

การศึกษาชนิดของหลังคาโรงเรือนที่มีผลต่อการไหลเวียนของอากาศภายในโรงเรือนเปิดดอกเห็ด หลินจือ

Study on the type of greenhouse roof affecting the air ventilation in Lingzhi mushroom house

พลเทพ เวงสูงเนิน^{1*}, ทยาวิร์ หนูบุญ¹, จาริณี จงปลื้มปิติ¹ สนั่น จันทร์พรหม² และ ณัฐดนัย พรธัญเจริญวงศ์³

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร ² สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

744 ถ.สุรนารายณ์ อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

³ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์พัทยา

*ติดต่อ: ponthep.ve@rmu.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 0866539179

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาชนิดของหลังคาโรงเรือนที่มีผลต่อการไหลเวียนของอากาศภายในโรงเรือนเปิดดอกเห็ดหลินจือ โดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในการวิเคราะห์การไหลในสถานะคงตัวของการกระจายอุณหภูมิและความเร็วของอากาศภายในโรงเรือนจำนวน 5 ชนิดได้แก่ หลังคาแบน หลังคาเพิงหมาแหงน หลังคาแบบผีเสื้อ หลังคาแบบหน้าจั่ว และหลังคาแบบหน้าจั่วสองชั้น ซึ่งในโรงเรือนบรรจุก้อนเชื้อเห็ดได้ 520 ก้อน ผลของการศึกษาแสดงให้เห็นว่าโรงเรือนที่มีหลังคาแบบหลังคาแบน หลังคาเพิงหมาแหงน หลังคาแบบผีเสื้อ หลังคาแบบหน้าจั่ว และหลังคาแบบหน้าจั่วสองชั้น มีความเร็วของอากาศที่ไหลภายในโรงเรือนเฉลี่ยเท่ากับ 4.39×10^{-9} m/s 5.28×10^{-11} m/s 9.95×10^{-8} m/s 3.75×10^{-10} m/s และ 3.66×10^{-9} m/s ตามลำดับ และมีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 302.363 K 302.337 K 302.209 K 302.517 K และ 302.015 ตามลำดับ

คำหลัก: พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โรงเรือนเห็ด เห็ดหลินจือ การระบายอากาศ

Abstract

This paper aim to study the roof type of mushroom house that affects ventilation of house of Ganoderma lucidum using the Computational Fluid Dynamics to analyze the steady-state flow of temperature distribution and air velocity in 5 types of house: flat roof, shed roof, butterfly roof, gable roof and double gable roof. A mushroom house contains 520 bag. The results showed the house with a flat roof, shed roof, butterfly roof, gable roof and double gable roof, that have average air flow velocity in the house of 4.39×10^{-9} m/s 5.28×10^{-11} m/s 9.95×10^{-8} m/s 3.75×10^{-10} m/s and 3.66×10^{-9} m/s, respectively. The average temperatures are 302.363 K 302.337 K 302.209 K 302.517 K and 302.015, respectively.

Keywords: Computational Fluid Dynamics, mushroom house, Lingzhi, Ventilation

1. บทนำ

การเพาะเห็ดหลินจือเริ่มจากการผสมก้อนเชื้อ จากนั้นบ่มก้อนเชื้อให้ได้ระยะเวลาตามที่ต้องการจึงนำเอาก้อนเชื้อเห็ดไปเปิดดอกในโรงเรือน ซึ่งโรงเรือนที่เปิดดอกเห็ดจำเป็นต้องมีการควบคุมตัวแปรที่สำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ และการไหลเวียนของอากาศ [1, 2] ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์จะส่งผลต่อความสมบูรณ์ของดอกเห็ด [3, 4, 5] อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในโรงเรือนมีแหล่งความร้อนจากการหายใจของพืชและการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ หากไม่มีการทำให้เกิดการไหลเวียนของอากาศจากภายในสู่ภายนอกจะทำให้พืชเติบโตไม่ดี และความชื้นเป็นปัจจัยพื้นฐานของพืชแต่หากภายในโรงเรือนมีความชื้นที่สูงก็จะนำมาซึ่งโรคพืชได้ ปี 1997 [6, 7] A. Mistriotis และคณะ ได้นำเอาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาใช้ในการวิเคราะห์อากาศที่ไหลแบบบังคับผ่านโรงเรือนที่มีการออกแบบที่แตกต่างกัน ซึ่งผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการนำเอาสมการ $k-\epsilon$ มาใช้ในการวิเคราะห์สมการการปั่นป่วนของอากาศมีผลการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับการทดสอบ ในปีเดียวกันยังได้นำเสนอการวิเคราะห์อากาศที่ไหลแบบอิสระในโรงเรือนด้วยเช่นกัน ซึ่งการไหลเวียนแบบนี้เกิดจากความแตกต่างของความดันหรือความแตกต่างของอุณหภูมิ โดยที่รูปทรงของโรงเรือน จำนวนหน้าต่างและประตูมีผลอย่างยิ่งต่อการไหลเวียนของอากาศทั้งสิ้น [8] ในปี 2006 ก็มีการศึกษาในลักษณะที่คล้ายๆ กัน คือนำเอาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการไหลเวียนของอากาศของโรงเรือนที่มีการเปิดช่องใต้หลังคาในแบบต่างๆ กันแบบ 2 มิติ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการออกแบบหลังคาที่แตกต่างกันจะส่งผลให้ความแตกต่างของความเร็วในจุดที่สนใจมีค่าตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.5 m/s และมีอุณหภูมิแตกต่างกันระหว่าง 2 ถึง 6 °C นั่นหมายถึงการออกแบบหลังคาของโรงเรือนเป็นตัวแปรที่สำคัญอย่างยิ่งต่อการไหลเวียนของอากาศภายในโรงเรือน ซึ่งสอดคล้อง

