

การศึกษาระยะห่างที่เหมาะสมของโรงเรือนแบบอุโมงค์ โดยการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

*วิโรจน์ โหราศาสตร์¹ และ ผศ.ดร.ทรงวุฒิ แสงจันทร์¹

¹หลักสูตรวิศวกรรมเกษตร สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

ติดต่อผู้เขียน: วิโรจน์ โหราศาสตร์ E-mail: wirot2555@yahoo.co.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาระยะห่างที่เหมาะสมของโรงเรือนแบบอุโมงค์โดยใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (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 เมตร สูง 2.1 เมตร ยาว 6 เมตร หลังคาคลุมด้วยพลาสติกใสหนา 150 ไมครอน ด้านข้างทั้งสองด้านเปิดโล่งสูง (H) 1.14 เมตร ระยะห่างระหว่างโรงเรือน 1 เมตร จำนวน 2 โรงเรือน ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิแบบจำลองการไหลปั่นป่วน k- ϵ ชนิด Standard พบว่ามีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่วัดได้จริงจากโรงเรือน จึงใช้แบบจำลองการไหลปั่นป่วนดังกล่าวทำการจำลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความสูงช่องเปิดด้านข้าง กับระยะห่างระหว่างโรงเรือนจำนวน 5 ระยะ ดังนี้ 0.5H, 1.0H, 1.5H, 2.0H และ 3.0H ผลจากการจำลองระยะห่างของโรงเรือนที่ 1.5H, 2.0H และ 3.0H พบว่ามีอุณหภูมิภายในโรงเรือนใกล้เคียงกัน โดยที่ระยะห่าง 1.5H เป็นระยะที่เหมาะสมเพราะเป็นระยะห่างที่น้อยที่สุดของโรงเรือนสองหลังที่ไม่มีอิทธิพลด้านสภาพอากาศต่อกัน

คำสำคัญ: โรงเรือนอุโมงค์; ระยะห่างโรงเรือน; CFD

1. บทนำ

โรงเรือนอุโมงค์ กว้าง 2.8-3 เมตร สูง 1.8-2.1 เมตร ยาว 6-18 เมตร มีหลังคาทรงโค้งมุงด้วยพลาสติกใส ด้านหน้าและด้านหลัง เปิดโล่ง ด้านข้างส่วนที่เปิดโล่งสูง 1-1.2 เมตร (รูปที่ 1) โรงเรือนมีการระบายอากาศตามธรรมชาติแบบโรงเรือนเปิดโดยทั่วไป เป็นโรงเรือนที่เกษตรกรนิยมใช้ปลูกเบญจมาศ [1] ซึ่งเกษตรกรแต่ละรายจะมีโรงเรือนแบบนี้จำนวนหลายหลัง การเว้นระยะห่างระหว่างโรงเรือนมีตั้งแต่ 0.3-3 เมตร ซึ่งการเว้นระยะห่างระหว่างโรงเรือน 1 เมตร เป็นระยะที่นิยมที่สุด [1] จะมีข้อดีคือ สามารถสร้างโรงเรือนปลูกเบญจมาศได้จำนวนมาก แต่จะมีข้อเสียคือ ทำให้การระบายอากาศภายในโรงเรือนไม่ดี อุณหภูมิภายในโรงเรือนสูงกว่าอุณหภูมิภายนอกมาก ซึ่งส่งผลทำให้มีผลผลิตต่ำและไม่ได้คุณภาพ ถ้าเกษตรกรเว้นระยะห่างระหว่างโรงเรือนมากขึ้นจะทำให้การ

