

การประยุกต์ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุม สภาพแวดล้อมในโรงเรือนเลี้ยงหนอนไหมอัจฉริยะ

Optimization of Environmental Control in Smart Silkworm Houses using Computational Fluid Dynamics (CFD) and Multi-Physics Simulation.

วิชา รังคนานนท์

สาขาวิชาวิศวกรรมการก่อสร้าง ขนส่งและโลจิสติกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

340 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000

Whichaya Ringkananont

Engineering Program in Construction Transport and Logistics Engineering, Faculty of Industrial
Technology, Nakhon Ratchasima Rajabhat University,

340 Suranarai Road, Nai Mueang Subdistrict, Mueang Nakhon Ratchasima District, Nakhon
Ratchasima Province 30000.

Corresponding author Email: whichaya.r@nrru.ac.th

(Received: January 21, 2026; Revised: March 21, 2026 ; Accepted: August 17, 2026)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนเลี้ยงหนอนไหมโดยใช้การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) เพื่อปรับปรุงการควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น และการระบายอากาศให้เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศเขตร้อน แบบจำลองสามมิติของโรงเรือนขนาด $4 \times 6 \times 3$ เมตร ถูกสร้างขึ้นและวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์ OpenFOAM โดยพิจารณาการไหลของอากาศ การถ่ายเทความร้อน และการกระจายความชื้นภายใต้สภาวะภูมิอากาศตัวแทนของประเทศไทย ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าแนวทางการออกแบบที่เสนอช่วยลดความแปรปรวนของอุณหภูมิภายใน ลดบริเวณอับอากาศ และปรับปรุงความสม่ำเสมอของความชื้นเมื่อเทียบกับโรงเรือนแบบดั้งเดิม โดยลดอุณหภูมิสะสม 8.2% มีค่าความสม่ำเสมอของการกระจายความชื้น 9.1% และมีค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างผลจำลองกับการวัดจริง ประเมินจากความแตกต่างความหนาแน่นอากาศเฉลี่ย 0.9% นอกจากนี้ การจัดวางตำแหน่งช่องเปิดและอัตราการระบายอากาศที่เหมาะสมยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการไหลเวียนอากาศโดยไม่ก่อให้เกิดกระแสลมแรงเฉพาะจุด ผลลัพธ์จากการศึกษานี้แสดงศักยภาพของการประยุกต์ใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ในการออกแบบอาคารเกษตรกรรมที่สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ และรองรับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในเขตร้อน

คำสำคัญ: พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ การจำลองสถานการณ์แบบมัลติฟิสิกส์ การควบคุมสภาพอากาศ โรงเรือนเลี้ยงหนอนไหม

ABSTRACT

This research presents the design of the internal environment of a silkworm-rearing greenhouse using computational fluid dynamics (CFD) to optimize temperature, humidity, and ventilation control for tropical climates. A three-dimensional model of a $4 \times 6 \times 3$ meter greenhouse was created and

analyzed with OpenFOAM, considering air flow, heat transfer, and moisture distribution under climate conditions representative of Thailand. Simulation results show that the proposed design approach reduces internal temperature variability, minimizes stagnant-air zones, and improves humidity uniformity compared with a conventional greenhouse—reducing cumulative temperature by 8.2%, achieving a 9.1% improvement in moisture distribution uniformity, and yielding a mean air-density difference of 0.9% between simulation and measurements. In addition, appropriate placement of openings and ventilation rates enhanced airflow performance without creating localized strong drafts. Results from this study demonstrate the potential of applying CFD modeling to the design of agricultural buildings that can effectively control the environment and accommodate climate change in tropical regions.

Keyword: Computational fluid dynamics, multi-physics simulation, climate control, Silkworm farm.

1. บทนำ

การเลี้ยงหนอนไหมเป็นอุตสาหกรรมเกษตรสำคัญของประเทศไทย ที่มีบทบาทในการสร้างรายได้และพัฒนาเศรษฐกิจชุมชนมายาวนาน [1] แต่ปัจจุบันเผชิญความท้าทายหลายด้าน โดยเฉพาะการออกแบบโรงเรือนที่เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อม ซึ่งมีผลโดยตรงต่อคุณภาพผลผลิตและความยั่งยืน [2] สภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลง เช่น อุณหภูมิสูงขึ้น ความชื้นแปรปรวน และปริมาณฝนไม่แน่นอน ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของหนอนไหม [3] – [6] ขณะที่โรงเรือนแบบดั้งเดิมที่พึ่งพาการระบายอากาศธรรมชาติอาจไม่เพียงพอ [7] ส่งผลให้เกิดความเสี่ยงในการผลิตและต้นทุนเพิ่มขึ้น เนื่องจากโรงเรือนเลี้ยงหนอนไหมแบบดั้งเดิมที่พึ่งพาการระบายอากาศตามธรรมชาติ วัสดุก่อสร้างที่มีสมบัติเชิงความร้อนจำกัด และการจัดการเชิงประจักษ์การ แสดงข้อจำกัดเชิงระบบ ได้แก่ ความแปรปรวนสูงของอุณหภูมิและความชื้น ภาวะจุดอับอากาศ (dead zones) และความสามารถในการปรับตัวต่อความผันผวนของสภาพภูมิอากาศที่จำกัด ซึ่งส่งผลให้มีความเสี่ยงต่อการระบาดของโรค ผลผลิต และคุณภาพเส้นไหมมีความผันผวนสูง อีกทั้งการขาดข้อมูลเซ็นเซอร์และมาตรการควบคุมแบบอัตโนมัติจำกัดความเป็นไปได้ในการวิเคราะห์และปรับปรุงเชิงวิศวกรรม ข้อจำกัดดังกล่าวส่งเสริมความจำเป็นในการ

พัฒนาโรงเรือนที่บูรณาการการระบายอากาศตามธรรมชาติกับระบบควบคุมเชิงกลไก วัสดุที่มีสมบัติป้องกันความร้อนที่เหมาะสม และแพลตฟอร์มการวัด-วิเคราะห์ข้อมูล (เช่น เซ็นเซอร์, CFD, AI/ML, Digital Twin) เพื่อเพิ่มความเสถียรทางสิ่งแวดล้อม ลดความเสี่ยงต่อโรค และรองรับการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตในบริบทภูมิอากาศของประเทศไทย