กับงานวิจัยของ Tomás Norton และคณะ ได้สรุปถึงการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในการวิเคราะห์อากาศภายในโรงเรือน และปัจจัยที่ผลต่อการไหลเวียนของอากาศภายในโรงเรือน [9]

ดังนั้นการออกแบบและสร้างโรงเรือนจึงเป็นสิ่งที่สำคัญเนื่องจากทำให้สามารถควบคุมปัจจัยต่างๆ ที่กล่าวมาได้ง่าย

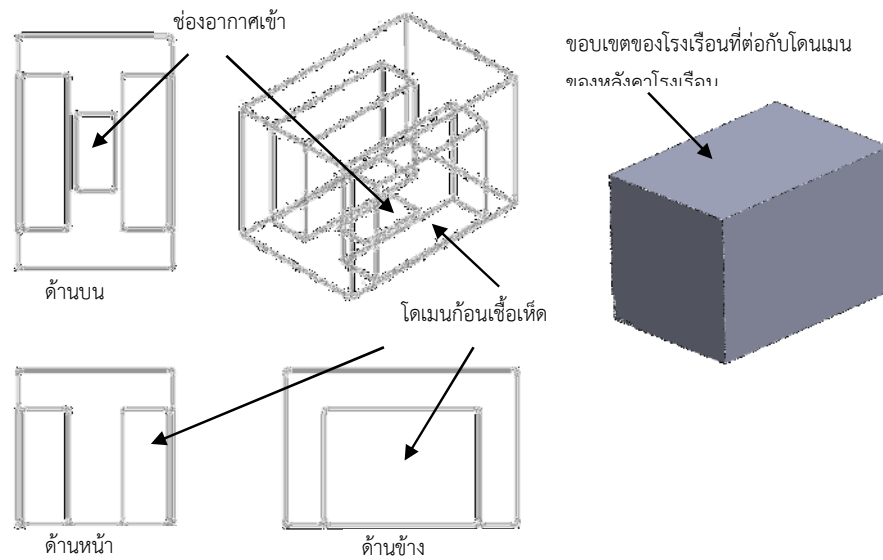
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และวิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การเปิดดอกเห็ดหลินจือ

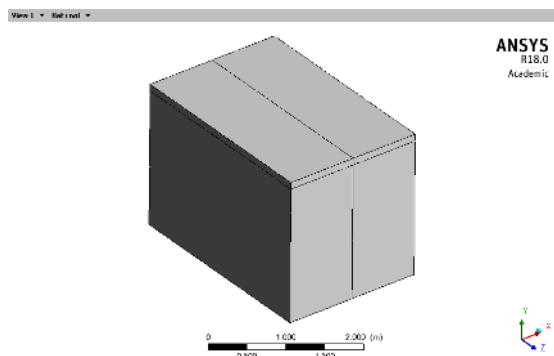
การเพาะเห็ดมีกระบวนการเบื้องต้นได้แก่ การเตรียมวัสดุทางการเกษตรและทำการฆ่าเชื้อโดยการนึ่ง จากนั้นนำเอาเชื้อเห็ดมาหยอดใส่ถุงที่บรรจุวัสดุทางการเกษตร นำเอาถุงที่บรรจุไปบ่มเพื่อให้เชื้อเห็ดมีการเติบโต จากนั้นจึงนำมาเปิดดอกและเก็บผลผลิต [10, 11, 12, 13, 14] ซึ่งเห็ดหลินจือก็มีกระบวนการผลิตตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น

2.2 รูปแบบของหลังคาโรงเรือน

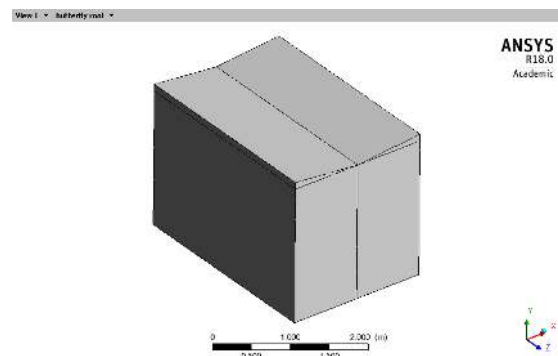
โรงเรือนที่นำมาใช้ในการศึกษามีขนาดเท่ากับ 2 m x 3 m x 2 m แตกต่างกันไปรูปแบบของการมุงหลังคา พื้นโรงเรือนกำหนดให้มีช่องขนาด 0.5 m x 1.0 m ภายในโรงเรือนมีโดเมนขนาด 0.6 m x 2.0 m x 1.5 m จำนวน 2 โดเมน ซึ่งถูกกำหนดไว้บริเวณสองข้างของโรงเรือน แทนก้อนเชื้อเห็ดจำนวน 520 ก้อน ในแต่ละก้อนคายความร้อนด้วยอัตรา 0.036 W/m³ เนื่องจากอัตราการหายใจของเห็ด แผนภาพของโรงเรือนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1 ส่วนรูปแบบของหลังคาโรงเรือนที่ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ในบทความนี้ประกอบไปด้วย 5 รูปแบบ ได้แก่ หลังคาเรียบ (flat roof) หลังคาเพิงหมาแหงน (shed roof) หลังคาปีกผีเสื้อ (butterfly roof) หลังคาจั่ว (gable roof) และหลังคาจั่วสองชั้น (double gable roof) ดังรูปที่ 2 ถึงรูปที่ 6 ตามลำดับ



