

แบบจำลองเชิงตัวเลข 3 มิติ ของการไหลของอากาศและการกระจายตัวของอุณหภูมิเพื่อทำนายภาวะความสบายเชิงความร้อนภายในห้องตัวอย่าง

3-D Numerical Modeling of the Air Flow and Temperature Distribution for Predicting Thermal Comfort in the Sample Room

พรทิพย์ แก่งอินทร์^{1*}, ศศิธร คำพูน¹ และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

25/25 ถนนพุทธมณฑลสาย 4 ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

99 หมู่ 18 ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

*ติดต่อ: pornthip.kea@mahidol.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 0-2889-2138 ต่อ 6401-3, เบอร์โทรสาร 0-2889-2138 ต่อ 6429

บทคัดย่อ

ภาวะความสบายเชิงความร้อน (Thermal Comfort) เป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบอาคาร ซึ่งจะช่วยสร้างภาวะความสบายของสิ่งแวดล้อมภายในสำหรับผู้อาศัยภายในอาคาร งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะการไหลของอากาศ การกระจายตัวของอุณหภูมิ และภาวะความสบายเชิงความร้อนภายในห้องตัวอย่างที่มีผู้อยู่อาศัยอยู่ภายในและมีเครื่องปรับอากาศในการทำงาน โดยแบบจำลอง 3 มิติของห้องตัวอย่างจะถูกจำลองเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และถูกแก้ไขโดยใช้ระเบียบวิธีแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method (FEM)) สมการพลวัตของเหลวที่ขึ้นกับเวลา สมการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนและการพาความร้อนที่ขึ้นกับเวลา ควบคู่กับสมการถ่ายเทความร้อนทางชีวภาพที่ขึ้นกับเวลาถูกคำนวณ เพื่อทำนายลักษณะการไหลของอากาศและการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องตัวอย่าง อิทธิพลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่ทางเข้าที่ส่งผลต่อลักษณะการไหลของอากาศ การกระจายตัวของอุณหภูมิ และภาวะความสบายเชิงความร้อนจะถูกศึกษา ผลการจำลองเชิงตัวเลขถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลอง เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองเชิงตัวเลขที่นำเสนอ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าผลการจำลองเชิงตัวเลขจะสอดคล้องกับข้อมูลการทดลอง ผลการศึกษาที่ได้รับจะเป็นประโยชน์ช่วยในการแนะนำการออกแบบอาคารเพื่อสร้างภาวะความสบายแก่ผู้ใช้อาคาร

คำหลัก: การไหลของอากาศ ; การถ่ายเทความร้อน ; การจำลองเชิงคอมพิวเตอร์ ; ภาวะความสบายเชิงความร้อน

Abstract

Thermal comfort is a key factor of building design which helps to create an indoor environment comfort for occupants in the building. This research aims to study and analyze the characteristics of air flow, temperature distribution and thermal comfort in the sample room with occupants inside and having air conditioning in operation. A three-dimensional (3D) sample room model is implemented by numerical simulation with computer program and is solved by using finite element method (FEM). The time-dependent fluid dynamic equation, the time-dependent conduction and convection heat transfer equations coupled with the time-dependent Bioheat equation are solved to predict the characteristics of air flow and temperature distribution inside a sample room.

The effect of environmental temperatures at the entrance on the characteristics of air flow, temperature distribution and thermal comfort in the sample room is studied. The numerical simulation results are compared to experimental data to verify the accuracy of the present numerical models. The results show that the simulation results are in agreement with the experimental data. The obtained result may be helpful in recommending building design to provide comfort to building users.

