

การศึกษาระยะห่างที่เหมาะสมของโรงเรือนแบบอุโมงค์
โดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

THE STUDY OF SPACING OPTIMIZATION OF TUNNEL GREENHOUSE
USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-100-049

การศึกษาระยะห่างที่เหมาะสมของโรงเรือนแบบอุโมงค์
โดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

THE STUDY OF SPACING OPTIMIZATION OF TUNNEL GREENHOUSE
USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS



วิโรจน์ โหราศาสตร์
WIROT HORASART

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2559

KMITL-2016-EN-M-100-049

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY OF SPACING OPTIMIZATION OF TUNNEL GREENHOUSE
USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

WIROT HORASART

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN AGRICULTURAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016

KMITL-2016-EN-M-100-049

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาระยะห่างที่เหมาะสมของโรงเรือนแบบอุโมงค์โดยใช้
พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
Thesis Title The Study on Spacing Optimization of Tunnel Greenhouse Using
Computational Fluid Dynamics
นักศึกษา นายวิโรจน์ โหระศาสตร์
รหัสประจำตัว 55612303
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเกษตร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ทรงวุฒิ แสงจันทร์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-100-049

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วินัย	กล้าจริง	
ผศ.ดร.ธีรพงศ์	ผลโพธิ์	
ดร.กัมปนาท	ขวัญศิริกุล	
ดร.จิราพร	ศรียัญญ์ โยวณิชย์ จงยิ่งเจริญ	
ผศ.ดร.ทรงวุฒิ	แสงจันทร์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 17 พฤษภาคม พ.ศ. 2559 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา **ฉบับนี้ คณะวิศวกรรมศาสตร์** ะโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องวันที่ 17 พฤษภาคม พ.ศ. 2559 การนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาระยะห่างที่เหมาะสมของโรงเรือนแบบอุโมงค์ โดยการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
นักศึกษา	นายวิโรจน์ โหราศาสตร์
รหัสประจำตัว	55612303
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเกษตร
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ทรงวุฒิ แสงจันทร์

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาระยะห่างที่เหมาะสมของโรงเรือนแบบอุโมงค์โดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) โดยใช้โปรแกรม Fluent ทำการจำลองพฤติกรรมของอากาศภายในโรงเรือนอุโมงค์ที่ได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ (Solar Radiation) ความเร็วลมด้านนอกน้อยมากและมีการระบายอากาศตามธรรมชาติ (Natural Ventilation) ออกทางช่องเปิดด้านข้างของโรงเรือน ซึ่งสภาพการไหลของอากาศในโรงเรือนเป็นแบบปั่นป่วน ได้ทำการทดสอบแบบจำลองการไหลปั่นป่วน k- ϵ ชนิด Standard, Renormalization group (RNG) และ Realizable เปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดได้จากโรงเรือนอุโมงค์มีขนาดกว้าง 3 m ยาว 6 และ 18 m สูง 2.1 m หลังคาคลุมด้วยพลาสติกใสหนา 150 ไมครอน ด้านข้างทั้งสองด้านเปิดโล่งสูง 1.14 m ระยะห่างระหว่างโรงเรือน 1 m ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร จำนวน 2 หลัง และศูนย์วิจัยพืชสวนศรีสะเกษ จ.ศรีสะเกษ จำนวน 3 หลัง ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิแบบจำลองการไหลปั่นป่วน k- ϵ ชนิด Standard พบว่ามีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่วัดได้จริงจากโรงเรือนทั้งสองสถานที่ จึงใช้แบบจำลองการไหลปั่นป่วนดังกล่าวทำการจำลองหาระยะห่างระหว่างโรงเรือนจำนวน 5 ระยะ ดังนี้ 0.5m, 1.0m, 1.5m, 2.0m และ 3.0m ผลจากการจำลองระยะห่างของโรงเรือนที่ 1.5m, 2.0m และ 3.0m พบว่ามีอุณหภูมิภายในโรงเรือนต่ำและใกล้เคียงกัน โดยที่ระยะห่าง 1.5m เป็นระยะที่เหมาะสมเพราะเป็นระยะห่างที่น้อยที่สุดของโรงเรือนสามหลังที่ไม่มีอิทธิพลด้านสภาพอากาศต่อกัน

Thesis Title	The Study of Spacing Optimization of Tunnel Greenhouse using Computational Fluid Dynamics
Student	Mr.Wirot Horasart
Student ID.	55612303
Degree	Master of Engineering
Program	Agricultural Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Songvoot Saengchan

ABSTRACT

This study was aimed to investigate the proper spacing of tunnel greenhouse by using CFD (Computational Fluid Dynamics) technique. Fluent CFD software was applied to simulate the behavior of the air inside the tunnel greenhouse heated by solar radiation under the assumed conditions such as very low outside wind speed, the natural ventilation through both opening sides of the greenhouse and the turbulent flow of air inside the greenhouse. In this study the k- ϵ turbulence models were applied with three formulations namely, Standard k- ϵ model, Re-Normalization Group (RNG) k- ϵ model and Realizable k- ϵ model, in order to compare the air temperatures of the greenhouses. Each tunnel greenhouse was 3 m wide, 6 and 18 m long, 2.1 m high and covered with clear plastic sheet with 150 micron thickness. Both sides of the greenhouse were fully opened with a height of 1.14 m above the ground. 1m spacing of tunnel greenhouse were established apart at King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok two tunnel greenhouses and at Srisaket Horticultural Research Center Srisaket province three tunnel greenhouses. The results showed that the air temperatures obtained from the Standard k- ϵ model were similar to the measured temperatures in Both locations. The Standard k- ϵ model was subsequently used to simulate the spacing between the greenhouse at 5 distances namely, 0.5m, 1.0m, 1.5m, 2.0m and 3.0m. The results showed that inside low temperatures of the spacing of 1.5m, 2.0m and 3.0m are relatively close to each other. Therefore, the spacing of 1.5m was appropriate because it was a minimum

distance between three greenhouses which the inside temperatures were not influenced by beside greenhouses.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ทรงวุฒิ แสงจันทร์ ที่ให้ความรู้ ความช่วยเหลือตลอดจนให้คำชี้แนะในการแก้ไขปัญหาต่างๆจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณสำนักบริการคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สนับสนุนโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร ที่ให้ความอนุเคราะห์และสนับสนุนโรงเรือนอุโมงค์ที่ใช้ทดสอบ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ ศูนย์วิจัยพืชสวนศรีสะเกษ กรมวิชาการเกษตร ที่ให้การสนับสนุนและเอื้อเฟื้อสถานที่สร้างโรงเรือนอุโมงค์เพื่อการทดสอบ

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

วิโรจน์ ไทราศาสตร์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การทำงานของโปรแกรม Computation Fluid Dynamics.....	4
2.1.1 Pre-processor.....	4
2.1.2 Solver.....	5
2.1.3 Post-processor.....	7
2.2 การไหลแบบปั่นป่วน.....	8
2.3 อิทธิพลของความปั่นป่วนในสมการ Navier–Stokes.....	11
2.4 การสร้างแบบจำลองของสมการความปั่นป่วน.....	17
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	20
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการ.....	20
3.2 การสร้างโรงเรือนอุโมงค์เพื่อเก็บข้อมูลอุณหภูมิจริง.....	21
3.2.1 แบบโรงเรือนอุโมงค์.....	21
3.2.2 สร้างโรงเรือนอุโมงค์.....	22
3.2.3 การวัดอุณหภูมิและความเร็วลม.....	22
3.3 การสร้างแบบจำลอง รูปร่าง ขอบเขตที่ต้องการคำนวณ.....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัดยว้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.4 โปรแกรม ANSYS FLUENT.....	25
3.4.1 สมการ Continuty Equation.....	25
3.4.2 สมการโมเมนตัม Momentum Equation.....	25
3.4.3 สมการอนุรักษ์พลังงาน Energy Equation.....	25
3.5 แบบจำลองความปั่นป่วน.....	26
3.5.1 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k- ϵ Standard.....	26
3.5.2 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k- ϵ renormalization (RNG)	27
3.5.3 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k- ϵ Realizable.....	28
3.6 คุณสมบัติของอากาศที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง.....	30
3.7 วิเคราะห์ข้อมูล.....	30
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	31
4.1 ผลการทดลองครั้งที่ 1.....	31
4.1.1 ผลการวัดอุณหภูมิในโรงเรือนทดลองจริงและแบบจำลองการไหลปั่นป่วน K- ϵ	31
4.1.2 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดในโรงเรือนอุโมงค์และแบบจำลองการไหลปั่นป่วน K- ϵ ชนิดต่างๆ.....	33
4.1.3 ผลการจำลองและเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างโรงเรือน.....	34
4.2 ผลการทดลองครั้งที่ 2.....	37
4.2.1 ผลการวัดอุณหภูมิในโรงเรือนทดลองจริงและแบบจำลองการไหลปั่นป่วน K- ϵ	37
4.2.2 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดในโรงเรือนอุโมงค์และแบบจำลองการไหลปั่นป่วน K- ϵ ชนิดต่างๆ.....	40
4.2.3 ผลการจำลองและเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างโรงเรือน.....	40
4.3 ผลการทดสอบสร้างโรงเรือนอุโมงค์ที่ระยะห่าง 1.5m.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัด vi บ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	45
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	45
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	46
เอกสารอ้างอิง.....	47
ภาคผนวก.....	49
ภาคผนวก ก แบบแปลนโรงเรือนอุโมงค์.....	50
ภาคผนวก ข การสร้างแบบจำลอง ANSYS FLUENT.....	55
ภาคผนวก ค ประมวลรูปภาพ.....	58
ประวัติผู้เขียน.....	61



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้ง VII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมการการไหลสำหรับของไหลอัดตัวได้.....	16
3.1 คุณสมบัติของอากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	30
4.1 อุณหภูมิที่วัดในโรงเรือนอุโมงค์ 2 หลัง และแบบจำลองการไหลปั่นป่วน k- ϵ ชนิดต่างๆ.....	33
4.2 เปร้เซ็นความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองการไหลปั่นป่วน k- ϵ ชนิดต่างๆ (โรงเรือน 2 หลัง).....	34
4.3 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ที่จำลองระยะห่างระหว่างโรงเรือน 2 หลัง จำนวน 5 ระยะ.....	36
4.4 อุณหภูมิที่วัดในโรงเรือนอุโมงค์ 3 หลัง และแบบจำลองการไหลปั่นป่วน k- ϵ ชนิดต่างๆ.....	39
4.5 เปร้เซ็นความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองการไหลปั่นป่วน k- ϵ ชนิดต่างๆ (โรงเรือน 3 หลัง).....	40
4.6 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ที่จำลองระยะห่างระหว่างโรงเรือน 3 หลัง จำนวน 5 ระยะ.....	40
4.7 อุณหภูมิที่วัดในโรงเรือนอุโมงค์และแบบจำลองที่มีระยะห่างระหว่างโรงเรือน 1.5m.....	44
4.8 เปร้เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่มีระยะห่างระหว่างโรงเรือน 1.5 เมตร.....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้ง VIII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 โรงเรือนหลังคาโค้งมนกึ่งแหวน.....	2
1.2 โรงเรือนหลังคาอุโมงค์.....	2
2.1 ค่าความเร็วที่จุดต่างๆ ในสนามการไหลแบบปั่นป่วน.....	8
2.2 ภาพที่เห็นได้ด้วยตาเมื่อใช้เทคนิค flow visualization ของการไหลที่บริเวณชั้นขีดผิวผนัง.....	9
2.3 ค่าของพลังงานตลอดสเปกตรัมของความถี่ของความปั่นป่วนที่เกิดจากการไหลผ่านกริด.....	11
3.1 ไดอะแกรมผังการดำเนินงานศึกษาวิจัย.....	20
3.2 แบบโรงเรือนอุโมงค์.....	21
3.3 โรงเรือนอุโมงค์ จำนวน 3 หลัง มีระยะห่าง 1 m.....	22
3.4 เครื่องมือวัดอุณหภูมิและความเร็วลม.....	22
3.5 ตำแหน่งที่ตั้งหัววัดอุณหภูมิ 5 จุด.....	23
3.6 ตำแหน่งที่ตั้งหัววัดอุณหภูมิ 10 จุด.....	23
3.7 ตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิตดลองจริง.....	23
3.8 โดเมนของโรงเรือนอุโมงค์ จำนวน 2 หลัง ระยะห่างระหว่างโรงเรือน 1 m.....	24
3.9 โดเมนของโรงเรือนอุโมงค์ จำนวน 3 หลัง ระยะห่างระหว่างโรงเรือน 1 m.....	24
4.1 โรงเรือนอุโมงค์ที่ใช้ทดสอบที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.....	31
4.2 อุณหภูมิแบบจำลองการไหลปั่นป่วน K- ϵ ชนิดต่างๆของโรงเรือน 2 หลัง.....	32
4.3 แสดงอุณหภูมิที่วัดในโรงเรือนอุโมงค์และแบบจำลองการไหลปั่นป่วน K- ϵ ชนิดต่างๆ.....	33
4.4 แบบจำลองสภาพอุณหภูมิภายในโรงเรือน 2 หลัง ที่มีระยะห่างระหว่างโรงเรือน 5 ระยะ.....	35
4.5 แผนภาพอุณหภูมิในโรงเรือนอุโมงค์เพื่อเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างโรงเรือน.....	36
4.6 โรงเรือนอุโมงค์ที่ใช้ทดสอบที่ศูนย์วิจัยพืชสวนศรีสะเกษ.....	37
4.7 อุณหภูมิแบบจำลองการไหลปั่นป่วน K- ϵ ชนิดต่างๆ ของโรงเรือน 3 หลัง.....	38
4.8 แผนภาพอุณหภูมิที่วัดในโรงเรือนอุโมงค์และแบบจำลองการไหลปั่นป่วน K- ϵ ชนิดต่างๆ.....	39
4.9 แบบจำลองสภาพอุณหภูมิภายในโรงเรือน 3 หลัง ที่มีระยะห่างระหว่างโรงเรือน 0.5m	41
4.10 แบบจำลองสภาพอุณหภูมิภายในโรงเรือน 3 หลัง ที่มีระยะห่างระหว่างโรงเรือน 1.0m	41
4.11 แบบจำลองสภาพอุณหภูมิภายในโรงเรือน 3 หลัง ที่มีระยะห่างระหว่างโรงเรือน 1.5m	41

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 แบบจำลองสภาพอุณหภูมิภายในโรงเรือน 3 หลัง ที่มีระยะห่างระหว่างโรงเรือน 2.0m42	
4.13 แบบจำลองสภาพอุณหภูมิภายในโรงเรือน 3 หลัง ที่มีระยะห่างระหว่างโรงเรือน 3.0m42	
4.14 แผนภาพอุณหภูมิในโรงเรือนอุโมงค์เพื่อเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างโรงเรือน.....43	
4.15 แผนภาพเปรียบเทียบอุณหภูมิในโรงเรือนที่ระยะห่าง 1.5m กับแบบจำลอง.....44	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัดขอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

โรงเรือนปลูกพืช (Greenhouse) เป็นปัจจัยการผลิตที่มีความสำคัญในการผลิตพืชให้ได้ปริมาณสูงและมีคุณภาพดี เพราะโรงเรือนสามารถควบคุมสภาพแวดล้อมต่างๆ ให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืช เช่น แสงแดด อุณหภูมิ ความชื้น และช่วยป้องกันการเกิดโรคและการเข้าทำลายของแมลง ซึ่งจะช่วยลดการใช้สารเคมีในการป้องกันและกำจัดศัตรูพืชทำให้ผลผลิตมีปลอดภัยมากขึ้น โดยทั่วไปสามารถแบ่งโรงเรือนตามลักษณะระบบควบคุมสภาพแวดล้อมภายในออกเป็น 2 ระบบ ดังนี้ 1) โรงเรือนระบบปิด สามารถควบคุมอุณหภูมิและสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้ ซึ่งการควบคุมอุณหภูมิด้วยการระเหยของน้ำ (Evaporative Cooling System; EVEP) โดยอาศัยหลักการระเหยของน้ำ โดยการปล่อยน้ำให้ไหลเวียนในแผ่นรังผึ้ง (Cooling pad) ที่ติดตั้งอยู่ด้านหน้าของโรงเรือน ซึ่งโรงเรือนจะถูกปิดทุกด้าน อากาศภายในและภายนอกไหลเวียนไม่ได้โดยอิสระแต่จะถูกควบคุมไว้ในทิศทางที่ต้องการ อากาศที่ผ่านถูกดูดแผ่นรังผึ้งจะมีอุณหภูมิลดลง และอากาศจะเคลื่อนไปในโรงเรือนและไหลออกทางด้านท้ายของโรงเรือนด้วยพัดลมดูดอากาศ แต่ข้อเสียของโรงเรือนปิดคือ มีค่าก่อสร้างสูงและการทำงานต้องมีความรู้และการจัดการที่ดี 2) โรงเรือนระบบเปิด เป็นโรงเรือนที่ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิและสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้ คือ โรงเรือนมีหลังคาเพื่อป้องกันน้ำฝนหรือลดความชื้นของแสงแดดเท่านั้น รอบโรงเรือนมุงตาข่ายหรือเปิดโล่งเพื่อให้อากาศภายนอกพัดผ่าน ดังนั้นอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนจึงขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมภายนอกไม่สามารถควบคุมได้ ข้อดีของโรงเรือนระบบเปิดคือ มีราคาก่อสร้างถูกกว่าระบบปิด สำหรับประเทศไทยมีการใช้โรงเรือนปลูกพืชในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยเฉพาะไม้ตัดดอก เช่น เบญจมาศ ซึ่งโรงเรือนที่ใช้นั้นเป็นระบบเปิดทั้งหมด ส่วนลักษณะรูปแบบของโรงเรือนที่ใช้กันมี 2 แบบ คือ 1) โรงเรือนหลังคาโค้งมนกึ่งทรง (High-Roof Greenhouse, HRG) (รูปที่ 1) มีขนาดกว้าง 6 เมตร สูง 4.5 เมตร ยาว 12-18 เมตร 2) โรงเรือนหลังคาอุโมงค์ (High Tunnel Greenhouse, HTG) (รูปที่ 2) มีขนาดกว้าง 2.8-3 เมตร สูง 1.8-2.1 เมตร ยาว 6-18 เมตร ทั้งสองแบบมุงด้วยพลาสติกใส ด้านหน้า ด้านหลัง และด้านข้างเปิดโล่ง โรงเรือนมีการระบายอากาศตามธรรมชาติแบบโรงเรือนเปิดโดยทั่วไป แต่โรงเรือนหลังคาอุโมงค์เป็นแบบที่เกษตรกรนิยมมากที่สุด เพราะมีการสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อน เกษตรกรสามารถสร้างเองได้ มีค่าก่อสร้างและการซ่อมบำรุงที่ถูกกว่า[1] ซึ่งเกษตรกรแต่ละรายจะมีโรงเรือนอุโมงค์แบบนี้จำนวนหลายหลัง มีการเว้นระยะห่างระหว่างโรงเรือนมีตั้งแต่ 0.3-3 เมตร ซึ่งการเว้นระยะห่างระหว่างโรงเรือน 1 เมตร เป็นระยะที่นิยมที่สุด[1] เพราะสามารถใช้เป็นทางเดินระหว่างโรงเรือนได้สะดวก แต่มีเกษตรกรบางรายที่เว้นระยะห่างเพียง 0.3-0.5 เมตร เท่านั้นเพราะต้องการประหยัดเนื้อที่และสามารถสร้างโรงเรือนปลูกเบญจมาศได้จำนวนมาก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่จะมีข้อเสียคือ ทำให้การระบายอากาศภายในโรงเรือนไม่ดี อุณหภูมิภายในโรงเรือนสูงกว่าอุณหภูมิภายนอกมาก ซึ่งส่งผลทำให้มีผลผลิตต่ำและไม่ได้คุณภาพ แต่ก็มีเกษตรกรบางรายเว้นระยะห่างระหว่างโรงเรือนมากขึ้นประมาณ 1.5 - 3 เมตร จะทำให้การระบายอากาศดีขึ้นอุณหภูมิภายในโรงเรือนเท่ากับภายนอก ซึ่งปัจจุบันยังไม่มีข้อมูลทางวิชาการหรือคำแนะนำที่เหมาะสมเกี่ยวกับระยะห่างระหว่างโรงเรือนดังกล่าว



รูปที่ 1.1 โรงเรือนหลังคาโค้งมังกิ่งแขนง



รูปที่ 1.2 โรงเรือนหลังคาอุโมงค์

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) คือสาขาหนึ่งในกลศาสตร์ของไหลที่ใช้กระบวนการเชิงตัวเลขและขั้นตอนวิธี (algorithm) ในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับการไหลของของไหล ในการหาคำตอบนี้จะใช้คอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณซึ่งจะต้องคำนวณนับล้านๆครั้ง และเฉลยคำตอบเป็นรูปภาพเสมือนจริงแบบจำลองการทำปฏิกิริยาของของไหลและก๊าซต่อขอบผิวซึ่งกำหนดโดยสถานะของขอบเขต ปัจจุบันมีบริษัทที่พัฒนาซอฟต์แวร์ที่ช่วยคำนวณ CFD ทั้งเพื่อการศึกษาและขายในเชิงพาณิชย์หลายบริษัท เช่น Ansys Fluent ในด้านการเกษตร ที่ผ่านมามีการใช้โปรแกรม Ansys Fluent ช่วยคำนวณวิเคราะห์การไหลหรือการระบายอากาศและอุณหภูมิภายในโรงเรือน[2] เพื่อปรับปรุงโรงเรือนให้มีการระบายอากาศที่ดีขึ้นและลดอุณหภูมิภายในโรงเรือน จากที่กล่าวมาโปรแกรม Ansys Fluent สามารถคำนวณวิเคราะห์การระบายอากาศและอุณหภูมิภายในโรงเรือนได้ ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้จะใช้โปรแกรม Ansys Fluent จำลองสภาพอากาศและการระบายอากาศตามธรรมชาติในโรงเรือนเพื่อหาระยะห่างระหว่างโรงเรือนหลังคาอุโมงค์ที่เหมาะสมที่สามารถระบายอากาศได้ดีและไม่ส่งผลกระทบต่อด้านอุณหภูมิต่อกัน ซึ่งการหาระยะที่เหมาะสมดังกล่าวเป็นการช่วยให้เกษตรกรใช้พื้นที่ได้อย่างคุ้มค่าและประโยชน์สูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาระยะห่างที่เหมาะสมของโรงเรือนแบบอุโมงค์โดยการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโดยมีวัตถุประสงค์หลักดังต่อไปนี้ คือ

1. จำลองสภาพอากาศการระบายความร้อนตามธรรมชาติของโรงเรือนหลังคาอุโมงค์ที่มีระยะห่างระหว่างโรงเรือน 1 เมตร เพื่อหาแบบจำลองการไหลปั่นป่วน K- ϵ
2. สร้างโรงเรือนอุโมงค์และวัดอุณหภูมิภายในโรงเรือนเพื่อเปรียบเทียบแบบจำลอง
3. ทหาระยะห่างระหว่างโรงเรือนหลังคาอุโมงค์ที่เหมาะสมที่สามารถระบายอากาศได้ดี

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. โครงการวิจัยนี้เน้นหาระยะห่างที่เหมาะสมของโรงเรือนหลังคาอุโมงค์ที่ใช้ปลูกพืชในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ขนาดกว้าง 3 เมตร ยาว 18 เมตร สูง 2.1 เมตร
2. โรงเรือนอุโมงค์ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิเพื่อเปรียบเทียบหาแบบจำลองการไหลปั่นป่วน K- ϵ เป็นโรงเรือนเปล่าที่ไม่ได้มีการปลูกพืช