ระบายอากาศดีขึ้นอุณหภูมิภายในโรงเรือนเท่ากับภายนอก ซึ่งปัจจุบันยังไม่มีข้อมูลทางวิชาการหรือคำแนะนำที่เหมาะสมเกี่ยวกับระยะห่างระหว่างโรงเรือนดังกล่าว วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงการคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) นั้นเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถช่วยวิเคราะห์การไหลของอากาศและอุณหภูมิภายในโรงเรือน [2] ซึ่งการระบายอากาศตามธรรมชาติจากด้านข้างที่เป็นช่องเปิด (H) เป็นสัดส่วนกับระยะห่างระหว่างโรงเรือน (X) การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาระยะห่างระหว่างโรงเรือนที่เหมาะสมที่สามารถระบายอากาศได้ดีและไม่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิต่อกัน ซึ่งการหาระยะห่างที่เหมาะสมดังกล่าวเป็นการช่วยให้เกษตรกรใช้พื้นที่ได้อย่างคุ้มค่าและประโยชน์สูงสุด

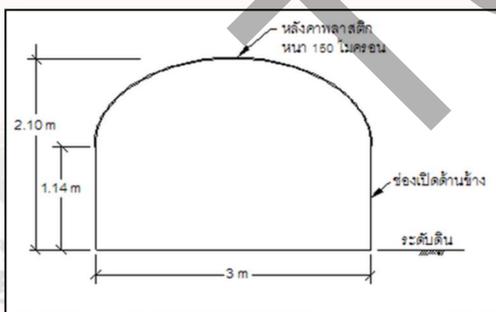


รูปที่ 1 โรงเรือนอุโมงค์ที่ปลูกเบญจมาศ

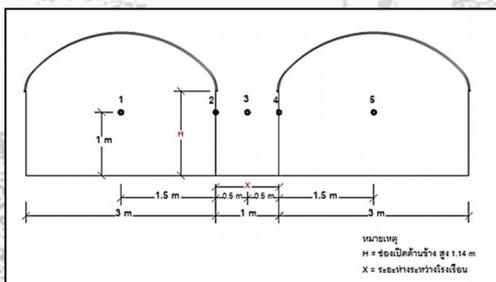
2. วิธีการและอุปกรณ์

2.1 โรงเรือนและอุปกรณ์การวัด

เลือกโรงเรือนอุโมงค์ที่มีแบบมาตรฐานและนิยมใช้ใน การปลูกเบญจมาศ[1] ขนาด กว้าง 3 เมตร สูง 2.1 เมตร ยาว 6 เมตร ด้านข้างมีช่องเปิดสูง (H) 1.14 เมตร (รูปที่ 2) จำนวน 2 หลัง มีระยะห่างระหว่างโรงเรือน 1 เมตร ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร มี Latitude 13.67 Longitude 100.62°[3] เพื่อใช้ทดสอบและเก็บข้อมูลอุณหภูมิภายในโรงเรือน โดยใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิอัตโนมัติ (Sila Rese-arch รุ่น AP-1700) ติดตั้งสูงจากพื้น 1 เมตร จำนวน 5 จุด (รูปที่ 3) เครื่องวัดความเร็วลมแบบพกพา (Digicon รุ่น DA-43) เพื่อวัดสภาพอากาศในโรงเรือน โดยวัดตั้งแต่เดือนมีนาคม ถึง เมษายน



รูปที่ 2 แบบโรงเรือนอุโมงค์



รูปที่ 3 ตำแหน่งที่ติดตั้งหัววัดอุณหภูมิ 5 จุด

2.2. พลศาสตร์ของไหล (CFD)

วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics) โปรแกรม Fluent ถูกนำมาใช้เพื่อทำนายพฤติกรรมการไหลของอากาศ ซึ่งเป็นการคำนวณการไหลของอากาศจากสมการ Reynolds-Averaged, Navier-Stokes[4]