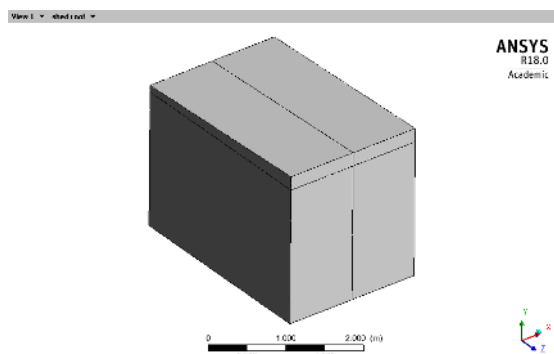
รูปที่ 1 ขนาดของโรงเรือนที่ใช้ในการวิเคราะห์



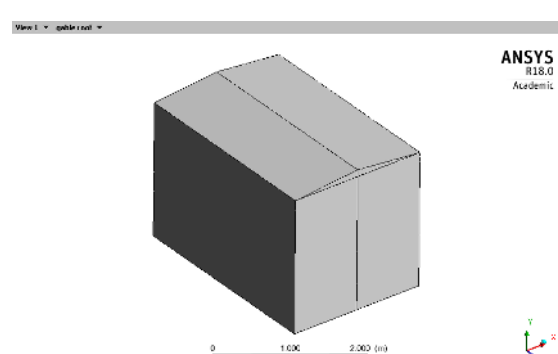
รูปที่ 2 โดเมนของไหลภายในโรงเรือนแบบหลังคาเรียบ (flat)



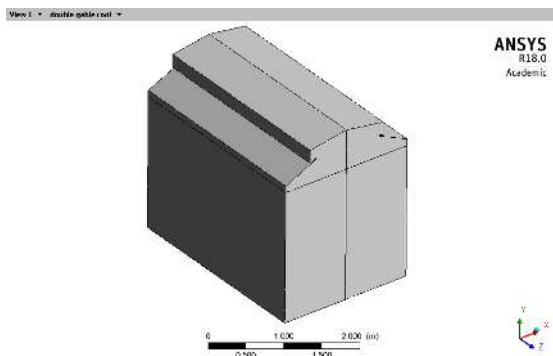
รูปที่ 4 โดเมนของไหลภายในโรงเรือนแบบหลังคาปีกผีเสื้อ (butterfly)



รูปที่ 3 โดเมนของไหลภายในโรงเรือนแบบหลังเพิงหมาแหงน (shed)



รูปที่ 5 โดเมนของไหลภายในโรงเรือนแบบหลังจั่ว (gable)



รูปที่ 6 โดเมนของไหลภายในโรงเรือนแบบหลังคาจั่วสองชั้น (double gable)

2.3. พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

การวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในการศึกษานี้กำหนดให้เป็นการวิเคราะห์แบบสภาวะคงตัว (steady state) สมการที่ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์เป็นไปตามกฎการอนุรักษ์กฎการอนุรักษ์มวล (conservation of mass) กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม (conservation of momentum) และกฎการอนุรักษ์พลังงาน (conservation of energy) [15, 16, 17, 18, 19] ซึ่งสามารถนำเสนอได้ในรูปแบบของสมการที่ (1)

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \phi \vec{v} = \vec{\nabla} \cdot (\Gamma_{\phi} \vec{\nabla} \phi) + s_{\phi} \quad (1)$$

กำหนดให้ภายในโรงเรือนมีชั้นวางหีดจำนวนสองชั้น ชุดที่มีขนาดเท่ากับ 0.6 m x 2.0 m x 1.5 m แทนขนาดของก้อนเชื้อหีดทั้งหมดโดยมีการหายใจทำให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานความร้อนที่มีค่าเท่ากับ 0.036 W/m³ โดยได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดความร้อนโดยภาพถ่าย (thermos scan) มีอุณหภูมิบรรยากาศเท่ากับ 288 K โรงเรือนรับพลังงานจากแสงอาทิตย์ที่มีอุณหภูมิเท่ากับ 303 K การไหลของอากาศที่เกิดขึ้นจากการพาความร้อนอิสระ (free convection) [20] โดเมนของโรงเรือนที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ถูกกำหนดให้มีขนาดเท่ากับ 2 m x 3 m x 2 m โดยจะเชื่อมต่อกับโดเมนของหลังคาโรงเรือนทั้ง 5 รูปแบบได้แก่ หลังคาเรียบ (flat roof) หลังคาเพิงหมาแหงน (shed roof) หลังคาปีกผีเสื้อ

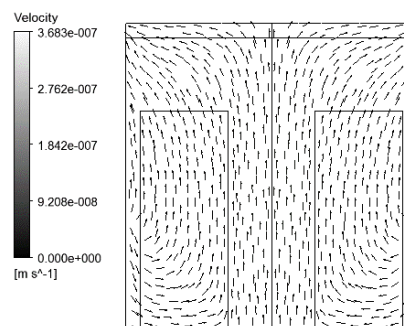
(butterfly roof) หลังคาจั่ว (gable roof) และหลังคาจั่วสองชั้น (double gable roof) เจื่อนไขในการแบ่งเอลิเมนต์พิจารณาจากค่าของความฉากของเอลิเมนต์ (Orthogonal Quality) ซึ่งเอลิเมนต์จะมีคุณภาพดีเมื่อมีค่าความฉากสูง [21] หรือมีค่าเข้าใกล้ 1 และคุณภาพแย่เมื่อมีค่าเข้าใกล้ 0 [22] คุณภาพเอลิเมนต์ของแบบจำลองโรงเรือนที่มีหลังคาที่แตกต่างกันทั้ง 5 รูปแบบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1 โดยแบ่งออกเป็นค่าต่ำสุด (Min) ค่าสูงสุด (Max) ค่าเฉลี่ย (Ave) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Std)

