

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบ
เรือนกระจก

The study of influencing factors of the drying process in a
greenhouse solar dryer.



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบ
เรือนกระจก

The study of influencing factors of the drying process in a
greenhouse solar dryer.



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The study of influencing factors of the drying process in a
greenhouse solar dryer.



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN RAIL TRANSPORTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2566

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมขนส่งทางราง


คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก

The study of influencing factors of the drying process in a greenhouse solar dryer.

ผู้จัดทำ

1. นายภานุกร ขาวสุทธิ รหัสประจำตัว 63010745
2. นายรวิพล ทองทาบ รหัสประจำตัว 63010804
3. นายศักรินทร์ ทูคำมี รหัสประจำตัว 63010911


(ผศ.ดร.อนุวัต พิณโสภณ)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก

นายภานุกร ชาวสุทธิ์ รหัสประจำตัว 63010745

นายรวีพล ทองทาบ รหัสประจำตัว 63010804

นายศักรินทร์ ทูกามี รหัสประจำตัว 63010911

ผศ.ดร.อุन्नัต พิณโสภณ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2566

บทคัดย่อ

ลักษณะการสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในปัจจุบัน ขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์ ปริมาณของผลิตภัณฑ์ และความยากง่ายในการสร้าง ซึ่งที่มีการใช้งานแพร่หลายในประเทศไทยคือรูปทรงพาราโบลิกหรือรูปทรงหลังคาโค้ง หากแต่การออกแบบและสร้างโรงเรือนโดยไม่ได้คำนึงถึงปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งก็สามารถส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งด้วยเช่นกัน ปัญหาดังกล่าวอาจมาจากหลายสาเหตุด้วยกัน แต่สาเหตุหนึ่งที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญคือปัจจัยภายใน เช่น การไหลเวียนของอากาศ และการกระจายตัวของอุณหภูมิ ซึ่งส่งผลต่อการแห้งที่ไม่เท่ากัน เป็นผลให้เกิดเชื้อราได้ด้วยเช่นกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยภายในที่มีผลต่อการอบแห้งเพื่อออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยวิธีคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหล (CFD) ภายในเครื่องอบแห้ง กรณีของแบบจำลองที่ทำการศึกษาคือ อัตราส่วนความกว้างต่อความยาวที่ 1.5:1, 1:1.5 และ 1:1 และที่ความสูงที่เพิ่มขึ้นดังต่อไปนี้ 0.6, 0.7, 0.85, 1.05, 1.30 และ 1.60 เมตร ภายใต้สภาพแวดล้อมเดียวกัน จากการทดลองผู้วิจัยสรุปได้ว่าแบบจำลองที่อัตราส่วนความกว้างต่อความยาว 1.5:1 หรือกรณีที่ 1 ที่ความสูง 0.6 เมตรมีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้งผักตบชวา 10 กิโลกรัม เนื่องจากมีความเร็วเฉลี่ยของอากาศมีค่า 0.233 m/s, ค่าเฉลี่ย TKE มีค่า 0.01194 m²/s² และ HTC มีค่า 0.957 W/m².K ซึ่งตัวแปรทั้ง 3 มีค่าสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกกรณีและทุกความสูงแม้ว่าค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในแบบจำลองมีค่า 335.23 K จะมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกกรณีและทุกความสูง สำหรับประโยชน์ของงานวิจัยนี้คือ สามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปประกอบการศึกษาเป็นแนวทางในการสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับผักตบชวา 10 กิโลกรัม

คำหลัก: เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์, การคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหล, ผักตบชวา

The study of influencing factors of the drying process in a greenhouse solar dryer.

| | | |
|-----------------------------|-----------|-----------|
| Panukorn | Khaosut | 63010053 |
| Ravipon | Thongthab | 63010390 |
| Sakkarin | Thukhammi | 63010911 |
| Asst.Prof.Dr.Unnat Pinsopon | Advisor | |
| | | Year 2566 |

Abstract

The characteristics of solar drying systems in the present depend on the type of product, the quantity of the product, and the ease of construction. A popular design in Thailand is the parabolic or curved roof shape. However, designing and constructing a greenhouse without considering factors of the drying process can impact the quality of the dried product. Several issues may arise, with one significant factor being the internal conditions, such as air circulation and temperature distribution. This study aims to investigate internal factors influencing drying for design a Greenhouse Solar Dryer using Computational Fluid Dynamics (CFD). The study focuses on parabolic solar dryers with a fixed width-to-length ratio of 1.5:1, 1:1.5, and 1:1, and varying heights of 0.6, 0.7, 0.85, 1.05, 1.30, and 1.60 meters. From the experiment, the researcher concluded that the model with a width-to-length ratio of 1.5:1 or case 1 at a height of 0.6 meters was the most suitable for drying 10 kg of water hyacinth because the average air velocity was 0.233 m./s, the mean TKE is 0.01194 m²/s² and HTC is 0.957 W/m².K. All three variables have the highest values for all cases and all heights even though the mean temperature within the model is 335.23 K. It will have the lowest value when comparing all cases and all heights. The simulations were conducted under the same environmental conditions. The results of this study will provide valuable information for the design and construction of efficient solar dryers for water hyacinths (10 kg).

Keywords: Solar dryer, Computational fluid dynamics (CFD), Water hyacinth.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เกิดขึ้นและสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องด้วยได้รับการสนับสนุนและความช่วยเหลืออย่างยิ่งในด้านต่างๆ จากบุคลากรหลายฝ่ายที่ให้คำปรึกษา และคำแนะนำแนวทางการศึกษา ขอขอบคุณ ผศ.ดร.อุจน์ต์ พิณโสภณ อาจารย์ที่ปรึกษา และ ผศ.ดร.ณัฐวดี เรื่องตระกูล ที่คอยมอบความรู้ให้การสนับสนุน คำแนะนำ เกี่ยวกับหัวข้อการทำปริญญานิพนธ์เล่มนี้ เป็นอย่างสูงที่ได้ให้ความใส่ใจคอย ติดตามความคืบหน้าของโครงการ คอยให้คำชี้แนะและคำแนะนำที่เปี่ยมไปด้วยความรู้และประสบการณ์ จนกระทั่งปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณ รศ.ดร.วิฑาดา เจษฎารัตนชัย, ศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข และ ดร. เอกราช บำรุงไทยชัย ชาญ ที่ได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลในโปรแกรม ANSYS และนำมาประยุกต์ใช้กับการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วง ขอขอบคุณบิดา มารดา รุ่นพี่และเพื่อนๆ สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางรางที่ให้คำปรึกษาและให้กำลังใจจน สามารถทำปริญญานิพนธ์นี้ได้เสร็จสมบูรณ์

นายภาณุกร ชาวสุทธิ
นายวิพล ทองทาบ
นายศักรินทร์ ทู่คำมี

สารบัญ

หน้า

| | |
|--|-----|
| บทคัดย่อ..... | I |
| Abstract..... | II |
| กิตติกรรมประกาศ..... | III |
| สารบัญ..... | IV |
| สารบัญตาราง..... | IX |
| สารบัญรูป..... | X |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ที่มาของการศึกษา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา..... | 2 |
| 1.3 สมมติฐานของการศึกษา..... | 2 |
| 1.4 ขอบเขตการของการศึกษา..... | 2 |
| 1.5 ขั้นตอนการศึกษา..... | 2 |
| 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา..... | 3 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 4 |
| 2.1 ผักตบชวา..... | 4 |
| 2.1.1 ความเป็นมาของผักตบชวา..... | 4 |
| 2.1.2 ลักษณะของผักตบชวา..... | 4 |
| 2.1.3 การขยายพันธุ์ของผักตบชวา..... | 6 |
| 2.1.4 ปัญหาจากผักตบชวา (กาญจนา จันทร์สิงห์, 10 ตุลาคม 2563)..... | 6 |

| | |
|--|----|
| 2.1.5 การกำจัดผักตบชวา..... | 7 |
| 2.1.6 ประโยชน์ของผักตบชวา..... | 7 |
| 2.2 การถ่ายเทความร้อน..... | 8 |
| 2.2.1 การพาความร้อน (convection)..... | 8 |
| 2.2.1.1 การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural or free convection)..... | 9 |
| 2.2.1.2 การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection)..... | 9 |
| 2.2.1.3 การแผ่รังสี (radiation)..... | 10 |
| 2.3 อากาศชื้น..... | 11 |
| 2.3.1 เอนทัลปี (enthalpy, h)..... | 11 |
| 2.3.2 อัตราส่วนความชื้น (humidity ratio, w)..... | 12 |
| 2.3.3 ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity, rh)..... | 12 |
| 2.3.4 ความดันไอน้ำ (vapor pressure, P_v)..... | 12 |
| 2.4 วัสดุชื้น (moist materials)..... | 13 |
| 2.4.1 การแสดงค่าความชื้นผลิตภัณฑ์..... | 13 |
| 2.4.1.1 ความชื้นมาตรฐานเปียก (moisture wet basis)..... | 13 |
| 2.4.1.2 ความชื้นมาตรฐานแห้ง (moisture dry basis)..... | 13 |
| 2.4.2 น้ำในวัสดุชื้น..... | 13 |
| 2.5 การเพิ่มความสามารถในการแห้งของวัสดุ..... | 14 |
| 2.6 แอคติวิตีของน้ำ..... | 14 |
| 2.7 หลักการพื้นฐานการอบแห้ง..... | 16 |
| 2.7.1 อัตราการทำแห้ง (drying rate)..... | 16 |
| 2.7.2 ความชื้นสมดุล..... | 17 |
| 2.7.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้ง..... | 17 |

| | |
|--|----|
| 2.8 ประเภทของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ | 18 |
| 2.8.1 ระบบอบแห้งแบบ Passive..... | 18 |
| 2.8.1.1 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทการไหลเวียนตามธรรมชาติแบบรับรังสี อาทิตย์ทางอ้อม (Distributed-type natural-circulation solar-energy dryers) | 18 |
| 2.8.1.2 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทการไหลเวียนตามธรรมชาติแบบรับรังสี อาทิตย์โดยตรง (Integral-type natural-circulation solar-energy dryers)..... | 21 |
| 2.8.1.3 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทการไหลเวียนตามธรรมชาติแบบรับรังสี อาทิตย์ผสม (Mixed-mode natural-circulation solar-energy dryers)..... | 26 |
| 2.8.2 ระบบอบแห้งแบบ Active..... | 28 |
| 2.8.2.1 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทแอคทีฟแบบรับรังสีอาทิตย์โดยตรง (Integral-type natural-circulation solar-energy dryers)..... | 28 |
| 2.8.2.2 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทแอคทีฟแบบรับรังสีอาทิตย์ทางอ้อม (Distributed-type active solar-energy drying systems) | 30 |
| 2.8.2.3 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทแอคทีฟแบบรับรังสีอาทิตย์แบบผสม (Distributed-type active solar-energy drying systems) | 31 |
| 2.9 การคำนวณประสิทธิภาพเครื่องอบแห้ง | 33 |
| 2.9.1 หลักการทำงานของระบบอบแห้งแบบเรือนกระจก..... | 34 |
| 2.9.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก | 34 |
| 2.10 Computational Fluid Dynamics, CFD..... | 40 |
| 2.10.1 Governing equations..... | 41 |
| 2.10.2 K-epsilon Turbulence Models..... | 42 |
| 2.10.2.1 Realizable k-epsilon Model..... | 42 |
| 2.10.3 Modeling radiation | 43 |
| 2.10.4 สมการโมเดล Model DO..... | 47 |

| | |
|---|----|
| 2.11 โปรแกรมที่เกี่ยวข้อง..... | 48 |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน..... | 50 |
| 3.1 เงื่อนไขเริ่มต้นและการออกแบบเครื่องอบแห้ง..... | 50 |
| 3.2 การวิเคราะห์แบบจำลองเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์..... | 51 |
| 3.2.1 การสร้างแบบจำลองเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (Create 3D Model)..... | 51 |
| 3.2.2 นำเข้าไฟล์แบบจำลองเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์..... | 52 |
| 3.2.3 การสร้างเมช (Meshing)..... | 54 |
| 3.2.4 การกำหนดขนาดของเอลิเมนต์..... | 56 |
| 3.2.5 การตั้งชื่อผิวของแบบจำลอง (Named Selection)..... | 57 |
| 3.2.6 การตั้งค่าการวิเคราะห์ปัญหาแบบจำลองการแผ่รังสีความร้อน..... | 58 |
| 3.2.6.1 General..... | 58 |
| 3.2.6.2 การกำหนดโมเดล (Models)..... | 59 |
| 3.2.6.3 การกำหนดคุณสมบัติวัสดุ (Materials)..... | 60 |
| 3.2.7 การกำหนดขอบเขตผิวของวัสดุ (Boundary Conditions)..... | 61 |
| 3.2.8 การกำหนดเงื่อนไขในแก้ปัญหาการวิเคราะห์การแผ่รังสีความร้อน (Solution)..... | 62 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปราย..... | 64 |
| 4.1 ความเป็นอิสระทางกริด (Grid Independence)..... | 64 |
| 4.2 การวิเคราะห์แผนภาพ Contour ภายในแบบจำลองที่เวลา 12.00 น..... | 78 |
| 4.2.1 แผนภาพ Temperature contour..... | 79 |
| 4.2.1.1 กรณีที่ 1 พื้นี่ฐาน 1.884 × 1.256 เมตร..... | 79 |
| 4.2.1.2 กรณีที่ 2 พื้นี่ฐาน 1.256 × 1.884 เมตร..... | 80 |
| 4.2.1.3 กรณีที่ 3 พื้นี่ฐาน 1.538 × 1.538 เมตร..... | 81 |
| 4.2.2 แผนภาพ Velocity contour..... | 82 |

| | |
|--|-----|
| 4.2.2.1 กรณีที่ 1 พื้นี่ฐาน 1.884×1.256 เมตร..... | 82 |
| 4.2.2.2 กรณีที่ 2 พื้นี่ฐาน 1.256×1.884 เมตร..... | 83 |
| 4.2.2.3 กรณีที่ 3 พื้นี่ฐาน 1.538×1.538 เมตร..... | 84 |
| 4.2.3 แผนภาพ Turbulence Kinetic Energy contour..... | 85 |
| 4.2.3.1 กรณีที่ 1 พื้นี่ฐาน 1.884×1.256 เมตร..... | 86 |
| 4.2.3.2 กรณีที่ 2 พื้นี่ฐาน 1.256×1.884 เมตร..... | 86 |
| 4.2.3.3 กรณีที่ 3 พื้นี่ฐาน 1.538×1.538 เมตร..... | 87 |
| 4.2.4 แผนภาพ Velocity vector..... | 88 |
| 4.2.4.1 กรณีที่ 1 พื้นี่ฐาน 1.884×1.256 เมตร..... | 88 |
| 4.2.4.2 กรณีที่ 2 พื้นี่ฐาน 1.256×1.884 เมตร..... | 91 |
| 4.2.4.3 กรณีที่ 3 พื้นี่ฐาน 1.538×1.538 เมตร..... | 93 |
| 4.3 ตัวแปรที่มีผลต่อการอบแห้ง..... | 96 |
| 4.3.1 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในแบบจำลองที่เวลา 12:00 น..... | 98 |
| 4.3.2 ความเร็วเฉลี่ยของอากาศภายในแบบจำลองที่เวลา 12:00 น..... | 99 |
| 4.3.3 Turbulence Kinetic Energy, TKE ที่เวลา 12:00 น..... | 100 |
| 4.3.4 Heat Transfer Coefficient ระหว่างผิวแบบจำลองและอากาศ, HTC ที่เวลา 12:00 น... 101 | |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง..... | 105 |
| 5.1 สรุปและอภิปรายผล..... | 104 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ..... | 107 |
| เอกสารอ้างอิง..... | 108 |
| ภาคผนวก ก..... | 111 |

สารบัญตาราง

| ตาราง | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 2.1 ตารางค่าแอกติวิตีของน้ำต่ำสุดที่จุลินทรีย์สามารถมีชีวิตอยู่ได้..... | 15 |
| ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบเครื่องอบแห้งแบบการรังสีโดยตรงกับทางอ้อม..... | 25 |
| ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของอากาศ..... | 61 |
| ตารางที่ 3.2 ตารางคุณสมบัติของโพลีคาร์บอเนต..... | 61 |
| ตารางที่ 3.3 ตารางคุณสมบัติของอะลูมิเนียม..... | 61 |
| ตารางที่ 3.4 ตารางการกำหนดขอบเขตผิววัสดุของเครื่องอบแห้ง..... | 61 |
| ตารางที่ 3.5 ตารางการกำหนดรูทางเข้าและทางออก..... | 62 |
| ตารางที่ 4.1 ผลลัพธ์ที่จำนวนเอลิเมนต์ต่างๆ ของแบบจำลองเครื่องอบแห้งกรณีที่ 1 ความสูง 0.6 เมตร เวลา 12:00 น..... | 65 |
| ตารางที่ 4.2 ผลลัพธ์ที่จำนวนเอลิเมนต์ต่างๆ ของแบบจำลองเครื่องอบแห้งกรณีที่ 1 ความสูง 0.7 เมตร เวลา 12:00 น..... | 67 |
| ตารางที่ 4.3 ผลลัพธ์ที่จำนวนเอลิเมนต์ต่างๆ ของแบบจำลองเครื่องอบแห้งกรณีที่ 2 ความสูง 0.6 เมตร เวลา 12:00 น..... | 69 |
| ตารางที่ 4.4 ผลลัพธ์ที่จำนวนเอลิเมนต์ต่างๆ ของแบบจำลองเครื่องอบแห้งกรณีที่ 2 ความสูง 0.7 เมตร เวลา 12:00 น..... | 71 |
| ตารางที่ 4.5 ผลลัพธ์ที่จำนวนเอลิเมนต์ต่างๆ ของแบบจำลองเครื่องอบแห้งกรณีที่ 3 ความสูง 0.6 เมตร เวลา 12:00 น..... | 73 |
| ตารางที่ 4.6 ผลลัพธ์ที่จำนวนเอลิเมนต์ต่างๆ ของแบบจำลองเครื่องอบแห้งกรณีที่ 3 ความสูง 0.7 เมตร เวลา 12:00 น..... | 75 |
| ตารางที่ 4.7 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของปริมาตรและเอลิเมนต์..... | 77 |
| ตารางที่ 4.8 เอลิเมนต์จากการประมาณค่า..... | 77 |
| ตารางที่ 4.9 ตารางแสดง DIMENSIONS ของแบบจำลองในแต่ละกรณี..... | 96 |
| ตารางที่ 4.10 แสดงค่า อุณหภูมิเฉลี่ย, ความเร็วเฉลี่ย, TKE และ HEAT TRANSFER COEFFICIENT ของ แบบจำลอง..... | 97 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 2.1 แผนภาพกายวิภาคของผักตบชวา. JULIEN, M.H., GRIFFITHS, M.W. & WRIGHT, A.D., 1999. BIOLOGICAL CONTROL OF WATER HYACINTH | 5 |
| รูปที่ 2.2 การพาความร้อน..... | 8 |
| รูปที่ 2.3 ภายในเซลล์และในช่องว่างระหว่างเซลล์ของวัสดุชีวภาพ | 14 |
| รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความชื้นระหว่างกรอบแห้ง | 16 |
| รูปที่ 2.5 แผนภูมิแสดงการทำงานของเครื่องอบแห้งประเภทการพาความร้อนโดยธรรมชาติแบบรับรังสี อาทิตย์ทางอ้อม(ดัดแปลงมาจาก เสริม จันทร์ฉาย)..... | 19 |
| รูปที่ 2.6 ลักษณะของเครื่องอบแห้งแบบตู้ที่บึ่งแสงที่มีตัวทำอากาศร้อนแยกส่วนและปล่องระบายอากาศ (EKECHUKWU AND NORTON) | 20 |
| รูปที่ 2.7 แผนภูมิแสดงหลักการทำงานของเครื่องอบแห้งประเภทการพาความร้อนโดยธรรมชาติแบบรับ รังสีอาทิตย์โดยตรง(ดัดแปลงมา จาก เสริม จันทร์ฉาย)..... | 21 |
| รูปที่ 2.8 ลักษณะของเครื่องอบแห้งแบบตู้ (CABINET DRYER) (LAWAND, 1966)..... | 22 |
| รูปที่ 2.9 กราฟแสดงมุมเอียงกระจกที่เหมาะสมสำหรับแต่ละละติจูด | 22 |
| รูปที่ 2.10 เครื่องอบแห้งแบบตู้ที่ใช้ปล่องระบายอากาศ (CABINET DRYER WITH CHIMNEY) (GUSTAFSSON, 1982)..... | 23 |
| รูปที่ 2.11 เครื่องอบแห้งแบบโดม (SACHITHANANTHAN ET AL., 1983)..... | 23 |
| รูปที่ 2.12 เครื่องอบแห้งแบบเรือนกระจกแบบมีปล่องระบายความร้อน (EKECHUKWU AND NORTON, 1997)..... | 24 |
| รูปที่ 2.13 เครื่องอบแห้งแบบตู้ที่มีตัวทำอากาศร้อนแยกส่วนและปล่องระบายอากาศ (EKECHUKWU AND NORTON, 1999)..... | 26 |
| รูปที่ 2.14 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือก (EXELL, 1978)..... | 27 |
| รูปที่ 2.15 ตู้อบแห้งแบบหลายชั้น (MUTI-STACKED DRYER) (BRACE RESEARCH INSTITUTE, CANADA)..... | 28 |
| รูปที่ 2.16 แผนภูมิแสดงหลักการทำงานของเครื่องอบแห้งประเภทการพาความร้อนโดยการบังคับอากาศ แบบรับรังสีอาทิตย์โดยตรง(ดัดแปลงมาจาก เสริม จันทร์ฉาย)..... | 29 |

| | |
|--|----|
| รูปที่ 2.17 เครื่องอบแห้งแบบหลังคาโปร่งแสงแบบเฉียง (TAYLOR UJ ET AL., 1985)..... | 29 |
| รูปที่ 2.18 เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชแบบหลังคาโปร่งแสง (SHOVE GC ETA AL., 1981)..... | 30 |
| รูปที่ 2.19 เครื่องอบแห้งแบบใช้อากาศร้อนจากตัวทำอากาศร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์..... | 31 |
| รูปที่ 2.20 เครื่องอบแห้งแบบเรือนกระจก (JANJAET AL., 2007)..... | 32 |
| รูปที่ 2.21 รูปภาพแสดงแผนภาพ VELOCITY VECTOR ของประพันธ์พงษ์ สมศิลา และคณะ (2012)..... | 37 |
| รูปที่ 2.22 รูปแสดงแผนภาพ TEMPERATURE CONTOUR ของประพันธ์พงษ์ สมศิลา และคณะ (2012)..... | 38 |
| รูปที่ 2.23 รูปแสดงแผนภาพ VELOCITY VECTOR เปรียบแบบจำลองในแต่ละขนาด ประพันธ์พงษ์ สมศิลา และคณะ (2012)..... | 39 |
| รูปที่ 2.24 โปรแกรมSOLIDWORKS..... | 48 |
| รูปที่ 2.25 โปรแกรม ANSYS..... | 48 |
| รูปที่ 3.1 หน้าต่าง SOLIDWORKS แสดงแบบจำลองเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์..... | 52 |
| รูปที่ 3.2 หน้าต่างแสดงการทำงานการนำเข้าไฟล์แบบจำลองจากภายนอก..... | 53 |
| รูปที่ 3.3 หน้าต่างแสดงการทำงานการเลือกการวิเคราะห์แบบของไหล (FLUID)..... | 53 |
| รูปที่ 3.4 หน้าต่างแสดงการทำงานการใช้คำสั่งสร้างเมช..... | 54 |
| รูปที่ 3.5 หน้าต่างแสดงการทำงานการใช้งานคำสั่งเลือกรูปทรงเอลิเมนต์(1)..... | 55 |
| รูปที่ 3.6 หน้าต่างแสดงการทำงานการเลือกรูปทรงของเอลิเมนต์(2)..... | 55 |
| รูปที่ 3.7 หน้าต่างแสดงการทำงานการปรับขนาดและคุณภาพของเอลิเมนต์..... | 56 |
| รูปที่ 3.8 หน้าต่างแสดงการทำงานการใช้งานคำสั่ง NAMED SELECTION..... | 57 |
| รูปที่ 3.9 หน้าต่างแสดงการเลือกใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์ในการแก้ปัญหาการจำลอง..... | 58 |
| รูปที่ 3.10 หน้าต่างแสดงการทำงานการปรับคำสั่งใน GENERAL..... | 59 |
| รูปที่ 3.11 หน้าต่างการแสดงผลการปรับโมเดล VISCOUS..... | 60 |
| รูปที่ 3.12 รูปแสดงหน้าต่างการปรับโมเดล DO และโมเดลโหลดพลังงานแสงอาทิตย์ (SOLAR LOAD MODEL)..... | 60 |
| รูปที่ 3.13 หน้าต่างการปรับการรายงานอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเครื่องอบแห้ง..... | 62 |
| รูปที่ 3.14 รูปหน้าต่างแสดงการกำหนดระยะเวลาในการบันทึกข้อมูล..... | 63 |
| รูปที่ 3.15 หน้าต่างแสดงการปรับจำนวนรอบในการวิเคราะห์ปัญหา..... | 63 |
| รูปที่ 4.1 แสดงการแบ่ง PLANE A, B, C, D, E และ F..... | 78 |

| | |
|--|----|
| รูปที่ 4.2 แสดงแผนภาพ TEMPERATURE CONTOUR ที่ความสูง 0.6 m. (A) แสดง YZ PLANE (B) แสดง XY PLANE..... | 79 |
| รูปที่ 4.3 แสดงแผนภาพ TEMPERATURE CONTOUR ที่ความสูง 1.6 m. (A) แสดง YZ PLANE (B) แสดง XY PLANE..... | 80 |
| รูปที่ 4.4 แสดงแผนภาพ TEMPERATURE CONTOUR ที่ความสูง 0.6 m. (A) แสดง YZ PLANE (B) แสดง XY PLANE..... | 80 |
| รูปที่ 4.5 แสดงแผนภาพ TEMPERATURE CONTOUR ที่ความสูง 1.6 m. (A) แสดง YZ PLANE (B) แสดง XY PLANE..... | 81 |
| รูปที่ 4.6 แสดงแผนภาพ TEMPERATURE CONTOUR ที่ความสูง 0.6 m. (A) แสดง YZ PLANE (B) แสดง XY PLANE..... | 81 |
| รูปที่ 4.7 แสดงแผนภาพ TEMPERATURE CONTOUR ที่ความสูง 1.3 m. (A) แสดง YZ PLANE (B) แสดง XY PLANE..... | 82 |
| รูปที่ 4.8 แสดงแผนภาพ VELOCITY CONTOUR ที่ความสูง 0.6 m. (A) แสดง YZ PLANE (B) แสดง XY PLANE..... | 83 |
| รูปที่ 4.9 แสดงแผนภาพ VELOCITY CONTOUR ที่ความสูง 1.05 m. (A) แสดง YZ PLANE (B) แสดง XY PLANE..... | 83 |
| รูปที่ 4.10 แสดงแผนภาพ VELOCITY CONTOUR ที่ความสูง 0.6 m. (A) แสดง YZ PLANE (B) แสดง XY PLANE..... | 84 |
| รูปที่ 4.11 แสดงแผนภาพ VELOCITY CONTOUR ที่ความสูง 1.6 m. (A) แสดง YZ PLANE (B) แสดง XY PLANE..... | 84 |
| รูปที่ 4.12 แสดงแผนภาพ VELOCITY CONTOUR ที่ความสูง 0.6 m. (A) แสดง YZ PLANE (B) แสดง XY PLANE..... | 85 |
| รูปที่ 4.13 แสดงแผนภาพ VELOCITY CONTOUR ที่ความสูง 1.3 m. (A) แสดง YZ PLANE (B) แสดง XY PLANE..... | 85 |
| รูปที่ 4.14 แสดงแผนภาพ TKE CONTOUR ที่ความสูง 0.6 m. (A) แสดง YZ PLANE (B) แสดง XY PLANE.. | 86 |
| รูปที่ 4.15 แสดงแผนภาพ TKE CONTOUR ที่ความสูง 0.6 m. (A) แสดง YZ PLANE (B) แสดง XY PLANE.. | 87 |
| รูปที่ 4.16 แสดงแผนภาพ TKE CONTOUR ที่ความสูง 0.6 m. (A) แสดง YZ PLANE (B) แสดง XY PLANE.. | 87 |
| รูปที่ 4.17 แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 0.6 m. | 88 |

| | |
|--|-----|
| รูปที่ 4.18 แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 0.85 ม..... | 90 |
| รูปที่ 4.19 แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 0.6 ม..... | 92 |
| รูปที่ 4.20 แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 0.6 ม..... | 94 |
| รูปที่ 4.21 แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 0.85 ม..... | 95 |
| รูปที่ 4.22 สมการเส้นโค้งของหลังคาแบบจำลองเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ | 103 |
| รูปที่ 4.23 ภาพฉายของแบบจำลองเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ | 104 |



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาของการศึกษา

การตากแห้งหรือการอบแห้งเป็นวิธีที่มีการใช้มาตั้งแต่หลายพันปีก่อนเพื่อนำมาใช้ในการถนอมอาหาร โดยการนำความชื้นในผลิตภัณฑ์ เช่น พืชผลทางการเกษตร เนื้อสัตว์ ออกเพื่อลดและหยุดยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่เป็นผลทำให้เกิดการเน่าเสีย สามารถยืดอายุและเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้ยาวนานขึ้น นอกจากนี้การอบแห้งยังสามารถแปรรูปผลิตภัณฑ์ไปเป็นรูปแบบอื่นๆได้ และยังสามารถเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ได้ เช่น การอบแห้งองุ่นให้เป็นลูกเกด เป็นต้น วิธีดั้งเดิมที่มีการใช้งานคือการตากแดดตามธรรมชาติเนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้ค่าใช้จ่าที่น้อยหรือไม่เสียเงินเลย แต่ผลิตภัณฑ์จะมีคุณภาพที่ต่ำเนื่องจากผลิตภัณฑ์จะถูกอบจากแสงแดด และปนเปื้อนฝุ่น นอกจากนี้การตากแดดตามธรรมชาติจะใช้เวลานานขึ้นและเกิดความเสี่ยงภัยได้ตามลำดับ

ปัจจุบันเครื่องอบแห้งได้มีการพัฒนาขึ้นมาหลายรูปแบบเพื่อแก้ปัญหาข้างต้น เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่สูงขึ้น มีคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง และใช้ระยะเวลาอบแห้งที่น้อยลง ซึ่งการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้นั้นหากไม่ได้คำนึงถึงผลของขนาดและรูปร่างที่ส่งผลต่อปัจจัยภายใน ก็จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการอบแห้งมีความแห้งไม่เท่ากัน และเกิดเชื้อราได้ด้วยเช่นกัน การสร้างเครื่องอบแห้งในหลากหลายลักษณะเพื่อศึกษานั้นไม่เพียงแต่จะสิ้นเปลืองงบประมาณ ยังสิ้นเปลืองทรัพยากรอีกด้วย ในปัจจุบันมีการใช้วิธีคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหลหรือ Computational Fluid Dynamics (CFD) [5,8,16,17] เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว โดยสามารถทำนายพฤติกรรมภายในเครื่องอบแห้งและไม่สิ้นเปลืองงบประมาณ จึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ปัจจัยภายในที่ส่งผลต่อการออกเครื่องอบแห้งได้

งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาปัจจัยภายในที่มีผลต่อการออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ด้วยการใช้วิธีการคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหลภายในเครื่องอบแห้ง โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาประกอบด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาราโบลาโกลิกหรือหลังคาโค้ง ขนาดพื้นที่ฐานและปริมาตรเท่ากัน ที่อัตราส่วนความกว้างต่อความยาวแตกต่างกัน ที่ความสูงตั้งแต่ 0.6, 0.7, 0.85, 1.05, 1.3, 1.6 เมตร โดยศึกษาที่สภาพแวดล้อมและช่วงเวลาเดียวกัน

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งภายในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกที่ขนาดแตกต่างกัน
- 1.2.2 ทำการศึกษาเพื่อออกแบบเครื่องอบแห้งที่มีความสามารถในการอบแห้งที่ดีที่สุด เพื่อนำไปต่อยอดในอนาคต

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

เครื่องอบแห้งกรณีอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว 1.5:1 ที่ความสูง 0.6 เมตร จะมีความสามารถในการอบแห้งมากที่สุด เนื่องจากเครื่องอบแห้งมีลักษณะสั้นทำให้มีการระบายอากาศที่ดี และมีอุณหภูมิภายในที่สม่ำเสมอทั่วถึงกัน

1.4 ขอบเขตการศึกษา

- 1.4.1 ออกแบบแบบจำลองเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกรูปทรงพาราโบลิก โดยอ้างอิงตามแบบของ “แบบระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกขนาด 6.0 ม. x 8.2 ม. (พพ.1) จาก กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน.” ด้วยโปรแกรม SolidWorks สำหรับผักตบชวาจำนวน 10 กิโลกรัม
- 1.4.2 กำหนดการทดลองโดยแบ่งเป็น 3 กรณี กรณีที่ 1 คือ อัตราส่วนความกว้างต่อยาว 1.5:1 กรณีที่ 2 คือ อัตราส่วนความกว้างต่อยาว 1:1.5 และกรณีที่ 3 คือ อัตราส่วนความกว้างต่อยาว 1:1
- 1.4.3 กำหนดการทดลองที่ความสูงต่างกันของทั้ง 3 กรณี ที่ความสูง 0.6, 0.7, 0.85, 1.05, 1.3 และ 1.6 เมตร
- 1.4.5 ทำการทดลองด้วยการตั้งค่า Boundary conditions แบบเดียวกันในแต่ละกรณี
- 1.4.6 นำแบบจำลองไปวิเคราะห์โดยวิธีการคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหลด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT เพื่อทำนายพฤติกรรมภายในเครื่องอบแห้ง และศึกษาปัจจัยภายในที่มีผลต่อการออกแบบเครื่องแบบเครื่องอบแห้ง

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

- 1.5.1 ศึกษางานวิจัย บทความ วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับหลักการทำงานและการออกแบบเครื่องอบพลังงานแสงอาทิตย์

- 1.5.2 กำหนด วัตถุประสงค์ ขอบเขตของโครงการ
- 1.5.3 ออกแบบเครื่องอบพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกรูปทรงพาราโบลิก
- 1.5.4 ทำการวิเคราะห์โดยวิธีการคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหลตามกรณีต่าง ๆ ที่ได้กำหนด
- 1.5.5 นำผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีการคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหลมาพิจารณาเปรียบเทียบ
- 1.5.6 วิเคราะห์ผลที่ได้ สรุปผลวิจัยและเสนอแนะ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา

- 1.6.1 ได้เรียนรู้การวิเคราะห์โดยวิธีการคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหลด้วยการใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT
- 1.6.2 สามารถนำผลการทดลองไปประยุกต์ใช้พิจารณาเพื่อสร้างเครื่องอบแห้งได้
- 1.6.3 ทราบถึงปัจจัยภายในที่ส่งผลต่อการอบแห้ง



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ผักตบชวา

2.1.1 ความเป็นมาของผักตบชวา

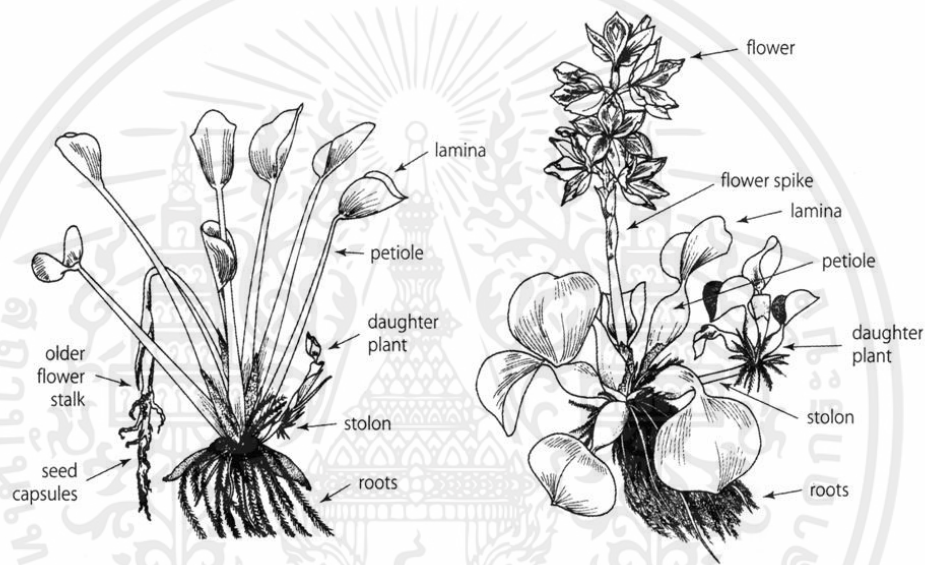
ผักตบชวามีชื่อสามัญคือ Water Hyacinth, Floating water hyacinth มีชื่อวิทยาศาสตร์ *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms จัดอยู่ในวงศ์ Pontederiaceae ในประเทศไทยในบางพื้นที่ก็มีการเรียกชื่อที่ต่างกันไป เช่น บัวลอย (เชียงใหม่), ผักปง (นครราชสีมา), ผักปอด (อ่างทอง), ผักปอง (สุพรรณบุรี), ผักตบ (ภาคตะวันตกเฉียงเหนือ) เป็นต้น ผักตบชวาเป็นพืชพื้นเมืองที่อาศัยอยู่ในทวีปอเมริกาใต้ โดยก่อนหน้านี้ไม่ได้มีเอกสารบันทึกทางพฤกษศาสตร์ จนกระทั่งในปี พ.ศ. 2367 นักพฤกษศาสตร์และ Karl von Martius (นายแพทย์ชาวเยอรมัน) ได้เข้าไปพบขณะทำการสำรวจพืชพันธุ์ในบราซิล ทั้งนี้ผักตบชวาในบราซิลไม่ได้ก่อปัญหาในวงกว้างอย่างแพร่หลายเหมือนปัจจุบัน เนื่องจากว่าในถิ่นกำเนิดของมันจะมีศัตรูทางธรรมชาติคอยควบคุมการแพร่ระบาดของผักตบชวาอยู่แล้ว เช่น แมลง โรค และศัตรูอื่น ๆ แต่เมื่อผักตบชวาถูกนำออกไปจากถิ่นที่อยู่เดิมของมัน ก็ทำให้เกิดการแพร่ระบาดอย่างรวดเร็ว กลายเป็นปัญหาศัตรูพืชต่างถิ่นที่คอยทำลายระบบนิเวศที่มันไปเจริญเติบโต ทำให้น้ำเน่าเสียและกีดขวางทางน้ำ เนื่องจากปราศจากศัตรูทางธรรมชาติของมัน

ในปี พ.ศ. 2424 ผักตบชวาถูกนำเข้ามาที่ประเทศอินโดนีเซีย โดยเริ่มแรกได้ถูกนำมาเลี้ยงไว้ที่สวนพฤกษศาสตร์ที่เมืองโบกอร์ แต่หลังจากนั้น ก็ได้แพร่ไปตามลำน้ำต่าง ๆ และแพร่กระจายอย่างรวดเร็ว ต่อมาในปี พ.ศ. 2444 ผักตบชวาถูกนำเข้ามาในประเทศไทย ซึ่งถูกนำเข้ามาจากประเทศอินโดนีเซียโดยเจ้านายฝ่ายในที่ตามเสด็จประพาสประเทศอินโดนีเซีย ได้นำผักตบชวามาปลูกในวังสระประทุม ซึ่งต่อมาในภายหลัง วังสระประทุมได้เกิดน้ำท่วม ทำให้ผักตบชวาหลุดออกมาสู่ภายนอก และแพร่พันธุ์ไปอย่างกว้างขวาง จนภายในปี พ.ศ. 2456 ได้มีการออกพระราชบัญญัติสำหรับกำจัดผักตบชวาออกมาโดยเฉพาะ แต่พระราชบัญญัติดังกล่าวก็ได้มีการยกเลิกไปในปี พ.ศ. 2546 เนื่องจากมีความไม่เหมาะสมในปัจจุบัน (นพพล เกตุประสาท, ม.ป.ป.)

2.1.2 ลักษณะของผักตบชวา

ผักตบชวา (*Eichhornia crassipes*) เป็นพืชที่ลอยและเจริญเติบโตบนผิวน้ำ ถูกจัดอยู่ในพืชประเภท ลอยน้ำ (floating plant) พืชประเภทนี้ปกติมักจะลอยไปตามการไหลของน้ำเพราะรากไม่ได้ถูก

ยึดติดกับดิน แต่ถ้าอยู่ในบริเวณแอ่งน้ำตื้นที่มากพอ รากของมันก็สามารถยึดติดกับดินได้เช่นกัน โดยทั่วไป ลักษณะของผักตบชวาจะสูงได้ถึง 0.5 เมตร กลุ่มใบจะเรียงตัวกันเป็นกระจุก ที่บริเวณ โคนก้านจะมีกาบใบ (sheath) ลักษณะเป็นเยื่อบาง ๆ มีสีขาวอมเขียว แต่จะมีสีน้ำตาลเมื่ออายุมากขึ้น บริเวณของกาบใบ จะมีไหล (stolon) เชื่อมอยู่ ซึ่งเป็นลำต้นที่ทอดยาวและช่วยในการขยายพันธุ์ เมื่อผักตบชวาวางพันธุ์มัน จะงอกต้นใหม่ขึ้นมา มีรากฝอย (fibrous root) ความยาวของรากจะมีขนาดแตกต่างกันออกไป บางเส้นก็ยาวถึงหนึ่งเมตร แต่ลำต้นที่ขยายพันธุ์ขึ้นมาใหม่นั้นจะยังยึดติดอยู่กับ ลำต้นเดิมและเมื่อมีปริมาณมากขึ้น ก็จะมีลักษณะเป็นกอ



รูปที่ 2.1 แผนภาพกายวิภาคของผักตบชวา. Julien, M.H., Griffiths, M.W. & Wright, A.D., 1999. Biological control of water hyacinth

ใบเป็นใบเลี้ยงเดี่ยว (simple leaf) ประกอบด้วยแผ่นใบ (blade) และก้านใบ (petiole) แผ่นใบมีลักษณะคล้ายรูปไต (reniform) หรือคล้ายรูปหัวใจ (cordate) มักมีความกว้างมากกว่าความยาว เมื่ออายุยังน้อยปลายใบจะมน แต่เมื่ออายุมากขึ้นปลายใบจะแหลมมีสีเข้ม ขอบใบเรียบ ก้านใบมีลักษณะกลมเรียบ อวบน้ำ โดยผักตบชวาถ้าเจริญเติบโตอยู่ด้วยกัน ลำต้นจะเล็กและก้านใบมักจะพองออกเป็นท่อนลอยน้ำ (ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า Buoyancy leaf) แต่ถ้าผักตบชवालอยอยู่ในน้ำนิ่ง จะทำให้ผักตบชวาเบียดชิดกันมาก ก้านใบ ไม่พองมาก อีกทั้งก้านใบ (petiole) ยังยาวมาก

ดอก ผักตบชวามีดอกสีฟ้าอมม่วง ดอกออกเป็นช่อ ไม่มีก้านดอก (spike) ผักตบชวาต้น ๆ หนึ่งอาจมีได้ถึงหลายช่อ โดยดอกแต่ละดอกจะประกอบด้วยกลีบดอก (perianth) 6 กลีบ ปลายกลีบแยกออกเป็นแฉก ส่วนกลีบจะติดกันเป็นหลอด (tube) มีสีเขียว ซึ่งหลอดนี้จะติดไปถึงก้านช่อดอก นอกจากนี้ยังมีเกสรตัวผู้ 6 อัน ประกอบด้วย สั้น 3, ยาว 3 ติดอยู่ที่ตอนล่างของกลีบดอก อับเกสรตัวผู้จะมีสีเหลือง ส่วนเกสรตัวเมียมีส่วนปลายเรียกว่า “stigma” มีสีม่วงอ่อนอยู่ด้านบนต่อมาจากรังไข่ ซึ่งรังไข่เมื่อได้รับการผสมแล้วก็จะเจริญเติบโตไปเป็นผล แต่ภายในประเทศไทยยังไม่ค่อยพบว่ามี การผสมของดอก ผักตบชวาจึงไม่ค่อยพบเมล็ดในประเทศไทย

2.1.3 การขยายพันธุ์ของผักตบชวา

การสืบพันธุ์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดและพบเห็นได้ทั่วไปของผักตบชวา คือ การสืบพันธุ์โดยไม่ใช้เมล็ดหรือเรียกอีกอย่างว่าการสืบพันธุ์โดยไม่อาศัยเพศ โดยแตกหน่อ (stolon) เป็นต้นใหม่ที่อยู่ติดกับต้นเดิมแล้วขยายพันธุ์ไปเรื่อย ๆ นอกจากกรณีที่เกิดฤดูแห้งแล้งมาก ๆ ทำให้ผักตบชวาตายไปจนหมดพอลงฤดูฝนและได้รับน้ำเพียงพอซึ่งมีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโต เมล็ดที่พักตัวอยู่ในดินก็จะเจริญเติบโตงอกออกมาเป็นต้นอ่อน ละเจริญเติบโตและเจริญพันธุ์ต่อไปในที่สุด ซึ่งการสืบพันธุ์ลักษณะนี้เรียกว่าการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศ

มีรายงานจากต่างประเทศพบว่า หลังจากที่ดินถูกน้ำท่วมผ่านไป 48 ชั่วโมงแล้วยังไม่ได้รับการผสมเกสรจากแมลง จะเกิดการผสมพันธุ์ภายในตัวเอง หลังจากนั้น 3 สัปดาห์ ก้านช่อดอกจะโค้งงอลงเบื้องล่าง เมื่อกระเปาะผลแตก เมล็ดสีดำที่แก่ก็จะตกลงสู่พื้นน้ำ โดยปกติจะใช้เวลาประมาณ 20 วันเจริญเติบโตไปเป็นต้นใหม่

2.1.4 ปัญหาจากผักตบชวา (กาญจนา จันทร์สิงห์, 10 ตุลาคม 2563)

1. ปัญหาการชลประทานและการคมนาคมทางน้ำ เมื่อผักตบชวาแพร่พันธุ์เป็นจำนวนมาก จะทำให้เกิดการรวมกลุ่มกันเป็นขนาดใหญ่ ส่งผลให้เกิดการกีดขวางการจราจรทางน้ำและการไหลของน้ำ (ลดการไหลลงประมาณ 40%) อีกทั้งผักตบชวาที่รวมกลุ่มกันเป็นขนาดใหญ่มักจะไหลตามน้ำไปอุดตันบริเวณใต้สะพานหรือประตูระบายน้ำซึ่งส่งผลให้ ช่วงฝนตกหนักหรือมีน้ำไหลหลากจะทำให้ไม่สามารถระบายน้ำได้ทัน ทำให้น้ำไหลเข้าท่วมบ้านเรือนบริเวณริมคลองได้ง่าย อีกทั้งเมื่อผักตบชวาเน่าเสียหรือตายลงมักจะจมลงสู่ด้านล่าง ทำให้น้ำหรือลำคลองเกิดการตื้นเขิน เป็นผลให้เกิดน้ำท่วมได้ง่ายเช่นกัน

2. ปัญหาการไฟฟ้าพลังน้ำ การที่ฝักตบชวาทายและจมสู่พื้นด้านล่างทำให้อ่างเก็บน้ำที่มีไว้สำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้ามีความจุลดลง นำไปสู่การผลิตกระแสไฟฟ้าที่ลดลงตามด้วย
3. ปัญหาการกสิกรรม การแพร่พันธุ์ที่รวดเร็วและจำนวนมากของฝักตบชวา ทำให้ปริมาณน้ำสำหรับการเกษตรลดลง อีกทั้งแพฝักตบชวายังเป็นแหล่งที่อยู่ของสัตว์พาหะนำโรค และศัตรูพืชนานาชนิด เช่น หนู และศัตรูอื่น ๆ ทำให้พืชผลของเกษตรกรเกิดความเสียหาย
4. ปัญหาการประมง เมื่อแพของฝักตบชวามีจำนวนมาก ทำให้แสงแดดไม่สามารถส่องไปยังด้านล่างของน้ำได้ เป็นผลให้พืชน้ำที่เป็นอาหารของปลาเล็กไม่สามารถเจริญเติบโตได้ ซึ่งทำให้ระบบนิเวศของปลาเกิดความเสียหายหรือปลามีปริมาณลดลงไปจนถึงการสูญพันธุ์ของปลาในบริเวณนั้น
5. ปัญหาด้านสาธารณสุข เนื่องจากแพฝักตบชวาเป็นแหล่งที่อยู่ของสัตว์พาหะนำโรค เช่น หนู ยุง และงูมีพิษ ทำให้เกิดโรคระบาดได้ง่ายกับชุมชนที่อยู่ใกล้
6. ปัญหาด้านการท่องเที่ยว ถ้ามีฝักตบชวาขึ้นอยู่อย่างหนาแน่น จะทำให้การพัฒนาสถานที่นั้น ๆ เป็นแหล่งท่องเที่ยวเป็นไปได้ยาก เพราะฝักตบชวามีส่วนในการทำลายความสวยงามของแหล่งน้ำต่างและยังมีปัญหาเรื่องกลิ่นไม่พึงประสงค์ที่ตามมาด้วย

2.1.5 การกำจัดฝักตบชวา

วิธีการกำจัดฝักตบชวาโดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 แบบ คือ การกำจัดให้หมดไปโดยสมบูรณ์ไม่ให้หลงเหลืออยู่ในบริเวณนั้นอีกต่อไป และการกำจัดโดยการควบคุม โดยทั้ง 2 วิธีก็มีความต่างในเลือกการดำเนินการ เช่น การกำจัดไปโดยสมบูรณ์จะเหมาะกับการระบาดในช่วงแรก ๆ ซึ่งมีปริมาณน้อย สามารถลงมือได้ง่าย ส่วนอีกวิธีคือการกำจัดโดยการควบคุม จะเหมาะสำหรับกรณีที่ไม่สามารถกำจัดให้หมดไปอย่างสมบูรณ์ ซึ่งจะใช้วิธีการควบคุมปริมาณไม่ให้ออกไปจากบริเวณเดิมได้

ส่วนวิธีในการกำจัดฝักตบชวาก็มีหลายวิธีด้วยกันเช่น การใช้สารเคมีกำจัดวัชพืช การกำจัดทางชีววิธี โดยการใช้ แมลงหรือศัตรูพืช การกำจัดด้วยวิธีทางกลโดยใช้คนหรือเครื่องจักร และการกำจัดโดยนำมาใช้ประโยชน์

2.1.6 ประโยชน์ของฝักตบชวา

1. สามารถนำมารับประทานเป็นอาหารได้ (เฉพาะฝักตบชวาที่เจริญเติบโตในน้ำที่สะอาด) โดยฝักตบชวา 100 กรัม จะประกอบไปด้วย พลังงาน 30 แคลอรี, น้ำ 89.8%, โปรตีน 0.5 กรัม, ไขมัน 0.1 กรัม, คาร์โบไฮเดรต 7.5 กรัม, โยอาหาร 2.4 กรัม

ผักตบชวาแห้งสามารถนำมาเลี้ยงสุกรและไก่ได้ เนื่องจากมีคุณค่าทางอาหาร โดยผักตบชวาแห้ง จะมีโปรตีนประมาณ 14-20% ไขมัน 1-2.5% เส้นใย 17-19% นอกจากนี้ยังสามารถนำผักตบชวาไปประกอบสูตรอาหารสัตว์ได้อีกด้วย

2. สามารถนำมาทำเป็นปุ๋ยหมักสำหรับการเกษตร
3. สามารถนำมาทำเป็นเชื้อเพลิงแห้งโดยการนำมาผสมกับแกลบอัดเพื่อเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง
4. สามารถนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์จักรสานหรือสินค้าอื่น ๆ ได้ เช่น ตะกร้าผักตบชวา กระเป๋าผักตบชวา กระดาษจากเส้นใยผักตบชวา และชุดจากเส้นใยผักตบชวา

5. นำผักตบชวามาเป็นวัสดุกันกระแทกแทนบับเบิลและโฟม เพราะมีน้ำหนักเบา และสามารถย่อยเองได้ตามธรรมชาติ โดยผักตบชวาอบแห้ง 1 กิโลกรัม เทียบเท่ากับผักตบ 12-13 กิโลกรัมที่อยู่ในแม่น้ำ ผักตบชวานั้นสามารถรับแรงกระแทกได้ดี เนื่องจากว่าผักตบชวาเป็นพืชที่มีขนาดของแอแรงคิมา (Aerenchyma tissue) ที่ใหญ่ที่สุดในโลก แอแรงคิมาจะทำหน้าที่ลำเลียงและเก็บสะสมอาหาร มีลักษณะกลวงและมีเซลล์พาเรงคิมาอยู่รอบ ๆ อีกทั้งยังมีงานวิจัยที่ใช้เส้นใยไฟเบอร์จากผักตบชวามาเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุผสมเป็นจำนวนมาก ซึ่งการที่ผักตบชวามีลักษณะกลวงเป็นจำนวนมากและมีเส้นใยไฟเบอร์ที่เหนียวทำให้สามารถนำมาใช้ทำวัสดุกันกระแทกได้ดี

2.2 การถ่ายเทความร้อน

2.2.1 การพาความร้อน (convection)



รูปที่ 2.2 การพาความร้อน

เป็นวิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่เกิดขึ้นระหว่างผิวของของแข็งและของไหลเมื่อความร้อนที่เคลื่อนที่ทำให้จำนวนปริมาณความร้อนนั้นไหลไปยังติดกับโมเลกุลที่กำลังเคลื่อนที่อยู่ โดยของไหลนั้นจะเป็นตัวพาความร้อนในวิธีการดังกล่าว โดยมีทั้งการพาตามธรรมชาติและการพาความร้อนแบบบังคับ ซึ่งจะถ่ายเทความร้อนจากของแข็งสู่ผิวของแข็งและถ่ายเทสู่ของไหล และเมื่อของไหลมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้มีความหนาแน่นน้อย เบาตัว และลอยตัวสูงขึ้นทำให้พาความร้อนเคลื่อนที่ไปด้วย จนมีของเหลว

หรือแก๊สที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า มีความหนาแน่นมากกว่าไหลมาแทนที่ จนเกิดการไหลเวียนขึ้นและทำให้ ความร้อนนั้นไหลเวียนและถ่ายเทความร้อนได้ดี

2.2.1.1 การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural or free convection)

เป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างของแข็งและของไหล โดยไม่มีปัจจัยใด ๆ มา กระตุ้น โดยวัตถุซึ่งมีผิวเรียบอยู่ในของไหลซึ่งอยู่นิ่งถ้าอุณหภูมิของผิวสูงกว่าอุณหภูมิของไหล ความร้อน จะเริ่มเคลื่อนที่ไปยังของไหลที่ติดกับผนัง ทำให้ความหนาแน่นของของไหลที่อยู่ชิดผนังต่ำลง ซึ่งผลที่เกิด จากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นจากอุณหภูมิของไหลที่แตกต่างกัน จะทำให้เกิดแรงลอยตัวขึ้น ซึ่งของ ไหลที่อยู่ต่ำลงกว่าก็จะเคลื่อนที่เข้ามาแทนที่จนทำให้เกิดการหมุนเวียนของของไหล รูปแบบการไหลของของ ไหลนั้นจะสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น แรงลอยตัว แรงจากความหนืดของของไหล เป็นต้น

2.2.1.2 การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection)

การที่ของไหลมีแรงกระทำจากภายนอกทำให้ของไหลถูกบังคับให้วิ่งผ่านผิวของของแข็ง ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนได้ไวขึ้น และเนื่องจากการพาความร้อนแบบราบเรียบของไหลจะขนานกับผิว ของวัสดุเมื่อได้รับความร้อนจากวัสดุความหนาแน่นก็จะน้อยลงและลอยตัวสูงขึ้น การแทนที่ของอากาศ การไหลแบบปั่นป่วนทำให้เกิดการแทนที่ของอากาศได้ไวขึ้นทำให้การถ่ายเทความร้อนจากผิวของแข็งสู่ ของไหลสามารถเกิดขึ้นได้มากขึ้น ปัจจัยภายนอกที่ทำให้เกิดการพาอัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อยที่กระทำ ต่อของไหล (inertia force) และแรงหนืด (viscous force) ในของไหลนั้น จะเรียกอัตรส่วนนี้ว่า เลขเรย์ โนลด์ส์ (Reynolds number, Re) ซึ่งเป็นชื่อ ของ Osborn Reynolds นักฟิสิกส์วิศวกรชาวอังกฤษ ผู้ ค้นพบ

เลขเรย์โนลด์ส์สามารถใช้ในการบอกรูปแบบการไหลของของไหลได้ โดยที่เลขเรย์โนลด์ส์ ต่ำเป็นการไหลแบบราบเรียบ ($0 < Re < 2000$) เลขเรย์โนลด์ส์สูงเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ($Re > 4000$) และเลขเรย์โนลด์ส์วิกฤติ (critical Reynolds numbers, Re_{cr}) เป็นเลขเรย์โนลด์ส์ที่บอกการ เปลี่ยนแปลงรูปแบบของไหลจากการไหลแบบราบเรียบไปเป็นแบบปั่นป่วน ($2000 < Re < 4000$) ของไหล ต่างชนิดกันจะมีความสามารถในการส่งผ่านโมเมนตัมและความสามารถในการ ส่งผ่านความร้อนในของ ไหลที่แตกต่างกัน

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างอากาศภายในเครื่องอบแห้งกับพื้น และระหว่าง อากาศภายในเครื่องอบแห้งกับแผ่นโพลีคาร์บอเนตจะสามารถหาได้จากสมการ (1) โดยถือว่าทั้งสองค่ามี ค่าเท่ากัน

$$h_c = \frac{Nuk}{D_h} \quad (1)$$

- เมื่อ h_c คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน [$W/m^2 - K$]
 Nu คือ ค่า Nusselt number
 k คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของอากาศ ซึ่งมีค่าเท่ากับ
 $0.0242 [W/m^2 - K]$
 D_h คือ hydraulic diameter [m] ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$D_h = \frac{4WD}{2(W+D)} \quad (2)$$

- เมื่อ W คือ ความกว้างของเครื่องอบแห้ง [m]
 D คือ ระยะเฉลี่ยระหว่างพื้นกับแผ่นโพลีคาร์บอเนต [m]

โดย Nu สามารถหาได้จากสมการที่ (3)

$$Nu = 0.0158Re^{0.8} \quad (3)$$

- เมื่อ Re คือ ค่า Reynolds number ซึ่งหาได้จากสมการที่ (4)

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (4)$$

- เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1.225 [kg/m^3]$
 V คือ อัตราเร็วเฉลี่ยของอากาศภายในเครื่องอบแห้ง [m/s]
 μ คือ Dynamic viscosity ของอากาศ ซึ่งมีค่าเท่ากับ
 $0.000017894 [kg/m \cdot s]$

2.2.1.3 การแผ่รังสี (radiation)

การแผ่รังสีความร้อน (Radiation) คือวิธีการเคลื่อนที่ของความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่ความร้อนนั้นจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันกับแสง และไม่อาศัยตัวกลาง แต่วิธีการดังกล่าวนี้จะเกิดขึ้นในรูปของคลื่น ซึ่งเกิดขึ้นได้แม้ในสุญญากาศ สสารสถานะของแข็ง ของเหลว และก๊าซจะดูดกลืนและส่งผ่านพลังงานจากการแผ่รังสี เนื่องจากรังสีออกมาในทุกความยาวคลื่นและทิศทาง อย่างไรก็ตามในวัตถุของแข็งที่ทึบแสงเป็นปรากฏการณ์เชิงผิว เนื่องจากไม่

มีการแผ่รังสีจากบริเวณภายในเนื้อวัสดุที่บอบบาง และรังสีที่ตกกระทบไปบนวัตถุดังกล่าวจะถูกดูดกลืนไว้เพียงสองหรือสามไมครอนจากผิวอีกด้วย

2.3 อากาศชื้น

โดยปกติแล้วนั้นอากาศจะมีส่วนผสมของออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจนเป็นส่วนใหญ่และมีส่วนประกอบของก๊าซอื่นและไอน้ำอากาศแห้งคืออากาศที่มีความสามารถในการดูดซับไอน้ำให้เป็นอากาศชื้นได้ อุณหภูมิมีผลต่อความสามารถในการดูดซับไอน้ำ เมื่ออากาศชื้นนั้นมีปริมาณไอน้ำอิ่มตัวไอน้ำส่วนเกินจะควบแน่นเป็นหยดน้ำ

โดยทั่วไปสมบัติของอากาศชื้นสามารถบอกได้ด้วยตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

2.3.1 เอนทัลปี (enthalpy, h)

คือ ความร้อนที่เกิดขึ้นภายใต้แรงดันคงที่ความร้อนแฝงจำเพาะ (Specific Latent Heat) คือ ความร้อนที่สาร 1 มวลได้รับหรือคายออกเพื่อใช้ในการเปลี่ยนแปลงสถานะโดยอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง ความร้อนแฝง (Latent Heat) คือ ความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของสารโดยที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการ เช่น น้ำ ที่ความดัน 1 บรรยากาศ ความร้อนที่ทำให้ น้ำแข็ง 1 กิโลกรัม อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส หลอมเหลวกลายเป็นน้ำหมดที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส จะใช้ความร้อน 333 กิโลจูล

ดังนั้น ความร้อนแฝงจำเพาะของการหลอมเหลวของน้ำ คือ L_f

$$L_f = 333 \text{ kJ/kg}$$

และที่ความดัน 1 บรรยากาศ ความร้อนที่ทำให้ น้ำ 1 กิโลกรัม อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส กลายเป็นไอน้ำหมดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะใช้ความร้อน 2256 กิโลจูล

ดังนั้น ความร้อนแฝงจำเพาะของการกลายเป็นไอของน้ำ คือ L_v

$$L_v = 2256 \text{ kJ/kg}$$

นั่นคือ ถ้าให้ Q คือความร้อนที่ทำให้สาร (วัตถุ) มวล m เปลี่ยนสถานะหมด คือ

$$Q = mL \tag{5}$$

เมื่อ Q คือ ความร้อนแฝงหรือปริมาณความร้อนที่วัตถุได้รับหรือคายออก (kJ)

m คือ มวลของวัตถุ (kg)

L คือ ความร้อนแฝงจำเพาะของวัตถุ มีหน่วยเป็นแคลอรีต่อกรัม (kJ/kg)

2.3.2 อัตราส่วนความชื้น (humidity ratio, w)

คือ มวลของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศ

$$w = 0.62198 \frac{P_v}{P - P_v} \quad (6)$$

เมื่อ w คือ อัตราส่วนความชื้น (kg/kg)

P_v คือ ความดันไอน้ำในอากาศ (kPa)

P คือ ความดันบรรยากาศ (kPa)

2.3.3 ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity, rh)

คือ ความดันไอน้ำในอากาศที่อิ่มตัว ณ อุณหภูมิและความดันบรรยากาศเดียวกัน

$$rh = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (7)$$

เมื่อ rh คือ ความชื้นสัมพัทธ์

P_v คือ ความดันไอน้ำในอากาศ (kPa)

P_{vs} คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว (kPa)

2.3.4 ความดันไอน้ำ (vapor pressure, P_v)

เนื่องจากอากาศชื้นประกอบด้วยไอน้ำและก๊าซต่าง ๆ องค์ประกอบแต่ละชนิดจะมีความดันย่อย (partial pressure) กรณีของไอน้ำจะเรียกความดันย่อยนี้ว่า ความดันไอน้ำ กรณีของไอน้ำอิ่มตัวจะเรียกความดันนี้ว่า ความดันไอน้ำอิ่มตัว (saturated vapor pressure, P_{vs})

$$P_v = \frac{P_w}{0.62198 + w} \quad (8)$$

$$\ln(P_{vs}) = 24.2779 - \frac{6238.64}{T} - 0.344438 \ln(T); 233.16 \leq T \leq 273.16 \quad (9)$$

$$\ln(P_{vs}) = \frac{-7511.52}{T} + 89.63121 + 0.023998970T - 1.1654551 \times 10^{-5} T^2 - 1.2810336 \times 10^{-8} T^3 + 2.0998405 \times 10^{-11} T^4 - 12.150799 \ln(T); 273.16 \leq T \leq 393.16 \quad (10)$$

เมื่อ P_v คือ ความดันไอน้ำในอากาศ (kPa)

P_{vs} คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว (kPa)

P คือ ความดันบรรยากาศ (kPa)

w คือ อัตราส่วนความชื้น (kg/kg)

T คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศชื้นที่อิ่มตัว (K)

2.4 วัสดุชื้น (moist materials)

คือ วัสดุซึ่งประกอบด้วยมวลของแข็งและความชื้นที่แทรกอยู่ โดยทั่วไปความชื้น จะหมายถึงน้ำที่อยู่ในรูปของของเหลว วัสดุชื้นแบ่งออกเป็นสองชนิด ได้แก่

1. วัสดุดูดซับความชื้น (Hygroscopic material) เช่น วัสดุทางชีวภาพ (biological material) น้ำจะแทรกอยู่ในเนื้อวัสดุ
2. วัสดุไม่ดูดซับความชื้น (Non hygroscopic material) เช่น ทราช กรวด หิน พลาสติก แต่สามารถมีความชื้นได้ เนื่องจากน้ำไปเกาะอยู่ที่ผิววัสดุ แต่ไม่ซึมเข้าไปในเนื้อวัสดุ

2.4.1 การแสดงค่าความชื้นผลิตภัณฑ์

ปริมาณความชื้นนิยมบอกเป็นเปอร์เซ็นต์มี 2 รูปแบบ คือ

2.4.1.1 ความชื้นมาตรฐานเปียก (moisture wet basis)

คืออัตราส่วนระหว่างมวลของน้ำต่อมวลของวัสดุชื้น เป็นค่าความชื้นที่มักใช้ในทางการค้า เป็นค่าที่ใช้บ่งชี้ความชื้นโดยทั่วไปในชีวิตประจำวัน มักบอกเป็นเปอร์เซ็นต์

$$M_{w.b.} = \frac{(m_w - m_d)}{m_w} \times 100 \quad (11)$$

2.4.1.2 ความชื้นมาตรฐานแห้ง (moisture dry basis)

คือ อัตราส่วนระหว่างมวลของน้ำต่อมวลของของแข็ง

$$M_{d.b.} = \frac{(m_w - m_d)}{m_d} \quad (12)$$

เมื่อ $M_{w.b.}$ คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (%)

$M_{d.b.}$ คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง

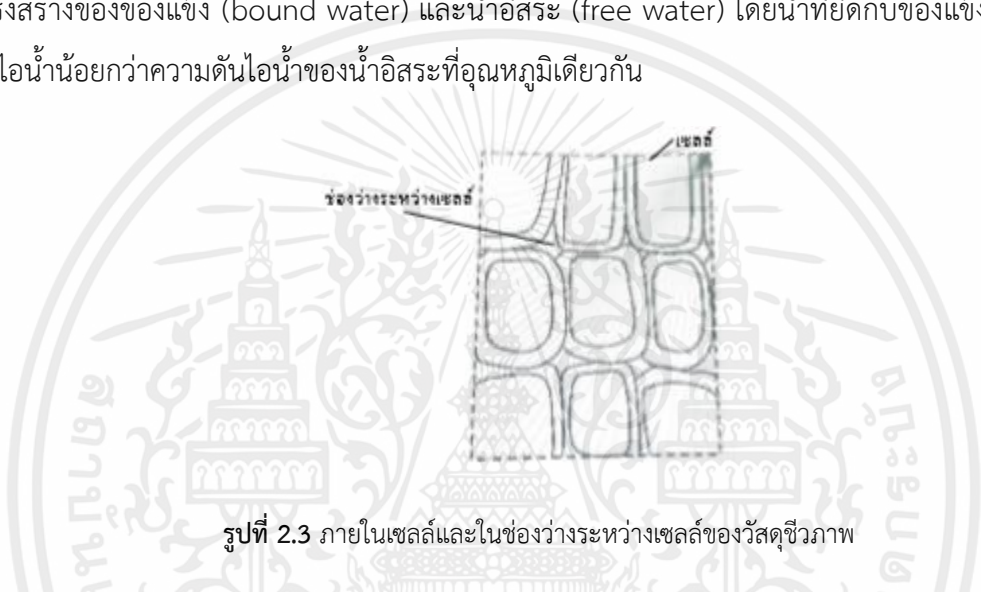
m_w คือ มวลของวัสดุ (kg)

m_d คือ มวลหนักแห้งวัสดุ (kg)

2.4.2 น้ำในวัสดุชื้น

น้ำในวัสดุชื้น คือ น้ำที่กระจายตัวอยู่ภายในวัสดุชื้นนั้นจะยึดเกาะอยู่กับของแข็ง โดยลักษณะการยึดเกาะนั้นจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะของวัสดุชื้น เช่น วัสดุทางชีวภาพ จะมีน้ำเป็น