Keywords: Air flow ; Heat transfer ; Computer simulation ; Thermal comfort

1. บทนำ

ประเทศไทยมีลักษณะภูมิอากาศแบบร้อนชื้น โดยเฉพาะในช่วงเวลากลางวันสภาพอากาศโดยเฉลี่ยจะสูงกว่าอุณหภูมิในขอบเขตสภาวะความสบายที่กำหนดไว้ในช่วงอุณหภูมิ 22.2 °C - 26.1 °C ทำให้มีการพึ่งพาการทำความเย็นจากเครื่องปรับอากาศ เพื่อให้เกิดภาวะความสบายแก่ผู้อยู่อาศัยในอาคาร จากการสำรวจการใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคารพาณิชย์โดยกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน พบว่าการใช้พลังงานเพื่อการปรับอากาศมีค่าอยู่ระหว่าง 50 % - 60 % ของการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดในอาคาร [1] ดังนั้นการออกแบบอาคารที่ดีจึงควรคำนึงถึงทั้งการลดการใช้พลังงานอาคารและสภาวะความสบายของผู้อยู่อาศัย ในปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้วิธีการด้านพลศาสตร์ของไหล (Computation Fluid Dynamic) ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อทำนายลักษณะการไหลของอากาศและการกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศภายในพื้นที่ภายในอาคารและพื้นที่ส่วนต่าง ๆ ที่มีการระบายอากาศ เพื่อความสะดวกในการศึกษาและเป็นพื้นฐานในการออกแบบอาคารและพื้นที่ส่วนต่าง ๆ ให้มีความคุ้มค่าทางด้านการใช้พลังงานและมีสภาวะความสบายต่อผู้อยู่อาศัยก่อนการสร้างพื้นที่จริง โดย Nada S.A. และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาลักษณะการไหลของอากาศ การกระจายตัวของอุณหภูมิ และภาวะความสบายเชิงความร้อน (Thermal Comfort) ภายในโรงภาพยนตร์ที่ใช้ระบบการกระจายอากาศจากพื้น (Underfloor Air Distribution (UFAD) System) เปรียบเทียบกับระบบการกระจายอากาศเหนือศีรษะแบบดั้งเดิม (Traditional Overhead Mixing Air Distribution (OHAD) System)

โดยใช้วิธีการด้านพลศาสตร์ของไหลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และทำการตรวจสอบความถูกต้องกับการทดลอง และใช้วิธีการคำนวณค่าดัชนีทำนายการโหวตเฉลี่ย (Predicted Mean Vote (PMV)) ในการวิเคราะห์ภาวะความสบายเชิงความร้อน โดยทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบปรับอากาศและภาวะความสบายเชิงความร้อนได้แก่ อุณหภูมิอากาศที่ง่าย, ความเร็วลมที่ง่าย, ความสูงของพื้นที่ และจำนวนของตัวกระจายอากาศ ผลการศึกษาพบว่าผลการคำนวณเชิงตัวเลขของลักษณะการไหลและการกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศมีความสอดคล้องกับผลการทดลอง และพบว่าระบบการกระจายอากาศจากพื้นมีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานและมีภาวะความสบายเชิงความร้อนสูงกว่าระบบการกระจายอากาศเหนือศีรษะแบบดั้งเดิม โดยสภาวะอุณหภูมิอากาศที่ง่ายที่ 18 °C และความเร็วลมที่ง่ายที่ 0.8 m/s มีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานและมีสภาวะความสบายเชิงความร้อนที่สูงที่สุด และพบว่าเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานโดยใช้ระบบการกระจายอากาศจากพื้นจะมีค่าสูงขึ้นตามระดับความสูงของโรงภาพยนตร์ ในปีถัดมา Valeria V. และ Ginevra S. [3] ได้ทำการจำลองเชิงตัวเลขของรูปแบบการระบายอากาศของอาคารประวัติศาสตร์ในกรุงโรมเพื่อหาภาวะความสบายเชิงความร้อนภายในอาคาร โดยทำการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับมาตรฐาน EN15251 และ ISO7730 ซึ่งกำหนดอุณหภูมิที่ทำให้เกิดภาวะความสบายเชิงความร้อนไว้ที่ ถึง 23 °C - 26 °C ผลการศึกษาพบว่าช่วงเวลาที่ทำให้รู้สึกสบายภายในอาคารที่มีการระบายความ

ร้อนภายในอาคารด้วยวิธีแบบธรรมชาตินั้น อยู่ที่ช่วงเวลาเช้าตั้งแต่ เวลา 10.00 น. - 11.00 น. นอกจากนั้นยังมีงานวิจัยบางส่วนที่ทำการศึกษการถ่ายเทความร้อนและภาวะความสบายเชิงความร้อนภายในห้องที่มีแบบจำลองของผู้อยู่อาศัยอยู่ภายใน อาทิ งานวิจัยของ Atish D. และ Upender G. [4] ได้ทำการศึกษการถ่ายเทความร้อนและภาวะความสบายเชิงความร้อนภายในห้องที่มีแบบจำลองของผู้อยู่อาศัยอยู่ภายใน โดยใช้สมการการถ่ายเทความร้อนทางชีวภาพ (Bioheat Equation) ในการวิเคราะห์ และใช้วิธีการคำนวณค่าดัชนีทำนายการไหลเวียนเลือดในการวิเคราะห์ภาวะความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัย ผ่านการจำลองเชิงโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีการพลศาสตร์ของไหล ผลการจำลองเชิงตัวเลขจะทำการตรวจสอบความถูกต้องกับการทดลองและผลการจำลองเชิงตัวเลขจากงานวิจัยที่ผ่านมา ผลจากการศึกษาพบว่าในสภาวะสิ่งแวดล้อมที่ค่าอุณหภูมิ 25 °C และความชื้นของอากาศ 50 % ส่งผลให้มีสภาวะความสบายเชิงความร้อนที่สูงที่สุด