อีกปัญหาคือการขาดแคลนแรงงานในชนบทเนื่องจากแรงงานรุ่นใหม่ย้ายเข้าสู่เมือง ทำให้การถ่ายทอดองค์ความรู้การเลี้ยงไหมลดลง [8] แนวทางแก้ไขคือพัฒนาโรงเรือนทันสมัยพร้อมระบบจัดการมีประสิทธิภาพ [9] การนำเทคโนโลยีวิศวกรรมสมัยใหม่ โดยเฉพาะการจำลองสถานการณ์ทางคอมพิวเตอร์ มาช่วยออกแบบโรงเรือน จะทำให้สามารถประเมินการระบายอากาศ ควบคุมอุณหภูมิ และจัดการความชื้นได้แม่นยำก่อนก่อสร้างจริง ลดความเสี่ยงและต้นทุน [10] โรงเรือนอัจฉริยะควรคำนึงถึงความยั่งยืนและการประหยัดพลังงาน [11] โดยใช้การผสมผสานการระบายอากาศธรรมชาติกับระบบควบคุมอัตโนมัติ [12] พร้อมเลือกวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและกันความร้อนได้ดี ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมสภาพภายใน นอกจากนี้ การพัฒนาโรงเรือนที่มีประสิทธิภาพยังช่วยเพิ่มศักยภาพการแข่งขันในตลาดโลก [13] เพราะสามารถควบคุมคุณภาพ

ผลผลิตให้ได้มาตรฐานและสม่ำเสมอ สร้างความเชื่อมั่นแก่ผู้บริโภคและคู่ค้าต่างประเทศ

การวิจัยนี้มุ่งพัฒนาแนวคิดการออกแบบโรงเรือนเลี้ยงหนอนไหมที่ตอบสนองต่อความท้าทายดังกล่าว ด้วยการประยุกต์ใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์ขั้นสูงและเทคนิควิศวกรรม รวมถึงการจำลองแบบหลายปรากฏการณ์ (Multi-physics modeling) การวิเคราะห์ความไม่แน่นอน (Uncertainty Quantification) และเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพ (Optimization Algorithms) เพื่อสร้างแบบจำลองที่น่าเชื่อถือและเหมาะสมกับบริบทประเทศไทย โดยจะวิเคราะห์ปัจจัยสำคัญ ได้แก่ การระบายอากาศ ความชื้น และอุณหภูมิ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งในการยกระดับอุตสาหกรรมไหมไทยให้มีความทันสมัย แข่งขันได้ และยั่งยืนในอนาคต

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

1) เพื่อพัฒนาแบบจำลองโรงเรือนเลี้ยงหนอนไหมที่เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศในประเทศไทย โดยบูรณาการเทคนิคการจำลองขั้นสูงเพื่อความแม่นยำและความน่าเชื่อถือ

2) เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของโรงเรือน เช่น การระบายอากาศ ความชื้น และอุณหภูมิภายใต้สภาวะแวดล้อมและปัจจัยภายในที่ซับซ้อน

3. วิธีดำเนินการศึกษา

โรงเรือนเลี้ยงหนอนไหมแห่งอนาคตในประเทศไทยเป็นการวิจัยเชิงพัฒนา (Developmental Research) ที่ใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์และการวิเคราะห์เชิงตัวเลข โดยมีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังนี้

3.1 การรวบรวมข้อมูล

รวบรวมข้อมูลสภาพภูมิอากาศจากกรมอุตุนิยมวิทยาทำการรวบรวมข้อมูลสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยย้อนหลัง 5 ปี ในช่วงปี 2020 - 2025 จากกรมอุตุนิยมวิทยา โดยแยกตามภูมิภาคดังแสดงในตารางที่ 1 จากนั้นหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย สำหรับกำหนดพารามิเตอร์สำหรับการจำลอง เช่น อัตราการระบาย

อากาศ ตำแหน่งแหล่งจ่ายลม เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการจำลองการไหลของอากาศและการกระจายความชื้นในซอฟต์แวร์ OpenFOAM โดยคำนึงถึงทิศทางลม ซึ่งจะมีการสลับทิศทางตามฤดูกาลดังแสดงข้อมูลในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ข้อมูลสภาพภูมิอากาศเฉลี่ยของประเทศไทยย้อนหลัง 5 ปี ในช่วงปี 2563-2567

	อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ความเร็วลม (km./hr.)
ภาคกลาง	28-36	70-80	5-15
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	25-35	65-75	5-12
ภาคเหนือ	20-30	70-85	5-10
ภาคใต้	26-32	75-85	5-20
ภาคตะวันตก	26-34	70-80	5-15
ภาคตะวันออก	26-34	70-80	5-15
ค่าเฉลี่ยทั้งหมด	25-34	70-81	5-15

ที่มา: กรมอุตุนิยมวิทยาแห่งประเทศไทย. (2566). [14]

ตารางที่ 2 ข้อมูลทิศทางลมหลักตามฤดูกาลของประเทศไทย

ฤดูกาล	ช่วงเวลาโดยประมาณ	ลมประจำฤดู	ทิศทางลมหลัก	ลักษณะอากาศเด่น
ร้อน	ก.พ. - พ.ค.	ตะวันออกเฉียงใต้	SE → NW	ร้อนและแห้ง
ฝน	พ.ค. - ต.ค.	ตะวันตกเฉียงเหนือ	SW → NE	ฝนตกชุก ความชื้นสูง
หนาว	ต.ค. - ก.พ.	ตะวันออกเฉียงเหนือ	NE → SW	เย็นและแห้ง (เหนือ/อีสาน), ฝนมากฝั่งอ่าวไทย

ที่มา: กรมอุตุนิยมวิทยาแห่งประเทศไทย. (2566). [14]

3.2 ศึกษาข้อกำหนดและมาตรฐานในการเลี้ยง หนอนไหม

มาตรฐานการเลี้ยงหนอนไหม (มกษ. 8201-2555)
[15] กำหนดขั้นตอนตั้งแต่การเลี้ยงถึงการขนส่งเพื่อให้ได้
รังไหมคุณภาพ ควบคุมมาตรฐาน แนวปฏิบัติ GAP เน้น
สถานที่ปลอดมลพิษ สะอาด ระบายอากาศดี ป้องกันศัตรู
ปัจจัยการผลิตต้องได้คุณภาพ เช่น ไข่ไหมตรวจโรค อัตรา
ฟัก $\geq 90\%$ ไบหม่อนสดสะอาด วัสดุรองพื้นปลอดเชื้อ
เทคนิคเลี้ยงวัยอ่อนเน้นความสะอาด จัดไบหม่อนตามวัย

ไม่อัดแน่น FAO แนะนำควบคุม CO₂ <1% ทำความ
สะอาดเข่งงวด และใช้เทคโนโลยีควบคุมอาหาร-คุณภาพ
ไบหม่อนเพื่อเพิ่มผลผลิต

3.3 รวบรวมข้อมูลปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโต ของหนอนไหม

ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของหนอนไหมสามารถ
แบ่งได้เป็น ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม ปัจจัยด้านการเลี้ยงดู
และ ปัจจัยด้านพันธุกรรม ดังแสดงในตารางที่ 3

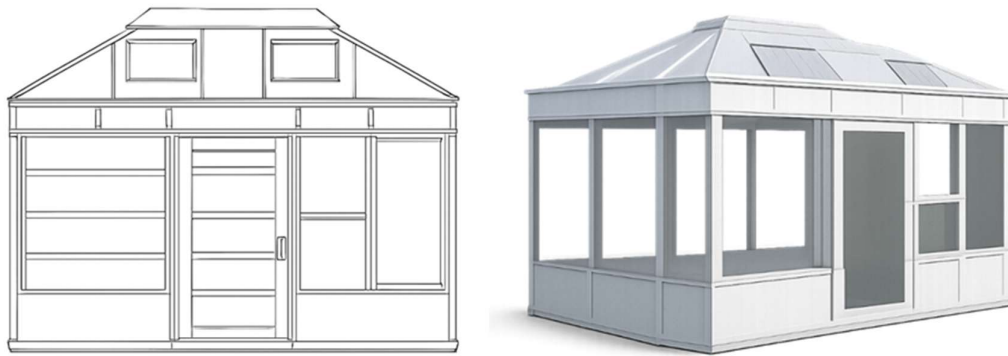
ตารางที่ 3 สรุปปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของหนอนไหมในแต่ละช่วงวัย

ปัจจัย	วัย 1-3 (หนอนเล็ก)	วัย 4-5 (หนอนใหญ่)	หมายเหตุ
อุณหภูมิ (°C)	26-28	25-27	อุณหภูมิสูงเกิน 32°C อาจทำให้ หนอนอ่อนแอ
ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	80-85	65-75	ความชื้นสูงช่วยให้ลอกคราบง่าย แต่ ถ้าสูงเกินไปในวัยโตจะเสี่ยงโรค
ไบหม่อน	ไบอ่อน นุ่ม สะอาด	ไบกลางแก่ สะอาด	ไบต้องปลอดสารเคมีและฝุ่นดิน
ความถี่ให้อาหาร (ครั้ง/วัน)	4-5	3-4	ให้น้อยแต่บ่อยในวัยเล็ก ให้อิ่มและ พอเพียงในวัยโต
การถ่ายเทอากาศ	อากาศหมุนเวียนดี ไม่มี กลิ่นอับ	อากาศหมุนเวียนมากขึ้น	หลีกเลี่ยงลมแรงปะทะโดยตรง
แสงสว่าง	แสงอ่อนสม่ำเสมอ	แสงธรรมชาติพอประมาณ	หลีกเลี่ยงแสงจ้าเกินไป
ความหนาแน่นใน การเลี้ยง	หนาแน่นปานกลาง (2,000-3,000 ตัว/ตร.ม.)	กระจายห่าง (800-1,200 ตัว/ตร.ม.)	ลดความแออัดเพื่อลดความเสี่ยงโรค
การทำความสะอาด	เก็บมูลและเศษไบทุกวัน	เก็บมูลและเศษไบทุกวัน	อาจโรยปูนขาวบาง ๆ บนพื้น
การป้องกันโรค	คัดหนอนป่วยออกทันที	คัดหนอนป่วยออกทันที	รักษาความสะอาดอุปกรณ์และโรง เลี้ยง

3.4 การออกแบบโรงเรือนด้วยซอฟต์แวร์จำลอง สถานการณ์และการประยุกต์ใช้ CFD และเทคนิคการ จำลองขั้นสูง

การสร้างแบบจำลองโรงเรือนและผนวกการจำลอง
แบบหลายปรากฏการณ์ สำหรับในการสร้างแบบจำลอง
โรงเรือนเลี้ยงหนอนไหม ได้ใช้ซอฟต์แวร์ AutoCAD สร้าง

แบบจำลอง 3 มิติของโรงเรือนขนาดกว้าง 4 เมตร ยาว 6
เมตร สูง 3 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยแบบจำลองนี้เป็น
พื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์ด้วย OpenFOAM ซึ่งจะมีการ
ผนวกการจำลองแบบหลายปรากฏการณ์ (Multi-physics
Modeling) ได้แก่ การระบายอากาศ ความชื้น และอุณหภูมิ



รูปที่ 1 แบบโรงเรียนเลี้ยงหนอนไหม

การจำลองด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคอมพิวเตอร์ (Computational Fluid Dynamics — CFD) เป็นเครื่องมือสำคัญในการวิเคราะห์การไหลของอากาศ การกระจายความร้อน และการแพร่กระจายความชื้นภายในโรงเรียน เนื่องจากสามารถแสดงสนามความเร็ว อุณหภูมิ และความชื้นเชิงพื้นที่-เวลา ช่วยระบุจุดร้อน จุดเย็น และจุดอับอากาศ (dead zones) ก่อนการก่อสร้างจริง ลดต้นทุนและความเสี่ยงจากการทดลองเชิงกายภาพ และสนับสนุนการตัดสินใจด้านการจัดวาง inlet/outlet พัดลม และชั้นวางได้อย่างมีประสิทธิภาพ ภายในกรอบงานนี้ OpenFOAM เป็นเครื่องมือ CFD แบบโอเพนซอร์สที่เหมาะสม เพราะรองรับการจำลองแบบหลายฟิสิกส์ (multi-physics) การปรับแต่งสมการและ boundary conditions การรันแบบขนาน (parallel) และการเชื่อมต่อกับเครื่องมือ optimization หรือ AI/ML ทำให้สามารถดำเนิน sensitivity study, uncertainty quantification (UQ) และการผนวกกับอัลกอริทึมหา optimum ได้ ซึ่งสอดคล้องกับเป้าหมายของงานวิจัยนี้ที่ต้องการออกแบบโรงเรียนเลี้ยงหนอนไหมให้มีความทนทานและประหยัดพลังงาน อย่างไรก็ตาม ความถูกต้องของผลจำลองขึ้นกับการเลือก turbulence model ขนาดเมช และการตั้ง boundary conditions จึงควรดำเนิน mesh-independence test, sensitivity study และการเปรียบเทียบ (calibration/validation) กับข้อมูลทดลองหรือข้อมูลภาคสนาม [10], [16], [17], [18], [19], [20]

3.5 กำหนดพารามิเตอร์สำหรับการจำลองและเทคนิคขั้นสูง

การกำหนดพารามิเตอร์สำหรับการจำลอง เช่น อัตราการระบายอากาศ ตำแหน่งแหล่งจ่ายลม และการประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ขั้นสูง สามารถสรุปภาพรวมขั้นตอนหลักได้ดังนี้