องค์ประกอบส่วนสำคัญ โดยน้ำจะอยู่ทั้งภายในเซลล์และในช่องว่างระหว่างเซลล์ (รูปที่ 2.3) เนื่องจากโมเลกุลของน้ำแต่ละโมเลกุลมีการกระจายตัวของประจุไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นโมเลกุลของน้ำจึงมีขั้วไฟฟ้าที่ทำให้น้ำในวัสดุชื้นมีแรงยึดเหนี่ยวกับโมเลกุลของโครงสร้างที่เป็นของแข็งของวัสดุชื้น โดยแรงยึดเหนี่ยวจะมีมากกับโมเลกุลของน้ำชั้นแรกที่สัมผัสกับผิวของแข็ง น้ำดังกล่าวจึงไม่สามารถใช้เป็นตัวทำละลายได้ ส่วนน้ำชั้นถัดมาจะมีแรงยึดเหนี่ยวน้อยลง และน้ำชั้นนอกสุดจะเป็นน้ำอิสระ (free water) เช่นเดียวกันกับน้ำในภาชนะเปิด ซึ่งหมายความว่า น้ำที่อยู่ในวัสดุชื้นประกอบด้วยน้ำที่มีแรงยึดกับโครงสร้างของของแข็ง (bound water) และน้ำอิสระ (free water) โดยน้ำที่ยึดกับของแข็งจะให้ความดันไอน้ำน้อยกว่าความดันไอน้ำของน้ำอิสระที่อุณหภูมิเดียวกัน



รูปที่ 2.3 ภายในเซลล์และในช่องว่างระหว่างเซลล์ของวัสดุชีวภาพ

2.5 การเพิ่มความสามารถในการแห้งของวัสดุ

โดยการจะเพิ่มประสิทธิภาพให้วัสดุคายน้ำได้เร็วยิ่งขึ้นมี 2 ประเภท กรณีที่ 1 คือ เพิ่มอุณหภูมิภายในตู้อบ เมื่ออุณหภูมิภายในตู้อบสูงขึ้นจะถ่ายเทความร้อนสู่วัสดุชื้นทำให้น้ำในวัสดุชื้นระเหยออกได้ไวยิ่งขึ้น และกรณี 2 คือ ลดความชื้นภายในตู้อบกรณีที่ความชื้นในตู้อบมีปริมาณเท่ากับวัสดุชื้นความชื้นจะไม่ถูกถ่ายเทไปยังทางใดทางหนึ่งเมื่อความชื้นในตู้อบมีปริมาณน้อยเท่าไร ความชื้นจากวัสดุก็จะออกมาได้ไวมากยิ่งขึ้น และเช่นกันเมื่อความชื้นในตู้อบมีมากกว่าตัววัสดุตัววัสดุก็จะมีมากขึ้นมากยิ่งขึ้น

2.6 แอคติวิตีของน้ำ

แอคติวิตีของน้ำ (water activity) หมายถึง วัสดุชื้นที่แตกต่างกันจะมีน้ำที่แทรกตัวอยู่ด้วยแรงยึดเกาะที่แตกต่างกัน เช่น วัสดุชื้นบางอย่าง มีปริมาณน้ำอิสระอยู่มาก บางอย่างมีปริมาณน้ำอิสระอยู่น้อย ซึ่งปริมาณของน้ำในวัสดุชื้นเป็นสิ่งที่จำเป็นในการดำรงชีวิตของจุลชีพ (micro organism) โดยจุลชีพแต่

ละประเภทจะมีความสามารถในการดึงเอาน้ำออกมาใช้ประโยชน์แตกต่างกัน และยิ่งขึ้นอยู่กับระดับความแอคทีฟของน้ำ ที่เรียกว่า แอคติวิตีของน้ำ (a_w) โดยนิยามเป็นสมการดังนี้

$$a_w = \frac{P_{vp}}{P_{vs}} \quad (13)$$

เมื่อ a_w คือ แอคติวิตีของน้ำ

P_{vp} คือ ความดันไอของวัสดุชั้น (kPa)

P_{vs} คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว (kPa)

จากสมการจะเห็นได้ว่าวัสดุชั้นที่มีปริมาณน้ำอิสระมากหรือมีความดันไอน้ำมากจะมีค่า a_w สูง ซึ่งระดับของ a_w ที่แตกต่างกัน จะมีผลต่อการดำรงชีวิตของจุลชีพแต่ละประเภท โดยค่าแอคติวิตีของน้ำต่ำสุดที่จุลินทรีย์แต่ละชนิดสามารถมีชีวิตอยู่ได้เป็นดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตารางค่าแอคติวิตีของน้ำต่ำสุดที่จุลินทรีย์สามารถมีชีวิตอยู่ได้

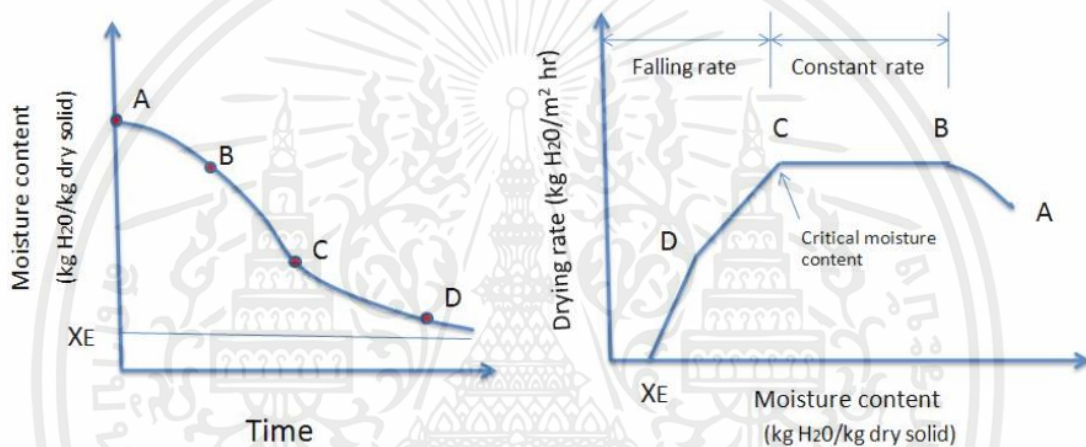
| จุลินทรีย์ | a_w |
|--|-------|
| จุลินทรีย์ทำให้เกิดเมือกที่ผิวของเนื้อสัตว์ | 0.98 |
| แบคทีเรียแกรมลบส่วนใหญ่ | 0.97 |
| บาซิลลัส ซับทิลิส และสปอร์ของคลอสทริเดียม บูโทธินิ่ม | 0.95 |
| ซูโดโมแนส และสปอร์ของบาซิลลัส ซีเรียส | 0.93 |
| คลอสทริเดียม บูโทธินิ่ม และซาลโมเนลลา | 0.93 |
| แบคทีเรียแกรมบวกส่วนใหญ่ | 0.90 |
| ยีสต์ส่วนใหญ่ | 0.88 |
| แอสเปอร์จิลลัส ไนเจอร์ | 0.85 |
| ราส่วนใหญ่ | 0.80 |
| แบคทีเรียที่ชอบเกลือ (Halophilic Bacteria) | 0.75 |
| ยีสต์ที่ชอบน้ำตาล (Osmophilic Yeast) | 0.62 |
| ราที่ชอบเจริญในที่แห้ง (Xerophilic Fungi) | 0.61 |

2.7 หลักการพื้นฐานการอบแห้ง

2.7.1 อัตราการทำแห้ง (drying rate)

อัตราการทำแห้ง (drying rate) เป็นการวัดความสามารถในการระเหยของน้ำต่อพื้นที่ต่อเวลา ระหว่างการทำแห้ง โดยอัตราการทำแห้งนั้นจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมของการทำแห้ง คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ เช่น ชนิดของเครื่องอบแห้ง ความชื้นสัมพัทธ์ เวลา อุณหภูมิ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (heat transfer coefficient)

กราฟของอัตราการทำแห้ง (drying rate) และความชื้นในวัสดุนั้น (moisture content) จะแบ่งออกเป็นสามช่วงคือ



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความชื้นระหว่างการอบแห้ง

1. ช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้น (Initial adjustment period - AB) เป็นช่วงเริ่มต้นที่ผลิตภัณฑ์มีความชื้นเริ่มต้นยังสูงอยู่ ผิวของผลิตภัณฑ์จะมีลักษณะเปียกชื้นมาก เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างตัวกลางลมร้อนกับผลิตภัณฑ์ ทำให้อุณหภูมิที่ผิวผลิตภัณฑ์มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียก (wet bulb temperature) ของกระแสลมร้อนที่ใช้เป็นตัวกลาง อัตราการทำแห้งจึงค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงช่วงที่อัตราทำแห้งคงที่ (constant rate)
2. ช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ (Constant rate period - BC) คือ ช่วงที่น้ำในผลิตภัณฑ์เคลื่อนที่สู่ผิว ซึ่งวัสดุจะได้รับพลังงานความร้อนใช้ในการระเหยน้ำออกจากของผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่อง ความชื้นเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์จะลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลาในการอบแห้ง ความชื้นในช่วงนี้จะถูกเรียกว่า “ความชื้นวิกฤตวิกฤต” (critical moisture content) ซึ่งความชื้นเฉลี่ยในวัสดุจะลดลงไปเป็นสัดส่วนกับเวลาในการอบแห้ง

2.8 ประเภทของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

Ekechukwu and Norton (1999) ได้จำแนกเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เป็น ระบบอบแห้งแบบ Passive และระบบอบแห้งแบบ Active ซึ่งในแต่ละประเภทก็จะแบ่งย่อยเป็น แบบรับรังสีอาทิตย์โดยตรง (integral-type หรือ direct mode) แบบรับรังสีอาทิตย์แบบทางอ้อม (distributed-type หรือ indirect mode) และแบบผสม (mixed-mode)

2.8.1 ระบบอบแห้งแบบ Passive

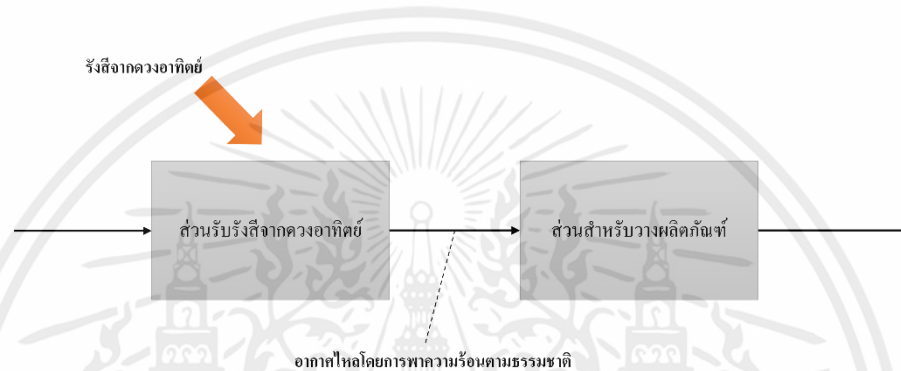
ระบบอบแห้งแบบ Passive หรือระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบการไหลเวียนของอากาศตามธรรมชาติ เป็นการอาศัยพลังงานจากแสงอาทิตย์ทั้งหมด ในระบบดังกล่าว อากาศจะถูกทำให้ร้อนจากแสงอาทิตย์ เมื่ออากาศร้อนขึ้นจะมีน้ำหนักเบากว่าอากาศเย็น จึงทำให้อากาศลอยตัวสูงขึ้นแล้วหมุนเวียนผ่านพืชผลทางการเกษตรจากแรงลอยตัวโดยไม่ต้องใช้พัดลม ในทางตรงกันข้ามหากมีการใช้พัดลมเข้ามาช่วยในการไหลเวียนของอากาศ วิธีนี้จะเรียกว่า “ระบบอบแห้งแบบ Active (active solar-energy drying systems)” ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป โดยระบบอบแห้งประเภทนี้เหมาะสมสำหรับการใช้งานในพื้นที่ชนบทหรือประเทศที่กำลังพัฒนา เนื่องจากอาศัยพลังงานจากแสงอาทิตย์ทั้งหมด ซึ่งเครื่องอบแห้งประเภทนี้ยังมีประสิทธิภาพมากกว่าการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบธรรมชาติ (open-to-sun drying) ข้อดีของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบการไหลเวียนของอากาศตามธรรมชาติ คือใช้ต้นทุนที่ต่ำ พื้นที่ที่น้อยแต่มีความจุที่มาก มีปริมาณและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ดีกว่าเนื่องจากสภาพแวดล้อมที่ถูกควบคุมทำให้ป้องกันการรบกวนจากภายนอกได้ และระยะเวลาการอบแห้งที่สั้นลงเมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบเปิดโล่ง

ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจง่ายจะใช้คำว่า “การพาความร้อนตามธรรมชาติ (natural convection)” แทน คำว่า “การไหลเวียนตามธรรมชาติ (natural-circulation)”

2.8.1.1 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทการไหลเวียนตามธรรมชาติแบบรับรังสีอาทิตย์ทางอ้อม (Distributed-type natural-circulation solar-energy dryers)

ในเครื่องอบแห้งพืชผลทางการเกษตรจะถูกวางไว้บนถาดหรือชั้นวางภายในห้องอบแห้งที่บดแสง อากาศจะไหลเวียนผ่านส่วนที่โดนความร้อนซึ่งทำให้อากาศร้อนขึ้นและลอยตัวขึ้นไปบริเวณที่สูงกว่า ซึ่งเป็นส่วนที่พืชผลทางการเกษตรถูกวางไว้ เนื่องจากพืชผลทางการเกษตรไม่ได้สัมผัสกับรังสีดวงอาทิตย์

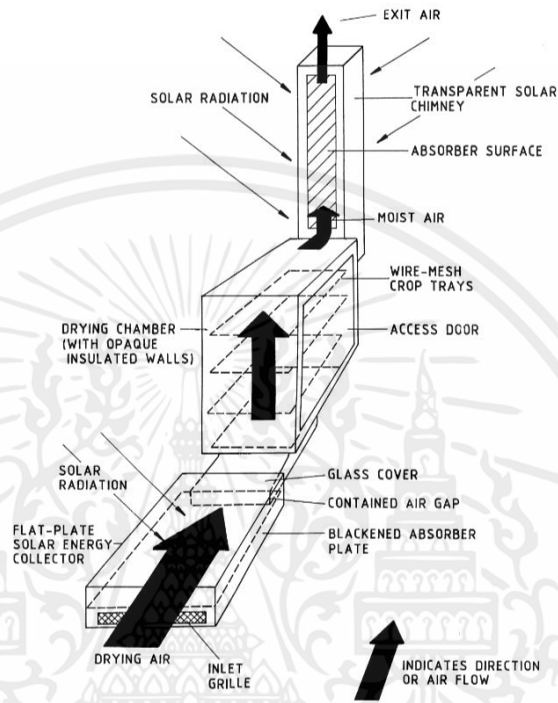
โดยตรง จะช่วยป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับผลิตภัณฑ์อบแห้งได้ ทำให้มีสีที่ดี มีเมล็ดสีที่สูง และมีคุณภาพที่ดีกว่าการถูกรังสีของดวงอาทิตย์โดยตรง โดยมีหลักการทำงานคร่าวๆ ดังรูปที่ 2.5 อย่างไรก็ตามจากการศึกษาพบว่าเครื่องอบแห้งประเภทนี้มีโครงสร้างที่ซับซ้อนซึ่งต้องการการลงทุนที่สูง อีกทั้งเรื่องความยากลำบากในการโหลดและขนถ่ายถาด ทำให้ไม่ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ถูกใช้งานส่วนใหญ่จะเป็น ระบบอบแห้งแบบ Passive (passive solar-energy drying systems) และแบบผสม (mixed-mode)



รูปที่ 2.5 แผนภูมิแสดงการทำงานของเครื่องอบแห้งประเภทการพาความร้อนโดยธรรมชาติแบบรับรังสีอาทิตย์ทางอ้อม (ดัดแปลงมาจาก เสริม จันทร์ฉาย)

ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาเครื่องอบแห้งประเภทนี้ดังนี้

1. เครื่องอบแห้งแบบตู้ทึบแสงที่มีตัวทำอากาศร้อนแยกส่วนและปล่องระบายอากาศ (Ekechukwu and Norton)



รูปที่ 2.6 ลักษณะของเครื่องอบแห้งแบบตู้ทึบแสงที่มีตัวทำอากาศร้อนแยกส่วนและปล่องระบายอากาศ (Ekechukwu and Norton)

ตู้อบแห้งประกอบด้วยสองส่วนคือ ส่วนชั้นวางผลิตภัณฑ์และส่วนทำให้อากาศร้อน สำหรับส่วนที่ทำให้อากาศร้อน มีลักษณะเป็นกระจก ซึ่งจะให้อากาศภายในส่วนนี้ร้อนขึ้น แล้วอากาศจะลอยตัวขึ้นจากด้านล่างตามหลักการพาความร้อนตามธรรมชาติ ขึ้นมายังบริเวณส่วนที่สองคือ ชั้นวางผลิตภัณฑ์ เมื่ออากาศร้อนไหลผ่านผลิตภัณฑ์ก็จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีความชื้นลดลง และสุดท้ายอากาศก็จะไหลออกไปยังบริเวณปล่องระบายอากาศ ซึ่งส่วนสำหรับชั้นวางผลิตภัณฑ์จะเป็นตู้ทึบแสง โดยวัสดุที่นำมาใช้ทำตู้คือ ไม้ ดังนั้นจึงมีการแนะนำให้ใช้แผ่นโลหะที่มีฉนวนกันความร้อนที่ดีกว่า ซึ่งเครื่องอบแห้งดังกล่าวสามารถอบแห้งข้าวโพดเปียกที่ 90 กิโลกรัมที่ความชื้น 20% (w.b.) ให้เหลือ 12% (w.b.) ได้ภายใน 3 วันในกรณีที่มีแดดตลอดทั้งวัน

2.8.1.2 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทการไหลเวียนตามธรรมชาติแบบรับรังสีอาทิตย์โดยตรง (Integral-type natural-circulation solar-energy dryers)

พืชผลทางการเกษตรจะถูกวางไว้ในห้องที่โปร่งแสงเพื่อให้ความร้อนจากรังสีของดวงอาทิตย์ ทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศลดลง เมื่ออากาศภายในห้องมีความชื้นน้อยลงจึงสามารถนำความชื้นที่อยู่ในพืชผลทางการเกษตรออกมาได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังเกิดการหมุนเวียนของอากาศภายในห้องขณะที่ความชื้นถูกกำจัดออกไปด้วย โดยมีหลักการทำงานคร่าว ๆ ดังรูปที่ 2.7

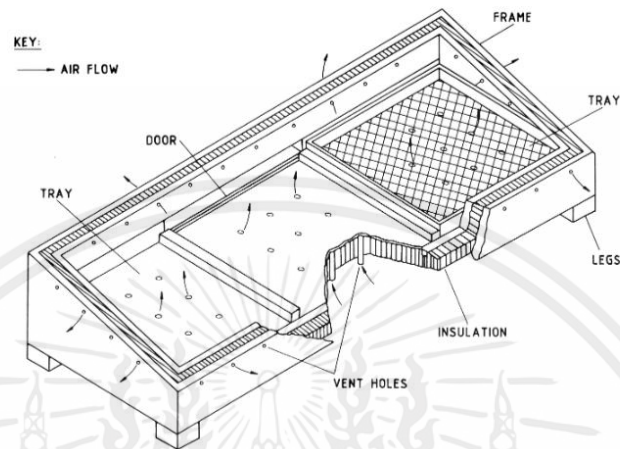
การสัมผัสแสงโดยในพืชผลทางการเกษตรในบางชนิด เช่น องุ่นและกาแฟอาราบิก้า ยังช่วยทำให้คลอโรฟิลล์สลายตัวและเพิ่มรสชาติให้อีกด้วย



รูปที่ 2.7 แผนภูมิแสดงหลักการการทำงานของเครื่องอบแห้งประเภทการพาความร้อนโดยธรรมชาติแบบรับรังสีอาทิตย์โดยตรง(ดัดแปลงมาจาก เสริม จันทร์ฉาย)

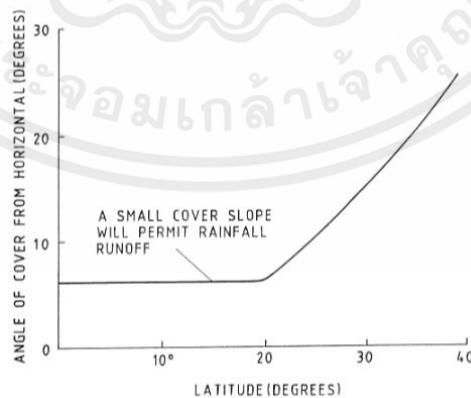
ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาเครื่องอบแห้งประเภทนี้หลายแบบดังนี้

1. เครื่องอบแห้งแบบตู้ (Cabinet dryer) (Lawand, 1966)



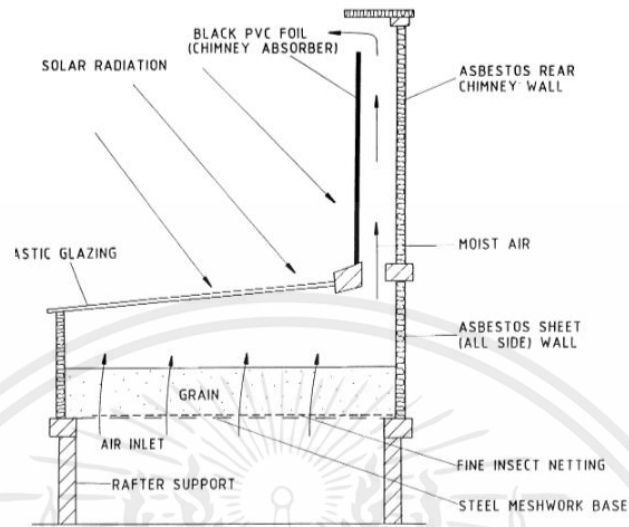
รูปที่ 2.8 ลักษณะของเครื่องอบแห้งแบบตู้ (Cabinet dryer) (Lawand, 1966)

เครื่องอบแห้งประเภทนี้มีลักษณะเป็นตู้ ขนาดด้านยาวเป็น 3 เท่าของความกว้างเพื่อลดการเกิดเงาจากผนังด้านข้าง มุมที่เหมาะสมสำหรับกระจกปิดด้านบนขึ้นกับละติจูดที่ใช้งาน เป็นไปตามรูปที่ 2.9 ผนังภายในจะถูกทาด้วยสีดำทั้งหมดเพื่อช่วยในการดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ โดยวัสดุที่นำมาใช้จะต้องมีคุณสมบัติเป็นฉนวนความร้อนที่ดีเพื่อลดการสูญเสียความร้อน ชั้นวางเป็นตระแกรงวางเหนือพื้นตู้อบซึ่งเป็นทางเข้าของอากาศ และมีทางออกของอากาศอยู่บริเวณด้านบนตะแกรง จากการศึกษาพบว่าสามารถทำความร้อนได้ที่ประมาณ 80 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงมุมเอียงกระจกที่เหมาะสมสำหรับแต่ละละติจูด

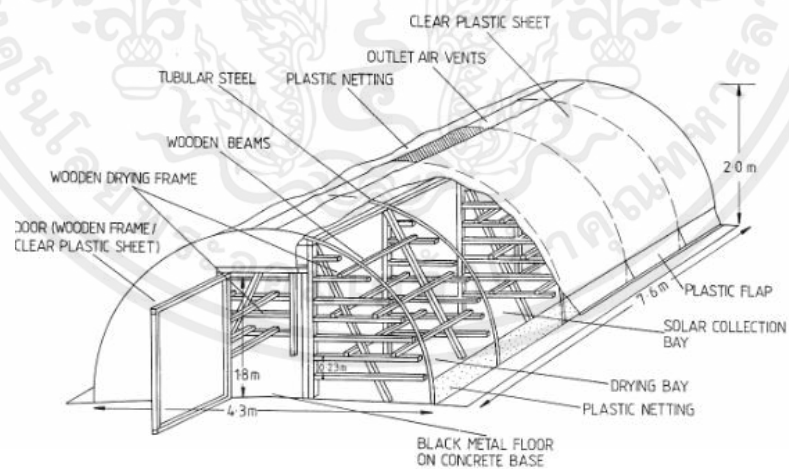
2. เครื่องอบแห้งแบบตู้ที่ใช้ปล่องระบายอากาศ (cabinet dryer with chimney)



รูปที่ 2.10 เครื่องอบแห้งแบบตู้ที่ใช้ปล่องระบายอากาศ (cabinet dryer with chimney) (Gustafsson, 1982)

มีลักษณะคล้ายเหมือนเครื่องอบแห้งแบบตู้ แต่มีการเพิ่มปล่องระบายอากาศเข้ามาเพื่อช่วยในการระบายอากาศ

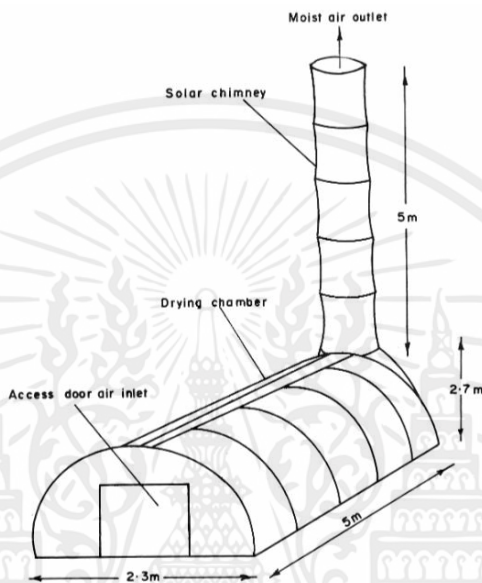
3. เครื่องอบแห้งแบบโดม (Sachithanathan et al., 1983)



รูปที่ 2.11 เครื่องอบแห้งแบบโดม (Sachithanathan et al., 1983)

เครื่องอบแห้งมีลักษณะเป็นโดม หลังคาโค้งครึ่งวงกลม โครงทำมาจากเหล็กกล้าบิวาไนซ์ ปิดด้วยแผ่นพลาสติกใส ด้านข้างที่ติดกับพื้นเป็นตะแกรงมีรูอากาศเข้าและใช้ป้องกันแมลง ด้านบนมีช่องให้อากาศระบายออก

4. เครื่องอบแห้งแบบเรือนกระจกแบบมีปล่องระบายอากาศ (Ekechukwu and Norton, 1997)



รูปที่ 2.12 เครื่องอบแห้งแบบเรือนกระจกแบบมีปล่องระบายความร้อน (Ekechukwu and Norton, 1997)

มีลักษณะคล้ายเครื่องอบแห้งแบบโดม แต่มีการเพิ่มปล่องระบายอากาศเพื่อให้อากาศไหลเวียนได้ดีขึ้น ซึ่งทั้งเครื่องอบแห้งแบบโดม และเครื่องอบแห้งแบบเรือนกระจกแบบมีปล่องระบายอากาศเหมาะสำหรับการอบในปริมาณที่มาก

ซึ่งสรุปได้ดังนี้ เครื่องอบแห้งแบบรับรังสีอาทิตย์โดยตรง ข้อดีคือ มีราคาที่ถูกและการก่อสร้างที่ง่ายกว่า เนื่องจากมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน เช่น ส่วนทำความร้อนที่แยกออกมา เมื่อเทียบกับเครื่องอบแห้งแบบรับรังสีอาทิตย์ทางอ้อม อย่างไรก็ตามเครื่องอบแห้งประเภทนี้มีการสร้างความร้อนที่มากเกินไปซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายกับพืชผลทางการเกษตรได้ อีกทั้งยังมีการกำจัดไอน้ำที่ไม่ดี เพื่อการลดข้อจำกัดเหล่านี้ สามารถติดตั้งปล่องระบายอากาศเพื่อให้อากาศเพิ่มอัตราการกำจัดความชื้นได้เร็วขึ้น

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบเครื่องอบแห้งแบบการรับรังสีโดยตรงกับทางอ้อม

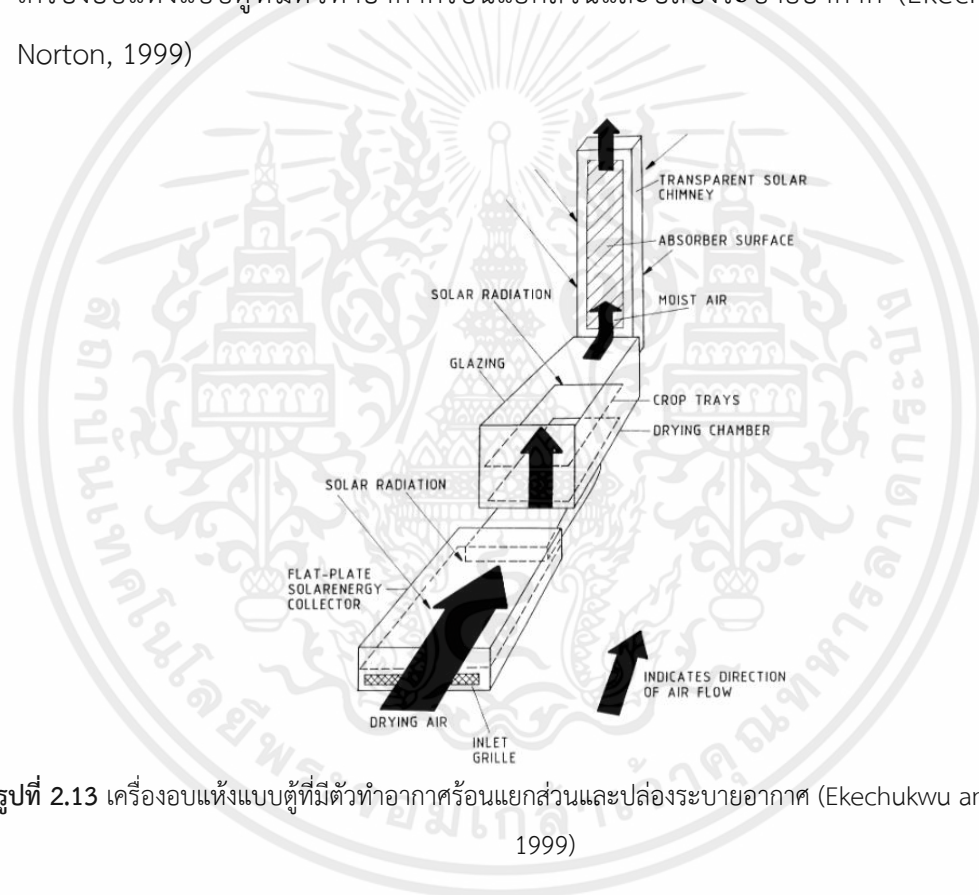
| | ประเภทของเครื่องอบแห้ง | |
|-------------------------------------|--|---|
| | แบบโดยตรง | แบบทางอ้อม |
| รูปแบบการถ่ายเทความร้อนสู่ผลิตภัณฑ์ | <ul style="list-style-type: none"> - การแผ่รังสี (radiation) - การพาความร้อน (convection) โดยจะได้รับความร้อนจากอากาศรอบ ๆ | <ul style="list-style-type: none"> - การพาความร้อน (convection) โดยอากาศร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (solar collector) |
| อุปกรณ์ | <ul style="list-style-type: none"> - การทาสีเคลือบ - ปล่องระบายอากาศ | <ul style="list-style-type: none"> - ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ - ปล่องระบายอากาศ |
| ค่าก่อสร้างและการบำรุงรักษา | <ul style="list-style-type: none"> - มีราคาต่ำกว่า เนื่องจากมีความซับซ้อนที่น้อย | <ul style="list-style-type: none"> - มีราคาที่สูงกว่า เนื่องจากมีความซับซ้อนที่มาก |
| ประสิทธิภาพ | <ul style="list-style-type: none"> - ประสิทธิภาพต่ำ เนื่องจากมีความเรียบง่ายและควบคุมการอบแห้งได้น้อย | <ul style="list-style-type: none"> - มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า เนื่องจากอุปกรณ์แต่ละชิ้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ |

แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทการไหลเวียนตามธรรมชาติแบบรับรังสีอาทิตย์โดยตรงจะมีประสิทธิภาพการอบแห้งที่ต่ำกว่าแบบรับรังสีทางอ้อม ในประเทศที่กำลังพัฒนามักใช้แบบรับรังสีโดยตรง เนื่องจากว่ามีความซับซ้อนที่น้อยทำให้ราคาการก่อสร้างและการบำรุงรักษามีราคาถูก และประสิทธิภาพก็ยังไม่ได้ต่างกันมากจนเห็นผลข้ามวันได้

2.8.1.3 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทการไหลเวียนตามธรรมชาติแบบรับรังสีอาทิตย์ผสม (Mixed-mode natural-circulation solar-energy dryers)

เครื่องอบแห้งประเภทนี้จะเป็นการรวมคุณสมบัติของเครื่องอบแห้งประเภทการพาความร้อนตามธรรมชาติแบบโดยตรงและทางอ้อมเข้าด้วยกัน การรวมกันทำให้เกิดความร้อนที่เพียงพอโดยไม่จำเป็นต้องมีแหล่งทำความร้อนเพิ่มและทำให้มีประสิทธิภาพมากกว่าแบบรับรังสีจากดวงอาทิตย์โดยตรงหรือทางอ้อมนั่นเอง โดยที่ผ่านมาก็มีการออกแบบเครื่องอบแห้งประเภทนี้ไว้หลากหลายเช่น

1. เครื่องอบแห้งแบบตู้ที่มีตัวทำอากาศร้อนแยกส่วนและปล่องระบายอากาศ (Ekechukwu and Norton, 1999)

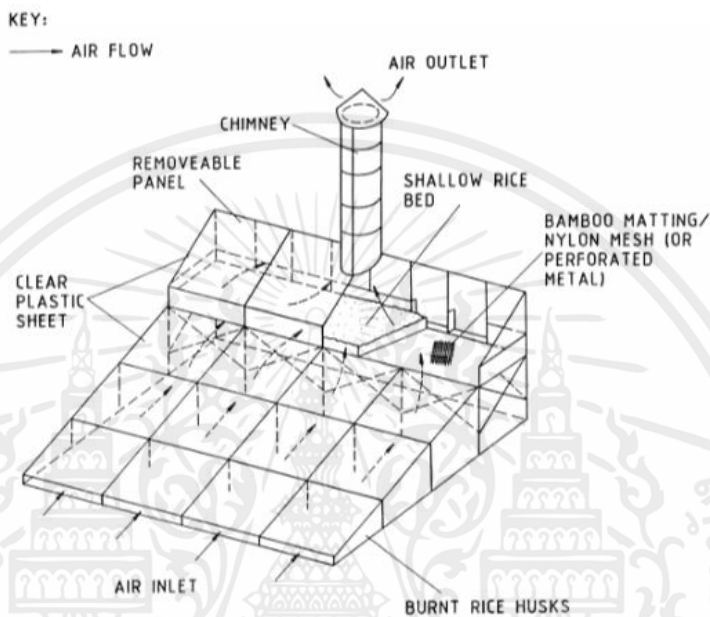


รูปที่ 2.13 เครื่องอบแห้งแบบตู้ที่มีตัวทำอากาศร้อนแยกส่วนและปล่องระบายอากาศ (Ekechukwu and Norton, 1999)

จะมีลักษณะคล้าย เครื่องอบแห้งแบบตู้ที่รับแสงที่มีตัวทำอากาศร้อนแยกส่วนและปล่องระบายอากาศ (Othieno, Grainger and Twidell) ประเภท เครื่องอบแห้งประเภทการพาความร้อนตามธรรมชาติแบบรับพลังงานรังสีอาทิตย์ทางอ้อม (indirect mode natural convection solar dryer)

หรือเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบการไหลเวียนตามธรรมชาติแบบรั้งรังสีอาทิตย์ทางอ้อม (Distributed-type natural-circulation solar-energy dryers) แต่ที่แตกต่างออกไปคือ ผสมจะมีการเคลื่อนเพื่อเพิ่มการดูดกลืนรังสีจากดวงอาทิตย์ และจากตู้ที่บแสงจะเปลี่ยนเป็นกระจกธรรมชาติ

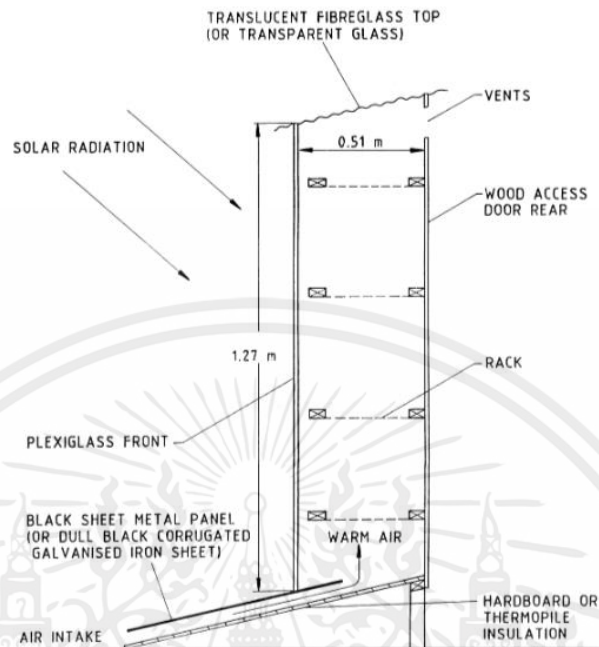
2. เครื่องอบแห้งข้าวเปลือก (Exell, 1978)



รูปที่ 2.14 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือก (Exell, 1978)

เป็นเครื่องอบแห้งข้าวเปลือก ประกอบด้วยเครื่องทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ชั้นวางผลิตภัณฑ์ และปล่องระบายอากาศ โดยเครื่องทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โครงสร้างเป็นไม้ไผ่ ด้านบนปิดด้วยแผ่นพลาสติกใส แผ่นพลาสติกใสที่ครอบคลุมชั้นวางผลิตภัณฑ์ช่วยให้ข้าวร้อนโดยตรงในขณะที่ปกป้องผลิตภัณฑ์จากฝนและปล่องไฟจากกรอบไม้ไผ่หุ้มด้วยแผ่นพลาสติกสีเข้มเพื่อให้ภายในอบอุ่น และเป็นการเพิ่มแรงลอยตัวทำให้อากาศไหลได้ดียิ่งขึ้น

3. ตู้อบแห้งแบบหลายชั้น (muti-stacked dryer) (Brace Research Institute, Canada)



รูปที่ 2.15 ตู้อบแห้งแบบหลายชั้น (muti-stacked dryer) (Brace Research Institute, Canada)

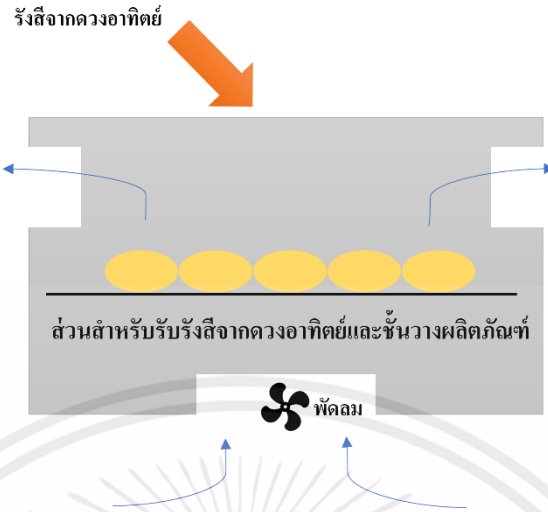
เป็นเครื่องอบแห้งที่มีตู้บรรจุภัณฑ์หลายชั้น เครื่องทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จะทำให้อากาศร้อนและไหลผ่านชั้นวางผลิตภัณฑ์ แล้วถูกดูดออกไปโดยช่องระบายอากาศด้านบน หลังจากทำจากวัสดุโปร่งแสงเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ได้รับรังสีอาทิตย์โดยตรง

2.8.2 ระบบอบแห้งแบบ Active

ระบบอบแห้งแบบ Active หรือระบบอบแห้งที่ใช้การพาความร้อนแบบบังคับ โดยจะมีพัดลม เครื่องเป่าลม หรือเครื่องดูดอากาศติดตั้งไว้ในเครื่องอบแห้ง เพื่อบังคับการไหลของอากาศ

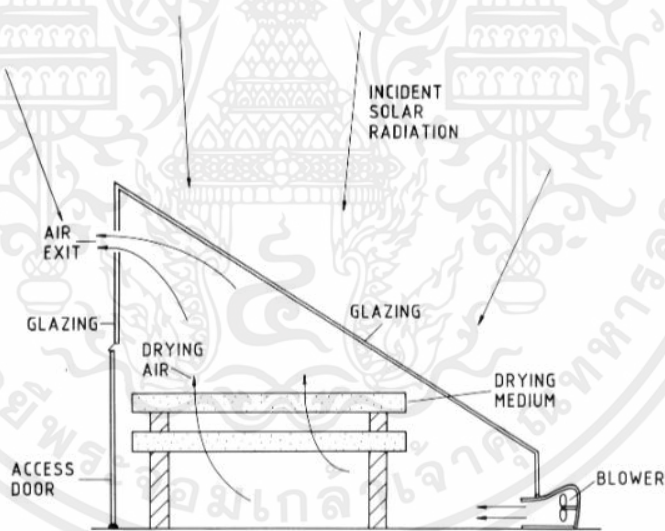
2.8.2.1 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทแอกทีฟแบบรับรังสีอาทิตย์โดยตรง (Integral-type natural-circulation solar-energy dryers)

เครื่องอบแห้งประเภทนี้ผลิตภัณฑ์จะถูกวางอยู่ในส่วนรับรังสีอาทิตย์ซึ่งอาจคลุมด้วยแผ่นพลาสติกใสหรือกระจก และมีพัดลมดูดหรือเป่าอากาศให้ผ่านผลิตภัณฑ์ โดยหลักทำงานดังรูปที่ 2.16 ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการออกแบบไว้หลายแบบดังนี้



รูปที่ 2.16 แผนภูมิแสดงหลักการทำงานของเครื่องอบแห้งประเภทการพาความร้อนโดยการบังคับอากาศแบบรับรังสีอาทิตย์โดยตรง(ดัดแปลงมาจาก เสริม จันทรฉาย)

1. เครื่องอบแห้งแบบหลังคาโปร่งแสงแบบเฉียง (Taylor UJ et al., 1985)

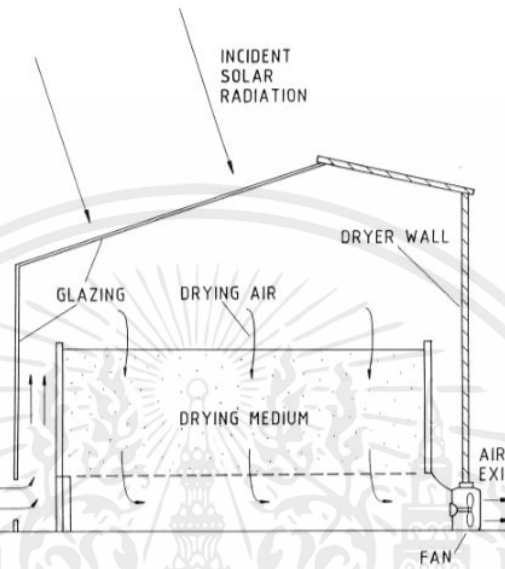


รูปที่ 2.17 เครื่องอบแห้งแบบหลังคาโปร่งแสงแบบเฉียง (Taylor UJ et al., 1985)

ผลิตภัณฑ์จะถูกวางบนชั้นวางซึ่งได้รับรังสีอาทิตย์โดยตรงจากด้านบนซึ่งถูกคลุมด้วยกระจกหันหน้าทำมุมกับแสงอาทิตย์ และมีเครื่องเป่าอากาศบริเวณทางเข้าช่วยเป่าลมเพื่อให้ความร้อนใน

เครื่องอบมีความร้อนที่สม่ำเสมอ และด้านบนมีรูอากาศออก ซึ่งมีประสิทธิภาพมากกว่าระบบอบแห้งแบบ Passive หรือระบบอบแห้งประเภทการพาความร้อนตามธรรมชาติ

2. เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชแบบหลังคาโปร่งแสง (Shove GC eta al., 1981)



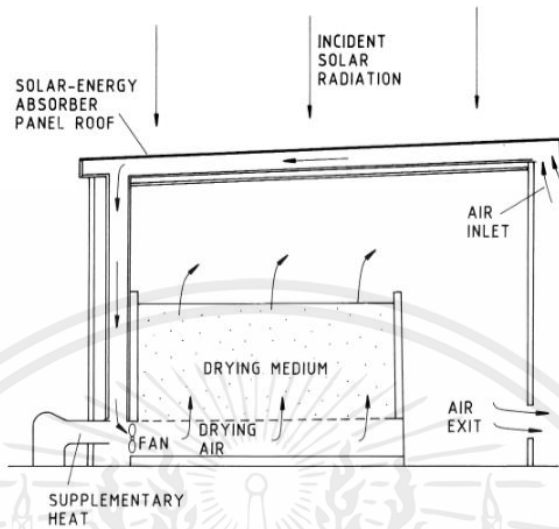
รูปที่ 2.18 เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชแบบหลังคาโปร่งแสง (Shove GC eta al., 1981)

มีลักษณะเหมือนเครื่องอบแห้งหลังคาโปร่งแสงแบบเฉียง แต่แตกต่างกันตรงที่เครื่องทำอากาศบริเวณทางเข้าจะถูกแทนที่ด้วยรูอากาศเข้า และรูอากาศออกจะแทนที่ด้วยพัดลมดูดอากาศ

2.8.2.2 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทแอคทีฟแบบรับรังสีอาทิตย์ทางอ้อม (Distributed-type active solar-energy drying systems)

เครื่องอบแห้งประเภทนี้ผลิตภัณฑ์จะไม่ได้รับรังสีอาทิตย์โดยตรง แต่จะอยู่แยกส่วน ซึ่งความร้อนจะเป็นอากาศร้อนที่เกิดขึ้นในส่วนรับรังสีอาทิตย์ แล้วมีพัดลมดูดเป่าหรือดูดอากาศให้ไหลผ่านผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างเครื่องอบแห้งประเภทการพาความร้อนโดยการบังคับอากาศแบบรับรังสีอาทิตย์ทางอ้อมเช่น

1. เครื่องอบแห้งแบบใช้อากาศร้อนจากตัวทำอากาศร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์



รูปที่ 2.19 เครื่องอบแห้งแบบใช้อากาศร้อนจากตัวทำอากาศร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์

เมื่อรังสีจากดวงอาทิตย์ตกกระทบตัวทำอากาศร้อนจะทำให้อากาศที่อยู่ข้างในมีอุณหภูมิสูงขึ้น จากนั้นอากาศร้อนจะถูกพัดลมดูดอากาศให้ไหลไปผ่านชั้นวางผลิตภัณฑ์ และออกทางรูทางออกในที่สุด

2.8.2.3 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทแอกทีฟแบบรับรังสีอาทิตย์แบบผสม (Distributed-type active solar-energy drying systems)

เครื่องอบแห้งประเภทนี้จะเป็นการรวมคุณสมบัติของเครื่องอบแห้งประเภทการพาความร้อนตามธรรมชาติแบบโดยตรงและทางอ้อมเข้าด้วยกัน ทำงานเหมือนที่ได้กล่าวมาข้างต้นในหัวข้อ เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทการไหลเวียนตามธรรมชาติแบบรับรังสีอาทิตย์ผสม แต่ที่ต่างกันคือมีการเพิ่มพัดลมดูดหรือเป่าอากาศเข้ามานั้นเอง ยกตัวอย่างเช่น



รูปที่ 2.20 เครื่องอบแห้งแบบเรือนกระจก (Janjaiet al., 2007)

เครื่องอบแห้งแบบเรือนกระจก (Greenhouse dryer) มีรูปร่างเป็นทรงพาราโบลิกและคลุมด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนต มีพัดลมดูดอากาศ 3 ตัว บริเวณด้านบน ซึ่งได้รับพลังงานจากแผงโซลาร์เซลล์ พื้นคอนกรีตผสมผงสีดาเพื่อเพิ่มการดูดกลืนความร้อน มีขนาด กว้าง 5.5 เมตร ยาว 8 เมตร สูง 3.5 เมตร เมื่อเครื่องอบแห้งได้รับรังสีอาทิตย์ ภายในจะเกิดภาวะเรือนกระจก ซึ่งวัสดุจะได้รับความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบและอากาศร้อนภายในเครื่องอบแห้ง

หลังคาโค้งรูปทรงพาราโบลิกช่วยทำให้อากาศที่ตกกระทบลงมาสามารถเข้าไปยังเครื่องอบแห้งได้ดีเนื่องจาก มีมุมตกกระทบของรังสีที่ด้านข้างเครื่องอบแห้งเอื้อต่อการส่งผ่านของรังสีได้ดีตลอดทั้งวัน อีกทั้งยังลดการต้านทานแรงลมและมีรูปทรงที่สวยงามอีกด้วย

พื้นที่เป็นคอนกรีตขัดดีคือ ป้องกันไม่ให้ความชื้นจากดินระเหยเข้าไปในเครื่องอบแห้ง ซึ่งด้านล่างของพื้นคอนกรีตยังมีแผ่นพลาสติกใสเพื่อป้องกันความชื้นจากดินอีกชั้นด้วย นอกจากนี้คอนกรีตยังช่วยเก็บพลังงานความร้อนจากรังสีอาทิตย์อาทิตย์เพื่อใช้ในเวลาที่รังสีอาทิตย์มีความเข้มต่ำอีกด้วย อีกทั้งยังสามารถเพิ่มการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ได้ด้วยการผสมผงคาร์บอนเข้าไป

แผ่นโพลีคาร์บอเนต เป็นวัสดุโปร่งแสง เป็นฉนวนความร้อนที่ดี ซึ่งรังสีอาทิตย์สามารถส่งผ่านแผ่นโพลีคาร์บอเนตเข้าไปในเครื่องอบแห้งได้ดีเนื่องจากเป็นรังสีคลื่นสั้นที่มีความยาวน้อยกว่า 400 nm ซึ่งแผ่นโพลีคาร์บอเนตจะยอมให้รังสีที่มีคลื่นสั้นผ่านเข้ามาบางส่วน และบางส่วนสะท้อนออกไป

และบางส่วนถูกดูดกลืนด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนต หลังจากนั้นเมื่อพื้นคอนกรีตและโครงสร้างเครื่องอบแห้งดูดกลืนรังสีที่ผ่านเข้ามา จะปล่อยรังสีความร้อนที่มีคลื่นยาวออกมา ซึ่งแผ่นโพลีคาร์บอเนตจะสามารถดูดกลืนรังสีในช่วงความยาวคลื่น 400-1500 nm ได้ดี จากนั้นก็จะคายพลังงานความร้อนให้กระจายอยู่ภายในเครื่องอบแห้ง ทำให้รังสีสะท้อนกลับไปมาภายในเครื่องอบแห้งจนเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก ทำให้อุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น

โดยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการนำเครื่องอบแห้งพาราโบลาโกลาโดมไปติดตั้งมากกว่า 500 แห่ง ทั่วประเทศไทย และบางแห่งยังถูกติดตั้งในต่างประเทศอีกด้วย เช่น อินเดีย สเปน ลาว เป็นต้น

2.9 การคำนวณประสิทธิภาพเครื่องอบแห้ง

การคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง (η_d) ที่อาศัยพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถคำนวณหาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งได้จากอัตราส่วนระหว่างพลังงานความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากผักตบชวา (Q_{dryer}) และพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่ผิวของเครื่องอบแห้ง ($Q_{solar,dryer}$) ดังสมการ

$$\eta_d = \frac{Q_{dryer}}{Q_{solar,dryer}} \times 100 \quad (14)$$

เมื่อ Q_{dryer} คือ พลังงานความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากผักตบชวา (kJ) สามารถหาได้จากสมการ

$$Q_{dryer} = m_r L_v \quad (15)$$

เมื่อ m_r คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกมาจากผลิตภัณฑ์ (kg)

L_v คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ (kJ/kg)

เมื่อ $Q_{solar,dryer}$ คือ พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่ผิวของเครื่องอบแห้ง (kJ) สามารถหาได้จากสมการ

$$Q_{solar,dryer} = I A_d t \quad (16)$$

เมื่อ I คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์ (W/m^2)

A_d คือ พื้นที่ผิวรับรังสีอาทิตย์ของเครื่องอบแห้ง (m^2)

t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h, day)

2.9.1 หลักการทำงานของระบบอบแห้งแบบเรือนกระจก

เมื่อรังสีอาทิตย์ตกกระทบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก ส่วนแรกที่โดนรังสีอาทิตย์คือแผ่นโพลีคาร์บอเนต จากนั้นจะผ่านลงไปกระทบยังผลิตภัณฑ์ที่อยู่ภายใน และรังสีบางส่วนตกกระทบยังพื้นของเครื่องอบแห้ง ทำให้ภายในเครื่องอบแห้งมีอุณหภูมิสูงขึ้น และเกิดการแผ่รังสีอินฟราเรดออกมา แต่รังสีนี้ส่วนมากจะไม่สามารถผ่านแผ่นโพลีคาร์บอเนตออกไปได้เนื่องจากรังสีอินฟราเรดเป็นรังสีคลื่นยาว ทำให้ถูกกักเก็บอยู่ในเครื่องอบแห้ง เป็นผลให้อุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งและอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์เพิ่มสูงขึ้น ทำให้น้ำที่อยู่ภายในผลิตภัณฑ์ระเหยออกมา และถูกพัดลมดูดอากาศดูดออกไปในที่สุด และอากาศแวดล้อมจะไหลเข้ามาทางช่องระบายอากาศบริเวณด้านหน้าเพื่อเข้ามาแทนที่อากาศที่ถูกระบายออกไป โดยผลิตภัณฑ์จะได้รับพลังงานจากรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบลงมาโดยตรงและและอากาศร้อนภายในเครื่องอบแห้ง ทำให้มีประสิทธิภาพการตากแห้งที่เร็วกว่าประเภทอื่น ๆ ที่ได้กล่าวมาเช่น เครื่องอบแห้งประเภทการพาความร้อนแบบรับรังสีอาทิตย์โดยตรงหรือทางอ้อมนั่นเอง

2.9.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลในการออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษางานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพเครื่องอบแห้ง การออกแบบเครื่องอบแห้งให้มีความเหมาะสมกับวัสดุที่ใช้สร้างเครื่องอบแห้งทั้งในประเทศและต่างประเทศ เพื่อให้ทราบถึงแนวคิด วิธีการทดลอง และการทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อเครื่องอบแห้ง

Janjai, Khamvongsa et al. (2007) มหาวิทยาลัยศิลปากรร่วมกับกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งแบบเรือนกระจก (Greenhouse dryer) มีรูปร่างเป็นทรง พาราโบลิกและคลุมด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนต ติดตั้งพัดลมดูดอากาศ 3 ตัว บริเวณด้านบนของทางออก ซึ่งได้รับพลังงานจากแผงโซลาร์เซลล์ พื้นคอนกรีตผสมผงสีดำเพื่อเพิ่มการดูดกลืนความร้อน มีขนาด กว้าง 5.5 เมตร ยาว 8 เมตร สูง 3.5 เมตร อบแห้งพริกสด 100 - 150 กิโลกรัม บนชั้นวางผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 3 ชั้น ความชื้นเริ่มต้นที่ 80% (w.b.) เหลือความชื้นสุดท้าย 10% (w.b.) ภายใน 5 วัน และเครื่องอบแห้งมีประสิทธิภาพประมาณ 20% สำหรับการอบแห้งพริกสด 150 กิโลกรัม ภายในเครื่องอบแห้งมีอุณหภูมิ 60 - 65 °C และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 20 - 75%

Janjai (2012) ได้สร้างตัวอย่างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกสำหรับอุตสาหกรรมการอบแห้งผลิตภัณฑ์ขนาดเล็กที่มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม (13.96 °N, 100.10 °E) ประเทศไทย มีรูปร่างเป็นทรงพาราโบลิกคลุมด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนต พื้นคอนกรีต กว้าง 8 เมตร ยาว 20 เมตร สูง 3.5 เมตร ความจุของผลิตภัณฑ์ 1,000 กิโลกรัม รูทางเข้าของอากาศอยู่บริเวณด้านล่างของด้านหน้า รูทางออกเป็นพัดลมดูดอากาศจำนวน 9 ตัว ติดตั้งบริเวณข้างบนของด้านหลัง ซึ่งได้รับพลังงานจากแผงโซลาร์เซลล์ และติดตั้งเครื่องทำความร้อนเสริม (100 kW-LPG gas burner) ใช้ในกรณีในวันที่มีเมฆมากหรือในวันที่ฝนตก จากการทดลองอบแห้งมะเขือเทศที่ผ่านกระบวนการออสโมซิส จำนวน 1,000 กิโลกรัม พบว่าใช้ระยะเวลา 4 วัน สำหรับความชื้นเริ่มต้น 54% (w.b.) เหลือความชื้นสุดท้าย 17% (w.b.) ภายในเครื่องอบแห้งมีอุณหภูมิ 35 - 65 °C และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 20 - 40%

Niroka, Panprayun et al. (2022) ศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกสำหรับอบผักตบชวา ที่วิสาหกิจชุมชนชนราภิรมย์กรุป นครปฐม ประเทศไทย ทดลองอบผักตบชวาบนชั้นตากแห้ง 4 ชั้น แต่ละชั้นห่างกัน 0.4 เมตร โดยในเครื่องอบแห้งได้ติดตั้งพัดลมระบายอากาศจำนวน 3 ตัว ถูกควบคุมด้วยเซนเซอร์ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์และทั้งสองอุปกรณ์ได้รับพลังงานจากแผงโซลาร์เซลล์ 100-W ที่มีแบตเตอรี่ 0.54 kWh สำหรับเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งผักตบชวามีความชื้นเริ่มต้น 92% (w.b.) จะถูกตัดรากและใบออกแล้วตัดให้มีความยาว 1 เซนติเมตร จากนั้นนำไปตากแห้ง พบว่าผักตบชวาที่ถูกอบแห้งในเครื่องอบแห้งใช้เวลาไวกว่าการตากแห้งแบบธรรมชาติ 1-4 ชั่วโมง โดยความชื้นสุดท้ายอยู่ที่ 13 % (w.b.) ส่วนการตากแห้งแบบธรรมชาติความชื้นสุดท้ายอยู่ที่ 20% (w.b.) ถึงแม้ระยะเวลาอบแห้งจะไม่ต่างกันมากแต่มีความต่างทางด้านกายภาพ ซึ่งผักตบชวาที่ถูกอบในเครื่องอบแห้งจะมีสีและรูปร่างที่ดีกว่าการตากแห้งตามธรรมชาติ ซึ่งประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งอยู่ที่ 63% สำหรับอบแห้งผักตบชวาสด 100 กิโลกรัม และจากการติดตั้งชุดควบคุมความชื้นทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลงและสามารถเพิ่มอัตราการอบแห้งได้ 0.5 เท่า เมื่อนำผักตบชวาในชั้นที่แห้งออกก่อนและนำตัวอย่างใหม่ใส่แทนที่ในชั้นเดิม ภายในเครื่องอบแห้งมีอุณหภูมิ 35 - 60 °C และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 30 - 75%

Pankaew, Aumporn et al. (2019) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกทรงพาราโบลิกที่ติดตั้งเตาเผาแลกเปลี่ยนแบบอุตสาหกรรมสำหรับอบกล้วยน้ำ

หว่าเมื่อเทียบกับการตากแห้งตามธรรมชาติ ผู้วิจัยได้อบกล้วยน้ำหว่าในเครื่องอบแห้ง ขนาด 8x12 ตารางเมตร ที่ติดตั้งพัดลมระบายอากาศจำนวน 6 ตัว ใช้พลังงานจากแผงโซลาเซลล์ และใช้ความร้อนเสริมจากเตาเผาแกลบแบบอุตสาหกรรม โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ครั้ง แต่แต่ละครั้งอบกล้วยน้ำหว่าปริมาณ 300 กิโลกรัม พบว่ากล้วยน้ำหว่าที่อบเครื่องอบแห้ง ใช้เวลา 4 วัน จากความชื้นเริ่มต้นที่ 68% (w.b.) จนเหลือความชื้นสุดท้ายที่ 15% (w.b.) ในขณะที่การตากแห้งแบบธรรมชาติใช้เวลา 6 วัน เพื่อให้ได้ความชื้นสุดท้ายของกล้วยน้ำหว่าอยู่ที่ 15% (w.b.) ซึ่งกล้วยน้ำหว่าในเครื่องอบแห้งมีรูปร่างและสีที่ดีกว่าเนื่องจากไม่ได้ถูกรบกวนด้วยแมลง ผุ่น และน้ำฝน อีกทั้งยังถูกให้ความร้อนจากเตาเผาแกลบแบบอุตสาหกรรม เพื่อให้อุณหภูมิภายในอยู่ในช่วง 50 °C ในวันที่ฝนตกหรือเมฆน้อย หลังจากทดลองพบว่าประสิทธิภาพของเตาเผาแกลบแบบอุตสาหกรรมอยู่ที่ 87.7% เครื่องอบแห้งมีประสิทธิภาพอยู่ที่ 12.6% สำหรับกล้วยน้ำหว่า 300 กิโลกรัม

Andres Colorado et al (2022) ศึกษาการออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกประเภทการพาความร้อนตามธรรมชาติให้มีความเหมาะสมสำหรับการอบแห้งมูลสัตว์ (ruminal content) ที่มีความจุ 10,000 กิโลกรัมต่อสัปดาห์ ซึ่งรูปทรงเครื่องอบแห้งที่ได้ศึกษาเป็นลักษณะครึ่งวงกลม จากการออกแบบเครื่องอบแห้งได้สมมติตัวแปรที่สำคัญสำหรับการออกแบบ เช่น จำนวนวันที่ต้องการอบแห้ง รัศมีของครึ่งวงกลม และประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง หลังจากการคำนวณและออกแบบ พบว่าเมื่อกำหนดจำนวนวันที่มากขึ้น พื้นที่รับแสงจะลดลง และพื้นที่เครื่องอบแห้งก็จะลดลงตามด้วย ทำให้ความจุผลิตภัณฑ์ต่อพื้นที่มากขึ้น เป็นผลให้ใช้จำนวนวันในการอบแห้งมากขึ้นเช่นกัน

วสันต์ จินธาตา และพรชัย เพชรสงคราม (2016) ศึกษาลักษณะรูปทรงของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ส่งผลต่อสภาพภายใน ที่มีพื้นที่ฐาน ความสูง และช่องระบายอากาศเท่ากัน แต่มีรูปทรงที่แตกต่างกันทั้งหมด 3 แบบ 1.ตัวห้องรูปทรงสี่เหลี่ยมและหลังคาเป็นรูปทรงสามเหลี่ยม 2.ตัวห้องรูปทรงสี่เหลี่ยมและหลังคาเป็นครึ่งวงกลม 3.เป็นรูปทรงพาราโบลา หลังการทดลองพบว่าอุณหภูมิภายในโรงอบแห้งของทั้ง 3 ไม่ต่างกันมาก แต่ตัวห้องรูปทรงสี่เหลี่ยมและหลังคาเป็นครึ่งวงกลมมีพื้นที่รับแสงมากที่สุดทำให้สามารถทำอุณหภูมิได้ดีและมีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ต่ำที่สุด จึงทำให้โรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในแบบที่ 2 มีความเหมาะสมสำหรับการอบแห้งยางพารามากที่สุด

ประพันธ์พงษ์ สมศิลา และคณะ (2012) ได้ศึกษาโครงสร้างของโรงเรือนที่มีผลต่อการไหลเวียนและอุณหภูมิของอากาศภายในโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้วิธีการคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหล บนโปรแกรม ANSYS FLUENT ชนิดโครงสร้างของโรงเรือนที่ศึกษาได้แก่ แบบหลังคา

หน้าจั่วสามเหลี่ยม แบบหลังคาแนวเอียง แบบหลังคาโค้ง และแบบหลังคาโค้งผนังตรง และพลั๊กซ์ความร้อน 400, 600 และ 800 วัตต์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าโรงเรือนอบแห้งแสงอาทิตย์แบบหลังคาแนวเอียง เป็นโรงเรือนที่มีการไหลของอากาศภายในโรงเรือนดีที่สุด ซึ่งได้จากปริมาณความเร็วของอากาศที่ค่อนข้างสูง และสม่ำเสมอทั่วทั้งโรงเรือน อีกทั้งทิศทางของเวกเตอร์ความเร็วครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดภายในโรงเรือน ดังแสดงในรูปข้างล่าง ส่วนการกระจายตัวของอุณหภูมิในเครื่องอบแห้งพบว่าแบบหลังคาโค้งจะมีการกระจายตัวของอุณหภูมิจะมีการกระจายตัวที่ดีที่สุดดังรูปข้างล่าง

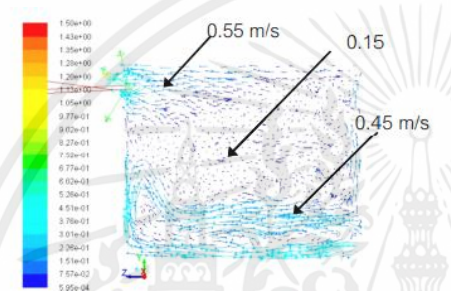


Figure 5 Velocity vector in triangle roofing of green house type solar dryer

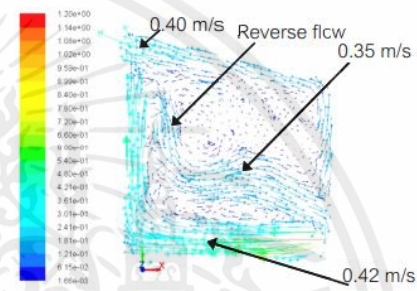


Figure 6 Velocity vector in incline roofing of greenhouse type solar dryer

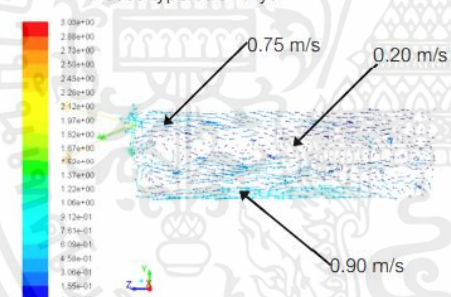


Figure 7 Velocity vector in curved roofing of green house type solar dryer

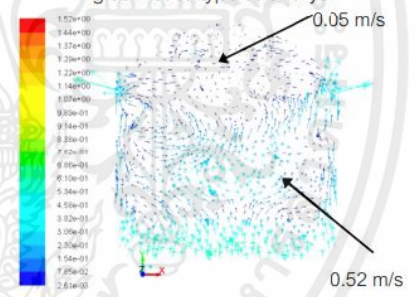


Figure 8 Velocity vector in curved wall roofing of greenhouse type solar dryer

รูปที่ 2.21 รูปภาพแสดงแผนภาพ Velocity vector ของประพันธ์พงษ์ สมศิลา และคณะ (2012)

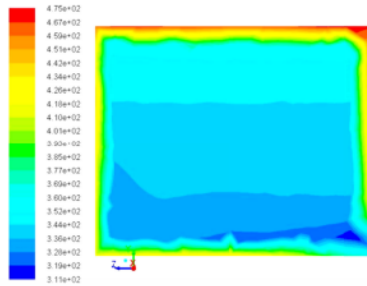


Figure 9 Temperature contour in triangle roofing of greenhouse type solar dryer

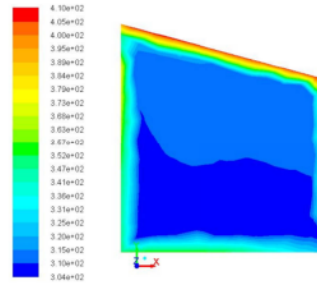


Figure 10 Temperature contour in incline roofing of greenhouse type solar dryer

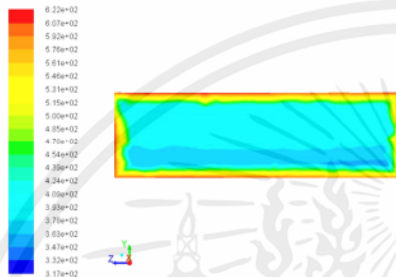


Figure 11 Temperature contour in curve roofing of greenhouse type solar dryer

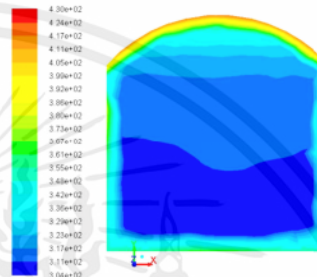


Figure 12 Temperature contour in curve roofing and straight wall of greenhouse type solar dryer

รูปที่ 2.22 รูปแสดงแผนภาพ Temperature contour ของประพันธ์พงษ์ สมศิลา และคณะ (2012)

ประพันธ์พงษ์ สมศิลา และคณะ (2012) ได้ศึกษาการไหลเวียนและอุณหภูมิของอากาศภายในโรงเรือนอบแห้งที่มีผลต่อประสิทธิภาพของโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์หลังคาสามเหลี่ยมหน้าจั่วบนโปรแกรม ANSYS FLUENT ซึ่ง ตัวแปรที่ทำการศึกษาประกอบด้วยขนาดของโรงเรือน ได้แก่ 3x4x2.5, 3x8x2.5 และ 5x10x2.5 เมตร และฟลักซ์ความร้อน ได้แก่ 400, 600 และ 800 วัตต์/ตารางเมตร ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า โรงเรือนอบแห้งขนาด 3x4x2.5 เมตร มีการไหลเวียนอากาศดีที่สุดเนื่องจากมีความเร็วที่ทางเข้าและทางออกมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทั้งสามขนาด และทิศทางเวกเตอร์ความเร็วมีคสม่าเสมอทั่วทั้งโรงเรือนดังรูปด้านล่าง และขนาด 5x10x2.5 เมตร มีการไหลเวียนของอากาศน้อยที่สุด เนื่องจากปริมาณพื้นที่รวมค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ได้รับ เป็นผลให้ความแตกต่างของความหนาแน่นอากาศน้อยจึงทำให้มีการไหลเวียนที่น้อยที่สุด