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รู้สภาพอากาศภายในโรงเรือนหลังคาอุโมงค์ที่มีระยะห่างระหว่างโรงเรือน 1 เมตร ซึ่งเป็นระยะที่เกษตรกรผู้ปลูกเบญจมาศนิยมใช้
2. ได้ทราบแบบจำลองการไหลปั่นป่วน K- ϵ ของอากาศในโรงเรือนหลังคาอุโมงค์ที่มีระยะห่างระหว่างโรงเรือน 1 เมตร
3. ได้ทราบระยะห่างระหว่างโรงเรือนหลังคาอุโมงค์ที่เหมาะสมที่สามารถระบายอากาศได้ดี เพื่อเป็นทางเลือกให้เกษตรกรเลือกในการเว้นระยะห่างระหว่างโรงเรือนเป็นการใช้พื้นที่ให้ได้ประโยชน์สูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Computation Fluid Dynamics หรือ CFD คือการวิเคราะห์ระบบที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหลหรือความร้อนหรือปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมี โดยการสร้างแบบจำลองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เทคนิคนี้เป็นประโยชน์อย่างยิ่งและใช้กันอย่างกว้างขวางทั้งอุตสาหกรรมและการเกษตร

2.1 การทำงานของโปรแกรม Computation Fluid Dynamics

โปรแกรม CFD เป็นเครื่องมือที่ถูกสร้างขึ้นด้วยลำดับขั้นตอนของการคำนวณเชิงตัวเลขที่สามารถแก้ปัญหาการไหลได้ ผู้ใช้ที่ไม่ใช่ผู้เชี่ยวชาญนั้นสามารถเชื่อมโยงกับเครื่องมือนี้ด้วยโปรแกรมที่สร้างขึ้นเพื่อเชื่อมโยงปัญหาทางวิศวกรรมที่ศึกษาไปสู่ข้อมูลในรูปของพารามิเตอร์เพื่อป้อนเข้าสู่โปรแกรมหลัก และหลังจากได้ผลลัพธ์จากการคำนวณแล้ว จะมีโปรแกรมอีกส่วนหนึ่งทำการแปลงข้อมูลไปเป็นรูปแบบที่สามารถเข้าใจได้ง่ายโดยผู้ใช้ เพราะฉะนั้น CFD ทุกโปรแกรมจะประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ 1) pre-processor 2) solver 3) post – processor ซึ่งพอจะสรุปหน้าที่ของแต่ละส่วนดังนี้

2.1.1 Pre-processor ประกอบด้วยส่วนป้อนข้อมูลของปัญหาการไหลในลักษณะที่ง่ายต่อการใช้งาน และจะเปลี่ยนข้อมูลนี้ให้เป็นในรูปแบบที่เหมาะสมตามวิธีของ Solver ที่เลือกใช้ ซึ่งผู้ใช้งานต้องทำในสิ่งต่างๆต่อไปนี้

- นิยามของรูปร่างขอบเขตที่สนใจซึ่งเป็นการแบ่งขอบเขตปัญหาที่ต้องการการคำนวณ (Computational domain)
- การสร้างกริด (Grid) ได้แก่ การแบ่งขอบเขตปัญหาเป็นส่วนเล็ก ๆ จำนวนมากๆ และไม่เกิดการซ้อนทับกันของส่วนเล็ก ๆ เหล่านี้ ซึ่งได้แก่ กริดหรือร่างตาข่าย (Mesh) ของเซลล์ (Cell) หรือปริมาตรควบคุม (Control volume) หรือ เอลิเมนต์ (Element)
- เลือกปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ ทางฟิสิกส์และเคมีซึ่งจำเป็นต่อการสร้างแบบจำลอง
- นิยามคุณสมบัติของของไหล
- กำหนดขอบเขตที่เหมาะสมที่เซลล์ซึ่งตรงกับ หรือสัมผัสกับขอบเขตของปัญหา

คำตอบของปัญหาการไหล (ความเร็ว ความดัน อุณหภูมิ ฯลฯ) ถูกนิยามภายในแต่ละเซลล์ ความแม่นยำของคำตอบที่เกิดขึ้นจากวิธี CFD ถูกควบคุมโดยจำนวนของเซลล์ โดยทั่วไปจำนวนเซลล์ยิ่งมากคำตอบยิ่งแม่นยำ ทั้งความแม่นยำของคำตอบ ต้นทุนของเครื่องคอมพิวเตอร์และเวลาการคำนวณขึ้นอยู่กับความละเอียดของกริดหรือตาข่าย โดยทั่วไป กริดหรือตาข่าย ที่มีลักษณะที่ดีจะมีลักษณะการแบ่งที่สม่ำเสมอ มีความละเอียดในบริเวณที่เกิดการแปรเปลี่ยนของคำตอบอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และหยาบมากขึ้นในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของผลเฉลยเพียงเล็กน้อยเพื่อความประหยัดทรัพยากรและเวลาในการคำนวณ โดยได้มีความพยายามสร้างโปรแกรมที่สามารถปรับขนาดของกริดให้เหมาะสมตามความแปรเปลี่ยนของผลเฉลย (หรือที่เรียกกันในวงการว่า adaptive mesh) ได้ด้วยตัวมันตัวเอง จนในที่สุดก็มีโปรแกรมที่สามารถปรับขนาดของ กริดให้ละเอียดได้อย่างอัตโนมัติในบริเวณที่มีการแปรเปลี่ยนอย่างมากของผลเฉลยได้

เวลาที่ใช้ในโครงการที่เกี่ยวข้องกับงานด้าน CFD จะถูกใช้ไปกับการกำหนดกรอบของปัญหาที่ศึกษา การสร้างรูปร่างของปัญหาและการสร้างกริดเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นเพื่อให้สามารถใช้ทักษะของทรัพยากรบุคคลทางด้าน CFD ให้ได้อย่างเต็มที่ จำเป็นต้องมีการเชื่อมต่อกันระหว่างงานทางด้าน CAD ที่สร้างขึ้นโดยโปรแกรมเชิงพาณิชย์ทั่วไป กับงานด้าน Pre-processor ซึ่ง ทำให้โปรแกรมส่วนใหญ่ต้องมี CAD interface ที่สามารถรับถ่ายข้อมูลจาก โปรแกรมทาง CAD ได้อย่างดีจึงจะสามารถรองรับปัญหาที่ซับซ้อนได้ เพื่อให้การออกแบบ จำนวนกริดที่ใช้ การกำหนดกรอบของปัญหา ฯลฯ มีความเหมาะสม โดยมีความแม่นยำเพียงพอกับความต้องการ ภายใต้ต้นทุน ที่ยอมรับได้ เป็นต้น

นอกจากนี้ Pre-processor ยังได้ให้ผู้ใช้สามารถเปิดข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุสำหรับของไหลรวมทั้งแบบจำลองของทางกายภาพแบบพิเศษต่างๆ และปฏิกิริยาทางเคมี (เช่น แบบจำลองความปั่นป่วนของการไหล การแผ่รังสีความร้อน แบบจำลองการเผาไหม้ เป็นต้น)

2.1.2 Solver เทคนิคการหาค่าตอบเชิงตัวเลขจากกล่าวได้ว่ามีอยู่ 3 แบบ ได้แก่ 1) วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite Difference Method) 2) วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) 3) วิธีสเปกตรัล (Spectral Method) โดยขั้นตอนพื้นฐานของ Solvers เป็นตามขั้นตอนดังนี้

- การประมาณตัวแปรการไหลที่ไม่รู้ค่าด้วยฟังก์ชันอย่างง่าย
- การแปลงรูปให้เป็นฟังก์ชันของโหนด (discretisation) โดยการแทนค่าตัวแปรที่ประมาณไว้ในสมการควบคุมการไหลและ ในขั้นตอนต่อมาก็ทำการจัดรูปสมการคณิตศาสตร์
- การหาค่าตอบของสมการพีชคณิต (Algebraic equations)

ความแตกต่างระหว่าง 3 วิธีดังกล่าวนี้ อยู่ที่วิธีการประมาณค่าตัวแปร และขั้นตอนการแปลงรูปให้เป็นฟังก์ชันของค่าตัวแปรที่โหนด (Discretisation: transformation into a function of node values)

1) วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite Difference Method)

วิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมนี้จะแปลงรูปสมการอนุพันธ์ของตัวแปรที่ไม่รู้ค่า ซึ่งในกรณีนี้ นิยามให้เป็น ϕ ของปัญหาการไหล โดยพิจารณาให้ตัวแปรอยู่ที่จุดตัดของแนวเส้นซึ่งเรียกว่า กริด(Grid) โดยทั่วไปอนุกรมกำลังแบบ Taylor ซึ่งทำการตัดพจน์อันดับสูงออกไป จะถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลต่างสี่เหลี่ยมซึ่งทำให้ได้สมการพีชคณิต (Algebraic equations) ของตัวแปรไม่รู้ค่า ϕ ของแต่ละกริดออกมา [3]

2) วิธีไฟไนท์อีเลเมนต์ (Finite Element Method)

วิธีไฟไนท์อีเลเมนต์ที่ได้สมมติฟังก์ชันอย่างง่ายขึ้นมาในแต่ละชิ้นส่วนย่อยๆ นั้น (เช่น ฟังก์ชันเชิงเส้น หรือฟังก์ชัน quadratic เป็นต้น) ซึ่งจะใช้อธิบายการแปรเปลี่ยนของตัวแปรการไหลที่ไม่รู้ค่านั้น (เช่น ค่า ϕ) โดยที่สมการควบคุม (Governing equation) จะถูกสร้างขึ้นเพื่อให้การหาคำตอบของ ϕ เป็นที่น่าพอใจ ถ้าฟังก์ชันที่สมมติขึ้นเพื่อแทนค่าประมาณของ ϕ ถูกแทนไปในสมการควบคุม ซึ่งจะทำให้ไม่ได้คำตอบที่แท้จริง (Exact solution) ดังนั้นค่าเศษตกค้าง (Residual) จะถูกนิยามเพื่อวัดค่าผิดพลาด (error) ที่เกิดขึ้น ค่าเศษตกค้างหรือค่าผิดพลาดจะถูกทำให้น้อยลง โดยคูณเข้าด้วยกันกับกลุ่มของฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก (Weighting functions) ผลลัพธ์จากการอินทิเกรตจะทำให้ได้กลุ่มของสมการพีชคณิต ซึ่งประกอบไปด้วยสัมประสิทธิ์ที่ไม่รู้ค่าของฟังก์ชันการประมาณที่กำหนดขึ้นนั้น

อย่างไรก็ดี ทฤษฎีของไฟไนท์อีเลเมนต์ถูกพัฒนาขึ้นมาในตอนแรกเริ่มนั้น เพื่อการวิเคราะห์โครงสร้างซึ่งเป็นปัญหาเกี่ยวกับความเค้นและการเสียรูปร่างของของแข็ง ภายหลังได้มีการประยุกต์ใช้กับปัญหาของไหล เช่น Zienkiewicz และ Taylor เป็นต้น ในประเทศไทยก็ได้มีการพัฒนาระเบียบวิธีไฟไนท์อีเลเมนต์สำหรับปัญหาของแข็งและของไหลด้วยเช่นกัน [4]

3) วิธี Spectral

วิธี spectral ทำการประมาณการตัวไม่รู้ค่าโดยวิธี กำหนดผลเฉลยในรูปแบบของอนุกรม Fourier หรือ อนุกรมยกกำลังโพลีโนเมียลของ Chebychev วิธีการนี้ไม่เหมือนกับวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมหรือวิธีไฟไนท์อีเลเมนต์ กล่าวคือฟังก์ชันการประมาณค่าจะถูกใช้กับทั้งโดเมนภายในขอบเขตของปัญหา ไม่ใช่เพียงตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งของโดเมนเท่านั้น จากนั้นแทนฟังก์ชันการประมาณค่าที่ตัดพจน์อันดับสูงแล้วนั้น ลงในสมการควบคุม ทำการกำหนด Constraint เพื่อสร้างสมการพีชคณิตของสัมประสิทธิ์ของอนุกรม Fourier หรืออนุกรมยกกำลังโพลีโนเมียลของ Chebychev ดังกล่าว โดยร่วมกับวิธีถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง คล้ายๆ กับเทคนิคของไฟไนท์อีเลเมนต์ หรืออาจทำการกำหนด Constraint โดยสร้างฟังก์ชันการประมาณค่าที่เมื่อแทนค่าพิกัดของโหนดแล้ว จะได้ค่าในลักษณะที่สอดคล้องกับผลเฉลยแบบแม่นยำ [5]

ในโปรแกรมเชิงพาณิชย์หลายตัว เช่น ANSYS FLUENT 14.0, PHOENICS FLUENT, FLOW 3D และ STAR-CD เป็นต้น ใช้วิธีปริมาตรการสี่เหลี่ยม (Finite Volume Method)

วิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมถูกพัฒนาแรกเริ่มจากวิธีของผลต่างสี่เหลี่ยมแบบ เซปักตรัล กล่าวคือมีการตัดพจน์อันดับสูงออก ลำดับขั้นตอนการคำนวณเชิงตัวเลขของวิธีการนี้ประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

- การอินทิเกรตสมการควบคุมของของไหลทั้งปริมาตรควบคุมเล็กๆ ทุกปริมาตร ภายในได้ขอบเขตของปัญหา
- การแปลงรูปสมการ ซึ่งประกอบไปด้วย การแทนค่าเทอมต่างๆ (การพา การแพร่ การก่อตัว หรือ การสูญเสีย) ของสมการควบคุมที่อินทิเกรตแล้วนั้น ด้วยการประมาณค่าที่อยู่ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารทงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบที่เหมือนกับผลต่างสี่เหลี่ยม คือเป็นเทอมที่อยู่ในรูปแบบของค่าผลเฉลยที่โหนด การประมาณค่าดังกล่าวมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน ทั้งนี้การแปลงรูปสมการนี้ทำให้เกิดระบบสมการพีชคณิตขึ้น

- การหาคำตอบของสมการพีชคณิตโดยวิธีการกระทำซ้ำ (Iterative processes) [6][7]

ขั้นตอนแรก คือ การอินทิเกรตปริมาตรการควบคุม ซึ่งเป็นการทำให้วิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมแตกต่างจากเทคนิค CFD อื่น ๆ ทั้งหมด โดยขั้นตอนในการแก้ปัญหาเชิงตัวเลขนี้ยังคงสะท้อนให้เห็นหรืออีกนัยหนึ่งคือ ยังอยู่บนพื้นฐานของกฎการอนุรักษ์สสาร และพลังงานตามหลักทางฟิสิกส์ไว้ในแต่ละเซลล์เล็กๆที่มีขนาดแน่นอนเหล่านั้น สิ่งนี้เองที่ทำให้เกิดความชัดเจนในความสัมพันธ์ระหว่างลำดับขั้นการคำนวณเชิงตัวเลข (Algorithm) กับกฎการอนุรักษ์ปริมาณทางฟิสิกส์พื้นฐาน จึงทำให้ง่ายในการทำความเข้าใจแนวคิดของวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมมากกว่าวิธี ผลต่างสี่เหลี่ยม วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิธี เสปีกตรัล

การอนุรักษ์ตัวแปรการไหลในกรณีทั่วไป เช่น ค่า ϕ สำหรับตัวอย่าง เช่น ความเร็วในแนวแกนหรือเอ็นทาลปี ภายในปริมาตรควบคุม สามารถอธิบายเป็นสมดุลระหว่างกระบวนการต่างๆ เราสามารถเขียนได้ว่า

อัตราการเพิ่มขึ้นของ ϕ ภายในปริมาตรควบคุม เทียบกับเวลา	=	ฟลักซ์สุทธิของ ϕ เนื่องจากการพาไป ในปริมาตรควบคุม	+	ฟลักซ์สุทธิของ ϕ เนื่องจากการแพร่ ในปริมาตรควบคุม	+	อัตราการเพิ่ม ϕ สุทธิ ในปริมาตรควบคุม
---	---	--	---	--	---	--

โปรแกรม CFD ประกอบด้วยเทคนิคการแปลงรูปที่เหมาะสม สำหรับการศึกษารากฐานการเคลื่อนย้ายที่จะประกอบไปด้วย เทอมของการพา (เนื่องจากการไหลของของไหล) และเทอมของการแพร่ (เนื่องจากความไม่เท่ากันของค่า ϕ ระหว่างจุดหนึ่งกับอีกจุดหนึ่ง) รวมทั้งเทอมของแหล่งกำเนิดหรือทำลาย (เทียบกับการสร้างและการทำลายของ ϕ) และเทอมของอัตราการเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา ปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ขั้นพื้นฐานมีความซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นการหาคำตอบแบบกระทำซ้ำจึงเป็นสิ่งที่ต้องนำมาใช้ วิธีการหาคำตอบที่นิยมใช้มากที่สุดคือ TDMA แบบ Line by line ส่วนลำดับขั้นของการหาคำตอบคือแบบ SIMPLE ให้แน่ใจว่าการเชื่อมโยงระหว่างความดันและความเร็วถูกต้อง โปรแกรมเชิงพาณิชย์บางตัวอาจจะให้ผู้ใช้เลือกเทคนิคที่ทันสมัยกว่า เช่น Stone's Algorithm และวิธี Conjugate gradient เป็นต้น

2.1.3 Post – processor เป็นส่วนที่ใช้แสดงผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น ปัจจุบันโปรแกรมเชิงพาณิชย์ CFD ได้รับความนิยมมากขึ้นเนื่องจากความสามารถในการทำกราฟฟิคที่ยืดหยุ่นรวมทั้งสะดวกต่อการใช้งาน นอกจากนี้โปรแกรมยังได้สร้างเครื่องมือแสดงภาพในการมองในที่นี้ได้รวมถึง

- รูปร่างของขอบเขตของปัญหา และ แสดงกริด

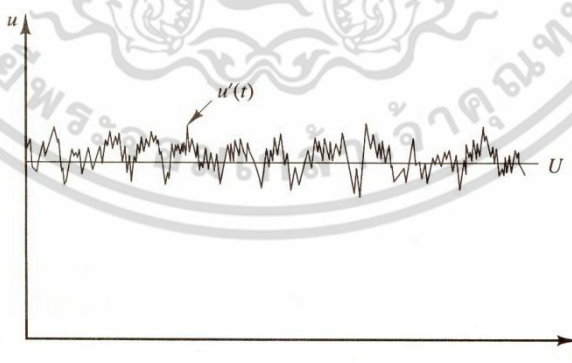
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เวกเตอร์
- ภาพ contour และเส้น
- พล็อตพื้นผิวแบบ 2D และ 3D
- เส้นการวิ่งของอนุภาค (Particle Tracking)
- จัดภาพการมองให้เหมาะสม (ในการหมุน การเคลื่อนที่ การย่อ-การขยาย เป็นต้น)
- การสร้างไฟล์ Postscript เป็นสี

2.2 การไหลแบบปั่นป่วน

ในขั้นตอนนี้เรามาดูคุณลักษณะเด่นๆ ของการไหลแบบปั่นป่วน ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของการไหลจะเป็นตัวชี้วัด ซึ่งบ่งชี้ถึงอัตราส่วนของแรงเฉื่อย (ซึ่งสัมพันธ์กับการพาของของไหล) ต่อ แรงเนื่องจากความหนืด ในการทดลองเราจะสังเกตได้ว่าที่ค่าเรย์โนลด์ต่ำกว่าค่าๆ หนึ่งที่เรียกว่าเป็นค่าวิกฤติ Re_{crit} นั้นการไหลจะมีลักษณะราบเรียบ ซึ่งแต่ละชั้นของของไหลจะมีความเป็นระเบียบ ซึ่งเป็นการไหลแบบลามินาร์

ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เกิน Re_{crit} จะเกิดปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนขึ้นหลายอย่างซึ่งทำให้ในที่สุดแล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะจำเพาะของการไหลไปอย่างมาก สุดท้ายการไหลก็เป็นแบบไร้ระเบียบและยุ่งเหยิง การเคลื่อนที่ของของไหลเป็นแบบไม่คงตัวตลอดเวลา ถึงแม้จะมีเงื่อนไขขอบเขตที่คงที่ก็ตาม ค่าและทิศทางของความเร็วรวมทั้งคุณสมบัติอื่นๆ ของการไหลก็จะเปลี่ยนแปลงอย่างยุ่งเหยิงเช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นการไหลแบบปั่นป่วนนั่นเอง อย่างไรก็ตามหากเราทำการวัดค่าของความเร็วที่จุดใดจุดหนึ่งตลอดเวลาที่ยาวนานพอสมควร ค่าของความเร็วก็จะเป็นตามรูปแบบในรูปที่ 2.1 ข้างล่างนี้



รูปที่ 2.1 ค่าความเร็วที่จุดหนึ่งๆ ในสนามการไหลแบบปั่นป่วน

ความยุ่งเหยิงดังกล่าวนี้เป็นผลให้เราไม่สามารถคำนวณหา หรืออธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคของไหลได้ แต่หากเราพิจารณาค่าของความเร็วดังที่แสดงในรูปที่ 2.1 ก็จะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าความเร็วประกอบด้วย ค่าความเร็วเฉลี่ยที่คงตัว คือ U และ ค่าของความเร็วที่ผันแปรหรือแกว่งไปมา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$u'(t)$ ที่ซ้อนทับกันอยู่ ดังนั้นจึงได้ว่า $u(t) = U + u'(t)$ และโดยทั่วไปเราจะทำการพิจารณาลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน โดยดูจากองค์ประกอบของความเร็วและคุณสมบัติเฉลี่ย U, V, W, P เป็นต้น และ ค่าความเร็วและคุณสมบัติผันแปรที่เกิดขึ้นในแต่ละแกน u', v', w', p' เป็นต้น

ถึงแม้ว่าปัญหาการไหลบางแบบสามารถสรุปการพิจารณาเป็นแบบเชิงเส้น 1 มิติ หรือระนาบ 2 มิติ แต่ปรากฏการณ์ความปั่นป่วนนั้นจะเป็นแบบที่เกิดขึ้นในปริภูมิ 3 มิติเสมอ นอกจากนี้เมื่อทำการสังเกตด้วยตาโดยใช้เทคนิคทางด้าน Flow visualization จะพบว่า จะเกิดการหมุนวนของกระแสการไหล ที่เรียกว่าการหมุนวนปั่นป่วน (Turbulent eddies) ซึ่งมีขนาดต่างๆกัน รูป 2.2 แสดงภาพตัดขวางของชั้นของไหลที่เกิดความปั่นป่วนขึ้น ในบริเวณที่ขีดผิวผนังที่เป็นขอบเขตของการไหล ขนาดของการหมุนวนมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของขอบเขตการไหล ซึ่งมีการหมุนวนที่มีขนาดรองลงมาและการหมุนวนเล็กๆที่อยู่ใกล้ๆกันนั้นเกิดขึ้นด้วย

อนุภาคของไหลที่อยู่ห่างกันในระยะหนึ่งนั้นอาจถูกพามาให้ใกล้ชิดกันได้เพราะการหมุนวนของความปั่นป่วนนี้ ดังนั้นคุณสมบัติในเชิงมหภาคของของไหลก็จะเกิดการผสมผสานกันอย่างดีจากการหมุนวนนี้ หากเราปล่อยน้ำสีเข้าไปในสนามการไหลที่มีความปั่นป่วน เราจะเห็นการกระจายของสีอย่างรวดเร็ว การผสมกันอย่างดีนี้หมายถึงการไหลดังกล่าวจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของมวล โมเมนตัม และพลังงานที่สูงนั่นเอง



รูปที่ 2.2 ภาพที่เห็นได้ด้วยตาเมื่อใช้เทคนิค flow visualization ของการไหลที่บริเวณชั้นขีดผิวผนัง

ความเร็ว \mathcal{O} และขนาด l ของการหมุนวนขนาดใหญ่ จะอยู่ในย่านเดียวกับความเร็วเฉลี่ย U ของการไหลและขนาด L ของการไหลเฉลี่ยตามลำดับ ดังนั้นค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของการหมุนวนขนาดใหญ่ ($= \mathcal{O}l/v$) จะมีค่าสูงมากในการไหลแบบปั่นป่วน (เพราะเนื่องจากค่า UL/v จะมีค่าสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