- 1) ระบุเป้าหมายทางสภาพแวดล้อมทั้ง อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลมที่ยอมรับได้ ซึ่งสำหรับหนอนไหมนั้นควรหลีกเลี่ยงลมแรงจ่อในช่วงเช็ดตัวของหนอน
- 2) กำหนดขนาดและโครงสร้างอุปกรณ์ในโรงเรียน ทั้ง ขนาด (กว้าง x ยาว x สูง) ตำแหน่งชั้นวางหรือราง และแหล่งความร้อนหรือแสง
- 3) เลือกตัวชี้วัดการระบาย ACH หรือ Q และคำนวณอัตราการไหลที่ต้องการ
- 4) กำหนดตำแหน่ง inlet/outlet โดยคำนึงถึงการกระจายอากาศและการหลีกเลี่ยงกระแสตรงไปยังหนอน
- 5) ตั้งเงื่อนไขขอบเขตสำหรับโมเดล กำหนดความเร็วลมที่เข้าสู่พื้นที่จำลอง (velocity inlet) อัตราไหลของมวลสารเข้า (mass flow inlet) ความกดดันขาออก (pressure outlet) ผนังที่ไม่มีการส่งผ่านของมวลหรือแรง (wall) สมมติฐานสมมาตร (symmetry) ข้อมูลค่าความไม่แน่นอนของอากาศ (turbulence) ค่าความร้อนเริ่มต้นและขอบเขต (temperature) ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (humidity) รวมถึงค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบภายนอก และการปล่อยความร้อนและความชื้นจากหนอนไหม

6) ทำ mesh และ รัน sensitivity study เช่น เปลี่ยนตำแหน่ง อัตรา โมเดล turbulence เพื่อดูผลที่เปลี่ยนแปลงไป

7) ตรวจสอบผลการวิเคราะห์ ซึ่งมีวิธีคำนวณอัตราการไหลพื้นฐานดังสมการที่ 1

$$Q = ACH \times Volume \div 3600 \quad (1)$$

เมื่อ Q = ปริมาณอากาศ (m^3/s หรือ L/s)
 ACH = Air Changes per Hour
 $Volume$ = ปริมาตร (m^3)

3.6 การประยุกต์ใช้เทคนิคการจำลองและวิเคราะห์ขั้นสูง

1) การใช้เทคนิค Optimization Algorithms และ AI/Machine Learning: นอกจากการจำลอง CFD พื้นฐานแล้ว งานวิจัยนี้ยังมีการประยุกต์ใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Algorithms) เช่น Genetic Algorithms หรือ Particle Swarm Optimization ร่วมกับ OpenFOAM เพื่อระบุชุดพารามิเตอร์การออกแบบที่เหมาะสมที่สุด เช่น ขนาดและตำแหน่งของช่องระบายอากาศ, ตำแหน่งพัดลม, หรือความหนาของฉนวน เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ เช่น การรักษาสภาพอุณหภูมิและความชื้นให้คงที่ที่สุด หรือการลดการใช้พลังงานให้ต่ำสุด

2) การวิเคราะห์ความไม่แน่นอน (Uncertainty Quantification - UQ): เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของการออกแบบ ได้มีการนำวิธีการวิเคราะห์ความไม่แน่นอน (Uncertainty Quantification - UQ) มาใช้ โดยพิจารณาความแปรปรวนของข้อมูลอินพุต เช่น อุณหภูมิภายนอก ความเร็วลม เพื่อประเมินว่าการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของโรงเรือนอย่างไร และเพื่อทำความเข้าใจถึงความทนทาน (Robustness) ของการออกแบบต่อความไม่แน่นอนของสภาพแวดล้อม รวมถึงการวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) เพื่อระบุว่าพารามิเตอร์การออกแบบหรือปัจจัยสภาพแวดล้อมภายนอก

ใดที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อสภาวะภายในโรงเรือน เพื่อใช้ในการจัดลำดับความสำคัญของการออกแบบและปรับปรุง

3) การพัฒนา Digital Twin เสมือน (Virtual Digital Twin): ในระยะยาว แนวคิดนี้สามารถนำไปสู่การสร้าง 'Digital Twin' เสมือนของโรงเรือน ซึ่งเป็นแบบจำลองคอมพิวเตอร์ที่สามารถเชื่อมโยงกับข้อมูลสภาพอากาศจริงหรือข้อมูลพยากรณ์ เพื่อจำลองและทำนายประสิทธิภาพของโรงเรือนภายใต้สถานการณ์จริงต่างๆ ได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้สามารถทดสอบกลยุทธ์การควบคุมหรือการปรับเปลี่ยนการออกแบบได้โดยไม่ต้องสร้างโรงเรือนจริง

3.7 การคำนวณจากขนาดโรงเรือน

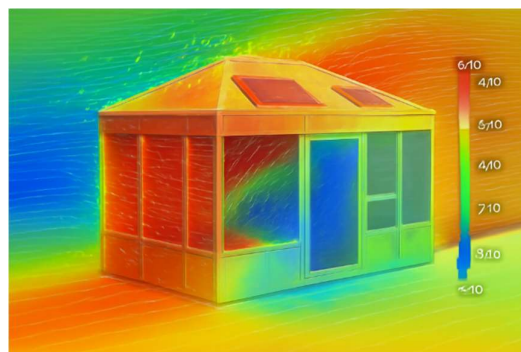
เมื่อโรงเรือนมีขนาดเท่ากับ $4\text{ m} \times 6\text{ m} \times 3\text{ m}$ หรือปริมาตร ($Volume$) เท่ากับ $4 \times 6 \times 3 = 72\text{ m}^3$ และ $ACH = 6$ ดังนั้น ปริมาณอากาศ (Q) = $6 \times 72 \div 3600 = 432 \div 3600 = 0.12\text{ m}^3/s$ หรือเท่ากับ $0.12 \times 1000 = 120\text{ L/s}$ จากนั้นใช้ซอฟต์แวร์ OpenFOAM เพื่อจำลองการไหลของอากาศและการกระจายความชื้น

4. ผลการศึกษา

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าโรงเรือนเลี้ยงหนอนไหมแห่งอนาคตที่ใช้เทคโนโลยีการควบคุมสภาพแวดล้อมเอื้อให้สามารถเพิ่มผลผลิตและลดต้นทุนการผลิตได้ พร้อมปรับปรุงคุณภาพของเส้นไหมให้ดียิ่งขึ้น ข้อได้เปรียบในการปรับแต่งสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมกับสภาพอากาศในแต่ละฤดูกาล ยังเปิดโอกาสให้เกษตรกรในประเทศไทยสามารถพัฒนาการให้เติบโตอย่างยั่งยืนและมีความสามารถแข่งขันในระดับสากล