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

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) - \rho u' u' \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) - \rho u' v' \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right) - \rho u' w' \right] \quad \dots(2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) - \rho v' u' \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) - \rho v' v' \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right) - \rho v' w' \right] \quad \dots(3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) - \rho w' u' \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) - \rho w' v' \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) - \rho w' w' \right] \quad \dots(4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{v^2}{2} \right) \right] + \nabla \cdot \left[\rho \left(e + \frac{v^2}{2} \right) \vec{v} \right] = \rho \bar{Q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial (u p)}{\partial x} - \frac{\partial (v p)}{\partial y} + \frac{\partial (\bar{u} \sigma_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{u} \tau_{xx})}{\partial y} + \frac{\partial (\bar{v} \tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{v} \sigma_y)}{\partial y} + \bar{p} \vec{f} \quad \dots(5)$$

โดยที่ u, v, w เป็นความเร็วเฉลี่ยอยู่ในรูป x, y, และ z ทิศทางตามลำดับ ในขณะที่ u', v', w' เป็นความเร็ว และ ในสมการ ρ=ความหนาแน่นของไหล P=แรงดันของไหล e = ผลรวมของพลังงานทั้งหมด σ และ T = ค่าแรงเฉือน สมการที่ 1 เป็นสมการเกี่ยวกับมวล สมการที่ 2-4 เป็นสมการเกี่ยวกับโมเมนตัมในแกน x, y และ z สมการที่ 5 เป็นสมการเกี่ยวกับพลังงาน สมการเหล่านี้หาค่าโดยวิธี finite volume เพื่อหาการระบายอากาศ[5][6] แบบจำลองการไหลปั่นป่วน K-ε ชนิด Standard, Renormalization group (RNG) และ Realizable และความร้อนที่โรงเรือนได้รับคิดแบบการแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์[7]

การหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ[8] จากการจำลองการไหลปั่นป่วนทั้ง 3 แบบ เทียบกับผลที่วัดได้จากโรงเรือนอุโมงค์จริง หาได้จากสมการที่ 6

$$Error = \frac{(Exdata - CFDdata)}{Exdata} * 100\% \dots(6)$$

เมื่อ Error = ค่าความคลาดเคลื่อน (%)

Exdata = ข้อมูลจากการทดลอง

CFDdata = ข้อมูลจาก CFD

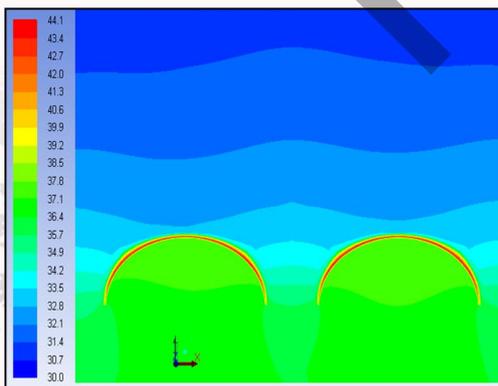
3. การวิเคราะห์ผล

ขั้นตอนการคำนวณวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics) โปรแกรม Fluent สำหรับจำลองสภาพอากาศในโรงเรือน ในการวิเคราะห์และประมวลผล รวมทั้งแสดงผล โดยขั้นตอนการวิเคราะห์นั้นจะกำหนดเงื่อนไข ขอบเขตและค่าตัวแปรต่างๆ ให้กับกริดของอากาศในโรงเรือน โดยกำหนดให้คุณสมบัติของอากาศเป็นก๊าซอุดมคติ (Ideal Gas) แบบจำลองความปั่นป่วน k- ϵ [9] ชนิด Standard และคุณสมบัติอื่นๆ เช่น ความหนาแน่นของอากาศ ความร้อนจำเพาะ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ค่าความหนืด แสดงในตารางที่ 1

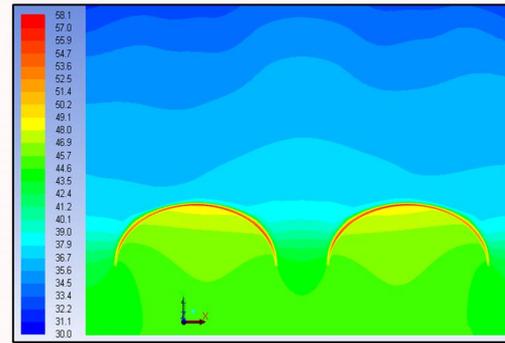
ตารางที่ 1 คุณสมบัติของอากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์[9]