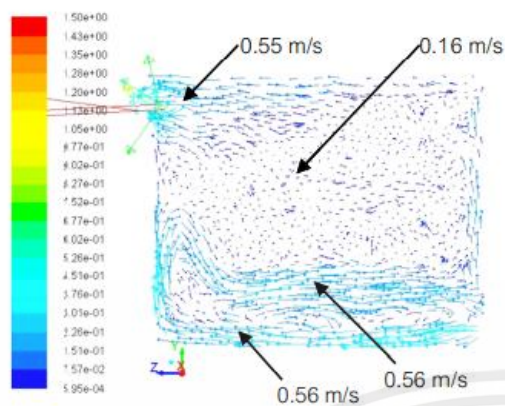


Figure2 Simulation result of velocity vector on size 3x4x2.5 m drying chamber

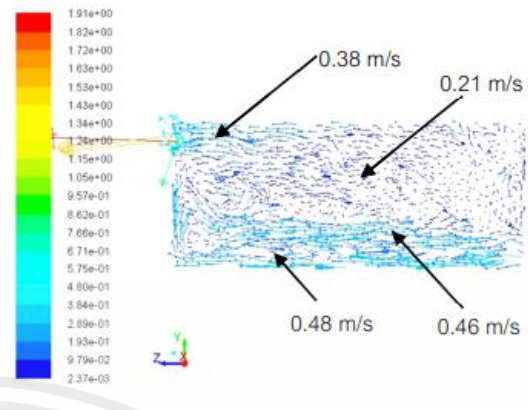
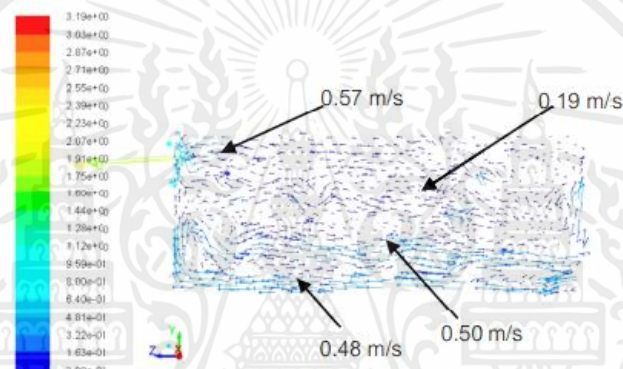


Figure3 Simulation result of velocity vector on size 3x8x2.5 m drying chamber



รูปที่ 2.23 รูปแสดงแผนภาพ Velocity vector เปรียบแบบจำลองในแต่ละขนาด ประพันธ์พงษ์ สมศิลา และคณะ (2012)

Yen H.P. Duong et al. (2019) การศึกษานี้ได้ศึกษาเงื่อนไขภายในของเครื่องอบแสงอาทิตย์พร้อมการอบผลผลิตทางการเกษตร การทำงานภายในเครื่องอบแสงอาทิตย์ได้ถูกวิเคราะห์โดยซอฟต์แวร์ ANSYS Fluent โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ นอกจากนี้อากาศชั้นภายนอกเปลี่ยนไปตามเงื่อนไขอากาศของวัน โดยที่อากาศชั้นเข้าไปในเครื่องอบแห้งผ่านรูด้านหน้าสองรูและออกจากเครื่องอบแห้งผ่านพัดลมระบายอากาศสามตัวที่ติดตั้งอยู่ด้านหลัง และการไหลถ่ายโอนความร้อนถูกพิจารณาเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ผลผลิตทางการเกษตรภายในเครื่องอบแสงอาทิตย์ถูกจำลองเป็นวัสดุซึ่งมีโครงสร้างรูปร่างเหมือนโปร่งใส และการรังสีถูกจำลองตามแบบจำลองรังสี ผลการจำลองแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิและความชื้นภายในโรงเรือนอบแสงอาทิตย์ โดยมีผลจากการแลกเปลี่ยนความร้อน การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) และกระบวนการเอาออกความชื้นจากวัสดุที่กำลังอบไปยังภายนอก ผลการจำลอง

แสดงอุณหภูมิการอบภายในเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์อยู่ในช่วง 303.15 ถึง 323.1 เคลวิน ในตั้งแต่เวลา 7:00 น. ถึงเวลา 18:00 น. หลังเที่ยงวัน โรงเรือนอบสามารถมีอุณหภูมิสูงสุดเมื่อเวลา 14:00 น. หลังเที่ยง ความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนอบมีการเปลี่ยนแปลงระหว่าง 23.70% ถึง 79.55% และความเร็วของลมภายในโรงเรือนอบเกือบไม่ขึ้นอยู่กัเวลาและเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งที่ตั้ง

Nicolás-Ivan Roman-Roldan et al. (2019) การศึกษานี้สร้างโมเดลคำนวณของระบบการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ใน Design Modeler และจำลองการทำงานด้วย ANSYS Fluent ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าโมเดลที่ซับซ้อนที่มีรูปทรงสามมิติเหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งภายใต้เงื่อนไขอากาศต่างๆ โดยได้จำลองการกระจายอุณหภูมิและความเร็วของอากาศขึ้นภายในเครื่องอบแห้งตั้งแต่พระอาทิตย์ขึ้นจนถึงพระอาทิตย์ตก โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองที่เป็นตัวเลขสอดคล้องกับผลลัพธ์จากการทดลอง อุณหภูมิสูงสุดและความชื้นสูงสุดเมื่อเวลา 14:00 น. คือ 66.1°C (339 K) และ 23.70% นอกจากนี้ผลการจำลองยังแสดงถึงความสัมพันธ์ของความชื้นในเครื่องอบแห้งที่มีค่าสูงสุดของความชื้นคือ 79.55% และค่าต่ำสุดคือ 23.70% ผลลัพธ์ของการจำลองการกระจายอุณหภูมิและความชื้นพิสูจน์ว่าระบบการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์สามารถทำงานได้ตลอดวันและเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการพัฒนาเครื่องอบแห้งในประเทศทางเกษตรกรรม

จากการศึกษาพบว่าการวิเคราะห์แบบจำลองเครื่องอบแห้งส่วนใหญ่ได้ใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT ในการวิเคราะห์แบบจำลอง ซึ่งหลายๆ งานวิจัยได้ศึกษาเกี่ยวกับการกระจายตัวของอุณหภูมิและการไหลเวียนของอากาศเป็นหลัก[5,16,17] ซึ่งจะใช้การมองแผนภาพคอนทัวร์ในการวิเคราะห์ แต่ยังมีบางงานวิจัยที่ใช้ตัวแปรพลังงานเชิงปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy: TKE) เป็นเป็นตัวแปรเชิงปริมาณที่มีความชัดเจนที่มากกว่าในการวิเคราะห์ ในการเปรียบเทียบการออกแบบเครื่องอบแห้ง โดยพลังงานเชิงปั่นป่วนที่มากส่งผลให้การกระจายตัวของอุณหภูมิมี่ความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และเกิดการพาความร้อนที่ดีในเครื่องอบแห้ง[8] ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ภายในเครื่องอบแห้งใช้ระยะเวลาอบแห้งที่น้อยลงและมีความชื้นในผลิตภัณฑ์ที่สม่ำเสมอ

2.10 Computational Fluid Dynamics, CFD

เป็นการจำลองเกี่ยวกับปรากฏการณ์ของการไหลต่างๆและปรากฏการณ์อื่นๆที่เกี่ยวข้อง และยัง สามารถวิเคราะห์ในส่วนที่ยากต่อการสังเกตและทดลองในที่นี้เราในโปรแกรม ANSYS Fluent CFD ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลอง ANSYS Fluent CFD จะแสดงให้เห็นถึงวิธีการไหล การกระจายตัว ความดัน อุณหภูมิ ความเร็ว รวมไปถึงพารามิเตอร์อื่นๆ ที่แปรผันไปตามเวลา

2.10.1 Governing equations

สมการพลังงาน อธิบายการอนุรักษ์พลังงานภายในการจำลองการไหลของของไหล สมการพลังงานเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่พิจารณาการถ่ายเทพลังงานต่างๆ การไหลของอากาศภายในเรือนกระจกจะถือว่าเป็น 3 มิติ สภาวะคงที่ บีบอัดไม่ได้ และปั่นป่วนปรากฏการณ์การไหลและการขนส่งสำหรับการไหลของอากาศและการถ่ายเทความร้อนอธิบายไว้ในสมการการอนุรักษ์มวลหรือสมการความต่อเนื่องสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\nabla(\rho v) = 0 \quad (17)$$

เมื่อ ∇ คือ nabla symbol

ρ คือ ความหนาแน่น (kg/m^3)

v คือ ความเร็วโดยรวมของเวกเตอร์ (m/s)

สมการที่ (18) เป็นรูปแบบทั่วไปของสมการการอนุรักษ์มวล และใช้ได้กับค่าที่ไม่สามารถบีบอัดได้ เช่นเดียวกับกระแสอัด

สมการอนุรักษ์โมเมนตัมสามารถอธิบายได้โดย

$$\nabla \cdot (\rho v v) = \nabla(\mu \nabla v) - \nabla P + \rho g \quad (18)$$

เมื่อ ∇ คือ nabla symbol

ρ คือ ความหนาแน่น (kg/m^3)

v คือ ความเร็วโดยรวมของเวกเตอร์ (m/s)

μ คือ ความสามารถของวัสดุในการต้านทานการไหลตามฟังก์ชัน ของอุณหภูมิ ความถี่

เวลา ($Pa \cdot s$)

P คือ แรงดัน (Pa)

g คือ ความเร่งโน้มถ่วง (m/s^2)

สมการการอนุรักษ์พลังงานสามารถอธิบายได้โดย

$$\nabla \cdot (\rho v T) = \nabla \left(\frac{\lambda}{c_p} \nabla T \right) + \psi \quad (19)$$

เมื่อ ∇ คือ nabla symbol

- ρ คือ ความหนาแน่น (kg/m^3)
- v คือ ความเร็วโดยรวมของเวกเตอร์ (m/s)
- T คือ อุณหภูมิ (K)
- λ คือ ความสามารถในการนำความร้อน ($W/(m \cdot K)$)
- C_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ ($J/(kg \cdot K)$)
- Ψ คือ การกระจายตัวของความหนืด

2.10.2 K-epsilon Turbulence Models

ในส่วนนี้จะมีการแสดงถึง Standard, RNG และ Realizable k-epsilon โดยที่ทั้ง 3 Models มีรูปแบบที่คล้ายกัน คือ transport equations สำหรับ k และ epsilon โดยที่ transport equations, วิธีที่ใช้ในการคำนวณ turbulent viscosity และ ค่าคงที่ของแต่ละ Model จะแตกต่างกัน รวมไปถึง turbulent generation ที่เป็นผลมาจาก shear buoyancy, ค่านี้ถึงผลกระทบของความสามารถในการอัดตัว และการออกแบบ heat and mass transfer

2.10.2.1 Realizable k-epsilon Model

เป็นแบบจำลองที่ถูกปรับปรุงจาก Standard k-epsilon Model โดยจะมีรูปแบบการคำนวณใหม่สำหรับ turbulent viscosity และมีการปรับปรุง transport equation สำหรับค่า Dissipation rate (epsilon) สามารถคำนวณพิสูจน์ได้จากสมการที่แน่นอนสำหรับการถ่ายเทของ mean-square vorticity fluctuation ส่วนในเทอมของ realizable หมายถึง Model เป็นไปตามข้อจำกัดทางคณิตศาสตร์บางประการของ Reynold stress และสอดคล้องกับกายภาพของ turbulence flow นอกจากนี้ทั้ง Realizable และ RNG แสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงที่ชัดเจนกว่า Standard k-epsilon ในลักษณะของการไหล รวมไปถึง strong streamline curvature, vortices และ rotation ในการศึกษาเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่า Realizable Model แสดงประสิทธิภาพที่ดีที่สุดสำหรับ k-epsilon Model ในเทอมของ k คือ Turbulence kinetic energy สามารถคำนวณได้จากสมการ (20) และเทอมของ epsilon คือ Dissipation rate สามารถคำนวณได้จากสมการ (21) [23]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (20)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon \quad (21)$$

| | | |
|-------|----------------------|---|
| เมื่อ | G_k | คือ การเกิดขึ้น Turbulence kinetic energy ที่เป็นผลมาจากเกรเดียนต์ความเร็วเฉลี่ย |
| | G_b | คือ การเกิดขึ้น Turbulence kinetic energy ที่เป็นผลมาจากแรงลอยตัว |
| | Y_M | คือ บทบาทของการขยายตัวที่แกว่งในความปั่นป่วนที่อัดตัวได้ที่มีผลต่อ dissipation rate |
| | α | คือ ค่าปรับแก้ความเร็วของผนังเคลื่อนที่ในทิศทางแกน x |
| | α_k | คือ ปริมาณส่วนกลับของตัวเลขพรีนด์เทิลประสิทธิภาพสำหรับ k (-) |
| | ρ | คือ ความหนาแน่น (kg/m^3) |
| | ε | คือ อัตราการสลายตัวของ Turbulence kinetic energy (m^2/s^3) |
| | μ_{eff} | คือ ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพความหนืด ($kg/m.s$) |
| | μ_t | คือ ความหนืดปั่นป่วน ($kg/m.s$) |
| | μ | คือ ความหนืดปั่นป่วน ($kg/m.s$) |
| | σ_ε | คือ ตัวเลขพรีนด์เทิลปั่นป่วนสำหรับ ε (-) |
| | ν | คือ ความหนืดเชิงจลน์ (m^2/s) |

2.10.3 Modeling radiation

โปรแกรม ANSYS FLUENT มีรูปแบบการจำลองการแผ่รังสีความร้อนทั้งหมด 5 แบบ (ทั้งแบบที่มีตัวกลางหรือไม่มีตัวกลาง) เพื่อช่วยในการนำการแผ่รังสีไปใช้ในการจำลองการถ่ายเทความร้อน โดยแบ่งได้ดังนี้

1. Discrete Transfer Radiation Model (DTRM)
2. P-1 Radiation Model
3. Rosseland Radiation Model
4. Discrete Ordinates (DO) Radiation Model
5. Surface to-Surface (S2S) Radiation Model

นอกจากโมเดลการจำลองการแผ่รังสีข้างต้นแล้ว ANSYS FLUENT ยังมีโมเดลโหลดพลังงานแสงอาทิตย์ (solar load model) ที่ช่วยในการนำผลกระทบของรังสีดวงอาทิตย์มาใช้งานร่วมกับการจำลอง ซึ่งช่วยกำหนดตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า ณ เวลา วันที่ และตำแหน่งที่กำหนดได้อีกด้วย

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้การจำลองการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสี เช่น

- การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีจากเปลวไฟ
- การถ่ายเทความร้อนแบบผสมผสานระหว่างการแผ่รังสี, การพาความร้อน, และ การนำความร้อน
- การแผ่รังสีผ่านหน้าต่างในงานระบบปรับอากาศและความร้อน (HVAC)

ข้อดีและข้อจำกัดของแต่ละโมเดลการแผ่รังสี

1. Discrete Transfer Radiation Model (DTRM)

ข้อดี

- เป็นโมเดลที่ค่อนข้างง่าย เหมาะสำหรับผู้ใช้งานเริ่มต้น
- ใช้ได้กับความหนาทางแสงที่หลากหลาย
- ปรับแต่งความแม่นยำของการคำนวณได้โดยการเพิ่มจำนวนรังสีที่ใช้ในการจำลอง

ข้อจำกัด

- สมมติฐานพื้นผิวแบบกระจายแสง: DTRM สมมติฐานว่าทุกพื้นผิวสะท้อนแสงแบบกระจาย ซึ่งหมายความว่า การสะท้อนของรังสีตกกระทบที่พื้นผิวจะเป็นแบบสม่ำเสมอในทุกทิศทาง
- ไม่คำนวณการกระเจิง: DTRM ไม่สามารถคำนวณผลกระทบของการกระเจิงของแสงได้
- จำกัดการใช้งานกับรังสีเทา: DTRM ใช้ได้เฉพาะกับการจำลองการแผ่รังสีเทาเท่านั้น ไม่สามารถใช้กับการจำลองการแผ่รังสีแบบไม่ใช้สีเทา
- ใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์สูง: การแก้ปัญหาด้วยจำนวนรังสีมากๆ ต้องใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์สูง

2. P-1 Radiation Model

ข้อดี

- การคำนวณเร็วกว่าและใช้หน่วยความจำน้อยกว่า: เนื่องจากสมการการถ่ายเทรังสี (RTE) สำหรับโมเดล P-1 เป็นสมการการแพร่ จึงง่ายต่อการแก้ปัญหาและใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์น้อยกว่าโมเดล Discrete Transfer Radiation Model (DTRM)
- คำนวณการกระเจิงของแสงได้: โมเดล P-1 สามารถคำนวณผลกระทบของการกระเจิงของแสงได้

- เหมาะสำหรับการเผาไหม้: เหมาะสำหรับการใช้งานที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ซึ่งความหนาทางแสงมีค่ามาก
- รองรับเรขาคณิตที่ซับซ้อน: โมเดล P-1 สามารถนำไปใช้กับเรขาคณิตที่ซับซ้อนที่มีพิกัดเส้นโค้งได้อย่างง่ายดาย

ข้อจำกัด

- สมมติฐานพื้นผิวแบบกระจายแสง: เช่นเดียวกับ DTRM, โมเดล P-1 สมมติฐานว่าทุกพื้นผิวสะท้อนแสงแบบกระจาย ซึ่งหมายความว่า การสะท้อนของรังสีตกกระทบที่พื้นผิวจะเป็นแบบสม่ำเสมอในทุกทิศทาง
- สมมติฐานพื้นผิวแบบกระจายแสง: เช่นเดียวกับ DTRM, โมเดล P-1 สมมติฐานว่าทุกพื้นผิวสะท้อนแสงแบบกระจาย ซึ่งหมายความว่า การสะท้อนของรังสีตกกระทบที่พื้นผิวจะเป็นแบบสม่ำเสมอในทุกทิศทาง
- จำกัดการใช้งานกับรังสีเทา: DTRM ใช้ได้เฉพาะกับการจำลองการแผ่รังสีเทาเท่านั้น ไม่สามารถใช้กับการจำลองการแผ่รังสีแบบไม่ใช้สีเทา
- สูญเสียความแม่นยำ: โมเดล P-1 อาจสูญเสียความแม่นยำเมื่อใช้กับเรขาคณิตที่ซับซ้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มีความหนาทางแสงมีค่าต่ำ
- ประเมินฟลักซ์ความร้อนเกินจริง: โมเดล P-1 มีแนวโน้มที่จะประเมินค่าฟลักซ์ความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนเฉพาะจุดสูงเกินจริง

3. Rosseland Radiation Model

ข้อดี

- การคำนวณเร็วและใช้หน่วยความจำน้อยกว่า: เนื่องจากโมเดล Rosseland ไม่ได้แก้ไขสมการการขนส่งเพิ่มเติมสำหรับรังสีตกกระทบ (เหมือนกับโมเดล P-1) จึงทำงานได้เร็วกว่าและใช้หน่วยความจำน้อยกว่าโมเดล P-1
- เหมาะสำหรับสื่อทึบแสง: โมเดล Rosseland สามารถใช้ได้เฉพาะกับสื่อทึบแสงเท่านั้น

ข้อจำกัด

- ไม่รองรับตัวแก้ปัญหามาตามความหนาแน่น: โมเดล Rosseland ใช้ได้เฉพาะกับตัวแก้ปัญหามาตามความดัน (pressure-based) เท่านั้น ไม่สามารถเข้ากับตัวแก้ปัญหามาตามความหนาแน่น (density-based) ได้

4. Discrete Ordinates (DO) Radiation Model

ข้อดี

- ครอบคลุมความหนาแน่นทางแสงทุกช่วง: โมเดล DO สามารถนำไปใช้กับปัญหาการแผ่รังสีได้หลากหลาย ตั้งแต่การแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวไปยังพื้นผิว ไปจนถึงการแผ่รังสีภายในตัวกลางที่เข้าร่วมในกรณีของการเผาไหม้
- รองรับผนังกึ่งโปร่งใส: โมเดล DO สามารถแก้ปัญหาคำการแผ่รังสีที่ผนังกึ่งโปร่งใส (semi-transparent) ได้
- ใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์ปานกลาง: สำหรับการแบ่งมุมตามปกติแล้ว โมเดล DO ใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์ในระดับปานกลาง และต้องการหน่วยความจำไม่มาก
- รองรับการระบุการแผ่รังสีสเปกตรัมที่ผนัง: การใช้งานอนุญาตให้ระบุการแผ่รังสีสเปกตรัมที่ผนัง โดยถือว่าการแผ่รังสีคงที่ภายในแต่ละแถบ

ข้อจำกัด

- การแบ่งมุมละเอียดอาจใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์สูง: การแก้ปัญหาคำด้วยการแบ่งมุมละเอียดอาจต้องใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์สูง
- จำกัดการใช้งานกับรังสีเทาหรือไม่ใช่สีเทาแบบแถบความถี่: การใช้งานปัจจุบันรองรับเฉพาะการจำลองรังสีเทา หรือการจำลองรังสีไม่ใช่สีเทา (non-gray) โดยใช้โมเดลแถบความถี่สีเทา

5. Surface to-Surface (S2S) Radiation Model

ข้อดี

- เหมาะสำหรับการจำลองการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีภายในช่องปิดที่ไม่มีตัวกลางที่เข้าร่วม: โมเดล S2S เหมาะสำหรับการจำลองการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีภายในระบบปิดที่ไม่มีสื่อกลางที่เข้าร่วม เช่น ระบบระบายความร้อนของยานอวกาศ
- การคำนวณเร็วกว่าโมเดล DTRM และ DO: เมื่อเทียบกับโมเดลการแผ่รังสี DTRM และ DO โมเดล S2S ใช้เวลาน้อยกว่ามากต่อการคำนวณ

ข้อจำกัด

- สมมติฐานพื้นผิวแบบกระจายแสง: โมเดล S2S สมมติฐานว่าทุกพื้นผิวเป็นแบบกระจายแสง
- จำกัดการใช้งานกับรังสีเทา: การใช้งานปัจจุบันรองรับเฉพาะการจำลองรังสีเทา
- ต้องการหน่วยความจำมาก: ความต้องการพื้นที่จัดเก็บและหน่วยความจำเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามจำนวนด้านของพื้นผิว ซึ่งสามารถลดลงได้โดยใช้กลุ่มของด้านของพื้นผิว แม้ว่าเวลา CPU จะไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนของกลุ่มที่ใช้
- ไม่รองรับการจำลองการแผ่รังสีที่เกี่ยวข้องกับสื่อกลาง: โมเดล S2S ไม่สามารถใช้ในการจำลองปัญหาการแผ่รังสีที่เกี่ยวข้องกับสื่อกลาง

2.10.4 สมการโมเดล Model DO

โมเดล DO พิจารณาการถ่ายโอนพลังงานรังสี (RTE) ในทิศทาง \vec{s} ซึ่งเป็นสมการเชิงสนาม (field equation) ดังสมการ

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s})\vec{s}) + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}')\Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}')d\Omega' \quad (22)$$

เมื่อ \vec{r} คือ เวกเตอร์ของตำแหน่ง

\vec{s} คือ เวกเตอร์ของทิศทาง

\vec{s}' คือ เวกเตอร์ของทิศทางการกระเจิง

I คือ ความเข้มของรังสี

a คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืน

σ_s คือ สัมประสิทธิ์การกระเจิง

n คือ ดัชนีการหักเห

σ คือ ค่าคงที่สเตฟาน-บ็อลทซ์มัน ($5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 - \text{K}^4$)

T คือ อุณหภูมิ ณ ตำแหน่ง

Φ คือ ฟังก์ชันเฟส

Ω' คือ มุมทิศทางที่กระเจิง

2.11 โปรแกรมที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 2.24 โปรแกรม SOLIDWORKS

SOLIDWORKS คือโปรแกรมในตระกูล CAD (Computer Aided Design and Drafting) เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบเชิงวิศวกรรมที่ช่วยจำลองการสร้างชิ้นงานออกมาในรูปแบบได้ทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติ สามารถวิเคราะห์ส่วนต่าง ๆ ของชิ้นงานในเรื่องของความแข็งแรง อุณหภูมิ อายุการใช้งาน เป็นต้น เราใช้ SOLIDWORKS เพื่อสร้างแบบจำลองสามมิติของโดมเพื่อนำมาจำลองการไหลของอากาศในโปรแกรม ANSYS เนื่องจาก ANSYS สามารถทำการจำลอง กำหนดตัวแปรได้ครอบคลุม และนำผลมาวิเคราะห์ได้ดีกว่า SOLIDWORKS



รูปที่ 2.25 โปรแกรม Ansys

ANSYS คือโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์งานทางวิศวกรรมด้วยวิธี FEM (Finite Element Method) และเราใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ fluent ซึ่งเป็นวิธีการทาง Fluid Mechanic คือการวิเคราะห์พฤติกรรม

ของของไหลหรือที่เราเรียกกันว่าการคำนวณทาง CFD (Computation Fluid Dynamic) โดยสามารถคำนวณได้ทั้งของไหลชนิดเดียว (Single-Phase Flows) ของไหลหลายชนิด หรือของไหลที่ต่างสถานะกันก็ได้ (Multiphase Flows) เรานำโปรแกรมนี้เพื่อวิเคราะห์ให้ทราบถึงความสามารถในการทำงานของเครื่องอบแห้งที่เราได้ออกแบบมาทั้ง 3 กรณี ว่ากรณีใดมีแนวโน้มที่จะมีประสิทธิภาพในการอบแห้งมากที่สุด



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

เนื่องจากผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งภายในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกที่ขนาดแตกต่างกันและศึกษาเพื่อออกแบบเครื่องอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการนำไปต่อยอด ซึ่งผู้วิจัยได้ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการอบแห้งผักตบชวา พบว่าผักตบชวาที่มีความชื้นเริ่มต้น 88.05% (w.b.) และอบแห้งจนเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 15% (w.b.) ซึ่งเป็นความชื้นที่ไม่ทำให้เชื้อราหรือจุลินทรีย์อาศัยอยู่ได้ และสามารถใช้เป็นวัสดุกันกระแทกได้ โดยใช้ระยะเวลาอบแห้งในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประมาณ 1.5 วัน ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นเพื่อใช้ในการออกแบบดังนี้

3.1 เงื่อนไขเริ่มต้นและการออกแบบเครื่องอบแห้ง

1. มวลของผลิตภัณฑ์ที่นำมาอบแห้งคือ 10 กิโลกรัม
2. ความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ที่นำมาอบแห้งโดยประมาณคือ 88.05% (w.b.) [1]
3. ความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ที่นำมาอบแห้งโดยประมาณคือ 15.00% (w.b.) [9]
4. ใช้เวลาอบแห้ง 1.5 วัน [9]
5. สมมติให้เครื่องอบแห้งมีประสิทธิภาพ 30%
6. ความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยรายปีที่ เขตลาดกระบัง จ.กรุงเทพมหานคร 18.22 (MJ/m²-day) [13]

จากการกำหนดเงื่อนไขดังกล่าว สามารถหาพื้นผิวเพื่อนำมาสร้างเครื่องอบแห้งได้จาก แทนสมการที่ (15) และ (16) ลงในสมการการที่ (14) จะได้

$$A_d = \frac{m_r L_v}{\eta_d I t} \quad (23)$$

จากการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับการอบแห้งผักตบชวาที่ผ่านมา พบว่าความชื้นสุดท้ายของผักตบชวาที่นำมาอบแห้งเพื่อเป็นวัสดุรองนอนของสัตว์ทดลองแลประยุกต์ใช้เป็นวัสดุกันกระแทก คือ 10-15% (w.b) [9] ดังนั้นจะสามารถหามวลน้ำที่ระเหยออกมาจากผลิตภัณฑ์ (m_r) ได้จากสมการ

$$m_r = m_{w,i} - m_{w,f}$$

| | |
|-----------------|---------------------------------------|
| เมื่อ $m_{w,i}$ | คือ มวลเปียกเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ (kg) |
| $m_{w,f}$ | คือ มวลเปียกสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ (kg) |
| m_r | คือ มวลน้ำที่ระเหยออกไป (kg) |

ซึ่งมวลเปียกของผลิตภัณฑ์สามารถหาได้จากสมการที่ (11)

ดังนั้นสำหรับอบแห้งผักตบชวา 10 กิโลกรัม ที่มีความชื้นเริ่มต้น 88.05% (w.b.) ให้เหลือความชื้นสุดท้าย 15% (w.b.) จะมีมวลน้ำที่ระเหยออกมาทั้งหมด 8.594 กิโลกรัม ความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยรายปี ที่ เขตลาดกระบัง จ.กรุงเทพมหานคร 18.22 (MJ/m²-day) ใช้เวลาอบแห้ง 1.5 วัน เนื่องจากไม่ทราบประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งทางผู้วิจัยจึงสมมติให้เป็น 30% จากการกำหนดเงื่อนไขดังกล่าว สามารถหาพื้นที่ผิวเครื่องอบแห้งได้เท่ากับ

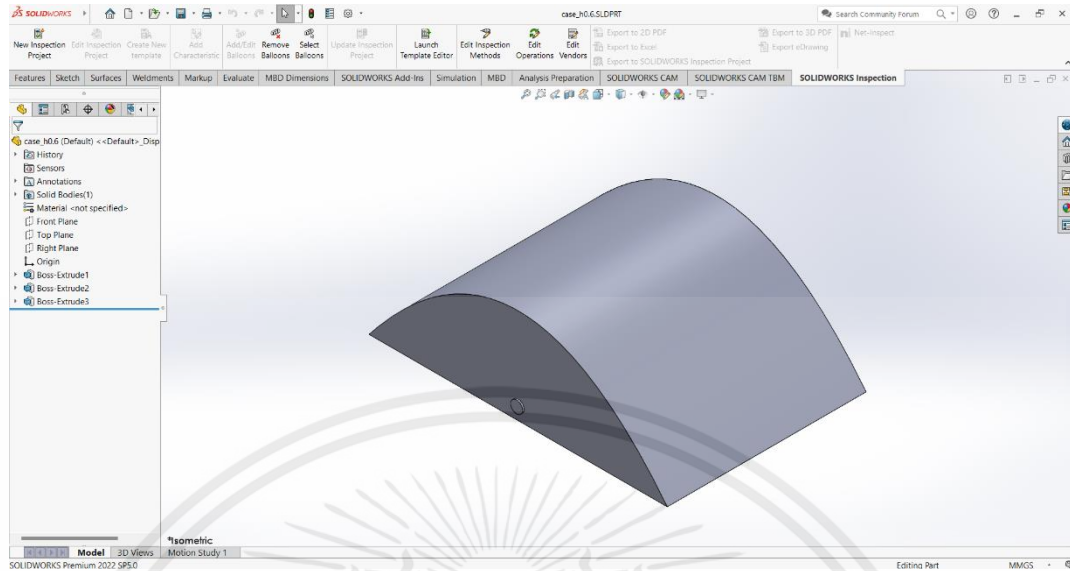
$$A_d = \frac{8.594 \times 2257}{0.30 \times 18.22 \times 10^3 \times 1.5} = 2.366 \text{ m}^2$$

จากนั้นนำค่าพื้นที่ผิวเครื่องอบแห้งที่ได้จากการคำนวณไปออกแบบในโปรแกรม SolidWorks

3.2 การวิเคราะห์แบบจำลองเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

3.2.1 การสร้างแบบจำลองเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (Create 3D Model)

ทางผู้วิจัยเลือกใช้โปรแกรม SOLIDWORKS สร้างแบบจำลองเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยออกแบบให้มีพื้นที่ใกล้เคียงกับที่ได้จากการคำนวณเพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบแล้ว กำหนดความสูงต่าง ๆ ตามที่ทางผู้วิจัยกำหนด จากนั้นสร้างรูทางเข้าและทางออกของอากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.076 เมตร ซึ่งจากจุดศูนย์กลางที่รูทางเข้ามีระยะห่างจากขอบพื้นด้านบนและล่าง 0.080 เมตร (อ้างอิงจาก ขนาดพัดลม DC12V ขนาด 3 นิ้ว)

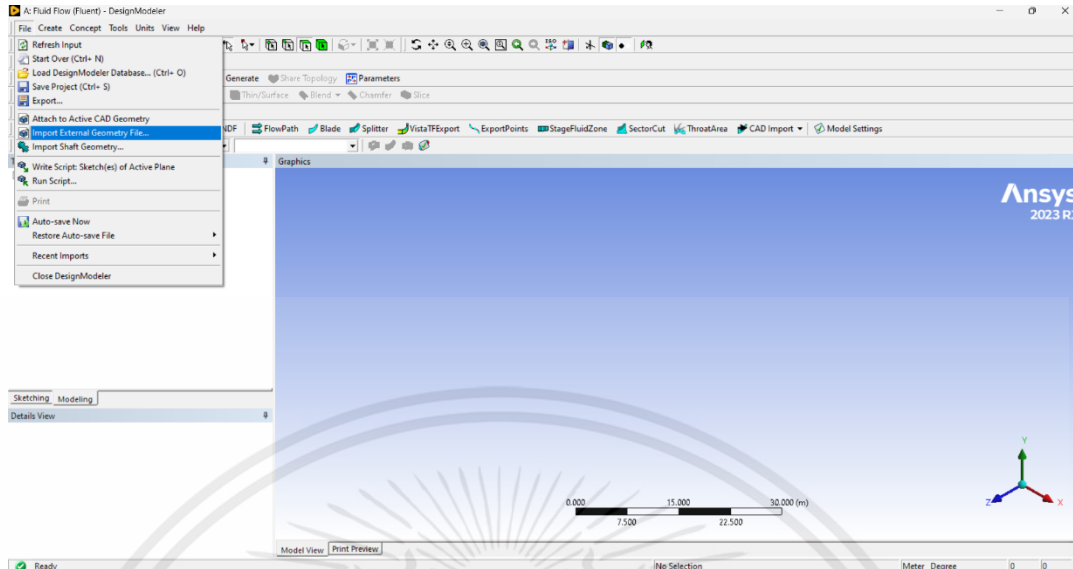


รูปที่ 3.1 หน้าต่าง SOLIDWORKS แสดงแบบจำลองเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

จากนั้นบันทึกไฟล์เป็นไฟล์นามสกุล STEP AP214 เพื่อนำไปเปิดในโปรแกรม ANSYS 2023 R1 ซึ่งทำตามขั้นตอนดังนี้ File > save as > ตั้งชื่อไฟล์ > เลือก Save as type เป็น STEP AP214

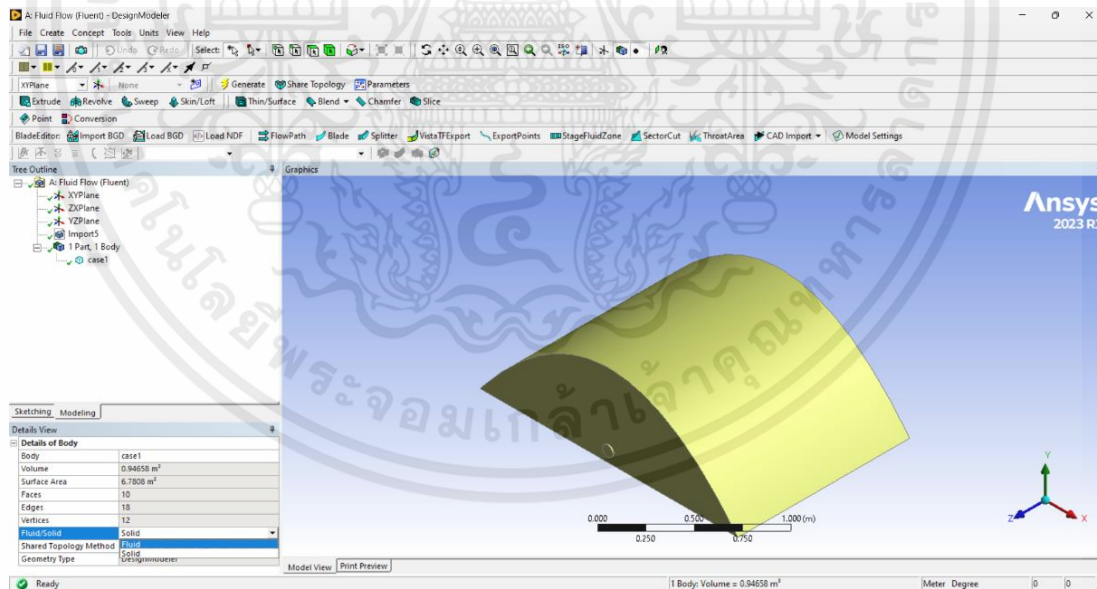
3.2.2 นำเข้าไฟล์แบบจำลองเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

เมื่อเปิดเข้ามาใน New Design Modeler Geometry แล้ว สามารถนำเข้าไฟล์แบบจำลองจากภายนอกได้โดย กดที่ File > Import external Geometry File > ไฟล์แบบจำลองเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ > Open จากนั้นกดไปที่คำสั่ง Generate (รูปสายฟ้า)



รูปที่ 3.2 หน้าต่างแสดงการทำงานการนำเข้าไฟล์แบบจำลองจากภายนอก

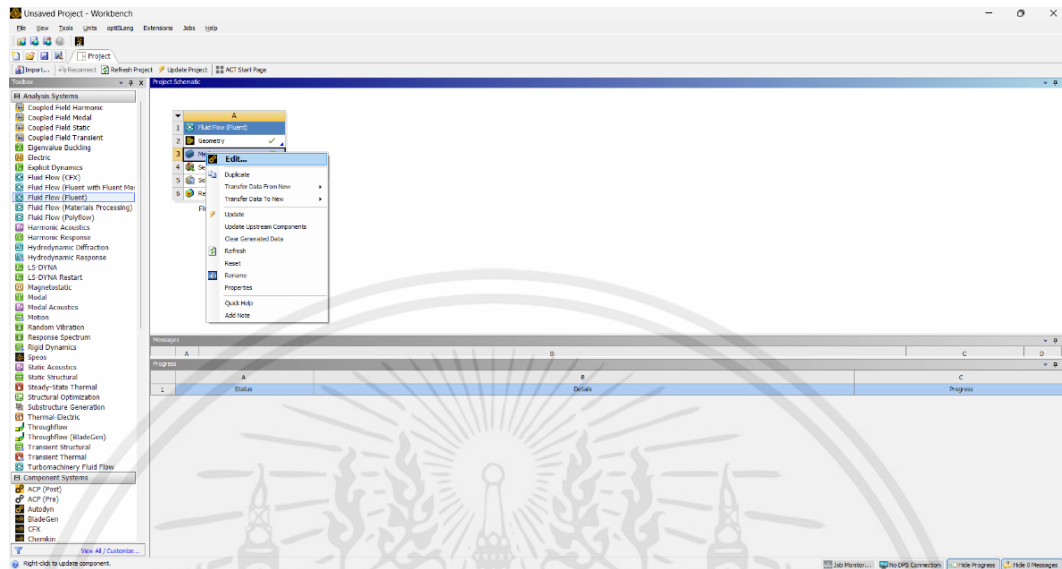
หลังจากนั้นกดเลือกแบบจำลองในส่วนของ part, body แล้วเปลี่ยนการวิเคราะห์จาก Solid เป็น Fluid ในหน้าต่างคำสั่ง Details of Body แล้วกดปิดหน้าต่าง New DesignModeler Geometry



รูปที่ 3.3 หน้าต่างแสดงการทำงานการเลือกการวิเคราะห์แบบของไหล (Fluid)

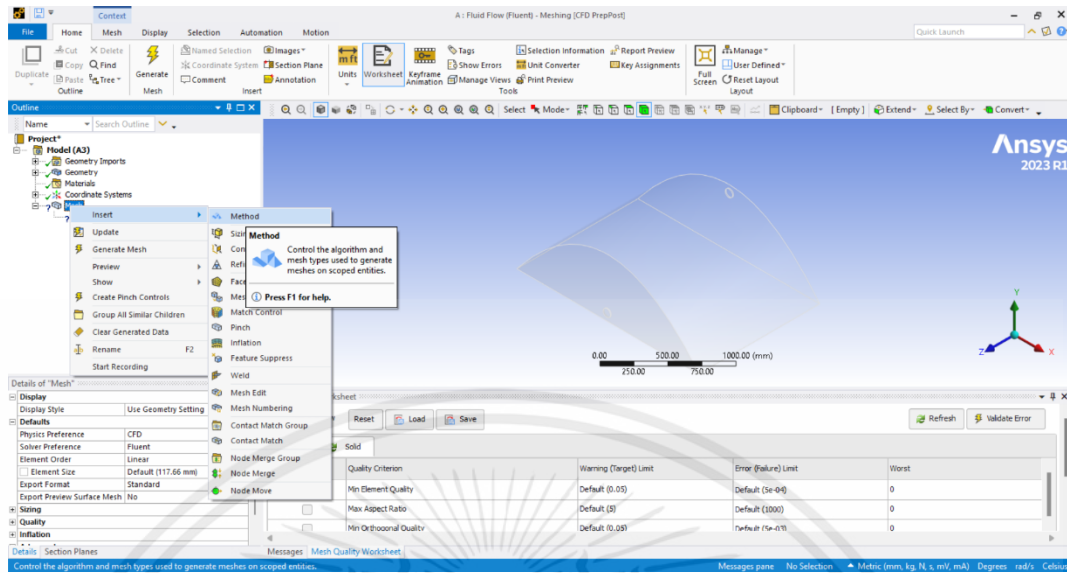
3.2.3 การสร้างเมช (Meshing)

การสร้างเมชนั้นผู้ใช้งานต้องคลิกขวาที่ Mesh > edit ดังรูปที่ 3.5

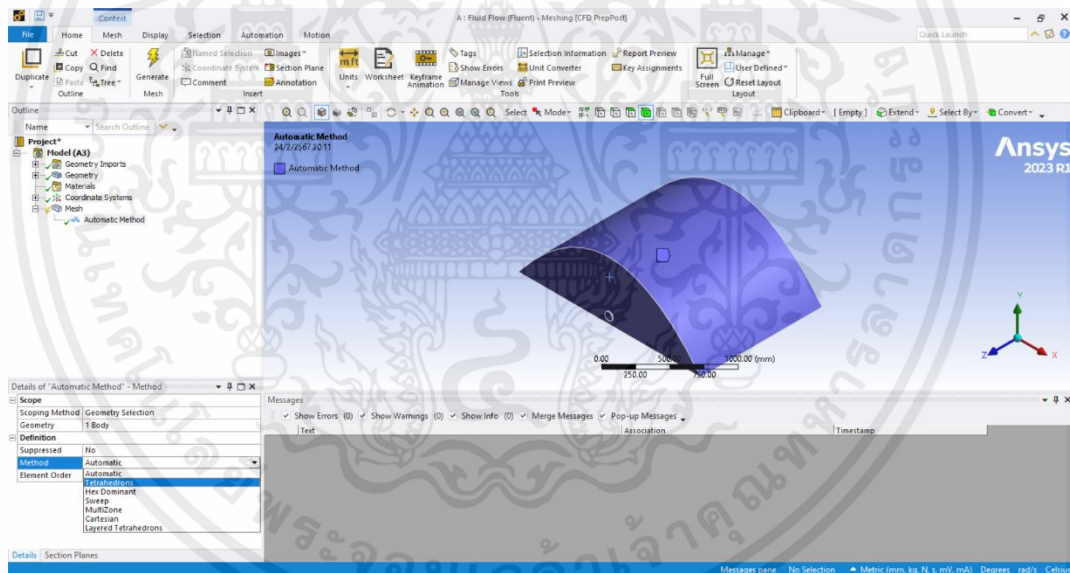


รูปที่ 3.4 หน้าต่างแสดงการทำงานการใช้คำสั่งสร้างเมช

รูปทรงของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองในโปรแกรมนี้มีหลากหลายรูปทรง แต่เป็นที่นิยมและใช้งานแพร่หลายคือ เอลิเมนต์ทรงหกหน้า (Hexahedral element) และเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า (Tetrahedral element) ซึ่งทางผู้วิจัยได้เลือกใช้เอลิเมนต์ทรงสี่หน้า (Tetrahedral element) ซึ่งสามารถเลือกได้โดย คลิกขวาที่ Mesh > Insert > Method จากนั้นคลิกซ้ายเลือกแบบจำลองเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ แล้วกด Apply ในส่วนของ Geometry ในหน้าต่างของ Details of “Automatic Method” แล้วเลือกรูปทรงเอลิเมนต์ในส่วนของ Method เป็น Tetrahedrons แล้วเลือกใช้คำสั่ง Generate ที่แถบด้านบนเพื่อสร้างเมช ดังรูปที่แสดงด้านล่าง



รูปที่ 3.5 หน้าต่างแสดงการทำงานการใช้นคำสั่งเลือกรูปทรงเอลิเมนต์(1)



รูปที่ 3.6 หน้าต่างแสดงการทำงานการเลือกรูปทรงของเอลิเมนต์(2)

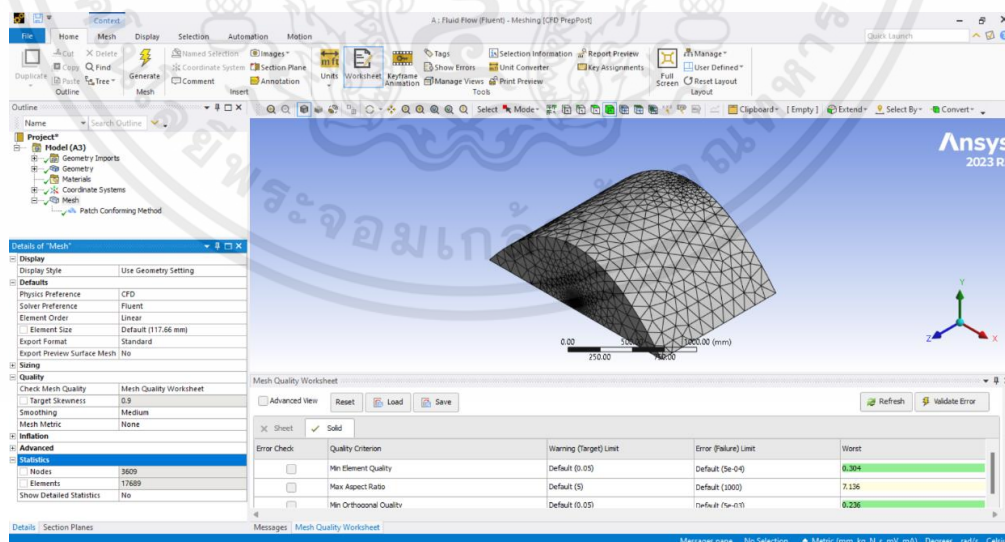
3.2.4 การกำหนดขนาดของเอลิเมนต์

การกำหนดขนาดของเอลิเมนต์ (element size) ในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำเป็นต้องกำหนดขนาดของเอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ปัญหาเพราะขนาดเอลิเมนต์ที่แตกต่างกันจะทำให้ผลลัพธ์ที่แสดงออกมาแตกต่างกันไปด้วย ถ้ากำหนดขนาดเอลิเมนต์ที่มีความละเอียดสูง จะส่งผลให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความแม่นยำสูงขึ้น แต่ต้องใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์และระยะเวลาในการวิเคราะห์มากขึ้นตามไปด้วย จึงจำเป็นต้องหาขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสมแก่การวิเคราะห์ โดยผู้วิจัยจะทำการกำหนดจำนวนเอลิเมนต์เริ่มต้นทั้งหมดตั้งแต่ประมาณ 300,000 และทำการเพิ่มเอลิเมนต์ครั้งละประมาณ 200,000 ไปเรื่อยๆ จนกว่าผลลัพธ์จะเข้าสู่อย่างมีนัยสำคัญ

ซึ่งการการกำหนดจำนวนของเอลิเมนต์สามารถปรับแต่งได้ด้วยการกำหนดขนาดของเอลิเมนต์ ยิ่งขนาดของเอลิเมนต์มีค่าน้อยก็จะทำให้จำนวนของเอลิเมนต์มากขึ้น ดังนั้นผู้ใช้งานสามารถเลือกปรับขนาดของเอลิเมนต์ได้โดย

คลิกซ้ายที่ Mesh ในแถบของ Project จากนั้นเลือกปรับขนาดของเอลิเมนต์ (Element Size) ในแถบของ Defaults และสามารถดูจำนวนเอลิเมนต์ (Element) ได้ในแถบของ Statics

เอลิเมนต์ที่ดีค่าของ Skewness ควรมีค่าเฉลี่ยที่น้อยกว่า 0.25 เนื่องจากจะทำให้มีค่าความผิดพลาดที่น้อย ซึ่งสามารถเปิดแสดงได้ โดยเลือก Check Mesh Quality ในแถบของ Quality ปรับ Mesh Quality Worksheet เป็น Yes, error และเปลี่ยน None เป็น Skewness ในแถบของ Mesh metric เมื่อปรับทุกอย่างเสร็จสิ้นแล้วเลือกใช้คำสั่ง Generate

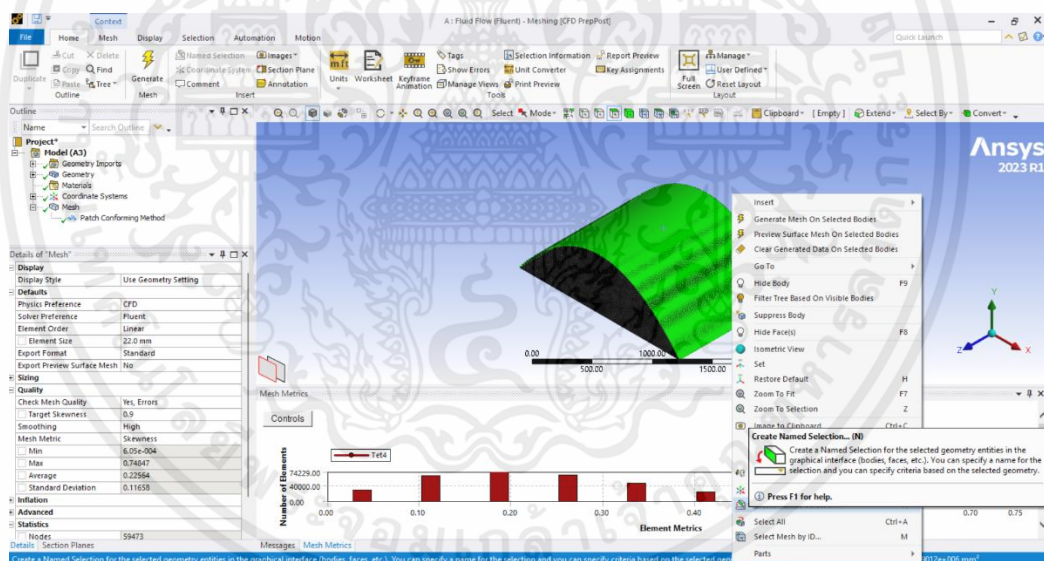


รูปที่ 3.7 หน้าต่างแสดงการทำงานการปรับขนาดและคุณภาพของเอลิเมนต์

3.2.5 การตั้งชื่อผิวของแบบจำลอง (Named Selection)

การตั้งชื่อผิวของแบบจำลองเป็นส่วนสำคัญเนื่องจากในส่วนถัดไปเรื่องการกำหนดขอบเขตเงื่อนไขของผิวนั้นจะต้องระบุว่าจะผิวคืออะไร ซึ่งส่งผลต่อการวิเคราะห์ปัญหาการจำลองการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งสามารถตั้งชื่อผิวได้โดยกดคำสั่ง Ctrl + F เพื่อเปิดใช้งานคำสั่ง Face จากนั้นกดเลือกผิวที่ต้องการตั้งชื่อ แล้วคลิกขวาเลือกคำสั่ง Create Named Selection แล้วตั้งชื่อผิวที่ต้องการ โดยทางผู้วิจัยกำหนดให้มีผิวทั้งหมด 6 ผิว ประกอบด้วย

1. Back (ผิวบริเวณด้านหลังของเครื่องอบแห้ง)
2. Base (ผิวบริเวณด้านล่างของเครื่องอบแห้ง)
3. Cover (ผิวบริเวณด้านบนของเครื่องอบแห้ง)
4. Front (ผิวบริเวณด้านหน้าของเครื่องอบแห้ง)
5. Inlet (ผิวบริเวณช่องทางเข้าอากาศของเครื่องอบแห้ง)
6. Outlet (ผิวบริเวณช่องทางออกอากาศของเครื่องอบแห้ง)

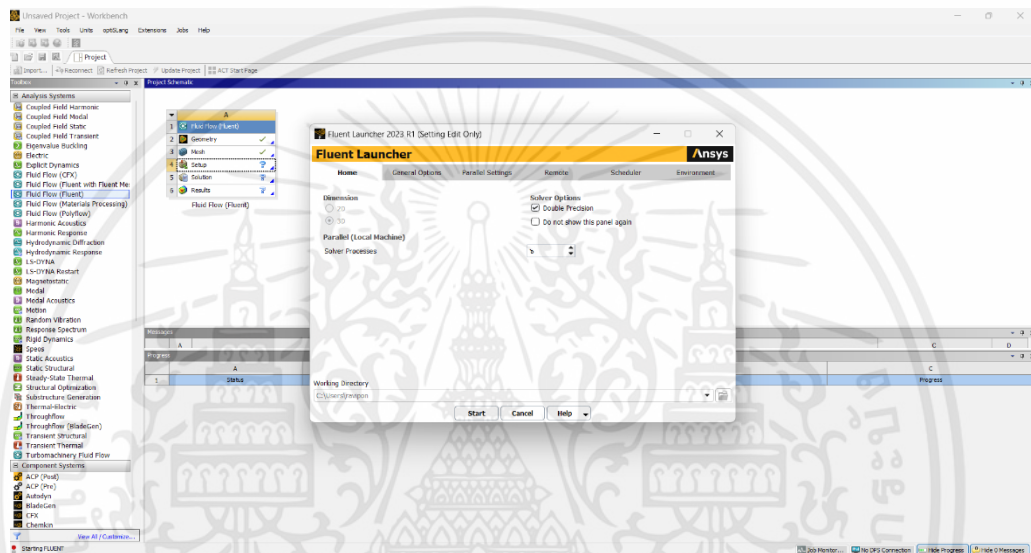


รูปที่ 3.8 หน้าต่างแสดงการใช้งานคำสั่ง Named Selection

เมื่อตั้งชื่อผิวของแบบจำลองเสร็จแล้วกดปิดหน้าต่าง Mesh แล้วคลิกขวาที่ Mesh ในกล่อง Fluid Flow (Fluent) แล้วคลิกใช้คำสั่ง Update

3.2.6 การตั้งค่าการวิเคราะห์ปัญหาแบบจำลองการแผ่รังสีความร้อน

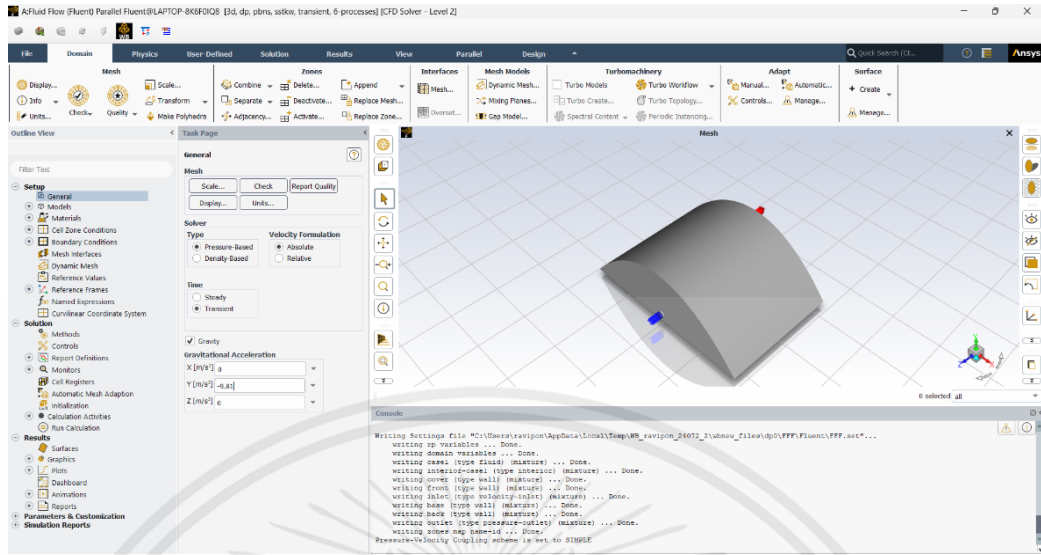
การตั้งค่าการวิเคราะห์ปัญหาแบบจำลองการแผ่รังสีความร้อน ผู้ใช้งานจำเป็นต้องกดใช้งานคำสั่ง setup ในกล่องของ Fluid Flow (Fluent) และเลือกการใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์ให้เหมาะสมกับคอมพิวเตอร์ของตนเอง เช่น ทางผู้วิจัยมี cores ในการใช้งานทั้งหมด 6 cores จึงปรับ Solver process เป็น 6 เพื่อใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์ทั้งหมดในการแก้ปัญหาการจำลอง เป็นต้น ยิ่งใช้ core ในการคำนวณที่มาก ก็จะทำให้สามารถแก้ปัญหาการจำลองได้เร็วยิ่งขึ้น



รูปที่ 3.9 หน้าต่างแสดงการเลือกใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์ในการแก้ปัญหาการจำลอง

3.2.6.1 General

ในส่วนของ General ทางผู้วิจัยเลือกปรับการวิเคราะห์ปัญหาเป็นแบบ Transient และเลือกใช้คำสั่ง Gravity เพื่อปรับให้แรงโน้มถ่วงทิศ Y มีเท่ากับ -9.81 m/s^2 ตามงานวิจัยที่ได้ศึกษามา ซึ่งสามารถกำหนดระยะเวลาในการจำลองการวิเคราะห์ปัญหาได้ (Abderrahman et al., 2021, Duong et al., 2021)



รูปที่ 3.10 หน้าต่างแสดงการทำงานการปรับค่าสิ่งใน General

3.2.6.2 การกำหนดโมเดล (Models)

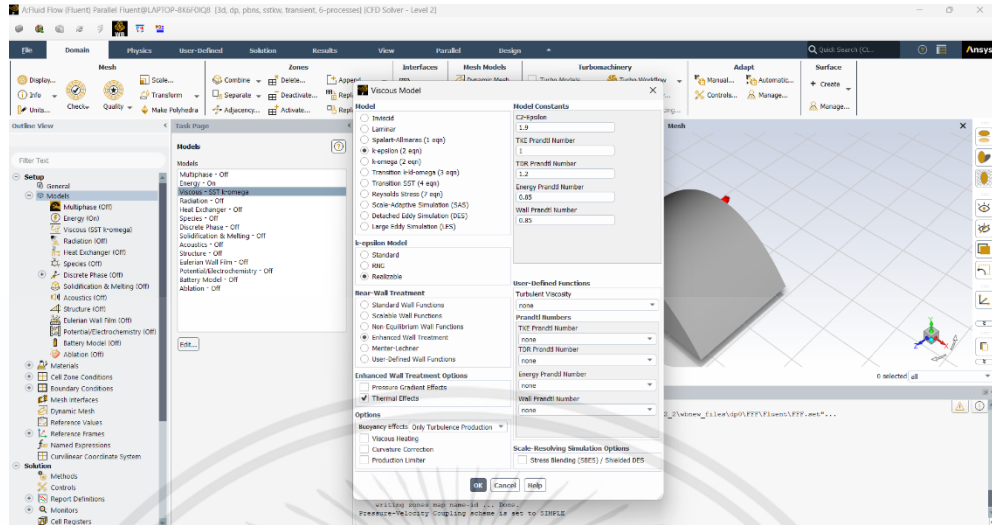
ทางผู้วิจัยเลือกใช้ models ในการวิเคราะห์การแผ่รังสีความร้อนทั้งหมด 3 models ประกอบด้วย

1. Energy Model
2. Viscous Model

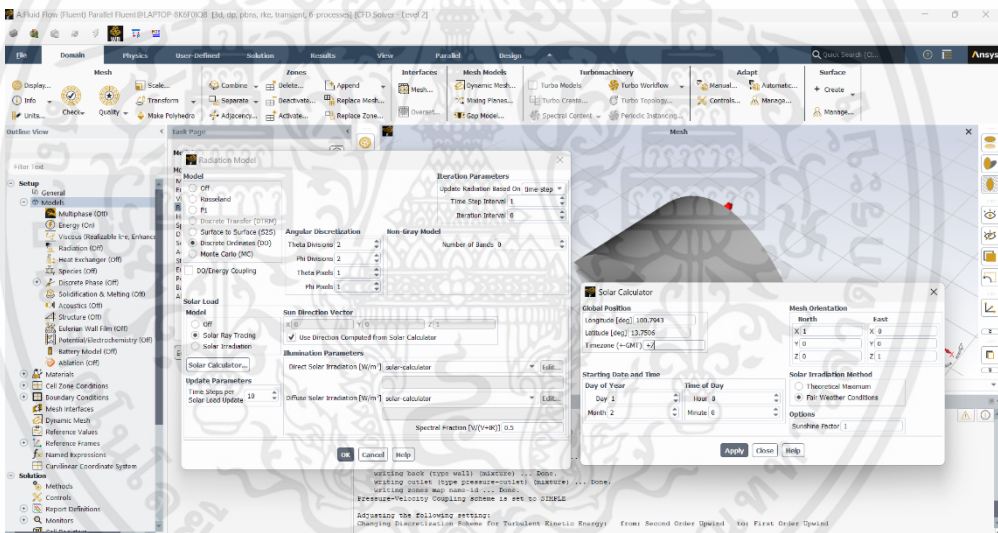
จากงานวิจัยของ Duong et al.(2021) เลือกใช้โมเดลการไหลแบบปั่นป่วนเนื่องจาก การไหลของอากาศภายในเครื่องอบแห้งโดยปกตินั้นจะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน

3. Radiation Model

ในโมเดลการแผ่รังสี (Radiation Model) ทางผู้วิจัยเลือกใช้โมเดล DO เนื่องจาก นำไปใช้กับปัญหาการแผ่รังสีได้หลากหลาย ตั้งแต่การแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวไปยังพื้นผิว ไปจนถึงการแผ่รังสีภายในตัวกลาง และยังสามารถใช้วิเคราะห์ผนังกึ่งโปร่งใส (semi-transparent) ได้อีกด้วย ซึ่งมีหลายงานวิจัยที่ใช้โมเดลนี้ในการวิเคราะห์ปัญหาการแผ่รังสีความร้อนเกี่ยวกับเครื่องอบแห้งอีกด้วย (Abderrahman et al., 2021, Duong et al., 2021) อีกทั้งผู้วิจัยยังใช้โมเดลโหลดพลังงานแสงอาทิตย์ (solar load model) ร่วมกับการวิเคราะห์ปัญหา โดยเลือกละติจูด 13.7506° และลองจิจูด 100.7943° ซึ่งเป็นสถานที่ในเขตลาดกระบัง พร้อมทั้งเลือกเวลาในการวิเคราะห์ปัญหาตั้งแต่เวลา 8:00-12:00 น. ของวันที่ 1 เดือนกุมภาพันธ์ จากในโปรแกรม และเลือกทิศทางของเครื่องอบแห้งให้ด้านหน้าหันไปทางทิศตะวันออก ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 หน้าต่างการแสดงผลการปรับโมเดล viscous



รูปที่ 3.12 รูปแสดงหน้าต่างการปรับโมเดล DO และโมเดลโหลดพลังงานแสงอาทิตย์ (solar load model)

3.2.6.3 การกำหนดคุณสมบัติวัสดุ (Materials)

ในส่วนของ Materials โปรแกรมนี้แบ่งเป็น Fluid และ Solid โดยทางผู้วิจัยใช้ค่าตามตารางข้างล่าง ดังนี้

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของอากาศ

| Density (Kg/m ³) | Specific Heat (J/Kg.K) | Thermal Conductivity (W/m.K) | Viscosity (Kg/m.s) |
|---------------------------------|---------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| 1.225 | 1006.43 | 0.0242 | 1.7894e-05 |

ตารางที่ 3.2 ตารางคุณสมบัติของโพลีคาร์บอนเนต

| Density (Kg/m ³) | Specific Heat (J/Kg.K) | Thermal Conductivity (W/m.K) |
|------------------------------|------------------------|------------------------------|
| 2700 | 840 | 0.75 |

ตารางที่ 3.3 ตารางคุณสมบัติของอะลูมิเนียม

| Density (Kg/m ³) | Specific Heat (J/Kg.K) | Thermal Conductivity (W/m.K) |
|------------------------------|------------------------|------------------------------|
| 2719 | 871 | 20.4 |

3.2.7 การกำหนดขอบเขตผิวของวัสดุ (Boundary Conditions)

ในส่วนของการกำหนดขอบเขตผิวของวัสดุ (Boundary Conditions) ทางผู้วิจัยกำหนดให้ผิวด้านบน (cover), ด้านหน้า (Front) และด้านหลัง (Back) เป็นโพลีคาร์บอนเนตแบบวัสดุกึ่งโปร่งใส (semi-transparent) และให้ผิวด้านล่าง (base) เป็นอะลูมิเนียม พร้อมทั้งกำหนดรูทางเข้า (inlet) และรูทางออก (outlet) ตามตารางข้างล่าง

ตารางที่ 3.4 ตารางการกำหนดขอบเขตผิววัสดุของเครื่องอบแห้ง

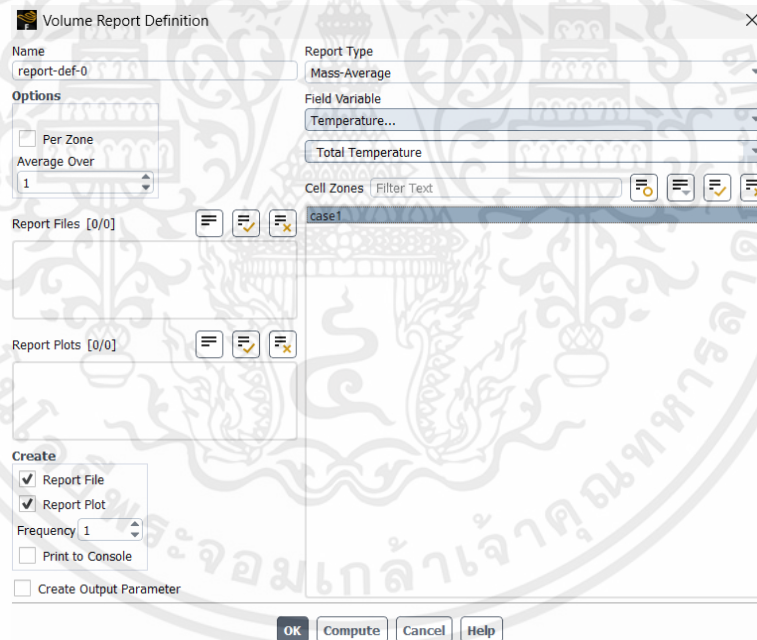
| Name | Type | Thermal Conditions | Material | Radiation |
|-------|------|--------------------|---------------|------------------|
| Back | Wall | Mixed | Polycarbonate | Semi-Transparent |
| Base | Wall | Mixed | Aluminum | Opaque |
| Cover | Wall | Mixed | Polycarbonate | Semi-Transparent |
| Front | wall | Mixed | Polycarbonate | Semi-Transparent |

ตารางที่ 3.5 ตารางการกำหนดรูทางเข้าและทางออก

| Name | Type | Velocity magnitude (m/s) |
|--------|----------------|--------------------------|
| Inlet | Pressure-inlet | - |
| Outlet | Velocity-inlet | -2.5 |

3.2.8 การกำหนดเงื่อนไขในแก้ปัญหาการวิเคราะห์การแผ่รังสีความร้อน (Solution)

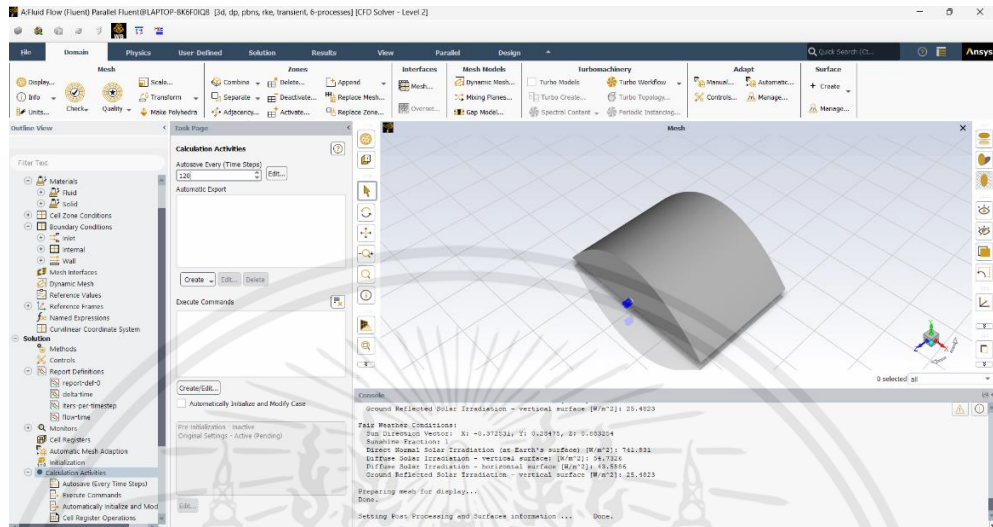
1. การกำหนดการรายงาน (Report Definitions) ทางผู้วิจัยต้องการดูค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของเครื่องอบแห้งในแต่ละชั่วโมงเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับงานที่วิจัยที่ได้ศึกษามา และใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของเครื่องอบแห้งเมื่อจบการวิเคราะห์ในการดูความเป็นอิสระทางกริช ดังนั้นจึงสร้างการรายงานอุณหภูมิเฉลี่ยขึ้นมา โดยเลือกไปที่ Report Definitions > คลิกขวา > New > Volume Report > Mass-Average และปรับค่าในหน้าต่าง Volume Report Definitions ตามดังรูปข้างล่าง