จากการจำลองในซอฟต์แวร์ OpenFOAM ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่าโรงเรือนที่ปรับแต่งสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมกับสภาพอากาศในแต่ละฤดูกาล สามารถเพิ่มผลผลิตหนอนไหมได้ เมื่อเทียบกับโรงเรือนแบบดั้งเดิม ทั้งนี้ยังลดต้นทุนการดำเนินงานลง เนื่องจากลดการใช้แรงงานและค่าไฟฟ้า อีกทั้งคาดว่าคุณภาพของเส้นไหมที่ได้มีความสมบูรณ์และมีความละเอียดมากขึ้น ซึ่งสามารถตอบสนองความต้องการของตลาดทั้งในและต่างประเทศ

ผลการจำลองการไหลของอากาศและการกระจายความชื้นของโรงเรือนเลี้ยงหนอนไหมแห่งอนาคตเทียบกับโรงเรือนเลี้ยงหนอนไหมแบบเดิม ที่แสดงในตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่า ความเร็วของอากาศ โรงเรือนแบบเดิม 2.2–4.2 m/s vs โรงเรือนอัจฉริยะ 1.7–3.6 m/s แนวโน้มโรงเรือนอัจฉริยะลดค่าสูงสุดของความเร็ว ลดการเกิดกระแสลมแรง และช่วงความเร็วแคบ ทำให้สภาพไหลสม่ำเสมอขึ้น ลดจุด turbulence สูงที่อาจทำให้จุดอับอากาศบางแห่งเกิดขึ้น



รูปที่ 2 จำลองการไหลของอากาศและการกระจายความชื้นของโรงเรือนเลี้ยงหนอนไหมจาก OpenFOAM

ตารางที่ 4 ผลการจำลองการไหลของอากาศและการกระจายความชื้นของโรงเรือนเลี้ยงหนอนไหมแบบเดิมเทียบกับโรงเรือนเลี้ยงหนอนไหมแห่งอนาคต

รายการ	โรงเรือนแบบเดิม	โรงเรือนอัจฉริยะ	หมายเหตุ
ความเร็วของอากาศ (m/s)	2.2 - 4.2	1.7 - 3.6	จุดอับอากาศต่ำ, จุดที่มีการระบายอากาศดี
ความหนาแน่นของอากาศ	1.14 - 1.16	1.15 - 1.17	ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ
ระดับความชื้นสัมพัทธ์ (%)	60 - 85	60 - 80	จุดที่ความชื้นสูงเสี่ยงต่อโรคของหนอนไหม โดยความชื้นสูงช่วยให้ลอกคราบง่าย แต่ถ้าสูงเกินไปในวัยโตจะเสี่ยงโรค
ความเข้มข้นของการกระจายความชื้น (g/m ³)	11 - 22	10 - 20	ค่าที่แสดงการสะสมของความชื้น
อุณหภูมิ (°C)	28 - 33	26 - 30	จุดที่มีอากาศร้อนเกินไปอาจส่งผลต่อการเลี้ยง โดยอุณหภูมิสูงเกิน 32°C อาจทำให้หนอนอ่อนแอ
จุดความร้อน/จุดเย็น (°C)	จุดร้อน: 33, จุดเย็น: 28	จุดร้อน: 30, จุดเย็น: 26	ค่าที่อาจเกิดขึ้นจากความไม่สม่ำเสมอของอากาศ

ความหนาแน่นของอากาศ ค่าใกล้เคียงกัน 1.14–1.17 ความคลาดเคลื่อนระหว่างผลจำลองกับการวัดจริง ประเมินจากความแตกต่างความหนาแน่นอากาศเฉลี่ยเท่ากับ 0.9% ขึ้นกับอุณหภูมิ ไม่มีความแตกต่างสำคัญทางฟิสิกส์ระหว่างโรงเรือนทั้งสองแบบ

ความชื้นสัมพัทธ์ และความเข้มข้นการกระจายความชื้น RH ลดช่วงบนจาก 85% → 80% ความเข้มข้นความชื้นลดสูงสุดจาก 22 → 20 g/m³ ความสม่ำเสมอของการ

กระจายความชื้น เท่ากับ 9.1% แนวโน้มโรงเรือนอัจฉริยะควบคุมการสะสมความชื้นได้ดีขึ้น ลดความเสี่ยงต่อการเพิ่มความชื้นสูงในบางจุด

อุณหภูมิ และจุดร้อน/จุดเย็น อุณหภูมิรวมลดลงสูงสุด 33→30°C ต่ำสุด 28→26°C ลดอุณหภูมิสะสมเท่ากับ 8.2% และช่วงแคบลง ผลลัพธ์ชี้ว่าแบบใหม่ลด hot-spot และ cold-spot ลง ซึ่งเอื้อต่อความเป็นเนื้อเดียวของสภาพแวดล้อมภายใน สภาพของโรงเรือน

อัจฉริยะมีความสม่ำเสมอของอากาศและอุณหภูมิดีกว่า ลดความเครียดต่อหนอนและความเสี่ยงการเกิดโรคที่สัมพันธ์กับความชื้นสูง ลดความเร็วลมสูงสุดช่วยลดความเคลื่อนไหวที่รุนแรง แต่ต้องระวังว่าความเร็วต้องเพียงพอต่อการระบายอากาศเพื่อลด CO₂ และความชื้น อุณหภูมิสูงเกิน 32°C มีผลเสียต่อหนอน ดังนั้นการลดค่าสูงสุดไป 30°C นับเป็นข้อดีเชิงสุขภาพของหนอนใหม่ [19], [21], [22], [23], [24]

โรงเรือนอัจฉริยะเมื่อเทียบกับโรงเรือนแบบเดิม มีจุดอับอากาศต่ำทำให้สามารถระบายอากาศดีกว่า มีความหนาแน่นของอากาศสูงกว่าทำให้ภายในโรงเรือนมีอุณหภูมิต่ำกว่า มีความชื้นพอเหมาะสำหรับการลอกคราบ และลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคของหนอนใหม่ มีการกระจายความชื้นที่สม่ำเสมอกว่า มีอุณหภูมิอากาศเหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตและทำให้หนอนใหม่แข็งแรงกว่า

จากผลการจำลองการไหลของอากาศและการกระจายความชื้นของโรงเรือนเลี้ยงหนอนใหม่ด้วย OpenFOAM ทำให้ได้แบบโรงเรือนเลี้ยงหนอนใหม่แห่งอนาคตแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 โรงเรือนเลี้ยงหนอนใหม่แห่งอนาคต