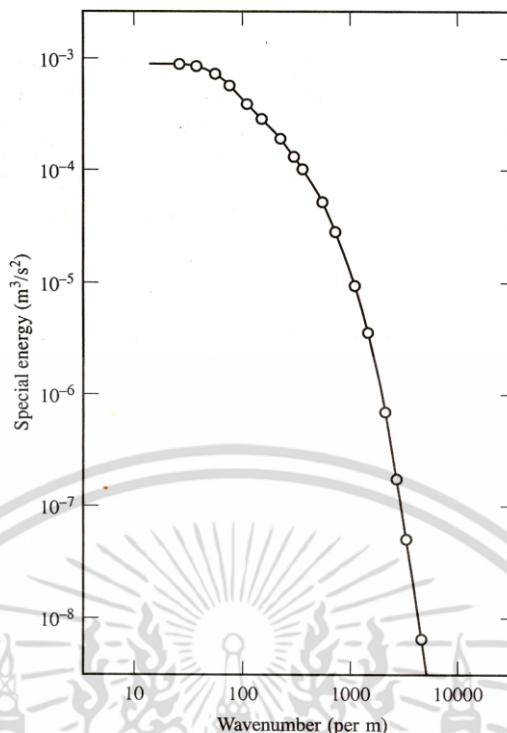
เช่นกัน) ดังนั้นการหมุนวนขนาดใหญ่จะอยู่ภายใต้อิทธิพลของแรงเฉื่อยเป็นหลัก ซึ่งทำให้อิทธิพลของแรงอันเนื่องมาจากความหนืดมีผลน้อยมาก

จะเห็นได้ว่าการหมุนวนขนาดใหญ่นี้เกือบจะเป็นการไหลแบบไร้ความหนืด ค่าโมเมนตัมเชิงมุมก็เกือบจะคงที่ระหว่างการคลายตัวของการหมุนวน ทำให้ความเร็วของการหมุนวนลดลงเมื่อรัศมีของการหมุนวนเพิ่มขึ้น กระบวนการนี้จะสร้างการเคลื่อนที่ของกระแสหมุนวนที่มีขนาดเล็กกว่า เกิดอยู่ข้างกระแสหมุนวนหลักนั้นโดยมีความเร็วแปรผันมากกว่าและคาบเวลาสั้นกว่า งานที่เกิดขึ้นจากการไหลหลักจะป้อนให้กับกระแสหมุนวนขนาดใหญ่ซึ่งจะทำให้ความปั่นป่วนดำรงสภาพอยู่ได้

การคลายตัวของการหมุนวนขนาดเล็กจะเกิดขึ้นโดยถ่ายเทโมเมนตัมไปสู่กระแสหมุนวนที่เล็กกว่า ซึ่งการเกิดปรากฏการณ์เช่นนี้ พลังงานจลน์จะถูกส่งผ่านจากกระแสหมุนวนขนาดใหญ่ไปสู่กระแสหมุนวนที่เล็กกว่าและเล็กลงเรื่อยๆ หรือที่เรียกว่า ชั้นของระดับพลังงาน (Energy cascade) คุณสมบัติที่ผันแปรในการไหลแบบปั่นป่วนนั้น บ่งชี้ถึงพลังงานจลน์ที่แฝงอยู่ พลังงานจลน์นี้มีอยู่ในความผันแปรที่ทุกๆ ความถี่ ($=2\pi f/U$ โดยที่ f คือความถี่ของการสั่น) ค่าของพลังงานตลอดสเปกตรัมความถี่แสดงให้เห็นในรูป 2.3

การเคลื่อนที่ผันแปรของของไหลในระดับที่เล็กที่สุดในการไหลแบบปั่นป่วน จะได้รับอิทธิพลของแรงอันเนื่องมาจากความหนืดของของไหลนั้นเป็นหลัก ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของการหมุนวนขนาดเล็กที่สุดนั้นคำนวณได้จากความเร็ว U ของการหมุนวนนั้นกับขนาดของการหมุนวน η ($Re = \eta U/\nu$) ซึ่งจะเท่ากับ 1 ที่ระดับนี้ (อยู่ระหว่าง 0.1 – 0.01 มิลลิเมตร และความถี่อยู่ราวๆ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ ในการไหลทางวิศวกรรมทั่วไป) ความหนืดจะมีอิทธิพลสูงจึงมีความสำคัญ ซึ่งแตกต่างกับการหมุนวนที่ระดับใหญ่ และจะเกิดงานขึ้นเพื่อใช้เอาชนะความหนืด ดังนั้นพลังงานที่แฝงอยู่ในการหมุนวนจะถูกลดทอน และเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนที่อยู่ภายในของไหล เป็นผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานจลน์ในการไหลแบบปั่นป่วนนั่นเอง

เมื่อพิจารณาโครงสร้างของการหมุนวนขนาดใหญ่เราจะพบว่ามันมีโครงสร้างแบบ Anisotropic กล่าวคือเป็นการหมุนวนแบบไม่เท่ากันในแต่ละทิศทางและโครงสร้างของการหมุนวนมีความเกี่ยวข้องกับสนามการไหลอย่างมาก และการส่งผ่านพลังงานไปสู่การหมุนวนขนาดเล็กจะแตกต่างกันในแต่ละทิศทาง หากแต่ที่การหมุนวนขนาดเล็กพลังงานจะถูกลดทอนทุกทิศทางอันเนื่องมาจากความหนืด ดังนั้นที่การไหลในระดับการหมุนวนขนาดเล็กนั้นจะมีการแพร่กระจายของคุณสมบัติของการไหลแบบ Isotropic (non-directional)



รูปที่ 2.3 ค่าของพลังงานตลอดสเปกตรัมของความถี่ของความปั่นป่วนที่เกิดจากการไหลผ่านกริด

2.3 อิทธิพลของความปั่นป่วนในสมการ Navier–Stokes

ความแตกต่างระหว่างการไหลแบบราบเรียบกับการไหลแบบปั่นป่วนก็คือ ที่การไหลปั่นป่วนนั้นจะเกิดการหมุนวนขึ้นโดยมีขนาดที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่นการไหลขนาด 0.1 เมตร² ที่มีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สูงๆ จะปรากฏการหมุนวนตั้งแต่ขนาด 10 จนถึง 100 ไมครอน ซึ่งถ้าหากต้องการทำการจำลองการไหลโดยวิธีเชิงตัวเลขที่ละเอียดเพียงพอนั้น จะต้องสร้างขนาดของปริมาตรควบคุมจำนวนมาก (ในย่าน 10^9 ถึง 10^{12}) และความถี่ของความแปรเปลี่ยนที่มากที่สุดจะอยู่ในย่าน 10 kHz ซึ่งหมายถึงต้องใช้คาบเวลาในการคำนวณในช่วง $100 \mu s$ ดังนั้นการที่จะทำการจำลองปรากฏการณ์ของความปั่นป่วนแบบที่ขึ้นกับเวลาโดยตรงนั้นจะต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีความสามารถสูงมากเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณ ในขณะเดียวกันในทางปฏิบัตินั้นเรามักจะสนใจค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติต่างๆ ของของไหล เช่น ค่าความเร็วเฉลี่ย ความดันเฉลี่ย ความเค้นเฉลี่ย เป็นต้น ในหัวข้อนี้เราจะมาศึกษาว่าความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นจะส่งผลต่อคุณสมบัติต่างๆของของไหลอย่างไร

สมการเรย์โนลด์

เริ่มจากการนิยาม Φ คือค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติ φ ใดๆ ของของไหล

$$\Phi = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \varphi(t) dt \quad (2.1)$$

ในทางทฤษฎีนั้น เราควรจะต้องอินทิเกรตในคาบเวลาที่กว้างมากๆ ที่เข้าสู่อนันต์ แต่ถ้า Δt กว้างมาก เพียงพอที่ครอบคลุมค่าความแปรเปลี่ยนที่ช้าที่สุดของคุณสมบัติการไหลนั้น (อันเนื่องมาจากการหมุนวนที่ใหญ่ที่สุด) ก็อนุโลมให้ใช้ Δt นั้นได้ ส่วนในการไหลแบบไม่คงตัวนั้นเราสามารถหาค่าเฉลี่ยดังกล่าว โดยการบันทึกผลค่าคุณสมบัติที่ตำแหน่งและเวลาเดิม โดยทำการทดลองซ้ำหลายๆ ครั้งมากๆ ได้ เรียกว่า assemble average

คุณสมบัติ φ ของการไหลซึ่งแปรเปลี่ยนไปตามเวลานั้น สามารถมองได้ว่าเป็น ผลบวกของค่าเฉลี่ย Φ กับ ค่าของความผันแปรที่ขึ้นกับเวลา φ' ซึ่งค่าเฉลี่ยของความผันแปรนี้จะเท่ากับศูนย์ ดังนั้น $\varphi(t) = \Phi + \varphi'(t)$ ซึ่งต่อไปนี้จะละ t ไว้เพื่อความสะดวกในการนำไปใช้ซึ่งจะเป็น $\varphi = \Phi + \varphi'$

$$\overline{\varphi'} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \varphi'(t) dt \equiv 0 \quad (2.2)$$

เราสามารถประเมินระดับความรุนแรงของความผันแปรได้โดยการหาค่า root-mean-square (rms) ดังนี้

$$\varphi_{\text{rms}} = \sqrt{\overline{(\varphi')^2}} = \left[\frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} (\varphi')^2 dt \right]^{1/2} \quad (2.3)$$

ค่า rms นี้มีความสำคัญเพราะเนื่องจากเป็นค่าที่เราสามารถตรวจวัดได้โดยการใช้เครื่องมือวัดแบบที่ตรวจจับความเร็วที่มีความไวต่อความปั่นป่วน เช่น hot wire anemometer ทั้งนี้ค่าพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน k (พลังงานต่อหน่วยมวล) สามารถหาได้ดังนี้

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (2.4)$$

นอกจากนี้ค่าความเข้มข้นของความปั่นป่วน T_i นั้นจะเป็นค่าที่เชื่อมโยงกับค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนกับพลังงานจลน์ของการไหลเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_i = \frac{\left(\frac{2}{3}k\right)^{1/2}}{U_{\text{ref}}} \quad (2.5)$$

ก่อนที่เราจะทำการแปลงรูปสมการการไหล เราจะมาสรุปกฎต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินการทางพีชคณิตของคุณสมบัติของของไหล 2 ตัวแปรใดๆ ที่นำเสนอในรูปแบบของค่าเฉลี่ยและค่าผันแปร $\varphi = \Phi + \varphi'$ และ $\psi = \Psi + \psi'$ ดังนี้

$$\begin{aligned} \overline{\varphi} = \overline{\psi} = 0; \quad \overline{\Phi} = \Phi; \quad \frac{\partial \overline{\varphi}}{\partial s} = \frac{\partial \Phi}{\partial s}; \quad \int \overline{\varphi} ds = \int \Phi ds \\ \overline{\varphi + \psi} = \overline{\Phi + \Psi}; \quad \overline{\varphi\psi} = \overline{\Phi\Psi} + \overline{\varphi'\psi'}; \quad \overline{\varphi\Psi} = \overline{\Phi\Psi}; \quad \overline{\varphi'\Psi} = 0 \end{aligned} \quad (2.6)$$

ความสัมพันธ์ที่กล่าวทั้งหมดนี้สามารถพิสูจน์ได้จากการประยุกต์สมการ(2.1) และ (2.2) และนอกจากนี้การหาอนุพันธ์ของคุณสมบัติต่างๆก็สามารถกระทำได้ ไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติเชิงเวกเตอร์ $\mathbf{a} = \mathbf{A} + \mathbf{a}'$ ที่ผสมกับคุณสมบัติเชิงสเกลลาร์ $\varphi = \Phi + \varphi'$

$$\begin{aligned} \overline{\text{div} \mathbf{a}} = \overline{\text{div} \mathbf{A}}; \quad \overline{\text{div}(\varphi \mathbf{a})} = \overline{\text{div}(\varphi \mathbf{a})} = \overline{\text{div}(\Phi \mathbf{A})} + \overline{\text{div}(\varphi' \mathbf{a}')} ; \\ \overline{\text{div} \text{grad} \varphi} = \overline{\text{div} \text{grad} \Phi} \end{aligned} \quad (2.7)$$

เพื่อที่จะให้เห็นภาพที่ชัดเจนของอิทธิพลของค่าผันแปรในสมการนาเวียร์-สโตกส์ เราจะพิจารณาปัญหาการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ที่มีความหนืดคงที่ในพิกัดฉาก ซึ่งจะให้ความซับซ้อนของการแปลงสมการลดลง ซึ่งกรณีนี้จะสามารถแสดงเวกเตอร์ความเร็ว \mathbf{u} ได้ 3 องค์ประกอบ ในทิศ x , y และ z ซึ่งคือ u , v และ w ตามลำดับ

$$\overline{\text{div} \mathbf{u}} = 0 \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \overline{\text{div}(u \mathbf{u})} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \overline{\text{div} \text{grad} u} \quad (2.9a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \overline{\text{div}(v \mathbf{u})} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \overline{\text{div} \text{grad} v} \quad (2.9b)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \overline{\text{div}(w \mathbf{u})} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \overline{\text{div} \text{grad} w} \quad (2.9c)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการแทนค่าความเร็ว และความดัน ในสมการ (2.8) และ (2.9a-c) ด้วยพจน์ที่เป็นการบวกกันของค่าเฉลี่ยและค่าผันแปร

$$\mathbf{u} = \mathbf{U} + \mathbf{u}' ; u = U + u' ; v = V + v' ; w = W + w' ; p = P + p'$$

จากนั้น ทำการเฉลี่ยพจน์ทุกพจน์ตลอดช่วงเวลาหนึ่งที่ยาวนานเพียงพอ และเมื่อพิจารณาสมการความต่อเนื่อง (2.8) พร้อมกับที่เราประยุกต์สมการ (2.6) ได้ว่า $\overline{\text{div}(\mathbf{u})} = \text{div}(\mathbf{U})$ เราจะได้สมการความต่อเนื่องของการไหลคือ

$$\text{div}\mathbf{U} = 0 \quad (2.10)$$

เราสามารถทำการแปลงรูปสมการโมเมนตัมได้ในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน ยกตัวอย่างเช่นโมเมนตัมตามแนวแกน x โดยแต่ละพจน์ของสมการโมเมนตัมในแนวแกน x เป็นดังนี้

$$\begin{aligned} \overline{\frac{\partial u}{\partial t}} &= \frac{\partial U}{\partial t} ; \quad \overline{\text{div}(\mathbf{u}\mathbf{u})} = \text{div}(\mathbf{U}\mathbf{U}) + \text{div}(\overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'}) \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} ; \quad \overline{\nu \text{div grad } \mathbf{u}} = \nu \text{div grad } \mathbf{U} \end{aligned}$$

โดยการแทนค่าผลเหล่านี้ในสมการโมเมนตัมแกน x จะได้

$$\begin{aligned} \overline{\frac{\partial u}{\partial t}} + \overline{\text{div}(\mathbf{u}\mathbf{u})} + \overline{\text{div}(\overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'})} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \text{div grad } U \end{aligned} \quad (2.11a)$$

(I) (II) (III) (IV) (V)

สำหรับสมการโมเมนตัมแกน y และ z จะได้

$$\begin{aligned} \overline{\frac{\partial v}{\partial t}} + \overline{\text{div}(\mathbf{v}\mathbf{U})} + \overline{\text{div}(\overline{\mathbf{v}'\mathbf{u}'})} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \text{div grad } V \end{aligned} \quad (2.11b)$$

(I) (II) (III) (IV) (V)

$$\begin{aligned} \overline{\frac{\partial w}{\partial t}} + \overline{\text{div}(\mathbf{w}\mathbf{U})} + \overline{\text{div}(\overline{\mathbf{w}'\mathbf{u}'})} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \text{div grad } W \end{aligned} \quad (2.11c)$$

(I) (II) (III) (IV) (V)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้สังเกตว่าเทอม (I), (II), (IV) ในสมการ (2.11a-c) มีลักษณะเดียวกันกับเทอมที่ปรากฏอยู่ในสมการ (2.9a-c) หากแต่การเฉลี่ยนั้นทำให้เกิดพจน์ใหม่ขึ้นคือ (III) พจน์นี้เขียนอยู่ในรูปการคูณกันของความเร็วผันแปร ซึ่งมีความหมายเป็นการเคลื่อนย้ายหรือถ่ายโอนโมเมนตัมอันเนื่องมาจากความเร็วผันแปรนั้น โดยทั่วไปเราจะจัดกลุ่มพจน์นี้ไว้ด้านขวาของสมการ เพื่อที่จะสะท้อนให้เห็นถึงบทบาทของพจน์นี้ว่าเป็นความเค้นอันเนื่องมาจากความปั่นป่วน

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \text{div}(U\mathbf{U}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \text{div grad } U + \left[-\frac{\overline{\partial u'^2}}{\partial x} - \frac{\overline{\partial u'v'}}{\partial y} - \frac{\overline{\partial u'w'}}{\partial z} \right] \quad (2.12a)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \text{div}(V\mathbf{U}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \text{div grad } V + \left[-\frac{\overline{\partial u'v'}}{\partial x} - \frac{\overline{\partial v'^2}}{\partial y} - \frac{\overline{\partial v'w'}}{\partial z} \right] \quad (2.12b)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \text{div}(W\mathbf{U}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \text{div grad } W + \left[-\frac{\overline{\partial u'w'}}{\partial x} - \frac{\overline{\partial v'w'}}{\partial y} - \frac{\overline{\partial w'^2}}{\partial z} \right] \quad (2.12c)$$

ทำการกระจายเทอมเหล่านี้ให้เห็นเพื่อให้ชัดเจน ซึ่งประกอบด้วยความเค้นตั้งฉาก 3 เทอมและเทอมของความเค้นเฉือน 3 เทอม

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= -\overline{\rho u'^2} & \tau_{yy} &= -\overline{\rho v'^2} & \tau_{zz} &= -\overline{\rho w'^2} \\ \tau_{xy} &= \tau_{yx} = -\overline{\rho u'v'} & \tau_{xz} &= \tau_{zx} = -\overline{\rho u'w'} & \tau_{zy} &= \tau_{yz} = -\overline{\rho v'w'} \end{aligned} \quad (2.13)$$

เทอมของความเค้นอันเนื่องมาจากความปั่นป่วนเราเรียกว่า Reynolds stress การไหลแบบปั่นป่วนนั้น ค่าของความเค้นตั้งฉากคือ $-\overline{\rho u'^2}$, $-\overline{\rho v'^2}$ และ $-\overline{\rho w'^2}$ จะไม่เป็นศูนย์ เนื่องจากมันเป็นค่ายกกำลังสองของความผันแปร ค่าของความเค้นเฉือน $-\overline{\rho u'v'}$, $-\overline{\rho u'w'}$ และ $-\overline{\rho v'w'}$ จะเกี่ยวข้องกับสหสัมพันธ์ของค่าความผันแปรขององค์ประกอบความเร็วที่ต่างทิศทางกันนั้น เช่น ถ้าหากความผันแปร u' กับ v' ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างสิ้นเชิงแล้ว ย่อมหมายความว่าค่าของผลคูณ $u'v'$ จะเท่ากับศูนย์ โดยทั่วไปนั้นค่าความเค้นอันเนื่องมาจากความปั่นป่วนนี้จะมีค่าสูงกว่าความเค้นเนื่องจากความหนืดของของไหลอย่างมาก สมการ (2.12a-c) นี้เรียกว่าสมการเรย์โนลด์สเอง

เมื่อพิจารณาสมการการเคลื่อนย้ายปริมาณสเกลลาร์ ϕ ใดๆ ของของไหลภายใต้การไหลแบบปั่นป่วน เราจะสามารถแปลงสมการได้ด้วยวิธีที่คล้ายกับการแปลงสมการโมเมนตัม ซึ่งเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \text{div}(\Phi \mathbf{U}) = \text{div}(\Gamma_{\Phi}^* \text{grad } \Phi) + \left[-\frac{\partial \overline{u' \phi'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v' \phi'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{w' \phi'}}{\partial z} \right] + S_{\Phi} \quad (2.14)$$

ที่ผ่านมาเราได้ทำการสมมุติว่าของไหลมีความหนาแน่นคงที่ แต่ในทางปฏิบัตินั้นค่าเฉลี่ยแบบ assemble average ของความหนาแน่นอาจเปลี่ยนแปลงกับเวลาในขณะที่ค่าความหนาแน่นผันแปร จะแสดงถึงสภาพของความปั่นป่วน [8] ได้กล่าวไว้ว่าการผันแปรของค่าความหนาแน่นเพียงเล็กน้อย นั้น จะไม่ทำให้เกิดผลกระทบต่อสนามการไหลเท่าใดนัก กล่าวคือถ้าหากค่า rms ของความผันแปร ของความเร็วมีค่าราวๆ 5 % ของความเร็วเฉลี่ย ภายใต้สนามการไหลที่มีความเร็วไม่เกินราวๆ มัก 3 ถึง 5 แล้ว ค่าของความผันแปรของความหนาแน่นก็จะมีผลต่อการไหล ในกรณีของการไหล ปั่นป่วนบางแบบอาจมีความปั่นป่วนสูงถึง 20% ของความเร็วเฉลี่ย ซึ่งกรณีนี้ค่าความผันแปรของ ความหนาแน่น จะมีผลต่อการไหลของของไหลที่มันมีเบอร์ราวๆ 1 ดังนั้นเพื่อที่จะสรุปสูตรที่นำไปใช้ เราจะทำการหาค่าเฉลี่ยในลักษณะของการถ่วงน้ำหนักด้วยความหนาแน่น [9] สำหรับปัญหาการไหล แบบปั่นป่วนอัดตัวได้ ที่ผลของการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นผันแปรนั้นมีค่าน้อยสามารถ ตัดทิ้งได้ แต่ยังคงผลของการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยไว้ ซึ่งรูปสมการนี้ใช้ทั่วไปในโปรแกรมสำเร็จรูปโดย ที่ ρ คือความหนาแน่นเฉลี่ย

ตาราง 2.1 สมการการไหลสำหรับของไหลอัดตัวได้

ความต่อเนื่อง	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (2.15)$
สมการเรย์โนลด์	$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \text{div}(\rho U \mathbf{U}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } U) + \left[-\frac{\partial(\overline{\rho u'^2})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho u'v'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho u'w'})}{\partial z} \right] + S_{Mx} \quad (2.16a)$
	$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \text{div}(\rho V \mathbf{U}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad } V) + \left[-\frac{\partial(\overline{\rho v'v'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho v'^2})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho v'w'})}{\partial z} \right] + S_{My} \quad (2.16b)$
	$\frac{\partial(\rho W)}{\partial t} + \text{div}(\rho W \mathbf{U}) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } W) + \left[-\frac{\partial(\overline{\rho w'w'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho v'w'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho w'^2})}{\partial z} \right] + S_{Mz} \quad (2.16c)$
สมการการเคลื่อนย้ายปริมาณสเกลลาร์	$\frac{\partial(\rho \Phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho \Phi \mathbf{U}) = \text{div}(\Gamma_{\Phi}^* \text{grad } \Phi) + \left[-\frac{\partial(\overline{\rho u' \phi'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho v' \phi'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho w' \phi'})}{\partial z} \right] + S_{\Phi} \quad (2.17)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การสร้างแบบจำลองของสมการความปั่นป่วน

ในสมการความต่อเนื่องและสมการนาเวียร์-สโตกส์ของการไหลแบบลาร์มีนารีในสมการ (2.8) และ (2.9a-c) นั้นจะมีทั้งหมด 4 สมการ ในขณะที่ค่าตัวแปรในสนามการไหลคือ u , v , w และ p แต่ในสมการการไหลแบบปั่นป่วนดังที่แสดงในสมการข้างบนนั้นจะพบว่าไม่สามารถแก้สมการหาคำตอบได้