จากข้างต้นพบว่าแม้จะมีงานวิจัยหรือเอกสารทางวิชาการต่าง ๆ ที่ได้ทำการศึกษาลักษณะการไหลของอากาศ การกระจายตัวของอุณหภูมิ และภาวะความสบายเชิงความร้อนภายในห้องหรืออาคารตัวอย่าง แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ทำการศึกษเกี่ยวกับรูปแบบการไหลของอากาศ การกระจายตัวของอุณหภูมิ และภาวะความสบายเชิงความร้อนภายในห้องหรืออาคารตัวอย่างที่มีแบบจำลองของผู้อยู่อาศัยอยู่ภายใน โดยใช้แบบจำลอง 3 มิติของห้องตัวอย่างและผู้อยู่อาศัยภายในนั้น ยังพบว่ามีอยู่จำนวนน้อย รวมทั้งการศึกษเกี่ยวกับอิทธิพลของตัวแปรเชิงความร้อนต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมภายนอกที่ส่งผลต่อภาวะความสบายเชิงความร้อนภายในห้องตัวอย่างก็ยังมีจำนวนอยู่ไม่มากนัก

ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้จึงทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อศึกษาลักษณะการไหลของอากาศ การกระจายตัวของอุณหภูมิ และภาวะความสบายเชิงความร้อนภายใน

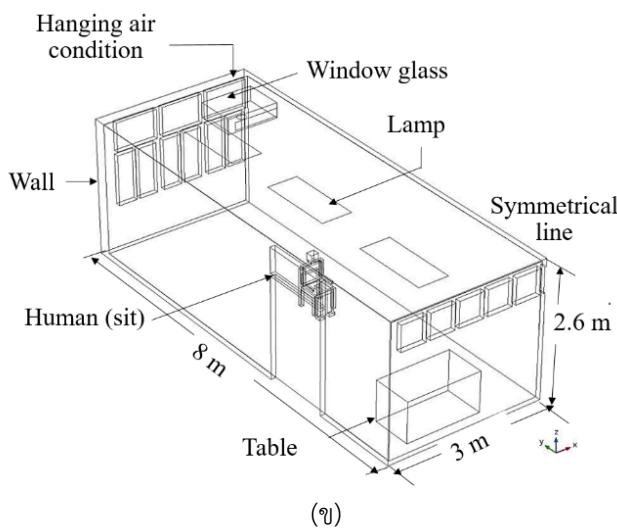
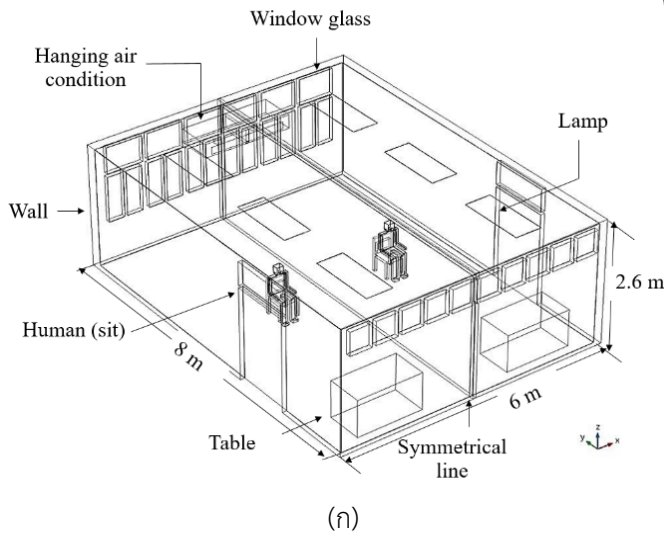
แบบจำลองห้องตัวอย่างที่มีแบบจำลองของผู้อยู่อาศัยอยู่ภายใน โดยทำการศึกษอิทธิพลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่ทางเข้าที่ส่งผลต่อลักษณะการไหลของอากาศ การกระจายตัวของอุณหภูมิ และภาวะความสบายเชิงความร้อน สมการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนที่ขึ้นกับเวลาจะถูกวิเคราะห์ในชั้นผนังของห้องตัวอย่าง สมการการพาความร้อนควบคู่กับสมการพลวัตของเหลวที่ขึ้นกับเวลาจะถูกวิเคราะห์ในอากาศภายในห้องตัวอย่าง และสมการการถ่ายเทความร้อนทางชีวภาพจะถูกวิเคราะห์ในร่างกายมนุษย์ สมการที่ใช้ในการศึกษาจะถูกแก้ปัญหา โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method (FEM)) ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในกรณีไม่มีผู้อยู่อาศัยอยู่ภายในจะถูกใช้ในการเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองกับผลจากการทดลอง ผลที่ได้จากการศึกษาจะสามารถช่วยให้คำแนะนำในการออกแบบด้านพลังงานของอาคารที่มีภาวะที่เหมาะสมและเกิดภาวะความสบายแก่ผู้อยู่อาศัยภายในอาคาร