รูปที่ 3.13 หน้าต่างการปรับการรายงานอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเครื่องอบแห้ง

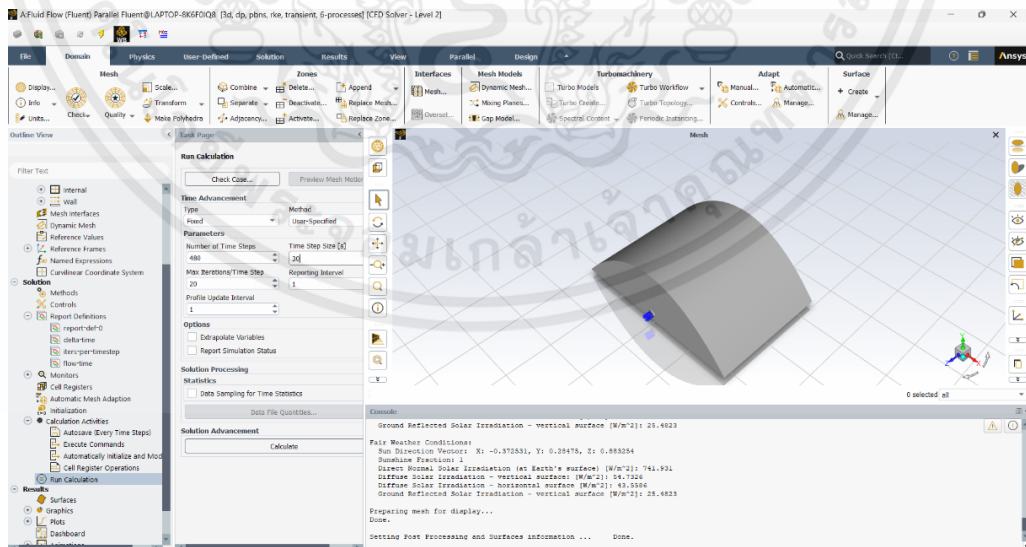
2. Monitoring (Initialization) เลือกใช้ Initialization เป็นแบบ Hybrid
3. Calculation Activities ในส่วนนี้จะเป็นการบันทึกข้อมูลผลที่ได้จากการวิเคราะห์การจำลองการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งการบันทึกข้อมูลบ่อย ๆ นั้น ส่งผลให้ขนาดไฟล์ข้อมูลต้องใช้เนื้อที่ความจุที่

เยอะตามไปด้วย ดังนั้นทางผู้วิจัยได้กำหนดให้มีการบันทึกข้อมูลทุก ๆ 120 Time steps (ทุก ๆ 1 ชั่วโมง) ดังแสดงในรูปด้านล่าง



รูปที่ 3.14 รูปหน้าต่างต่างแสดงการกำหนดระยะเวลาในการบันทึกข้อมูล

4. Run Calculation ในส่วนนี้จะคล้ายกับส่วนก่อนหน้า แต่จะแตกต่างออกไปที่เป็นการกำหนดการวนซ้ำของวิเคราะห์ปัญหา โดยกำหนดให้จำนวนรอบของการวิเคราะห์ปัญหาทั้งหมดเป็น 480 รอบ ทุก ๆ 1 รอบเทียบเท่ากับเวลา 30 วินาทีและทุก ๆ 1 รอบจะมีการวนซ้ำของวิเคราะห์ปัญหาทั้งหมด 20 รอบ ดังนั้นที่ 480 Time steps จะเทียบเท่าเวลาทั้งหมด 4 ชั่วโมง จากนั้นกด Calculate



รูปที่ 3.15 หน้าต่างแสดงการปรับจำนวนรอบในการวิเคราะห์ปัญหา

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปราย

4.1 ความเป็นอิสระทางกริด (Grid Independence)

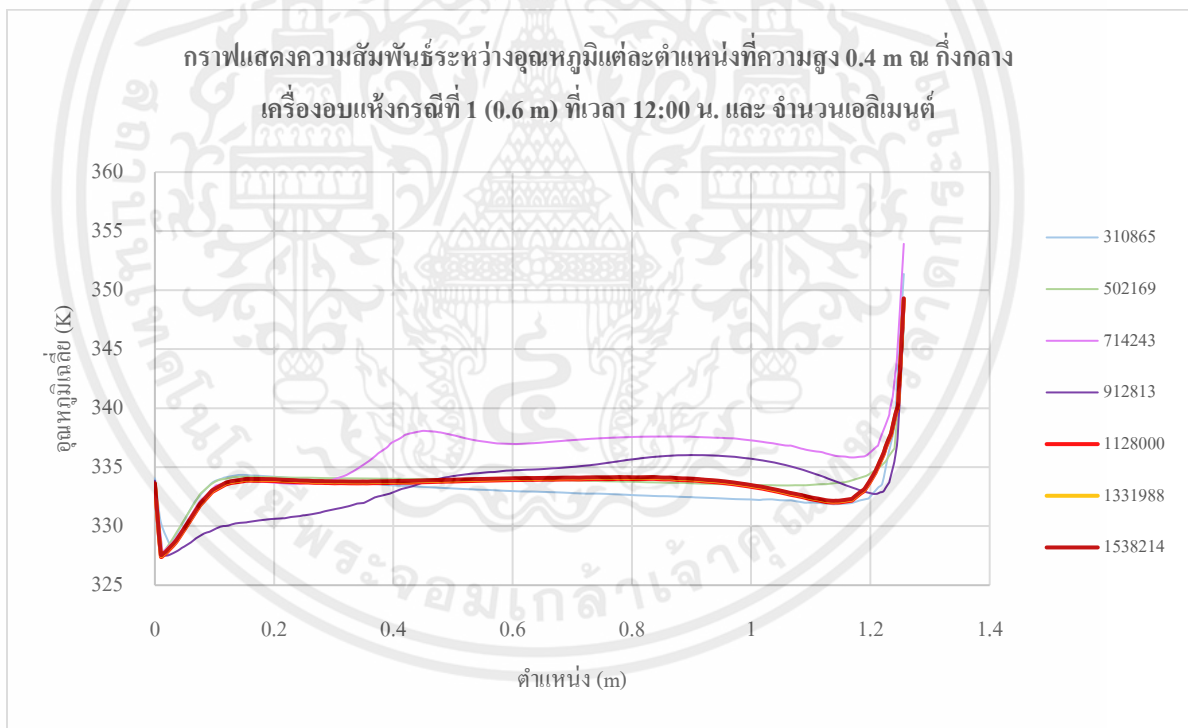
ความเป็นอิสระทางกริด (Grid Independence) คือ การทดสอบเพื่อสร้างความมั่นใจว่าผลลัพธ์ที่ได้จะไม่ขึ้นอยู่กับกริดที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ กริดที่ไม่เหมาะสมอาจนำไปสู่ข้อมูลที่ผิดพลาดหรือใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์ในจำนวนมาก

การทดสอบนี้จะใช้การปรับแต่งกริดให้ละเอียดขึ้นอย่างต่อเนื่องและอัตโนมัติ โดยพิจารณาจากค่าตัวแปรต่าง ๆ ภายในพื้นที่ของการจำลอง เมื่อค่าของตัวแปรนั้นเพิ่มขึ้นหรือลดลงเพียงเล็กน้อยอย่างเป็นนัยยะ หรือมีค่าสูงเข้าค่าใดค่าหนึ่ง ซึ่งจะทำให้ได้กริดที่มีความเหมาะสมสำหรับการจำลอง โดยได้รับผลลัพธ์ที่ถูกต้องและไม่สิ้นเปลืองทรัพยากรคอมพิวเตอร์ในจำนวนมาก (Lee, M., G. Park, C. Park and C. Kim, 2020)

จากการปรับจำนวนเอลิเมนต์ (Number of Element) ให้มากขึ้นตั้งแต่เอลิเมนต์ประมาณ 300,000 และเพิ่มขึ้นทีละประมาณ 200,000 จนกว่าค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเครื่องอบแห้งและอุณหภูมิตามแนวยาวที่ความสูง 0.4 เมตร ณ กึ่งกลางเครื่องอบแห้ง (แกน YZ) ที่เวลา 12:00 น. จะสูงเข้าค่าใดค่าหนึ่งอย่างมีนัยสำคัญ เพื่อทำการวิเคราะห์จำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการวิเคราะห์การจำลองการแผ่รังสีความร้อน โดยค่าที่บันทึกได้แก่ ขนาดเอลิเมนต์ (Element Size), จำนวนโหนด (Number of Node), จำนวนเอลิเมนต์ (Number of Element) และอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเครื่องอบแห้ง ที่เวลา 12:00 น. จากนั้นสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเอลิเมนต์และอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเครื่องอบแห้ง ที่เวลา 12:00 น. และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตามแนวยาวที่ความสูง 0.4 เมตร ณ กึ่งกลางเครื่องอบแห้ง (แกน YZ) ที่เวลา 12:00 น. โดยบันทึกผลลัพธ์ดังตารางที่ 4.1

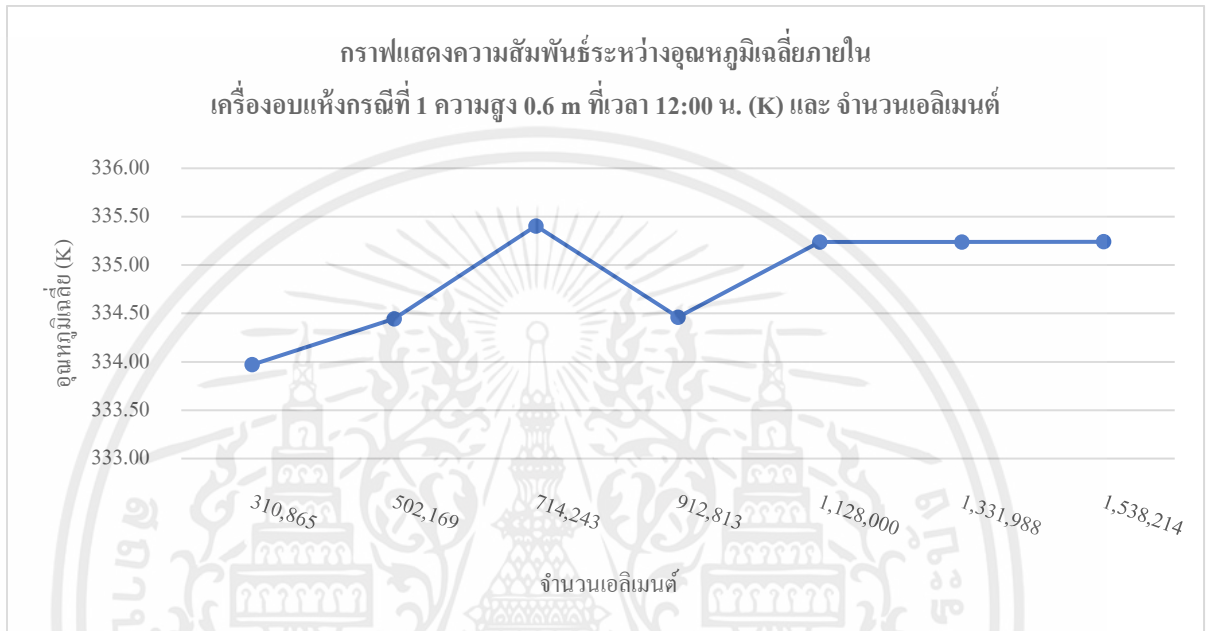
ตารางที่ 4.1 ผลลัพธ์ที่จำนวนเอลิเมนต์ต่าง ๆ ของแบบจำลองเครื่องอบแห้งกรณีที่ 1 ความสูง 0.6 เมตร เวลา 12:00 น.

| Element size (mm) | Number of Nodes | Elements | Average Temperature (K) |
|-------------------|-----------------|-----------|-------------------------|
| 22 | 59,473 | 310,865 | 333.971 |
| 18 | 94,997 | 502,169 | 334.444 |
| 15.6 | 134,294 | 714,243 | 335.405 |
| 13.9 | 171,200 | 912,813 | 334.461 |
| 12.8 | 210,669 | 1,128,000 | 335.238 |
| 12 | 247,408 | 1,331,988 | 335.239 |
| 11.9 | 281,046 | 1,538,214 | 335.240 |



กราฟที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตามแต่ละตำแหน่งที่ความสูง 0.4 m ณ กึ่งกลางเครื่องอบแห้งกรณีที่ 1 (0.6 m) ที่เวลา 12:00 น. และ จำนวนเอลิเมนต์

จากกราฟที่ 4.1 พบว่าจำนวนเอลิเมนต์ตั้งแต่ 1,128,000 ขึ้นไป หรือขนาดเอลิเมนต์ตั้งแต่ 12.8 มิลลิเมตรขึ้นไป พบว่าเส้นกราฟมีลักษณะทับซ้อนกัน ซึ่งหมายความว่าอุณหภูมิตามแนวยาวที่ความสูง 0.4 เมตร ณ กึ่งกลางเครื่องอบแห้งกรณีที่ 1 (0.6 เมตร) มีค่าที่ใกล้เคียงกันมากหรือลู่เข้าค่าใดค่าหนึ่งอย่างมีนัยสำคัญ



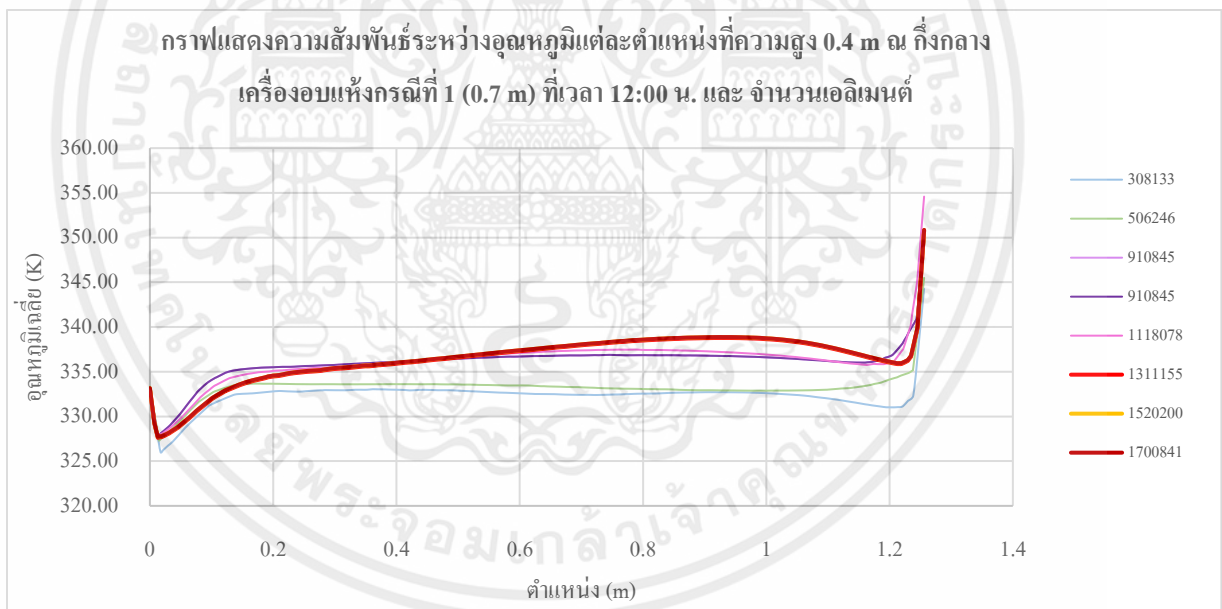
กราฟที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเครื่องอบแห้งกรณีที่1 ความสูง 0.6 m ที่เวลา 12:00 น. (K) และ จำนวนเอลิเมนต์

จากกราฟที่ 4.2 พบว่าจำนวนเอลิเมนต์ตั้งแต่ 1,128,000 ขึ้นไป หรือขนาดเอลิเมนต์ตั้งแต่ 12.8 มิลลิเมตรขึ้นไป ทำให้ค่าของอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเครื่องอบแห้งลู่เข้า 335.238-335.240 K ซึ่งหมายความว่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเครื่องอบแห้งกรณีที่ 1 ที่ความสูง 0.6 เมตร มีค่าที่ใกล้เคียงกันมากหรือลู่เข้าค่าใดค่าหนึ่งอย่างมีนัยสำคัญจนกราฟมีลักษณะคล้ายเส้นตรงหรือมีแนวโน้มที่จะคงที่

ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงเลือกใช้ขนาดเอลิเมนต์ 12.8 มิลลิเมตร ในการนำมาวิเคราะห์การจำลองการแผ่รังสีความร้อนสำหรับเครื่องอบแห้งกรณีที่ 1 ที่ความสูง 0.6 เมตร

ตารางที่ 4.2 ผลลัพธ์ที่จำนวนเอลิเมนต์ต่าง ๆ ของแบบจำลองเครื่องอบแห้งกรณีที่ 1 ความสูง 0.7 เมตร เวลา 12:00 น.

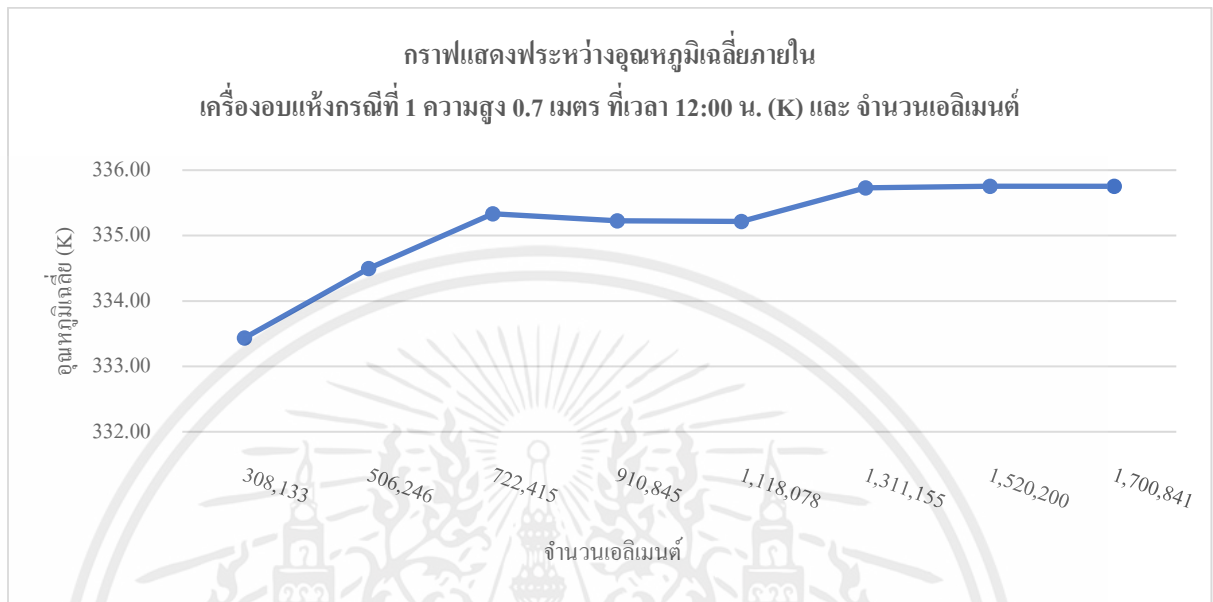
| Element size (mm) | Number of Nodes | Elements | Average Temperature (K) |
|-------------------|-----------------|-----------|-------------------------|
| 22.5 | 59,097 | 308,133 | 333.434 |
| 18.4 | 95,928 | 506,246 | 334.497 |
| 16 | 135,572 | 722,415 | 335.335 |
| 14.6 | 170,203 | 910,845 | 335.226 |
| 13.5 | 207,724 | 1,118,078 | 335.217 |
| 12.7 | 242,850 | 1,311,155 | 335.730 |
| 12 | 280,506 | 1,520,200 | 335.752 |
| 11.5 | 313,270 | 1,700,841 | 335.753 |



กราฟที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งที่ความสูง 0.4 m ณ กึ่งกลางเครื่องอบแห้งกรณีที่ 1 (0.7 m) ที่เวลา 12:00 น. และ จำนวนเอลิเมนต์

จากกราฟที่ 4.3 พบว่าจำนวนเอลิเมนต์ตั้งแต่ 1,311,155 ขึ้นไป หรือขนาดเอลิเมนต์ตั้งแต่ 12.8 มิลลิเมตรขึ้นไป พบว่าเส้นกราฟมีลักษณะทับซ้อนกัน ซึ่งหมายความว่าอุณหภูมิตามแนวยาวที่ความสูง

0.4 เมตร ณ กึ่งกลางเครื่องอบแห้งกรณีที่ 1 (0.7 เมตร) มีค่าที่ใกล้เคียงกันมากหรือลู่เข้าค่าใดค่าหนึ่งอย่างมีนัยสำคัญ จนกราฟมีลักษณะดังกล่าว



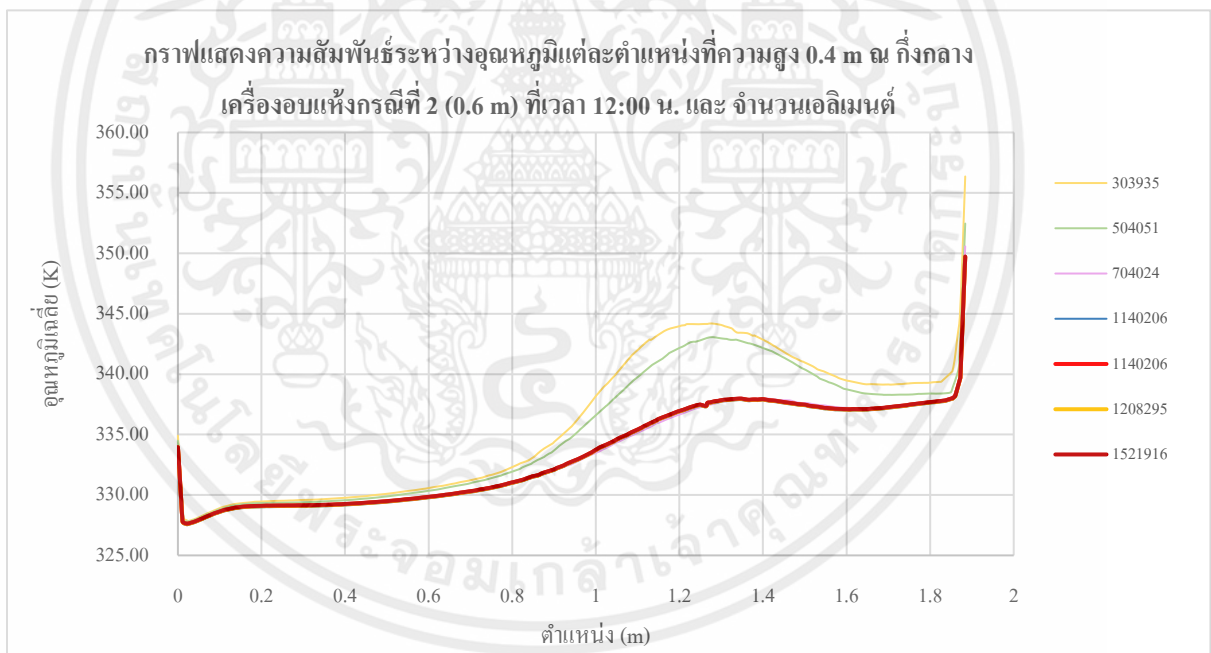
กราฟที่ 4.4 กราฟแสดงพหุระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเครื่องอบแห้งกรณีที่ 1 ความสูง 0.7 m ที่เวลา 12:00 น. (K) และ จำนวนเอลิเมนต์

จากกราฟที่ 4.4 พบว่าจำนวนเอลิเมนต์ตั้งแต่ 1,311,155 ขึ้นไป หรือขนาดเอลิเมนต์ตั้งแต่ 12.7 มิลลิเมตรขึ้นไป ทำให้ค่าของอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเครื่องอบแห้งลู่เข้า 335.730-335.753 K ซึ่งหมายความว่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเครื่องอบแห้งกรณีที่ 1 ที่ความสูง 0.7 เมตร มีค่าที่ใกล้เคียงกันมากหรือลู่เข้าค่าใดค่าหนึ่งอย่างมีนัยสำคัญจนกราฟมีลักษณะคล้ายเส้นตรงหรือมีแนวโน้มที่จะคงที่

ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงเลือกใช้ขนาดเอลิเมนต์ 12.7 มิลลิเมตร ในการนำมาวิเคราะห์การจำลองการแผ่รังสีความร้อนสำหรับเครื่องอบแห้งกรณีที่ 1 ที่ความสูง 0.7 เมตร

ตารางที่ 4.3 ผลลัพธ์ที่จำนวนเอลิเมนต์ต่าง ๆ ของแบบจำลองเครื่องอบแห้งกรณีที่ 2 ความสูง 0.6 เมตร เวลา 12:00 น.

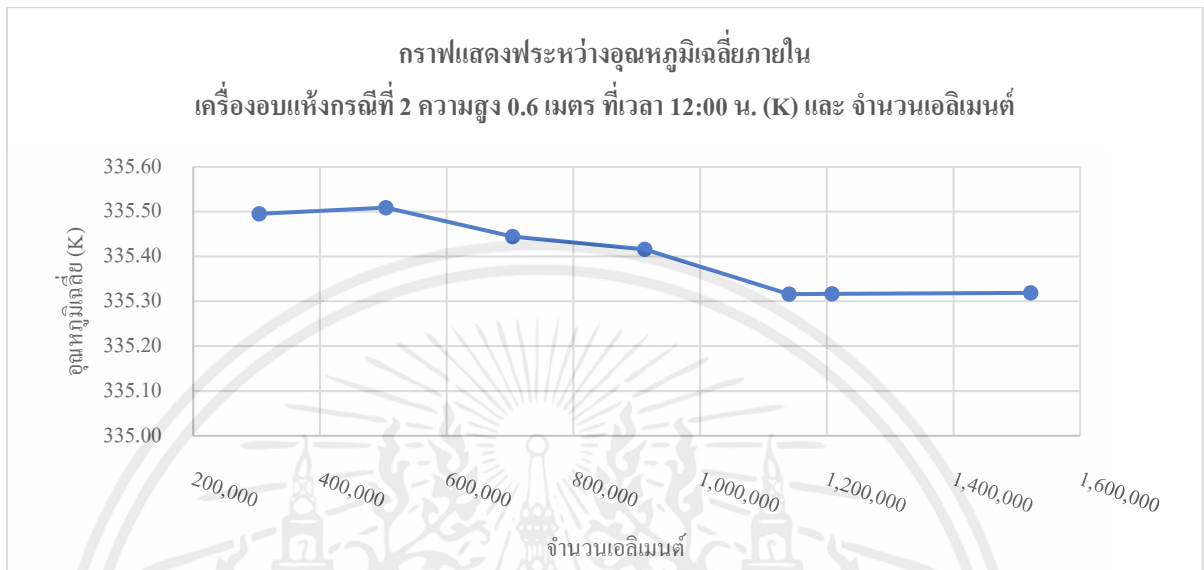
| Element size (mm) | Number of Nodes | Elements | Average Temperature (K) |
|-------------------|-----------------|-----------|-------------------------|
| 22.5 | 57,740 | 303,935 | 335.495 |
| 18.2 | 94,784 | 504,051 | 335.509 |
| 15.9 | 131,348 | 704,024 | 335.445 |
| 14.3 | 169,509 | 912,735 | 335.416 |
| 13.1 | 210,440 | 1,140,206 | 335.316 |
| 12.8 | 222,670 | 1,208,295 | 335.317 |
| 11.7 | 279,092 | 1,521,916 | 335.319 |



กราฟที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งที่ความสูง 0.4 m ณ กึ่งกลางเครื่องอบแห้งกรณีที่ 2 (0.6 m) ที่เวลา 12:00 น. และ จำนวนเอลิเมนต์

จากกราฟที่ 4.5 พบว่าจำนวนเอลิเมนต์ตั้งแต่ 1,140,206 ขึ้นไป หรือขนาดเอลิเมนต์ตั้งแต่ 13.1 มิลลิเมตร ขึ้นไป พบว่าเส้นกราฟมีลักษณะทับซ้อนกัน ซึ่งหมายความว่าอุณหภูมิตามแนวยาวที่ความสูง

0.4 เมตร ณ กึ่งกลางเครื่องอบแห้งกรณีที่ 2 (0.6 เมตร) มีค่าที่ใกล้เคียงกันมากหรือลู่เข้าค่าใดค่าหนึ่งอย่างมีนัยสำคัญ จนกราฟมีลักษณะดังกล่าว



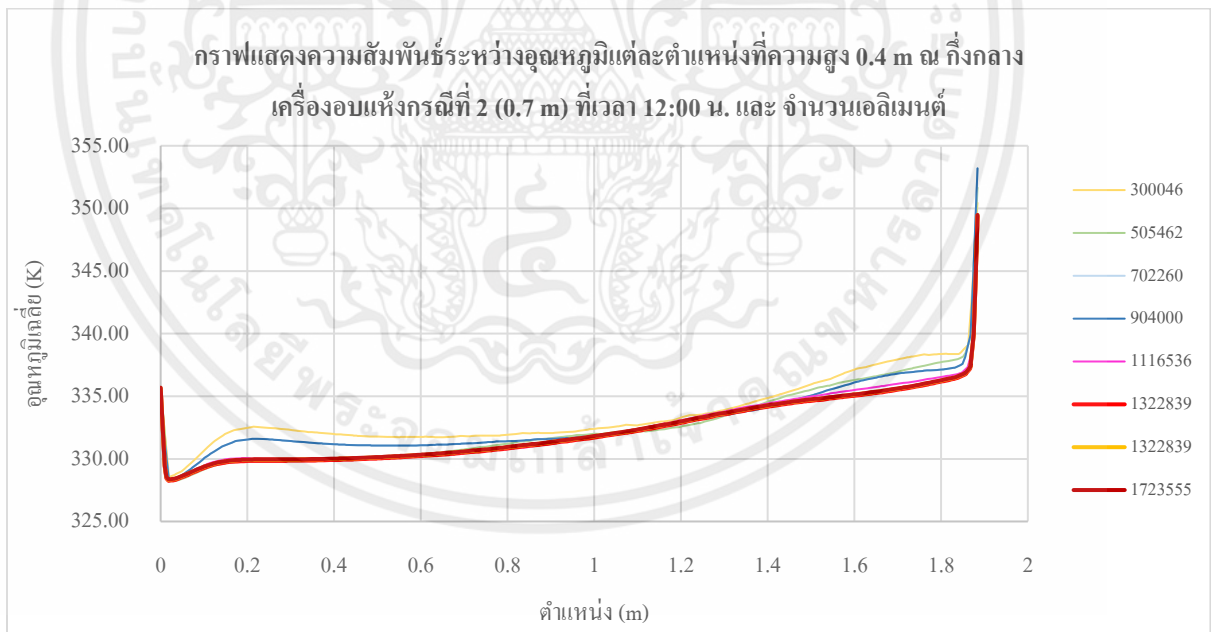
กราฟที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเครื่องอบแห้งกรณีที่ 2 ความสูง 0.6 m ที่เวลา 12:00 น. (K) และ จำนวนเอลิเมนต์

จากกราฟที่ 4.6 พบว่าจำนวนเอลิเมนต์ตั้งแต่ 1,140,206 ขึ้นไป หรือขนาดเอลิเมนต์ตั้งแต่ 13.1 มิลลิเมตร ขึ้นไป ทำให้ค่าของอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเครื่องอบแห้งลู่เข้า 335.316-335.319 K ซึ่งหมายความว่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเครื่องอบแห้งกรณีที่ 2 ที่ความสูง 0.6 เมตร มีค่าที่ใกล้เคียงกันมากหรือลู่เข้าค่าใดค่าหนึ่งอย่างมีนัยสำคัญจนกราฟมีลักษณะคล้ายเส้นตรงหรือมีแนวโน้มที่จะคงที่

ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงเลือกใช้ขนาดเอลิเมนต์ 13.1 มิลลิเมตร ในการนำมาวิเคราะห์การจำลองการแผ่รังสีความร้อนสำหรับเครื่องอบแห้งกรณีที่ 2 ที่ความสูง 0.6 เมตร

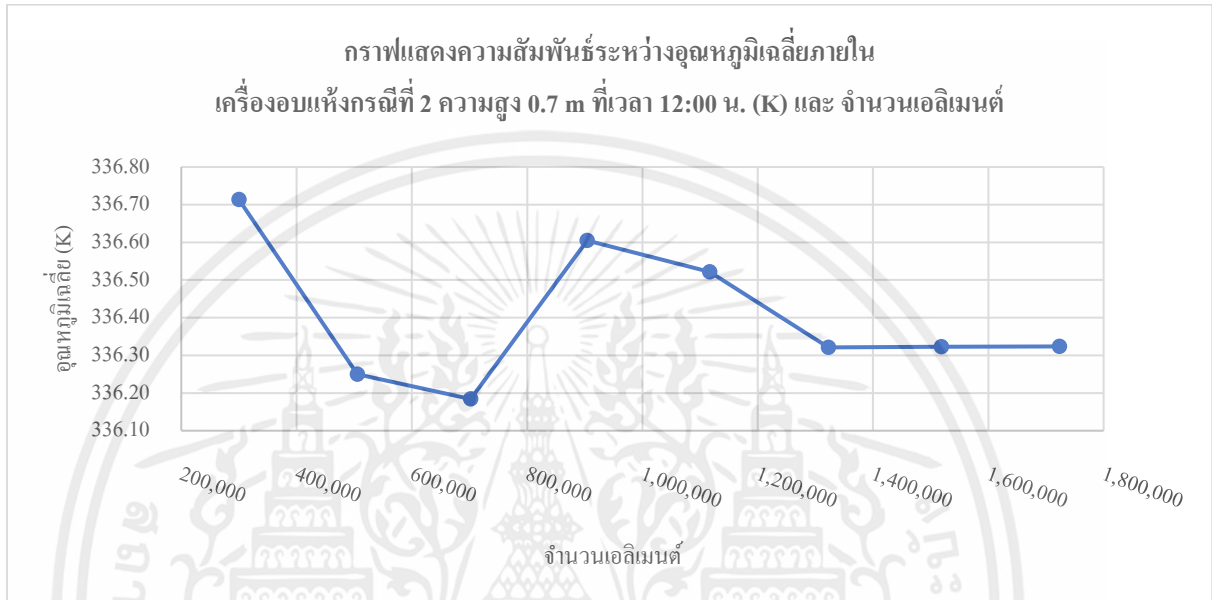
ตารางที่ 4.4 ผลลัพธ์ที่จำนวนเอลิเมนต์ต่าง ๆ ของแบบจำลองเครื่องอบแห้งกรณีที่ 2 ความสูง 0.7 เมตร เวลา 12:00 น.

| Element size (mm) | Number of Nodes | Elements | Average Temperature (K) |
|-------------------|-----------------|-----------|-------------------------|
| 23.8 | 56,814 | 300,046 | 336.713 |
| 19.2 | 94,573 | 505,462 | 336.250 |
| 16.8 | 130,337 | 702,260 | 336.184 |
| 15.1 | 167,073 | 904,000 | 336.605 |
| 13.9 | 205,535 | 1,116,536 | 336.521 |
| 13 | 242,391 | 1,322,839 | 336.321 |
| 12.3 | 277,572 | 1,518,519 | 336.323 |
| 11.7 | 314,275 | 1,723,555 | 336.324 |



กราฟที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งที่ความสูง 0.4 m ณ กึ่งกลางเครื่องอบแห้งกรณีที่ 2 (0.7 m) ที่เวลา 12:00 น. และ จำนวนเอลิเมนต์

จากกราฟที่ 4.7 พบว่าจำนวนเอลิเมนต์ตั้งแต่ 1,322,839 ขึ้นไป หรือขนาดเอลิเมนต์ตั้งแต่ 13 มิลลิเมตร ขึ้นไป พบว่าเส้นกราฟมีลักษณะทับซ้อนกัน ซึ่งหมายความว่าอุณหภูมิตามแนวยาวที่ความสูง 0.4 เมตร ณ กึ่งกลางเครื่องอบแห้งกรณีที่ 2 (0.7 เมตร) มีค่าที่ใกล้เคียงกันมากหรือลู่เข้าค่าใดค่าหนึ่ง อย่างมีนัยสำคัญ จนกราฟมีลักษณะดังกล่าว



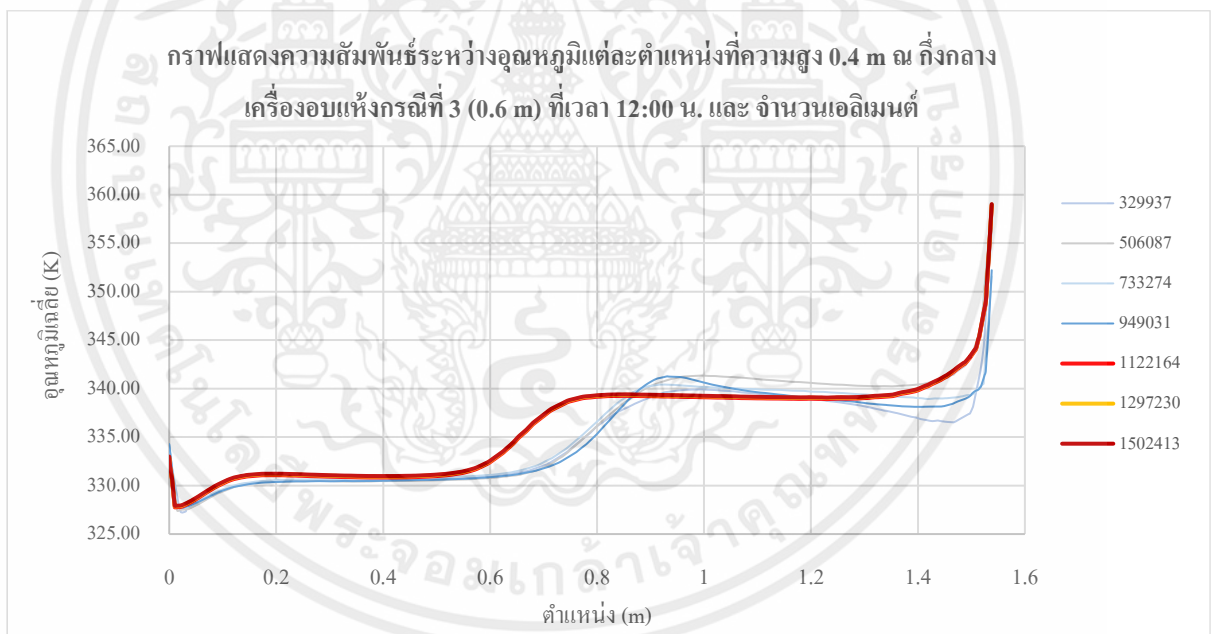
กราฟที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเครื่องอบแห้งกรณีที่ 2 ความสูง 0.7 m ที่เวลา 12:00 น. (K) และ จำนวนเอลิเมนต์

จากกราฟที่ 4.8 พบว่าจำนวนเอลิเมนต์ตั้งแต่ 1,322,839 ขึ้นไป หรือขนาดเอลิเมนต์ตั้งแต่ 13 มิลลิเมตร ขึ้นไป ทำให้ค่าของอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเครื่องอบแห้งลู่เข้า 336.321-336.324 K ซึ่งหมายความว่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเครื่องอบแห้งกรณีที่ 2 ที่ความสูง 0.7 เมตร มีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก หรือลู่เข้าค่าใดค่าหนึ่งอย่างมีนัยสำคัญจนกราฟมีลักษณะคล้ายเส้นตรงหรือมีแนวโน้มที่จะคงที่

ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงเลือกใช้ขนาดเอลิเมนต์ 13.1 มิลลิเมตร ในการนำมาวิเคราะห์การจำลองการแผ่รังสีความร้อนสำหรับเครื่องอบแห้งกรณีที่ 2 ที่ความสูง 0.7 เมตร

ตารางที่ 4.5 ผลลัพธ์ที่จำนวนเอลิเมนต์ต่าง ๆ ของแบบจำลองเครื่องอบแห้งกรณีที่ 3 ความสูง 0.6 เมตร เวลา 12:00 น.

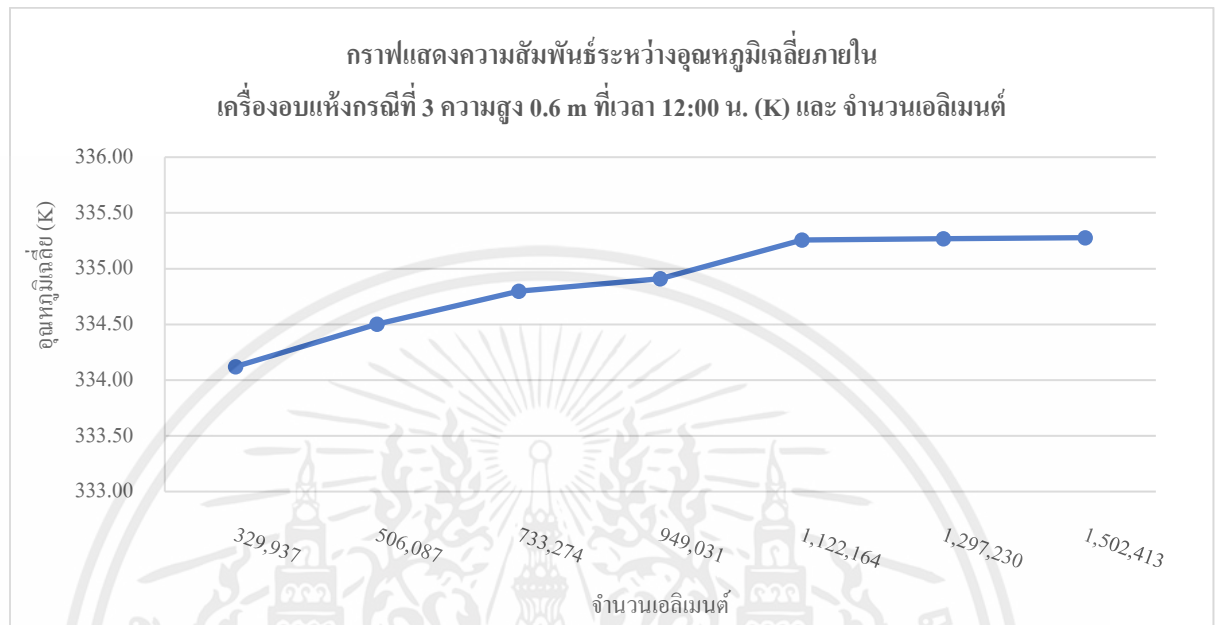
| Element size (mm) | Number of Nodes | Elements | Average Temperature (K) |
|-------------------|-----------------|-----------|-------------------------|
| 21.5 | 63,022 | 329,937 | 334.121 |
| 18 | 95,511 | 506,087 | 334.502 |
| 15.5 | 137,393 | 733,274 | 335.798 |
| 14 | 176,596 | 949,031 | 334.910 |
| 13.3 | 206,587 | 1,122,164 | 335.280 |
| 11.9 | 241,871 | 1,297,230 | 335.268 |
| 11.25 | 279,473 | 1,502,413 | 335.278 |



กราฟที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งที่ความสูง 0.6 m ณ กึ่งกลางเครื่องอบแห้งกรณีที่ 3 (0.6 m) ที่เวลา 12:00 น. และ จำนวนเอลิเมนต์

จากกราฟที่ 4.9 พบว่าจำนวนเอลิเมนต์ตั้งแต่ 1,122,164 ขึ้นไป หรือขนาดเอลิเมนต์ตั้งแต่ 13.3 มิลลิเมตร ขึ้นไป พบว่าเส้นกราฟมีลักษณะทับซ้อนกัน ซึ่งหมายความว่าอุณหภูมิตามแนวยาวที่ความสูง

0.4 เมตร ณ กึ่งกลางเครื่องอบแห้งกรณีที่ 3 (0.6 เมตร) มีค่าที่ใกล้เคียงกันมากหรือลู่เข้าค่าใดค่าหนึ่งอย่างมีนัยสำคัญ จนกราฟมีลักษณะดังกล่าว



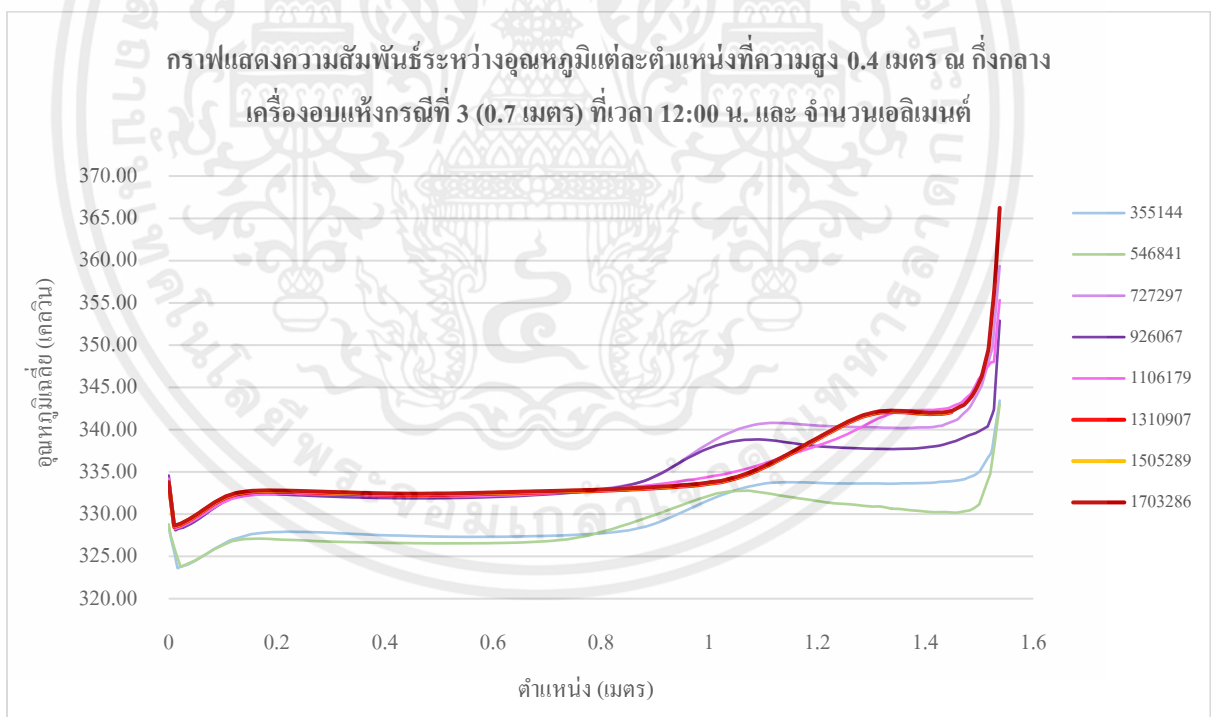
กราฟที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเครื่องอบแห้งกรณีที่ 3 ความสูง 0.6 m ที่เวลา 12:00 น. (K) และ จำนวนเอลิเมนต์

จากกราฟ 4.10 พบว่าจำนวนเอลิเมนต์ตั้งแต่ 1,122,164 ขึ้นไป หรือขนาดเอลิเมนต์ตั้งแต่ 13.3 มิลลิเมตร ขึ้นไป ทำให้ค่าของอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเครื่องอบแห้งลู่เข้า 335.280-335.278 K ซึ่งหมายความว่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเครื่องอบแห้งกรณีที่ 3 ที่ความสูง 0.6 เมตร มีค่าที่ใกล้เคียงกันมากหรือลู่เข้าค่าใดค่าหนึ่งอย่างมีนัยสำคัญจนกราฟมีลักษณะคล้ายเส้นตรงหรือมีแนวโน้มที่จะคงที่

ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงเลือกใช้ขนาดเอลิเมนต์ 13.3 มิลลิเมตร ในการนำมาวิเคราะห์การจำลองการแผ่รังสีความร้อนสำหรับเครื่องอบแห้งกรณีที่ 3 ที่ความสูง 0.6 เมตร

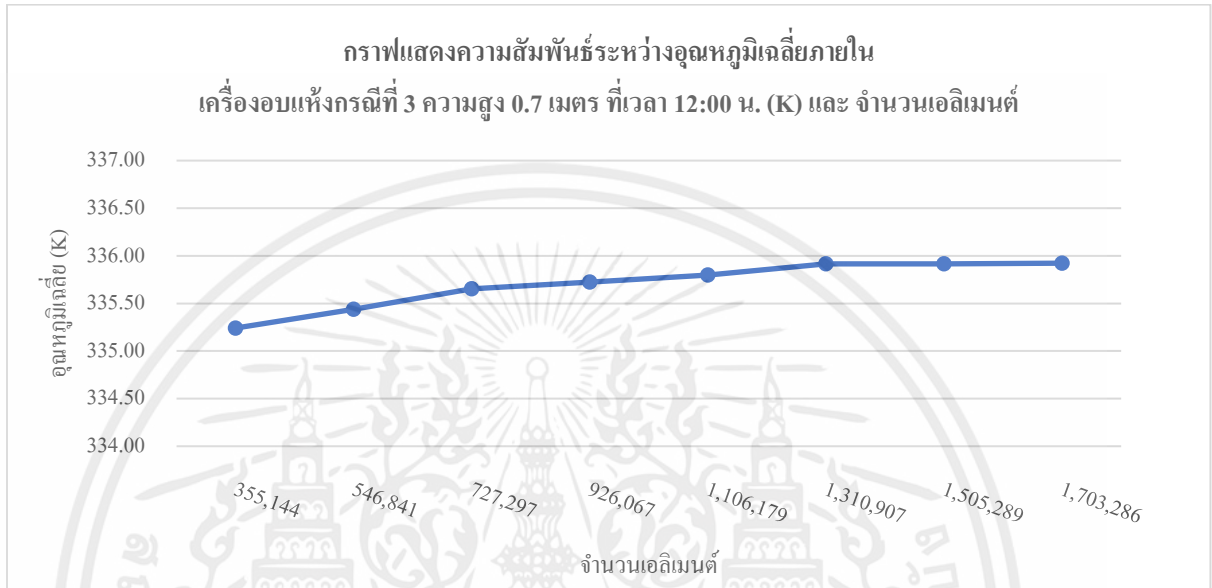
ตารางที่ 4.6 ผลลัพธ์ที่จำนวนเอลิเมนต์ต่างๆ ของแบบจำลองเครื่องอบแห้งกรณีที่ 3 ความสูง 0.7 เมตร เวลา 12:00 น.

| Element size (mm) | Number of Nodes | Elements | Average Temperature (K) |
|-------------------|-----------------|-----------|-------------------------|
| 21.5 | 67,670 | 355,144 | 335.241 |
| 18 | 103,102 | 546,841 | 335.440 |
| 16 | 136,360 | 727,297 | 335.654 |
| 14.5 | 172,875 | 926,067 | 335.724 |
| 13.5 | 205,822 | 1,106,179 | 335.800 |
| 12.4 | 243,534 | 1,310,907 | 335.915 |
| 11.75 | 279,273 | 1,505,289 | 335.915 |
| 11.2 | 315,004 | 1,703,286 | 335.922 |



กราฟที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งที่ความสูง 0.4 m ณ กึ่งกลางเครื่องอบแห้งกรณีที่ 3 (0.7 m) ที่เวลา 12:00 น. และ จำนวนเอลิเมนต์

จากกราฟที่ 4.11 พบว่าจำนวนเอลิเมนต์ตั้งแต่ 1,310,907 ขึ้นไป หรือขนาดเอลิเมนต์ตั้งแต่ 12.4 มิลลิเมตร ขึ้นไป พบว่าเส้นกราฟมีลักษณะทับซ้อนกัน ซึ่งหมายความว่าอุณหภูมิตามแนวยาวที่ความสูง 0.4 เมตร ณ กึ่งกลางเครื่องอบแห้งกรณีที่ 3 (0.7 เมตร) มีค่าที่ใกล้เคียงกันมากหรือลู่เข้าค่าใดค่าหนึ่ง อย่างมีนัยสำคัญ จนกราฟมีลักษณะดังกล่าว



กราฟที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเครื่องอบแห้งกรณีที่ 3 ความสูง 0.7 m ที่เวลา 12:00 น. (K) และ จำนวนเอลิเมนต์

จากกราฟที่ 4.12 พบว่าจำนวนเอลิเมนต์ตั้งแต่ 1,310,907 ขึ้นไป หรือขนาดเอลิเมนต์ตั้งแต่ 12.4 มิลลิเมตร ขึ้นไป ทำให้ค่าของอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเครื่องอบแห้งลู่เข้า 335.915-335.922 K ซึ่งหมายความว่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเครื่องอบแห้งกรณีที่ 3 ที่ความสูง 0.7 เมตร มีค่าที่ใกล้เคียงกันมากหรือลู่เข้าค่าใดค่าหนึ่งอย่างมีนัยสำคัญจนกราฟมีลักษณะคล้ายเส้นตรงหรือมีแนวโน้มที่จะคงที่

ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงเลือกใช้ขนาดเอลิเมนต์ 12.4 มิลลิเมตร ในการนำมาวิเคราะห์การจำลองการแผ่รังสีความร้อนสำหรับเครื่องอบแห้งกรณีที่ 3 ที่ความสูง 0.7 เมตร

หลังจากการทดลองทำความเข้าใจความเป็นอิสระทางกริด (Grid independence) กับแบบจำลองเครื่องอบแห้งทั้ง 3 กรณีที่ความสูง 0.6 และ 0.7 เมตร ซึ่งทางผู้วิจัยจะนำข้อมูลไปใช้ในการประมาณค่าจำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลองที่ความสูง 0.85, 1.05, 1.30 และ 1.60 เมตร แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของปริมาตรและเอลิเมนต์

| | Height (m) | Volume(m ³) | Elements | Volume increase (%) | Element increase (%) |
|-----------|------------|-------------------------|--------------|---------------------|----------------------|
| กรณีที่ 1 | 0.60 | 0.947 | 1,128,000.00 | - | - |
| | 0.70 | 1.104 | 1,311,155.00 | 16.67% | 16.24% |
| กรณีที่ 2 | 0.60 | 0.947 | 1,140,206.00 | - | - |
| | 0.70 | 1.104 | 1,322,839.00 | 16.67% | 16.02% |
| กรณีที่ 3 | 0.60 | 0.946 | 1,122,164.00 | - | - |
| | 0.70 | 1.104 | 1,310,907.00 | 16.67% | 16.82% |

จากตารางที่ 4.7 พบว่าเมื่อปรับความสูงแบบจำลองเครื่องอบแห้งจาก 0.6 เมตรเป็น 0.7 เมตร เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของปริมาตรแบบจำลองเครื่องอบแห้ง และเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของจำนวนเอลิเมนต์มีค่าที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงใช้เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของปริมาตรแบบจำลองเครื่องอบแห้ง มาประมาณค่าจำนวนเอลิเมนต์ที่ต้องใช้สำหรับแบบจำลองเครื่องอบแห้งที่ความสูง 0.85, 1.05, 1.30 และ 1.60 เมตร ตามตารางด้านล่าง

ตารางที่ 4.8 เอลิเมนต์จากการประมาณค่า

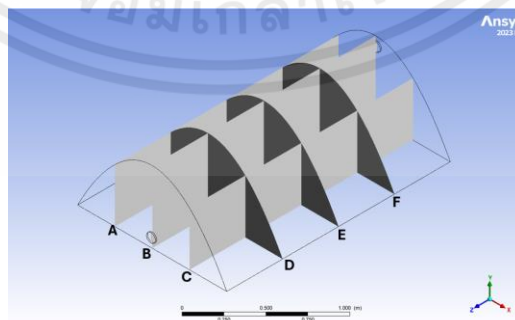
| | Height (m) | Volume (m ³) | Volume increase (%) | Estimated Elements | Actual Elements |
|-----------|------------|--------------------------|---------------------|--------------------|-----------------|
| กรณีที่ 1 | 0.60 | 0.947 | - | - | 1,128,000 |
| | 0.70 | 1.104 | 16.67% | - | 1,311,155 |
| | 0.85 | 1.341 | 21.43% | 1,592,097.72 | 1,606,620 |
| | 1.05 | 1.657 | 23.53% | 1,966,709.54 | 1,979,741 |
| | 1.30 | 2.051 | 23.81% | 2,434,958.66 | 2,459,821 |
| | 1.60 | 2.524 | 23.08% | 2,996,997.84 | 3,023,560 |

ตารางที่ 4.8 (ต่อ)

| | Height (m) | Volume (m ³) | Volume increase (%) | Estimated Elements | Actual Elements |
|--------------|------------|--------------------------|---------------------|--------------------|-----------------|
| กรณีที่ 2 | 0.60 | 0.947 | - | - | 1,140,206 |
| | 0.70 | 1.104 | 16.67% | - | 1,322,839 |
| | 0.85 | 1.341 | 21.43% | 1,606,275.97 | 1,595,684 |
| | 1.05 | 1.657 | 23.53% | 1,984,204.98 | 1,979,466 |
| | 1.30 | 2.051 | 23.81% | 2,456,565.44 | 2,470,701 |
| | 1.60 | 2.524 | 23.08% | 3,023,445.81 | 3,076,840 |
| กรณีที่ 3 | 0.60 | 0.946 | - | - | 1,122,164 |
| | 0.70 | 1.104 | 16.67% | - | 1,310,907 |
| | 0.85 | 1.341 | 21.43% | 1,591,813.29 | 1,595,905 |
| | 1.05 | 1.656 | 23.53% | 1,966,325.56 | 1,962,228 |
| | 1.30 | 2.050 | 23.82% | 2,434,614.95 | 2,414,717 |
| | 1.60 | 2.523 | 23.07% | 2,996,227.90 | 3,031,358 |

4.2 การวิเคราะห์แผนภาพ Contour ภายในแบบจำลองที่เวลา 12.00 น.

กำหนด Plane เพื่อใช้ในการอ้างอิงผลการทดลองโดยทำการกำหนด YZ Plane ขึ้นมา 3 Plane ที่ระยะห่างเท่ากันในตำแหน่ง A, B และ C และกำหนด XY Plane ขึ้นมา 3 Plane ในลักษณะเดียวกัน คือ D, E และ F ดังรูปที่ 4.1



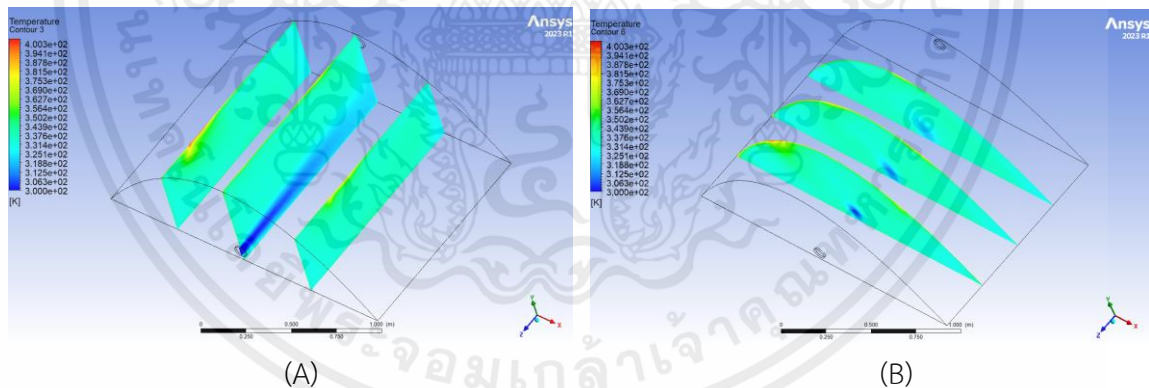
รูปที่ 4.1 แสดงการแบ่ง Plane A, B, C, D, E และ F

4.2.1 แผนภาพ Temperature contour

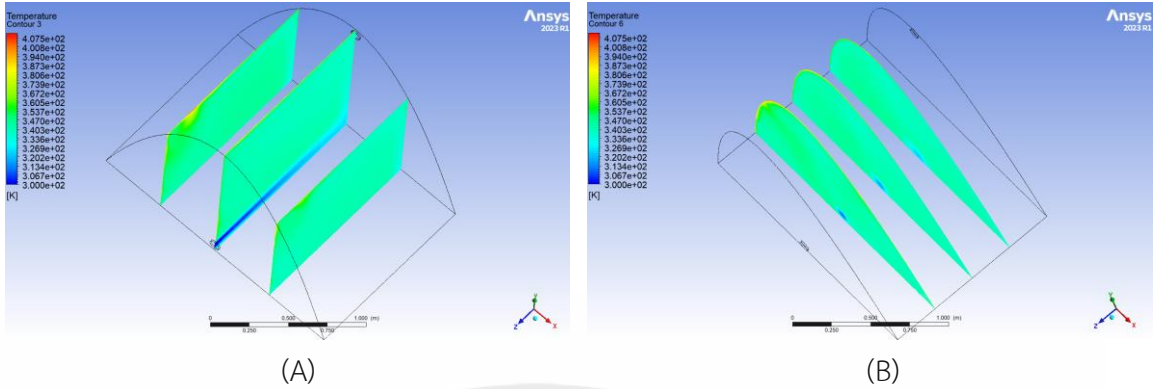
แผนภาพที่แสดงกระจายตัวของอุณหภูมิภายในแบบจำลอง จากงานวิจัย[8] กล่าวว่า การที่อุณหภูมิภายในแบบจำลองมีความสม่ำเสมอจะส่งผลต่อความสามารถในการอบแห้ง ซึ่งความสม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในแบบจำลองมีผลเกี่ยวเนื่องกับการกระจายตัวของความเร็วอากาศภายในแบบจำลอง

4.2.1.1 กรณีที่ 1 พื้นี่ฐาน 1.884×1.256 เมตร

พิจารณาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจากตารางที่ 4.10 ที่เวลาเที่ยง จะพบว่าเมื่อความสูงเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยและอุณหภูมิสูงสุดที่บริเวณผิว Cover ของแบบจำลองมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อสังเกตภายในแผนภาพ Contour อุณหภูมิต่ำสุดของแบบจำลองจะมีสีน้ำเงินซึ่งก็คือบริเวณที่ทางเข้าไปจนถึงที่ทางออกของแบบจำลองซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่บริเวณทางเข้า 300 K มีความเร็วของอากาศที่สูง นอกจากนี้ที่ผนังที่ด้านท้ายและผิว cover บริเวณท้ายของแบบจำลองที่มีสีฟ้าจะพบว่ามีอุณหภูมิต่ำเนื่องจากความเร็วของอากาศที่สูง พื้นที่มีลักษณะสีเขียวคือพื้นที่ภายในแบบจำลองที่มีอุณหภูมิสูงมีผลเกี่ยวเนื่องกับความเร็วของอากาศที่มีค่าต่ำทำให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดี และการกระจายตัวของอุณหภูมิจะมีลักษณะคล้ายคลึงกันในกรณีที่มีความสูง 0.6, 0.7, 0.85, 1.05 และ 1.3 เมตร จะมีลักษณะเป็นไปดังรูปที่ 4.2 แต่ที่ความสูง 1.6 เมตรจะมีพื้นที่สีเขียวมากซึ่งแตกต่างกับกรณีความสูงอื่นๆอย่างชัดเจนเป็นไปดังรูปที่ 4.3



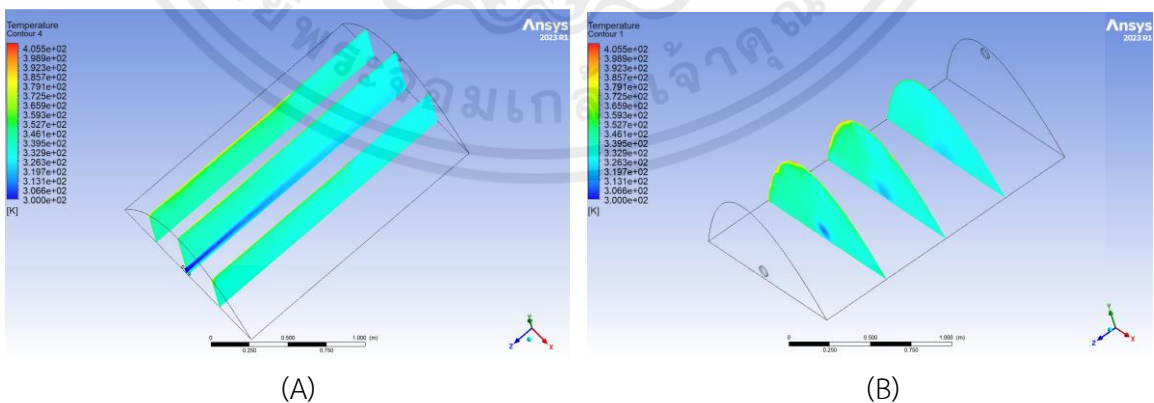
รูปที่ 4.2 แสดงแผนภาพ Temperature contour ที่ความสูง 0.6 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane



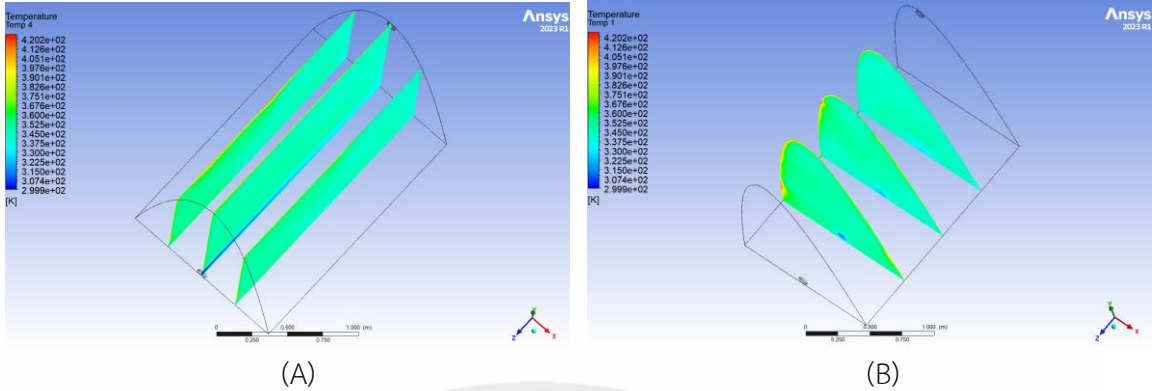
รูปที่ 4.3 แสดงแผนภาพ Temperature contour ที่ความสูง 1.6 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane

4.2.1.2 กรณีที่ 2 พื้นฐาน 1.256×1.884 เมตร

พิจารณาอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละความสูงจากรายที่ 4.10 จะสังเกตได้ว่า เมื่อความสูงของแบบจำลองเพิ่มขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมิสูงสุดที่บริเวณผิว Cover ของแบบจำลองมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน และบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำสุดคือบริเวณตั้งแต่ทางเข้าของแบบจำลองซึ่งจะมีลักษณะเป็นสีน้ำเงินเป็นมาจากอุณหภูมิทางเข้า 300 K มีความเร็วของอากาศที่สูงและมีลักษณะคล้ายคลึงกันในแต่ละความสูงที่เปลี่ยนไป เมื่อสังเกตบริเวณที่เป็นสีฟ้าที่อยู่บริเวณผนังที่ด้านท้ายและผิว Cover ด้านท้ายของแบบจำลองเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำเป็นผลเนื่องจากอากาศที่มีความเร็วสูง และบริเวณที่มีลักษณะที่เป็นสีเขียวหมายถึงบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงซึ่งเป็นผลมาจากความเร็วของอากาศที่ต่ำกว่าทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนของความร้อนจากผิว cover ที่ดีกว่า ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิของแบบจำลองที่กรณีความสูง 0.6, 0.7, 0.85, 1.05 และ 1.3 เมตร จะมีความคล้ายคลึงกับรูปที่ 4.4 แต่ที่ความสูง 1.6 เมตรจะมีพื้นที่สีเขียวมากซึ่งแตกต่างกับกรณีความสูงอื่นๆอย่างชัดเจนเป็นไปดังรูปที่ 4.5



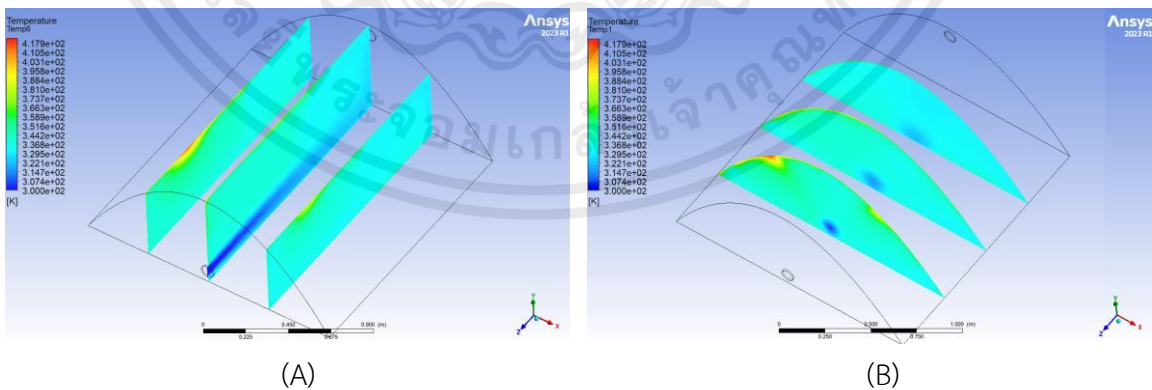
รูปที่ 4.4 แสดงแผนภาพ Temperature contour ที่ความสูง 0.6 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane



