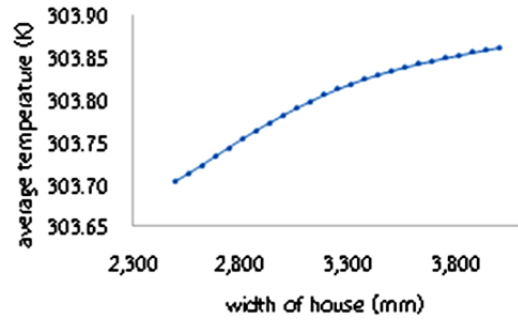


Figure 10 average temperature in various width of house.

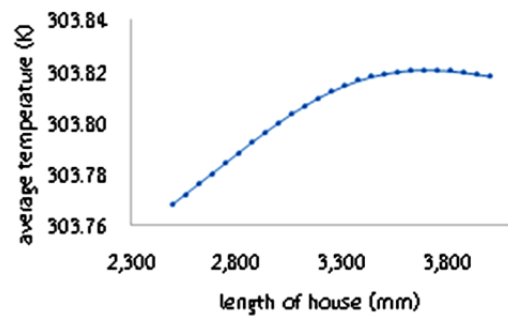


Figure 11 average temperature in various length of house.

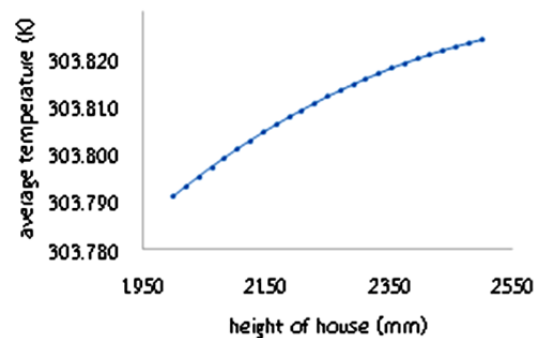


Figure 12 average temperature in various height of house.

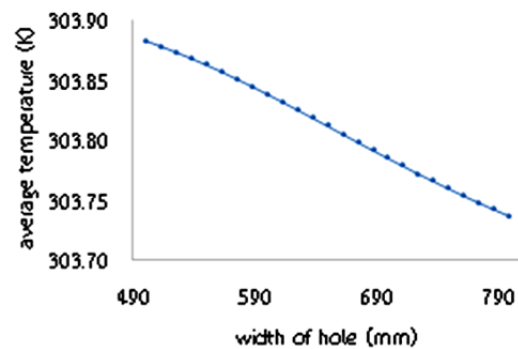


Figure 1 average temperature in various width of hole.

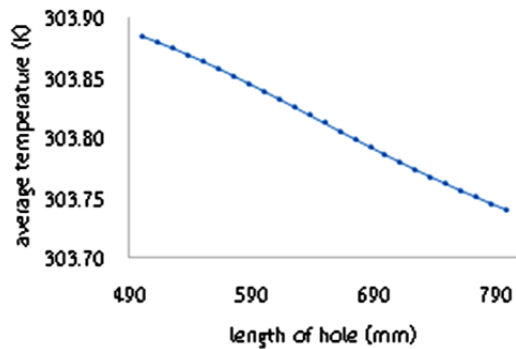


Figure 2 average temperature in various length of hole.

ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งอ้างอิง - 16 แสดงให้เห็นว่าเมื่อมิติของช่องเปิดระหว่างผนังและหลังคา และช่องเปิดที่พื้นโรงเรือนมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโรงเรือนมีค่าลดลง จากนั้นนำเอาผลตอบสนองที่ได้มาวิเคราะห์หาผลตอบสนองเฉพาะตัว (local sensitivity) ต่อค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนจะได้ดัง

ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งอ้างอิง

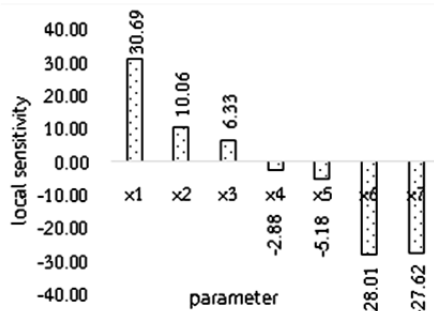


Figure 17 local sensitivity.

จาก **ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งอ้างอิง** แสดงให้ทราบว่าตัวแปร x_1 , x_2 และ x_3 ส่งผลกระทบบต่ออุณหภูมิเฉลี่ยในทางบวก หมายถึงทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้น และตัวแปร x_4 , x_5 , x_6 และ x_7 ส่งผลต่ออุณหภูมิในทางลบหมายถึงทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยมีค่าลดลง ตัวแปรที่ส่งผลกระทบบต่อค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดได้แก่ความกว้างของโรงเรือน ส่วนตัวแปรที่ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยลดลงได้มากที่สุดได้แก่ช่องเปิดด้านล่าง

จากผลการวิเคราะห์แล้วจะได้จุดที่เหมาะสมที่สุดที่สภาวะเงื่อนไขที่โรงเรือนมีความกว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ $2500 \times 3591 \times 2500$ mm มีช่องเปิดระหว่างหน้าจั่วชั้นแรกเท่ากับ 200 mm และช่องเปิดระหว่างหน้าจั่วชั้นที่สองเท่ากับ 291 mm ช่องเปิดที่พื้นมีขนาดกว้าง x ยาวเท่ากับ 800×800 mm ส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนต่ำที่สุดเท่ากับ 303.50 K