ในทางวิศวกรรมเรามักจะให้ความสนใจกับค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติต่างๆ ของการไหลและของไหล อย่างไรก็ตามเราจะพบว่าเกิดตัวแปรซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่เรียกว่า Reynolds Stress ซึ่งมีอยู่ทั้งหมด 6 เทอม ในขณะที่ในสมการการเคลื่อนย้ายปริมาณสเกลลาร์เฉลี่ย ก็จะเกิดตัวแปรขึ้นอีก 3 เทอมในแต่ละปริมาณสเกลลาร์ที่เกิดขึ้น นั่นคือ $\overline{u'\varphi}$, $\overline{v'\varphi}$ และ $\overline{w'\varphi}$ และด้วยความซับซ้อนของความปั่นป่วนเราจะไม่พบสมการอย่างง่ายที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าว ดังนั้นหลักในการสร้างแบบจำลองความปั่นป่วนจึงเกี่ยวข้องกับ การพัฒนากระบวนการวิธีในการคำนวณเพื่อให้มีความถูกต้องในระดับที่เพียงพอและมีความครอบคลุมปัญหาความปั่นป่วนได้ (แบบจำลองความปั่นป่วนแสดงในบทที่ 3)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วันชัยและคณะ (2553) [1] ได้ทำการทดลองปรับปรุงโรงเรือนปลูกเบญจมาศจำนวน 2 แบบ คือ 1) โรงเรือนสูงหลังโค้งมนกึ่งแหวน ขนาดกว้าง 6 เมตร ยาว 18 เมตร สูง 4.5 เมตร หลังคามุงด้วยพลาสติกใส มีค่าก่อสร้าง 477 บาท/ตร.ม 2) โรงเรือนต่ำหลังคาอุโมงค์ ขนาดกว้าง 3 เมตร ยาว 18 เมตร สูง 2.1 เมตร หลังคามุงด้วยพลาสติกใส มีค่าก่อสร้าง 260 บาท/ตร.ม ซึ่งโรงเรือนทั้งสองแบบสามารถใช้ในการปลูกเบญจมาศเพื่อการค้าในพื้นที่ที่เป็นเนินเขาทางภาคเหนือและพื้นที่ราบในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ การทดลองทำการออกแบบโรงเรือนในมีความแข็งแรงและระบบแสงสว่างเพื่อยับยั้งการเกิดตาดอก ทดลองปลูกเบญจมาศเพื่อทดสอบความแข็งแรงและความเหมาะสมในการใช้งาน เก็บข้อมูลผลผลิตเพื่อเปรียบเทียบการลงทุนปลูกเบญจมาศในโรงเรือนทั้งสองแบบ ผลจากการเปรียบเทียบพบว่า ผลผลิตที่ได้จากโรงเรือนทั้งสองแบบไม่แตกต่างกันทั้งปริมาณและคุณภาพ โรงเรือนต่ำหลังคาอุโมงค์มีความเหมาะสมกว่าเพราะมีค่าก่อสร้างที่ถูกลง

De la Torre-Gea M et al. (2011) [10] ได้ศึกษาเก็บข้อมูลผู้ที่ใช้งาน CFD ในการพัฒนาโรงเรือนปลูกพืช เช่น พัฒนาให้โรงเรือนมีการระบายอากาศมากขึ้น ทำให้อุณหภูมิภายในลดลง เพื่อให้เหมาะกับพืชที่ปลูกและทำให้ผลผลิตเพิ่มขึ้น หรือทดสอบการปิด - เปิด และหาตำแหน่งช่องระบายอากาศในโรงเรือน เพื่อให้มีการระบายอากาศได้ดี เป็นต้น

มานะ วิชางาม และธนรัฐ ศรีวีระกุล (2555) [11] ได้ทำการศึกษาการไหลของอากาศผ่านรูรั้งฝั่งเตาหุงต้มประสิทธิภาพสูง (High Efficiency Cooking Stove, HECS) ภายใต้เงื่อนไขการพาความร้อนตามธรรมชาติ โดยใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics)

โปรแกรม FLUENT 6.3 สำหรับจำลองการไหลดังกล่าว ส่วนใหญ่การไหลของอากาศภายในเตาหุงต้มเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษานี้เท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่เอกสารนี้แล้ว ไม่สามารถแก้ไข หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้จัดทำเอกสารนี้

ประสิทธิภาพสูงเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ที่มีความซับซ้อนมากกว่าการไหลแบบราบเรียบ ดังนั้นแบบจำลองความปั่นป่วนของการไหลจึงมีความสำคัญซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองความปั่นป่วนชนิด K- ϵ และเปรียบเทียบแบบจำลองความปั่นป่วนทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ Standard, renormalization (RNG) และ Realizable จากการศึกษพบว่าแบบจำลองความปั่นป่วน K- ϵ ชนิด Realizable ให้ผลการคำนวณใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด

Bartzanas T et al. (2004) [12] ได้ทำการทดลองใช้ CFD ในการจำลองดูพฤติกรรมของอากาศในโรงเรือนแบบอุโมงค์โดยกำหนดให้มีให้มีช่องระบายอากาศจำนวน 4 แบบ ดังนี้ 1) มีช่องเปิดด้านข้างอย่างเดียว 2) มีบานหน้าต่างแบบเปิดขึ้นด้านข้าง 3) มีช่องเปิดบนหลังคาอย่างเดียว 4) มีช่องเปิดด้านข้างร่วมกับช่องเปิดบนหลังคา โดยมีข้อกำหนดให้มีลมพัดตั้งฉากกับโรงเรือน ผลการจำลองของ CFD จะแสดงอุณหภูมิและความเร็วลมภายในโรงเรือนทั้ง 4 แบบ และสามารถสรุปผลการจำลองได้ว่า การเปิดช่องระบายอากาศแบบที่ 4 มีการระบายอากาศได้ดีที่สุด ทำให้ไม่มีการสะสมความร้อนภายในโรงเรือนทำให้อุณหภูมิใกล้เคียงกับภายนอก และแสดงให้เห็นถึงการใช้ CFD ในการออกแบบโรงเรือนซึ่งจะช่วยบอก (รูปแบบของช่องระบายอากาศ ขนาดของช่อง และตำแหน่งของช่องระบายอากาศ)

Ould Khaoua S.A et al. (2006) [13] ได้ทำการทดลองใช้ CFD จำลองดูการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความเร็วลมภายในโรงเรือนปลูกพืชเมื่อเปิดช่องระบายอากาศด้านบนหลังคา ทำการทดลองในโรงเรือน 4 หลังที่ปลูกติดกันขนาดพื้นที่รวม 2,600 ตร.ม. ใช้แผ่นพลาสติกกันแบ่งโรงเรือนออกเป็น 2 ส่วนเท่าๆ กัน ในการทดลองนี้ได้ติดตั้งหัววัดอุณหภูมิและความเร็วลมที่ความสูงจากพื้น 1 เมตร เพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จาก CFD ผลการทดลองพบว่า เมื่อเปิดช่องเปิดหลังคาด้านบน เมื่อมีลมมีความเร็ว 1 m/s มีอุณหภูมิ 30 C พัดเข้ามาทางช่องเปิดทำให้มีผลต่อสภาพอากาศภายในโรงเรือนเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิทั้งสองส่วนอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อใช้ข้อกำหนดดังกล่าวใน CFD ผลที่ได้พบว่าการหมุนวนของอากาศส่วนที่มีแผ่นกันระหว่างโรงเรือนซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิและความเร็วลมที่วัดได้

Limtrakarn W et al. (2012) [14] ได้ทำการปรับปรุงการระบายอากาศแบบธรรมชาติในโรงเรือนเพื่อเพิ่มผลผลิตของการปลูกพริกหวานโดยใช้ CFD ในการปรับปรุงนี้ได้ทำการทดลองที่สถานีทดลองแม่สำใหม่ จ.เชียงใหม่ ประเทศไทย ภายใต้โครงการหลวง โรงเรือนปลูกพริกหวานที่นิยมใช้ในปัจจุบันจะเป็นแบบหลังคาโค้ง (arch type) จะมีช่องเปิดบนหลังคาเพื่อระบายอากาศ ในการทดลองจะใช้โปรแกรม CFD เพื่อจำลองสภาพอากาศภายในโรงเรือนและวัดอุณหภูมิเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่วัดได้จริง หลังจากนั้นทำการออกแบบเพื่อปรับปรุงหลังคาโรงเรือนใหม่ให้มีการระบายอากาศได้ดีขึ้น (หลังคาสองชั้น) และใช้โปรแกรม CFD จำลองสภาพอากาศภายในและวัดอุณหภูมิและการระบายอากาศเพื่อเปรียบเทียบกับโรงเรือนแบบเก่า (หลังคาโค้ง) ซึ่งผลจากการจำลองพบว่าโรงเรือนมีการระบายอากาศได้ดีกว่าเดิม 39% มีอุณหภูมิสูงสุดลดลง 4°C และทำการทดลองปลูก

พริกหวานในโรงเรือนแบบใหม่ ผลที่ได้พริกหวานมีขนาดผลใหญ่ขึ้น 97% ปริมาณผลผลิตเพิ่มขึ้น 90% จำนวนเกรดหนึ่งเพิ่มขึ้นกว่าการปลูกในโรงเรือนแบบเก่า

Molina-Aiz F.D et al. (2010) [15] ได้ทำการเปรียบเทียบการคำนวณวิธี Finite element method (FEM) ของโปรแกรม (ANSYS/FLOTRAN v.11.0) และ วิธี Finite volume method (FVM) ของโปรแกรม (ANSYS/FLUENT v6.3) ในการจำลองการระบายอากาศตามธรรมชาติในโรงเรือนจำนวน 3 แบบ คือ mono-span, multi-span และ Almeria-type และวัดเปรียบเทียบการแผ่ความร้อน 4 กรณี ผลการเปรียบเทียบพบว่า ถ้าการแผ่ความร้อนไม่สูงและความเร็วลมปกติ โปรแกรมทั้งสองให้ผลการจำลองคล้ายคลึงกัน แต่จะมีกรณีเฉพาะที่การแผ่ความร้อนและมีความเร็วลมสูงของโรงเรือนแบบ Almeria-type FVM ให้ผลอุณหภูมิได้หลังคาต่ำกว่าความเป็นจริงในเล็กน้อย และเมื่อเปรียบเทียบการทำงาน FEM มีลำดับการทำงานของมากกว่า 2 เท่า ใช้พื้นที่หน่วยความจำและเวลามากกว่า 10 เท่า

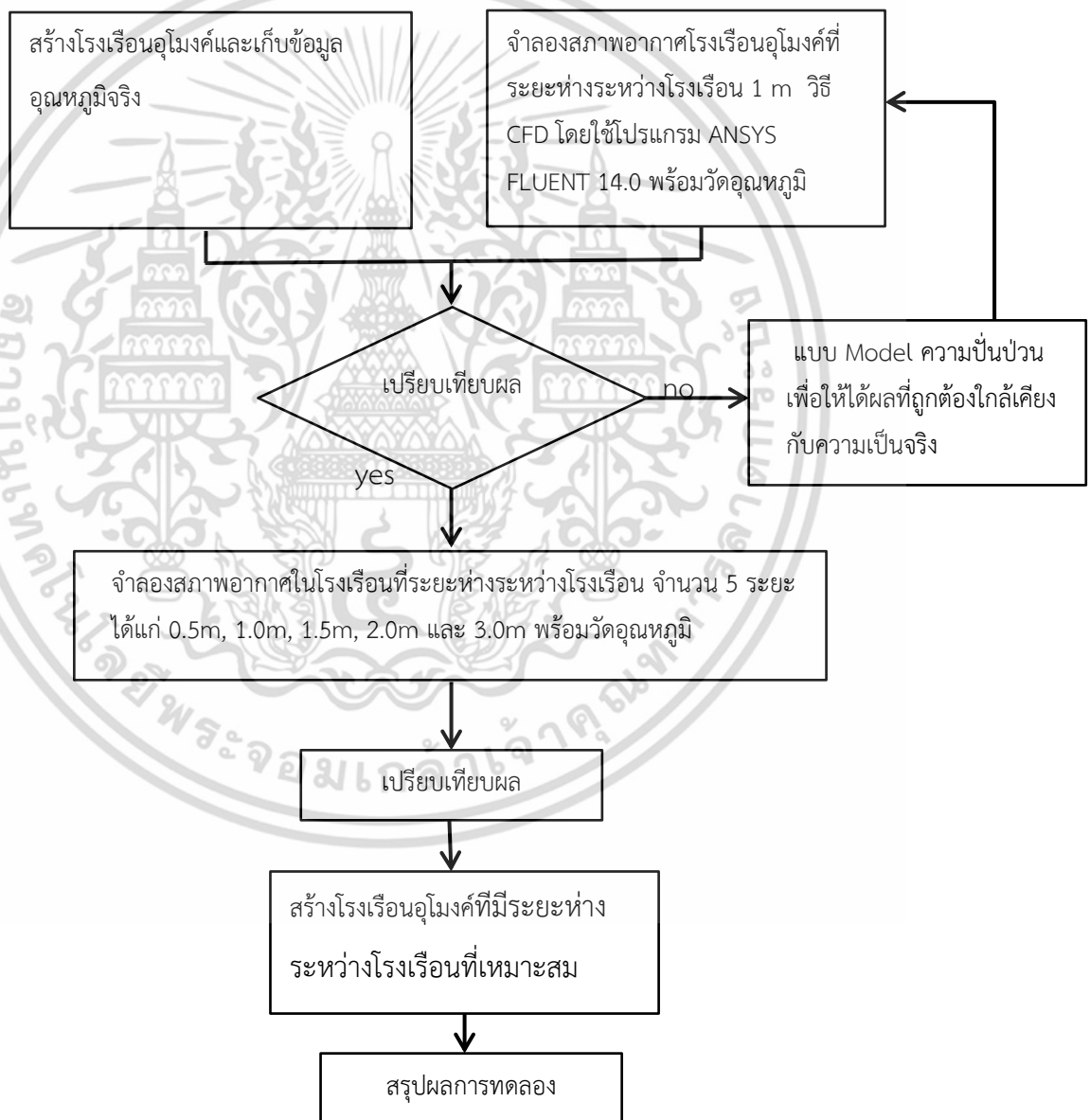


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

เพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์จึงทำการศึกษาระยะห่างที่เหมาะสมของโรงเรียนแบบอุโมงค์ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) โดยใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 14.0 เพื่อหาระยะห่างระหว่างโรงเรียนอุโมงค์ที่เหมาะสม โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานแสดงในไดอะแกรมตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมผังการดำเนินงานศึกษาวิจัย

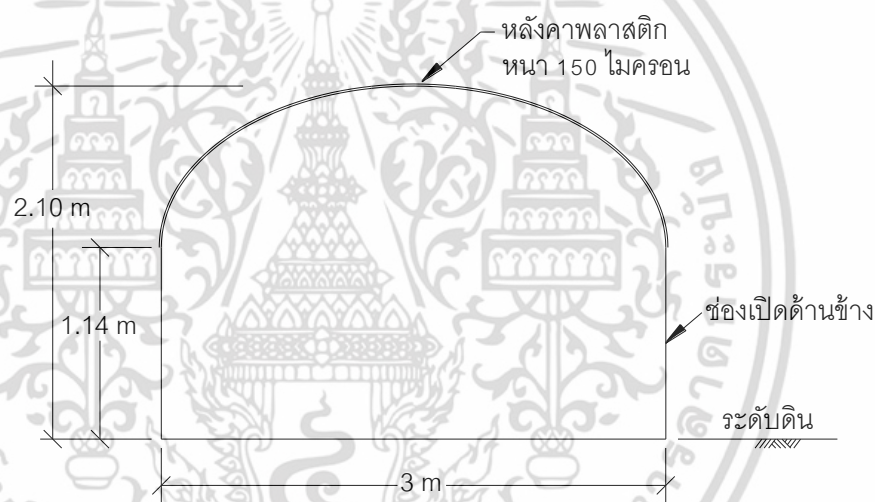
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การสร้างโรงเรือนอุโมงค์เพื่อเก็บข้อมูลอุณหภูมิจริง

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 14.0 จำลองสภาพอากาศภายในโรงเรือนอุโมงค์ จำเป็นต้องมีการเปรียบเทียบผล (Validate) ซึ่งสามารถเปรียบเทียบผลได้ 2 วิธีคือ การเปรียบเทียบผลกับงานวิจัยที่ใกล้เคียงกันหรือเปรียบเทียบจากการทดลองจริง ในงานวิจัยนี้ได้เลือกวิธีการเปรียบเทียบจากการทดลองจริง ซึ่งในการทดลองเก็บข้อมูลจริงนั้นจะเก็บข้อมูลอุณหภูมิภายในและระหว่างโรงเรือน เพื่อมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม

3.2.1 แบบโรงเรือนอุโมงค์

โรงเรือนอุโมงค์ มีความกว้าง 3 m สูง 2.1 m ความยาวประมาณ 18 m หลังคามุงด้วยพลาสติกใสหนา 150 ไมครอน ด้านข้างเปิดโล่งสูง 1.14 m ด้านหน้าและท้ายเปิดโล่ง [1] ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งโรงเรือนนี้มีแบบนิยมใช้ปลูกเบญจมาศมีอายุการปลูกจนถึงเก็บดอกประมาณ 120 วัน



รูปที่ 3.2 แบบโรงเรือนอุโมงค์

3.2.2 สร้างโรงเรือนอุโมงค์

สร้างโรงเรือนอุโมงค์ตามแบบรูปที่ 3.2 เพื่อทดสอบวัดอุณหภูมิ มีระยะห่างระหว่างโรงเรือน 1 m เพื่อใช้ทดสอบและเก็บข้อมูลอุณหภูมิภายในโรงเรือนที่ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร และ ศูนย์วิจัยพืชสวนศรีสะเกษ จ.ศรีสะเกษ ตามรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 โรงเรือนอุโมงค์ จำนวน 3 หลัง มีระยะห่าง 1 m

3.2.3 การวัดอุณหภูมิและความเร็วลม

โดยใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิอัตโนมัติ (Sila Research รุ่น AP-1700) รูปที่ 3.4(a) เครื่องวัดความเร็วลมแบบพกพา (Digicon รุ่น DA-43) รูปที่ 3.4(b)



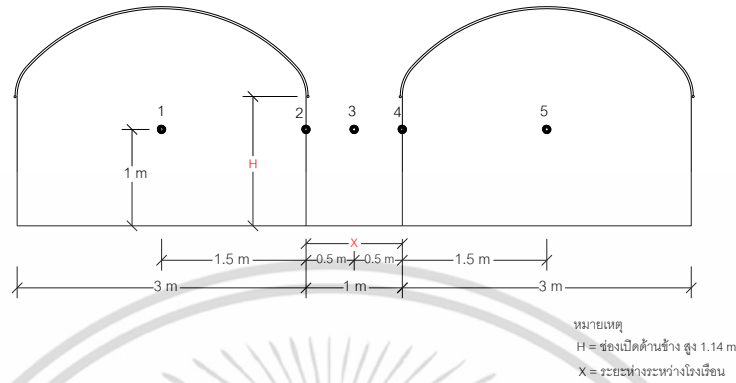
(a) เครื่องมือวัดอุณหภูมิอัตโนมัติ

(b) เครื่องวัดความเร็วลมแบบพกพา

รูปที่ 3.4 เครื่องมือวัดอุณหภูมิและความเร็วลม

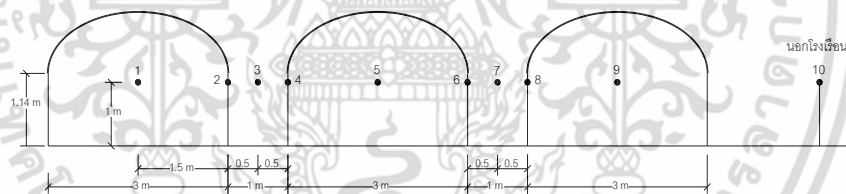
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดอุณหภูมิในโรงเรือนเรือนอุโมงค์จำนวน 2 หลัง ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร จะวัดที่ตำแหน่งสูงจากพื้น 1 m จำนวน 5 จุด เพื่อวัดสภาพอากาศในโรงเรือน ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.5 ตำแหน่งที่ติดตั้งหัววัดอุณหภูมิ 5 จุด

การวัดอุณหภูมิในโรงเรือนเรือนอุโมงค์จำนวน 3 หลัง ที่ศูนย์วิจัยพืชสวนศรีสะเกษ อ.เมือง จ.ศรีสะเกษ จะวัดที่ตำแหน่งสูงจากพื้น 1 m จำนวน 10 จุด เพื่อวัดสภาพอากาศในโรงเรือน ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ตำแหน่งที่ติดตั้งหัววัดอุณหภูมิ 10 จุด



(a) ตำแหน่ง T1 กลางโรงเรือน

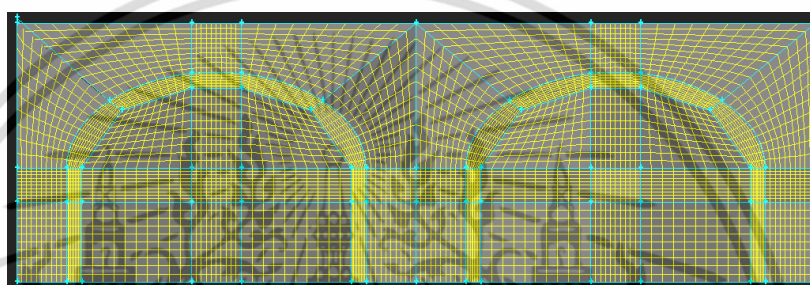


(b) ตำแหน่ง T3 ระหว่างโรงเรือน

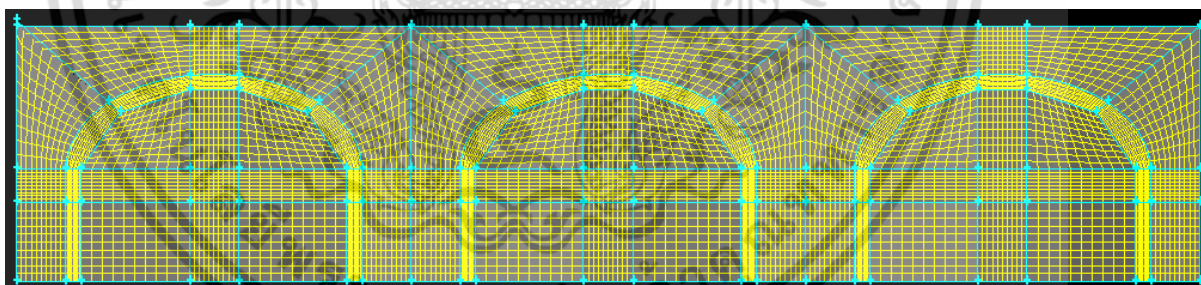
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้รูปที่ 3.7 ตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิทดลองจริง
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การสร้างแบบจำลอง รูปร่างขอบเขตที่ต้องคำนวณ (Computational domain)

การสร้างแบบจำลองโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ขั้นตอนแรกจะต้องสร้างโดเมนในการคำนวณขึ้นมาก่อน ซึ่งโดเมนในการคำนวณนี้จะเป็นโรงเรือนอุโมงค์ที่มีขนาดเท่าของจริง จำนวน 2 หลัง (รูปที่ 3.8) และ จำนวน 3 หลัง (รูปที่ 3.9) ในงานวิจัยนี้เลือกจำลองแบบ 2 มิติ โดยจะทำการจำลองโรงเรือนอุโมงค์ที่มีระยะห่างระหว่างโรงเรือน 1 m (ซึ่งเป็นระยะที่เกษตรกรนิยมใช้มากที่สุด) จะเปรียบเทียบอุณหภูมิกับอุณหภูมิที่วัดได้จริงเพื่อหาแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\epsilon$ หลังจากนั้นใช้แบบจำลองความปั่นป่วนที่เหมาะสม จำลองหาระยะห่างระหว่างโรงเรือนอุโมงค์ที่เหมาะสมจำนวน 5 ระยะ คือ 0.5m, 1m, 1.5m, 2m, และ 3m