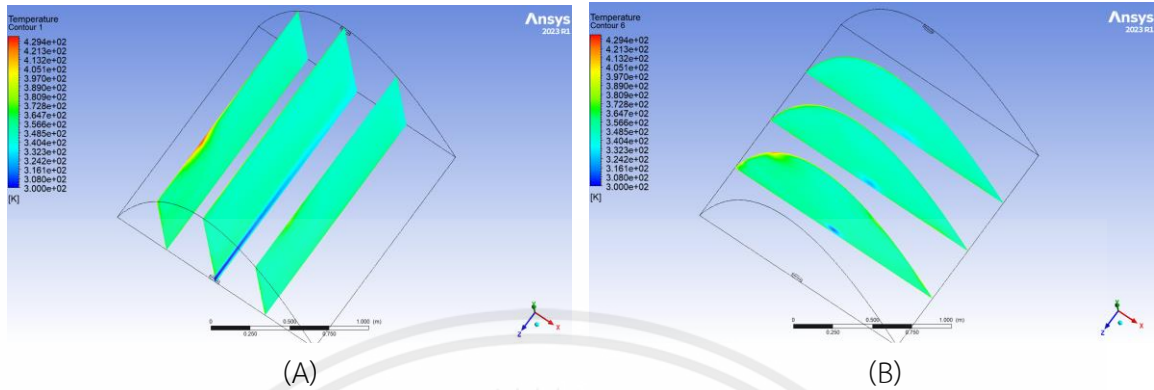
รูปที่ 4.5 แสดงแผนภาพ Temperature contour ที่ความสูง 1.6 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane

4.2.1.3 กรณีที่ 3 พื้นี่ฐาน 1.538 × 1.538 เมตร

พิจารณาเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยจากตารางที่ 4.10 ที่ความสูงต่างกันพบว่าเมื่อความสูงของแบบจำลองเพิ่มขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยและอุณหภูมิสูงสุดของแบบจำลองที่บริเวณผิว Cover เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน เมื่อสังเกต Contour จะเห็นได้ว่าพื้นที่ที่มีอุณหภูมิต่ำที่สุดคือบริเวณตั้งแต่ทางเข้าจะมีลักษณะเป็นสีน้ำเงินเนื่องจากอุณหภูมิกอากาศ 300 K ที่ทางเข้ามีความเร็วของอากาศที่สูงที่สุด นอกจากนี้พื้นที่สีฟ้าคือพื้นที่ที่มีอุณหภูมิต่ำที่อยู่บริเวณผนังด้านท้ายและผิว Cover บริเวณท้ายแบบจำลองซึ่งเป็นผลมาจากความเร็วของอากาศที่สูง และจะมีลักษณะคล้ายคลึงกันในทุกความสูงและพื้นที่สีเขียวคือบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงเป็นผลมาจากความเร็วของอากาศที่ต่ำ ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิของแบบจำลองที่กรณีความสูง 0.6, 0.7, 0.85 และ 1.05 เมตร จะมีความคล้ายคลึงกับรูปที่ 4.6 แต่ที่ความสูง 1.3 และ 1.6 เมตรจะมีพื้นที่สีเขียวมากซึ่งแตกต่างกับกรณีความสูงอื่นๆอย่างชัดเจนเป็นไปดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 แสดงแผนภาพ Temperature contour ที่ความสูง 0.6 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane



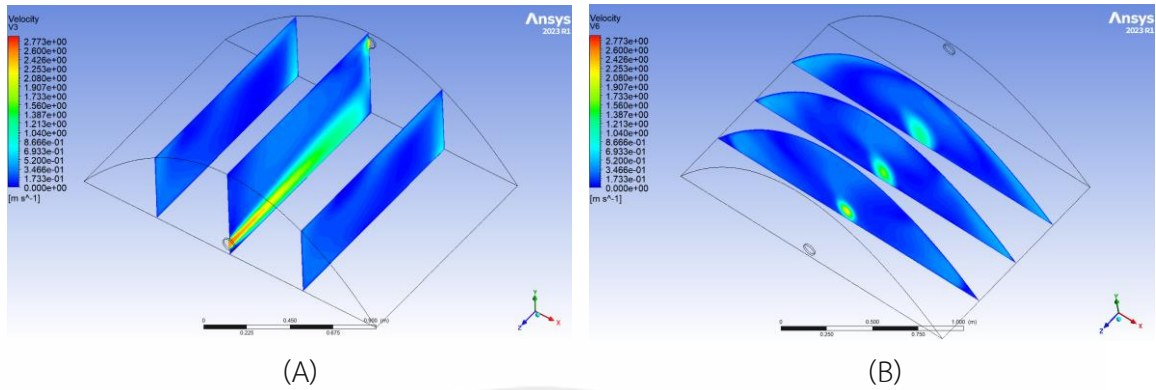
รูปที่ 4.7 แสดงแผนภาพ Temperature contour ที่ความสูง 1.3 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane

4.2.2 แผนภาพ Velocity contour

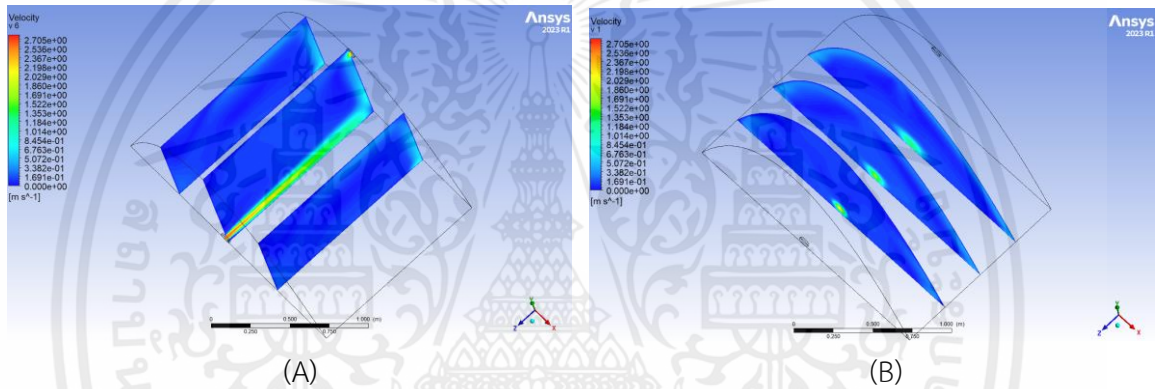
แผนภาพที่แสดงกระจายตัวของอุณหภูมิภายในแบบจำลอง จากงานวิจัย[8] กล่าวว่าความเร็วของอากาศภายในแบบจำลองมีความสม่ำเสมอจะส่งผลต่อความสามารถในการอบแห้ง ซึ่งความสม่ำเสมอของความเร็วภายในแบบจำลองมีผลเกี่ยวเนื่องกับค่า TKE

4.2.2.1 กรณีที่ 1 พื้นที่ฐาน 1.884×1.256 เมตร

เมื่อพิจารณาความเร็วของแบบจำลอง การไหลภายในแบบจำลองเป็นผลเนื่องพัดลมดูดอากาศที่ทางออก เมื่อเปรียบเทียบค่าความเร็วเฉลี่ยของแบบจำลองจากตารางที่ 4.10 จะพบว่าเมื่อความสูงเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความเร็วเฉลี่ยภายในแบบจำลองมีค่าที่ต่ำลงเนื่องจากปริมาตรที่เพิ่มขึ้น บริเวณที่มีสีน้ำเงินเป็นบริเวณที่ความเร็วต่ำและส่งผลให้อุณหภูมิมีค่าสูงส่งผลให้มีระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดี นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าความเร็วที่สูงที่สุดคือพื้นที่ที่มีสีแดงถึงสีเขียวตั้งแต่บริเวณทางเข้าไปจนถึงใกล้กับผนังด้านท้ายแบบจำลอง บริเวณสีฟ้าคือพื้นที่ที่มีความเร็วสูงเป็นผลต่อเนื่องมาจากความเร็วจากทางเข้าที่สูงส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณที่ผนังด้านท้ายและหน้าทางออกของแบบจำลอง และแบบจำลองในรูปที่ 4.8 จะสามารถสังเกตเห็นพื้นที่สีฟ้าที่มีความเร็วสูงได้ชัดเจนซึ่งส่วนใหญ่อยู่บริเวณขอบของแบบจำลองและกระจายบริเวณกลางของแบบจำลองด้วยเช่นกัน จะเป็นในลักษณะนี้ในกรณีที่มีความสูง 0.6, 0.7 และ 0.85 เมตร แต่ในรูปที่ 4.9 จะสังเกตเห็นว่าพื้นที่สีน้ำเงินที่มีความเร็วต่ำมีพื้นที่มากและจะมีลักษณะคล้ายคลึงกันในกรณีที่มีความสูง 1.05, 1.3 และ 1.6 เมตร



รูปที่ 4.8 แสดงแผนภาพ Velocity contour ที่ความสูง 0.6 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane

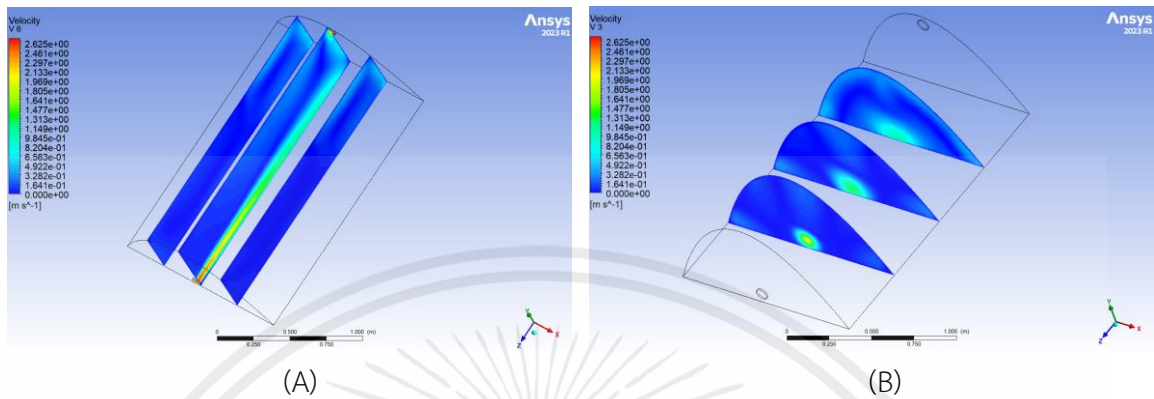


รูปที่ 4.9 แสดงแผนภาพ Velocity contour ที่ความสูง 1.05 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane

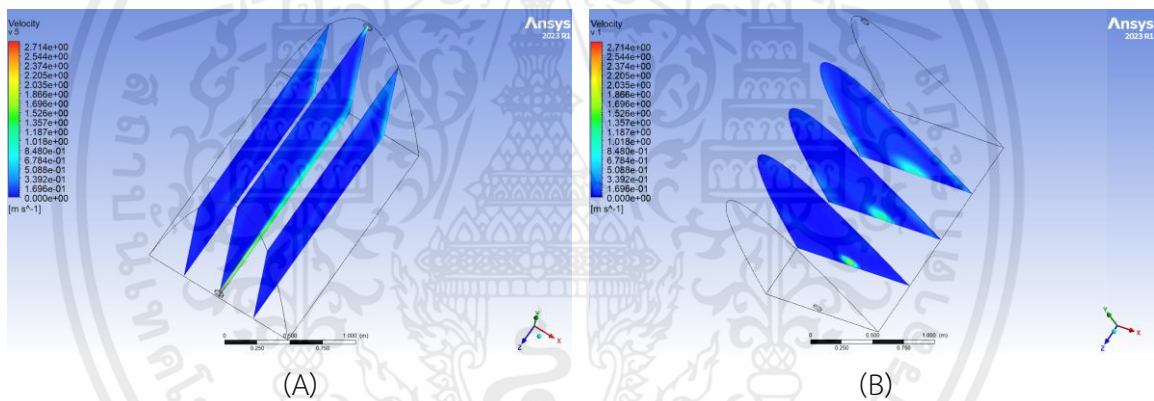
4.2.2.2 กรณีที่ 2 พื้นี่ฐาน 1.256×1.884 เมตร

พิจารณาความเร็วเฉลี่ยของอากาศจากตารางที่ 4.10 เมื่อความสูงของแบบจำลองเพิ่มขึ้น ความเร็วเฉลี่ยของอากาศภายในแบบจำลองจะมีค่าลดลง ความเร็วของอากาศที่เกิดขึ้นภายในแบบจำลองเป็นผลมาจากพัดลมดูดอากาศออกที่ทางออก บริเวณที่มีสีน้ำเงินคือพื้นที่ที่มีค่าความเร็วต่ำ และส่งผลให้อุณหภูมิมีค่าสูงด้วยเช่นกัน และในส่วนของพื้นที่ที่มีสีฟ้าคือบริเวณที่มีความเร็วอากาศสูง ส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณผนังด้านท้ายและหน้าทางออกของแบบจำลองเนื่องจากการระบายอากาศออก นอกจากนี้ความเร็วของอากาศที่สูงที่สุดคือบริเวณที่มีสีแดงไปจนถึงสีเขียวจะอยู่ที่ทางเข้าไปจนถึงบริเวณใกล้กับผนังด้านท้ายของแบบจำลอง และแบบจำลองในรูปที่ 4.10 จะสามารถสังเกตเห็นพื้นที่สีฟ้าที่มีความเร็วสูงได้ชัดเจนซึ่งส่วนใหญ่อยู่บริเวณขอบของแบบจำลอง จะเป็นในลักษณะนี้ในกรณีที่ความสูง

0.6, 0.7, 0.85, 1.05 และ 1.3 เมตร แต่ในรูปที่ 4.9 จะสังเกตเห็นว่าพื้นที่สีน้ำเงินที่มีความเร็วต่ำมีพื้นที่มากในกรณีที่มีความสูง 1.6 เมตร



รูปที่ 4.10 แสดงแผนภาพ Velocity contour ที่ความสูง 0.6 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane

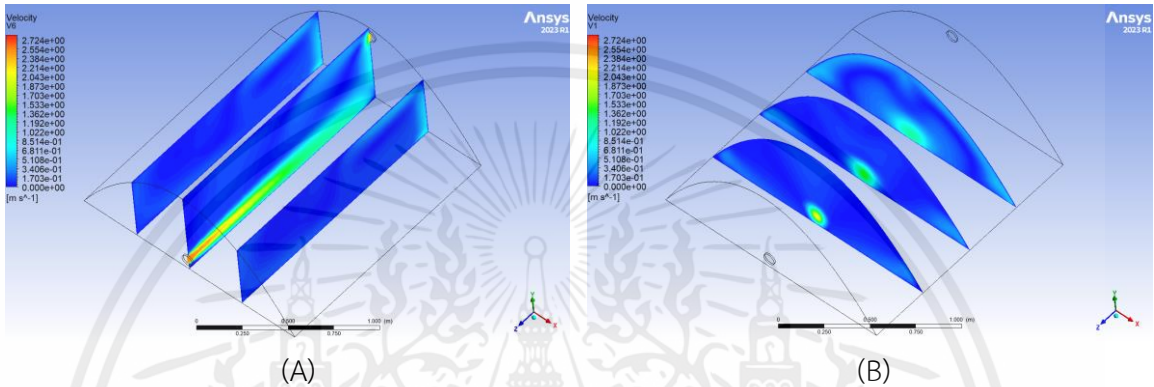


รูปที่ 4.11 แสดงแผนภาพ Velocity contour ที่ความสูง 1.6 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane

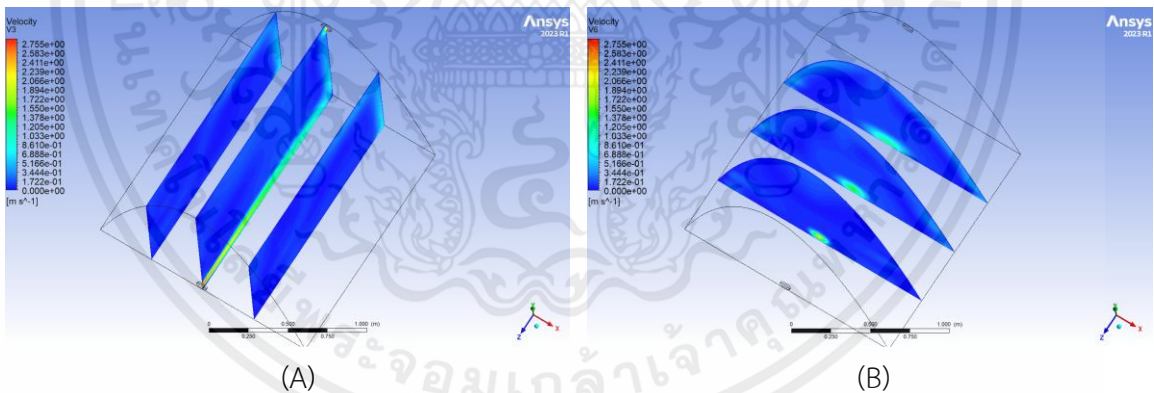
4.2.2.3 กรณีที่ 3 พื้นที่ฐาน 1.538×1.538 เมตร

เมื่อเปรียบเทียบความเร็วเฉลี่ยของอากาศจากตารางที่ 4.11 เมื่อความสูงของแบบจำลองเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเร็วเฉลี่ยของอากาศภายในแบบจำลองมีค่าลดลงเนื่องจากปริมาตรที่เพิ่มขึ้น พื้นที่สีน้ำเงินคือบริเวณที่มีความเร็วต่ำอยู่บริเวณผนังด้านหน้าไปจนถึงบริเวณกึ่งกลางของแบบจำลอง และพื้นที่สีฟ้าคือบริเวณที่มีความเร็วสูงเป็นผลมาจากอากาศที่มีความเร็วสูงจากทางเข้าส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณผนังด้านท้ายและหน้าทางออกของแบบจำลองเนื่องจากการระบายอากาศออก พื้นที่ที่มีความเร็วสูงที่สุดคือพื้นที่สีแดงไปจนถึงพื้นที่สีเขียวตั้งแต่บริเวณทางเข้าไปจนถึงใกล้กับผนังด้านท้ายของ

แบบจำลอง และแบบจำลองในรูปที่ 4.8 จะสามารถสังเกตพื้นที่สีฟ้าที่มีความเร็วสูงได้ชัดเจนซึ่งส่วนใหญ่อยู่บริเวณขอบของแบบจำลองและกระจายบริเวณกลางของแบบจำลองด้วยเช่นกัน จะเป็นในลักษณะนี้ในกรณีที่มีความสูง 0.6, 0.7, 0.85 และ 1.05 เมตร แต่ในรูปที่ 4.9 จะสังเกตเห็นว่าพื้นที่สีน้ำเงินที่มีความเร็วต่ำมีพื้นที่ที่มากและจะมีลักษณะคล้ายคลึงกันในกรณีที่ความสูง 1.3 และ 1.6 เมตร



รูปที่ 4.12 แสดงแผนภาพ Velocity contour ที่ความสูง 0.6 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane



รูปที่ 4.13 แสดงแผนภาพ Velocity contour ที่ความสูง 1.3 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane

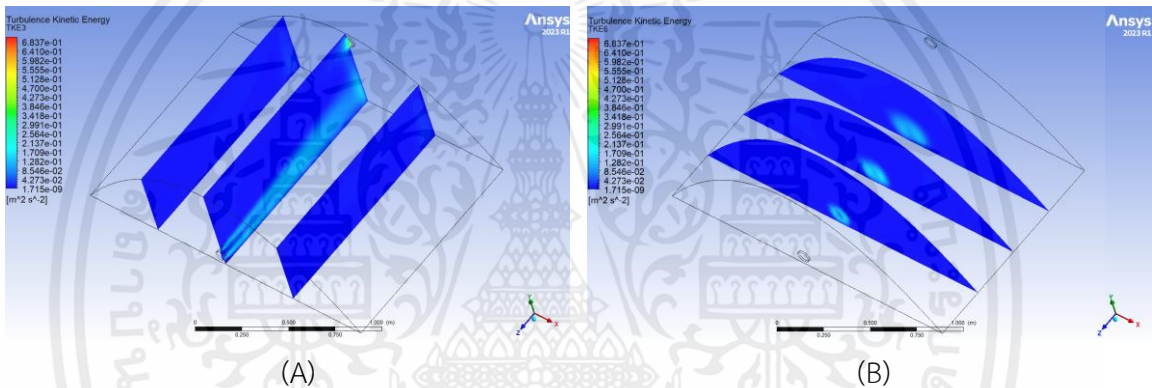
4.2.3 แผนภาพ Turbulence Kinetic Energy contour

Turbulence Kinetic Energy, TKE คือค่าที่นำมาใช้พิจารณาถึงความเหมาะสมในการออกแบบเครื่องอบแห้ง คือความสามารถในการบอกถึงความสม่ำเสมอของความเร็วของอากาศและ

อุณหภูมิภายในแบบจำลองเครื่องอบแห้งจากงานวิจัย [8] ซึ่งความสม่ำเสมอของความเร็วอากาศและอุณหภูมิมีค่ามากจำลองส่งผลให้แบบจำลองมีความสามารถในการอบแห้งที่ดีด้วย

4.2.3.1 กรณีที่ 1 พื้นี่ฐาน 1.884×1.256 เมตร

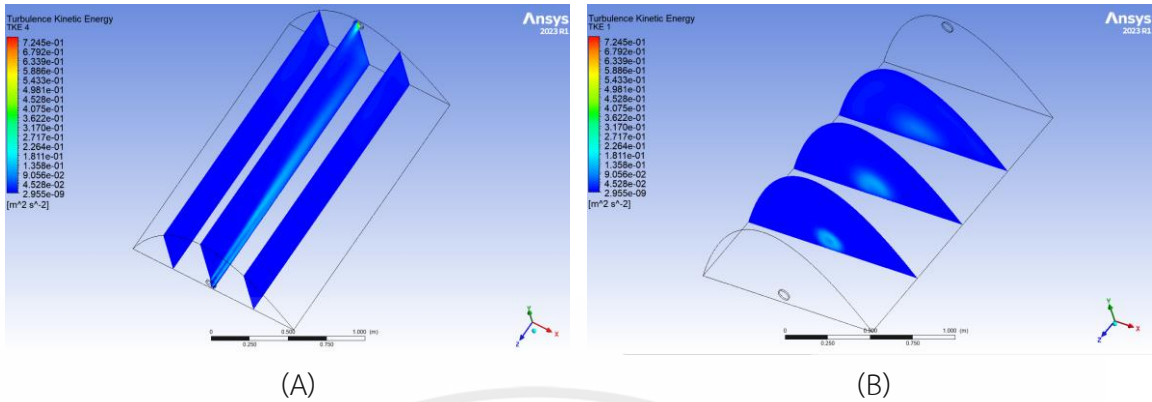
เมื่อพิจารณาที่ contour ในแต่ละกรณีที่มีความสูงต่างกันจะพบว่า TKE ภายในแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกันมากสังเกตได้จากสีของ contour ที่เป็นสีน้ำเงิน และบริเวณที่มี TKE มากที่สุดคือพื้นที่ที่สีฟ้าอยู่ปากทางเข้าไปจนถึงผนังด้านและบริเวณด้านหน้าทางออกของแบบจำลอง เป็นไปดังรูปที่ 4.14 และจะมีลักษณะคล้ายคลึงกันในกรณีที่มีความสูง 0.6, 0.7, 0.85, 1.05, 1.3 และ 1.6 เมตร นอกจากนี้ทำการพิจารณาค่า TKE ของแบบจำลองในแต่ละความสูงจากตารางที่ 4.10 พบว่าที่ความสูง 0.6 เมตร มีค่า TKE มากที่สุดและเมื่อความสูงเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่า TKE มีแนวโน้มลดลง



รูปที่ 4.14 แสดงแผนภาพ TKE contour ที่ความสูง 0.6 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane

4.2.3.2 กรณีที่ 2 พื้นี่ฐาน 1.256×1.884 เมตร

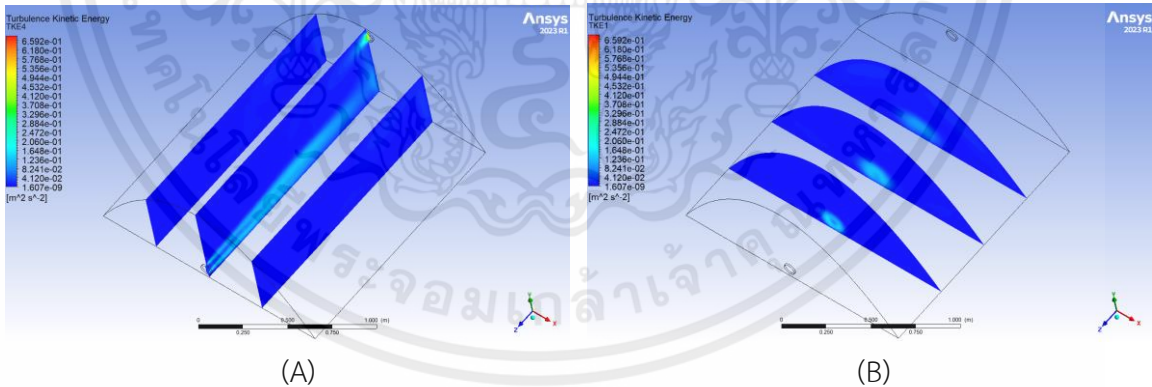
เมื่อพิจารณาที่ contour ในแต่ละกรณีที่มีความสูงต่างกันจะพบว่า TKE ภายในแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกันมากสังเกตได้จากสีของ contour ที่เป็นสีน้ำเงิน และบริเวณที่มี TKE มากที่สุดคือพื้นที่ที่สีฟ้าอยู่ปากทางเข้าไปจนถึงบริเวณกึ่งกลางของแบบจำลอง เป็นไปดังรูปที่ 4.15 และจะมีลักษณะคล้ายคลึงกันในกรณีที่มีความสูง 0.6, 0.7, 0.85, 1.05, 1.3 และ 1.6 เมตร นอกจากนี้ทำการพิจารณาค่า TKE ของแบบจำลองในแต่ละความสูงจากตารางที่ 4.10 พบว่าที่ความสูง 0.6 เมตร มีค่า TKE มากที่สุดและเมื่อความสูงเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่า TKE มีแนวโน้มลดลง



รูปที่ 4.15 แสดงแผนภาพ TKE contour ที่ความสูง 0.6 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane

4.2.3.3 กรณีที่ 3 พื้นที่ฐาน 1.538×1.538 เมตร

เมื่อพิจารณาที่ contour ในแต่ละกรณีที่มีความสูงต่างกันจะพบว่า TKE ภายในแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกันมากสังเกตได้จากสีของ contour ที่เป็นสีน้ำเงิน และบริเวณที่มี TKE มากที่สุดคือพื้นที่สี่เหลี่ยมปากทางเข้าไปจนถึงผนังด้านและบริเวณด้านหน้าทางออกของแบบจำลอง เป็นไปดังรูปที่ 4.16 และจะมีลักษณะคล้ายคลึงกันในกรณีที่มีความสูง 0.6, 0.7, 0.85, 1.05, 1.3 และ 1.6 เมตร นอกจากนี้ทำการพิจารณาค่า TKE ของแบบจำลองในแต่ละความสูงจากตารางที่ 4.10 พบว่าที่ความสูง 0.6 เมตร มีค่า TKE มากที่สุดและเมื่อความสูงเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่า TKE มีแนวโน้มลดลง



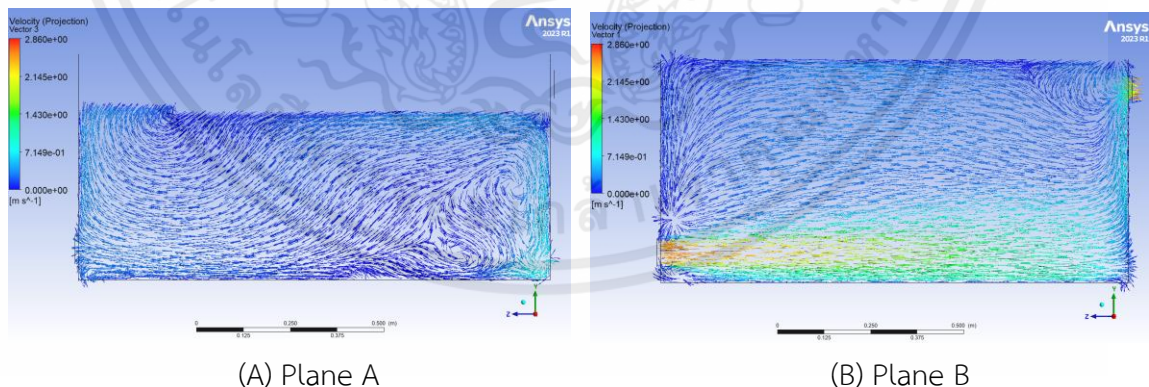
รูปที่ 4.16 แสดงแผนภาพ TKE contour ที่ความสูง 0.6 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane

4.2.4 แผนภาพ Velocity vector

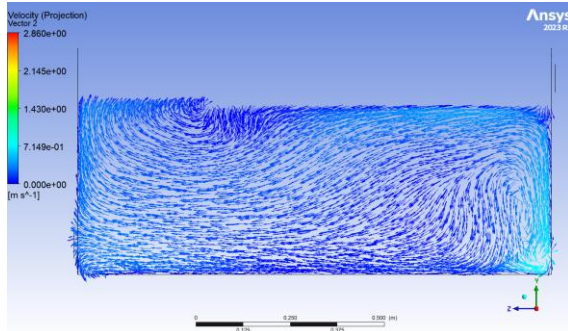
แผนภาพแสดงทิศทางการไหลของอากาศภายในแบบจำลอง เพื่อนำไปพิจารณาถึงความสามารถในการอบแห้ง ร่วมกับค่า TKE

4.2.4.1 กรณีที่ 1 พื้นี่ฐาน 1.884×1.256 เมตร

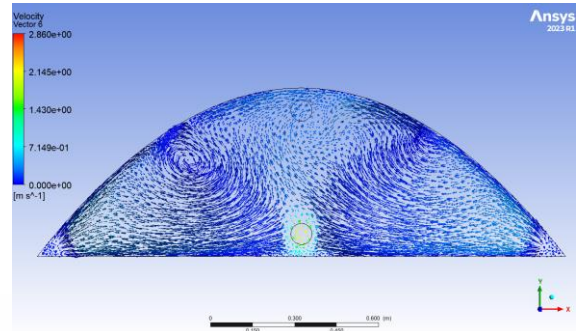
จากแผนภาพของ Velocity vector สีของ vector ที่บอกในแผนภาพจะเป็นค่าเดียวกันกับ Velocity contour เมื่อสังเกตภายในแผนภาพที่ Plane B คือ Plane ที่แสดงทิศทางการไหลของอากาศที่ทางเข้าไปจนถึงทางออกในและสื่อถึงการดูดอากาศออกของพัดลมดูดอากาศที่ทางออก จะพบว่าอากาศจากทางเข้ามีทิศทางที่พุ่งไปในทิศทางเดียวกันไปที่ผนังทางด้านหลังของแบบจำลองไปไหลต่อไปที่ทางออกของแบบจำลอง และเมื่อพิจารณาที่ Plane A และ C ในทิศทางแกน z จะพบว่ามึลักษณะที่ค่อนข้างคล้ายคลึงกัน คือทิศทางการไหลของอากาศมีการหมุนวนปั่นป่วนไม่มีทิศทางตายตัว และเมื่อนำ Plane D, E และ F ในทิศทางแกน x ของ Plane D, E และ F อากาศที่หมุนวนใน Plane A และ C มีการไหลวนกลับไปรวมกับอากาศที่จากทางเข้าไปจนถึงทางออกของแบบจำลองเพื่อพาอากาศออก และเมื่อสังเกตที่รูปด้านหน้าและด้านหลังของ XY Plane จะพบว่าอากาศที่อยู่บริเวณตรงกลางของแบบจำลองพิจารณาควบคู่ไป Plane B จะไหลไปในทิศทางเดียวกันจากทางเข้าไปจนถึงทางออกของแบบจำลอง จะมีลักษณะคล้ายคลึงกันที่ความสูง 0.6 และ 0.7 เมตร เป็นไปดังรูปที่ 4.17 แต่ความสูง 0.85, 1.05, 1.3 และ 1.6 เมตร อากาศที่มีอยู่บริเวณตรงกลางของแบบจำลองที่โดยพิจารณาควบคู่ไปกับ Plane B ด้วยเช่นกันจะมีทิศทางไหลย้อนกลับเป็นส่วนใหญ่ จะมีลักษณะเป็นไปดังรูปที่ 4.18



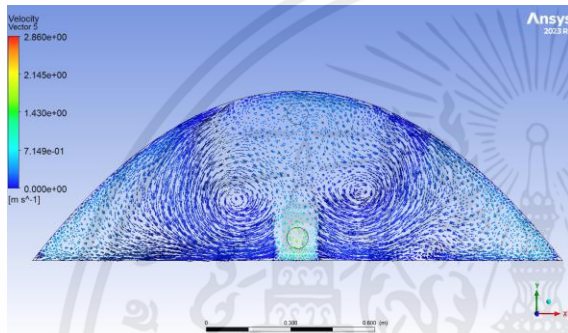
รูปที่ 4.17 แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 0.6 m.



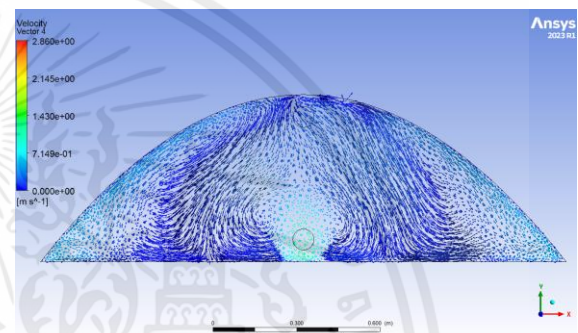
(C) Plane C



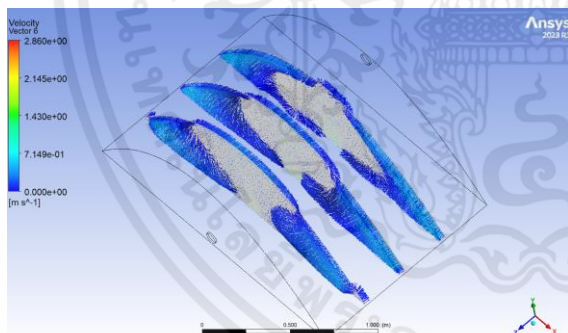
(D) Plane D



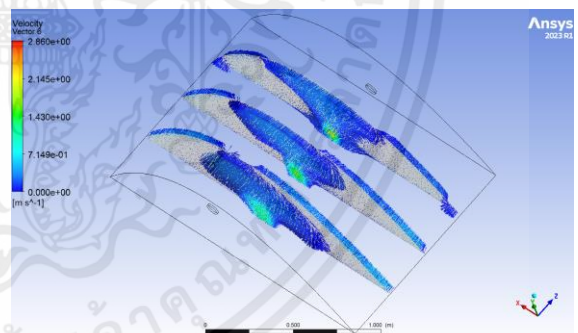
(E) Plane E



(F) Plane F

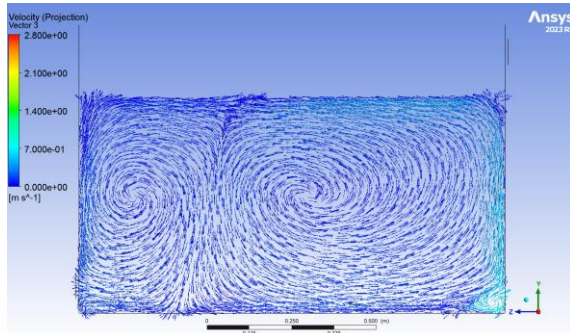


(G) ด้านหน้าของ XY Plane

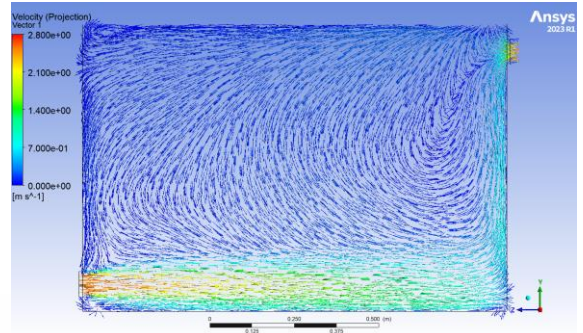


(H) ด้านหลังของ XY Plane

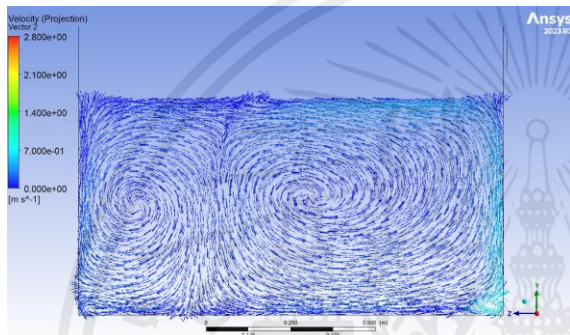
รูปที่ 4.17 (ต่อ)



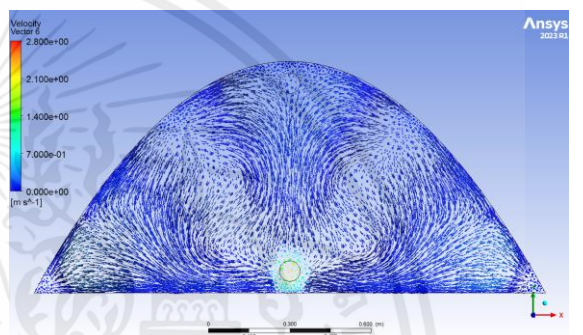
(A) Plane A



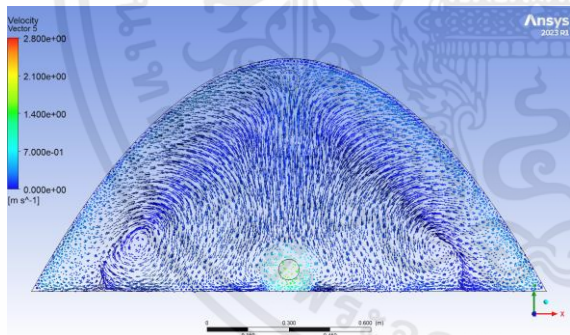
(B) Plane B



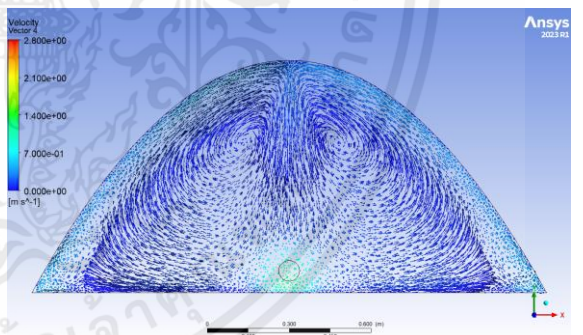
(C) Plane C



(D) Plane D

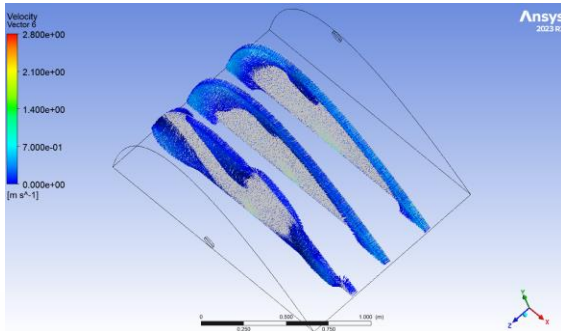


(E) Plane E

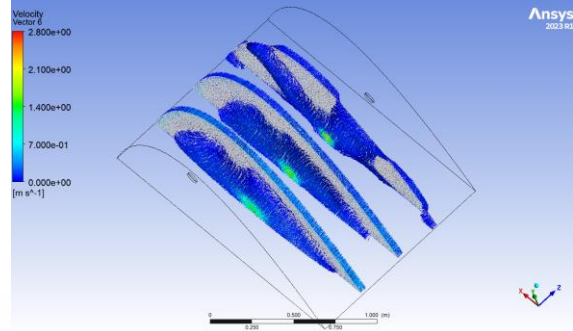


(F) Plane F

รูปที่ 4.18 แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 0.85 m.



(G) ด้านหน้าของ XY Plane

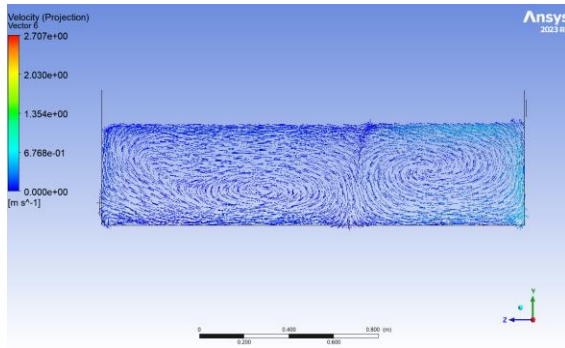


(H) ด้านหลังของ XY Plane

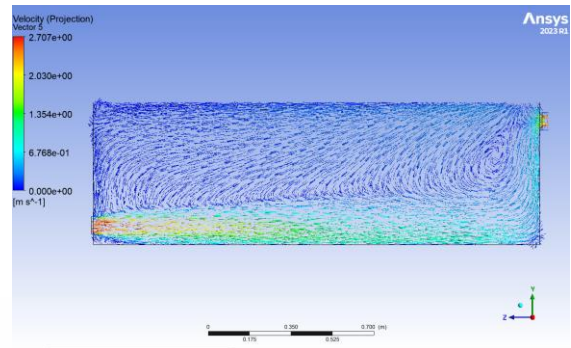
รูปที่ 4.18 (ต่อ)

4.2.4.2 กรณีที่ 2 พื้นี่ฐาน 1.256×1.884 เมตร

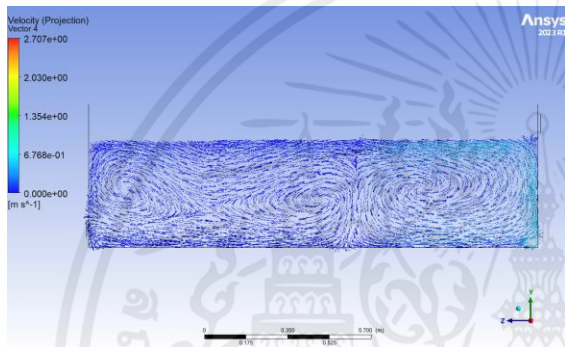
จากแผนภาพของ Velocity vector สีของ vector ที่บอกในแผนภาพจะเป็นค่าเดียวกับ Velocity contour เมื่อสังเกตภายในแผนภาพที่ Plane B คือ Plane ที่แสดงทิศทางการไหลของอากาศที่ทางเข้าไปจนถึงทางออกในและสื่อถึงการดูดอากาศออกของพัดลมดูดอากาศที่ทางออก จะพบว่าอากาศจากทางเข้ามีทิศทางที่พุ่งไปในทิศทางเดียวกันไปที่ผนังทางด้านหลังของแบบจำลอง และไหลต่อไปที่ทางออกของแบบจำลอง แต่พบว่าเมื่ออากาศบางส่วนที่ไม่ถูกระบายออกทำให้เกิดการไหลวนกลับ เมื่อพิจารณาที่ Plane A และ C ในทิศทางแกน z จะพบว่ามีลักษณะที่ค่อนข้างคล้ายคลึงกัน คือมีทิศทางการไหลวนปั่นป่วนไม่มีทิศทางตายตัว และเมื่อนำ Plane D, E และ F ในทิศทางแกน x ของอากาศที่หมุนวนใน Plane A และ C มีการไหลวนกลับไปพร้อมกับอากาศที่ไหลเข้าบริเวณที่ทางเข้าไปจนถึงทางออกของแบบจำลอง และเมื่อสังเกตที่รูปด้านหน้าและด้านหลังของ XY Plane จะพบว่าอากาศส่วนใหญ่จะมีทิศทางที่ไหลย้อนกลับไปทางด้านหน้าของแบบจำลองโดยพิจารณาควบคู่ไปกับ Plane B และโน้มของพฤติกรรมทิศทางการไหลของอากาศก็มีลักษณะค่อนข้างใกล้เคียงกันในความสูง 0.6, 0.7, 0.85, 1.05, 1.3 และ 1.6 เมตร เป็นไปดังรูปที่ 4.19



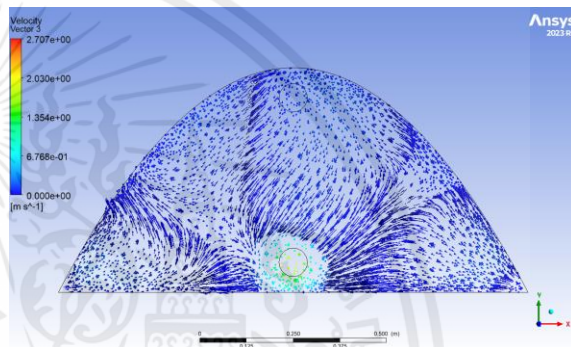
(A) Plane A



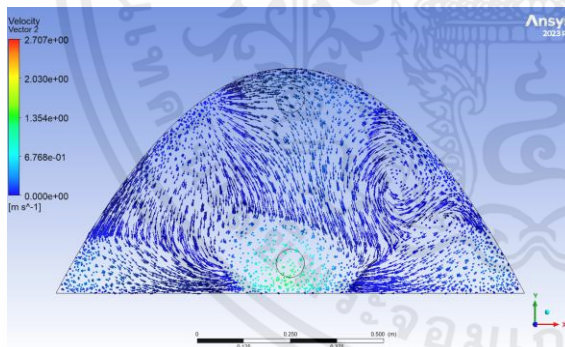
(B) Plane B



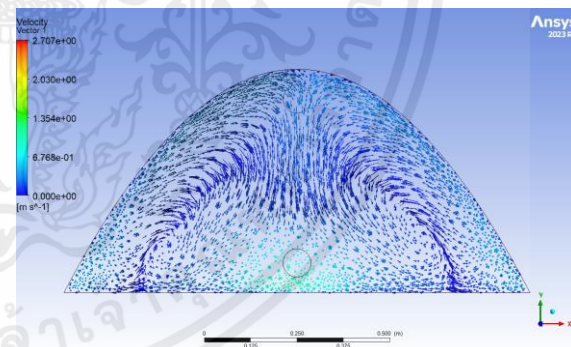
(C) Plane C



(D) Plane D

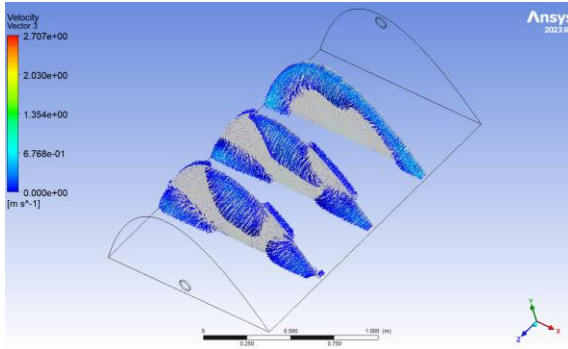


(E) Plane E

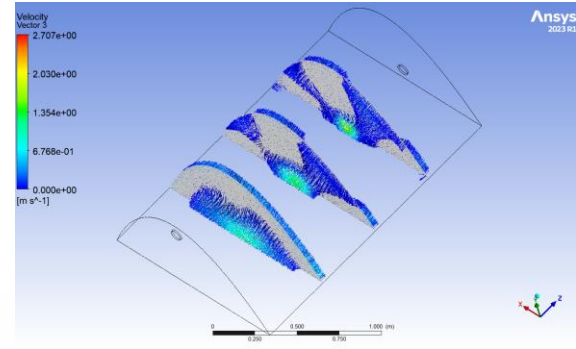


(F) Plane F

รูปที่ 4.19 แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 0.6 m.



(G) ด้านหน้าของ XY Plane

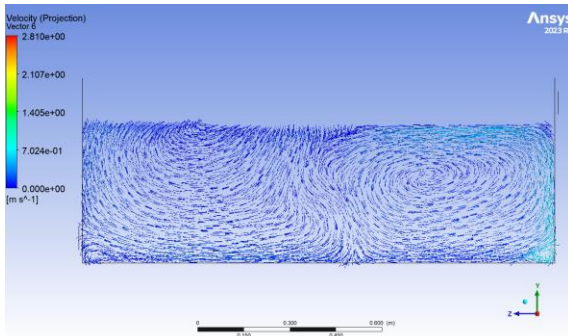


(H) ด้านหลังของ XY Plane

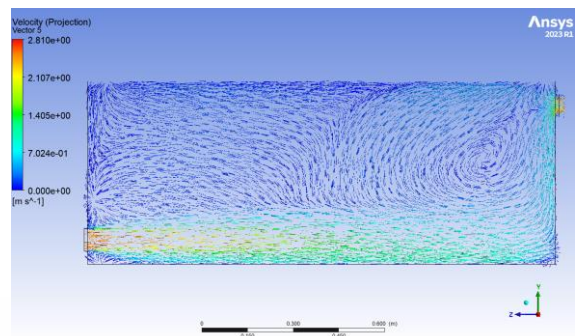
รูปที่ 4.19 (ต่อ)

4.2.4.3 กรณีที่ 3 พื้นที่ 1.538×1.538 เมตร

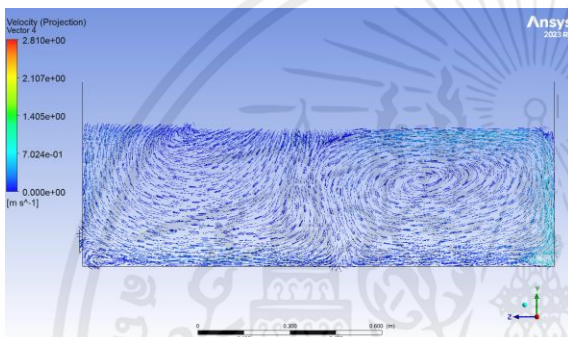
จากแผนภาพของ Velocity vector สีของ vector ที่บอกในแผนภาพจะเป็นค่าเดียวกับ Velocity contour เมื่อสังเกตภายในแผนภาพที่ Plane B คือ Plane ที่แสดงทิศทางการไหลของอากาศที่ทางเข้าไปจนถึงทางออกในและสื่อถึงการดูอากาศออกของพัดลมดูอากาศที่ทางออก จะพบว่าอากาศจากทางเข้ามีทิศทางที่พุ่งไปในทิศทางเดียวกันไปที่ผนังทางด้านหลังของแบบจำลองไปไหลต่อไปที่ทางออกของแบบจำลอง แต่พบว่าเมื่ออากาศบางส่วนที่ไม่ถูกระบายออกทำให้เกิดการไหลวนกลับไป เมื่อพิจารณาที่ Plane A และ C ในทิศทางแกน z จะพบว่ามิลักษณะที่ค่อนข้างคล้ายคลึงกัน คือมีทิศทางการไหลวนปั่นป่วนไม่มีทิศทางตายตัว และเมื่อนำ Plane D, E และ F ในทิศทางแกน x ของ อากาศที่หมุนวนใน Plane A และ C มีการไหลวนกลับไปรวมกับอากาศที่ไหลเข้าบริเวณที่ทางเข้าไปจนถึงทางออกของแบบจำลอง และเมื่อสังเกตที่รูปด้านหน้าและด้านหลังของ XY Plane จะพบว่าอากาศส่วนใหญ่จะมีทิศทางไหลย้อนกลับไปรวมกับอากาศที่ไหลเข้ามาจากทางเข้าที่บริเวณใกล้กับกึ่งกลางของแบบจำลองในกรณีที่มีความสูง 0.6 และ 0.7 เมตร พิจารณาควบคู่กับ Plane B มีลักษณะเป็นไปดังรูปที่ 4.20 แต่ที่ความสูง 0.85, 1.05, 1.3 และ 1.6 เมตร จะมีทิศทางที่ไหลย้อนกลับไปทางด้านหน้าของแบบจำลองโดยพิจารณาควบคู่กับ Plane B เช่นกัน โดยจะมีลักษณะดังในรูปที่ 4.21



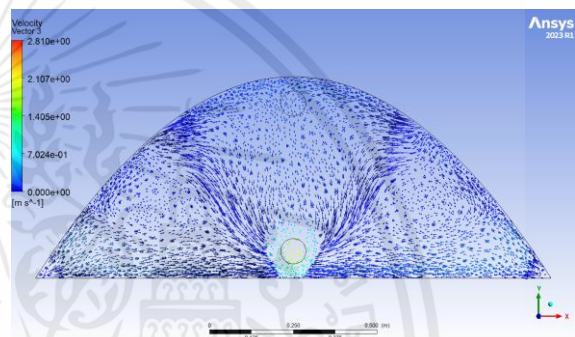
(A) Plane A



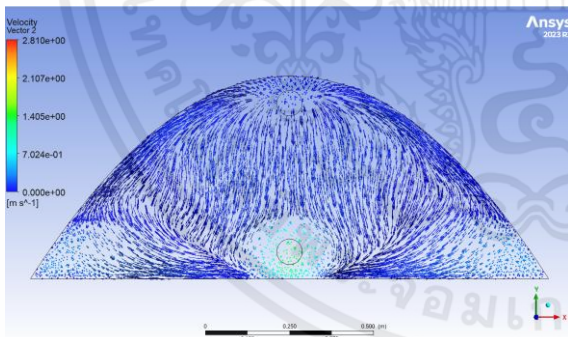
(B) Plane B



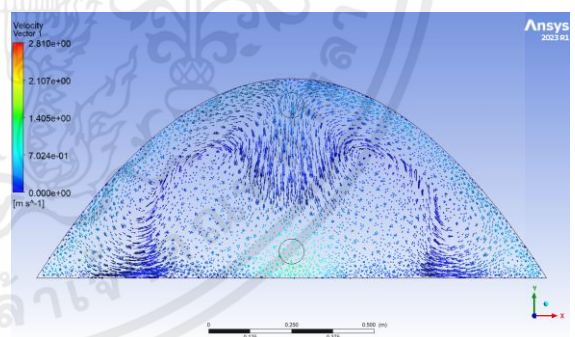
(C) Plane C



(D) Plane D

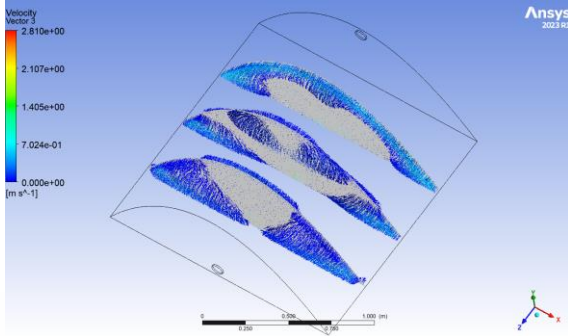


(E) Plane E

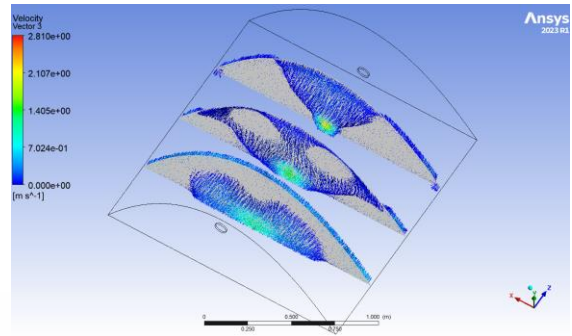


(F) Plane F

รูปที่ 4.20 แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 0.6 m.

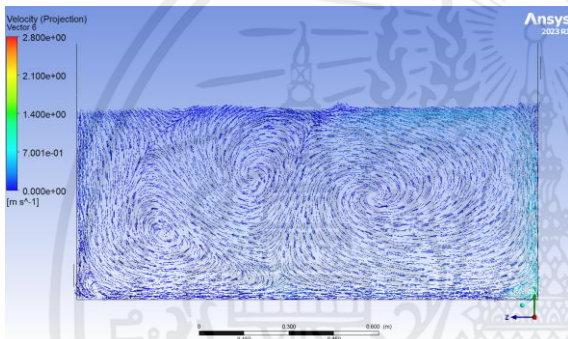


(G) ด้านหน้าของ XY Plane

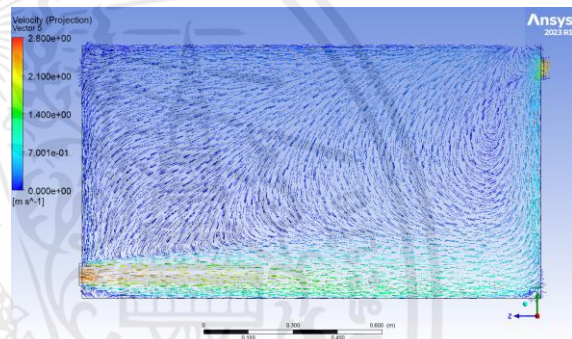


(H) ด้านหลังของ XY Plane

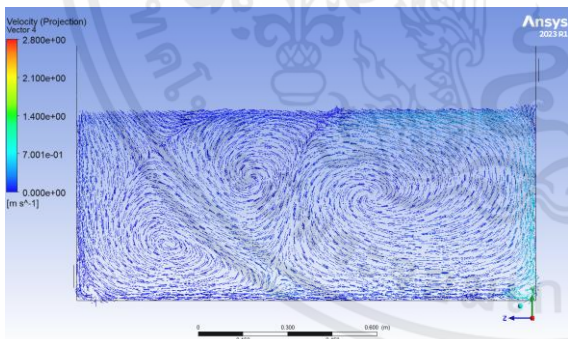
รูปที่ 4.20 (ต่อ)



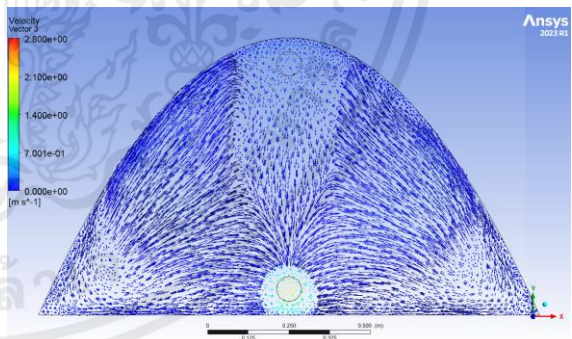
(A) Plane A



(B) Plane B

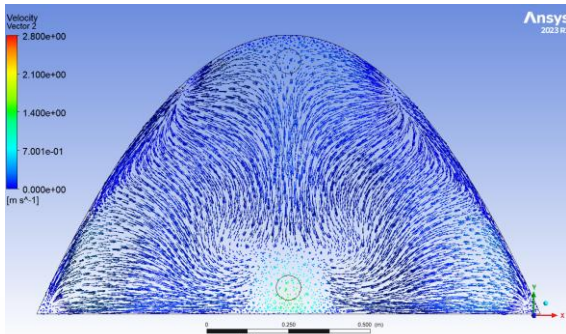


(C) Plane C

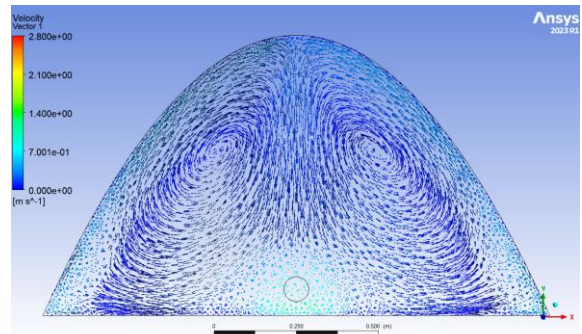


(D) Plane D

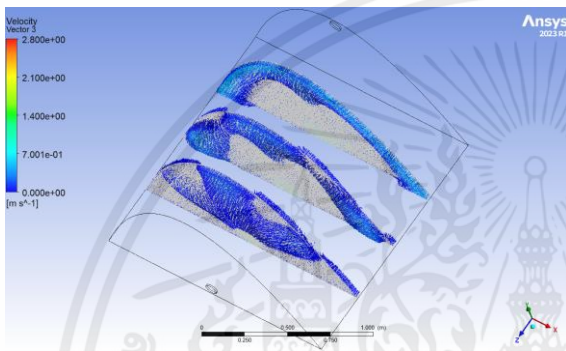
รูปที่ 4.21 แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 0.85 m.



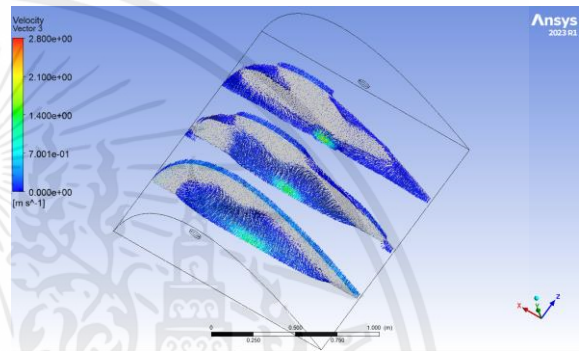
(E) Plane E



(F) Plane F



(G) ด้านหน้าของ XY Plane



(H) ด้านหลังของ XY Plane

รูปที่ 4.21 (ต่อ)

4.3 ตัวแปรที่มีผลต่อการอบแห้ง

ตารางที่ 4.9 ตารางแสดง Dimensions ของแบบจำลองในแต่ละกรณี

| | Dimensions (กว้าง × ยาว) (เมตร) |
|-----------|--|
| กรณีที่ 1 | 1.884 × 1.256 |
| กรณีที่ 2 | 1.256 × 1.884 |
| กรณีที่ 3 | 1.538 × 1.538 |

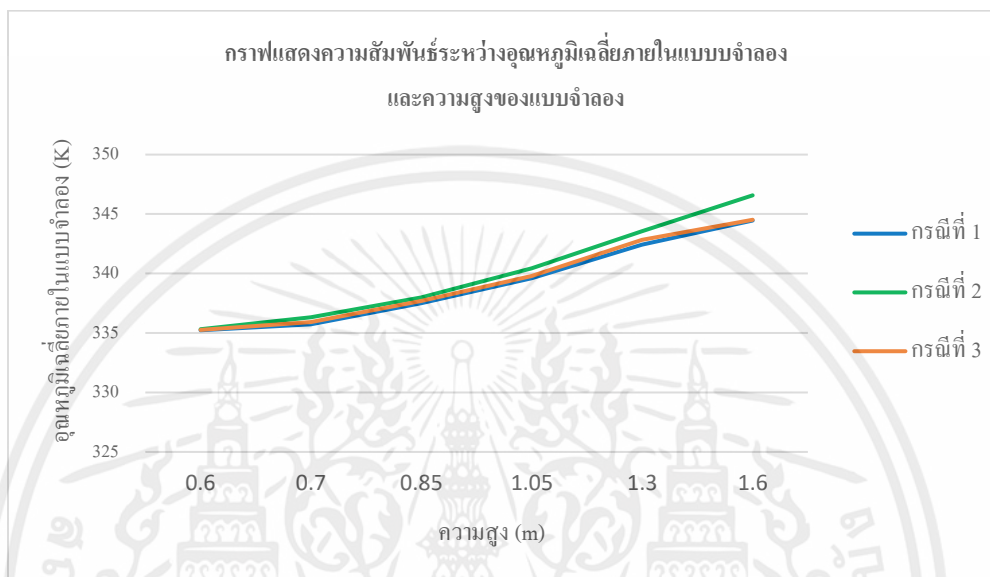
ตารางที่ 4.9 เป็นตารางที่แสดง Dimensions ของแบบจำลองในแต่ละกรณีซึ่ง กรณีที่ 1 มีอัตราส่วน 1.5 : 1, กรณีที่ 2 มีอัตราส่วน 1 : 1.5 และกรณีที่ 3 อัตราส่วน 1 : 1

ตารางที่ 4.10 แสดงค่า อุณหภูมิเฉลี่ย, ความเร็วเฉลี่ย, TKE และ Heat transfer coefficient ของแบบจำลอง

| | ความสูง (m.) | อุณหภูมิเฉลี่ย (K) | ความเร็วเฉลี่ย (m/s) | Turbulence Kinetic Energy (m^2/s^2) | Heat transfer coefficient ($W/m^2.K$) |
|-----------|--------------|--------------------|----------------------|---|---|
| กรณีที่ 1 | 0.6 | 335.23 | 0.233 | 0.01194 | 0.957 |
| | 0.7 | 335.73 | 0.206 | 0.01055 | 0.846 |
| | 0.85 | 337.511 | 0.178 | 0.00956 | 0.730 |
| | 1.05 | 339.607 | 0.160 | 0.00803 | 0.649 |
| | 1.3 | 342.428 | 0.147 | 0.00673 | 0.589 |
| | 1.6 | 344.455 | 0.129 | 0.00572 | 0.516 |
| กรณีที่ 2 | 0.6 | 335.316 | 0.179 | 0.0101 | 0.788 |
| | 0.7 | 336.321 | 0.171 | 0.00985 | 0.742 |
| | 0.85 | 338.000 | 0.158 | 0.00815 | 0.678 |
| | 1.05 | 340.439 | 0.145 | 0.00705 | 0.615 |
| | 1.3 | 343.559 | 0.131 | 0.00603 | 0.553 |
| | 1.6 | 346.575 | 0.116 | 0.00501 | 0.490 |
| กรณีที่ 3 | 0.6 | 335.258 | 0.192 | 0.01039 | 0.826 |
| | 0.7 | 335.912 | 0.178 | 0.01024 | 0.759 |
| | 0.85 | 337.697 | 0.164 | 0.00869 | 0.690 |
| | 1.05 | 339.828 | 0.148 | 0.00771 | 0.617 |
| | 1.3 | 342.828 | 0.141 | 0.00663 | 0.577 |
| | 1.6 | 344.518 | 0.125 | 0.00562 | 0.511 |

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าตัวแปร อุณหภูมิเฉลี่ย, ความเร็วเฉลี่ย, TKE และ Heat transfer coefficient ของแบบจำลอง ซึ่งเป็นตัวแปรที่จะนำมาใช้พิจารณาสรุปผลการทดลองถึงความสามารถในการอบแห้ง

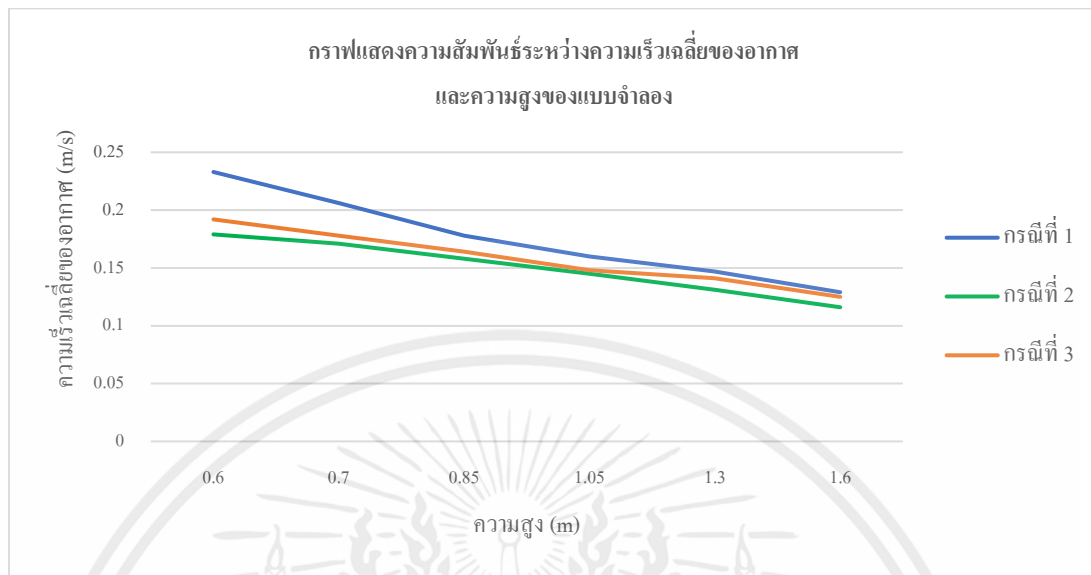
4.3.1 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในแบบจำลองที่เวลา 12:00 น.



กราฟที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยภายในแบบจำลอง (K) และความสูงของแบบจำลอง (m)

จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหลของทั้ง 3 กรณีในทุกความสูงที่แตกต่างกัน พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในแบบจำลองจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากพื้นที่ผิวรับรังสีของแผ่นโพลีคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้น ซึ่งที่ความสูงเดียวกันในกรณีที่ 2 จะมีอุณหภูมิเฉลี่ยมากที่สุด รองลงมาคือกรณีที่ 3 และสุดท้ายคือ กรณีที่ 1 เป็นไปตามกราฟที่ 4.1 โดยที่ความสูง 0.6 เมตร ของทั้ง 3 กรณีมีอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำที่สุดในทุกๆความสูง พบว่ากรณีที่ 2 มีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 335.316 K กรณีที่ 3 มีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 335.258 K และกรณีที่ 1 มีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 335.23 K และที่ความสูง 1.6 เมตร ของทั้ง 3 กรณีมีอุณหภูมิเฉลี่ยมากที่สุดในทุกๆความสูง กรณีที่ 2 มีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 346.575 K, กรณีที่ 3 มีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 344.518 K และกรณีที่ 1 มีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 344.455 K สามารถสังเกตได้จากตารางที่ 4.3

4.3.2 ความเร็วเฉลี่ยของอากาศภายในแบบจำลองที่เวลา 12:00 น.