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}
Molecular Weight (kg/kg mol)	28.966

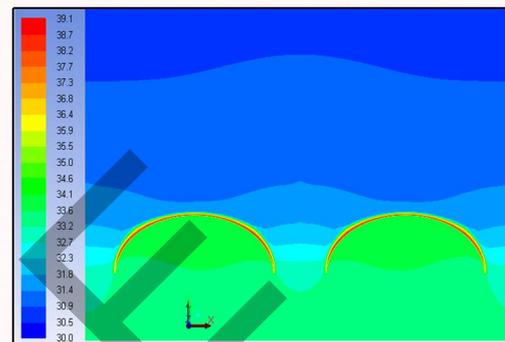
จำลองสภาพอากาศการระบายความร้อนตามธรรมชาติของโรงเรือนอุโมงค์ที่มีระยะห่างระหว่างโรงเรือน 1 เมตร แบบจำลองการไหลปั่นป่วน K- ϵ ชนิด Standard, Renormalization group (RNG) และ Realizable ดังแสดงในรูปที่ 4



(ก) Standard



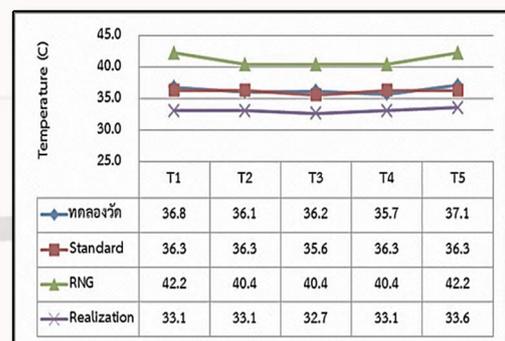
(ข) Renormalization group (RNG)



(ค) Realizable

รูปที่ 4 แบบจำลองการไหลปั่นป่วน K- ϵ ชนิดต่างๆ

วัดอุณหภูมิในโรงเรือนอุโมงค์และระหว่างโรงเรือน เวลา 12.00 น. ของวันที่ 26 มีนาคม 2557 ที่ความสูง 1 เมตร จากพื้น จำนวน 5 จุด วัดความเร็วลมมีค่าเป็น 0 เมตร/วินาที และผลที่ได้แสดงในรูปที่ 5 เปรียบเทียบความแตกต่างของแบบจำลองการไหลปั่นป่วน K- ϵ แบบ Standard, Renormalization group (RNG) และ Realizable



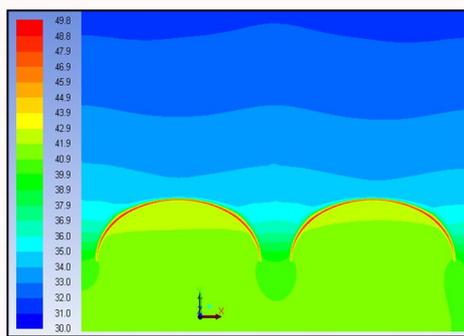
รูปที่ 5 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งและอุณหภูมิในโรงเรือนอุโมงค์เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของแบบจำลองการไหลปั่นป่วน K- ϵ แบบ Standard, Renormalization group (RNG) และ Realizable

จากตารางที่ 2 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของแบบจำลองความปั่นป่วน K- ϵ แบบ Standard มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าแบบอื่น จึงเลือกแบบจำลองความปั่นป่วน K- ϵ แบบ Standard จำลองสภาพ