4. สรุป

การศึกษานี้เป็นการจำลองสถานการณ์เพื่อหาการระบายอากาศที่เหมาะสมที่สุดในโรงเรือนเปิดดอกเห็ดหลินจือที่มุ่งหลังคาแบบจั่วสองชั้นโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยทำการ

เปลี่ยนแปลงตัวแปรจำนวน 7 ตัวแปร ได้แก่ ขนาดของโรงเรือนมีมิติกว้าง x ยาว x สูง อยู่ระหว่าง 2500-4000 mm, 2500-4000 mm และ 2000-2500 mm กำหนดให้เป็นตัวแปร x_1 , x_2 และ x_3 โดยให้ช่องเปิดด้านบนระหว่างผนังและหลังคาของหน้าจั่วชั้นแรกมีค่าระหว่าง 100-200 mm และชั้นที่สองระหว่าง 150-300 mm กำหนดให้เป็นตัวแปร x_4 และ x_5 ช่องเปิดด้านล่างมีขนาด กว้าง x ยาว อยู่ระหว่าง 500-800 m และ 500-800 m กำหนดให้เป็นตัวแปร x_6 และ x_7 ตามลำดับ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่ามิติของโรงเรือนมีผลต่ออุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือน โดยตัวแปรที่ส่งผลกระทบบต่อค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดได้แก่ความกว้างของโรงเรือน ส่วนตัวแปรที่ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยลดลงได้มากที่สุดได้แก่ช่องเปิดด้านล่าง

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าในสภาวะที่โรงเรือนมีมิติความกว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ $2500 \times 3591 \times 2500$ mm มีช่องเปิดระหว่างหน้าจั่วชั้นแรกเท่ากับ 200 mm และช่องเปิดระหว่างหน้าจั่วชั้นที่สองเท่ากับ 291 mm ช่องเปิดที่พื้นมีมิติของช่องขนาดกว้าง x ยาว เท่ากับ 800×800 mm ส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนต่ำที่สุดเท่ากับ 303.50 K ซึ่งจากผลการศึกษาครั้งนี้จะได้นำไปใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมกับต่อการเปิดดอกเห็ดหลินจือในเงื่อนไขอื่น ๆ ต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และทุนงบประมาณแผ่นดินประจำปี 2560 ที่สนับสนุนงบประมาณในการดำเนินงานวิจัยเรื่องระบบควบคุมสภาวะแวดล้อมโรงเรือนปลูกเห็ดหลินจือแบบอัตโนมัติ รวมถึงสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ และสถาปัตยกรรมศาสตร์ที่กรุณาอนุญาตให้ใช้สถานที่ในการดำเนินงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- Bezerra, M. A., Santelli, R. E., Oliveira, E. P., Villar, L. S., and Escalera, L. A. 2008. Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta*, 965-977.
- Brones, G. L., Varoquaux, P., Chambroy, Y., Bouquant, J., Bureau, B., and Pascat, B. 1992. Storage of common mushroom under controlled atmospheres. *International Journal of Food Science and Technology*, 27(5), 493-505.
- Fungiculture. 2017. (Wikipedia) Retrieved from <https://en.wikipedia.org/wiki/Fungiculture>
- Hopper, E. 2012. *The Basics of Greenhouse Ventilation*. (Garden and Greenhouse) Retrieved from <http://www.->

gardenandgreenhouse.net/articles/july-august2012-
/the-basics-of-greenhouse-ventilation/

- Lambert, E. B. 1993. Effect of Excess Carbon Dioxide on Growing Mushrooms. *Agric Res*, 47(8), 599–608.
- Lee, H.-Y., Ham, E.-J., Yoo, Y.-J., Kim, E.-S., Shim, K.-K., Kim, M.-K., and Koo, C.-D. 2012. Effects of Aeration of Sawdust Cultivation Bags on Hyphal Growth of *Lentinula edodes*. *Mycobiology*, 40(3), 164-167.
- Li, Z., and Zheng, X. 2017. Review of design optimization methods for turbomachinery aerodynamics. *Progress in Aerospace Sciences*, July.
- Mistriotis, A., Arcidiacono, C., Picuno, P., Bot, G., and Scarascia-Mugnozza, G. 1997. Computational analysis of ventilation in greenhouses at zero- and low-wind-speeds. *Agricultural and Forest Meteorology*, 88(1-4), 121-135.
- Mistriotis, A., Bot, G., Picuno, P., and Scarascia-Mugnozza, G. 1997. Analysis of the efficiency of greenhouse ventilation using computational fluid dynamics. *Agricultural and Forest Meteorology*, 85(3-4), 217-228.
- Norton, T., Sun, D.-W., Grant, J., Fallon, R., and Dodd, V. 2007. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review. *Bioresource Technology*, 98(12), 2386-2414.
- Oyster Mushroom Cultivation. 2004. Korea: MushWorld-Heineart Inc.
- Passive ventilation. 2017. Retrieved from windowmaster: <http://www.windowmaster.com/solutions/natural-ventilation/passive-ventilatio>