รูปที่ 3.8 โดเมนของโรงเรือนอุโมงค์ จำนวน 2 หลัง ระยะห่างระหว่างโรงเรือน 1 m



รูปที่ 3.9 โดเมนของโรงเรือนอุโมงค์ จำนวน 3 หลัง ระยะห่างระหว่างโรงเรือน 1 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 โปรแกรม ANSYS FLUENT

ในโปรแกรม ANSYS FLUENT 14.0 [16] มีสมการพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณดังนี้

3.4.1 สมการ Continuity Equation

$$\nabla \equiv i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \quad (3.1)$$

$$v \equiv (u, v, w)$$

3.4.2 สมการโมเมนตัม Momentum Equation (a non-conservative)

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho dV + \iint_S \rho v \cdot dS = 0 \quad (3.2)$$

Components in x, y and z

$$\begin{aligned} \rho \frac{Du}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial t_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial t_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial t_{zx}}{\partial x} + \rho f_x \\ \rho \frac{Dv}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial t_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial t_{yy}}{\partial x} + \frac{\partial t_{zy}}{\partial x} + \rho f_y \\ \rho \frac{Dw}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial t_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial t_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial t_{zz}}{\partial x} + \rho f_z \end{aligned} \quad (3.3)$$

3.4.3 สมการอนุรักษ์พลังงาน Energy Equation (a non-conservative)

$$\begin{aligned} \rho \frac{Dw}{Dt} \left(e + \frac{V^2}{2} \right) &= \rho q + \frac{\partial}{\partial x} \left(k + \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(k + \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(k + \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{\partial up}{\partial x} - \frac{\partial vp}{\partial y} - \frac{\partial wp}{\partial z} \\ &+ \frac{\partial (ut_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (ut_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial (ut_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial (vt_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (vt_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial (vt_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial (wt_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial (wt_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial (wt_{zz})}{\partial z} + pf \cdot V \end{aligned} \quad (3.4)$$

แทนค่าก๊าซที่ใช้ในการวิเคราะห์ จะสมมติให้เป็นก๊าซในอุดมคติ (Ideal gas) ตามสมการดังนี้

$$P = \rho RT \quad (3.5)$$

เมื่อ R = specific gas constant

$$e = C_v T \quad (3.6)$$

เมื่อ C_v = specific heat at constant volume

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 แบบจำลองความปั่นป่วน

อากาศภายในโรงเรือนจะมีการไหลแบบปั่นป่วน โดยในงานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองความปั่นป่วนชนิด K- ϵ มีจำนวน 3 แบบ [16] ได้แก่

1. แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k- ϵ Standard
2. แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k- ϵ renormalization (RNG)
3. แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k- ϵ Realizable

แต่ละแบบมีรายละเอียดดังนี้

3.5.1 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k- ϵ Standard

เป็นแบบจำลองที่ Turbulent viscosity เป็นฟังก์ชันของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน และอัตราการกระจายพลังงานจลน์โดยมีสมการ 2 ชุด เป็นสมการของ k และ ϵ อย่างละชุด ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (3.8)$$

โดยที่ G_b = พลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากการลอยตัว

Y_M = ค่าการกอดอัดได้ ซึ่งมีผลต่อความปั่นป่วนในการไหล

$C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$ และ $C_{3\epsilon}$ = ค่าคงที่ (Constant)

σ_k และ σ_ϵ = ค่า turbulent Prandtl numbers ของ k และ ϵ

G_k = พลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากความเร็วเฉลี่ย คำนวณได้จาก สมการที่ (3.9) ดังนี้

$$G_k = -\rho u'_i u'_j \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (3.9)$$

μ_t = Turbulent viscosity หาได้จากสมการที่ 10 ดังนี้

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ C_μ = ค่าคงที่ (Constant) สำหรับแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k- ϵ Standard แบบจำลองปกติทั่วไป ค่าคงที่ของตัวแปร มีดังนี้

$$C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$$

3.5.2 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k- ϵ renormalization (RNG)

ซึ่งแบบจำลองนี้มีคล้าย แบบ standard แต่แตกต่างกันตรงที่เพิ่มเทคนิคการเก็บสถิติอย่างเข้มงวด โดยบางเทอมที่แตกต่าง ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon \quad (3.12)$$

โดยที่ α_k และ α_ϵ = ค่า effective Prandtl numbers ของ k และ ϵ

ค่าคงที่ $C_{1\epsilon} = 1.42, C_{2\epsilon} = 1.68$

แบบจำลองของค่า turbulent viscosity ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์สำหรับแบบจำลองชนิดนี้คือ

$$d \left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\epsilon} \mu} \right) = 1.72 \frac{\hat{\nu}}{\sqrt{\hat{\nu}^3 - 1 + C_v}} d\hat{\nu} \quad (3.13)$$

โดยที่ $\hat{\nu} = \mu_{eff} / \mu$

$$C_v \approx 100$$

สมการที่ (3.13) จะใช้ได้เมื่อการไหลนั้นมีค่า Reynolds number ต่ำ แต่ถ้าการไหลนั้นมีค่า Reynolds number สูง จะต้องใช้สมการที่ (3.14)

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.14)$$

โดย $C_\mu = 0.0845$ เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี RGN ซึ่งค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับแบบ Standard k- ε ที่มีค่า 0.09

การคำนวณ effective Prandtl numbers ของ α_k และ α_ε

$$\left| \frac{\alpha - 1.3929}{\alpha_0 - 1.3929} \right|^{0.6321} \left| \frac{\alpha + 2.3929}{\alpha_0 + 2.3929} \right|^{0.3679} = \frac{\mu_{mol}}{\mu_{eff}} \quad (3.15)$$

เมื่อ $\alpha_0 = 1.0$ ที่ค่า Reynolds number สูง ($\mu_{mol}/\mu_{eff} \leq 1$), $\alpha_k = \alpha_\varepsilon \approx 1.393$

ค่า R_ε ในเทอม ของสมการที่ 12 หาได้จาก

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.16)$$

เมื่อ $\eta \equiv Sk/\varepsilon$, $\eta_0 = 4.38$, $\beta = 0.012$

3.5.3 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k- ε Realizable

เป็นแบบจำลองที่ได้รับการพัฒนาและมีความแตกต่างกับแบบ standard 2 ข้อสำคัญ คือ

- แบบ k- ε Realizable มีสมการ turbulent viscosity ใหม่
- สมการใหม่ของ ε ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน และอัตราการกระจายพลังงานจลน์ของ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (3.18)$$

$$\text{เมื่อ } C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ turbulent viscosity หาค่า μ_t ได้จากสมการ (3.19)

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.19)$$

ซึ่งจะแตกต่างกับแบบจำลอง standard และ RNG k- ε ตรงที่ C_μ ไม่ใช่ค่าคงที่ แต่จะหาได้จากสมการที่ 3.20

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (3.20)$$

$$\text{เมื่อ } U^* \equiv \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}} \quad (3.21)$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k$$

$$\Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk}\omega_k$$

ซึ่ง $\bar{\Omega}_{ij}$ = ค่าเฉลี่ย rate-of-rotation tensor

ω_k = angular velocity

และให้ A_0 และ A_s เป็นค่าคงที่ โดยให้มีค่า $A_0=4.04$, และ $A_s = \sqrt{6} \cos \phi$

$$\text{ซึ่ง } \phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W), \quad W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}^3}, \quad \tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$$

ค่าคงที่สำหรับสมการที่ (3.17)(3.18) นั้นมีค่าดังนี้

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, \quad C_2 = 1.9, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.2$$

3.6 คุณสมบัติของอากาศ

กำหนดให้คุณสมบัติของอากาศที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง เป็นก๊าซอุดมคติ (Ideal Gas) และมีค่าต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของอากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์

Air Properties	ค่า
Specific heat (J/Kg.k)	1006.43
Thermal conductivity (W/m.k)	0.0242
Viscosity (Kg/m.s)	1.7894×10^{-5}
Moleccular Weight (kg/kg mol)	28.966

3.7 วิเคราะห์ข้อมูล

การหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ [17] จากการจำลองการไหลปั่นป่วนทั้ง 3 แบบ เทียบกับผลที่วัดได้จากโรงเรือนอุโมงค์จริง หาได้จากสมการที่ 3.22

$$Error = \frac{(Exdata - CFDdata)}{Exdata} * 100\% \quad (3.22)$$

เมื่อ Error = ค่าความคลาดเคลื่อน (%)

Exdata = ข้อมูลจากการทดลอง

CFDdata = ข้อมูลจาก CFD

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองครั้งที่ 1

ทำการสร้างโรงเรือนอุโมงค์ที่มีขนาด กว้าง 3 m สูง 2.1 m ยาว 6 m ด้านข้างมีช่องเปิดสูง (H) 1.14 m (รูปที่ 3.2) จำนวน 2 หลัง มีระยะห่างระหว่างโรงเรือน 1 m ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร มี Latitude 13.67° Longitude 100.62°[17] เพื่อใช้ทดสอบและเก็บข้อมูลอุณหภูมิภายในโรงเรือน โดยใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิอัตโนมัติ (Sila Research รุ่น AP-1700) ติดตั้งสูงจากพื้น 1 m จำนวน 5 จุด (รูปที่ 4.1) เครื่องวัดความเร็วลมแบบพกพา (Digicon รุ่น DA-43) เพื่อวัดสภาพอากาศในโรงเรือน โดยวัดตั้งแต่วันที่ 1 มีนาคม ถึง เมษายน 2557



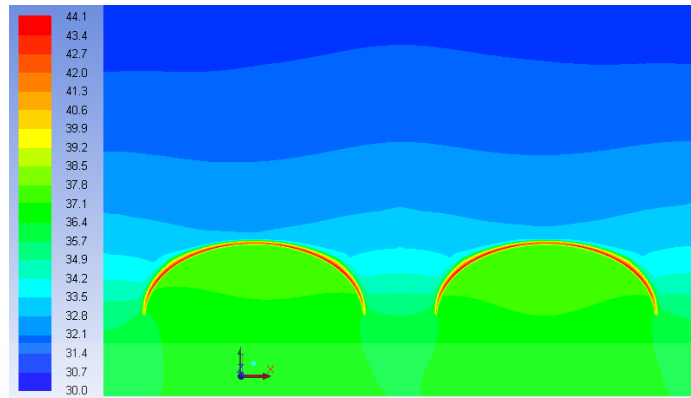
รูปที่ 4.1 โรงเรือนอุโมงค์ที่ใช้ทดสอบที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

4.1.1 ผลการวัดอุณหภูมิในโรงเรือนทดลองจริงและแบบจำลองการไหลปั่นป่วน K-ε

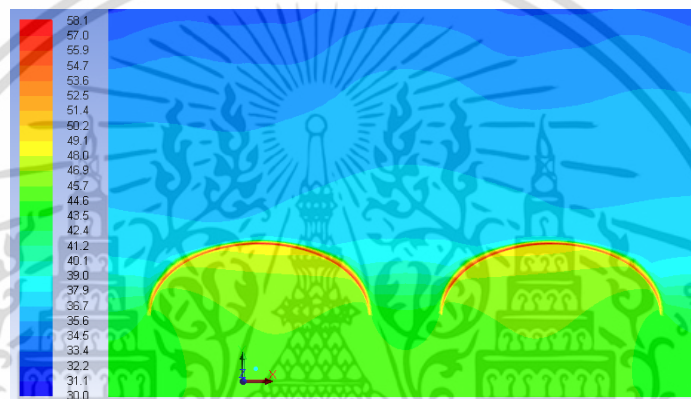
วัดอุณหภูมิในโรงเรือนอุโมงค์และระหว่างโรงเรือน เวลา 12.00 น. ของวันที่ 26 มีนาคม 2557 ที่ความสูง 1 m จากพื้น จำนวน 5 จุด วัดความเร็วลมมีค่าเป็น 0 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองโรงเรือนอุโมงค์จำนวน 2 หลัง มีระยะห่างระหว่างโรงเรือน 1 m ความเร็วลมมีค่าเป็น 0 m/s มีการระบายความร้อนตามธรรมชาติและ แบบจำลองการไหลปั่นป่วน K-ε ชนิด Standard,

Renormalization group (RNG) และ Realizable ดังแสดงในรูปที่ 4.2

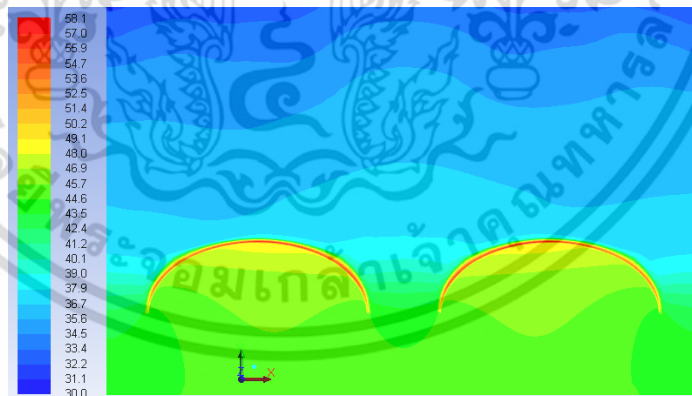
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) Standard



(ข) Renormalization group (RNG)



(ค) Realizable

รูปที่ 4.2 อุณหภูมิแบบจำลองการไหลปั่นป่วน K-ε ชนิดต่างๆ ของโรงเรือน 2 หลัง

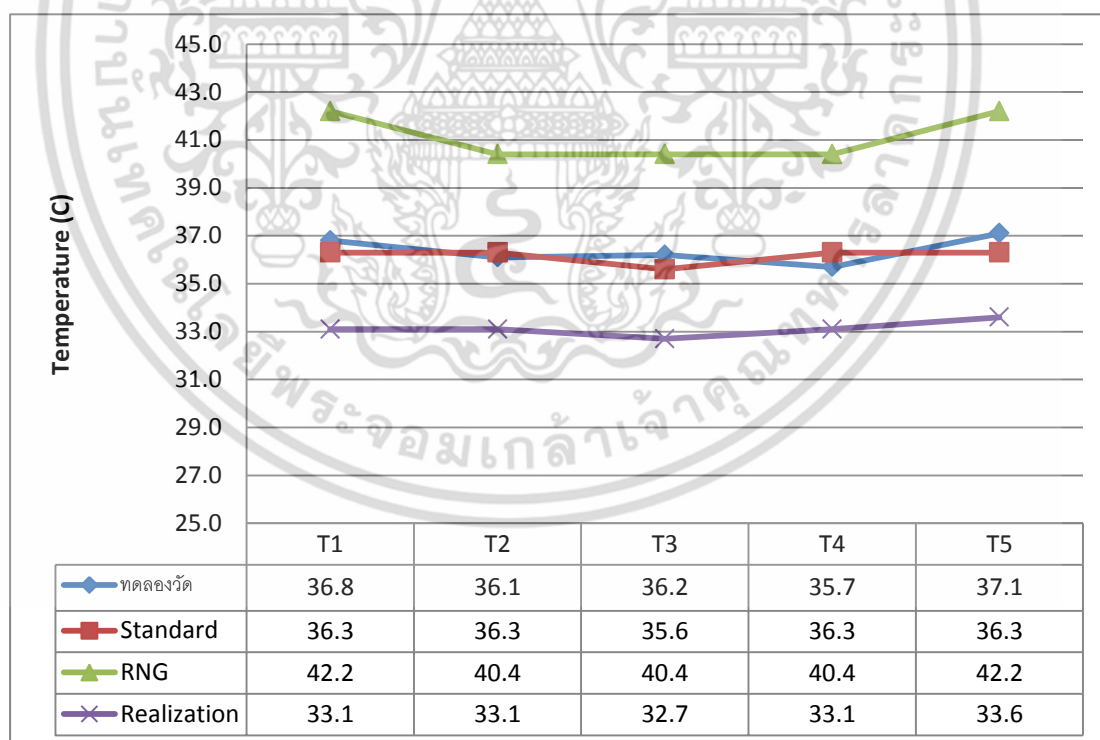
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดในโรงเรือนอุโมงค์และแบบจำลองการไหลปั่นป่วน K-ε ชนิดต่างๆ

ทำการวัดอุณหภูมิจำนวน 5 จุดในตำแหน่งเดียวกับที่วัดจริงในโรงเรือนอุโมงค์ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และทำการเปรียบเทียบในรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิที่วัดในโรงเรือนอุโมงค์ 2 หลัง และแบบจำลองการไหลปั่นป่วน K-ε ชนิดต่างๆ

Model K- ε	ตำแหน่งที่วัด				
	T1	T2	T3	T4	T5
ทดลองวัด	36.8	36.1	36.2	36.7	37.1
Standard	36.3	36.3	35.6	36.3	36.3
RNG	42.2	40.4	40.4	40.4	42.2
Realization	33.1	33.1	32.7	33.1	33.6



รูปที่ 4.3 แสดงอุณหภูมิที่วัดในโรงเรือนอุโมงค์และแบบจำลองการไหลปั่นป่วน K-ε ชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ (Error) ของโรงเรือน 2 หลัง เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของ แบบจำลองการไหลปั่นป่วน K- ϵ แบบ Standard, Renormalization group (RNG) และ Realizable แสดงค่าในตารางที่ 4.2

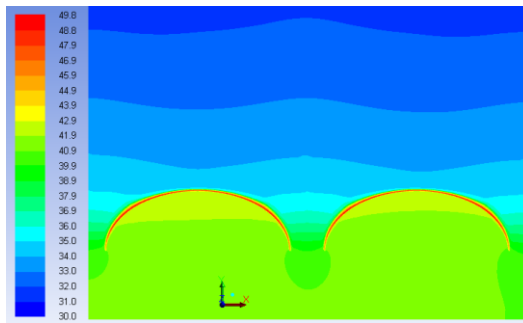
ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองการไหลปั่นป่วน K- ϵ ชนิดต่างๆ (โรงเรือน 2 หลัง)

Model	Error (%)				
	T1	T2	T3	T4	T5
Standard	1.36	0.55	1.66	1.09	2.16
RNG	14.67	11.91	11.60	10.08	13.75
Realization	10.05	8.31	9.67	9.81	9.43

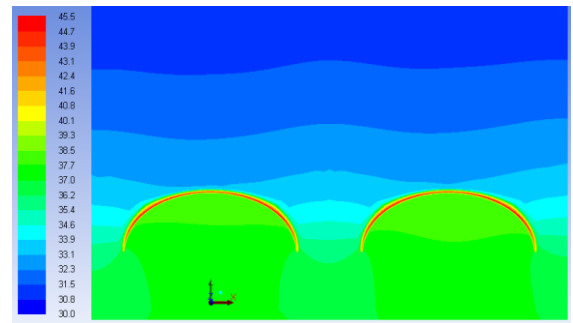
จากตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของแบบจำลองความปั่นป่วน K- ϵ แบบ Standard มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง 0.55 – 2.16 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าแบบอื่น จึงเลือกแบบจำลองความปั่นป่วน K- ϵ แบบ Standard มาสร้างแบบจำลองสภาพอากาศในโรงเรือนอุโมงค์ 2 หลัง เพื่อหาระยะห่างระหว่างโรงเรือน จำนวน 5 ระยะ ดังนี้ 0.5H, 1.0H, 1.5H, 2.0H และ 3.0H (H คือ ความสูงของช่องเปิดด้านข้าง มีค่าเท่ากับ 1.14 m)

4.1.3 ผลการจำลองและเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างโรงเรือน

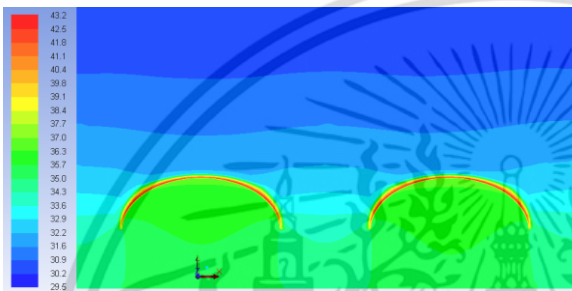
ผลที่ได้จากการลองได้ผลดังรูปที่ 4.4 วัตถุอุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พร้อมทั้งแผนภาพเพื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิ (รูปที่ 4.5)



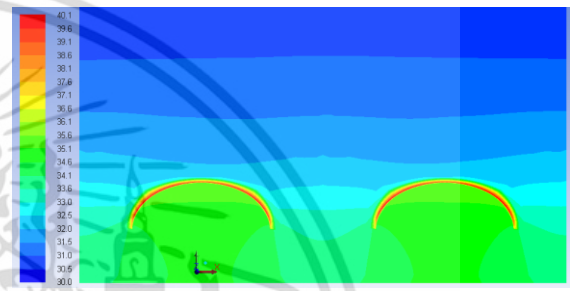
(ก) 0.5H



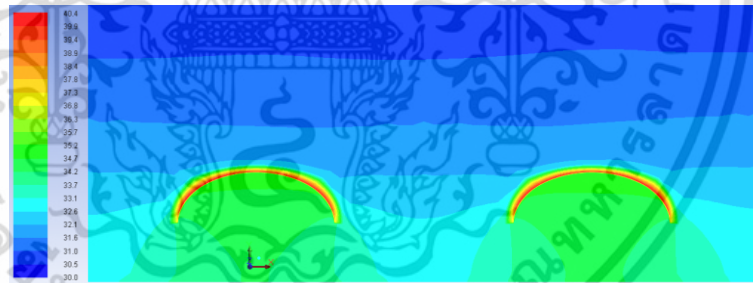
(ข) 1.0H



(ค) 1.5H



(ง) 2.0H



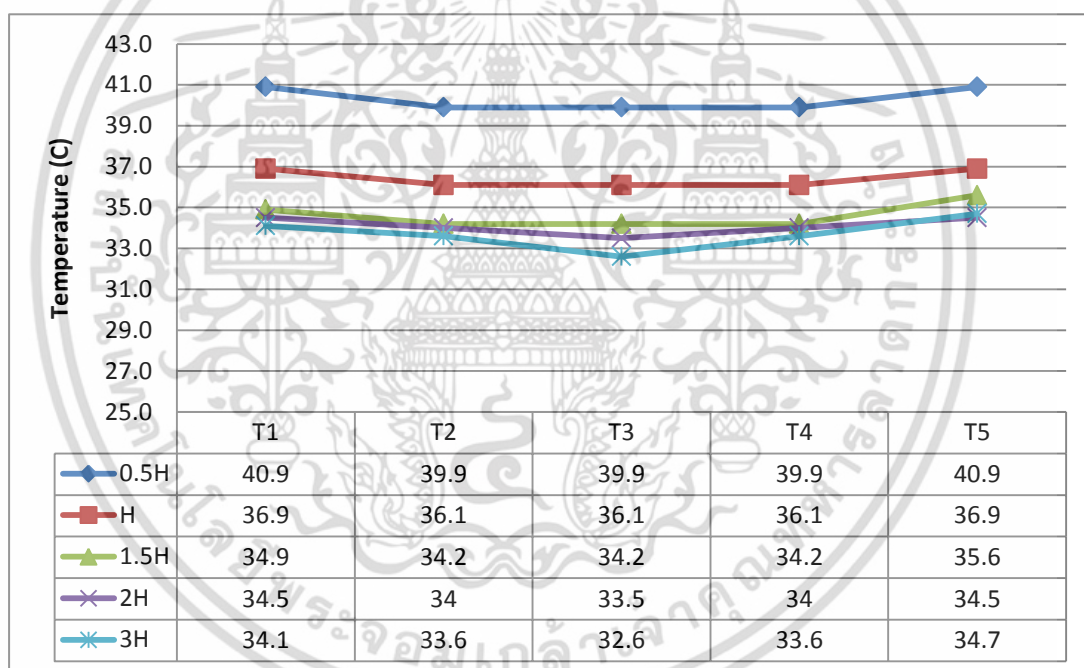
(จ) 3.0H

รูปที่ 4.4 แบบจำลองสภาพอุณหภูมิภายในโรงเรือน 2 หลัง ที่มีระยะห่างระหว่างโรงเรือน 5 ระยะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ที่จำลองระยะห่างระหว่างโรงเรือน 2 หลัง จำนวน 5 ระยะ