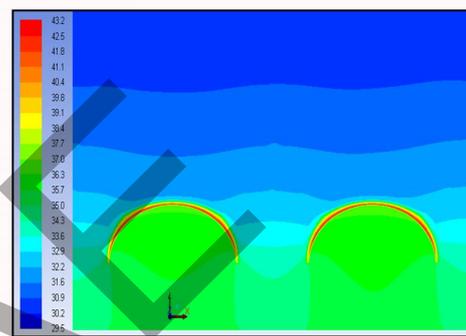
อากาศในโรงเรือนอุโมงค์ทั้งสองหลังเพื่อหาระยะห่างระหว่าง
 เรือน จำนวน 5 ระยะ ดังนี้ 0.5H, 1.0H, 1.5H, 2.0H และ
 3.0H (รูปที่ 6) และได้อุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ ตามรูปที่ 7

ตารางที่ 2 เปรียบเห็นถึงความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ

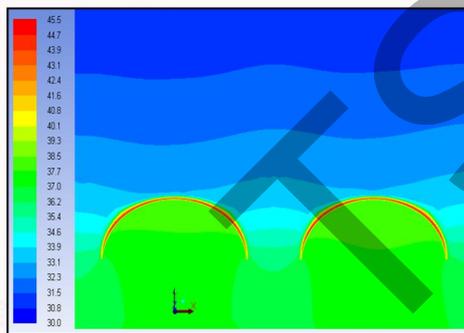
Model	Error (%)									
	T1		T2		T3		T4		T5	
ทดลองวัด		(36.8 °C)		(36.1 °C)		(36.2 °C)		(36.7 °C)		(37.1 °C)
Standard	1.36	(36.3 °C)	0.55	(36.3 °C)	1.66	(35.6 °C)	1.09	(36.3 °C)	2.16	(36.3 °C)
RNG	14.67	(42.2 °C)	11.91	(40.4 °C)	11.60	(40.4 °C)	10.08	(40.4 °C)	13.75	(42.2 °C)
Realization	10.05	(33.1 °C)	8.31	(33.1 °C)	9.67	(32.7 °C)	9.81	(33.1 °C)	9.43	(33.1 °C)