โดยโครงสร้างของโรงเรือนควรสร้างจากวัสดุที่แข็งแรง ทนทานต่อสภาพอากาศ และปลอดภัยต่อการเข้าทำงานของคนดูแล เช่น โครงสร้างเหล็ก วัสดุที่ใช้เป็นพื้นผนัง และอุปกรณ์ชิ้นวางต่าง ๆ ควรสะอาด ปลอดภัยโรค เพื่อป้องกันโรคและแมลงศัตรูของหนอนใหม่ เช่น ไม้เทียมหรือวัสดุผนังน้ำหนักเบาที่มีคุณสมบัติกันน้ำและความชื้น

ควรให้แสงธรรมชาติส่องถึงอย่างเหมาะสม เพื่อกระตุ้นการเจริญเติบโตและการสร้างเส้นใยใหม่ โดยติดตั้งหน้าต่างและบานประตูกระจกหรือวัสดุโปร่งแสงอื่น ๆ เพื่อให้โรงเรือนรับแสงธรรมชาติได้อย่างเพียงพอ หน้าต่างรวมถึงช่องระบายอากาศด้านบนหลังคา สามารถเปิดปิดเพื่อกำหนดทิศทางการระบายอากาศได้อย่างเหมาะสมกับสภาพอากาศในแต่ละฤดูกาล สามารถระบายอากาศได้ดี และมีมุ้งลวดปิดมิดชิด ช่วยลดความชื้นสะสม ป้องกันโรคแมลง เชื้อรา และศัตรูต่าง ๆ ของหนอนใหม่

5. อภิปรายผล

การวิจัยมุ่งพัฒนาโรงเรือนเลี้ยงหนอนใหม่แห่งอนาคตของประเทศไทย โดยใช้เทคโนโลยีควบคุมสภาพแวดล้อมและปรับปรุงกระบวนการเลี้ยง โดยมีวัตถุประสงค์การวิจัยเพื่อพัฒนาแบบจำลองโรงเรือนเลี้ยงหนอนใหม่ที่เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศในประเทศไทย และเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของโรงเรือน เช่น การระบายอากาศ ความชื้น และอุณหภูมิ การวิจัยนี้จึงศึกษาโดยการจำลองการไหลของอากาศและการกระจายความชื้นภายในทั้งบ้านเลี้ยงใหม่แบบดั้งเดิม และแบบอนาคตโดยใช้ซอฟต์แวร์ไดนามิกของของไหลเชิงคอมพิวเตอร์ (CFD) ด้วย OpenFOAM มีข้อค้นพบสำคัญดังนี้

5.1 การควบคุมสภาพแวดล้อมที่ดีขึ้น

จากผลการจำลองในตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่าโรงเรือนเลี้ยงหนอนใหม่แห่งอนาคต ให้การควบคุมสภาพแวดล้อมได้ดีกว่าโรงเรือนแบบเดิมดังนี้

- ความเร็วลมต่ำกว่าในบางบริเวณ แบบจำลองอนาคตมีความเร็วลมในบางบริเวณต่ำกว่า (1.7-3.6 ม./วินาที) เทียบกับแบบดั้งเดิม (2.2-4.2 ม./วินาที) ซึ่งบ่งชี้ว่าลดการเกิดลมพัดแรงซึ่งเป็นอันตรายในช่วงการตั้งไข่ใหม่
- การไหลเวียนอากาศและการระบายที่ดีกว่า ด้วยความเร็วลมที่ต่ำกว่าในแบบอนาคตสัมพันธ์กับการมี จุดเฉย (dead zones) น้อยลงและการระบายอากาศโดยรวมที่ดีกว่า

- สภาพที่คงที่มากขึ้น โดยแบบอนาคตส่งเสริมการกระจายความชื้นที่สม่ำเสมอมากขึ้น ทำให้สภาพแวดล้อมมีความเสถียร

- อุณหภูมิต่ำกว่า ทำให้แบบอนาคตให้ค่าอุณหภูมิที่ต่ำกว่า ซึ่งเอื้อต่อสภาพที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงไหม

5.2 ศักยภาพในการเพิ่มผลผลิตและลดค่าใช้จ่าย

ด้วยการควบคุมสภาพแวดล้อมที่ดีขึ้นในโรงเรือนเลี้ยงหนอนไหมแห่งอนาคตทำให้เกิดประโยชน์หลายประการ

- ผลผลิตเพิ่มขึ้น จากการรักษาสภาพแวดล้อมในเกณฑ์เหมาะสมจะทำให้ไหมเจริญเติบโตได้มีประสิทธิภาพขึ้น นำไปสู่การผลิตเส้นไหมที่มากขึ้น

- ความเสี่ยงต่อโรคลดลง ด้วยการควบคุมความชื้นและอุณหภูมิที่สม่ำเสมอช่วยลดความเสี่ยงของการระบาดของโรค ซึ่งอาจทำลายหนอนไหมได้

- การลดต้นทุน จากการออกแบบที่เหมาะสมสามารถลดความลดการใช้พลังงาน

5.3 การแก้ไขปัญหาในอุตสาหกรรมเลี้ยงไหมไทย

งานวิจัยตอบโจทย์ปัญหาที่อุตสาหกรรมเลี้ยงไหมไทยเผชิญ นั่นคือการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ จากการควบคุมสภาพแวดล้อมที่ปรับได้ในแบบอนาคต เอื้อต่อการปรับตัวให้เข้ากับสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงของประเทศไทย งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการนำเทคโนโลยีสมัยใหม่และหลักวิศวกรรมมาปรับใช้เพื่อปรับปรุงการเลี้ยงไหมในประเทศไทย โรงเรือนเลี้ยงหนอนไหมแห่งอนาคต มีแนวโน้มที่จะเพิ่มการควบคุมสภาพแวดล้อม เพิ่มผลผลิต ลดต้นทุน และส่งเสริมการเติบโตอย่างยั่งยืนของอุตสาหกรรมเลี้ยงไหม งานวิจัยนี้จึงเป็นพื้นฐานที่มั่นคงสำหรับการวิจัยและพัฒนาต่อไปในอนาคต จากผลการจำลองเชิงตัวเลขชี้ให้เห็นว่าข้อจำกัดของโรงเรือนแบบดั้งเดิมมีผลกระทบเชิงเทคนิคที่สำคัญต่อสภาวะภายในและประสิทธิภาพการผลิต โครงสร้างและวัสดุก่อสร้างที่มีสมบัติเชิงความร้อนไม่เหมาะสมก่อให้เกิดการสะสมความร้อนและความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิ ขณะที่การพึ่งพาการระบายอากาศตามธรรมชาติสร้างจุด