ระยะห่างระหว่าง โรงเรือน	ตำแหน่งที่วัด				
	T1	T2	T3	T4	T5
0.5H	40.9	39.9	39.9	39.9	40.9
H	36.9	36.1	36.1	36.1	36.9
1.5H	34.9	34.2	34.2	34.2	35.6
2H	34.5	34	33.5	34	34.5
3H	34.1	33.6	32.6	33.6	34.7



รูปที่ 4.5 แผนภาพอุณหภูมิในโรงเรือนอุโมงค์เพื่อเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างโรงเรือน

จากรูปที่ 4.5 พบว่าที่ระยะ 0.5H, 1.0H มีอุณหภูมิภายในโรงเรือนและระหว่างโรงเรือนตั้งแต่ 36.1 °C ถึง 40.9 °C เนื่องจากช่องว่างระหว่างโรงเรือนน้อย พื้นที่การระบายอากาศร้อนออกทางด้านบนน้อย มีผลทำให้อุณหภูมิภายในโรงเรือนและระหว่างโรงเรือนสูง ที่ระยะ 1.5H, 2.0H, 3.0H มีอุณหภูมิภายในและระหว่างโรงเรือนตั้งแต่ 32.6 °C ถึง 35.6 °C ต่ำกว่าที่ระยะ 0.5H, 1.0H เนื่องจากช่องว่างระหว่างโรงเรือนมากกว่า ทำให้มีพื้นที่การระบายอากาศร้อนออกทางด้านบนมากกว่ามีผลทำให้อุณหภูมิภายในโรงเรือนและระหว่างโรงเรือนต่ำกว่า และที่ระยะ 1.5H จะเหมาะสมที่สุด เพราะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นระยะห่างระหว่างโรงเรือนที่น้อยที่สุดและมีอุณหภูมิภายในและระหว่างโรงเรือนใกล้เคียงกับระยะ 2.0H, 3.0H

4.2 ผลการทดลองครั้งที่ 2

สร้างโรงเรือนอุโมงค์ตามแบบรูปที่ 3.2 เพื่อทดสอบวัดอุณหภูมิที่ศูนย์วิจัยพืชสวนศรีสะเกษ จ.ศรีสะเกษ (รูปที่ 4.6) มี Latitude (degree) 15.25° Longitude (degree) 104.87° จำนวน 3 หลัง มีระยะห่างระหว่างโรงเรือน 1 m เพื่อใช้ทดสอบและเก็บข้อมูลอุณหภูมิภายในโรงเรือน โดยใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิอัตโนมัติ (Sila Research รุ่น AP-1700) ติดตั้งสูงจากพื้น 1 m จำนวน 10 จุด เครื่องวัดความเร็วลมแบบพกพา (Digicon รุ่น DA-43) เพื่อวัดสภาพอากาศในโรงเรือน โดยวัดเดือน สิงหาคม 2558

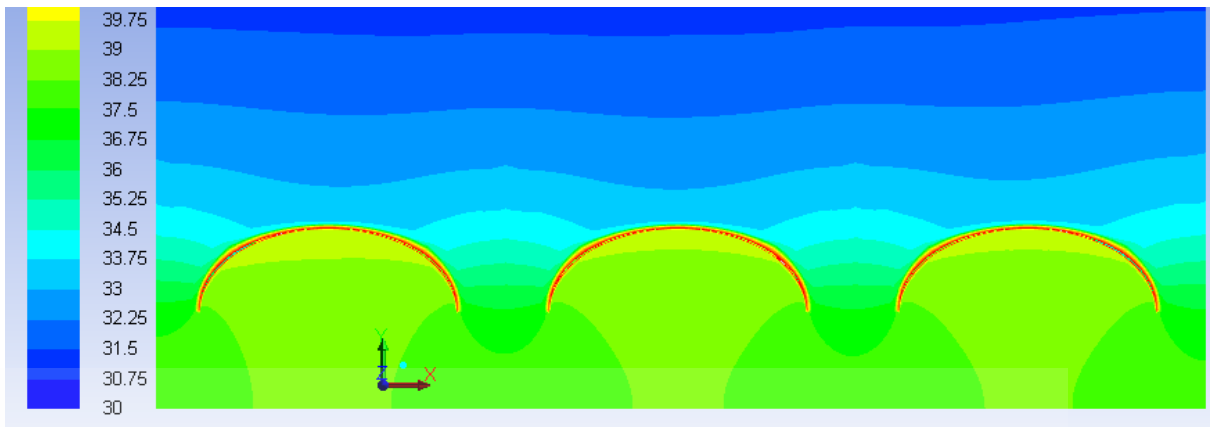


รูปที่ 4.6 โรงเรือนอุโมงค์ที่ใช้ทดสอบที่ศูนย์วิจัยพืชสวนศรีสะเกษ

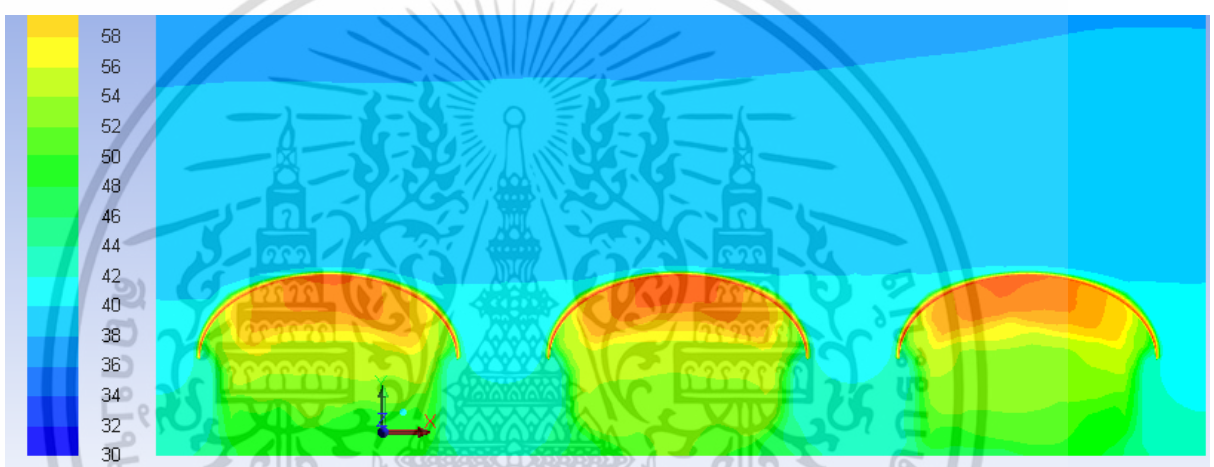
4.2.1 ผลการวัดอุณหภูมิในโรงเรือนทดลองจริงและแบบจำลองการไหลปั่นป่วน K-ε

วัดอุณหภูมิในโรงเรือนอุโมงค์และระหว่างโรงเรือน เวลา 12.00 น. ของวันที่ 14 สิงหาคม 2558 ที่ความสูง 1 m จากพื้น จำนวน 10 จุด วัดความเร็วลมมีค่าเป็น 0 m/s เปรียบเทียบกับแบบจำลองโรงเรือนอุโมงค์จำนวน 3 หลัง มีระยะห่างระหว่างโรงเรือน 1 m ความเร็วลมมีค่าเป็น 0 m/s มีการระบายความร้อนตามธรรมชาติและ แบบจำลองการไหลปั่นป่วน K-ε ชนิด Standard, Renormalization group (RNG) และ Realizable ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และทำการวัดอุณหภูมิ จำนวน 9 จุดในตำแหน่งเดียวกับที่วัดในโรงเรือนอุโมงค์และทำการเปรียบเทียบดังแสดงในตารางที่ 4.4 และทำการเปรียบเทียบในรูปที่ 4.8

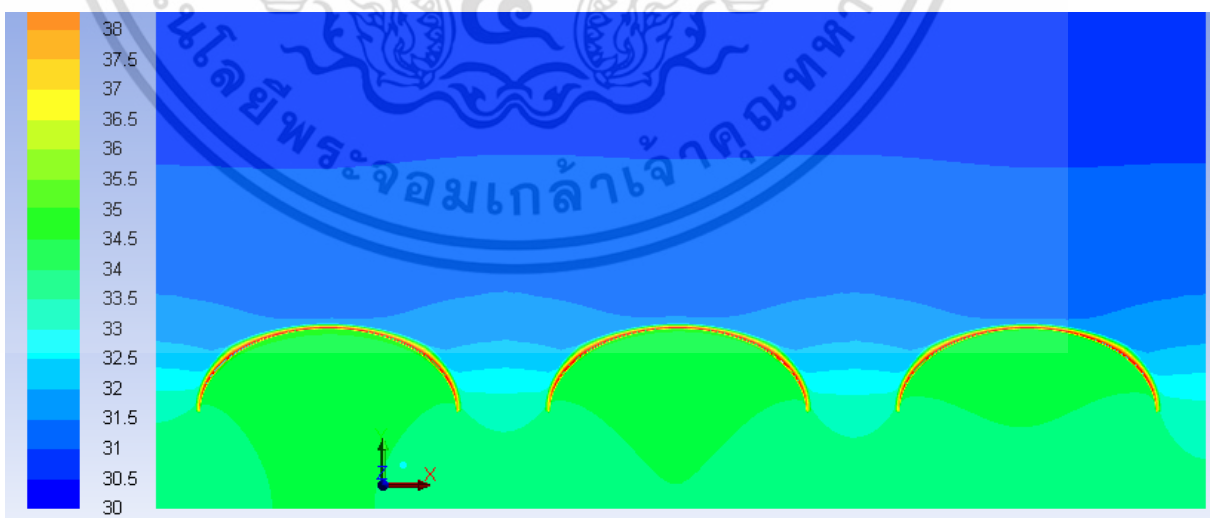
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) Standard



(ข) Renormalization group (RNG)

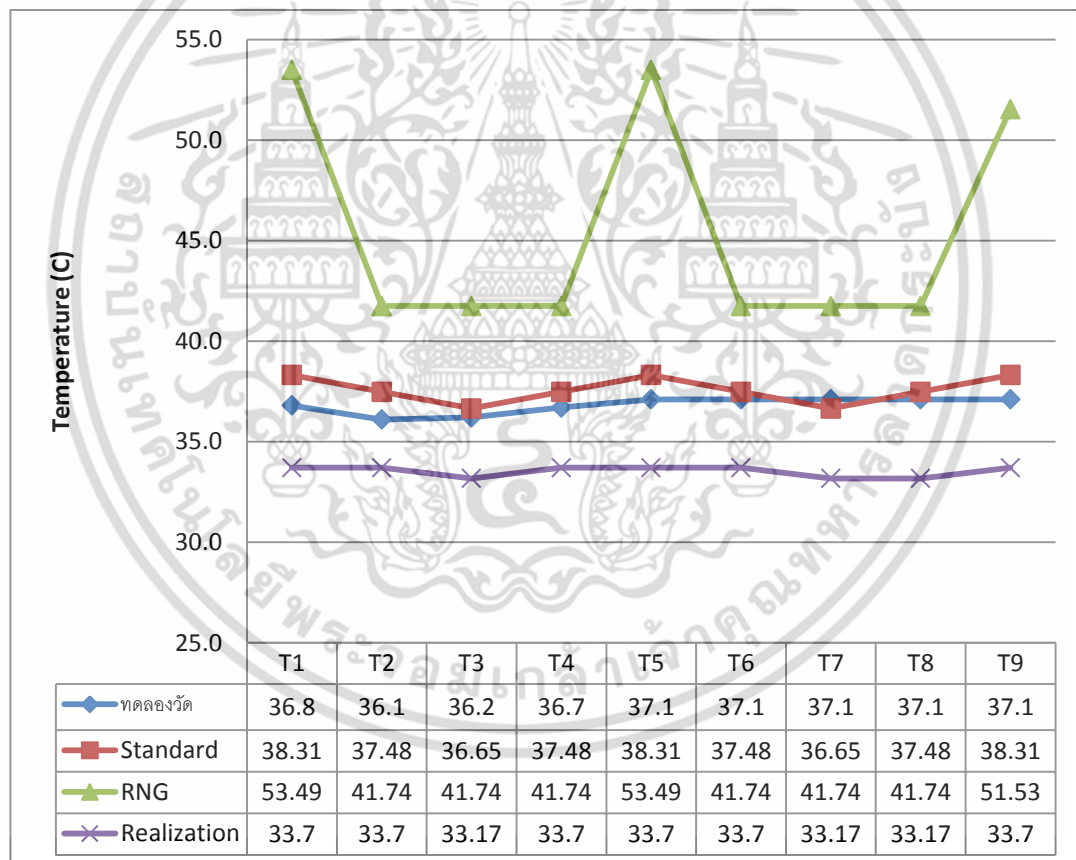


(ค) Realizable

รูปที่ 4.7 อุณหภูมิแบบจำลองการไหลปั่นป่วน K- ϵ ชนิดต่างๆ ของโรงเรือน 3 หลัง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิที่วัดในโรงเรือนอุโมงค์ 3 หลัง และแบบจำลองการไหลปั่นป่วน K-ε ชนิดต่างๆ

Model K- ε	ตำแหน่งที่วัด								
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
ทดลองวัด	36.8	36.1	36.2	36.7	37.1	37.1	37.1	37.1	37.1
Standard	38.31	37.48	36.65	37.48	38.31	37.48	36.65	37.48	38.31
RNG	53.49	41.74	41.74	41.74	53.49	41.74	41.74	41.74	51.53
Realization	33.7	33.7	33.17	33.7	33.7	33.7	33.17	33.17	33.7



รูปที่ 4.8 แผนภาพอุณหภูมิที่วัดในโรงเรือนอุโมงค์และแบบจำลองการไหลปั่นป่วน K-ε ชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดในโรงเรือนอุโมงค์และแบบจำลองการไหลปั่นป่วน K-ε ชนิดต่างๆ

ทำการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ (Error) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของ แบบจำลองการไหลปั่นป่วน K-ε แบบ Standard, Renormalization group (RNG) และ Realizable แสดงค่าในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองการไหลปั่นป่วน K-ε ชนิดต่างๆ (โรงเรือน 3 หลัง)

Model	Error (%)								
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
Standard	4.10	3.82	1.24	2.13	3.26	1.02	1.21	1.02	3.26
RNG	45.35	15.62	15.30	13.73	44.18	12.51	12.51	12.51	38.89
Realization	8.42	6.65	8.37	8.17	9.16	9.16	10.59	10.59	9.16

จากตารางที่ 4.5 พบว่าเปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆของแบบจำลองการไหลปั่นป่วน K-ε แบบ Standard มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าแบบอื่น

4.2.3 ผลการจำลองและเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างโรงเรือน

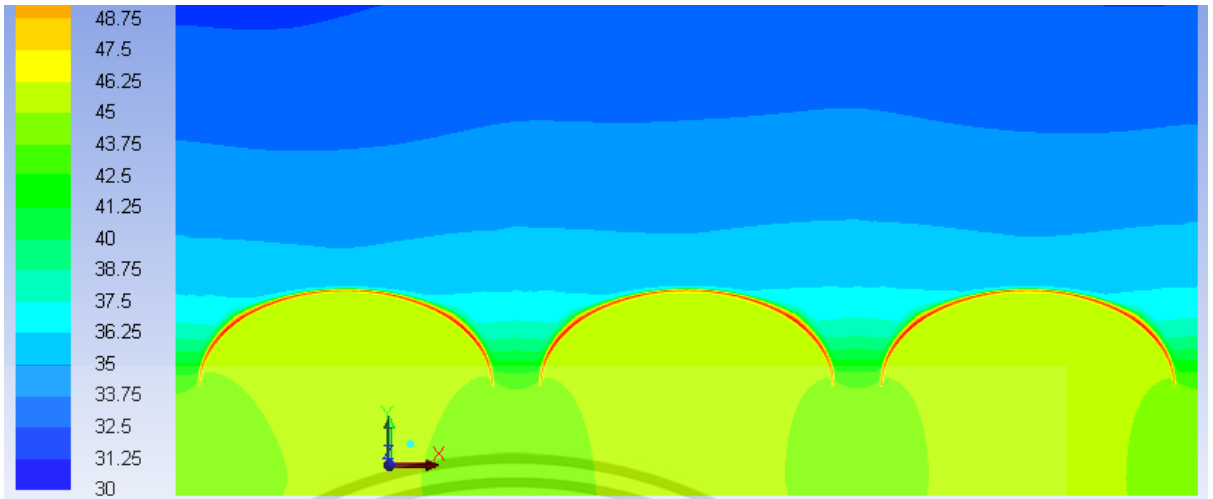
เลือกแบบจำลองความปั่นป่วน K-ε แบบ Standard และค่าต่างๆ จำลองสภาพอากาศในโรงเรือนอุโมงค์ทั้งสองหลังเพื่อหาระยะห่างระหว่างเรือน จำนวน 5 ระยะ ดังนี้ 0.5m, 1.0m, 1.5m, 2.0m และ 3.0m (รูปที่ 4.9-4.13) และวัดอุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ ตามตารางที่ 4.6 พร้อมทั้งแผนภาพเพื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิ (รูปที่ 4.14)

ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ที่จำลองระยะห่างระหว่างโรงเรือน 3 หลัง จำนวน 5 ระยะ

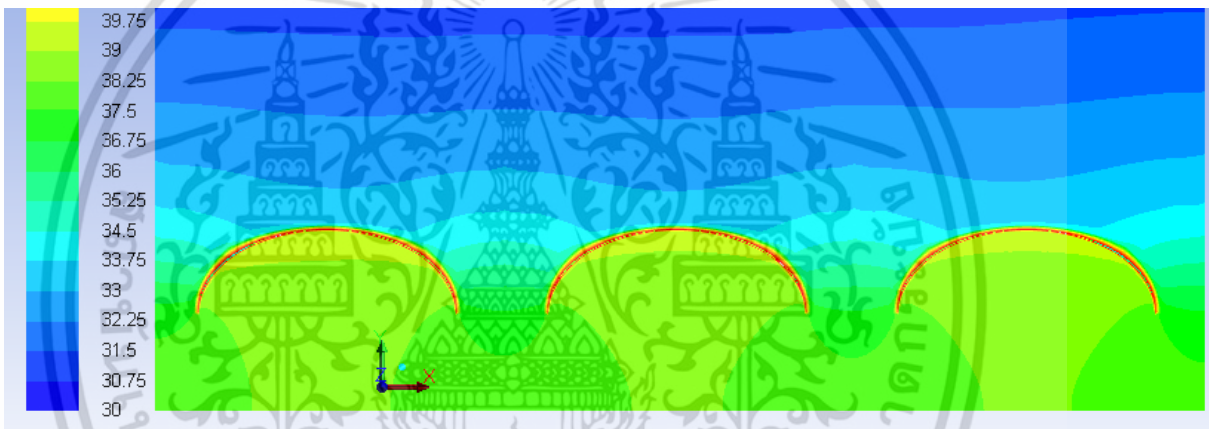
ระยะห่าง โรงเรือน	ตำแหน่งที่วัด								
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
0.5 m	44.95	43.7	43.7	43.7	44.95	43.7	43.7	43.7	44.95
1.0 m	38.31	37.48	37.65	37.48	38.31	37.48	37.65	37.48	38.31
1.5 m	37.42	36.71	36.65	36.61	37.54	36.71	36.71	36.71	36.71
2.0 m	37.25	36.44	36.24	36.44	37.25	36.44	36.63	36.44	37.25
3.0 m	36.97	36.29	36.18	36.19	36.97	36.29	36.64	36.19	36.97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน เพื่อการตีพิมพ์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

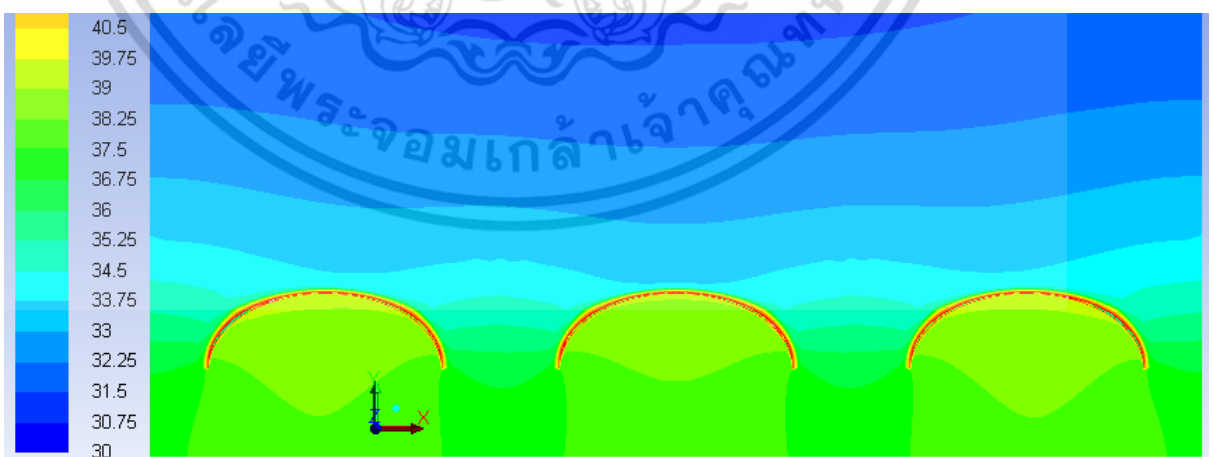
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แบบจำลองสภาพอุณหภูมิภายในโรงเรือน 3 หลัง ที่มีระยะห่างระหว่างโรงเรือน 0.5m

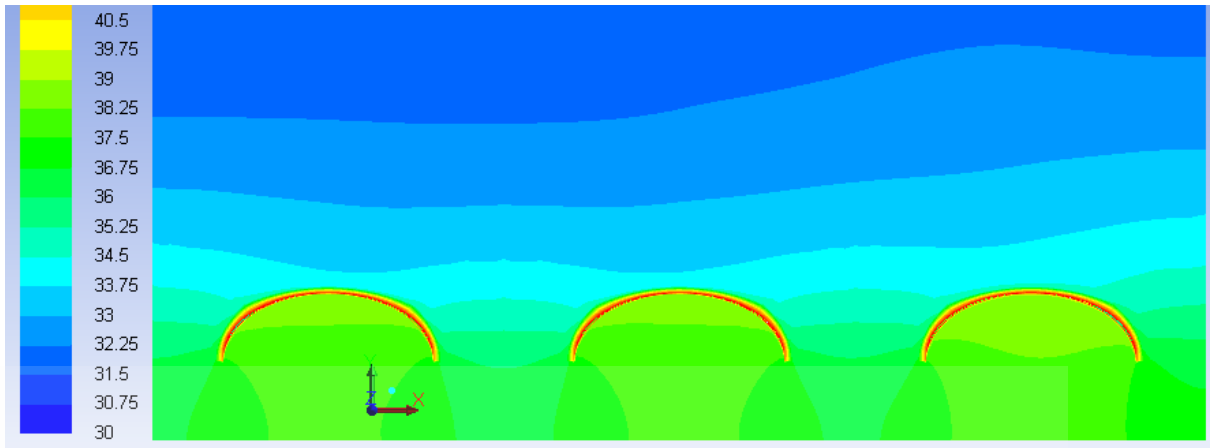


รูปที่ 4.10 แบบจำลองสภาพอุณหภูมิภายในโรงเรือน 3 หลัง ที่มีระยะห่างระหว่างโรงเรือน 1.0m