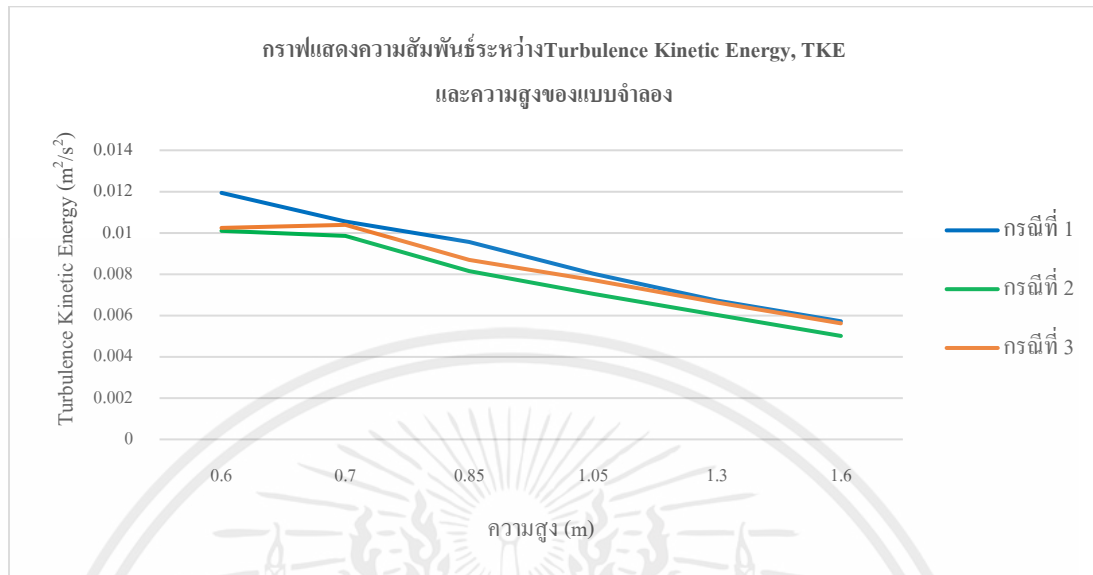


กราฟที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเฉลี่ยของอากาศ (m/s) และ ความสูงของแบบจำลอง (m)

ความเร็วเฉลี่ยของอากาศภายในแบบจำลองนั้นมีผลต่ออุณหภูมิภายในแบบจำลอง การลดลงของความเร็วเฉลี่ยของอากาศส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยภายในแบบจำลองมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากความเร็วของอากาศที่ช้าส่งผลให้อากาศภายในมีระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีทำให้ความร้อนสะสมภายในแบบจำลอง ส่งผลให้อุณหภูมิภายในสูงขึ้น แต่ผลิตภัณฑ์จะใช้เวลาในการอบแห้งนานขึ้นเนื่องจากอากาศไหลเวียนช้าทำให้ การพาความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์ได้น้อยลง [2]

จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหลทั้ง 3 กรณีที่ความสูงแตกต่างกัน พบว่าเมื่อแบบจำลองมีความสูงเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเร็วเฉลี่ยของอากาศลดลงตามลำดับทั้ง 3 กรณีเป็นไปดังกราฟที่ 4.2 โดยความสูง 0.6 เมตร มีค่าความเร็วเฉลี่ยของอากาศมากที่สุดในทุกๆความสูงของทุกกรณี และเมื่อเปรียบเทียบทั้ง 3 กรณี ที่ความสูง 0.6 เมตร พบว่ากรณีที่ 1 มีความเร็วเฉลี่ยของอากาศมากที่สุดเท่ากับ 0.233 m/s รองลงมา คือ กรณีที่ 3 มีความเร็วเฉลี่ยของอากาศเท่ากับ 0.192 m/s และสุดท้ายคือ กรณีที่ 2 มีความเร็วเฉลี่ยของอากาศเท่ากับ 0.179 m/s และที่ความสูง 1.6 m. มีค่าความเร็วเฉลี่ยของอากาศต่ำที่สุดในทุกๆความสูงของทุกกรณี และเมื่อเปรียบเทียบทั้ง 3 กรณี ที่ความสูง 1.6 เมตร พบว่ากรณีที่ 1 มีความเร็วเฉลี่ยของอากาศมากที่สุดเท่ากับ 0.129 m/s รองลงมา คือ กรณีที่ 3 มีความเร็วเฉลี่ยของอากาศเท่ากับ 0.125 m/s และสุดท้ายคือ กรณีที่ 2 มีความเร็วเฉลี่ยของอากาศเท่ากับ 0.116 m/s สามารถเปรียบเทียบได้จากตารางที่ 4.3

4.3.3 Turbulence Kinetic Energy, TKE ที่เวลา 12:00 น.



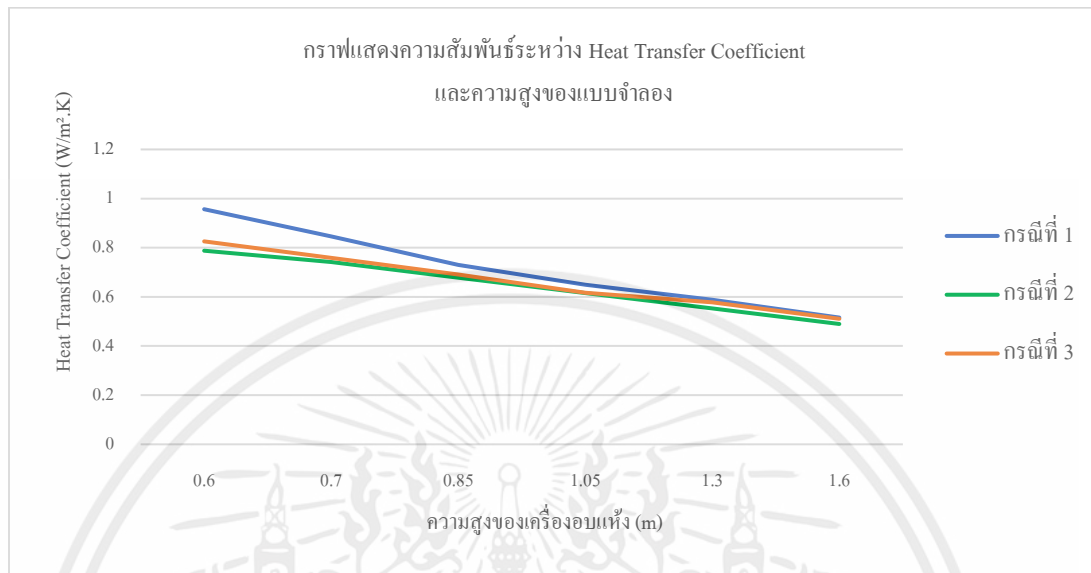
กราฟที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์เชิงปั่นป่วน (m^2/s^2) และความสูงแบบจำลอง (m)

TKE เป็นตัวแปรที่สามารถบ่งบอกความสม่ำเสมอของการกระจายของอุณหภูมิภายในแบบจำลอง เมื่อ TKE มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้การกระจายตัวของอากาศและอุณหภูมิภายในแบบจำลองมีความสม่ำเสมอมากขึ้น อีกทั้งยังส่งผลต่อการพาความร้อนไปสู่ผลิตภัณฑ์ที่สม่ำเสมอ เป็นผลให้ความสามารถในการอบแห้งดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถบอกได้อีกว่าความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของอากาศแปรผันตรงกับการกระจายตัวของอุณหภูมิ ดังนั้นหากความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของอากาศน้อยลง หมายความว่าความหนาแน่นของอากาศที่มีความเร็วลดลงและมีความเป็น Turbulence น้อยลงทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิลดลง อีกทั้ง TKE ยังส่งผลต่อการพาความร้อนอีกด้วย [8]

จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหลทั้ง 3 กรณีที่ความสูงแตกต่างกัน พบว่าเมื่อแบบจำลองมีความสูงเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า TKE ลดลงซึ่งแปรผันตรงกับความเร็วเฉลี่ยของอากาศภายในแบบจำลอง แต่แปรผกผันกับความสูง โดยที่ความสูง 0.6 เมตร มีค่า TKE มากที่สุดในทุกความสูงของทั้ง 3 กรณี เป็นไปดังกราฟที่ 4.3 และที่ความสูง 0.6 เมตร พบว่ากรณีที่ 1 มีค่า TKE มากที่สุดคือ $0.01194 m^2/s^2$ รองลงมาคือ กรณีที่ 3 มีค่า TKE เท่ากับ $0.01039 m^2/s^2$ และสุดท้ายคือกรณีที่ 2 มีค่า TKE เท่ากับ $0.0101 m^2/s^2$ และที่ความสูง 1.6 เมตร มีค่า TKE ต่ำที่สุดในทุกความสูงของทั้ง 3 กรณี พบว่ากรณีที่ 1 มีค่า TKE มากที่สุดคือ $0.00572 m^2/s^2$ รองลงมาคือ กรณีที่ 3 มีค่า TKE เท่ากับ $0.00562 m^2/s^2$ และสุดท้ายคือกรณีที่ 2 มีค่า TKE เท่ากับ $0.00501 m^2/s^2$

4.3.4 Heat Transfer Coefficient ระหว่างผิวแบบจำลองและอากาศ, HTC ที่เวลา 12:00

น.



กราฟที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Heat Transfer Coefficient (W/m².K) และความสูงของแบบจำลอง (m)

จากการวิเคราะห์การคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหลทั้ง 3 กรณีในความสูงที่แตกต่างกัน พบว่าค่า Heat Transfer Coefficient มีแนวโน้มที่ลดลงในทุกกรณีเมื่อความสูงเพิ่มขึ้นสามารถสังเกตได้จากกราฟที่ 4.4 พบว่าที่ความสูง 0.6 เมตร ในกรณี 1, 2 และ 3 มีค่า Heat Transfer Coefficient ที่มากที่สุด และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกันพบว่า กรณีที่ 1 มีค่ามากที่สุดคือ 0.957 W/m².K และรองลงมาคือกรณีที่ 3 มีค่าเท่ากับ 0.826 W/m².K และสุดท้ายคือ กรณีที่ 2 มีค่าเท่ากับ 0.788 W/m².K สามารถสังเกตได้จากตารางที่ 4.3 โดยค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Barnwal and Tiwari (2008) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.26 - 1.21 W/m².K

จากหัวข้อที่ 2.7.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการอบแห้ง พบว่าทั้งอุณหภูมิและความเร็วการไหลของอากาศเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อการอบแห้ง ซึ่งอุณหภูมิที่สูงส่งผลให้น้ำในผลิตภัณฑ์สามารถระเหยออกมาได้มากขึ้น แต่หากพิจารณาเพียงอุณหภูมิตัวแปรเดียวโดยไม่พิจารณาตัวแปรอื่นร่วมด้วย เช่น ความเร็วการไหลของอากาศ จะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการอบแห้งมีความไม่เท่ากันและเกิดเชื้อราขึ้นได้เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีการระเหยน้ำที่มากเมื่ออุณหภูมิสูง แต่มีความเร็วการไหลของอากาศที่ต่ำภายในเครื่องอบแห้ง [21,22] อีกทั้งความสม่ำเสมอของความเร็วกการไหลของอากาศ และการกระจายตัวของ

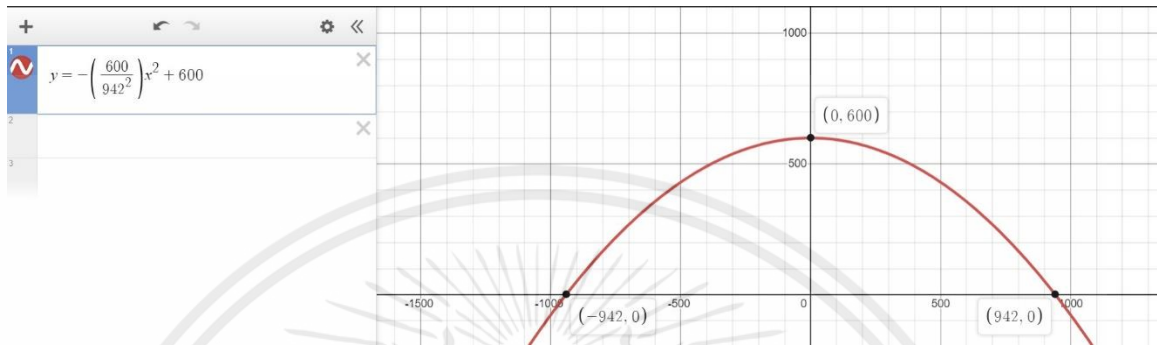
ความร้อนที่สม่ำเสมอก็ยังเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่นำมาอบแห้งใช้ระยะเวลาอบแห้งแล้วเสร็จพร้อมกัน มีการอบแห้งที่สม่ำเสมอมากขึ้น [22] ซึ่งตัวแปรที่ใช้บ่งบอกถึงความสม่ำเสมอของความเร็วการไหลของอากาศ และการกระจายตัวของความร้อน คือ Turbulence Kinetic Energy (TKE) เป็นตัวแปรเชิงปริมาณที่สามารถอธิบายถึงความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของอุณหภูมิและความเร็วของอากาศภายในแบบจำลองได้ [8] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยพบว่า TKE จะมีความสัมพันธ์กับ Heat Transfer Coefficient (HTC) พบว่ายิ่ง HTC มีค่าที่สูงจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่นำไปอบแห้งมีคุณภาพที่ดีและสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งได้ [8]

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิเฉลี่ยจากกราฟที่ 4.13 พบว่ากรณีที่ 2 ที่ความสูง 1.6 เมตร มีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 346.575 K เป็นผลให้กรณีนี้มีการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์มากที่สุด ส่งผลให้ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยลง แต่เมื่อพิจารณาร่วมกับความเร็วการไหลของอากาศจากกราฟที่ 4.3.2 พบว่ากรณีที่ 2 ที่ความสูง 1.6 เมตร มีความเร็วเฉลี่ยการไหลของอากาศภายในเครื่องอบแห้งต่ำที่สุดเท่ากับ 0.129 m/s ซึ่งเป็นผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการอบแห้งมีความไม่เท่ากัน เกิดเชื้อราขึ้นได้ อีกทั้งยังไม่สามารถควบคุมคุณภาพหลังการอบแห้งได้ และจากกราฟที่ 4.14 พบว่ากรณีที่มีค่าความเร็วเฉลี่ยของอากาศภายในแบบจำลองมากที่สุดคือกรณีที่ 1 ที่ความสูง 0.6 เมตร มีค่าเท่ากับ 0.233 m/s

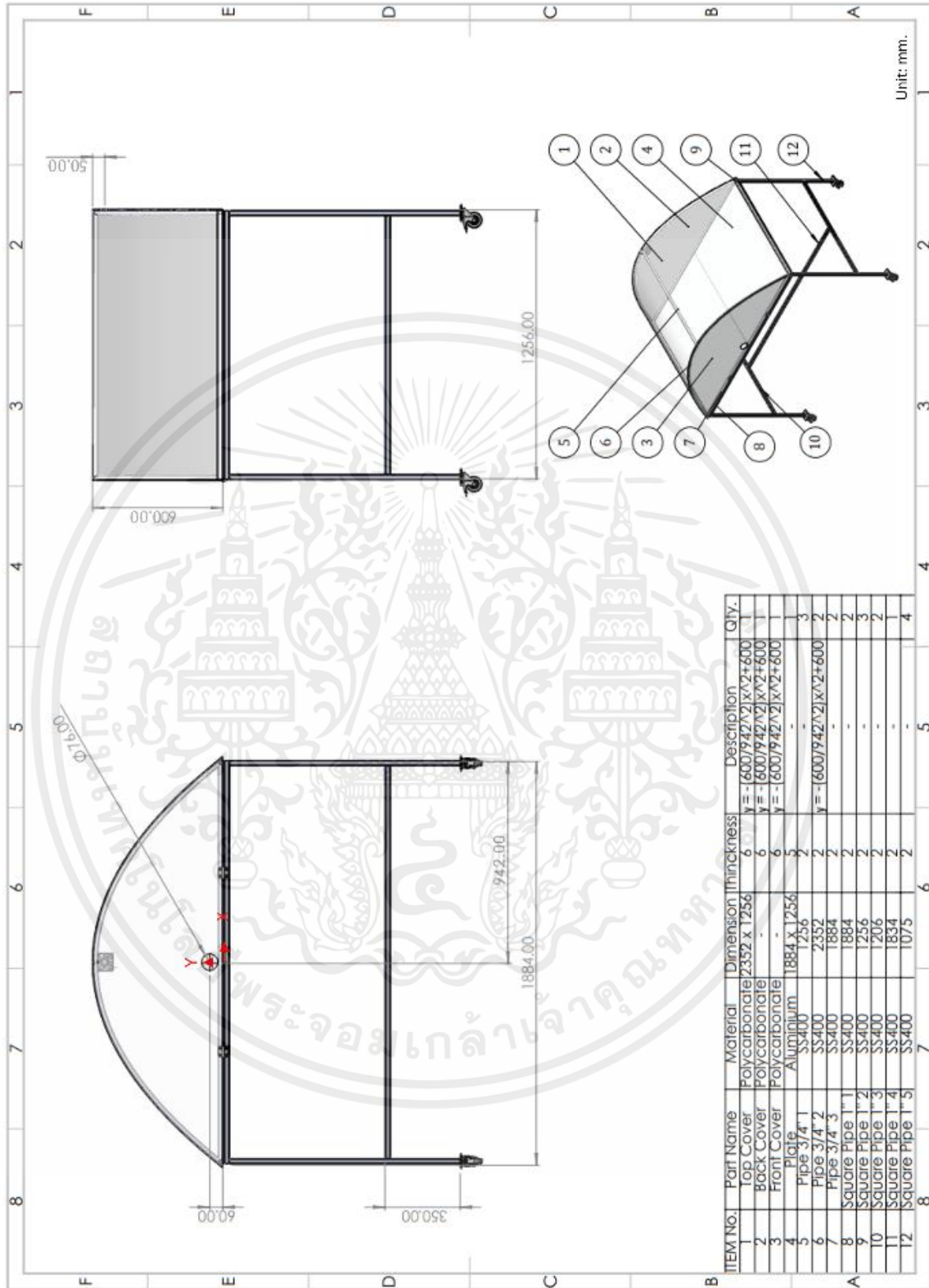
เมื่อพิจารณาถึงความสม่ำเสมอของความเร็วการไหลของอากาศ และการกระจายตัวของความร้อนภายในแบบจำลองจากกราฟที่ 4.15 พบว่ากรณีที่ 1 ที่ความสูง 0.6 เมตร TKE มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.01194 m^2/s^2 ทำให้มีความสม่ำเสมอทั้งความเร็วการไหลของอากาศและการกระจายตัวของความร้อนดีที่สุด เป็นผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการอบแห้งมีความสม่ำเสมอมากที่สุด และ HTC มีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับ TKE ซึ่งพบว่ายิ่ง HTC มีค่าที่สูงจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่นำไปอบแห้งมีคุณภาพที่ดีและสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งได้ [8] จากกราฟที่ 4.16 พบว่ากรณีที่ 1 ที่ความสูง 0.6 เมตร มีค่า HTC มากที่สุดเท่ากับ 0.957 $W/m^2.K$

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าแบบจำลองที่อัตราส่วนความกว้างต่อความยาว 1.5:1 หรือกรณีที่ 1 ที่ความสูง 0.6 เมตร มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้งผักตบชวา 10 กิโลกรัม เนื่องจากมีความเร็วเฉลี่ยของอากาศ ค่าเฉลี่ย TKE และ HTC มีค่าสูงที่สุดในทุกกรณีและทุกความสูง อีกทั้งเมื่อพิจารณาแผนภาพ Velocity Vector ที่ Plane B พบว่ามีการไหลเวียนของอากาศดีที่สุด ซึ่งมีการไหลจากทางเข้าไปทางออกโดยมีการไหลวนย้อนกลับน้อยที่สุดเป็นผลให้ความชื้นถูกระบายออกอย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการสะสมภายใน ถึงแม้ว่าที่ความสูง 0.6 เมตร จะมีอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดในทุก ๆ ความสูงก็ตาม แต่ยังเป็นอุณหภูมิที่อยู่ในช่วง

ที่แนะนำคือ 60 - 70 °C หรือ 333.15 - 343.15 K [24] และผลมาจากความเร็วการไหลของอากาศที่สูงที่สุดเป็นผลให้ผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งมีความสม่ำเสมอและคุณภาพมากที่สุด



รูปที่ 4.22 สมการเส้นโค้งของหลังคาแบบจำลองเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์



รูปที่ 4.23 ภาพฉายของแบบจำลองเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปและอภิปรายผล

จากการศึกษาปัจจัยภายในที่มีผลต่อการอบแห้งเพื่อออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกโดยใช้วิธีการจำลองพลศาสตร์ของไหลร่วมกับโมเดลการแผ่รังสี ซึ่งการจำลองเครื่องอบแห้งแบ่งเป็นทั้งหมด 18 กรณี คือ กรณีที่ 1 อัตราส่วนความกว้างต่อยาว 1.5:1 กรณีที่ 2 อัตราส่วนความกว้างต่อยาว 1:1.5 และกรณีที่ 3 อัตราส่วนความกว้างต่อยาว 1:1 ที่ความสูงตั้งแต่ 0.6, 0.7, 0.85, 1.05, 1.30 และ 1.60 เมตร โดยนำพื้นที่ที่ได้จากการคำนวณในบทที่ 3.1 สำหรับการอบแห้งผักตบชวา 10 กิโลกรัม ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.366 ตารางเมตร มาใช้ในการออกแบบแบบจำลองทั้งหมดโดยมีพื้นที่ฐานเท่ากัน เพื่อศึกษาปัจจัยภายในที่มีผลต่อการอบแห้งและวิเคราะห์ผลเพื่อหาเครื่องอบแห้งที่มีประสิทธิภาพในการอบแห้งที่ดีที่สุดเพื่อนำไปต่อยอดในการสร้างจริง โดยการจำลองใช้โมเดล SST k-epsilon model ร่วมกับ DO model ในการจำลองตั้งแต่เวลา 09:00 – 12:00 น. ของวันที่ 1 เดือนกุมภาพันธ์ ที่ละติจูด 100.7943° ลองจิจูด 13.7506° ลาดกระบัง ประเทศไทย โดยกำหนดทิศทางเข้าของอากาศให้หันหน้าไปทางทิศเหนือ และกำหนดให้พัดลมดูดอากาศออกที่ทางออก 2.5 m/s โดยในกรณีศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการอบแห้งจะแบ่งผลการวิเคราะห์เป็นกรณี ดังนี้

1. ผลของอุณหภูมิสามารถสรุปได้ว่ากรณีที่ 2 หรือที่อัตราส่วนความกว้างต่อยาว 1:1.5 ที่ความสูง 1.6 เมตร มีอุณหภูมิสูงสุด 346.575 K ซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าช่วงที่มีงานวิจัยแนะนำ 333.15 - 343.15 K [24] เพียงเล็กน้อย และอุณหภูมิมิมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของแบบจำลองเพิ่มขึ้นเป็นแนวโน้มเดียวกันทั้งหมด เป็นผลมาจากพื้นที่รับรังสีเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความชื้นที่อยู่ในผลิตภัณฑ์อาจจะสามารถระเหยออกมาได้ไวขึ้น และใช้เวลาอบแห้งที่น้อยลง
2. ผลองความเร็วเฉลี่ยสามารถสรุปได้ว่ากรณีที่ 1 หรือที่อัตราส่วนความกว้างต่อยาว 1.5:1 ที่ความสูง 0.6 เมตร มีความเร็วเฉลี่ยภายในแบบจำลองมากที่สุด 0.233 m/s เป็นผลมาจากมีปริมาตรที่น้อยที่สุดและมีการไหลวนของอากาศน้อยที่สุดซึ่งสามารถสังเกตได้จากแผนภาพ Velocity vector จากบทที่ 4.2.4 และความเร็วเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงในทุกกรณีเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น ซึ่งผลของความเร็วการไหลของอากาศที่สูงส่งผลให้ความชื้นสามารถระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ได้ไวขึ้น

และยังทำให้ไม่มีการสะสมความชื้นบริเวณผลิตภัณฑ์อันเป็นผลให้เกิดเชื้อราหรือไม่สามารถควบคุมคุณภาพให้มีความสม่ำเสมอหลังการอบแห้ง

3. ผลของ Turbulent Kinetic Energy สามารถสรุปได้ว่ากรณีที่ 1 หรือที่อัตราส่วนความกว้างต่อ ยาว 1.5:1 ที่ความสูง 0.6 เมตร มีค่า TKE มากที่สุด $0.01194 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ซึ่งสามารถใช้อธิบายถึง ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิและการไหลของอากาศ เป็นผลให้กรณีนี้จะสามารถควบคุม คุณภาพหลังการอบแห้งให้มีคุณภาพที่ดีและสม่ำเสมอมากที่สุด และยังเป็นไปตามแนวโน้ม เดียวกับงานวิจัยเมื่อลดปริมาตรของแบบจำลองจะทำให้มีความสม่ำเสมอของอุณหภูมิและการ ไหลของอากาศที่ดีขึ้น[8]
4. ผลของ Heat Transfer Coefficient สามารถสรุปได้ว่ากรณีที่ 1 หรือที่อัตราส่วนความกว้างต่อ ยาว 1.5:1 ที่ความสูง 0.6 เมตร มีค่า HTC ระหว่างผิวของแบบจำลองและอากาศ $0.957 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ โดยค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัย ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง $0.26 - 1.21 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ [3] ผลของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่สูงส่งผลให้ใช้ระยะเวลาอบแห้ง ที่น้อยลง เป็นผลมาจากมีการแลกเปลี่ยนความร้อนที่มาก

จากการจำลองเมื่อใช้ปัจจัยภายในทั้งหมดมาร่วมในการวิเคราะห์พบว่าแบบจำลองที่อัตราส่วนความ กว้างต่อความยาว 1.5:1 หรือกรณีที่ 1 ที่ความสูง 0.6 เมตร มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้ง ผักตบชวา 10 กิโลกรัม เป็นไปตามสมมติฐาน เนื่องจากมีความเร็วเฉลี่ยของอากาศ ค่าเฉลี่ย TKE และ HTC มีค่าสูงที่สุดในทุกกรณีและทุกความสูง อีกทั้งเมื่อพิจารณาแผนภาพ Velocity Vector ที่ Plane B พบว่ามีการไหลเวียนของอากาศดีที่สุด ซึ่งมีการไหลจากทางเข้าไปทางออกโดยมีการไหลวนย้อนกลับน้อย ที่สุดเป็นผลให้ความชื้นถูกระบายออกอย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการสะสมภายใน เป็นผลให้ผลิตภัณฑ์หลังการ อบแห้งมีคุณภาพที่สม่ำเสมอทั้งหมด และอุณหภูมิยังอยู่ในช่วงตามงานวิจัยแนะนำ[24] ทั้งนี้ไม่เลือกกรณี ที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดเนื่องจากอยู่นอกเหนือจากอุณหภูมิที่แนะนำ และอาจส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เกิดความ เสียหายได้ อีกทั้งเป็นกรณีนี้มีความเร็วการไหลของอากาศที่ต่ำสุด อาจส่งผลให้ความชื้นที่ระเหยออกมา จากผลิตภัณฑ์ที่มากไม่สามารถถูกถ่ายเทออกจากบริเวณผลิตภัณฑ์ได้ดีเท่ากับกรณีที่มีความเร็วการไหล ของอากาศที่มากที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่าในการก่อสร้าง กรณีที่เพิ่มความสูงเพิ่มขึ้นอาจไม่มี ความคุ้มค่า เนื่องจากมีบริเวณว่างด้านบนที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์จำนวนมาก แต่หากมีการทำชั้นวาง ผลิตภัณฑ์หลายชั้นก็จะทำให้สามารถควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ได้ยากขึ้น เป็นเรื่องที่ต้องทำการศึกษา เพิ่มเติม ดังนั้นสรุปได้ว่ากรณีที่ 1 หรือที่อัตราส่วนความกว้างต่อยาว 1.5:1 ที่ความสูง 0.6 เมตร มี ประสิทธิภาพการอบแห้งที่ดีที่สุดและสามารถนำไปต่อยอดในการสร้างจริง

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การทดลองนี้เป็นการจำลองภายใต้ผลของโดเมนอากาศแห้งซึ่งไม่ได้ทำการจำลองภายใต้ผลของโดเมนความชื้น ดังนั้นการพิจารณาผลการทดลองนี้เป็นเพียงการพิจารณาการไหลของอากาศ และการกระจายตัวของอุณหภูมิเท่านั้น หากสามารถทำการกำหนดให้โดเมนของอากาศเป็นอากาศชื้นได้จะทำให้สามารถพิจารณาผลการทดลองได้สมจริงและใช้ความชื้นสัมพัทธ์ในการร่วมสรุปผลการทดลองได้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย

5.2.2 การทดลองเป็นการจำลองโดยที่ไม่ได้มีการสร้างแบบจำลองของผลิตภัณฑ์ไว้ในแบบจำลองแต่ทำการกำหนดให้ฐานเป็น load ในการรับพลังงานแทน นอกจากนี้หากสามารถสร้างแบบจำลองผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นอยู่ภายในได้ก็จะสามารถพิจารณาถึงปัจจัยของความชื้นที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ได้ ซึ่งมีความสมจริงมากยิ่งขึ้น และสามารถใช้ความชื้นสัมพัทธ์ภายในแบบจำลองเป็นตัวตัดสินกรณีที่ดีที่สุดได้ด้วยเช่นกัน

5.2.3 ควรใช้ข้อมูลผลของอุณหภูมิเฉลี่ยจากเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ต้นแบบอย่างน้อย 1 กรณีเพื่อใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของการจำลอง หรือตรวจสอบความถูกต้องของความไม่เป็นอิสระทางกริด

5.2.4 ควรกำหนด time step ให้ละเอียดยิ่งขึ้นเพื่อความถูกต้องของผลการจำลอง แต่เนื่องจากทรัพยากรคอมพิวเตอร์ของผู้ทดลองมีจำกัดจึงเลือกใช้ time step = 30

เอกสารอ้างอิง

- [1] A.E, G., & Amangabara, G. (2013). Estimating Macrophyte Load for Water Hyacinth in Kolo Creek, Niger Delta. *International Journal of Ecosystem*, 3, 7-11.
<https://doi.org/10.5923/j.jje.20130301.02>
- [2] Ali, H. Ali Nikbahkt, M. Zachary, W. Prasad, Y. Sabrina, F. Azharul, K., (2022). Experimental and thermodynamic analysis of solar air dryer equipped with V-groove double pass collector: Techno-economic and exergetic measures. *Energy Conversion and Management*: X.
- [3] Barnwal, P. and G. N. Tiwari (2008). "Grape drying by using hybrid photovoltaic-thermal (PV/T) greenhouse dryer: An experimental study." *Solar Energy* **82**(12): 1131-1144.
- [4] Colorado, A., Morales, O., Ossa, D., Amell, A., & Chica, E. (2022). Modeling the optimal condition for drying rumen contents using a solar greenhouse dryer. *Case Studies in Thermal Engineering*, 30, 101678.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101678>
- [5] Duong, Y. H. P., Vo, N. T., Le, P. T. K., & Tran, V. T. (2021). Three-Dimensional Simulation of Solar Greenhouse Dryer. *Chemical Engineering Transactions*, 83, 211-216.
<https://doi.org/10.3303/CET2183036>
- [6] Janjai, S. (2012). A greenhouse type solar dryer for small-scale dried food industries: Development and dissemination. *Int J Energy Environ*, 3.
- [7] Janjai, S., Khamvongsa, V., & Bala, B. K. (2007). Development, design, and performance of a PV-Ventilated greenhouse dryer. *International Energy Journal*, 8, 249-258.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1290>
- [8] Nicolás-Iván, R.-R., A. L.O, J.-F. Ituna-Yudonago, O. García-Valladares and I. Pilatowsky (2019). "Computational fluid dynamics analysis of heat transfer in a greenhouse solar dryer "chapel-type" coupled to an air solar heating system." *Energy Science & Engineering* **7**.
- [9] Niroka, P., Panprayun, G., & Peerakiatkhajohn, P. (2022). Performance of a Solar Greenhouse Dryer for Water Hyacinth. *International Energy Journal*, 22, 167-176.

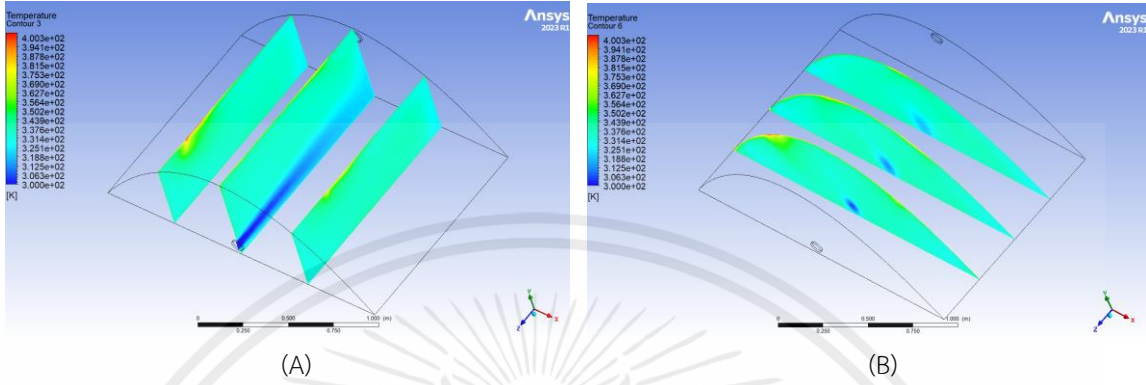
- [10] Pankaew, P., Aumporn, O., Janjai, S., Mundpookhiew, T., & Bala, B. K. (2019). Performance of parabolic greenhouse solar dryer equipped with rice husk burning system for banana drying. *Journal of Renewable Energy and Smart Grid Technology*, 14.
- [11] กาญจนา จันทร์สิงห์. (10 ตุลาคม 2563). ผักตบชวา. สำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร.
https://arit.kpru.ac.th/ap2/local/?nu=pages&page_id=1704&code_db=610010&code_type=01
- [12] การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์. (26 เมษายน 2565). อยากรู้พลังงานแสงอาทิตย์.com.
<https://shorturl.asia/cgh7H>
- [13] ฐานข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์ในประเทศไทย. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.
<https://maps.su.ac.th/solarth/>
- [14] ดร.นิธิยา รัตนานพนธ์ และ ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ (ม.ป.ป.). อัตราการทำแห้ง. Food Network Solution ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหาร.
<https://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0663/drying-rate>
- [15] นพพล เกตุประสาท. (ม.ป.ป.). ผักตบชวา. หน่วยอนุรักษ์และใช้ประโยชน์พืชพรรณ ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยและเรือนปลูกพืชทดลอง คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต กำแพงแสน จ.นครปฐม. <http://clgc.agri.kps.ku.ac.th/resources/weed/eichornia.html>
- [16] ประพันธ์พงษ์ สมศิลา และคณะ (2555). ขนาดของโรงเรือนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการไหลเวียนและอุณหภูมิของอากาศภายในโรงเรือนเครื่องอบแห้งยางพาราพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดหลังคาหน้าจั่วสามเหลี่ยม. *Agricultural Sci. J.*
<https://www.phtnet.org/download/phtic-seminar/1093.pdf>
- [17] ประพันธ์พงษ์ สมศิลา และคณะ (2555). ชนิดโครงสร้างของโรงเรือนที่มีผลต่อการไหลเวียนและอุณหภูมิของอากาศภายในโรงเรือนอบแห้งแสงอาทิตย์. *Agricultural Sci. J.*
<https://www.phtnet.org/download/phtic-seminar/1093.pdf>
- [18] ผักตบชวา วัสดุกันกระแทกชั้นดี นำมาตากแห้ง ยอดขายปังถึงหลักล้าน. (28 มกราคม 2565).เส้นทางเศรษฐกิจออนไลน์.
https://www.sentangsedtee.com/farming-trendy/article_181209

- [19] วสันต์ จินธาดา และ พรชัย เพชรสงคราม (2559). ลักษณะรูปทรงของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ส่งผลต่อการอบแห้งยางพาราแผ่น. The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok. <https://doi.org/10.14416/j.kmutnb.2016.03.007>
- [20] อนสรณ์ สุขเกษม. (2550). การศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนโดยการพาของครีบทรงทรงกระบอก. http://thesis.swu.ac.th/swuthesis/Mech_Eng/Anusorn_S.pdf
- [21] เสริม จันทร์ฉาย. (2560a). เทคโนโลยีการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ Solar drying technology. บริษัท เพชรเกษมพรีนติ้ง จำกัด หน่วยงานวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [22] Wuttikid, K., S. Promdan, M. Rakyat, A. Hokpunna, T. Chungcharoen, N. Ruttanadech, P. Yeunyongkul, C. Chaichana, A. P. N. Nuntapap, P. Srichai and R. Munsin (2021). "Study of air distribution in tray dryer using computational fluid dynamics." 684-693.
- [23] ANSYS, Inc. (2013) "ANSYS Fluent theory guide"
- [24] R. Abalone, A. Cassinera, A. Gaston, and M. A. Lara, "Some physical properties of amaranth seeds," Biosystems Engineering, vol. 89, no. 1, pp. 109–117, 2004.

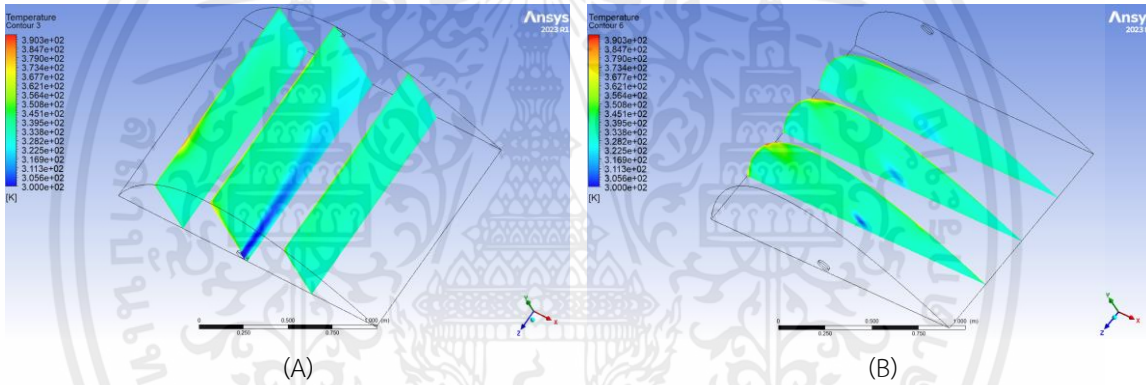


1. Temperature Contour

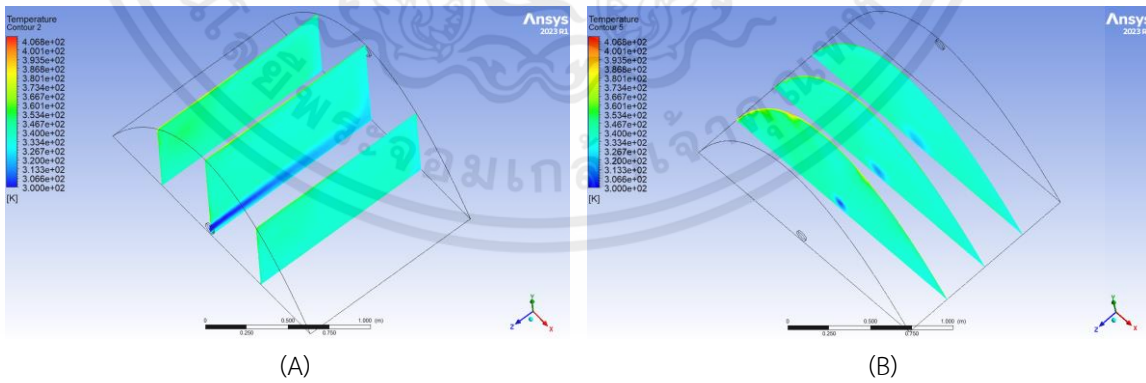
1.1 กรณีที่ 1 ที่มีพื้นที่ฐาน 1.884×1.256 เมตร



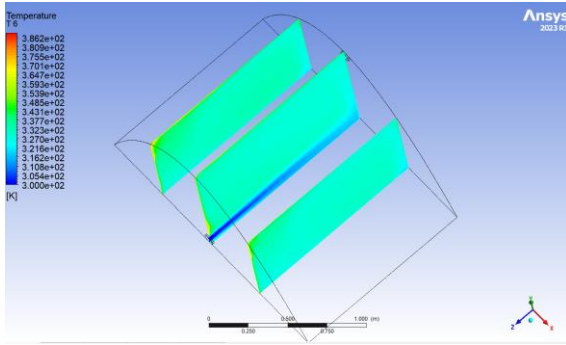
แสดงแผนภาพ Temperature contour ที่ความสูง 0.6 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane



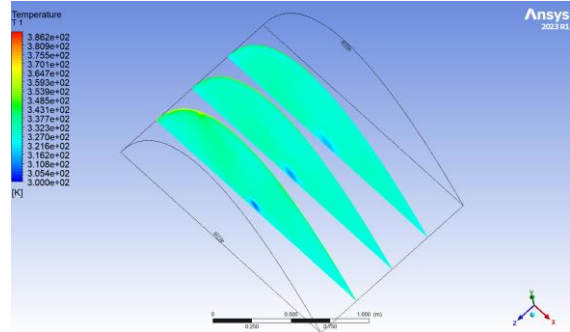
แสดงแผนภาพ Temperature contour ที่ความสูง 0.7 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane



แสดงแผนภาพ Temperature contour ที่ความสูง 0.85 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane

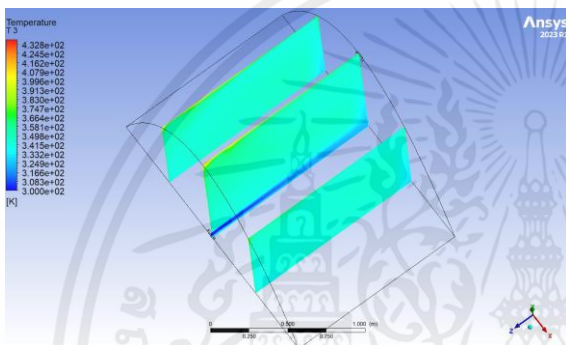


(A)

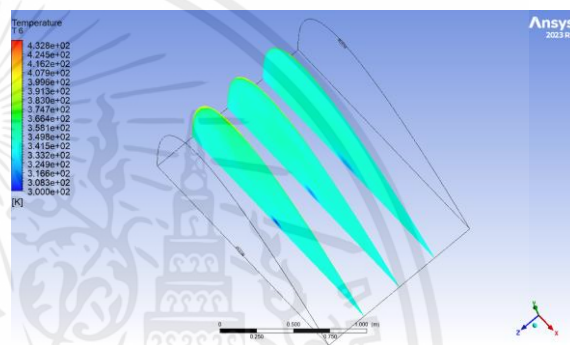


(B)

แสดงแผนภาพ Temperature contour ที่ความสูง 1.05 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane

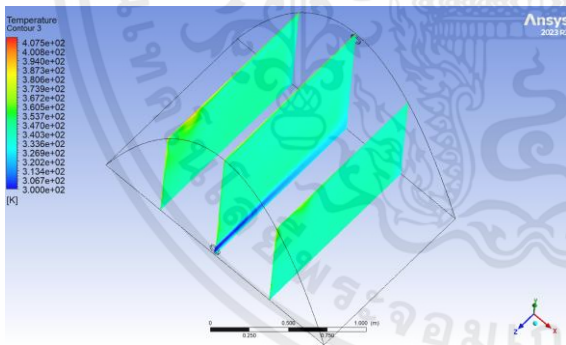


(A)

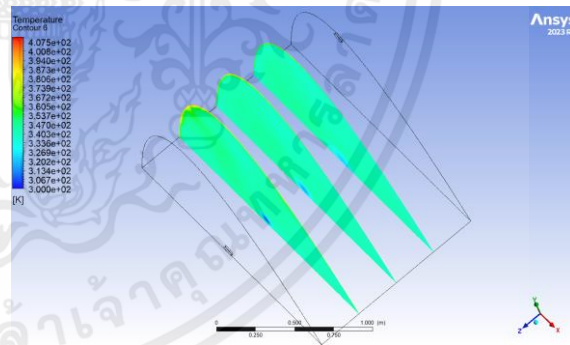


(B)

แสดงแผนภาพ Temperature contour ที่ความสูง 1.3 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane



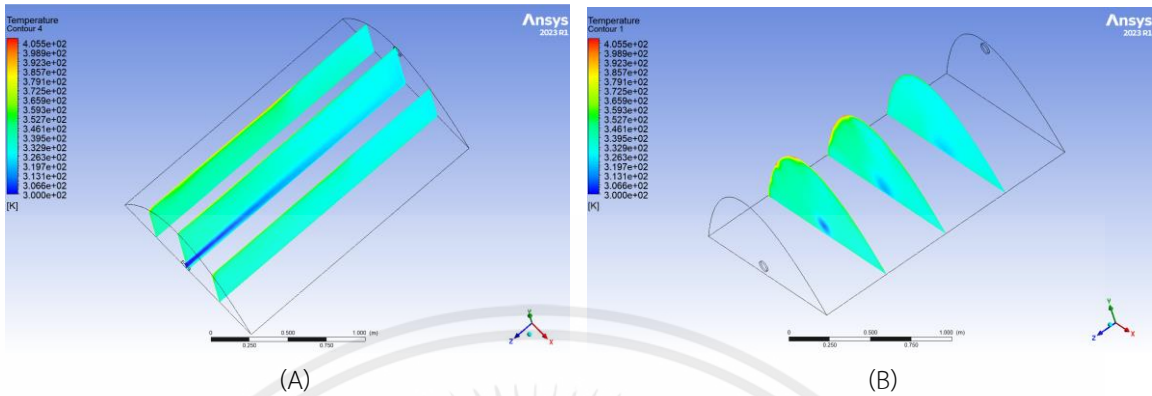
(A)



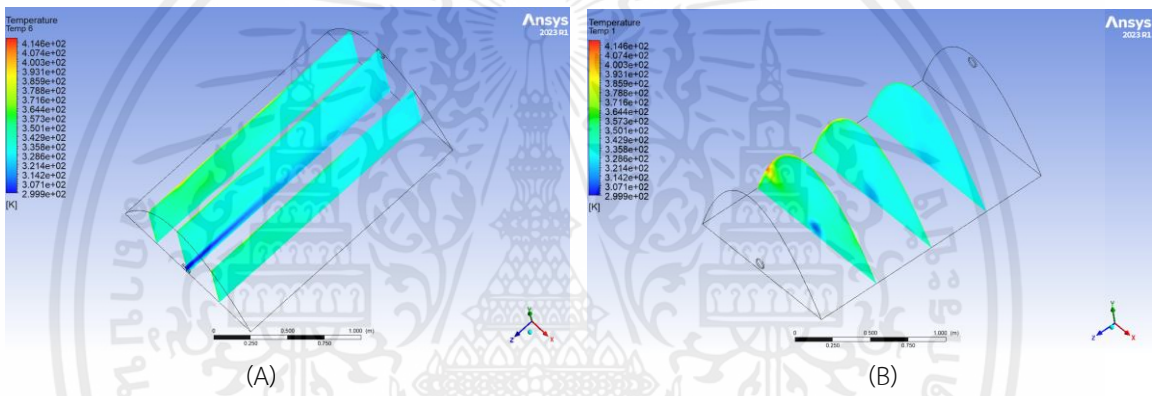
(B)

แสดงแผนภาพ Temperature contour ที่ความสูง 1.6 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane

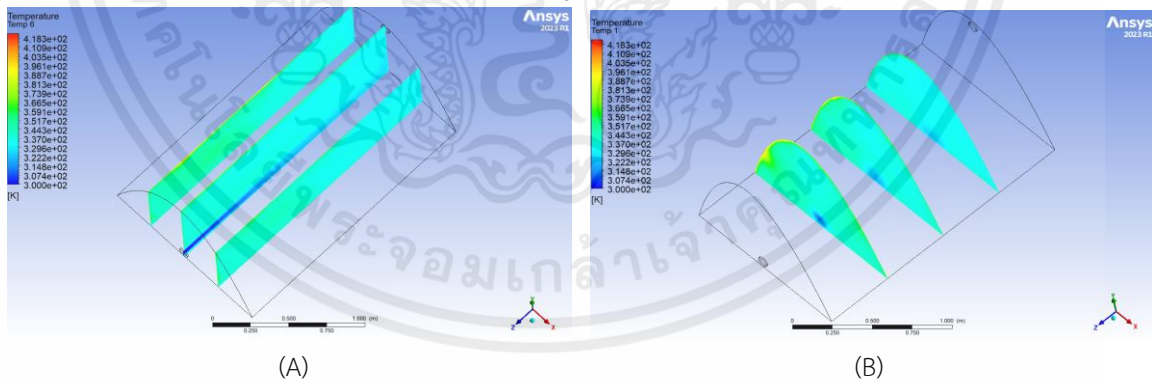
1.2 กรณีที่ 2 ที่มีพื้นที่ฐาน 1.256 × 1.884 เมตร



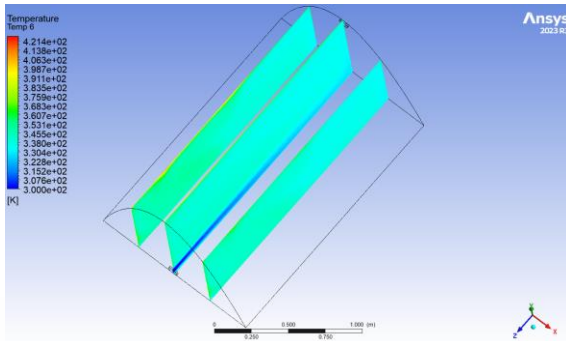
แสดงแผนภาพ Temperature contour ที่ความสูง 0.6 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane



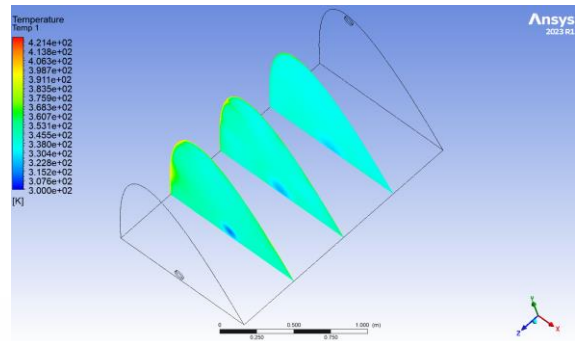
แสดงแผนภาพ Temperature contour ที่ความสูง 0.7 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane



แสดงแผนภาพ Temperature contour ที่ความสูง 0.85 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane

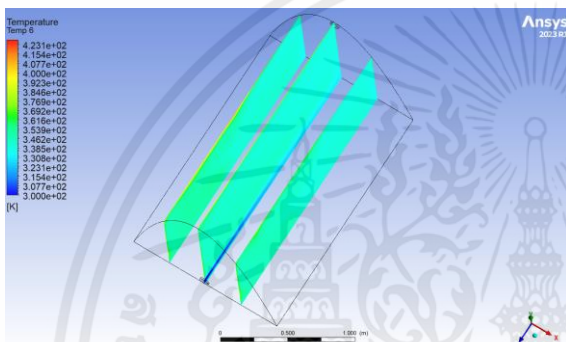


(A)

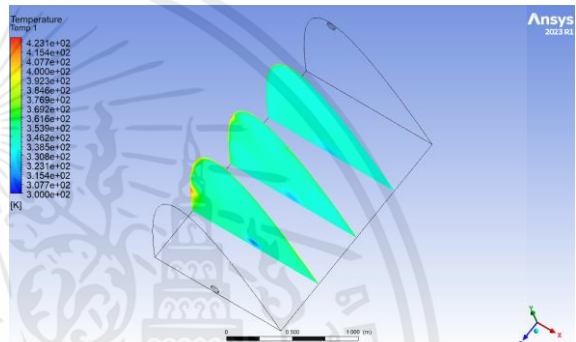


(B)

แสดงแผนภาพ Temperature contour ที่ความสูง 1.05 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane

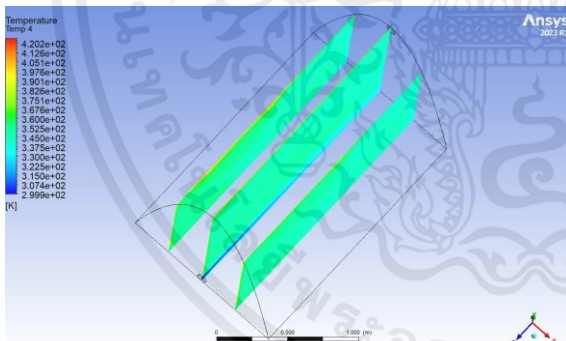


(A)

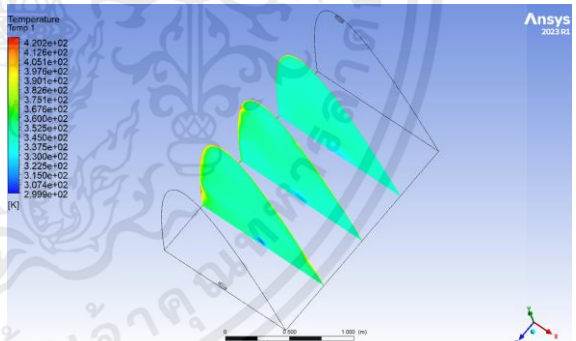


(B)

แสดงแผนภาพ Temperature contour ที่ความสูง 1.3 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane



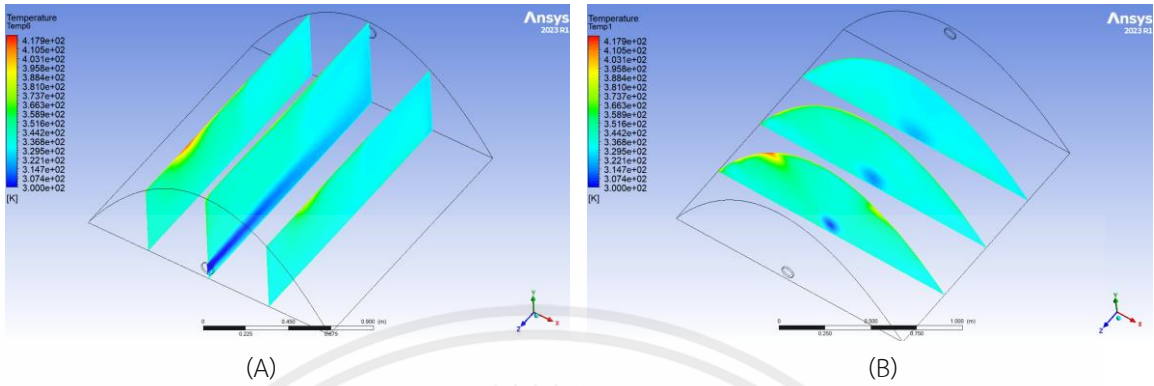
(A)



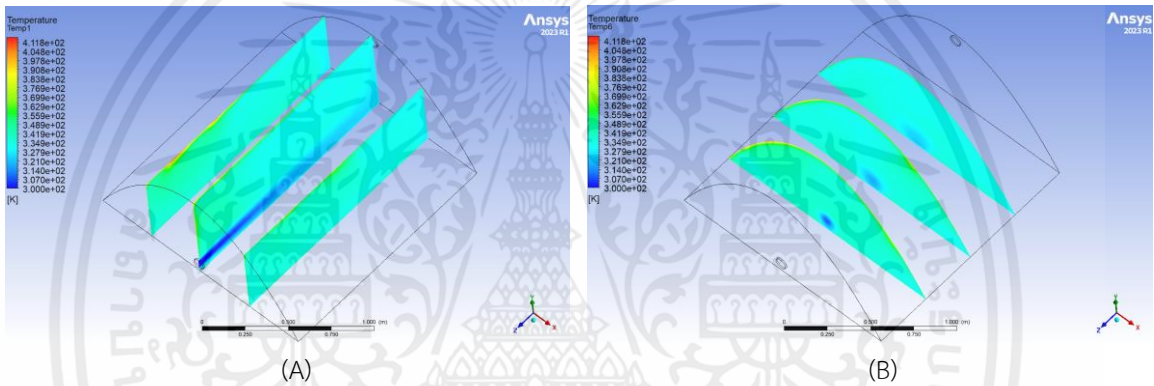
(B)

แสดงแผนภาพ Temperature contour ที่ความสูง 1.6 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane

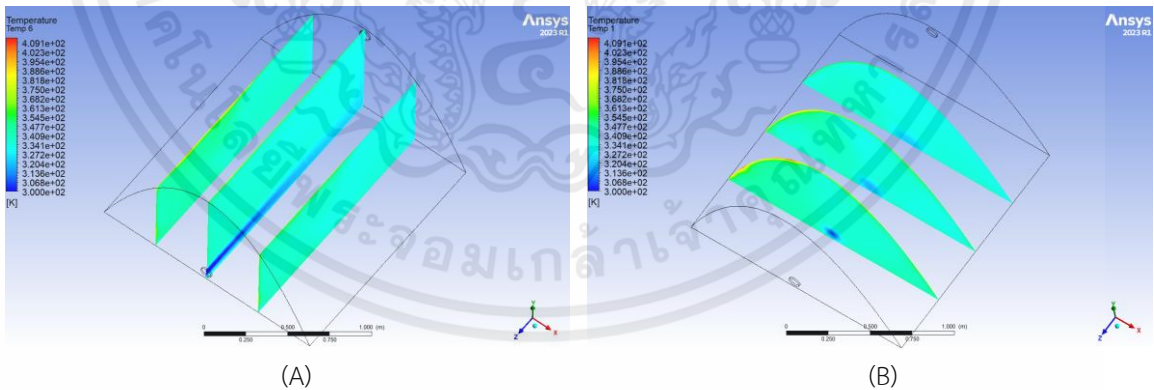
1.3 กรณีที่ 3 ที่มีพื้นที่ฐาน 1.538 x 1.538 เมตร



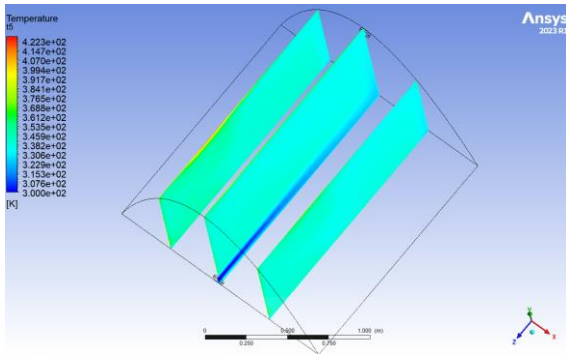
แสดงแผนภาพ Temperature contour ที่ความสูง 0.6 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane



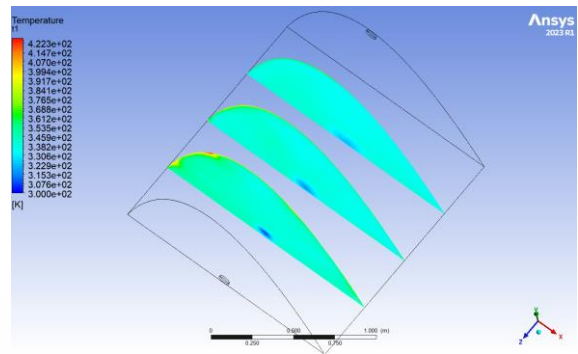
แสดงแผนภาพ Temperature contour ที่ความสูง 0.7 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane



แสดงแผนภาพ Temperature contour ที่ความสูง 0.85 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane

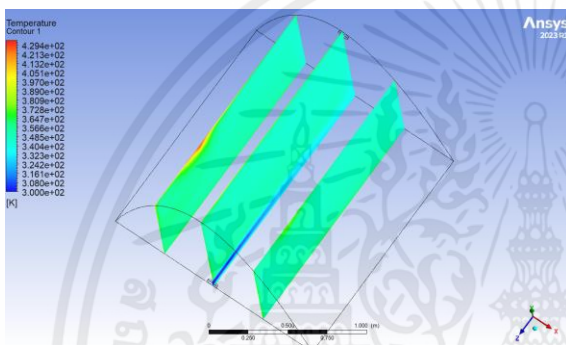


(A)

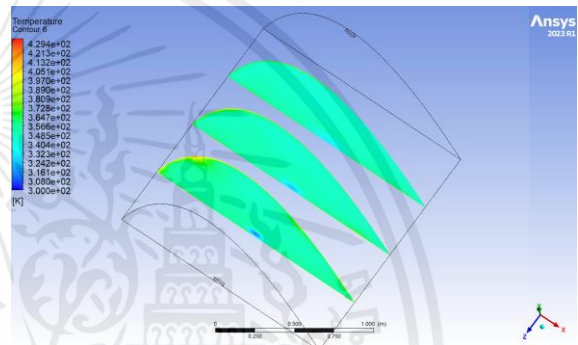


(B)

แสดงแผนภาพ Temperature contour ที่ความสูง 1.05 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane

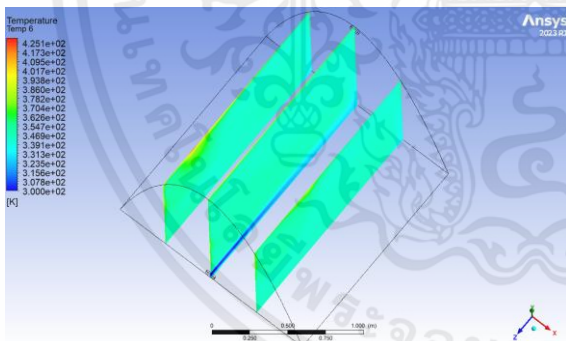


(A)

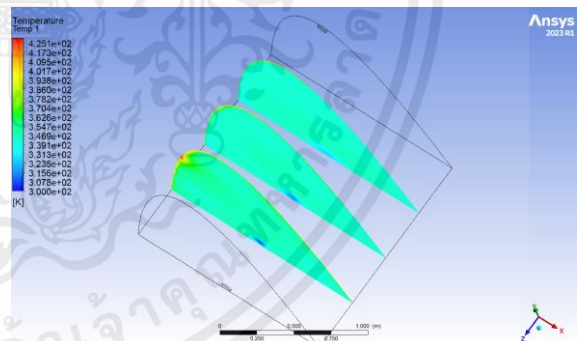


(B)

แสดงแผนภาพ Temperature contour ที่ความสูง 1.3 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane



(A)

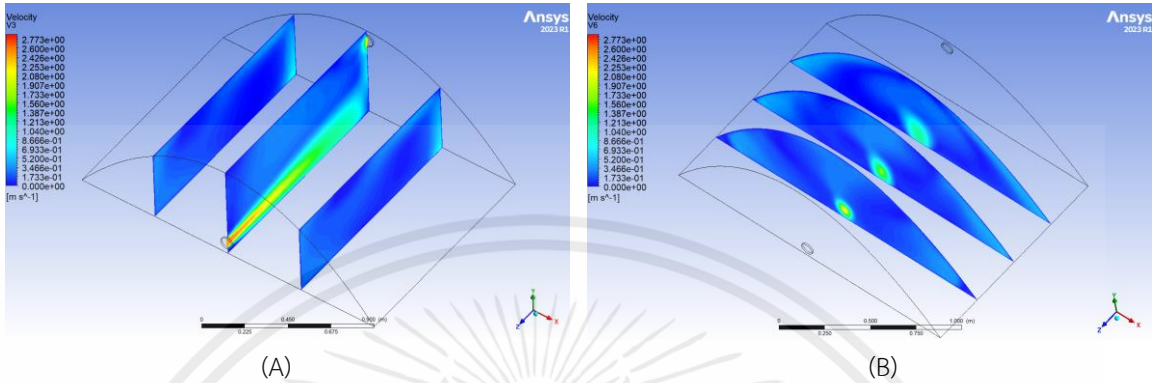


(B)

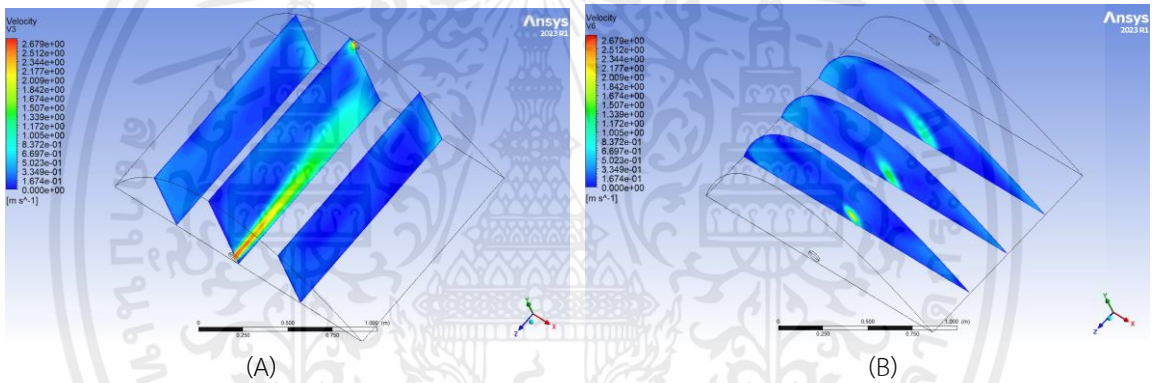
แสดงแผนภาพ Temperature contour ที่ความสูง 1.6 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane

2. Velocity contour

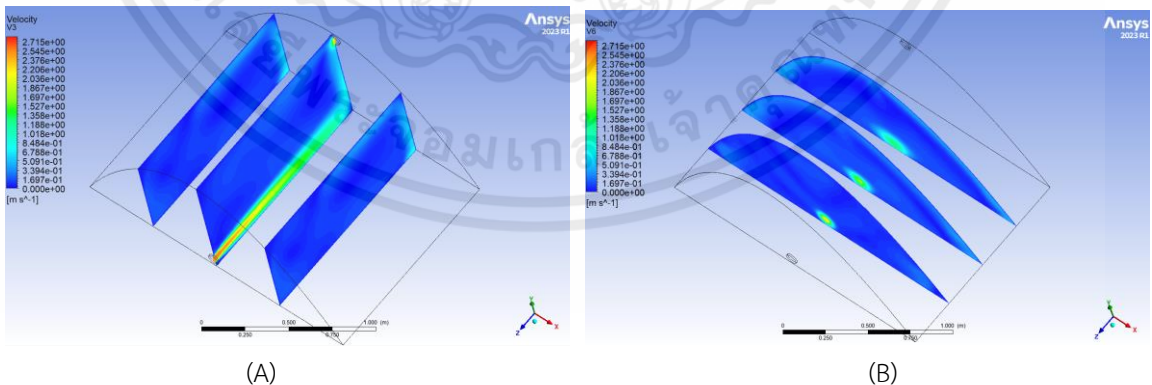
2.1 กรณีที่ 1 ที่มีพื้นที่ฐาน 1.884×1.256 เมตร



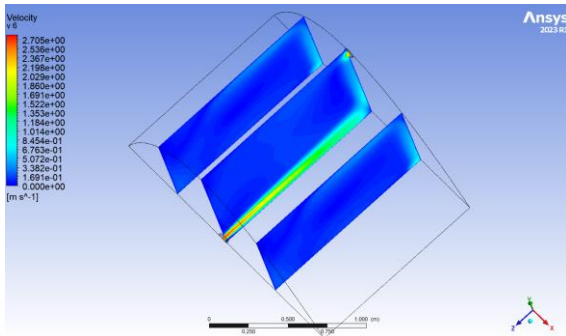
แสดงแผนภาพ Velocity contour ที่ความสูง 0.6 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane



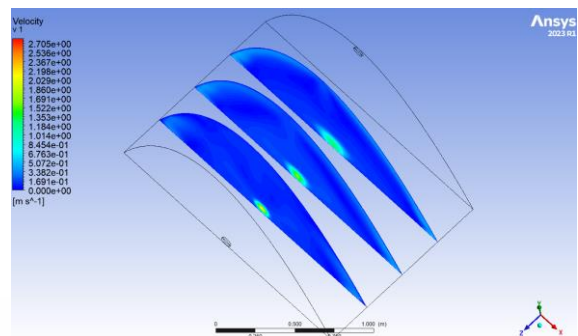
แสดงแผนภาพ Velocity contour ที่ความสูง 0.7 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane



แสดงแผนภาพ Velocity contour ที่ความสูง 0.85 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane

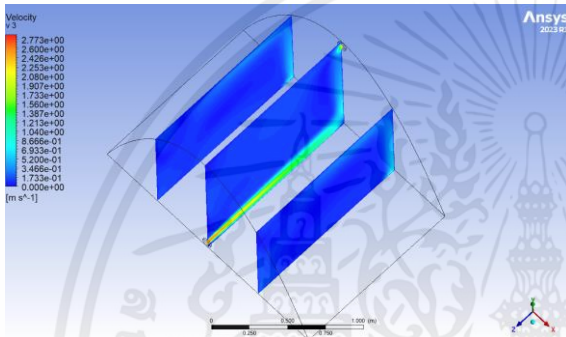


(A)