ตารางที่ 1 คุณภาพเอลิเมนต์ของแบบจำลอง

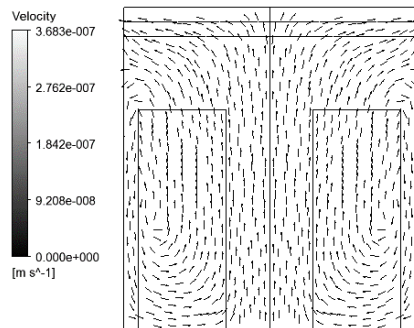
ประเภท	Min	Max	Ave	Std
flat	0.259	1.000	0.853	0.089
shed	0.202	1.000	0.853	0.089
butterfly	0.159	1.000	0.854	0.089
gable	0.157	1.000	0.854	0.089
double gable	0.266	1.000	0.855	0.087

3. ผลการวิจัย

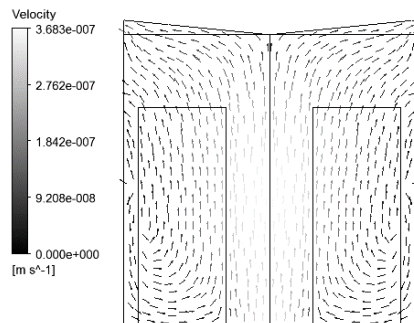
จากการวิเคราะห์การไหลเวียนของอากาศภายในโรงเรือนเปิดดอกหีดด้วยระเบียบวิธีการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแล้วผลของการวิเคราะห์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7 ถึงรูปที่ 26



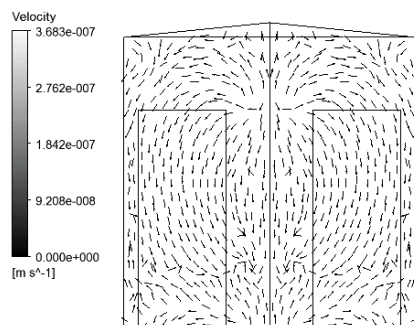
รูปที่ 7 เวกเตอร์การไหลของอากาศภายในโรงเรือน หลังคาเรียบระนาบกึ่งกลางในทิศทาง Z



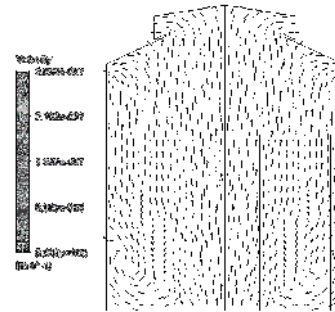
รูปที่ 8 เวกเตอร์การไหลของอากาศภายในโรงเรียน
หลังคาเพิงหมาแหงนระนาบกึ่งกลางในทิศทาง Z



รูปที่ 9 เวกเตอร์การไหลของอากาศภายในโรงเรียน
หลังคาปีกผีเสื้อระนาบกึ่งกลางในทิศทาง Z

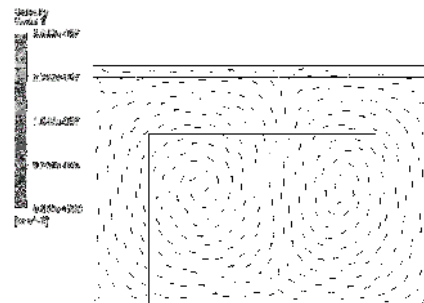


รูปที่ 10 เวกเตอร์การไหลของอากาศภายในโรงเรียน
หลังคาจั่วระนาบกึ่งกลางในทิศทาง Z

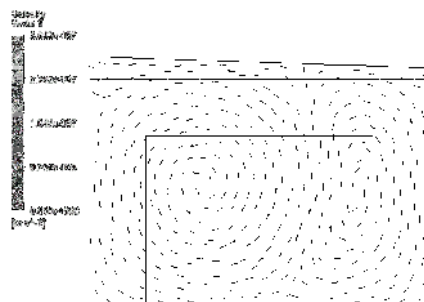


รูปที่ 11 เวกเตอร์การไหลของอากาศภายในโรงเรียน
หลังคาจั่วสองชั้นระนาบกึ่งกลางในทิศทาง Z

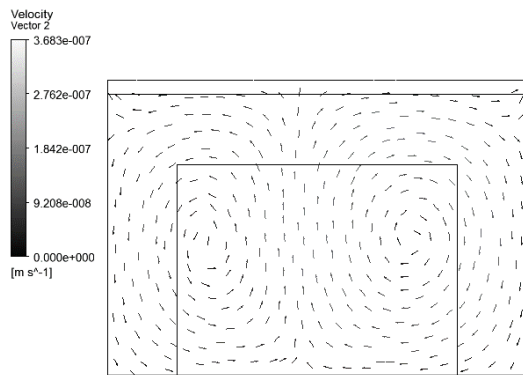
รูปที่ 7 ถึงรูปที่ 11 แสดงให้เห็นการไหลเวียนของอากาศภายในโรงเรียนโดยเวกเตอร์ความเร็วแสดงให้เห็นทราบว่ารูปแบบที่ทำให้มีความเร็วของอากาศสูงสุดเท่ากับ 2.74×10^{-7} m/s และมีความเร็วเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 9.95×10^{-8} m/s คือหลังคาปีกผีเสื้อซึ่งทิศทางของอากาศจะไหลวนด้านข้างของโรงเรียน