อ่อนแอและการกระจายความชื้นที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นปัจจัยเสี่ยงสำคัญต่อการแพร่ระบาดของโรคและความผันผวนของคุณภาพผลิตผล นอกจากนี้ การขาดระบบตรวจวัดเชิงเรียลไทม์และการควบคุมอัตโนมัติจำกัดความสามารถในการตอบสนองต่อความผันผวนของสภาพภูมิอากาศและลดความทนทานของการออกแบบ งานวิจัยนี้สนับสนุนการใช้วิธีการเชิงวิศวกรรม เช่น การประยุกต์ CFD เพื่อตั้งค่า inlet/outlet และการออกแบบการไหล การวิเคราะห์ความไม่แน่นอน (UQ) และการบูรณาการระบบควบคุมเพื่อปรับปรุงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิและความชื้น ลดจุดอ่อน และเพิ่มความเสถียรของผลผลิตเมื่อเทียบกับโรงเรือนแบบดั้งเดิม

6. สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาโรงเรือนเลี้ยงหนอนไหมแห่งอนาคตในประเทศไทย โดยใช้เทคโนโลยีและวิศวกรรมสมัยใหม่เข้ามาช่วยหาแนวทางควบคุมสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมกับการเลี้ยงหนอนไหมมากขึ้น การวิจัยนี้ได้ทำการสร้างแบบจำลองโรงเรือนและวิเคราะห์ปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และการระบายอากาศ โดยใช้ซอฟต์แวร์จำลองสถานการณ์ OpenFOAM ที่ผนวกการจำลองแบบหลายปรากฏการณ์ การวิเคราะห์ความไม่แน่นอน และการใช้เทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพ ผลการวิจัยพบว่าโรงเรือนเลี้ยงหนอนไหมแห่งอนาคตที่ออกแบบโดยวิธีการนี้สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมได้ดีกว่าโรงเรือนแบบดั้งเดิม ซึ่งจะช่วยเพิ่มผลผลิต ลดต้นทุน และลดความเสี่ยงต่อโรคของหนอนไหมได้ โดยมีข้อเสนอแนะสำหรับการตรวจสอบความถูกต้องและการพัฒนาต่อไปในอนาคตดังนี้

6.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองและการยืนยันประสิทธิภาพโดยไม่ต้องสร้างโรงเรือนจริง

เพื่อเสริมสร้างความน่าเชื่อถือของผลการออกแบบและแนวคิดที่นำเสนอ ควรดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองและการยืนยันประสิทธิภาพผ่านวิธีการที่ไม่จำเป็นต้องสร้างโรงเรือนขนาดเต็ม ดังนี้

6.1.1 การทดสอบด้วยแบบจำลองย่อส่วน (Scaled Model Testing) ในห้องปฏิบัติการ

- สร้างแบบจำลองทางกายภาพขนาดเล็ก ควรสร้างแบบจำลองโรงเรือนในอัตราส่วนที่ย่อส่วนลงมา (เช่น 1:10 หรือ 1:20) โดยใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับวัสดุจริงมากที่สุด

- การทดสอบในสภาพแวดล้อมควบคุม นำแบบจำลองย่อส่วนไปทดสอบในห้องปฏิบัติการที่มีการควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น และการไหลเวียนของอากาศอย่างแม่นยำ เพื่อจำลองสภาพอากาศภายนอกที่หลากหลาย

- การติดตั้งเซ็นเซอร์เพื่อเปรียบเทียบข้อมูล ติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลมภายในแบบจำลองย่อส่วน เพื่อเก็บข้อมูลและนำมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง OpenFOAM วิธีนี้จะช่วยยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Validation) โดยเฉพาะในส่วนของการไหลเวียนอากาศและการกระจายความร้อน/ความชื้น

6.1.2 การทดสอบประสิทธิภาพของระบบย่อย (Sub-system Performance Testing)

- ทดสอบเฉพาะส่วนประกอบสำคัญ ทำการทดสอบประสิทธิภาพของส่วนประกอบสำคัญที่ออกแบบใหม่ เช่น ระบบระบายอากาศ (พัดลม, ช่องระบายอากาศ) ในห้องทดสอบขนาดเล็ก เพื่อจำลองเงื่อนไขการไหลของอากาศที่เฉพาะเจาะจง

- ทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ ทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุก่อสร้างที่เสนอในห้องปฏิบัติการอย่างละเอียด เพื่อยืนยันค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง CFD ให้มีความแม่นยำ

6.1.3 การทดลองเลี้ยงหนอนไหมในสภาพแวดล้อมควบคุม (Controlled Environment Chamber for Biological Validation)

- สร้างห้องเพาะเลี้ยงขนาดเล็กที่ควบคุมได้ สร้างห้องเพาะเลี้ยงที่มีความสามารถในการควบคุมอุณหภูมิ

ความชื้น และการระบายอากาศได้อย่างแม่นยำ (คล้ายกับตู้ควบคุมสภาพแวดล้อม)

- จำลองสภาวะที่ได้จาก CFD ใช้ห้องเพาะเลี้ยงนี้เพื่อจำลองสภาวะแวดล้อมที่คาดการณ์ว่าจะเกิดขึ้นในโรงเรือนอัจฉริยะ ที่ได้จากการจำลอง OpenFOAM เช่น อุณหภูมิ 26-30°C, ความชื้น 60-80%

- เปรียบเทียบผลผลิตทางชีวภาพ ทำการเลี้ยงหนอนไหมจริงในห้องเพาะเลี้ยงที่จำลองสภาวะโรงเรือนอัจฉริยะ และเปรียบเทียบผลลัพธ์ เช่น อัตราการเจริญเติบโต, คุณภาพเส้นไหม, อัตราการรอดชีวิต, การเกิดโรค กับการเลี้ยงในห้องที่จำลองสภาวะโรงเรือนแบบดั้งเดิม หรือสภาวะที่ไม่เหมาะสม เพื่อยืนยันว่าการควบคุมสภาพแวดล้อมที่เสนอส่งผลดีต่อผลผลิตหนอนไหมจริง (Biological Validation)

6.1.4 การตรวจสอบความถูกต้องด้วยข้อมูลภาคสนามที่มีอยู่ (Field Data-driven Validation from Existing Structures)

- เก็บข้อมูลจากโรงเรือนเดิม หากมีข้อมูลภาคสนามจากโรงเรือนเลี้ยงหนอนไหมแบบดั้งเดิมที่คล้ายคลึงกัน เช่น อุณหภูมิ, ความชื้น, การไหลเวียนอากาศ สามารถนำมาใช้เพื่อปรับเทียบ (Calibrate) และตรวจสอบความถูกต้อง (Validate) ของแบบจำลอง OpenFOAM สำหรับโรงเรือนแบบดั้งเดิมได้