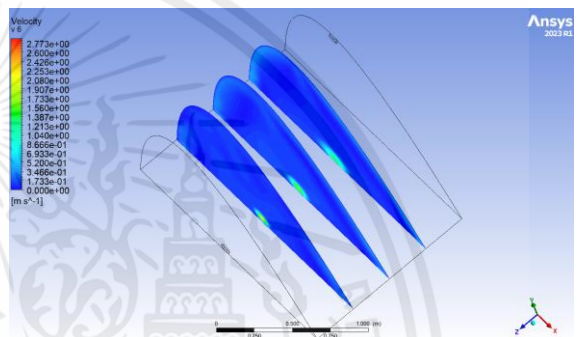


(B)

แสดงแผนภาพ Velocity contour ที่ความสูง 1.05 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane

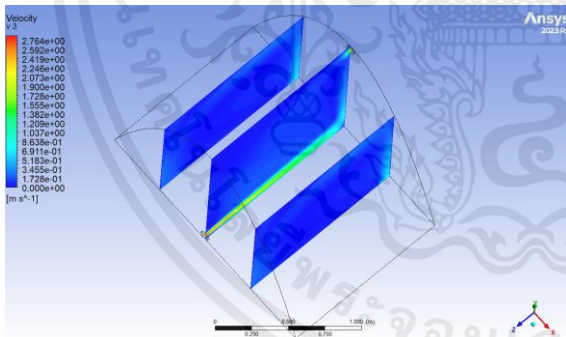


(A)

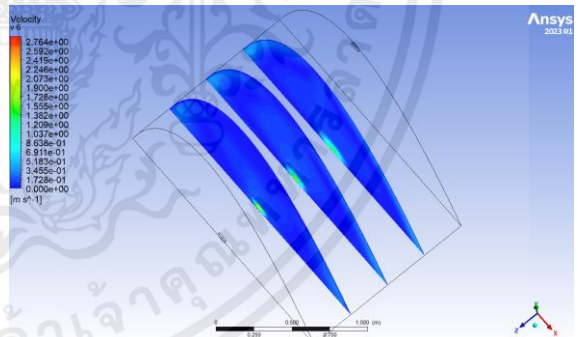


(B)

แสดงแผนภาพ Velocity contour ที่ความสูง 1.3 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane



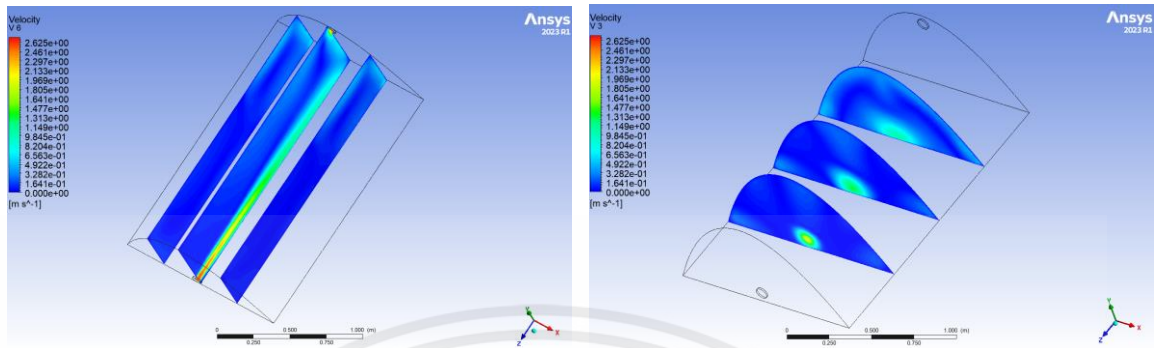
(A)



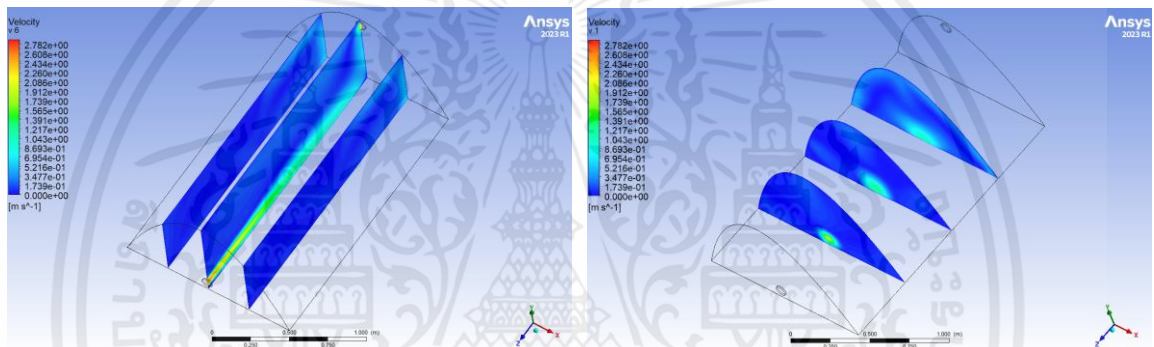
(B)

แสดงแผนภาพ Velocity contour ที่ความสูง 1.6 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane

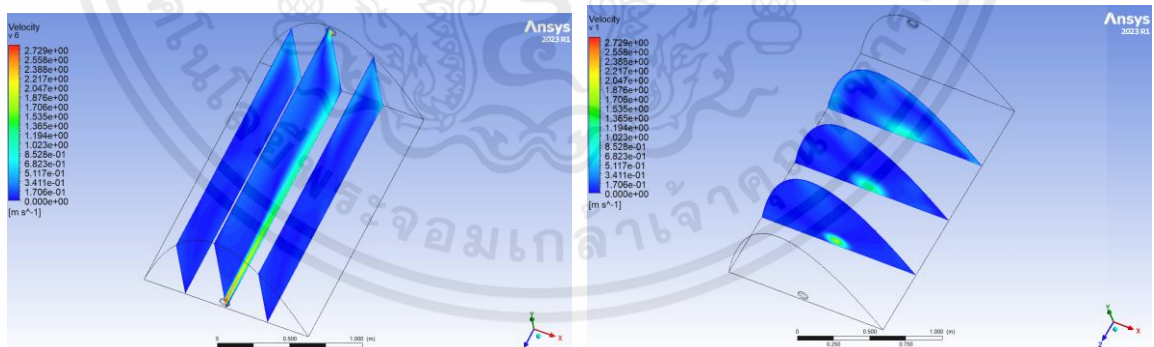
2.2 กรณีที่ 2 ที่มีพื้นที่ฐาน 1.256×1.884 เมตร



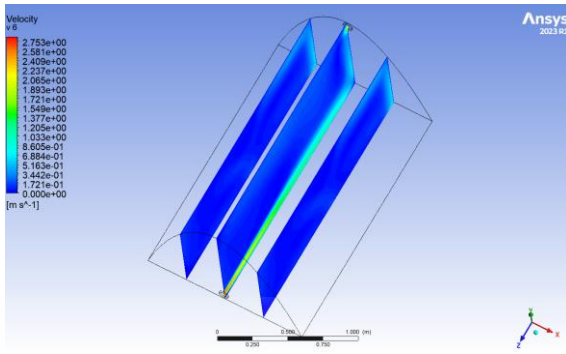
(A) (B)
แสดงแผนภาพ Velocity contour ที่ความสูง 0.6 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane



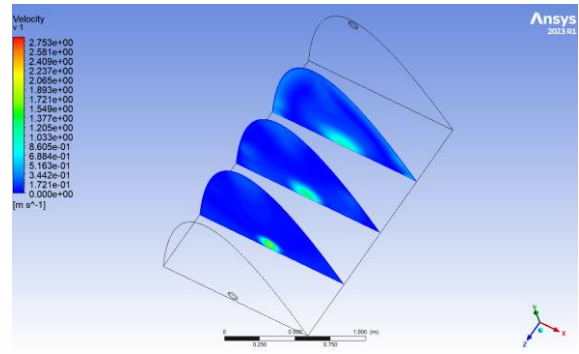
(A) (B)
แสดงแผนภาพ Velocity contour ที่ความสูง 0.7 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane



(A) (B)
แสดงแผนภาพ Velocity contour ที่ความสูง 0.85 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane

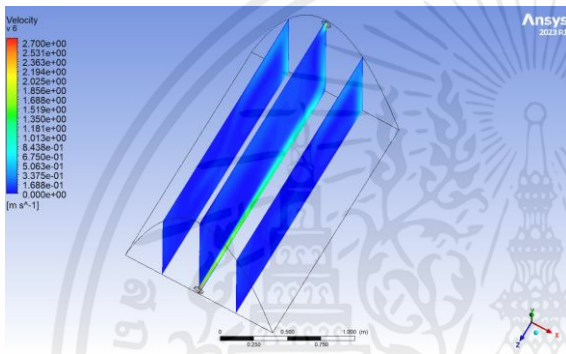


(A)

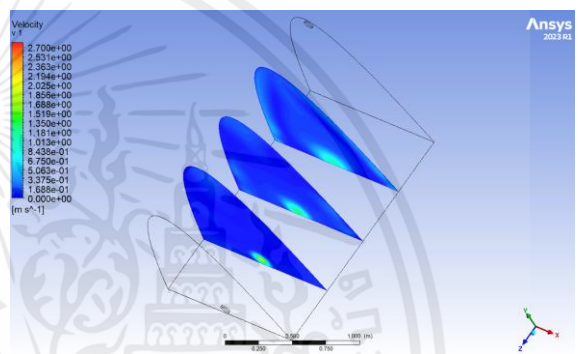


(B)

แสดงแผนภาพ Velocity contour ที่ความสูง 1.05 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane

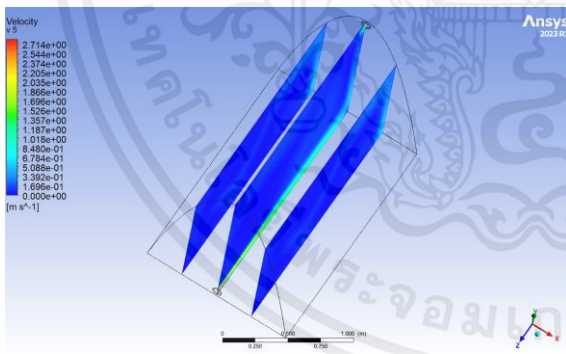


(A)

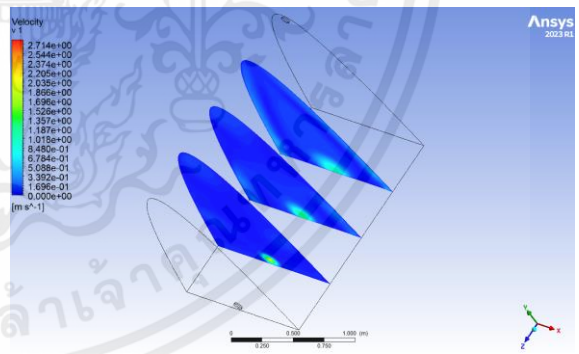


(B)

แสดงแผนภาพ Velocity contour ที่ความสูง 1.3 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane



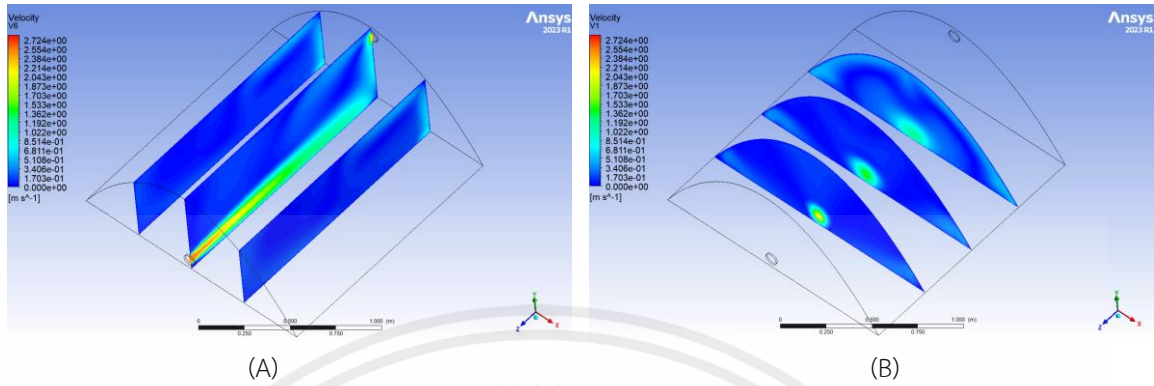
(A)



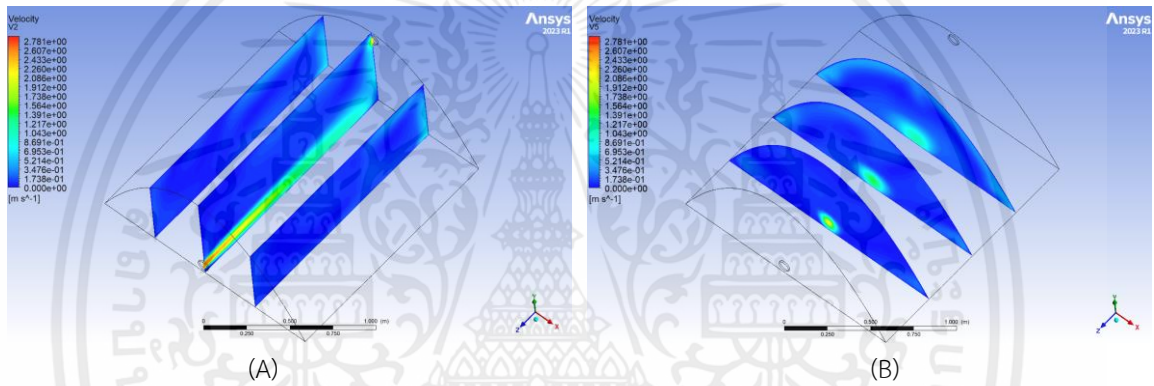
(B)

แสดงแผนภาพ Velocity contour ที่ความสูง 1.6 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane

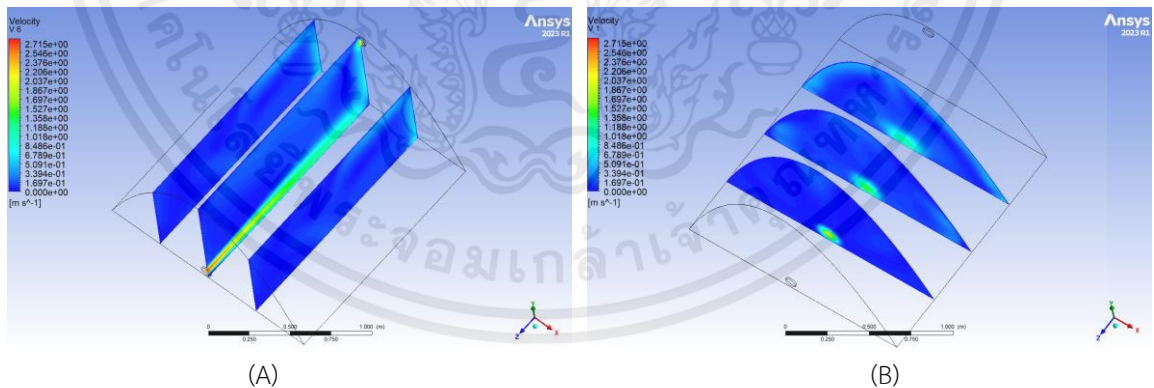
2.3 กรณีที่ 3 ที่มีพื้นที่ฐาน 1.538×1.538 เมตร



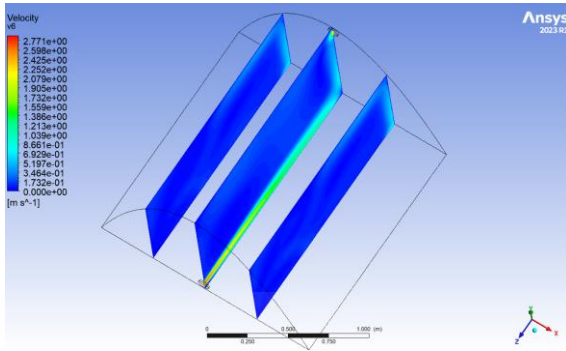
แสดงแผนภาพ Velocity contour ที่ความสูง 0.6 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane



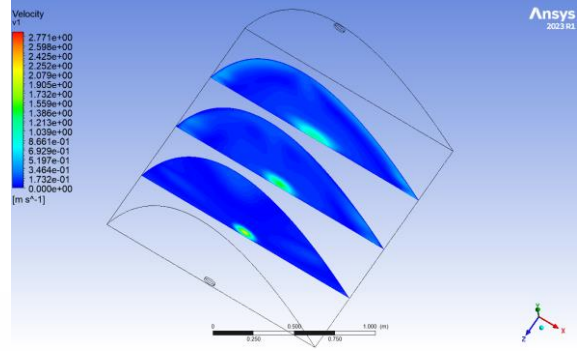
แสดงแผนภาพ Velocity contour ที่ความสูง 0.7 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane



แสดงแผนภาพ Velocity contour ที่ความสูง 0.85 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane

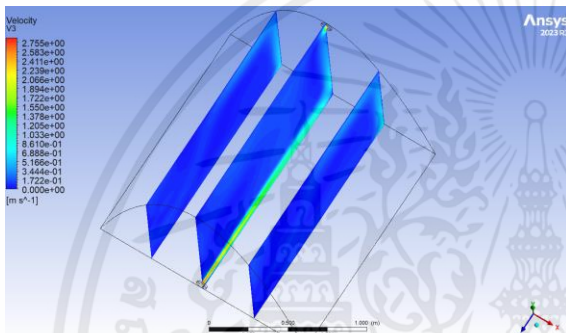


(A)

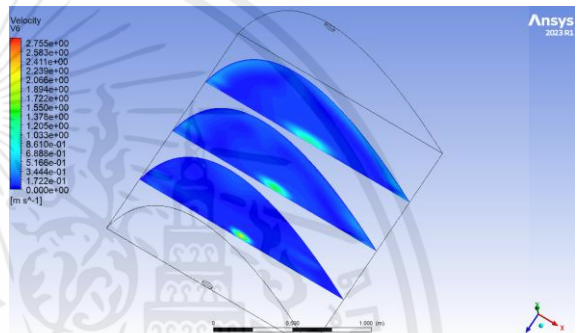


(B)

แสดงแผนภาพ Velocity contour ที่ความสูง 1.05 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane

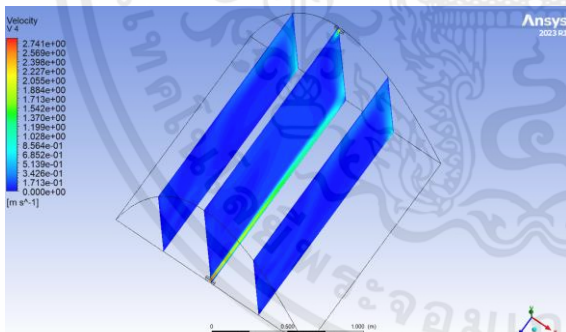


(A)

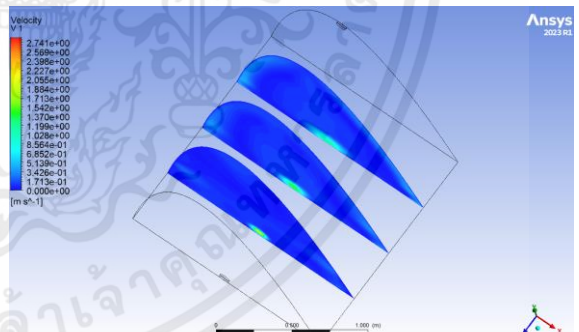


(B)

แสดงแผนภาพ Velocity contour ที่ความสูง 1.3 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane



(A)

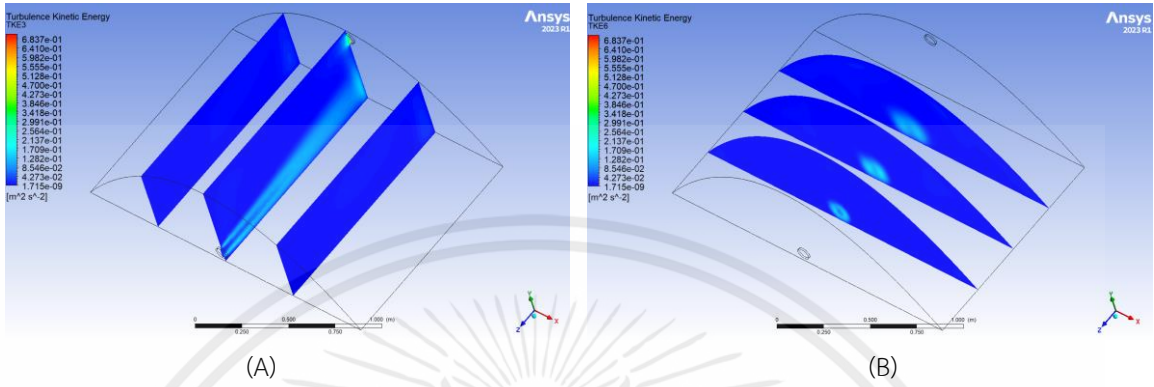


(B)

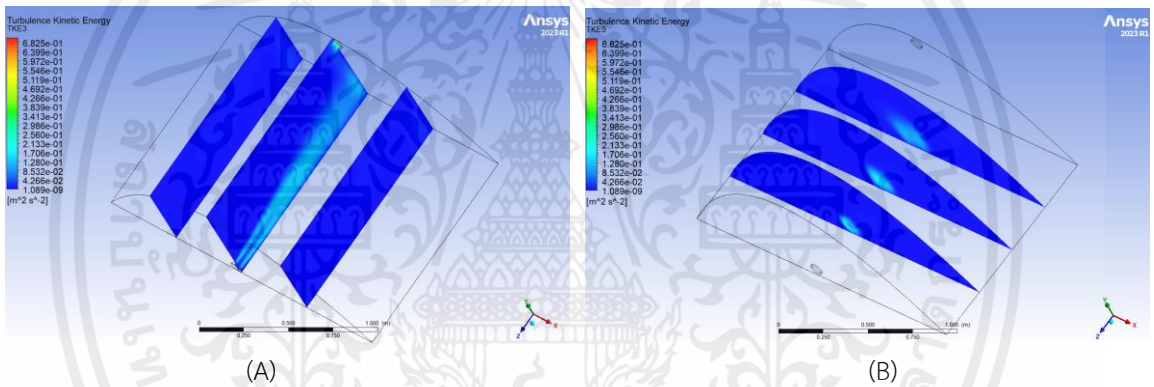
แสดงแผนภาพ Velocity contour ที่ความสูง 1.6 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane

3. Turbulence kinetic energy contour

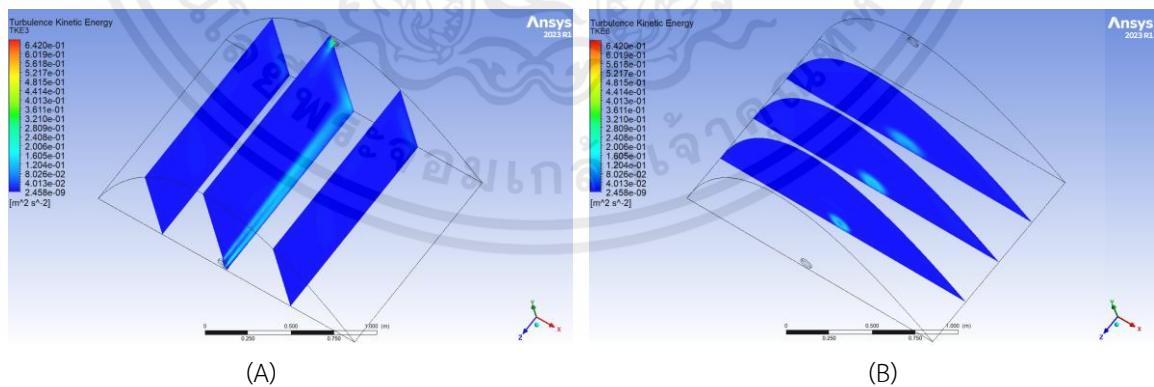
3.1 กรณีที่ 1 ที่มีพื้นที่ฐาน 1.884×1.256 เมตร



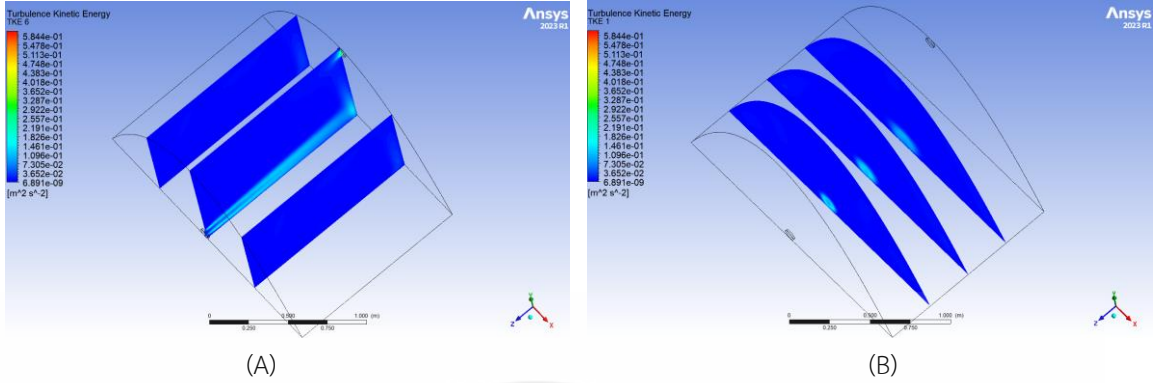
แสดงแผนภาพ TKE contour ที่ความสูง 0.6 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane



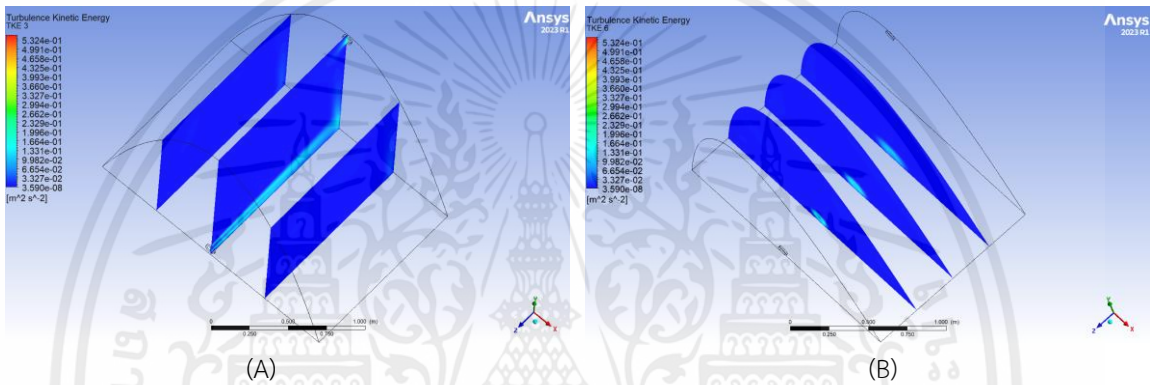
แสดงแผนภาพ TKE contour ที่ความสูง 0.7 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane



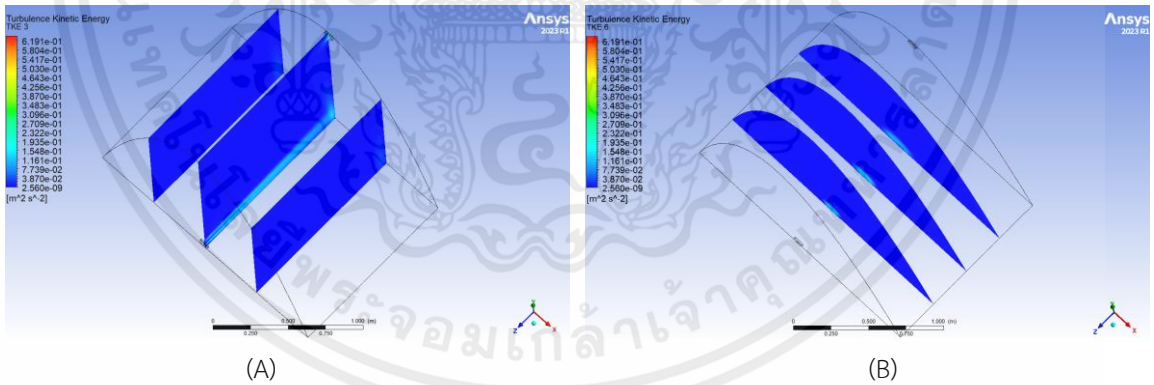
แสดงแผนภาพ TKE contour ที่ความสูง 0.85 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane



แสดงแผนภาพ TKE contour ที่ความสูง 1.05 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane

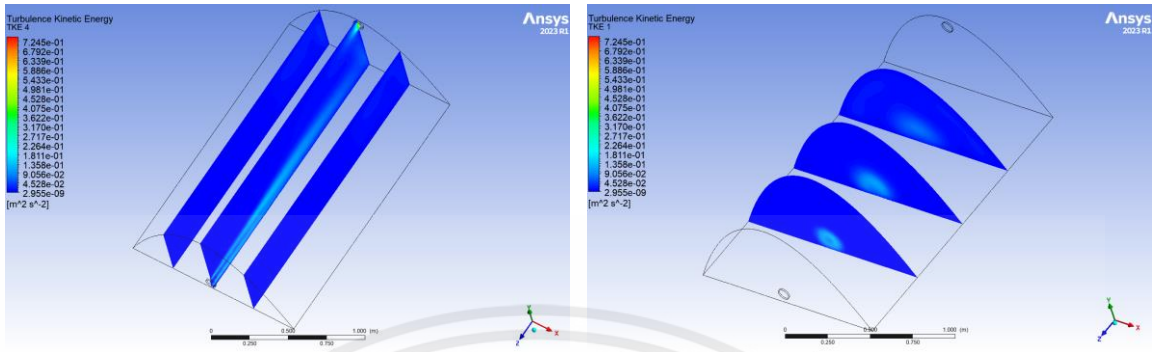


แสดงแผนภาพ TKE contour ที่ความสูง 1.3 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane



แสดงแผนภาพ TKE contour ที่ความสูง 1.6 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane

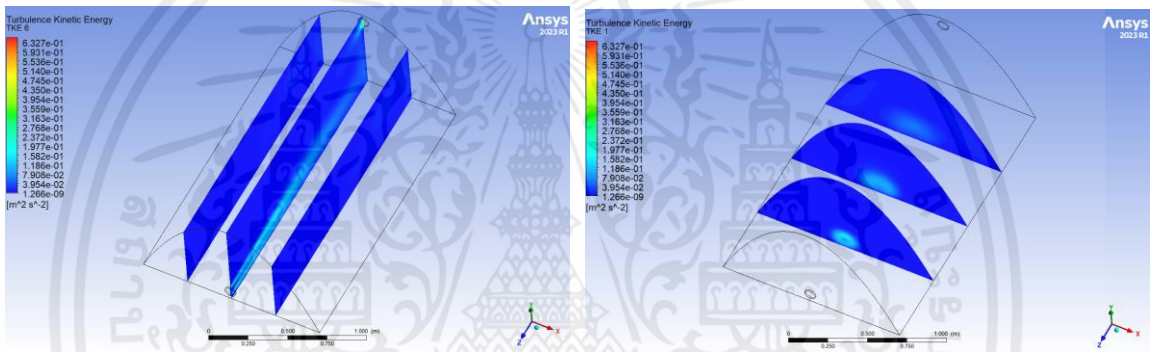
3.2 กรณีที่ 2 ที่มีพื้นที่ฐาน 1.256×1.884 เมตร



(A)

(B)

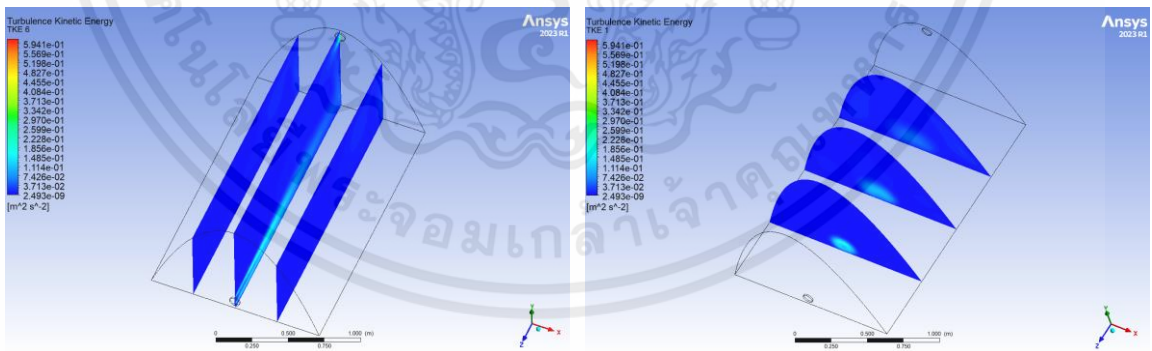
แสดงแผนภาพ TKE contour ที่ความสูง 0.6 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane



(A)

(B)

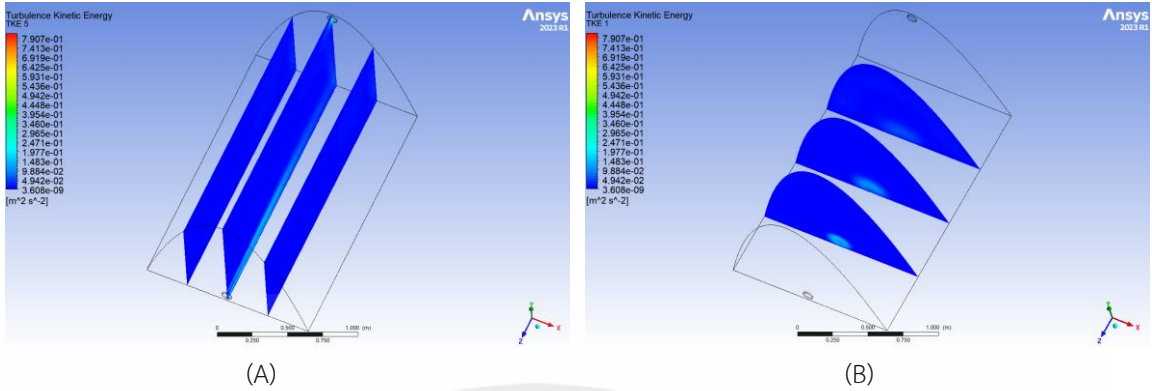
แสดงแผนภาพ TKE contour ที่ความสูง 0.7 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane



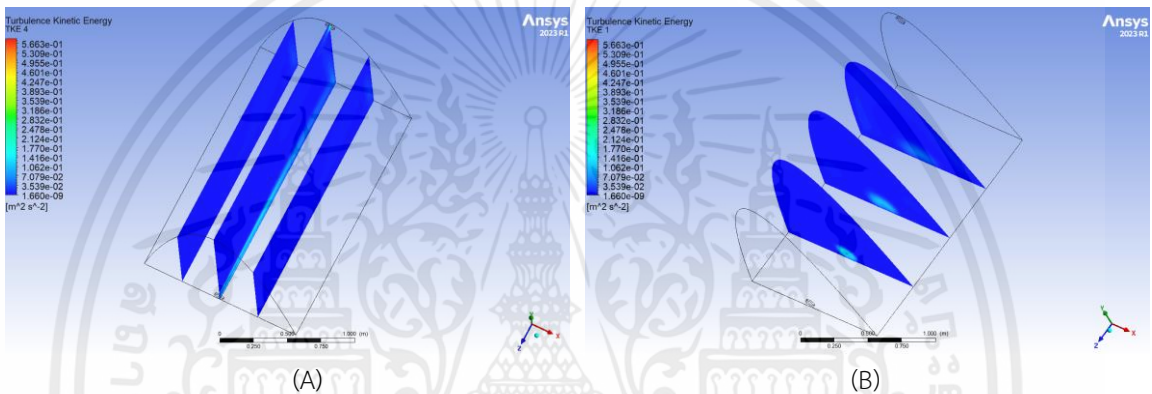
(A)

(B)

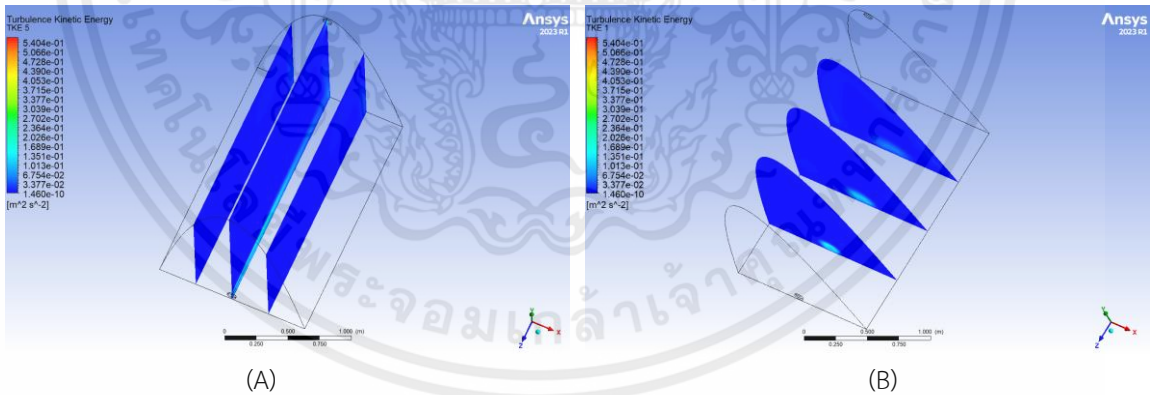
แสดงแผนภาพ TKE contour ที่ความสูง 0.85 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane



แสดงแผนภาพ TKE contour ที่ความสูง 1.05 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane

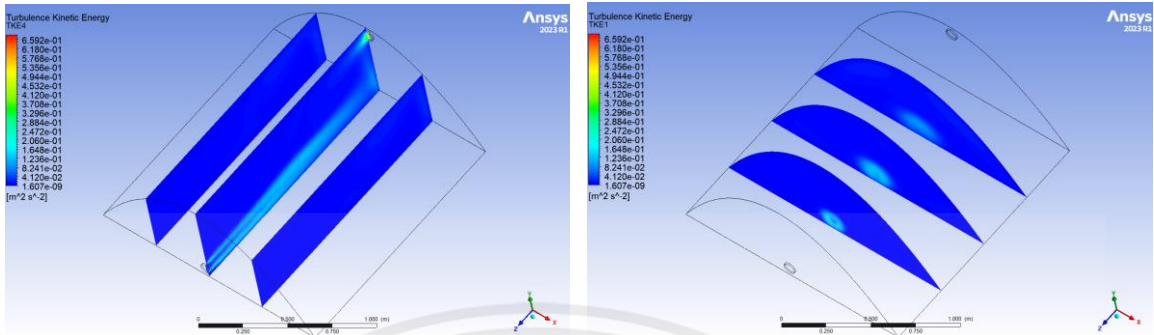


แสดงแผนภาพ TKE contour ที่ความสูง 1.3 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane ความสูง 1.6 เมตร



แสดงแผนภาพ TKE contour ที่ความสูง 1.6 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane

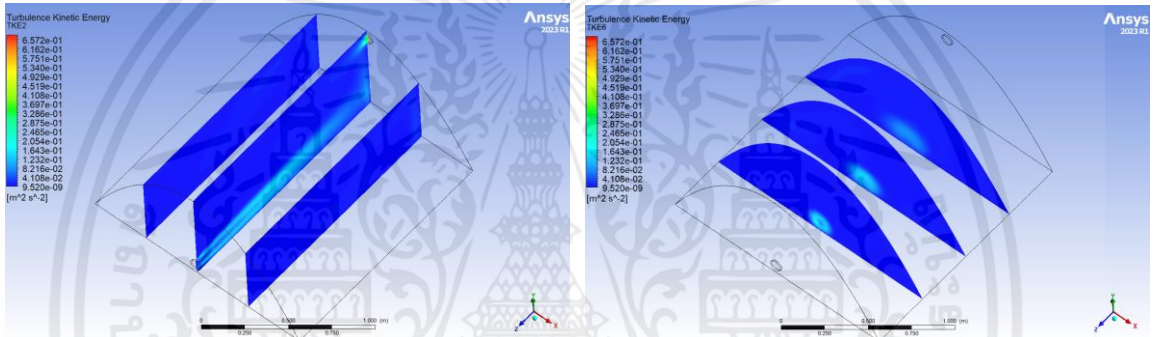
3.3 กรณีที่ 3 ที่มีพื้นที่ฐาน 1.538×1.538 เมตร



(A)

(B)

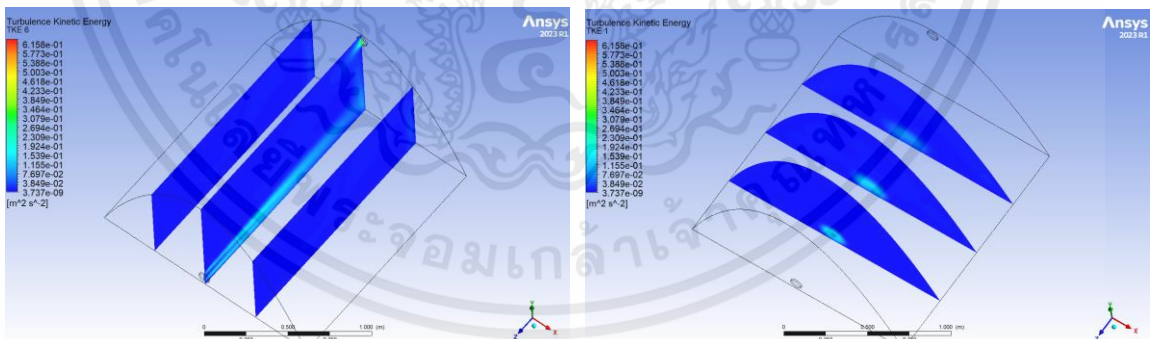
แสดงแผนภาพ TKE contour ที่ความสูง 0.6 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane



(A)

(B)

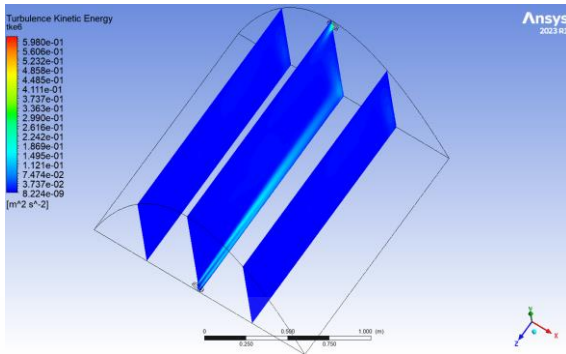
แสดงแผนภาพ TKE contour ที่ความสูง 0.7 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane



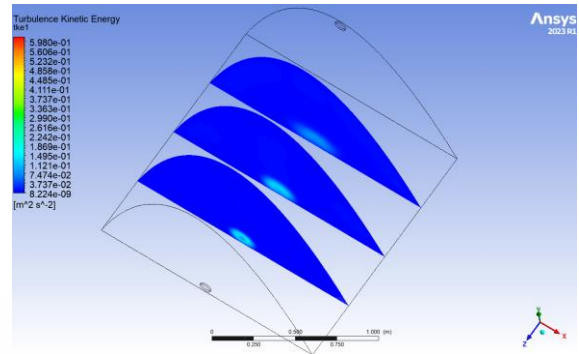
(A)

(B)

แสดงแผนภาพ TKE contour ที่ความสูง 0.85 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane

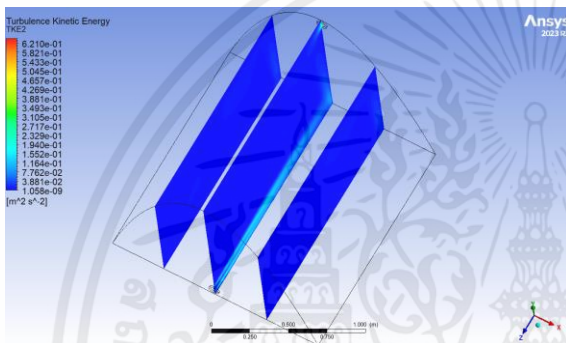


(A)

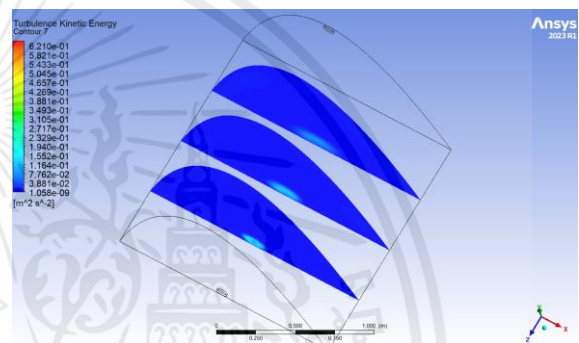


(B)

แสดงแผนภาพ TKE contour ที่ความสูง 1.05 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane

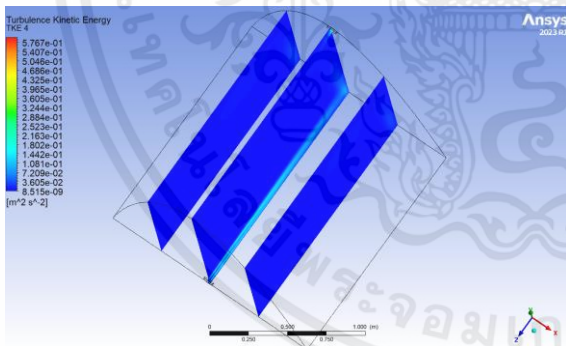


(A)

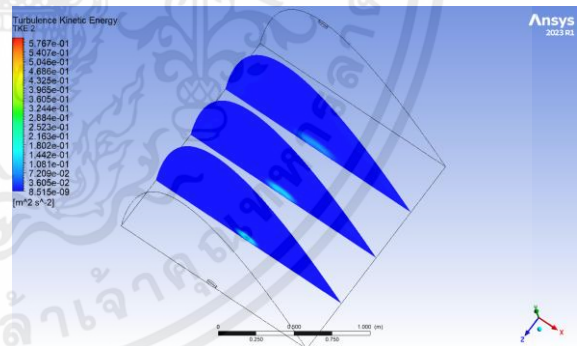


(B)

แสดงแผนภาพ TKE contour ที่ความสูง 1.3 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane



(A)

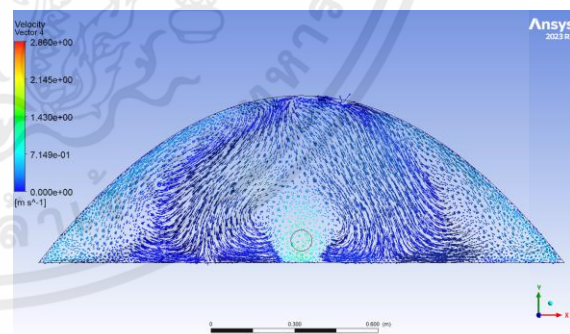
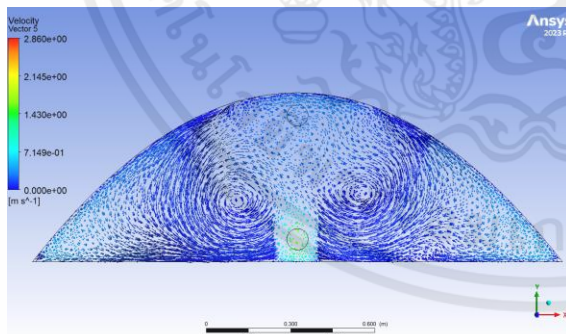
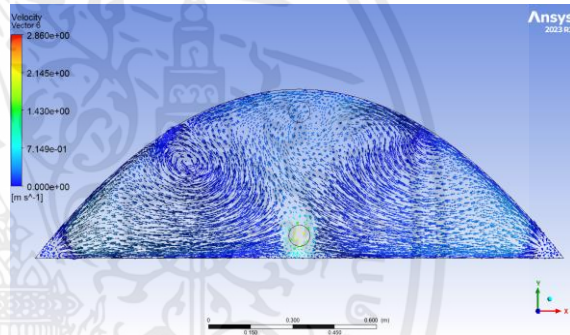
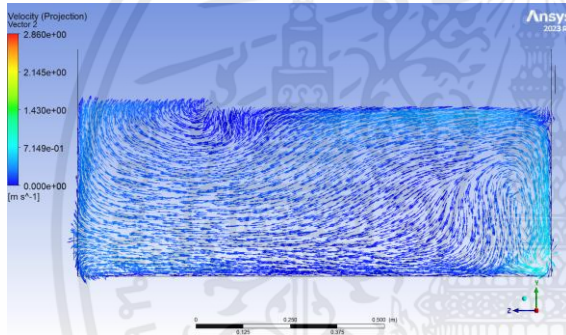
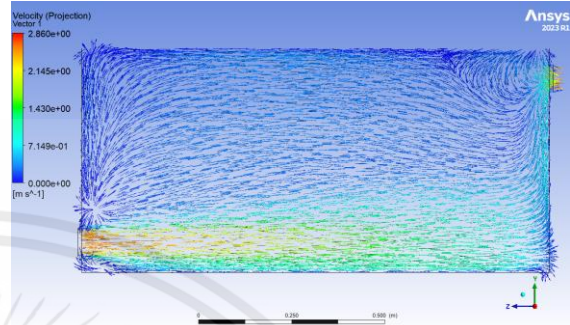
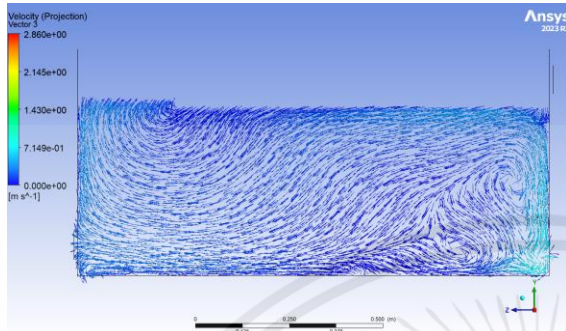


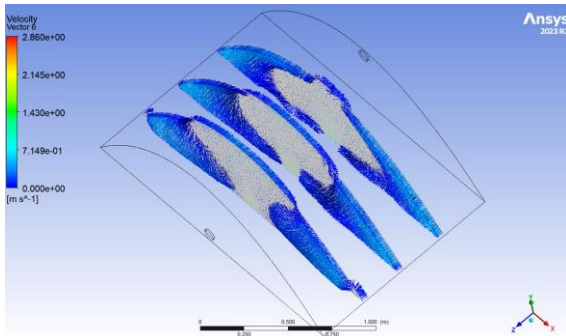
(B)

แสดงแผนภาพ TKE contour ที่ความสูง 1.6 m. (A) แสดง YZ Plane (B) แสดง XY Plane

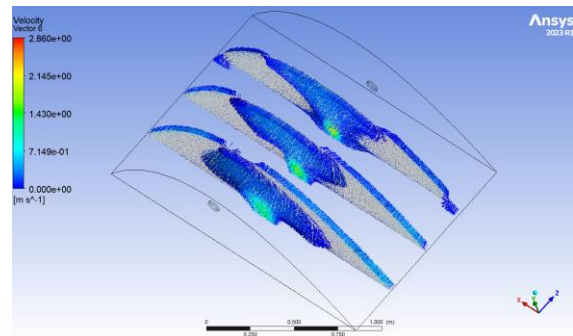
4. Velocity vector

4.1 กรณีที่ 1 ที่มีพื้นที่ฐาน 1.884×1.256 เมตร



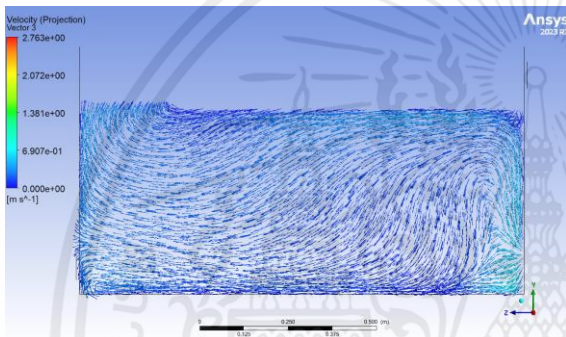


(G) ด้านหน้าของ XY Plane

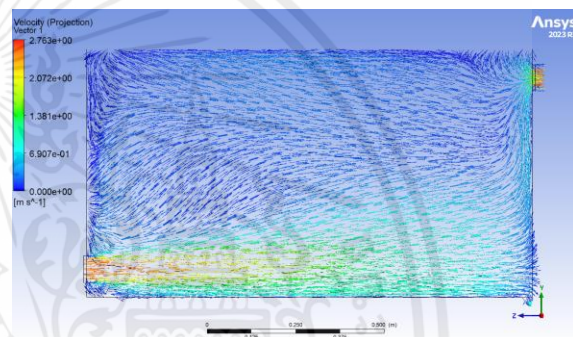


(H) ด้านหลังของ XY Plane

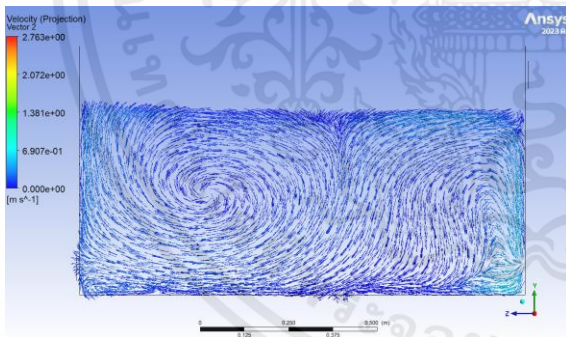
แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 0.6 m.



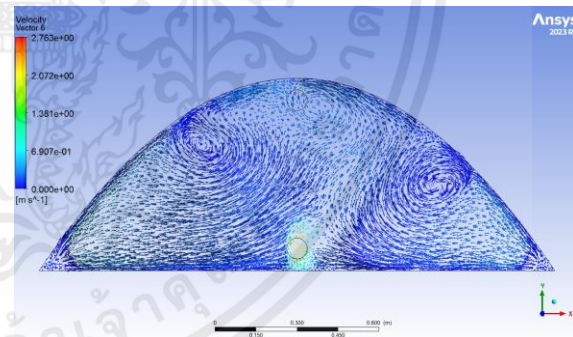
(A) Plane A



(B) Plane B

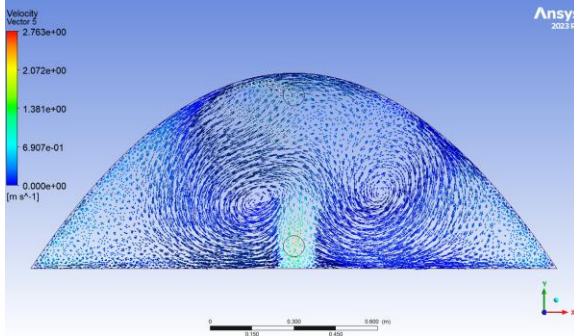


(C) Plane C

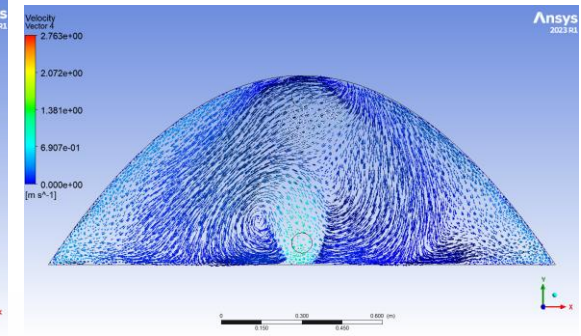


(D) Plane D

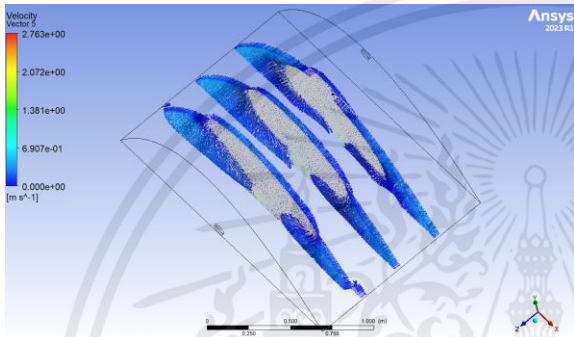
แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 0.7 m.



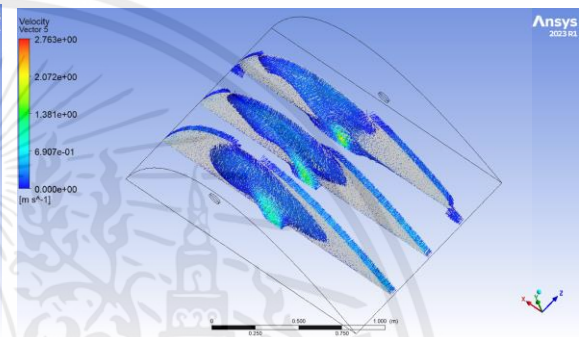
(E) Plane E



(F) Plane F

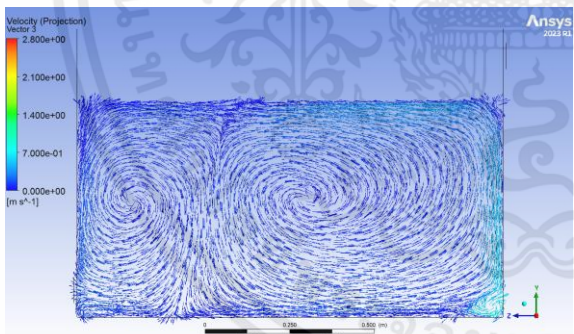


(G) ด้านหน้าของ XY Plane

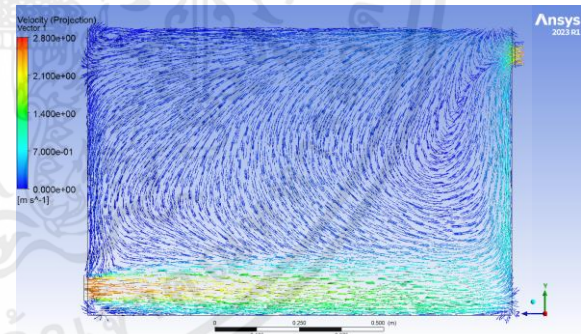


(H) ด้านหลังของ XY Plane

แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 0.7 m. (ต่อ)

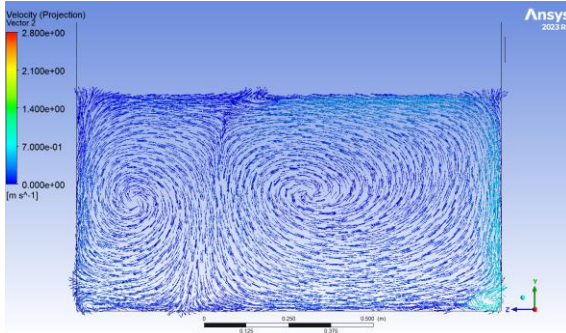


(A) Plane A

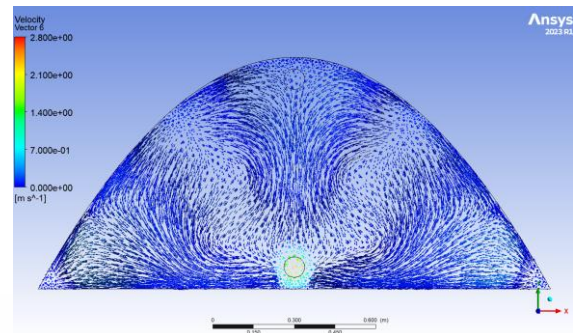


(B) Plane B

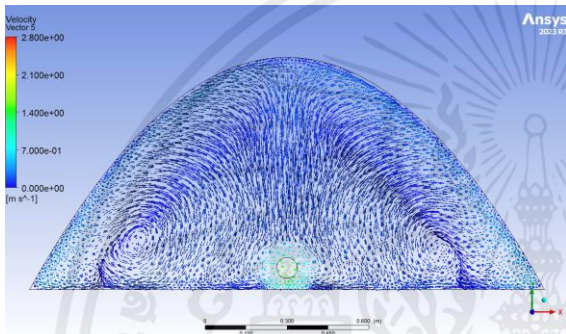
แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 0.85 m.



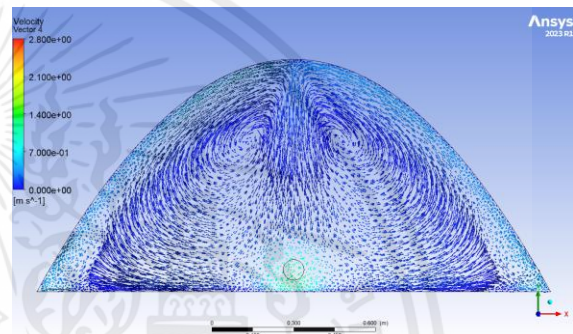
(C) Plane C



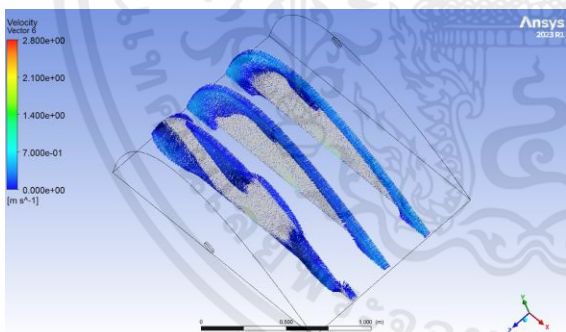
(D) Plane D



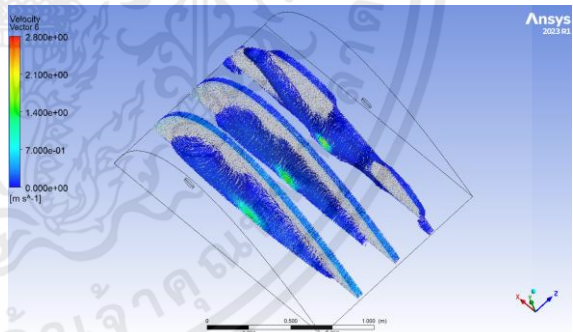
(E) Plane E



(F) Plane F

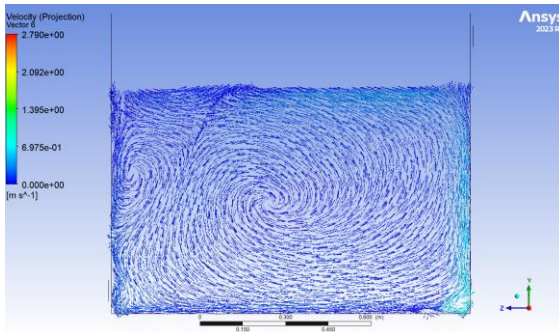


(G) ด้านหน้าของ XY Plane

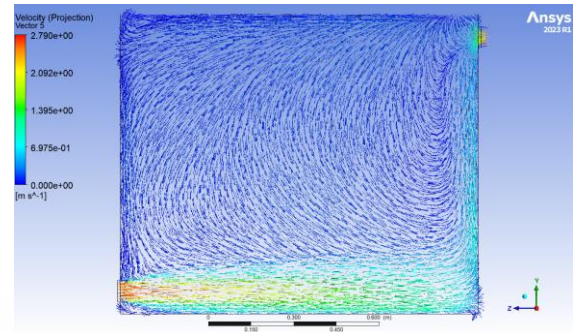


(H) ด้านหลังของ XY Plane

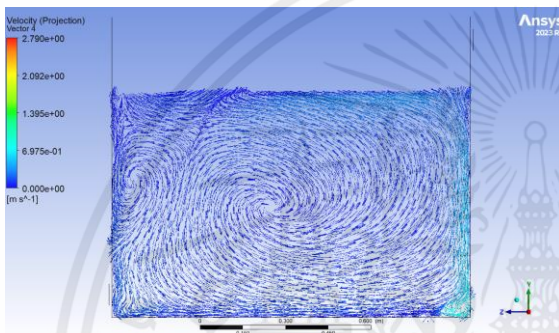
แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 0.85 m. (ต่อ)



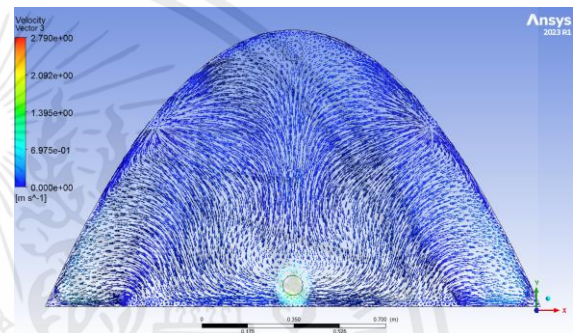
(A) Plane A



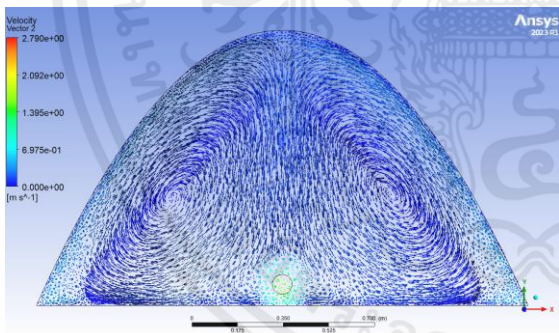
(B) Plane B



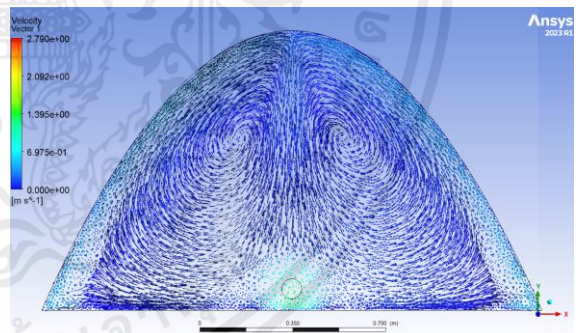
(C) Plane C



(D) Plane D

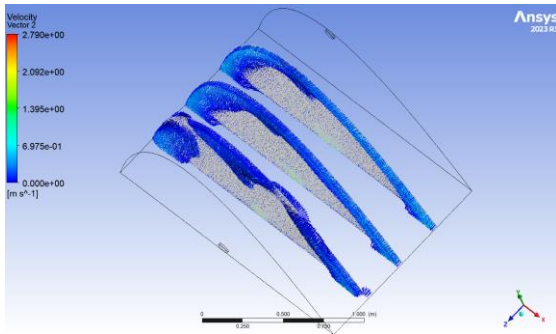


(E) Plane E

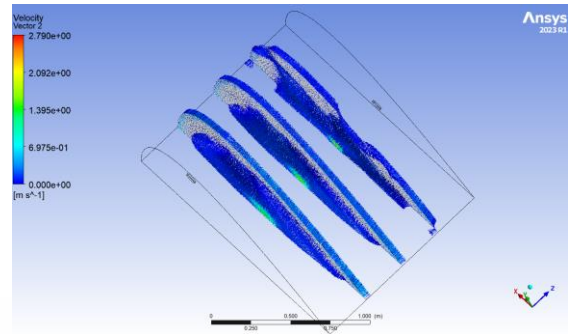


(F) Plane F

แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 1.05 m.

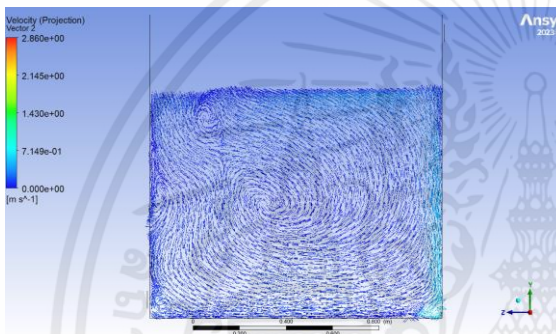


(G) ด้านหน้าของ XY Plane

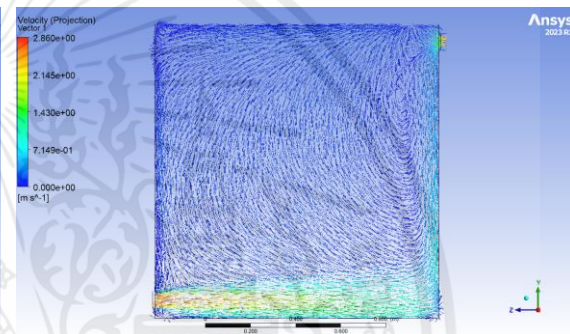


(H) ด้านหลังของ XY Plane

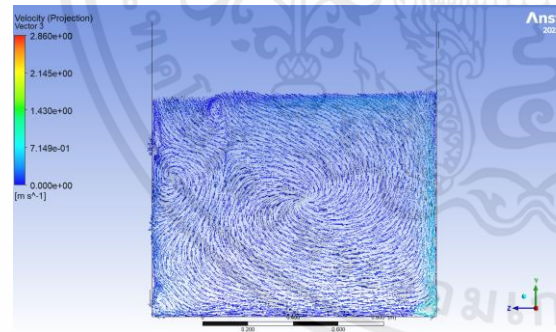
แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 1.05 m. (ต่อ)



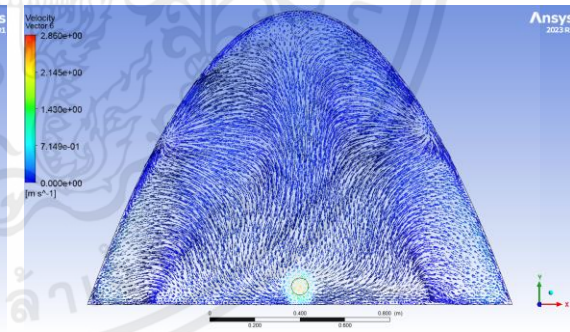
(A) Plane A



(B) Plane B

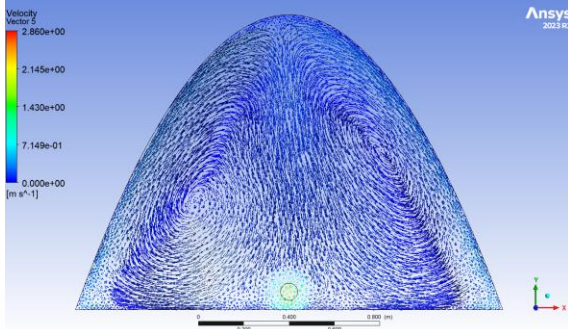


(C) Plane C

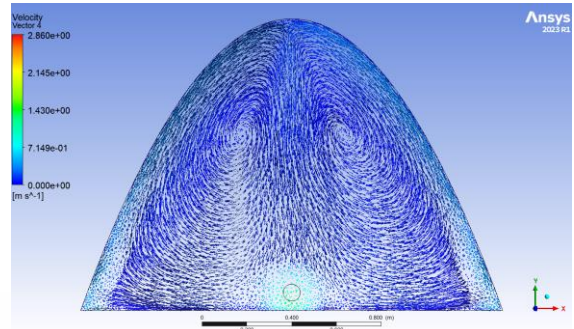


(D) Plane D

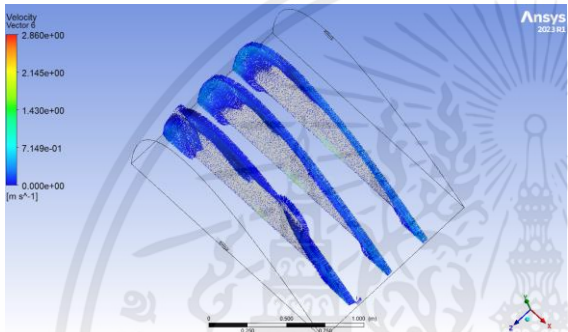
แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 1.3 m.