2. วิธีดำเนินการ

2.1 แบบจำลอง 3 มิติ ของห้องตัวอย่างและผู้อยู่อาศัยภายในห้อง

แบบจำลองเชิงตัวเลขของห้องตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา คือแบบจำลองของห้องเรียน R-424 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล โดยห้องตัวอย่างที่ทำการศึกษามีขนาดความกว้าง 6 m ความยาว 8 m และความสูง 2.6 m ผนังของแบบจำลองห้องตัวอย่างมีความหนา 0.1 m ซึ่งมีขนาดสอดคล้องกับขนาดของห้องตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง ภายในห้องจำลองจะประกอบด้วยเครื่องปรับอากาศขนาด 41,000 BTU/hr. จำนวน 1 เครื่อง หลอดไฟจำนวน 12 หลอด โตะ 2 ตัว และกำหนดให้มีผู้อยู่อาศัยอยู่ภายในห้องจำนวน 2 คน ทางด้านซ้ายและทางด้านขวาของห้อง โดยแบบจำลองของผู้อยู่อาศัยมีรูปทรงสี่เหลี่ยม [4] ด้วยลักษณะข้างต้นเพื่อทำการศึกษาลักษณะการไหลของอากาศ การ

กระจายตัวของอุณหภูมิ และภาวะความสบายเชิงความร้อนภายในแบบจำลองห้องตัวอย่าง จะทำการศึกษาโดยใช้แบบจำลองการวิเคราะห์แบบสมมาตรรอบแกนในการศึกษา เพื่อประหยัดระยะเวลาในการคำนวณและประหยัดทรัพยากรเชิงคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์



รูปที่ 1 แบบจำลองของห้องตัวอย่างและแบบจำลองของผู้อยู่อาศัยที่ใช้ในการศึกษา โดย (ก) แบบจำลอง 3 มิติ และ (ข) แบบจำลองแบบสมมาตรรอบแกน

โดยแบบจำลองของห้องตัวอย่างและแบบจำลองของผู้อยู่อาศัยที่ใช้ในการศึกษาจะแสดงในรูปที่ 1 โดยแบบจำลองของห้องตัวอย่างและแบบจำลองของผู้อยู่อาศัย 3 มิติ จะแสดงในรูปที่ 1(ก) และแบบจำลองของห้องตัวอย่างและแบบจำลองของผู้อยู่อาศัยแบบสมมาตร

รอบแกนจะแสดงในรูปที่ 1(ข) และกำหนดให้ห้องตัวอย่างมีอุณหภูมิเริ่มต้น 31 °C ซึ่งเป็นค่าอุณหภูมิที่ได้จากการวัดภายในห้อง

2.2 การจำลองโปรแกรมเชิงคอมพิวเตอร์

การจำลองโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์การไหลของอากาศภายในห้อง เป็นปัญหาทางด้านพลศาสตร์ของไหล (Fluid Dynamics) สามารถอธิบายได้จากสมการความต่อเนื่อง และสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equation) ดังต่อไปนี้

สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equation)

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot \left[-pl + \mu(u + \nabla u)^T - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot u)I \right] \quad (2)$$