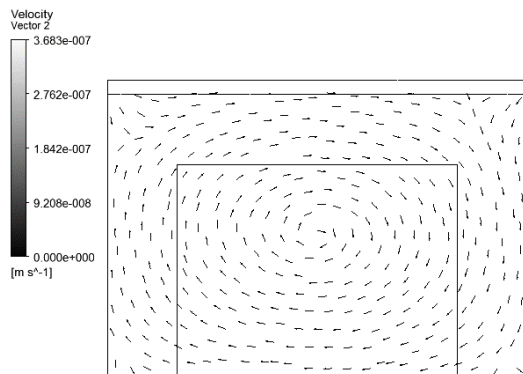
รูปที่ 12 เวกเตอร์การไหลของอากาศภายในโรงเรียน
หลังคาเรียบระนาบกึ่งกลางในทิศทาง X



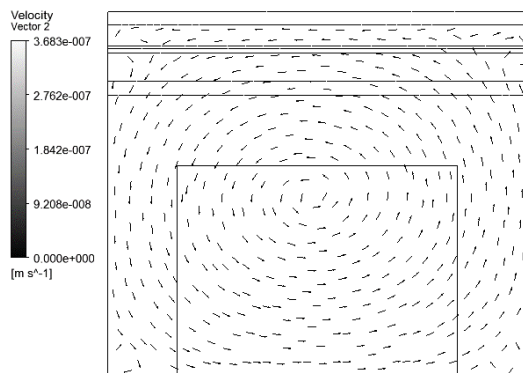
รูปที่ 13 เวกเตอร์การไหลของอากาศภายในโรงเรียน
หลังคาเพิงหมาแหงนระนาบกึ่งกลางในทิศทาง X



รูปที่ 14 เวกเตอร์การไหลของอากาศภายในโรงเรือน
หลังคาปีกผีเสื้อเรียบระนาบกึ่งกลางในทิศทาง X



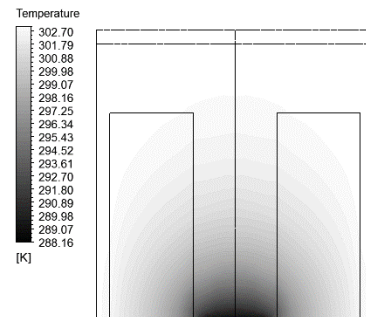
รูปที่ 15 เวกเตอร์การไหลของอากาศภายในโรงเรือน
หลังคาจั่วเรียบระนาบกึ่งกลางในทิศทาง X



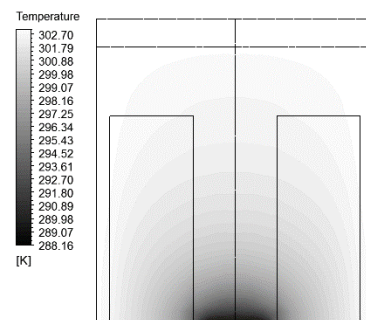
รูปที่ 16 เวกเตอร์การไหลของอากาศภายในโรงเรือน
หลังคาจั่วสองชั้นเรียบระนาบกึ่งกลางในทิศทาง X

รูปที่ 12 ถึงรูปที่ 16 เวกเตอร์การไหลของอากาศภายในโรงเรือนที่มุงหลังคาทั้ง 5 รูปแบบที่ระนาบกึ่งกลางในทิศทาง X ผลการวิเคราะห์ที่ได้คือทิศทางการไหลของอากาศของโรงเรือนหลังคาเรียบ เพิงหมาแหงนและแบบ

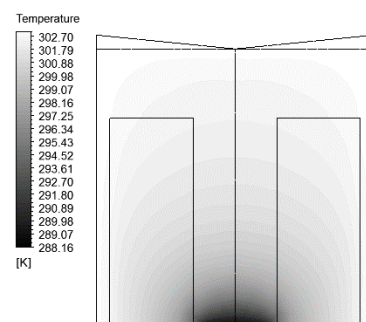
ผีเสื้อมีการไหลแบบสมมาตรในระนาบ XY ซึ่งจะทำให้ความชื้นมีแนวโน้มที่จะกระจายออกด้านข้าง ส่วนแบบหลังคาจั่ว และจั่วสองชั้นทิศทางของอากาศจะมีลักษณะไหลวนในระนาบ XY ซึ่งจะทำให้ความชื้นมีแนวโน้มที่จะกระจายทั่วโรงเรือน โดยมีศูนย์กลางอยู่บริเวณกึ่งกลางของโรงเรือน



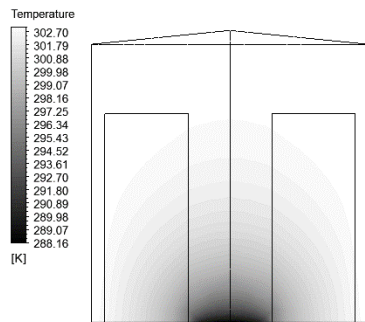
รูปที่ 17 เคนสีแสดงอุณหภูมิภายในโรงเรือนหลังคาเรียบ
ระนาบกึ่งกลางในทิศทาง Z