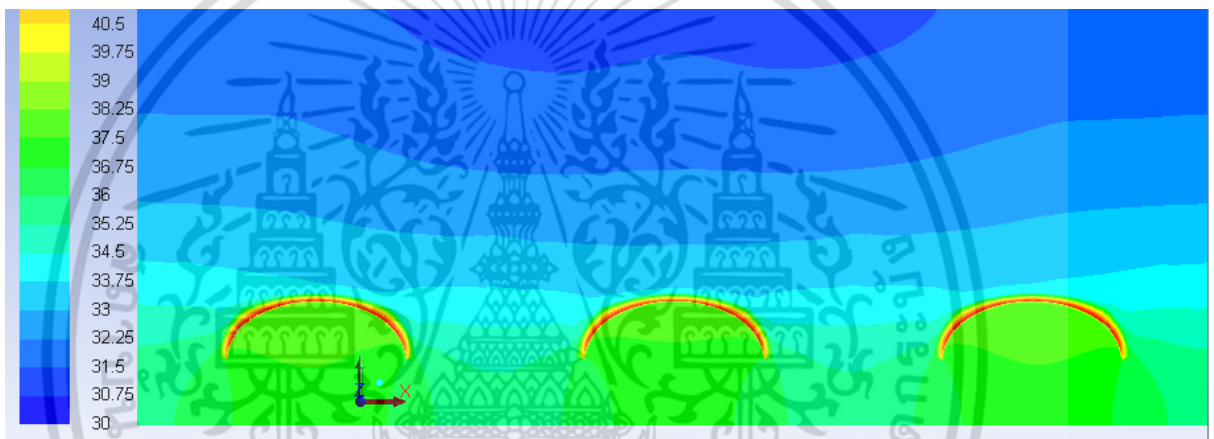


รูปที่ 4.11 แบบจำลองสภาพอุณหภูมิภายในโรงเรือน 3 หลัง ที่มีระยะห่างระหว่างโรงเรือน 1.5m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

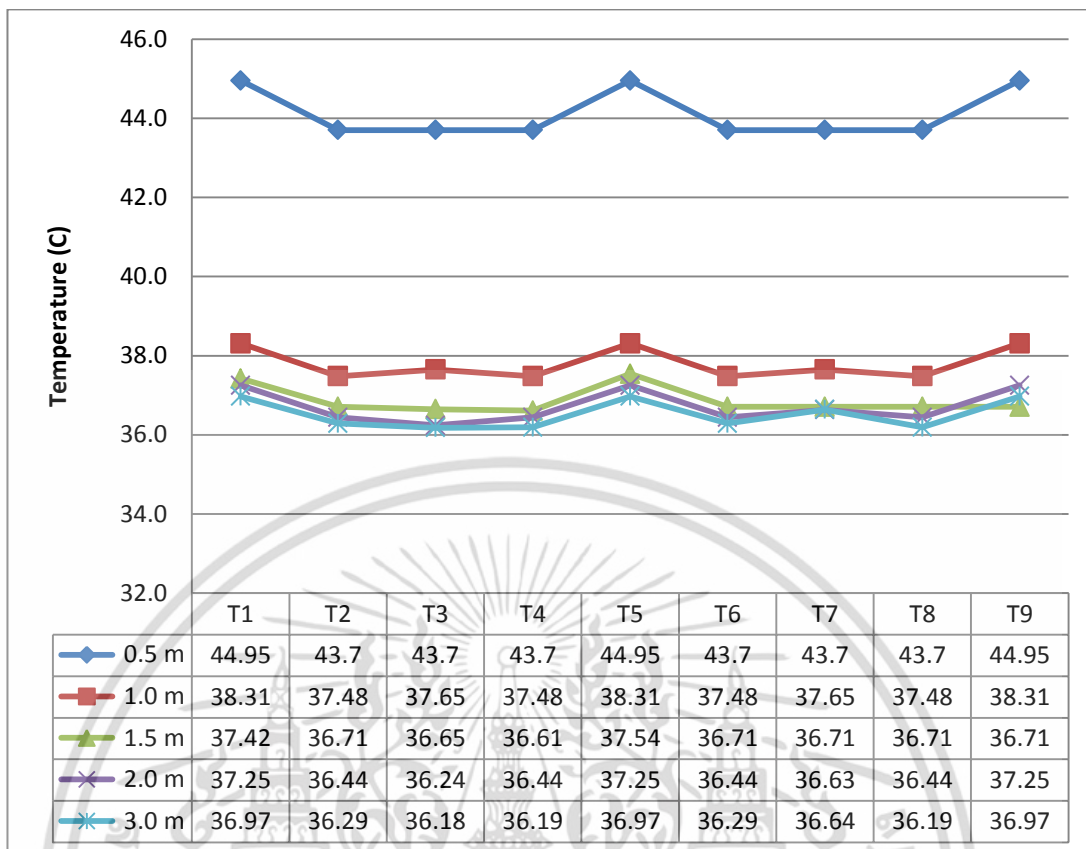


รูปที่ 4.12 แบบจำลองสภาพอุณหภูมิภายในโรงเรือน 3 หลัง ที่มีระยะห่างระหว่างโรงเรือน 2.0m



รูปที่ 4.13 แบบจำลองสภาพอุณหภูมิภายในโรงเรือน 3 หลัง ที่มีระยะห่างระหว่างโรงเรือน 3.0m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แผนภาพอุณหภูมิในโรงเรือนอุโมงค์เพื่อเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างโรงเรือน

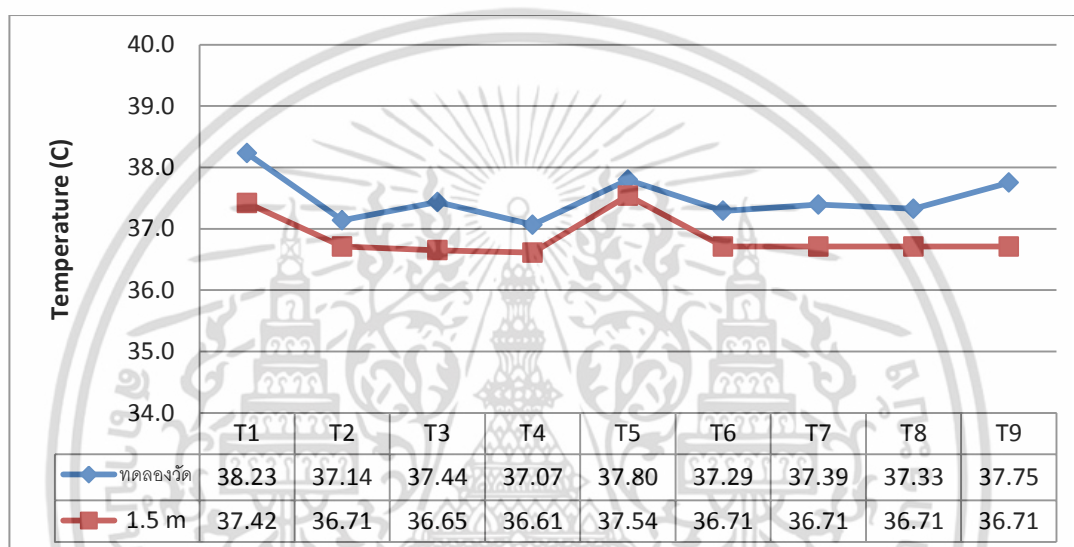
จากรูปที่ 4.14 พบว่าที่ระยะ 0.5m, 1.0m มีอุณหภูมิภายในโรงเรือนและระหว่างโรงเรือน ตั้งแต่ 36.65 °C ถึง 44.95 °C เนื่องจากช่องว่างระหว่างโรงเรือนน้อย พื้นที่การระบายอากาศร้อนออกทางด้านบนน้อย มีผลทำให้อุณหภูมิภายในโรงเรือนและระหว่างโรงเรือนสูง ที่ระยะ 1.5m, 2.0m, 3.0m มีอุณหภูมิภายในและระหว่างโรงเรือนตั้งแต่ 31.19 °C ถึง 38.05 °C ต่ำกว่าที่ระยะ 0.5m, 1.0m เนื่องจากช่องว่างระหว่างโรงเรือนมากกว่า ทำให้มีพื้นที่การระบายอากาศร้อนออกทางด้านบนมากกว่ามีผลทำให้อุณหภูมิภายในโรงเรือนและระหว่างโรงเรือนต่ำกว่า และที่ระยะ 1.5m จะเหมาะสมที่สุด เพราะเป็นระยะห่างระหว่างโรงเรือนที่น้อยที่สุดและมีอุณหภูมิภายในและระหว่างโรงเรือนใกล้เคียงกับระยะ 2.0m, 3.0m

4.3 ผลการทดสอบสร้างโรงเรือนอุโมงค์ที่ระยะห่าง 1.5 m

เมื่อได้ระยะห่างระหว่างโรงเรือน 1.5 m ที่เหมาะสม ทำการสร้างโรงเรือนอุโมงค์เพื่อทดสอบ วัดอุณหภูมิจริงที่ศูนย์วิจัยพืชสวนศรีสะเกษ จ.ศรีสะเกษ จำนวน 3 หลัง เก็บข้อมูลอุณหภูมิภายในโรงเรือนและระหว่างโรงเรือน จำนวน 10 จุด ในวันที่ 15 สิงหาคม 2558 เวลา 12.00 น. และเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง ดังตารางที่ 4.7 และทำการเปรียบเทียบในรูปที่ 4.15

ตารางที่ 4.7 อุณหภูมิที่วัดในโรงเรือนอุโมงค์และแบบจำลองที่มีระยะห่างระหว่างโรงเรือน 1.5 m

Model K-e	ตำแหน่งที่วัด								
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
ทดลองวัด	38.23	37.14	37.44	37.07	37.80	37.29	37.39	37.33	37.75
1.5 m	37.42	36.71	36.65	36.61	37.54	36.71	36.71	36.71	36.71



รูปที่ 4.15 แผนภาพเปรียบเทียบอุณหภูมิในโรงเรือนที่ระยะห่าง 1.5 m กับแบบจำลอง

ทำการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ (Error) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของแบบจำลองการกับอุณหภูมิที่วัดได้จริงจากโรงเรือนอุโมงค์ที่ระยะห่างระหว่างโรงเรือน 1.5 m พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ (Error) อยู่ในช่วง 0.68 – 2.76% ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่มีระยะห่างระหว่างโรงเรือน 1.5 m

Model	Error (%)								
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
1.5 m	2.12	1.15	2.10	1.23	0.68	1.56	1.83	1.65	2.76

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การทดลองสร้างโรงเรือนอุโมงค์ครั้งที่ 1 ขนาด กว้าง 3 m ยาว 6 m สูง 2.1 m ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร มี Latitude 13.67° Longitude 100.62° จำนวน 2 หลัง มีระยะห่างระหว่างโรงเรือน 1 m เพื่อเก็บข้อมูลอุณหภูมิภายในโรงเรือนและระหว่างโรงเรือนจำนวน 5 จุด จากนั้นเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการจำลอง ซึ่งการจำลองสภาพอากาศภายในโรงเรือนอุโมงค์โดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics) โปรแกรม ANSYS FLUENT 14.0 เลือกเงื่อนไขความร้อนที่โรงเรือนได้รับแบบการแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ และแบบจำลองการไหลปั่นป่วน K- ϵ ชนิด Standard, renormalization group (RNG) และ Realizable

จากนั้นเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการจำลองทั้งหมดกับอุณหภูมิที่ทดลองวัดจริงเวลา 12.00 น. ของวันที่ 26 มีนาคม 2557 พบว่าแบบจำลองแบบจำลองการไหลปั่นป่วน K- ϵ ชนิด Standard ให้ผลการคำนวณใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด มีค่า Error 0.55-2.6% ซึ่งมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองการไหลปั่นป่วน K- ϵ ชนิดต่างๆ

ใช้ค่าเงื่อนไขต่างๆ จากการจำลองสภาพอากาศข้างต้นมาทำการจำลองหาระยะห่างระหว่างโรงเรือนที่ระยะ 0.5H, 1.0H, 1.5H, 2.0H และ 3.0H ผลจากการจำลองพบว่าที่ระยะ 0.5H, 1.0H มีอุณหภูมิภายในโรงเรือนสูงกว่าระยะ 1.5H, 2.0H, 3.0H แต่ระยะที่ 1.5H จะเหมาะสมที่สุด เพราะเป็นระยะห่างระหว่างโรงเรือนที่น้อยที่สุดที่สามารถระบายอากาศได้ดีและไม่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิต่อกัน

ระยะที่เหมาะสมในการทดลองครั้งที่ 1 เมื่อนำไปปฏิบัติอาจมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากระยะ 1.5H (1.71 m) เมื่อเกษตรกรนำไปปฏิบัติเกิดการไม่ยอมรับเนื่องจากระยะที่ได้ไม่ใช่จำนวนเต็ม ผู้ทำการวิจัยจึงทำการทดลองครั้งที่ 2 โดยให้ระยะห่างระหว่างโรงเรือนเป็นตัวเลขจำนวนเต็มในหน่วยเมตร ซึ่งจะง่ายต่อการนำผลการทดลองไปปฏิบัติตามคำแนะนำ และเพิ่มแบบจำลองโรงเรือนอุโมงค์เป็นจำนวน 3 หลัง เพื่อให้ผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น

จึงได้ทำการทดลองสร้างโรงเรือนอุโมงค์ครั้งที่ 2 ขนาด กว้าง 3 m ยาว 18 m สูง 2.1 m ที่ศูนย์วิจัยพืชสวนศรีสะเกษ จ.ศรีสะเกษ มี Latitude 15.25° Longitude 104.87° จำนวน 3 หลัง มีระยะห่างระหว่างโรงเรือน 1 m เพื่อเก็บข้อมูลอุณหภูมิภายในโรงเรือนและระหว่างโรงเรือน จำนวน 9 จุด และอุณหภูมิภายนอก 1 จุด รวมเป็น 10 จุด

ทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการจำลอง ซึ่งการจำลองสภาพอากาศภายในโรงเรือน อุโมงค์โดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โปรแกรม ANSYS FLUENT 14.0 เลือกเงื่อนไขความร้อนที่โรงเรือนได้รับแบบการแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ และแบบจำลองการไหลปั่นป่วน K-ε ชนิด Standard, renormalization group (RNG) และ Realizable

จากนั้นเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการจำลองทั้งหมดกับอุณหภูมิที่ทดลองวัดจริงทดลองวัดจริงเวลา 12.00 น. ของวันที่ 14 สิงหาคม 2558 พบว่าแบบจำลองแบบจำลองการไหลปั่นป่วน K-ε ชนิด Standard ให้ผลการคำนวณใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด มีค่า Error 1.02-4.1% ซึ่งมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองการไหลปั่นป่วน K-ε ชนิดต่างๆ

ใช้ค่าเงื่อนไขต่างๆ จากการจำลองข้างต้นมาทำการจำลองหาระยะห่างระหว่างโรงเรือนที่ระยะ 0.5m, 1.0m, 1.5m, 2.0m และ 3.0m ผลจากการจำลองพบว่าที่ระยะ 0.5m, 1.0m มีอุณหภูมิภายในโรงเรือนสูงกว่าระยะ 1.5m, 2.0m, 3.0m แต่ระยะที่ 1.5m จะเหมาะสมที่สุด เพราะเป็นระยะห่างระหว่างโรงเรือนที่น้อยที่สุดที่สามารถระบายอากาศได้ดีและสามารถนำไปปฏิบัติได้จริง

เมื่อได้ระยะห่างที่เหมาะสมแล้ว จึงได้ทำการทดลองสร้างโรงเรือนอุโมงค์ครั้งที่ 3 ขนาดกว้าง 3 m ยาว 18 m สูง 2.1 m ที่ศูนย์วิจัยพืชสวนศรีสะเกษ จ.ศรีสะเกษ จำนวน 3 หลัง มีระยะห่างระหว่างโรงเรือน 1.5 m เพื่อเก็บข้อมูลอุณหภูมิภายในโรงเรือนและระหว่างโรงเรือน จำนวน 9 จุด และอุณหภูมิภายนอกรวมเป็น 10 จุด จากนั้นเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการจำลองทั้งหมดกับอุณหภูมิที่ทดลองวัดจริงทดลองวัดจริงเวลา 12.00 น. ของวันที่ 15 สิงหาคม 2558 พบว่าอุณหภูมิที่วัดได้จากโรงเรือนมีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลอง มีค่า 0.68 – 2.76%

จากการวิจัยครั้งนี้สามารถให้คำแนะนำเบื้องต้นให้แก่เกษตรกรผู้ปลูกเบญจมาศในการเว้นระยะห่างระหว่างโรงเรือนอุโมงค์ที่ใช้ปลูกเบญจมาศ ที่ระยะห่าง 1.5 m เพื่อให้อุณหภูมิภายในไม่สูงกว่าภายนอก ซึ่งจะส่งผลให้ผลผลิตมีคุณภาพดีและเป็นการใช้ที่ดินให้เกิดประโยชน์สูงสุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

- ในงานวิจัยนี้ทำการทดลองหาระยะที่ตรงกับโรงเรือนเปล่าเท่านั้น ซึ่งยังไม่ได้มีการทดลองปลูกต้นเบญจมาศในโรงเรือนอุโมงค์จริง
- การสร้างโรงเรือนอุโมงค์เพื่อทำการทดสอบวัดอุณหภูมิควรสร้างในสถานที่ปิดเพื่อลดผลกระทบจากแรงลม
- ในการทดลองครั้งต่อไปควรใช้โปรแกรม Fluent ของบริษัทอื่นๆ เพื่อเปรียบเทียบผล

เอกสารอ้างอิง

- [1] วันชัย คุปวานิชพงษ์ วิโรจน์ โหราศาสตร์ นาวิ จิระชีวี สรวุฒิ ปานทน ฉัตรนภา ช่มอาวุธ. 2554. วิจัยและพัฒนาโรงเรือนสำหรับปลูกเบญจมาศ, การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, โรงแรมชลจันทร์ พัทยา รีสอร์ท จังหวัดชลบุรี
- [2] OuldK haous S.A., Bournet P.E., Migeon C., Boulard T., Chasseriaux G. 2006. Analysis of Greenhouse Ventilation Efficiency based on Computational Fluid Dynamics, Biosystems Engineering, Vol. 95. Issue 1, September 2006, pp. 83-98.
- [3] Smith, G. D. 1985. Numerical Solution of Partial Differential Equations: Finite Difference Methods, 3rd edn, Clarendon Press, Oxford.
- [4] ปราโมทย์ เดชะอำไพ. 2548. ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อการคำนวณพลศาสตร์ของไหล, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. 2545.
- [5] Gottlieb, D. and Orszag, S. A. 1977. Numerical Analysis of Spectral Methods: Theory and Applications, SIAM, Philadelphia.
- [6] Kacira M., Short T.H., & Stowell R.R. 1998. A CFD evaluation of naturally ventilated, multi-span, sawtooth greenhouses, Trans. ASAE, Vol. 41(3) 1998, pp. 833-836.
- [7] Launder B.E., & Spalding D.B. 1974. The numerical computation of turbulent flows, Comp. Methods Appl. Mech. Eng., Vol. 3, 1974, pp. 269-289.
- [8] Bradshaw P., Cebeci T. and Whitelaw J.H. 1981. Engineering Calculation Methods for Turbulent Flow, Academic press, London.
- [9] Anderson D.A., Tannehill J.C. and Pletcher R. H. 1984. Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer, Hemisphere Publishing Corporation, Taylor & Francis Group, New York.
- [10] De la Torre-Gea M., Soto-Zarazúa G.M., López-Cruz I., Torres-Pacheco I., Rico-García E. 2011. Computational fluid dynamics in greenhouses, African Journal of Biotechnology, Vol. 10(77), December 2011, pp. 17651-17662.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] มานะ วิชางาม ธนรัฐ ศรีวีระกุล. 2555. การจำลองการไหลของอากาศผ่านรูรั้งฝั่งเตาหุงต้ม ประสิทธิภาพสูงโดยใช้โปรแกรม CFD, วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย อุบลราชธานี, ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 เมษายน 2555. หน้า 24-34.
- [12] Bartzanas T., Boulard T., Kittas C. 2004. Effect of Vent Arrangement on Windward Ventilation of a Tunnel Greenhouse, *Biosystems Engineering*, Vol. 88. Issue 4, July 2004, pp. 479-490.
- [13] Ould Khaoua S.A., Bournet P.E., Migeon C., Boulard T., Chasseriaux G. 2006. Analysis of Greenhouse Ventilation Efficiency based on Computational Fluid Dynamics, *Biosystems Engineering*, Vol 95 (1), 2006, pp. 83–98.
- [14] Limtrakarn W., Boonmongkol P., Chompupoung A., Rungprateepthaworn K., Krueenate J., Dechaumphai P. 2012. Computational Fluid Dynamics Modeling to Improve natural Flow Rate and Sweet Pepper Productivity in Greenhouse, *Advances in Mechanical Engineering*, Volume 2012, Article ID 158565, 7 pages.
- [15] Molina-Aiz F.D., Fatnassi H., Boulard T., Roy J.C., Valera D.L. 2010. Comparison of finite element and finite volume methods for simulation of natural ventilation in greenhouses, *Computers and Electronics in Agriculture*, 72 (2010), pp. 69–86.
- [16] *Fluent 14.0 User's Guide*, FLUENT INC, Lebanon, NH, U.S.A.
- [17] Nimnuan P., Janjai S. 2012. An Approach for Estimating Average Daily Global Solar Radiation from Cloud Cover in Thailand, *Procedia Engineering*, Vol. 32, pp. 399-406.