เมื่อ ρ คือ ค่าความหนาแน่นของอากาศ (Density of Air (kg/m^3)) u คือ ค่าความเร็วของอากาศ (Velocity of Air (m/s)) t คือ เวลา (Time (s)) p คือ ความดันของอากาศ (Pressure of Air (Pa)) μ คือ ค่าความหนืดไดนามิกของอากาศ (Dynamic Viscosity of Air ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)) และ I คือ ค่าเทนเซอร์ของเมกทริกซ์เอกลักษณ์ (Identity Matrix Tensor (-))

โดยตารางที่ 1 จะแสดงค่าคุณสมบัติของอากาศที่ใช้ในการคำนวณ

ตารางที่ 1 ค่าคุณสมบัติของอากาศที่ใช้ในการคำนวณ [2-3]

Properties	Density	Dynamic Viscosity
	ρ (kg/m^3)	μ ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
Air (31 °C)	995.41	0.000781

และการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของอากาศภายในห้อง จะพิจารณาการถ่ายเทความร้อนด้วยสมการการพาความร้อนดังสมการต่อไปนี้

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

เมื่อ ρ คือ ค่าความหนาแน่นของอากาศ (Density of Air (kg/m^3)) c_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (Specific Heat Capacity of Air (J/kg.K)) k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ (Thermal Conductivity of Air (W/m.K)) T คือ ค่าอุณหภูมิของอากาศ (Temperature of Air ($^{\circ}\text{C}$)) และ u คือ ค่าความเร็วอากาศ (Velocity of Air (m/s)) ซึ่งได้จากการคำนวณในสมการที่ (1) และ (2)

สมการการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนจะถูกนำมาใช้ภายในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังของห้องตัวอย่าง ดังสมการต่อไปนี้

สมการการนำความร้อน (Conduction Equation)

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (4)$$

โดยค่าคุณสมบัติทางความร้อนของอากาศและผนังจะแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าคุณสมบัติทางความร้อนของอากาศและผนัง [5]

Properties	Density	Specific Heat Capacity	Thermal Conductivity
	ρ (kg/m^3)	c_p (J/kg.K)	k (W/m.K)
Air (31 $^{\circ}\text{C}$)	995.41	4159.13	26.693
Wall	160	1400	0.024

สมการการถ่ายเทความร้อนทางชีวภาพ (Bioheat Equation) หรือสมการไบโอฮีทของ Pennes (Pennes's Bioheat Equation) เป็นสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนภายในร่างกายมนุษย์ ซึ่งแสดงถึงการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในร่างกายมนุษย์ทางชีวภาพ โดยสมการการถ่ายเทความร้อนทางชีวภาพที่ขึ้นกับเวลาแสดงดังสมการที่ (5)

สมการการถ่ายเทความร้อนทางชีวภาพ (Bioheat Equation)

$$\rho_t c_{p,t} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (k \nabla T) = \rho_b c_{p,b} \omega_b (T_t - T_b) + Q_{met} \quad (5)$$

เมื่อสัญลักษณ์ตัวห้อย t และ b คือ เนื้อเยื่อ (Tissue) และ เลือด (Blood) ตามลำดับ โดย ρ คือ ค่าความหนาแน่น (Density (kg/m^3)) c_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacity (J/kg.K)) k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity (W/m.K)) ตามลำดับ ω คือ อัตราการแพร่กระจายตัวของเลือด (Blood Perfusion Rate ($1/\text{s}$)) T คือ ค่าอุณหภูมิ (Temperature ($^{\circ}\text{C}$)) และ Q_{met} คือ ความร้อนจากการสันดาปภายในเนื้อเยื่อ (Metabolism Heat Source (W/m^3))

จากสมการที่ (5) เทอมทางซ้ายมือคือเทอมที่ขึ้นอยู่กับเวลา และเทอมของการนำความร้อน ส่วนเทอมด้านขวามือของสมการที่ (5) คือเทอมการแพร่กระจายตัวของเลือด และเทอมความร้อนจากการสันดาปภายในเนื้อเยื่อหรือจากการสันดาปภายในร่างกาย ตามลำดับ โดยค่าคุณสมบัติทางความร้อนของเนื้อเยื่อและเลือดจะแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าคุณสมบัติทางความร้อนของเนื้อเยื่อและเลือดจะ [6,7]

Properties	Tissue	Blood
Density (kg/m^3)	1109	1000
Specific Heat Capacity (J/kg.K)	3391	4000
Thermal Conductivity (W/m.K)	0.37	-
Arterial Blood Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	-	37
Blood Perfusion Rate ($1/\text{s}$)	-	0.003
Metabolic Heat Source (W/m^3)	-	865