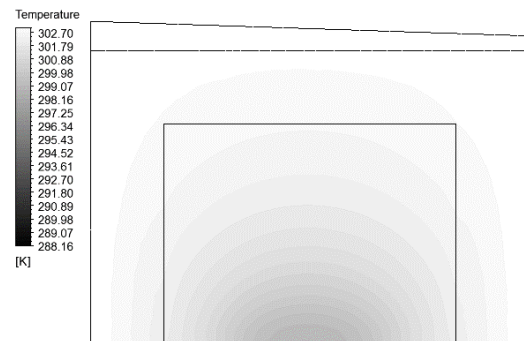
รูปที่ 18 เคนสีแสดงอุณหภูมิภายในโรงเรือนหลังคาเพิง
หมาแหงนระนาบกึ่งกลางในทิศทาง Z



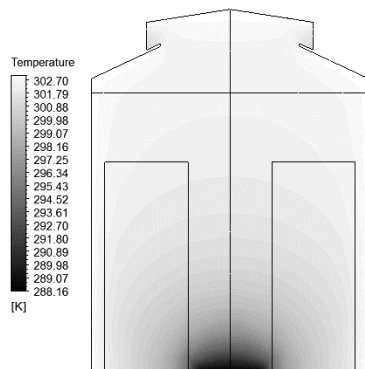
รูปที่ 19 เคนสีแสดงอุณหภูมิภายในโรงเรือนหลังคาปีก
ผีเสื้อระนาบกึ่งกลางในทิศทาง Z



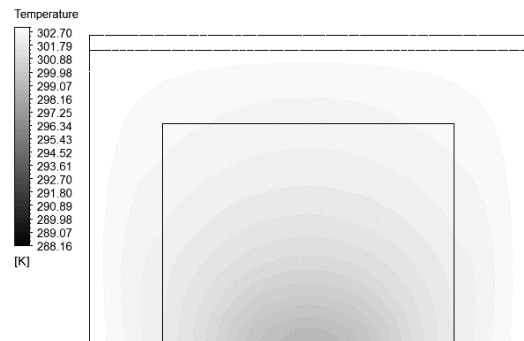
รูปที่ 20 เดสแสดงอุณหภูมิภายในโรงเรือนหลังคาจั่ว
ระนาบกึ่งกลางในทิศทาง Z



รูปที่ 23 เดสแสดงอุณหภูมิภายในโรงเรือนหลังคาเพิง
หมาแหงนระนาบกึ่งกลางในทิศทาง X

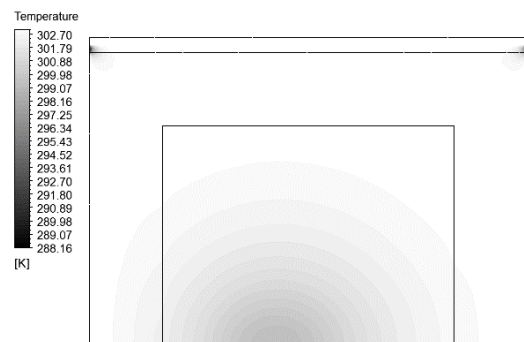


รูปที่ 21 เดสแสดงอุณหภูมิภายในโรงเรือนหลังคาจั่ว
สองชั้นระนาบกึ่งกลางในทิศทาง Z

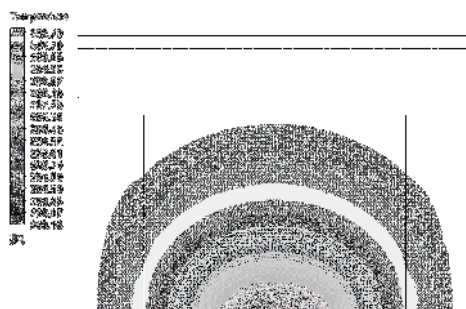


รูปที่ 24 เดสแสดงอุณหภูมิภายในโรงเรือนหลังคาปีก
ผีเสื้อระนาบกึ่งกลางในทิศทาง X

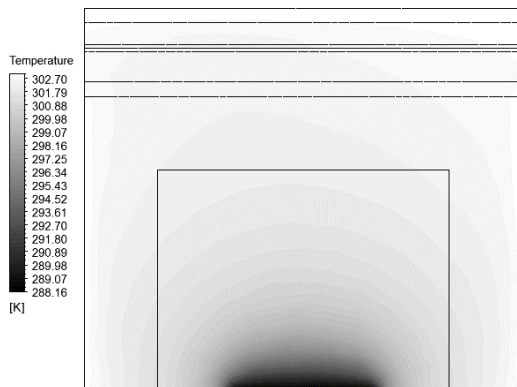
การกระจายอุณหภูมิของโรงเรือนเปิดดอกเห็ดที่มุงหลังคาทั้ง 5 รูปแบบถึงแสดงเป็นเดสซึ่งรูปที่ 17 ถึงรูปที่ 21 แสดงเดสแสดงอุณหภูมิภายในโรงเรือนหลังคาจั่วสองชั้นระนาบกึ่งกลางในทิศทาง Z ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโรงเรือนที่มุงด้วยหลังคาแบบหน้าจั่วสองชั้นมีอุณหภูมิต่ำสุดที่ 302.57 K และมีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 302.02 K เมื่อเปรียบเทียบกับทั้ง 5 รูปแบบแล้วจะมีค่าต่ำที่สุด