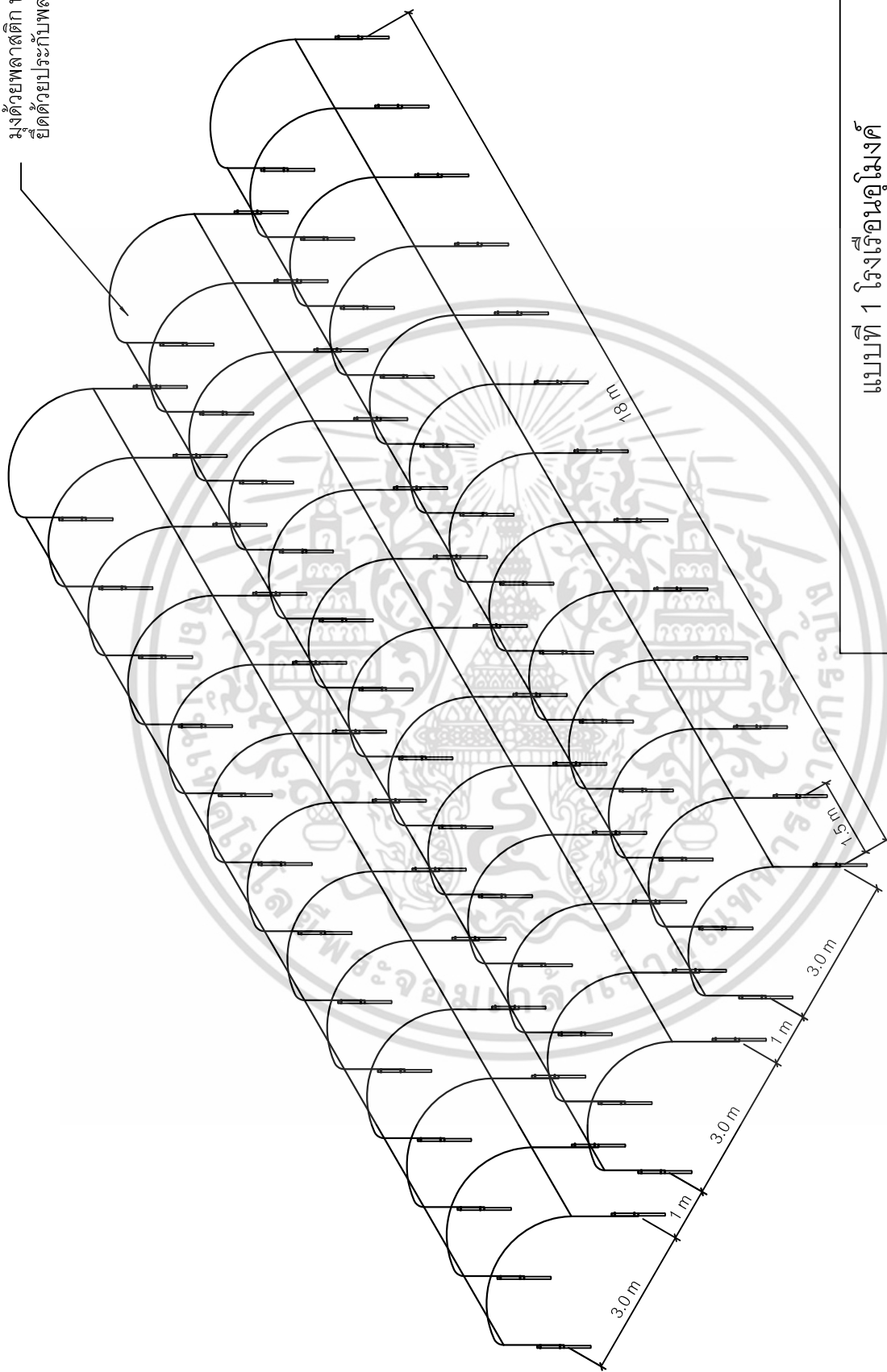
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มุ่งด้วยพลาสติก หน้า 150 ไมครอน
ยึดด้วยประกับพลาสติก ทั้งสี่ด้าน

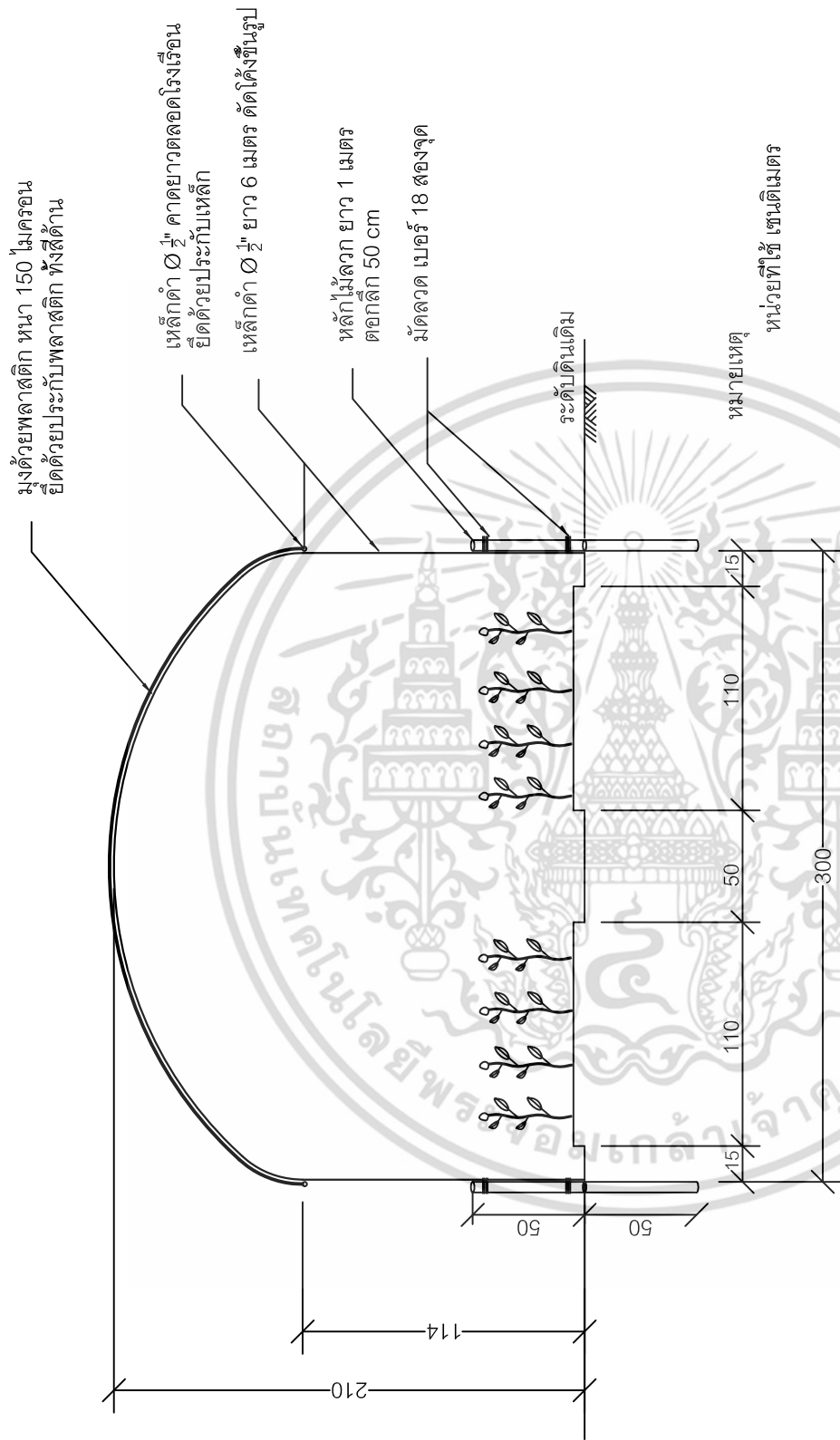


แบบที่ 1 โรงเรือนอุโมงค์

แสดง	โรงเรือนแบบที่ 1 จำนวน 3 โรง			เลขที่	พท-ว 004/52
	จำนวน	ชื่อ	สถานที่	แผ่นที่	1 / 4
	สำรวจ	อรรถพร รื่นรงค์	เขียน	สรวิชัย ปานทน	30/3/2552
	คำนวณ	วิโรจน์ โหระภาคินทร์	ตรวจ	นารี จิระชัย	
	ออกแบบ	วิโรจน์ โหระภาคินทร์	มาตรฐาน		
สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร โทร 0-2579-8519					

โรงเรือนปลูกเบญจมาศ แบบที่ 1 จำนวน 3 โรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



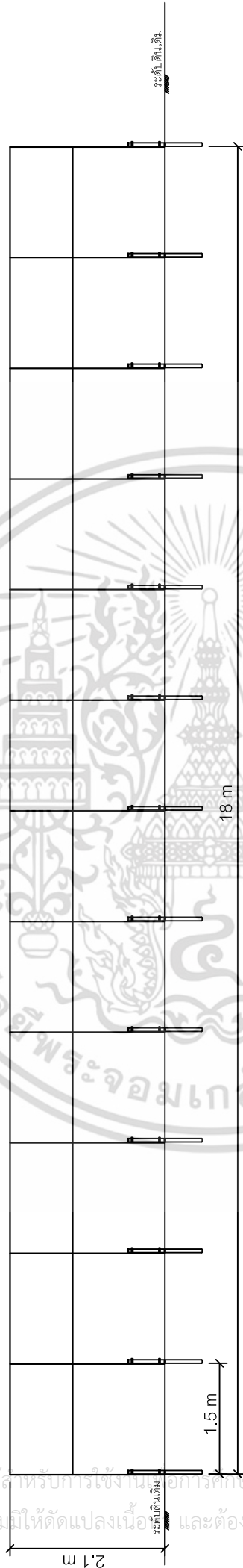
รูปด้านหน้า

แบบที่ 1 โรงเรือนอุโมงค์


แสดง	รูปด้านหน้าโรงเรือนแบบที่ 1				เลขที่	พท-ว 004/52
	สำรวจ	อรรถพร รื่นแรงดี	เขียน	สรวิชัย ปานทน	แผ่นที่	2 / 4
	คำนวณ	วิโรจน์ โหระภาคาสตร์	ตรวจ	นาวี จิระชัย		
	ออกแบบ	วิโรจน์ โหระภาคาสตร์	มาตรฐาน			
สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการ โทร 0-2579-8519						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

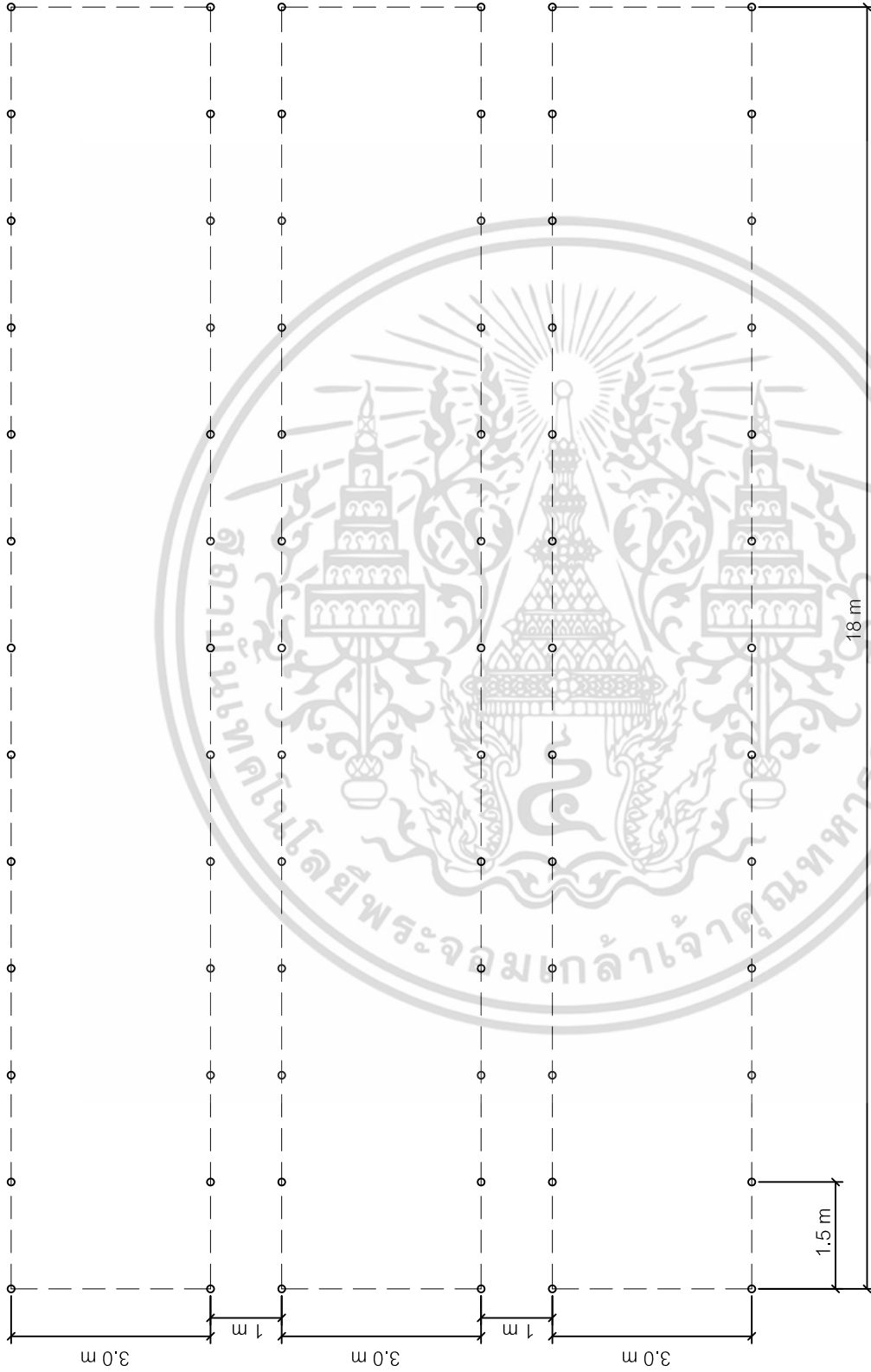
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเฉพาะการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แบบที่ 1 โครงเหล็กเสริมคอนกรีต


แสดง 	รูปด้านข้างโครงเหล็กเสริมแบบที่ 1				เลขที่	พท-ว 004/52
	สำรวจ	อรรถพงษ์ รื่นณรงค์	เขียน	สรวิชัย ปานทน	แผ่นที่	3 / 4
คำนวณ	วิโรจน์ ไชยศาสตร์	ตรวจ	นารี จิระชัย			
ออกแบบ	วิโรจน์ ไชยศาสตร์	มาตรฐาน				
สถาบันวิจัยเทคโนโลยีวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร โทร 0-2579-8519						

กรมวิชาการเกษตร



แบบที่ 1 โรงเรียนอุโมงค์

ผังตอกหลัก

	ผังโรงเรียนแบบที่ 1 จำนวน 3 โรง			เลขที่ พท-ว 004/52
	สํารวจ คํานวณ ออกแบบ	อรรถพร รินณรงค์ วิโรจน์ ไทรศาสตร์ วิโรจน์ ไทรศาสตร์	เขียน ตรวจ มาตรฐาน	สราวุฒิ ปานทน นาวี จิระชัย
สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร โทร 0-2579-8519				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

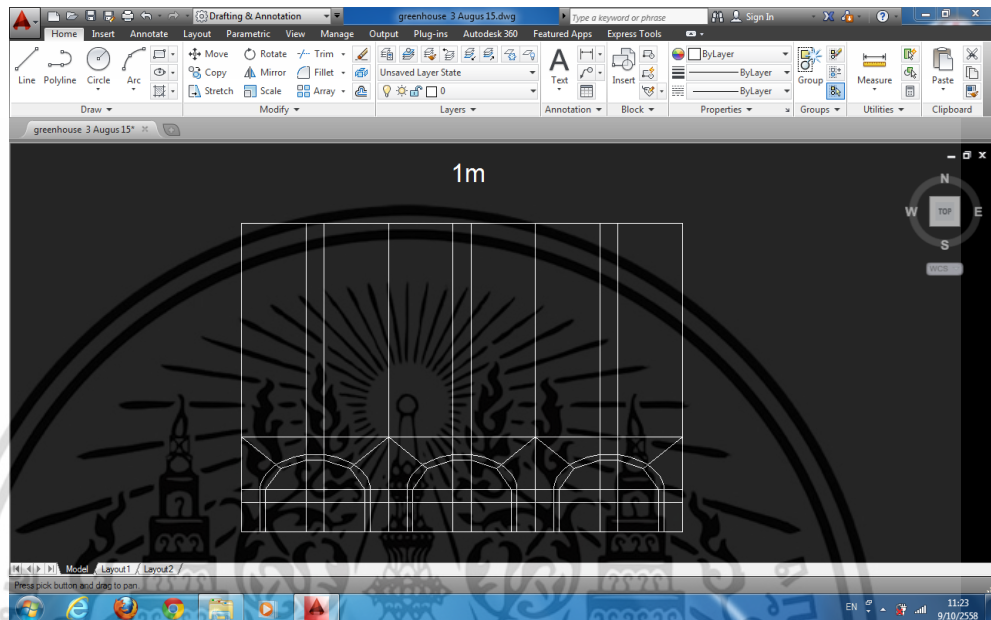


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างแบบจำลองโรงเรือนอุโมงค์ในโปรแกรม Fluent

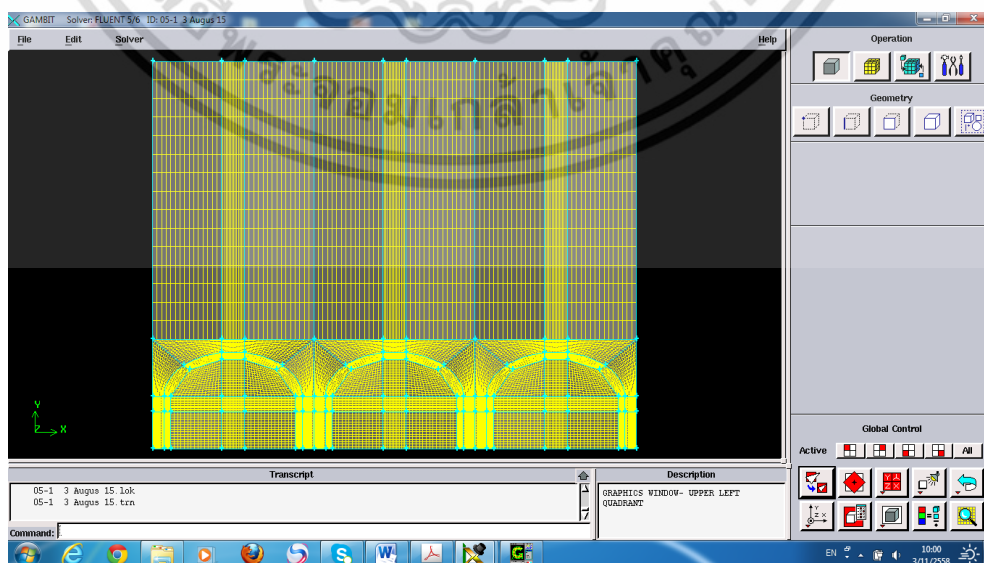
1. เขียนแบบโรงเรือนอุโมงค์

ด้วยโปรแกรม Auto Cad 2014 จำนวน 3 หลัง โดยมีระยะห่างระหว่างโรงเรือน 1 เมตร เขียนแบบ 2 มิติ เมื่อเขียนแบบเสร็จแล้วทำการ Export file เป็นนามสกุล *.iges (รูปที่ 3.1)



2. การกำหนดกริด (Grid)

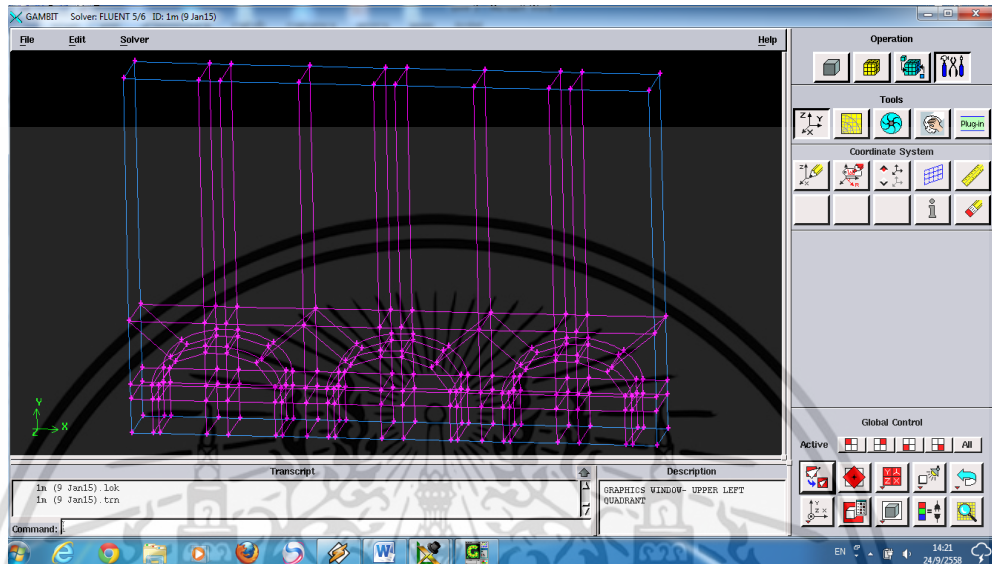
สร้าง Grid ของโรงเรือนอุโมงค์ ด้วยโปรแกรม Gambit โดยทำการ import file นามสกุล *.iges ทำการสร้าง Grid แบบสี่เหลี่ยม (Quad) สร้างให้เป็น 2 มิติ ตามรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

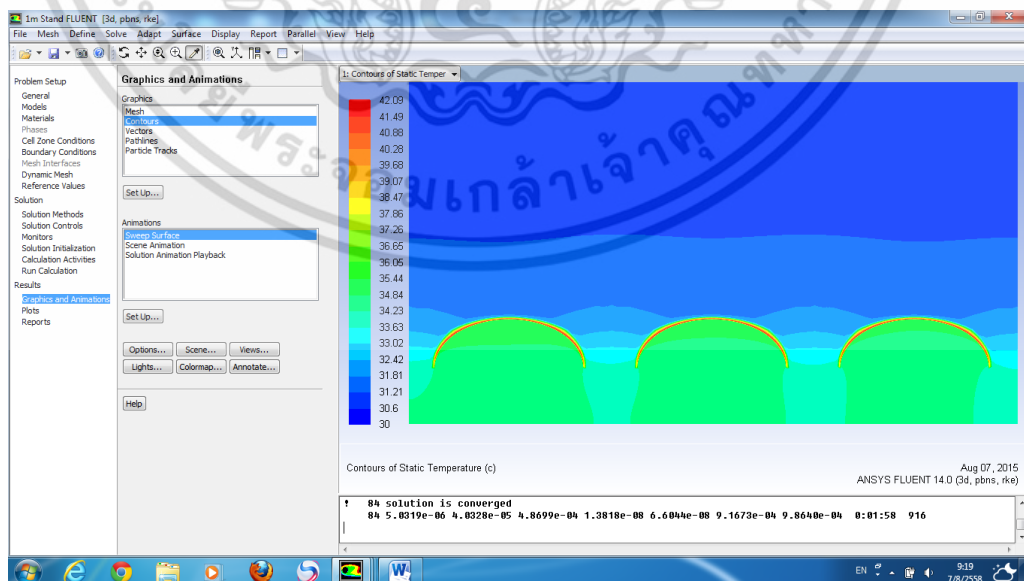
3. สร้าง Grid

ของโรงเรือนอุโมงค์ ด้วยโปรแกรม Gambit โดยทำการ import file นามสกุล *.iges ทำการสร้าง Grid สร้างให้เป็น 3 มิติ ตามรูป เมื่อเขียนเสร็จแล้วทำการ Export file เป็นนามสกุล *.mesh



4. ทำการจำลองสภาพอากาศภายในโรงเรือน

โดยใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 14.0 โดยทำการ Open file นามสกุล *.mesh และทำการ Run โปรแกรม ดังรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร
 โรงเรือนอุโมงค์ ขนาด กว้าง 3 เมตร ยาว 6 เมตร สูง 2.1 เมตร จำนวน 2 หลัง



โรงเรือนอุโมงค์จำนวน 2 หลัง



ล้อมแผ่นพลาสติกใสเพื่อกันลม



โรงเรือนอุโมงค์



ระยะห่างระหว่างโรงเรือน 1 เมตร



ความเร็วลมขณะบันทึกข้อมูล



หัววัดอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศูนย์วิจัยพืชสวนศรีสะเกษ จ.ศรีสะเกษ

โรงเรือนอุโมงค์ ขนาด กว้าง 3 เมตร ยาว 18 เมตร สูง 2.1 เมตร จำนวน 3 หลัง



โรงเรือนอุโมงค์จำนวน 3 หลัง



ระยะห่างระหว่างโรงเรือน 1 เมตร



ระยะห่างระหว่างโรงเรือน 1.5 เมตร



ความเร็วลมขณะทำงานบันทึกอุณหภูมิตั้ง



เครื่องบันทึกอุณหภูมิตั้ง AP-1700



หัววัดอุณหภูมิตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นายวิโรจน์ โทราศาสตร์
วันเดือนปีเกิด	21 เมษายน 2516 ที่จังหวัดปทุมธานี 30/2 หมู่ 10 ตำบลลำไทร อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี 12150 โทร.083-7189607
ประวัติการศึกษา	2528 จบประถมศึกษา โรงเรียนวัดมงคลรัตน์ ตำบลลำไทร อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี 2534 จบมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนวัดหนองจอก เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 2539 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1) ออกแบบระบบให้น้ำในแปลงทดลอง กรมวิชาการเกษตร
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย	
พ.ศ.2547 – 2548	การวิจัยและพัฒนาโรงเรือนและระบบการให้น้ำหน้าวัว
พ.ศ.2551 – 2552	ศึกษาระบบให้น้ำที่เหมาะสมสำหรับสวนปาล์มน้ำมันในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
พ.ศ.2552 – 2553	การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการควบคุมสภาพแวดล้อมสำหรับโรงเรือนปลูกเบญจมาศ
พ.ศ.2553 – 2554	วิจัยและพัฒนาโรงเรือนเพาะเห็ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้