- สัมภาษณ์/สำรวจผู้เชี่ยวชาญ รวบรวมข้อมูลเชิงคุณภาพจากเกษตรกรผู้เลี้ยงหนอนไหมและผู้เชี่ยวชาญเพื่อทำความเข้าใจถึงความท้าทายและปัจจัยที่ส่งผลต่อผลผลิตในโรงเรือนปัจจุบัน ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการประเมินความสมเหตุสมผลของสมมติฐานและผลการจำลอง

6.2 การศึกษาและพัฒนาเพิ่มเติม

6.2.1 การศึกษาเชิงเศรษฐศาสตร์

ควรมีการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์อย่างละเอียดสำหรับโรงเรือนอัจฉริยะนี้ เพื่อประเมินต้นทุนการก่อสร้าง การดำเนินงาน และผลตอบแทนที่คาดว่าจะได้รับเมื่อเปรียบเทียบกับโรงเรือนแบบดั้งเดิม

6.2.2 การพัฒนาด้านแบบระบบควบคุมอัจฉริยะ

พัฒนาด้านแบบระบบควบคุมสภาพแวดล้อมอัตโนมัติที่อ้างอิงจากผลการจำลองและเทคนิค AI/Machine Learning เพื่อสาธิตและทดสอบการทำงานจริงในระดับห้องเพาะเลี้ยงขนาดเล็ก

6.2.3 การสร้างแพลตฟอร์มการออกแบบแบบเปิด

สร้างแพลตฟอร์มที่เกษตรกรหรือผู้ประกอบการสามารถเข้าถึงแบบจำลองและเครื่องมือการออกแบบเบื้องต้นได้ เพื่อปรับแต่งโรงเรือนให้เข้ากับความต้องการและสภาพภูมิอากาศในพื้นที่ของตนเอง

6.2.4 การส่งเสริมและการถ่ายทอดองค์ความรู้

ภาครัฐควรส่งเสริมการนำเทคโนโลยีและองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้จริง และจัดอบรมถ่ายทอดเทคนิคให้กับเกษตรกร เพื่อยกระดับอุตสาหกรรมการเลี้ยงไหมของประเทศให้สามารถแข่งขันได้ในระดับสากลและเติบโตอย่างยั่งยืน

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of Sericulture. (2022). Rearing silkworms as an important agricultural industry of Thailand [Online]. Available: <https://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2560/E/035/6.PDF>
- [2] S. Susikaran, B. K. M. Bharathi, A. Loveson, V. Vasanth, S. N. Krishnan, and C. Kiruthika, "Silkworm growth and silk yield under changing climatic conditions: Challenges and adaptations," *International Journal of Insects*, vol. 1, no. 2, pp. 1–5, 2024. [Online]. Available: <https://journals.stmjournals.com/iji/article=2024/view=179029>
- [3] S. Kumar and S. Sharma, "Impact of Environmental Factors on the Growth and Development of Silkworm (*Bombyx mori* L.)," *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.*, vol. 4, no. 3, pp. 944–952, 2015.
- [4] X. Zhao and Y. Liu, "Effects of Temperature and Humidity on Growth Performance of Silkworm," *Journal of Insect Science*, vol. 10, no. 1, p. 56, 2010.
- [5] J. Jiang, H. Zhang and Y. Wang, "Influence of Light Quality on Growth and Development of Silkworm (*Bombyx mori*)," *Scientific Reports*, vol. 9, Article number 8926, 2019.
- [6] R. Prasad and S. Gupta, "Climate Change and the Impact on Sericulture: A Review," *Journal of Sericulture and Entomology Science*, vol. 5, no. 1, pp. 1–9, 2016.
- [7] A. Kumar, R. Singh and L. Zhao, "Challenges in traditional agriculture: Ventilation and climate control in silk farming," *Journal of Agricultural Engineering*, vol. 49, no. 2, pp. 123–137, 2023.
- [8] Office of Agricultural Economics (Thailand). (2021). Labor shortages and impacts on operations in the silk industry [Online]. Available: <https://oae.go.th/home/article/386>.
- [9] Q. Zhang, Y. Liu and M. Huang, "Modernization of sericulture facilities: Technology and management innovations," *Journal of Agricultural Technology*, vol. 18, no. 4, pp. 567–583, 2022.
- [10] L. Chen, Y. Wang and Z. Li, "Computational modeling for optimizing silkworm rearing house environment," *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 212, pp. 105–117, 2023.

- [11] National Sericulture Research and Development Institute. (2021). Guidelines for Sustainable and Energy-Efficient Sericulture Housing [Online]. Available: <https://qsds.go.th>
- [12] M. Johnson and R. Smith, "Sustainable design of smart agricultural houses: Integrating natural and automated ventilation," *Sustainable Agriculture Reviews*, vol. 59, pp. 89–112, 2023.
- [13] H. Kim, J. Park and S. Lee, "Enhancing global competitiveness in sericulture through controlled environment housing," *International Journal of Sericulture Science*, vol. 41, no. 1, pp. 12–25, 2023.
- [14] Meteorological Department (Thailand). (2025). Annual Report on Climate and Environment in Thailand [Online]. Available: <https://www.tmd.go.th>
- [15] Department of Sericulture, Thailand. (2012). Agricultural product standard: Rearing mulberry silkworms for raw silk production, The Royal Gazette [Online]. Available: <https://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2555/E/165/6.PDF>
- [16] H. K. Versteeg and W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Harlow, UK: Pearson Education, 2007.
- [17] OpenFOAM Foundation. (2023). OpenFOAM User Guide [Online]. Available: <https://www.openfoam.com/documentation>
- [18] J. H. Ferziger, M. Perić and R. L. Street, *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Cham, Switzerland: Springer, 2020.
- [19] P. J. Roache, *Verification and Validation in Computational Science and Engineering*. Albuquerque, NM, USA: Hermosa Publishers, 1998.
- [20] A. Saltelli, S. Tarantola, F. Campolongo and M. Ratto, *Global Sensitivity Analysis: The Primer*. Chichester, UK: Wiley, 2008.
- [21] W. L. Oberkampf and T. G. Trucano, "Verification and validation in computational fluid dynamics," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 38, no. 3, pp. 209–272, 2002.
- [22] J. Franke, A. Hellsten, H. Schlünzen and B. Carissimo, "Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment," COST Action 732, COST Office, Brussels, Belgium, 2007.
- [23] B. Blocken, T. Stathopoulos and J. Carmeliet, "CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems," *Atmospheric Environment*, vol. 41, no. 2, pp. 238–252, 2007.
- [24] S. B. Pope, *Turbulent Flows*. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2000.