รูปที่ 25 เดสแสดงอุณหภูมิภายในโรงเรือนหลังคาจั่ว
ระนาบกึ่งกลางในทิศทาง X

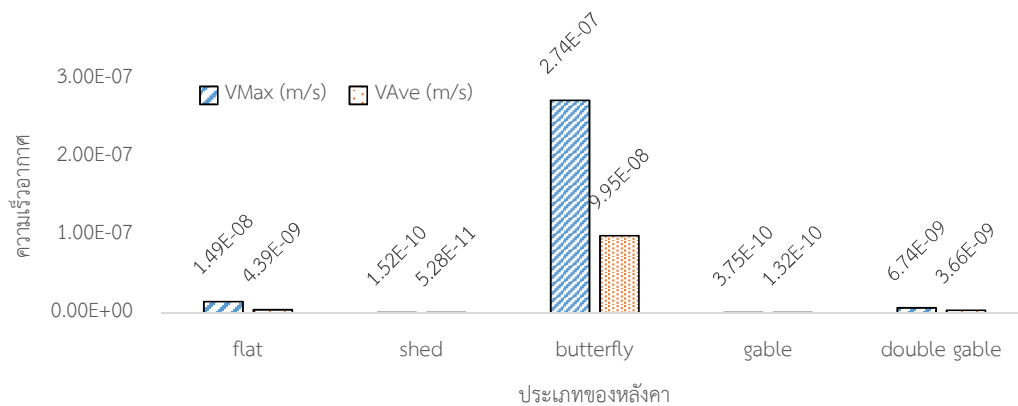


รูปที่ 22 เดสแสดงอุณหภูมิภายในโรงเรือนหลังคาเรียบ
ระนาบกึ่งกลางในทิศทาง X

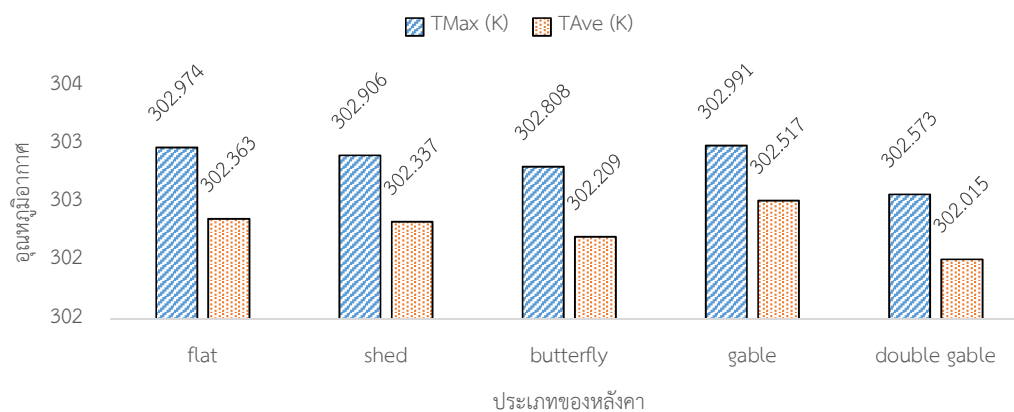


รูปที่ 26 เคนส์แสดงอุณหภูมิภายในโรงเรือนหลังคาจั่ว
สองชั้นระนาบกึ่งกลางในทิศทาง X

หากพิจารณาถึงอุณหภูมิภายในโรงเรือนหลังคาจั่วสองชั้นระนาบกึ่งกลางในทิศทาง X ดังรูปที่ 22 ถึงรูปที่ 26 แล้วจะเห็นว่าหลังคาแบบจั่วสองชั้นจะมีการกระจายอุณหภูมิที่ครอบคลุมพื้นที่ส่วนที่เปิดดอกเห็นมากกว่ารูปแบบอื่นซึ่งผลของการวิเคราะห์สามารถแสดงเป็นกราฟความเร็ว และอุณหภูมิได้ดังรูปที่ 27 และรูปที่ 28 ตามลำดับ



รูปที่ 27 ความเร็วของอากาศภายในโรงเรือนที่มีการมุงหลังคาในแต่ละรูปแบบ



รูปที่ 28 อุณหภูมิของอากาศภายในโรงเรือนที่มีการมุงหลังคาในแต่ละรูปแบบ

4. สรุปและอภิปรายผล

บทความนี้แสดงถึงการศึกษาชนิดของหลังคาโรงเรือนที่มีผลต่อการไหลเวียนของอากาศภายในโรงเรือนเปิดดอกเห็ดหลินจือด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยโรงเรือนมีขนาดเท่ากับ $2\text{ m} \times 3\text{ m} \times 2\text{ m}$ โดยจะเชื่อมต่อกับโดเมนของไหลของหลังคาโรงเรือนทั้ง 5 รูปแบบได้แก่ หลังคาเรียบ (flat roof) หลังคาเพิงหมาแหงน (shed roof) หลังคาปีกผีเสื้อ (butterfly roof) หลังคาจั่ว (gable roof) และหลังคาจั่วสองชั้น (double gable roof) หากพิจารณาการไหลเวียนของอากาศภายในโรงเรือนระนาบกึ่งกลางในทิศทาง Z เวกเตอร์ความเร็วแสดงให้เห็นว่ารูปแบบที่ทำให้มีความเร็วของอากาศสูงสุดเท่ากับ $2.74 \times 10^{-7}\text{ m/s}$ และมีความเร็วเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ $9.95 \times 10^{-8}\text{ m/s}$ คือหลังคาปีกผีเสื้อซึ่งทิศทางของอากาศจะไหลวนด้านข้างของโรงเรือนซึ่งอาจจะนำเอาความชื้นบริเวณพื้นขึ้นไประเหยพาเห็ดได้ เวกเตอร์การไหลที่ระนาบกึ่งกลางในทิศทาง X แสดงให้เห็นว่าทิศทางการไหลของอากาศของโรงเรือนหลังคาเรียบ เพิงหมาแหงนและแบบผีเสื้อมีการไหลแบบสมมาตรในระนาบ XY ส่วนแบบหลังคาจั่วและจั่วสองชั้นทิศทางของอากาศจะมีลักษณะไหลวนในระนาบ XY นั้นหมายถึงหากมีความชื้นที่พื้นก็อาจจะถูกพาไปโดยอากาศได้ดี