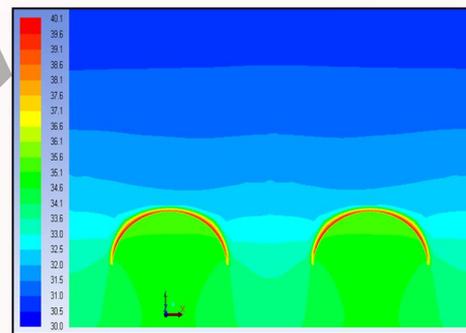
(ก) 0.5H



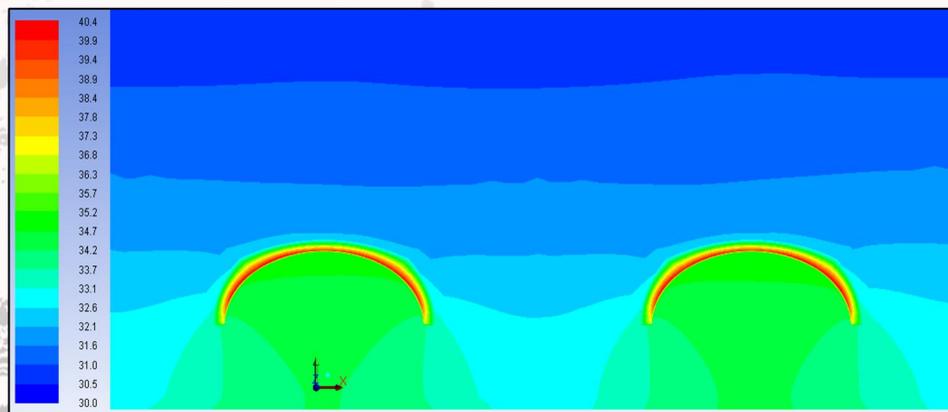
(ค) 1.5H



(ข) 1.0H

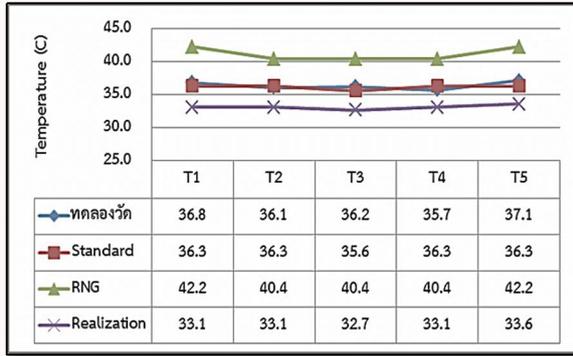


(ง) 2.0H



(จ) 3.0H

รูปที่ 6 แบบจำลองสภาพอุณหภูมิภายในและระหว่างโรงเรือน



รูปที่ 7 แผนภาพอุณหภูมิในโรงเรือนอุโมงค์เพื่อเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างโรงเรือน

จากรูปที่ 7 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 เพราะเป็นระยะห่างระหว่างโรงเรือนที่น้อยที่สุดและมีอุณหภูมิภายในและระหว่างโรงเรือนใกล้เคียงกับระยะ 2.0H, 3.0H

4. สรุปผล

จากการศึกษาการระบายอากาศตามธรรมชาติของโรงเรือนอุโมงค์ โดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics) โปรแกรม FLUENT เลือกเงื่อนไขความร้อนที่โรงเรือนได้รับแบบการแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ และแบบจำลองการไหลปั่นป่วน K-ε ชนิด Standard, renormalization group (RNG) และ Realizable จากนั้นเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการจำลองทั้งหมดกับอุณหภูมิที่ทดลองวัดจริง พบว่าแบบจำลองแบบจำลองการไหลปั่นป่วน K-ε ชนิด Standard ให้ผลการคำนวณใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองการไหลปั่นป่วน K-ε ชนิดต่างๆ

ใช้ค่าเงื่อนไขต่างๆ จากการจำลองข้างต้นมาทำการจำลองหาระยะห่างระหว่างโรงเรือนที่ระยะ 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 เพราะเป็นระยะห่าง

ระหว่างโรงเรือนที่น้อยที่สุดที่สามารถระบายอากาศได้ดีและไม่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิต่อกัน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้ความรู้ ความช่วยเหลือตลอดจนให้คำชี้แนะช่วยแก้ไขปัญหาต่างๆ และสำนักบริการคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สนับสนุนโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณและขอขอบคุณสถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร ที่ให้ความอนุเคราะห์และสนับสนุนโรงเรือนแบบอุโมงค์ที่ใช้ทดสอบ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] วันชัย คุณวานิชพงษ์ วิโรจน์ โทโรศาสตร์ นาวิ จิระชีวี สราวุฒิ ปานทน ฉัตรนภา ช่มอาวุธ. (2554). วิจัยและพัฒนาโรงเรือนสำหรับปลูกเบญจมาศ, การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, โรงแรมชลจันทร์ พัทยา รีสอร์ท จังหวัดชลบุรี
- [2] OuldK haous S.A., Boumet 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] 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.
- [4] Limtrakarn W., Boonmongkol P., Chompupoung A., Rungprateepthaworn K., Kruenate 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.
- [5] 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.
- [6] Launder B.E., & Spalding D.B. (1974). The numerical computation of turbulent flows, Comp. Methods Appl. Mech. Eng., Vol. 3, 1974, pp. 269-289.
- [7] 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.

- [8] มานะ วิชางาม ธนรัฐ ศรีวีระกุล. (2555). การจำลองการไหลของอากาศผ่านรูรั้งผึ้งเตาหุงต้มประสิทธิภาพสูงโดยใช้โปรแกรม CFD, วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 เมษายน 2555. หน้า 24-34.
- [9] Fluent 14.0 User's Guide, FLUENT INC, Labanon, NH, U.S.A.

TSAE