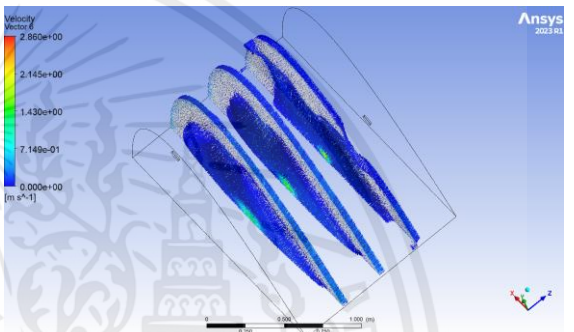
(E) Plane E



(F) Plane F

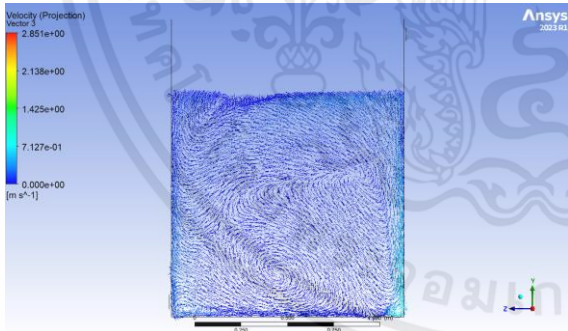


(G) ด้านหน้าของ XY Plane

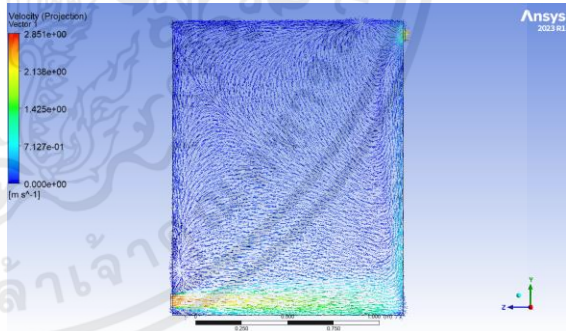


(H) ด้านหลังของ XY Plane

แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 1.3 m. (ต่อ)

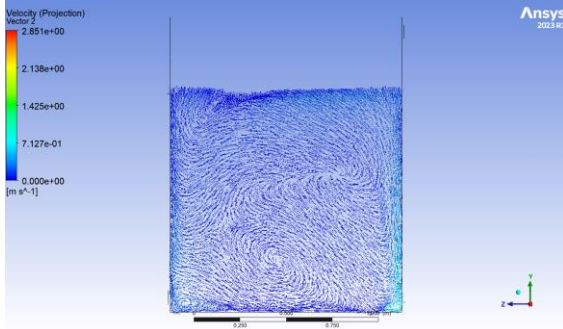


(A) Plane A

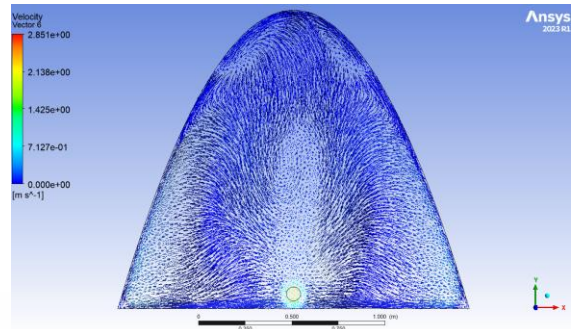


(B) Plane B

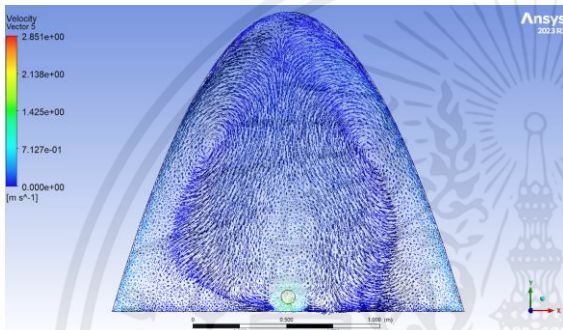
แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 1.6 m.



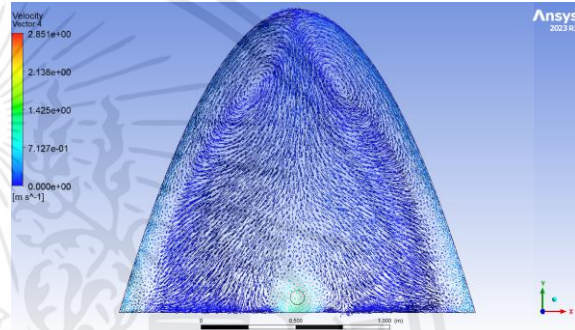
(C) Plane C



(D) Plane D



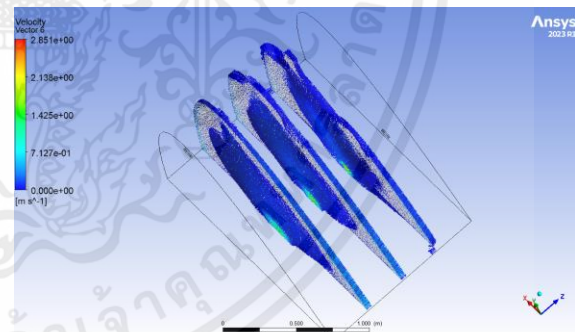
(E) Plane E



(F) Plane F



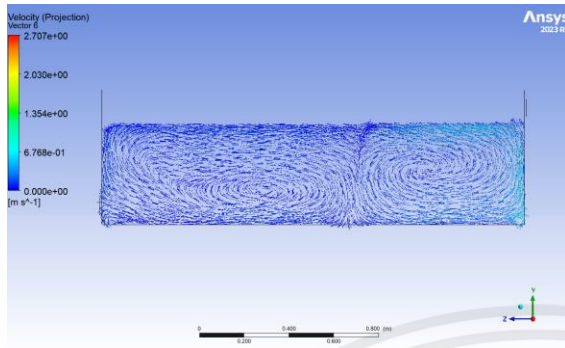
(G) ด้านหน้าของ XY Plane



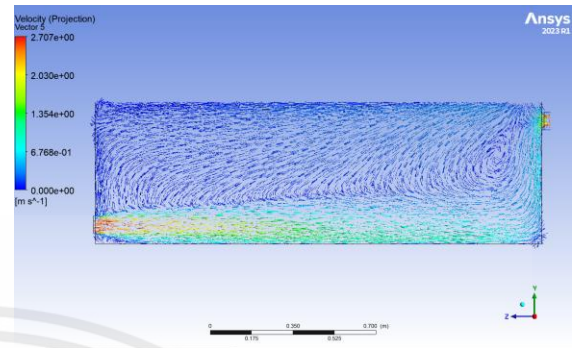
(H) ด้านหลังของ XY Plane

แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 1.6 m. (ต่อ)

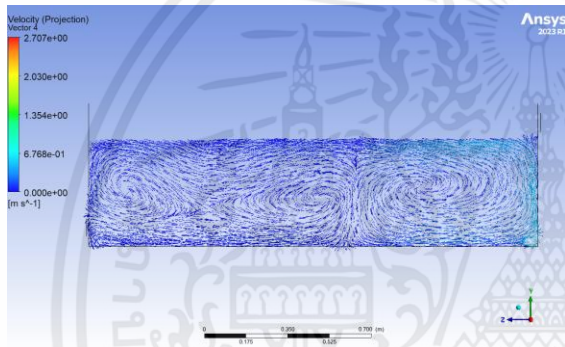
4.2 กรณีที่ 2 ที่มีพื้นที่ฐาน 1.256×1.884 เมตร



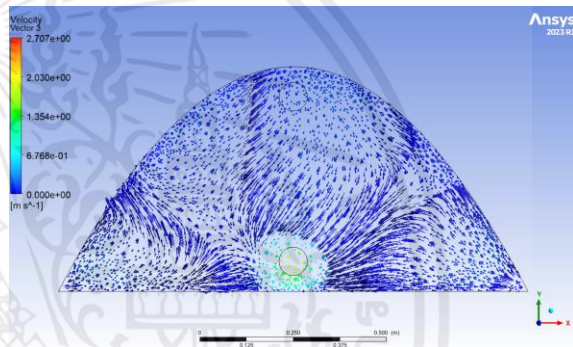
(A) Plane A



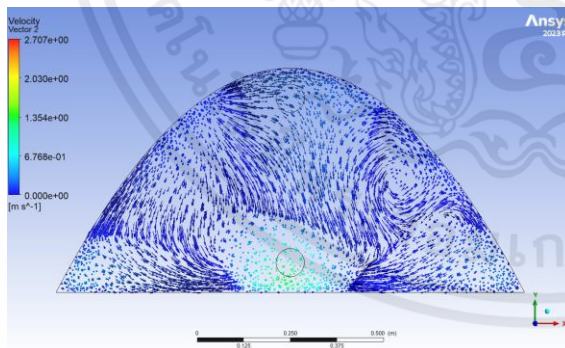
(B) Plane B



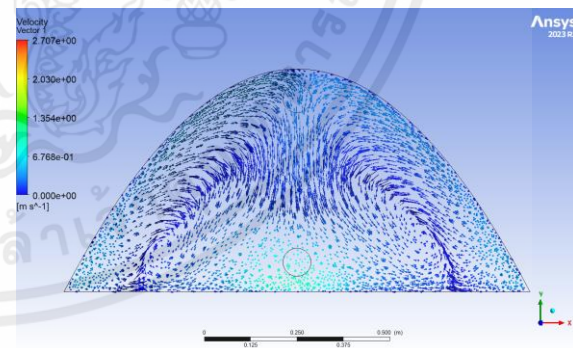
(C) Plane C



(D) Plane D

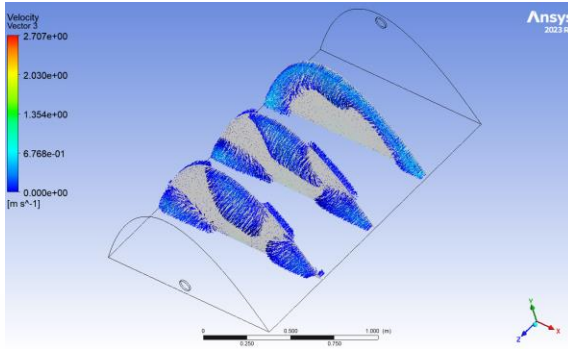


(E) Plane E

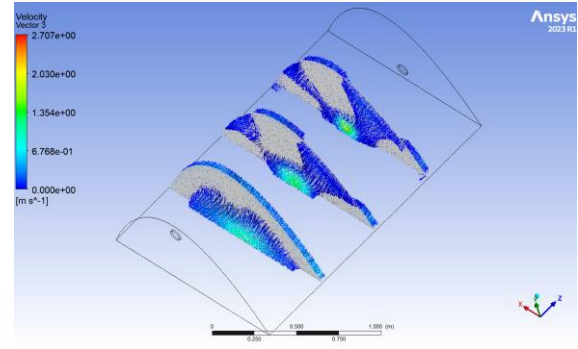


(F) Plane F

แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 0.6 m.

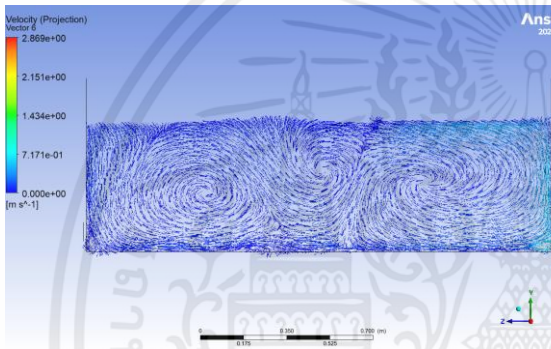


(G) ด้านหน้าของ XY Plane

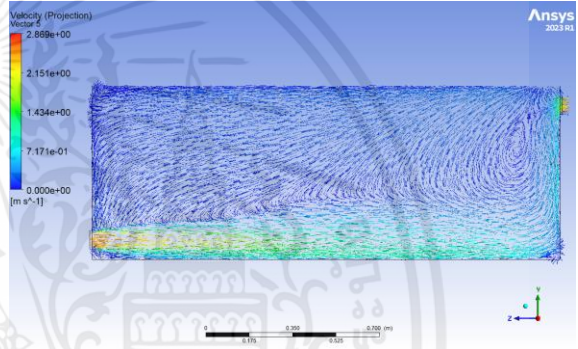


(H) ด้านหลังของ XY Plane

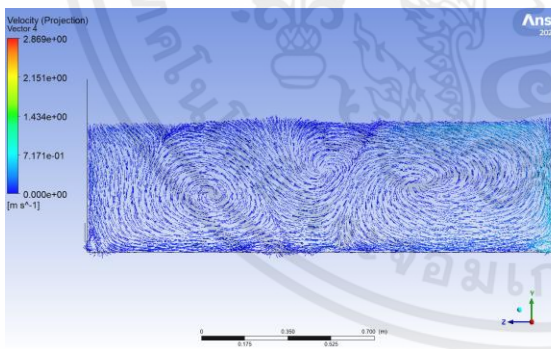
แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 0.6 m. (ต่อ)



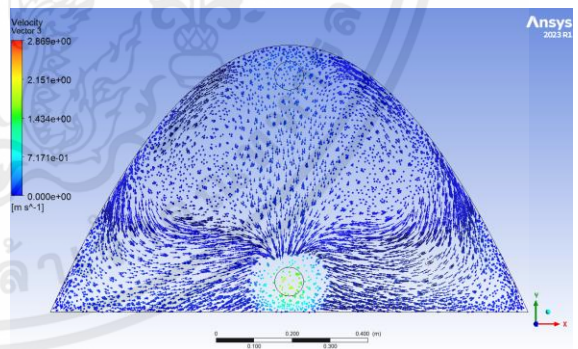
(A) Plane A



(B) Plane B

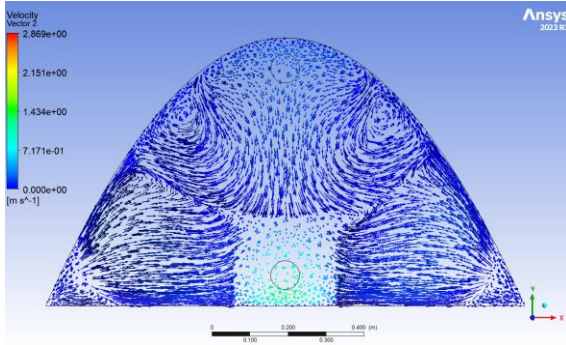


(C) Plane C

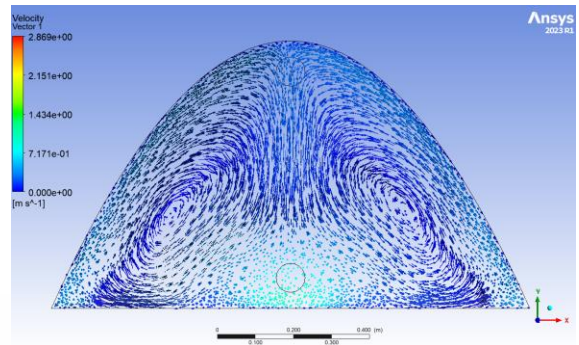


(D) Plane D

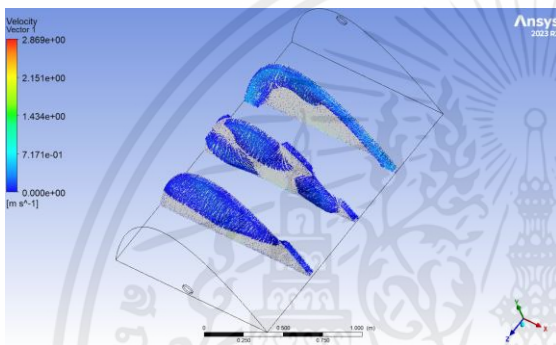
แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 0.7 m.



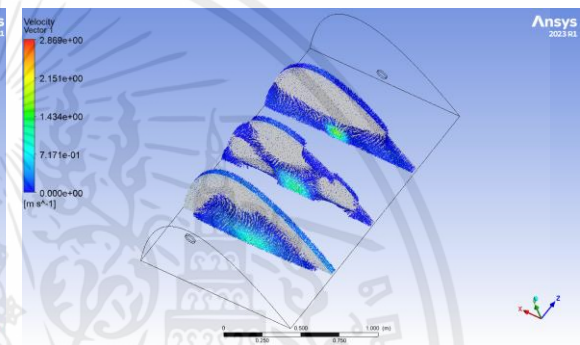
(E) Plane E



(F) Plane F

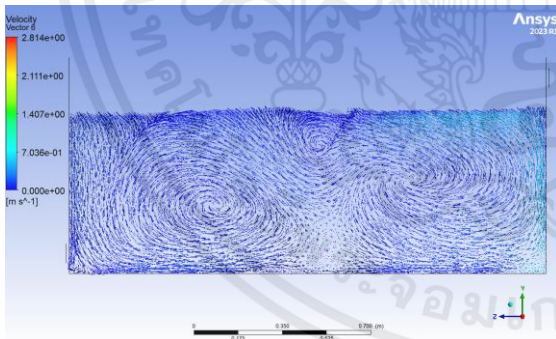


(G) ด้านหน้าของ XY Plane

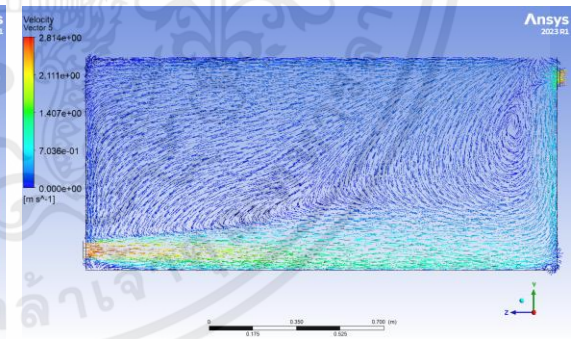


(H) ด้านหลังของ XY Plane

แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 0.7 m. (ต่อ)

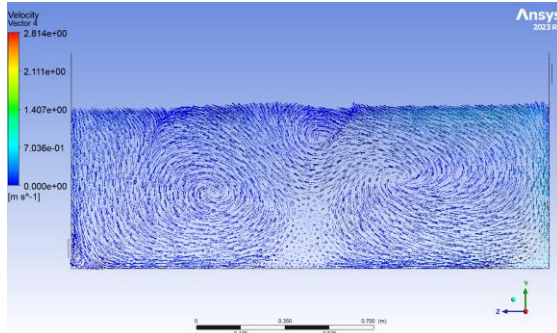


(A) Plane A

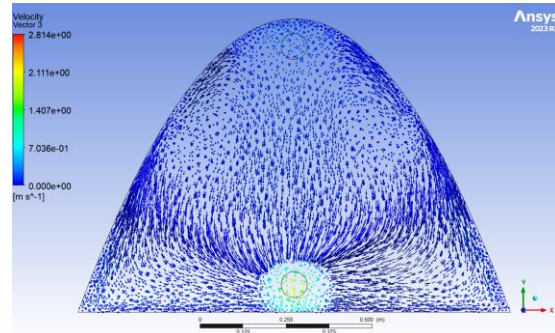


(B) Plane B

แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 0.85 m.



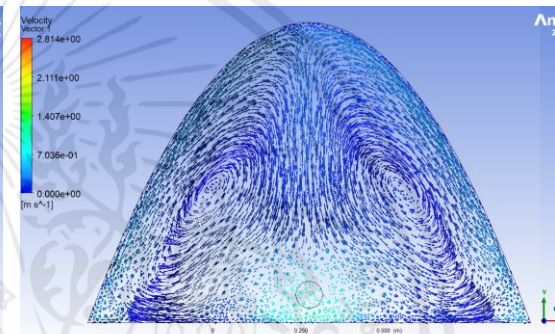
(C) Plane C



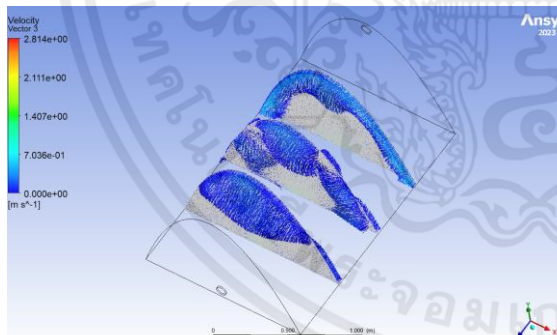
(D) Plane D



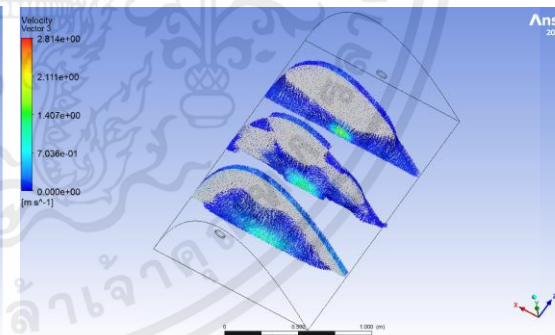
(E) Plane E



(F) Plane F

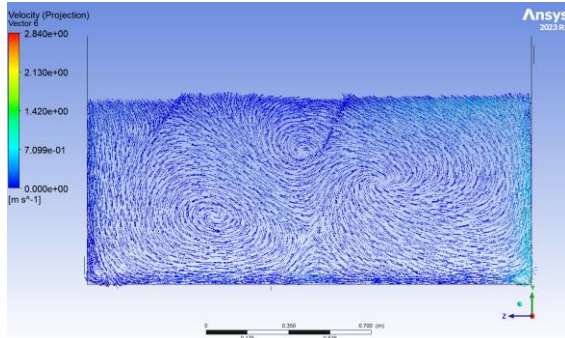


(G) ด้านหน้าของ XY Plane

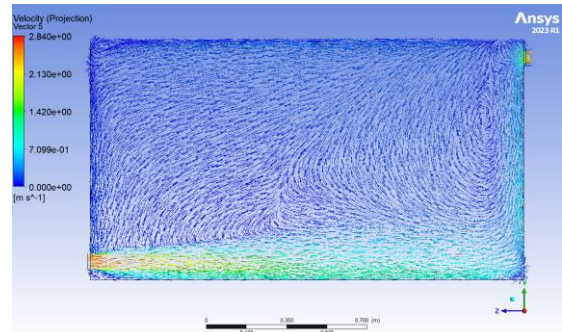


(H) ด้านหลังของ XY Plane

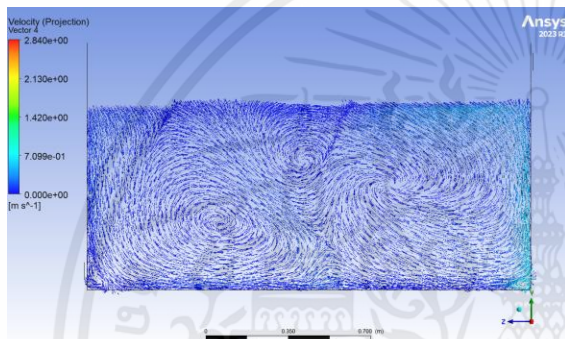
แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 0.85 m. (ต่อ)



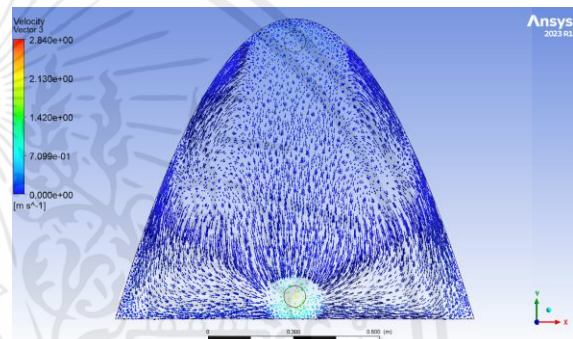
(A) Plane A



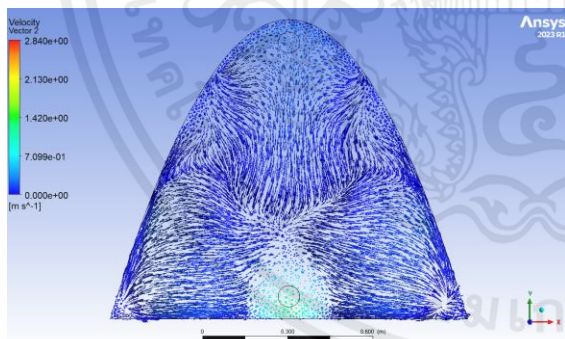
(B) Plane B



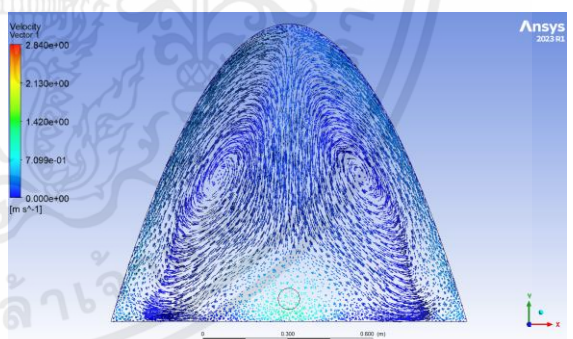
(C) Plane C



(D) Plane D

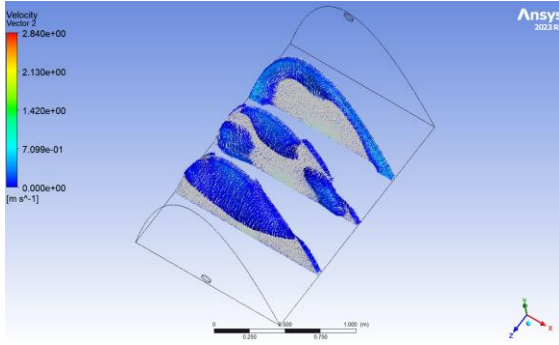


(E) Plane E

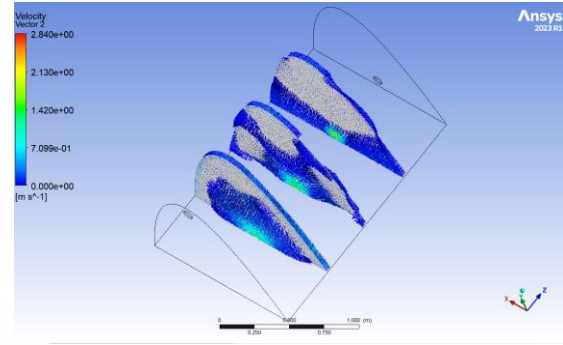


(F) Plane F

แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 1.05 m.

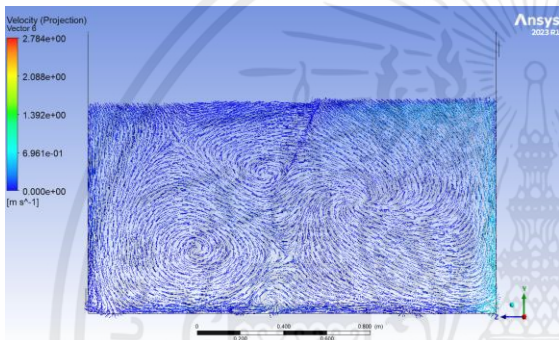


(G) ด้านหน้าของ XY Plane

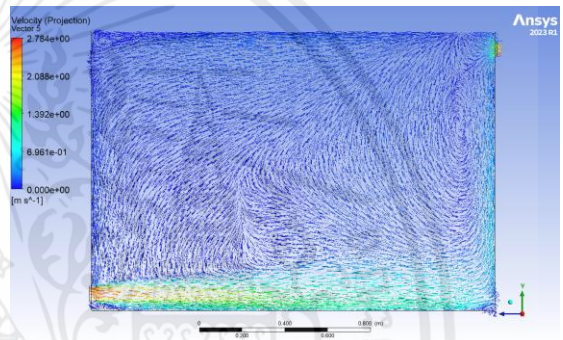


(H) ด้านหลังของ XY Plane

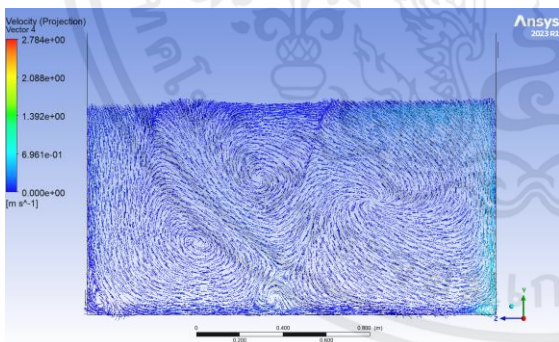
แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 1.05 m. (ต่อ)



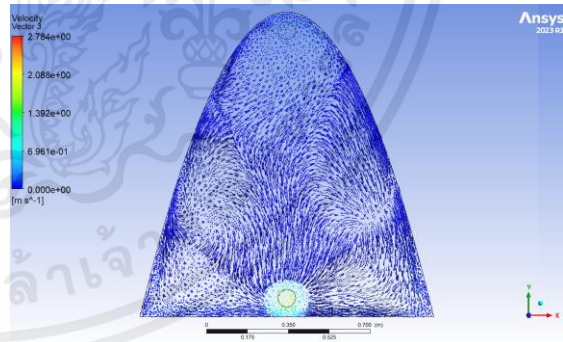
(A) Plane A



(B) Plane B

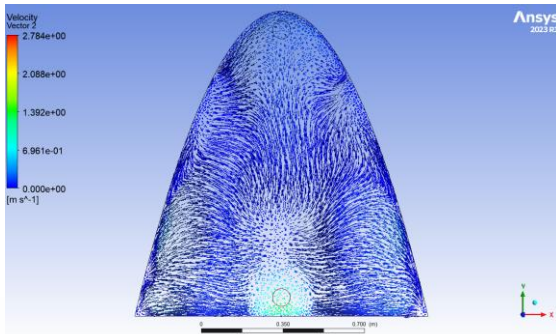


(C) Plane C

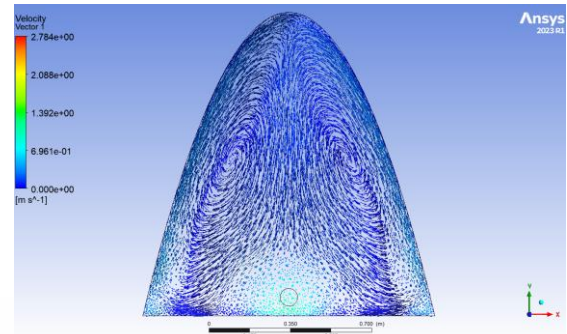


(D) Plane D

แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 1.3 m.



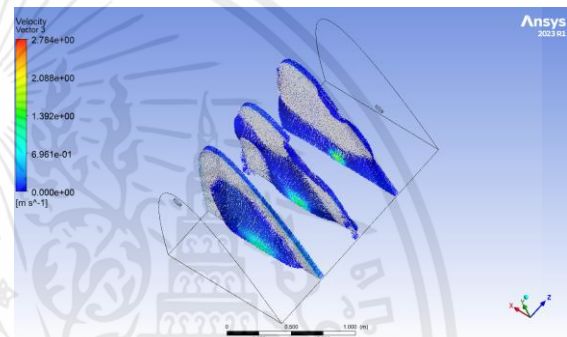
(E) Plane E



(F) Plane F

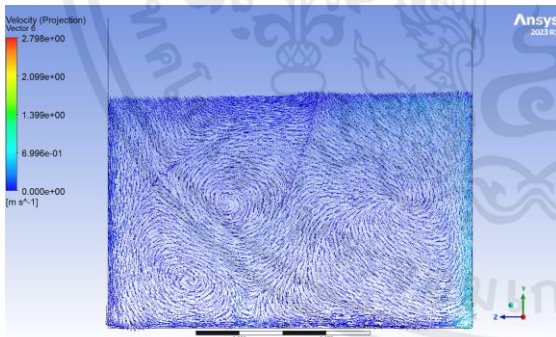


(G) ด้านหน้าของ XY Plane

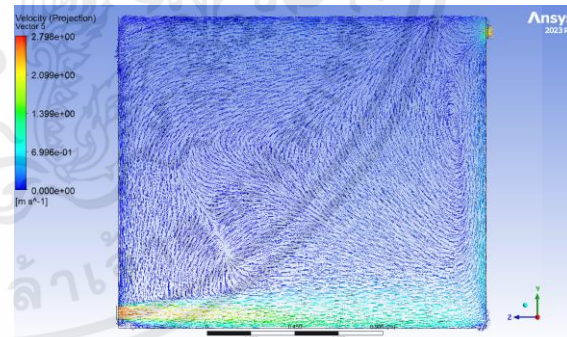


(H) ด้านหลังของ XY Plane

แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 1.3 m. (ต่อ)

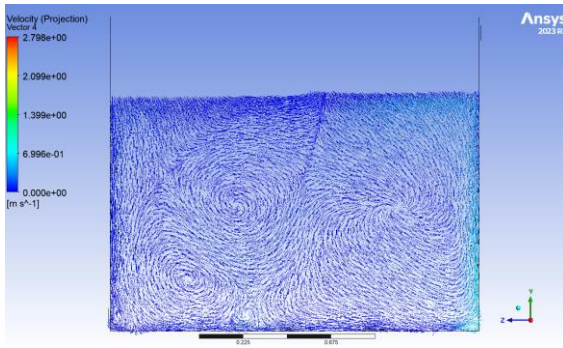


(A) Plane A

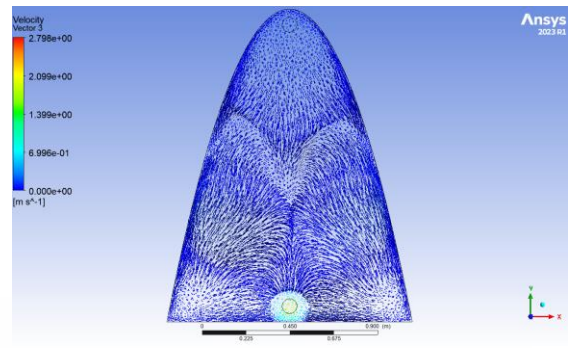


(B) Plane B

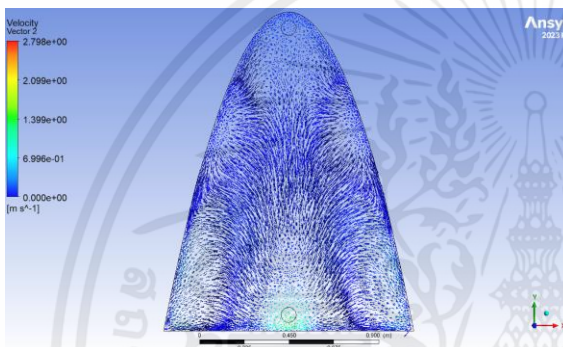
แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 1.6 m.



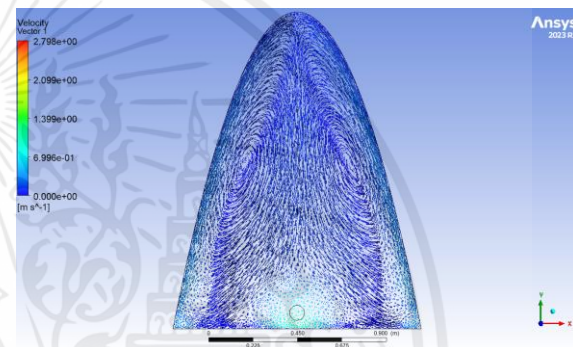
(C) Plane C



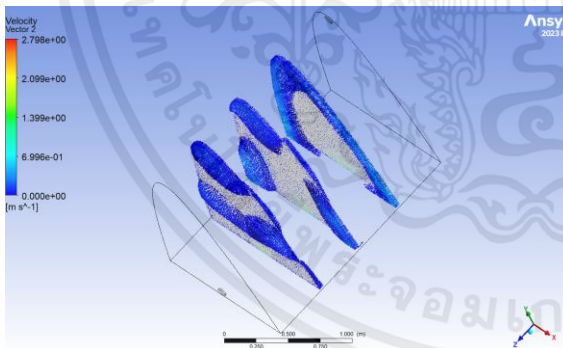
(D) Plane D



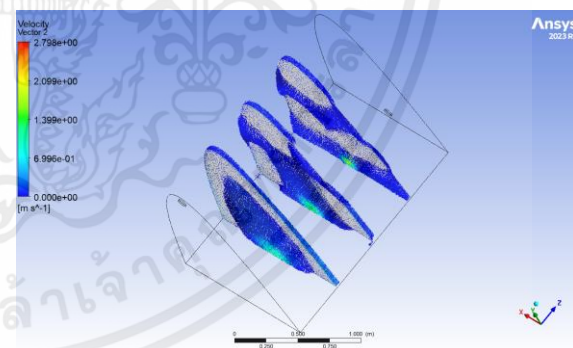
(E) Plane E



(F) Plane F



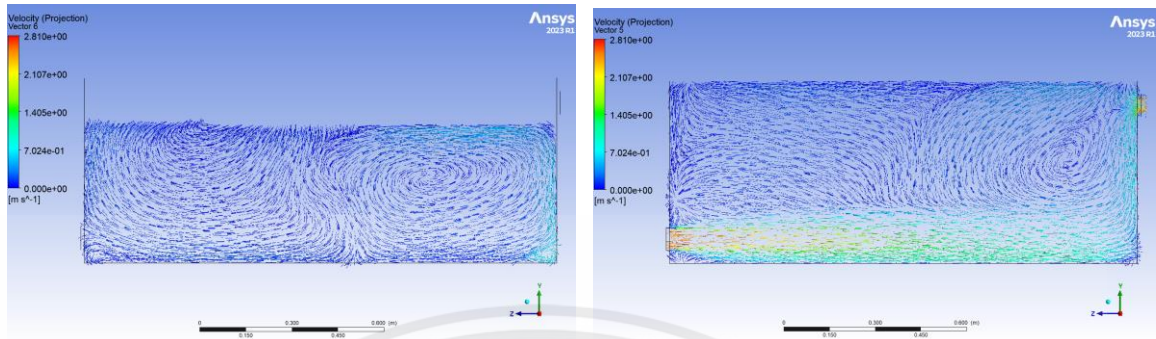
(G) ด้านหน้าของ XY Plane



(H) ด้านหลังของ XY Plane

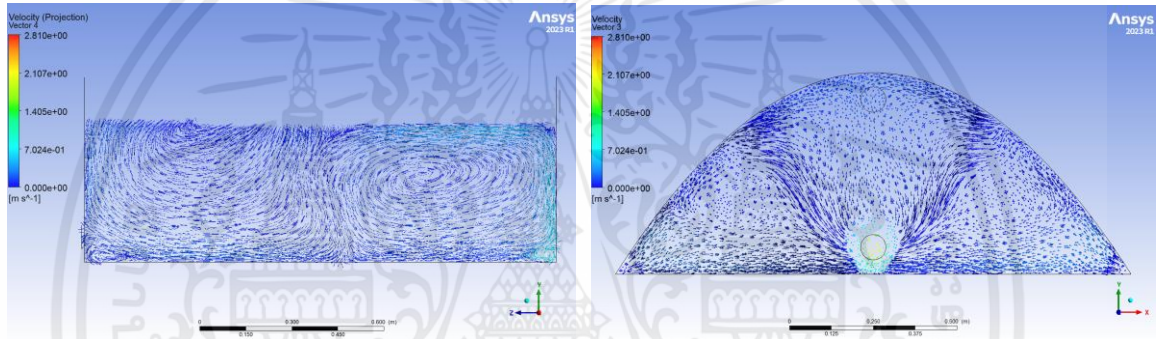
แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 1.6 m. (ต่อ)

4.3 กรณีที่ 3 ที่มีพื้นที่ฐาน 1.538×1.538 เมตร



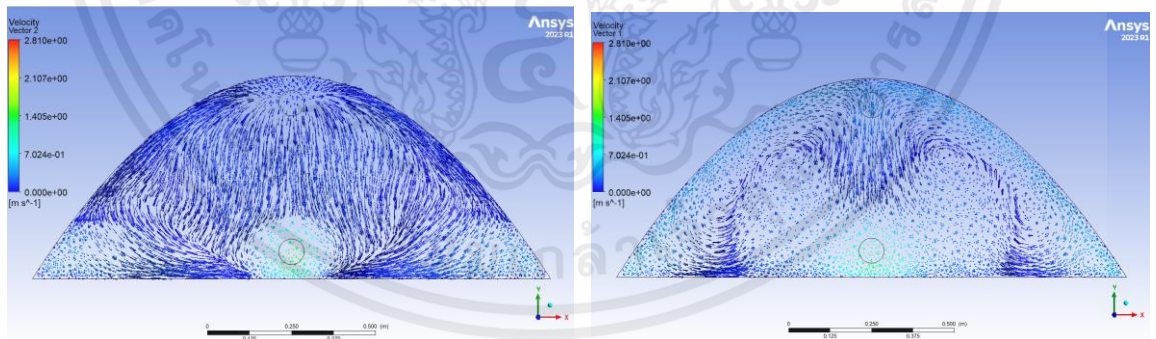
(A) Plane A

(B) Plane B



(C) Plane C

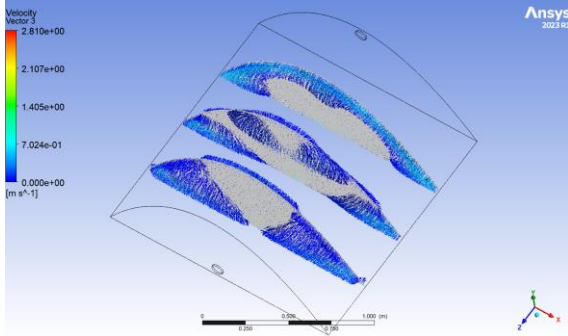
(D) Plane D



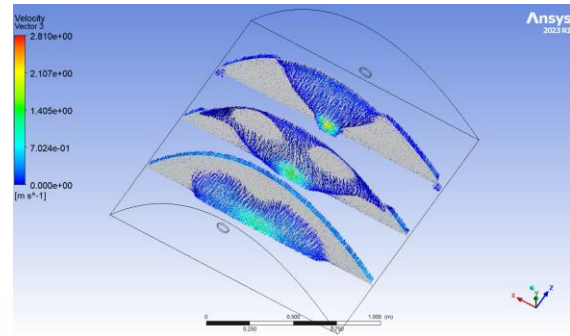
(E) Plane E

(F) Plane F

แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 0.6 m.

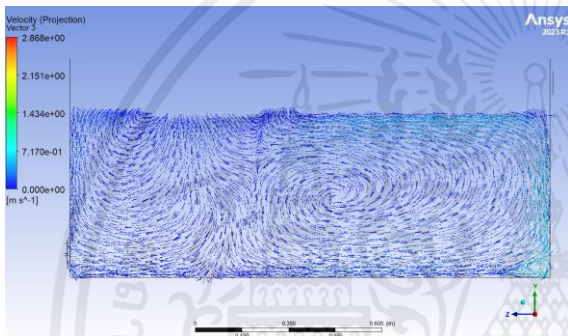


(G) ด้านหน้าของ XY Plane

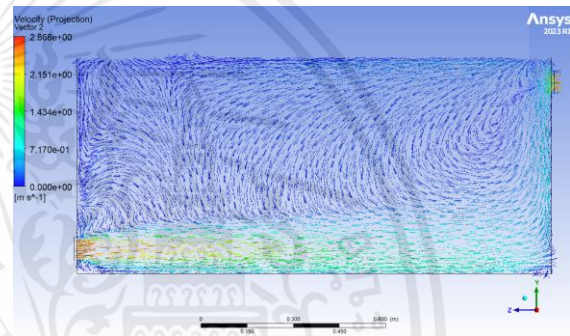


(H) ด้านหลังของ XY Plane

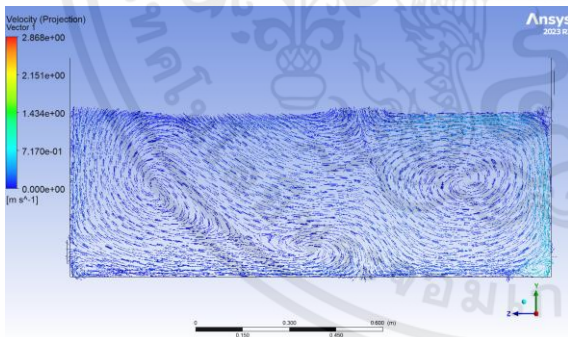
แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 0.6 m. (ต่อ)



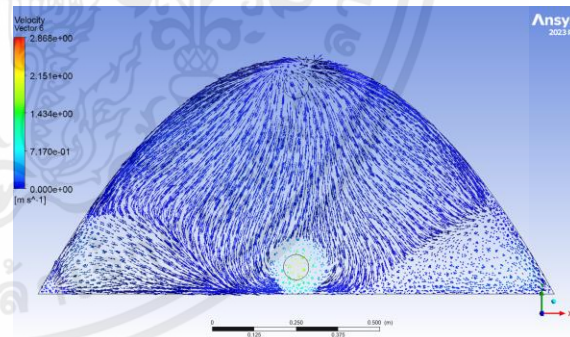
(A) Plane A



(B) Plane B

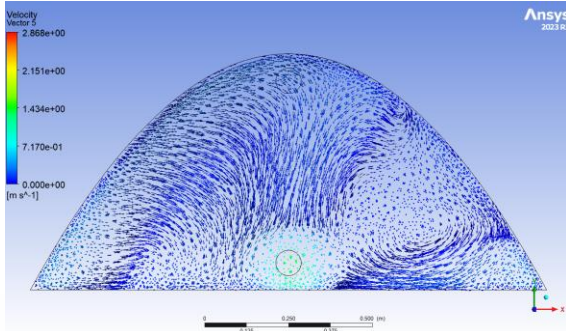


(C) Plane C

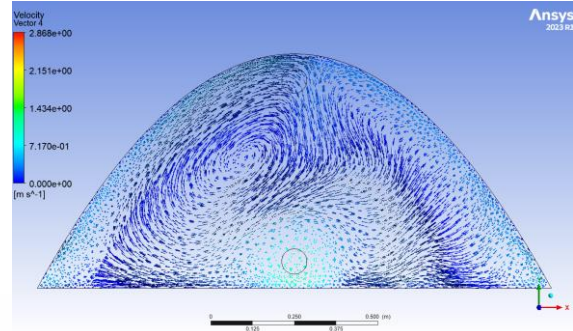


(D) Plane D

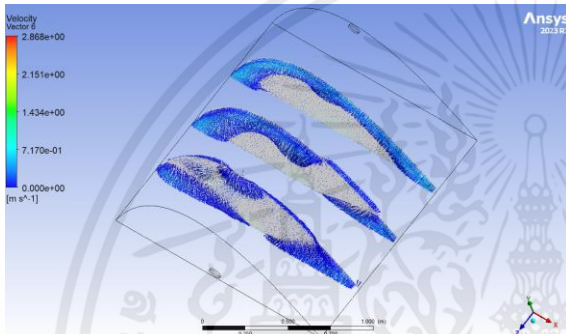
แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 0.7 m.



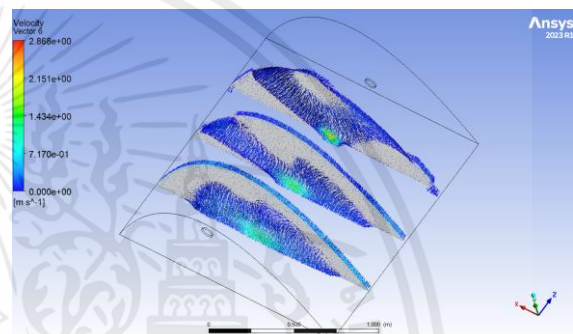
(E) Plane E



(F) Plane F

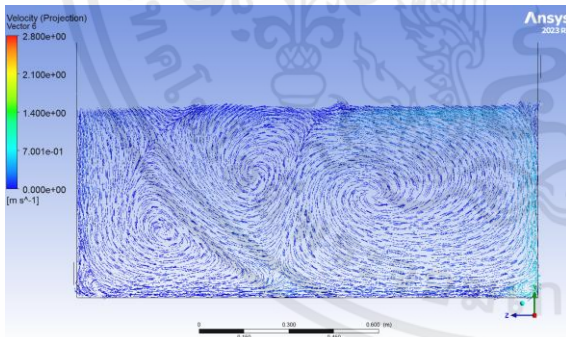


(G) ด้านหน้าของ XY Plane

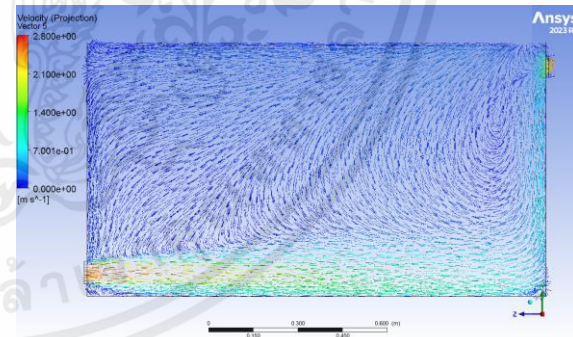


(H) ด้านหลังของ XY Plane

แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 0.7 m. (ต่อ)

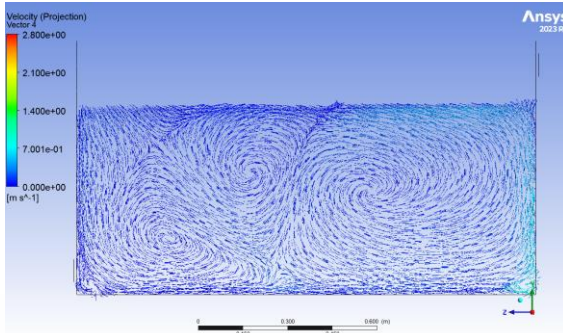


(A) Plane A

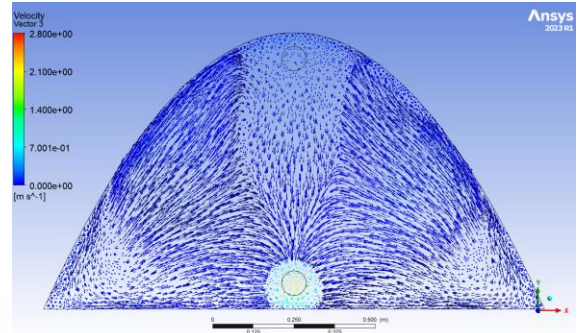


(B) Plane B

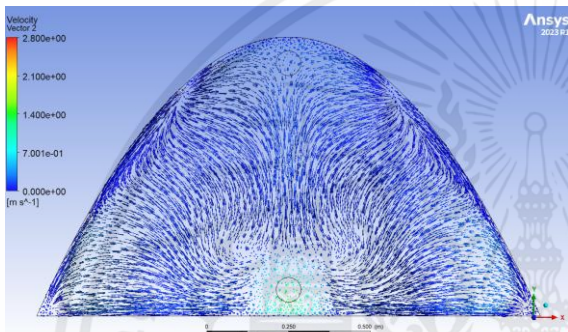
แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 0.85 m.



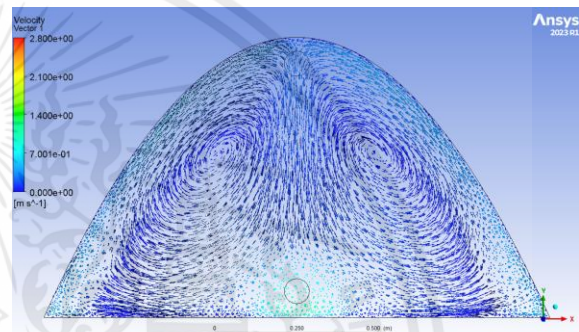
(C) Plane C



(D) Plane D



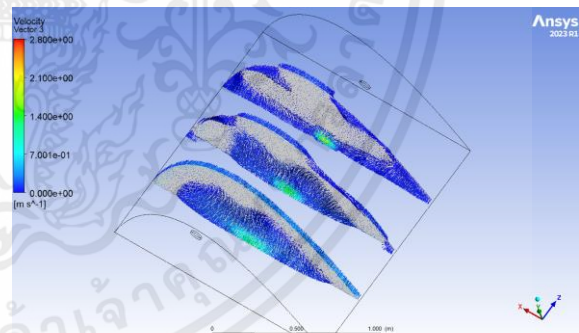
(E) Plane E



(F) Plane F

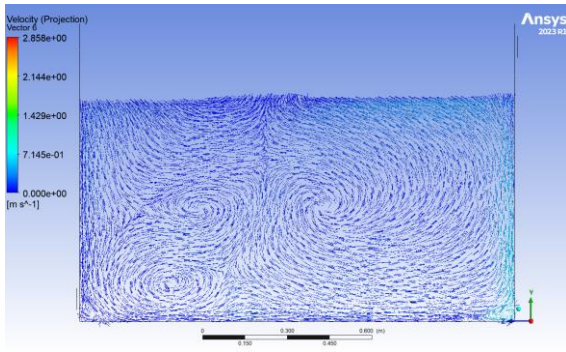


(G) ด้านหน้าของ XY Plane

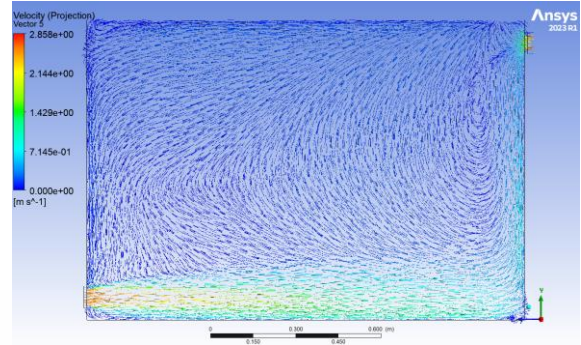


(H) ด้านหลังของ XY Plane

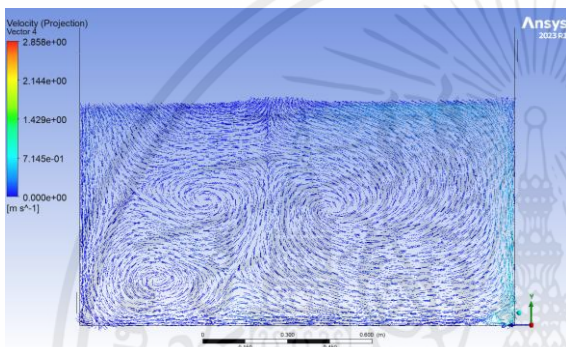
แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 0.85 m. (ต่อ)



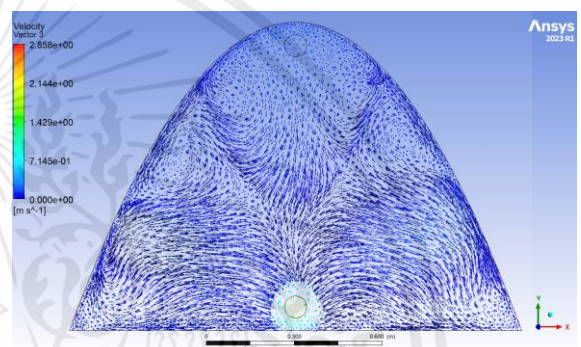
(A) Plane A



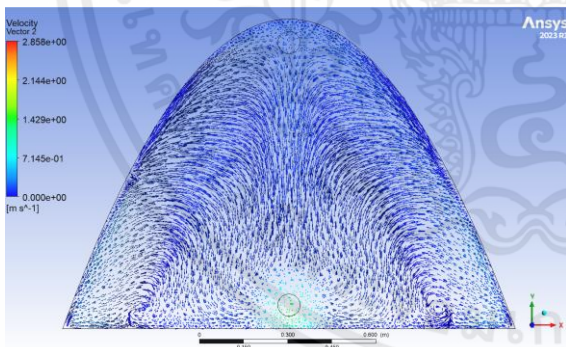
(B) Plane B



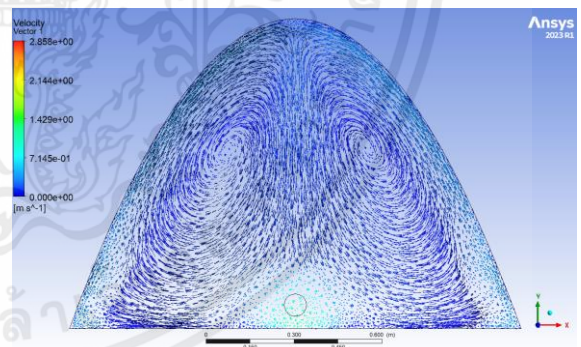
(C) Plane C



(D) Plane D

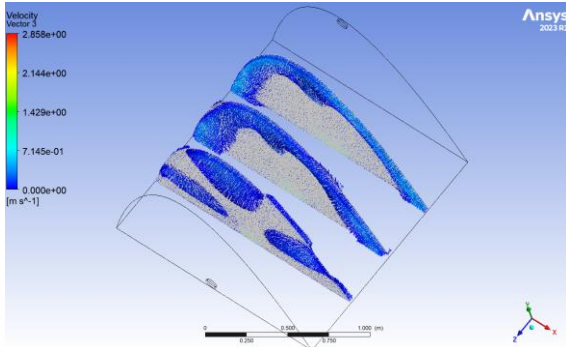


(E) Plane E

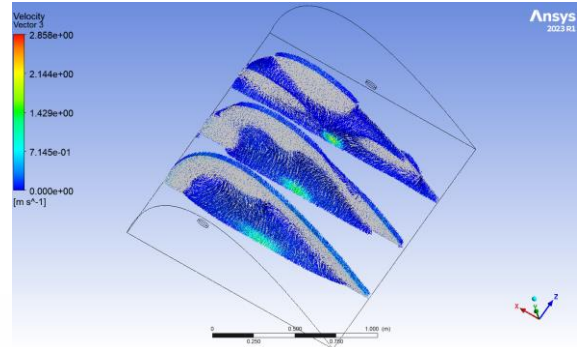


(F) Plane F

แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 1.05 m.

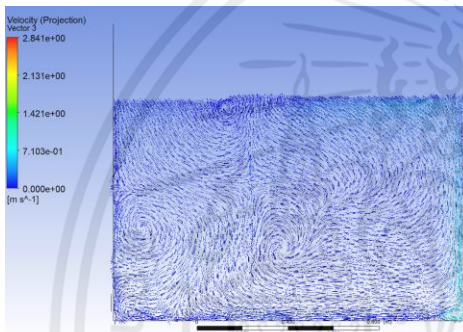


(G) ด้านหน้าของ XY Plane

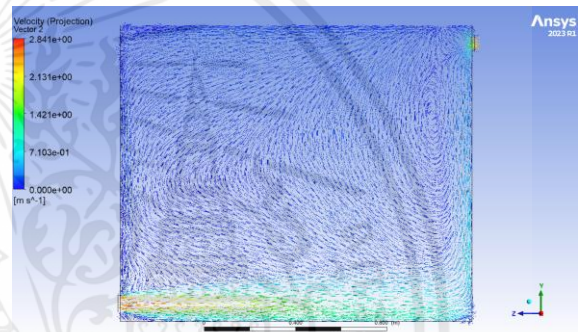


(H) ด้านหลังของ XY Plane

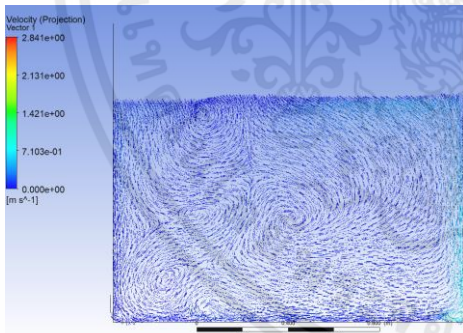
แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 1.05 m. (ต่อ)



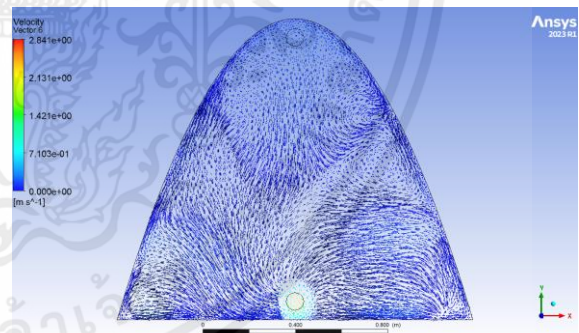
(A) Plane A



(B) Plane B

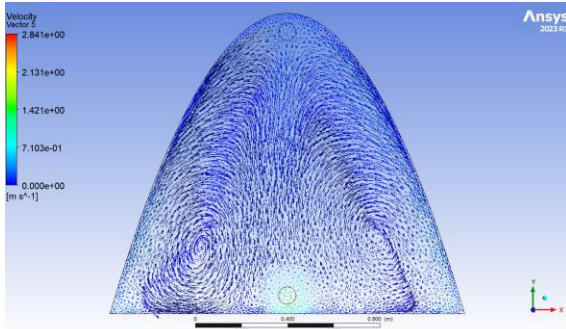


(C) Plane C

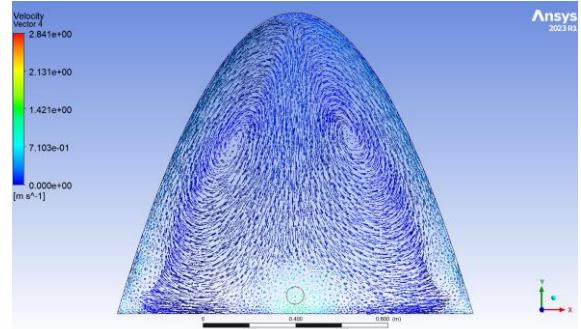


(D) Plane D

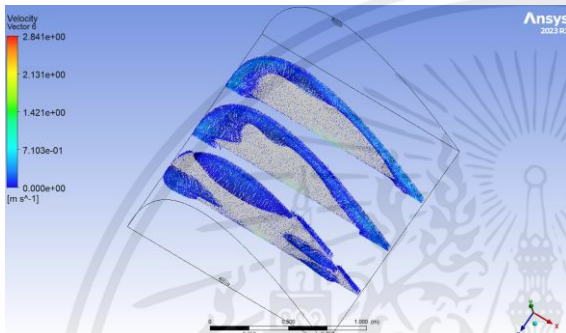
แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 1.3 m.



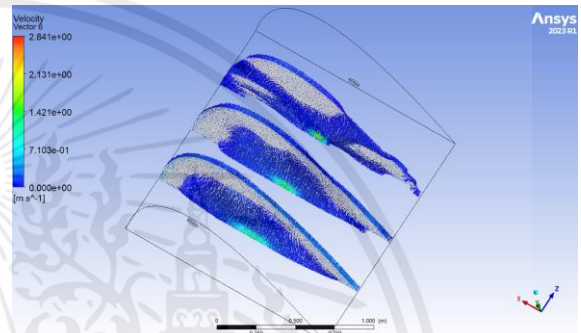
(E) Plane E



(F) Plane F

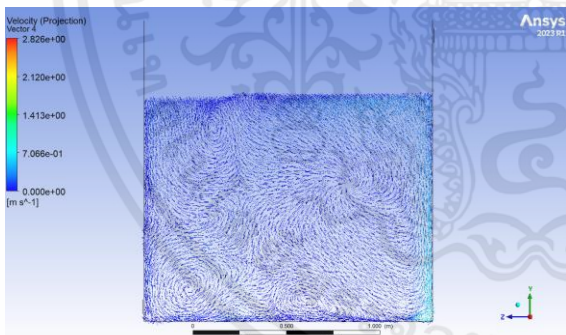


(G) ด้านหน้าของ XY Plane

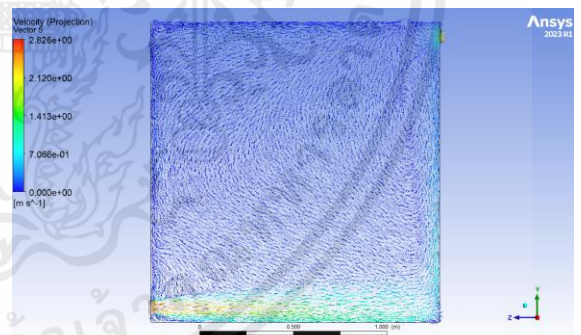


(H) ด้านหลังของ XY Plane

แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 1.3 m. (ต่อ)

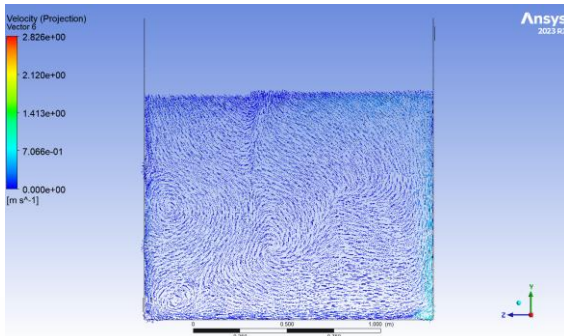


(A) Plane A

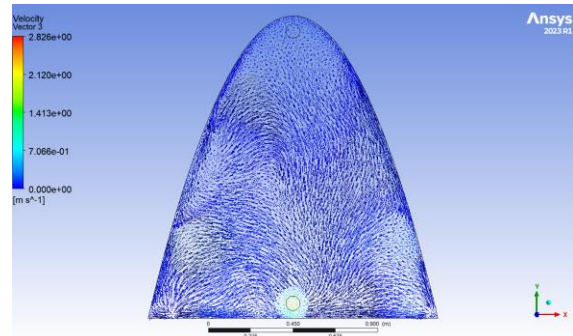


(B) Plane B

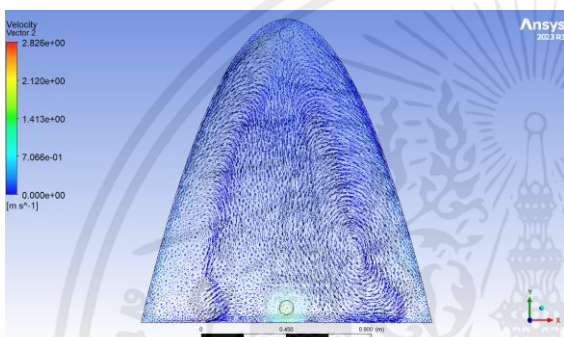
แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 1.6 m.



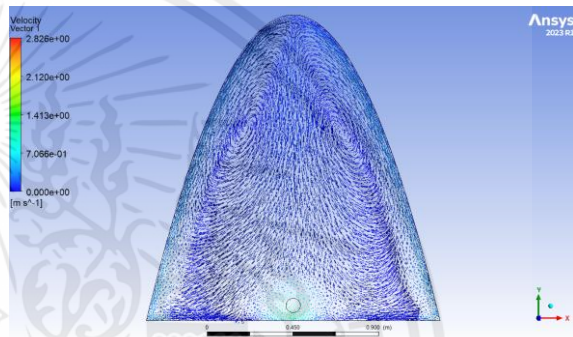
(C) Plane C



(D) Plane D



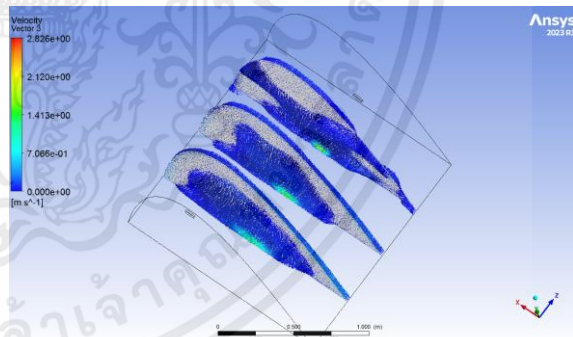
(E) Plane E



(F) Plane F



(G) ด้านหน้าของ XY Plane



(H) ด้านหลังของ XY Plane

แสดงภาพทิศทางการไหลของอากาศที่ความสูง 1.6 m. (ต่อ)