เมื่อกำหนดให้โปรแกรมแสดงเฉดสีอุณหภูมิภายในโรงเรือนที่ระนาบกึ่งกลางในทิศทาง Z แสดงให้เห็นว่าโรงเรือนที่มุงด้วยหลังคาแบบหน้าจั่วสองชั้นมีอุณหภูมิต่ำสุดที่ 302.57 K และมีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 302.02 K เมื่อเปรียบเทียบกับทั้ง 5 รูปแบบแล้วจะมีค่าต่ำที่สุดและเฉดสียังแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิภายในโรงเรือนหลังคาจั่วสองชั้นระนาบกึ่งกลางในทิศทาง X มีการกระจายอุณหภูมิที่ครอบคลุมพื้นที่ส่วนที่เปิดดอกเห็ดมากกว่ารูปแบบอื่น ซึ่งจากผลการศึกษานี้จะถูกนำไปใช้ในการออกแบบโรงเรือนเปิดดอกเห็ดหลินจือเพื่อเพิ่ม

การไหลเวียนของอากาศ ลดอุณหภูมิและป้องกันการเกิดโรคต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานที่อนุญาตให้ใช้พื้นที่ในการศึกษา และขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่มอบทุนสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] "Fungiculture," Wikipedia, March 2017. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Fungiculture>.
- [2] E. Hopper, "The Basics of Greenhouse Ventilation," Garden & Greenhouse, 5 June 2012. [Online]. Available: <http://www.gardenandgreenhouse.net/articles/july-august-2012/the-basics-of-greenhouse-ventilation/>.
- [3] G. L. Briones, P. Varoquaux, Y. Chambroy, J. Bouquant, B. Bureau and B. Pascat, "Storage of common mushroom under controlled atmospheres," *International Journal of Food Science & Technology*, vol. 27, no. 5, pp. 493-505, 1992.
- [4] E. B. Lambert, "Effect of Excess Carbon Dioxide on Growing Mushrooms," vol. 47, no. 8, 1993.
- [5] H.-Y. Lee, E.-J. Ham, Y.-J. Yoo, E.-S. Kim, K.-K. Shim, M.-K. Kim and C.-D. Koo, "Effects of Aeration of Sawdust Cultivation Bags on Hyphal Growth of *Lentinula edodes*,"



- Mycobiology*, vol. 40, no. 3, pp. 164-167, 2012.
- [6] A. Mistriotis, G. Bot, P. Picuno and G. Scarascia-Mugnozza, "Analysis of the efficiency of greenhouse ventilation using computational fluid dynamics," *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 85, no. 3-4, pp. 217-228, 1997.
- [7] Oyster Mushroom Cultivation, Korea: MushWorld-Heineart Inc., 2004.
- [8] A. Mistriotis, C. Arcidiacono, P. Picuno, G. Bot and G. Scarascia-Mugnozza, "Computational analysis of ventilation in greenhouses at zero- and low-wind-speeds," *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 88, no. 1-4, pp. 121-135, 1997.
- [9] T. Norton, D.-W. Sun, J. Grant, R. Fallon and V. Dodd, "Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review," *Bioresource Technology*, vol. 98, no. 12, pp. 2386-2414, 2007.
- [10] "Growing mushroom," The Pennsylvania State University, College of Agriculture, Extension Service, University Park, Pennsylvania, November 2016. [Online]. Available: <http://www.mushroominfo.com/growing-mushrooms/six-steps-to-mushroom-farming/>.
- [11] B. Harris, Growing Wild Mushrooms: A Complete Guide to Cultivating Edible and Hallucinogenic Mushrooms, Oakland: Ronin Publishing, Inc., 2003.
- [12] E. Coriander, How to Grow Mushrooms: Grow Your Own Mushrooms Garden Guide, 2014.
- [13] P. Oei, Small-scale Mushroom Cultivation, Netherlands: Agromisa Foundation and CTA, 2005.
- [14] S. Russell, The Essential Guide to Cultivating Mushrooms: Simple and Advanced Techniques for Growing Shiitake, Oyster, Lion's Mane, and Maitake Mushrooms at Home, North Adams: Storey Publishing, 2014.
- [15] V. H. K. and W. Malalasekera, An Introduction to Computational Fluid Dynamics, England: Pearson Education Limited, 2007.
- [16] T. Petrilă, D. Trif and C. Brezinski, Basics of Fluid Mechanics and Introduction to Computational Fluid Dynamics, Boston: Springer Science + Business Media, Inc., 2005.
- [17] J. F. Wendt, Computational Fluid Dynamics An Introduction, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [18] H. Lomax, T. H. Pulliam and D. W. Zingg, Fundamentals of Computational Fluid Dynamics, California: NASA Ames Research Center, 1999.
- [19] C. Pozrikidis, Introduction to Theoretical and Computational Fluid Dynamics, New



- York: Oxford University Press, Inc., 2011.
- [20] G. H. Yeoh and K. K. Yuen, Computational Fluid Dynamics in Fire Engineering, Burlington: Elsevier Inc., 2009.
- [21] Y. Zhang, Y. Jia and S. S. Wang, "An improved nearly-orthogonal structured mesh generation system with smoothness control functions," *Journal of Computational Physics*, vol. 231, no. 16, pp. 5289-5305, 2012.
- [22] "Accuracy, Convergence and Mesh Quality," June 2012. [Online]. Available: <http://www.pointwise.com/theconnector/May-2012/Mesh-Quality.shtml>.