ภาวะความสบายเชิงความร้อนจะพิจารณาจากค่าดัชนีทำนายการไหลเวียน โดยสมการภาวะความสบาย

เชิงความร้อนที่ได้รับการยอมรับและถูกนำมาประยุกต์ใช้มากที่สุด คือสมการที่ศึกษาและพัฒนาโดย Fanger [8] โดยเป็นสมการเพื่อคำนวณค่าดัชนีทำนายการโหวตเฉลี่ยแสดงในสมการที่ (6) โดยสมการนี้จะประกอบด้วย 2 ตัวแปรหลัก คือ ตัวแปรทางกายภาพ (Ambient Parameters) ได้แก่ อุณหภูมิอากาศ, ความเร็วอากาศ, ความชื้นสัมพัทธ์, อุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย และตัวแปรจากบุคคล (Personal Parameter) ได้แก่ อัตราการเผาผลาญพลังงาน และเสื้อผ้าที่สวมใส่ของผู้อยู่อาศัยในห้อง ช่วงสภาวะความสบายจะแบ่งเป็น 7 ช่วงอยู่ระหว่าง -3 ถึง +3 โดยค่าที่ทำให้รู้สึกสบายจะอยู่ระหว่าง -0.5 ถึง +0.5 สมการที่ใช้ในการคำนวณค่าดัชนีทำนายการโหวตเฉลี่ยแสดงดังต่อไปนี้ [4]

$$PMV = [0.303e^{-0.036M} + 0.028] \{ (M - W) - 3.05 \times 10^{-3} [5733 - 6.99M - W - P_v] - 0.42 \times [(M - W) - 58.15] - 1.7 \times 10^{-5} M (5867 - P_v) - 0.0014M (34 - T_a) - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} \times [(T_r + 273)^4 - f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a)] \} \quad (6)$$

เมื่อ M คือ อัตราการเผาผลาญพลังงานของร่างกายที่ขึ้นอยู่กับกิจกรรม (W/m^2) โดยในการศึกษานี้ได้กำหนดให้ผู้อยู่อาศัยอยู่ในท่านั่ง ซึ่งมีค่าอัตราการเผาผลาญพลังงานของร่างกายเท่ากับ $58.2 W/m^2$ [9] W คือ งานภายนอก (W/m^2) ซึ่งในการศึกษานี้กำหนดให้ไม่พิจารณาภายนอก ซึ่งมีค่าเท่ากับ $0 W/m^2$ [4] P_v คือ ความดันไออากาศ (mmHg) T_a คือ อุณหภูมิอากาศ ($^{\circ}C$) ซึ่งในการศึกษานี้พิจารณาอุณหภูมิของอากาศในตำแหน่งด้านบนศีรษะ แขนด้านซ้าย แขนด้านขวา และด้านล่างของขาโดยรอบของแบบจำลองของผู้อยู่อาศัยภายในห้อง f_{cl} คือ ค่าอัตราส่วนพื้นที่ที่ปกคลุมด้วยเสื้อผ้าต่อพื้นที่เปลือย (-) T_r คือ อุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อน ($^{\circ}C$) h_c คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($kcal/m^2 \cdot hr \cdot ^{\circ}C$) และ T_{cl} คือ อุณหภูมิภายนอกของเสื้อผ้า ($^{\circ}C$)

โดยความดันไออากาศ, P_v หาได้จากสมการที่ (7) [10]

$$P_v = \%RH \cdot P_{vs} \quad (7)$$

เมื่อพิจารณาค่าความชื้นของอากาศ, $\%RH$ เท่ากับ 50 % [4] และความดันไอน้ำอิ่มตัวในอากาศ, P_{vs} หาได้จากสมการที่ (8) [10]

$$P_{vs} = \left[\frac{\exp\left[\frac{C_1}{T_{abs}} + C_2 + C_3 T_{abs}\right]}{+C_4 T_{abs}^2 + C_5 T_{abs}^3 + C_6 \ln(T_{abs})} \right] \quad (8)$$

เมื่อ $C_1 = -5.80 \times 10^3$, $C_2 = 1.3915$, $C_3 = -4.86 \times 10^{-2}$, $C_4 = 4.18 \times 10^{-5}$, $C_5 = -1.45 \times 10^{-8}$, $C_6 = 6.5460$ และ

$$T_{abs} = T_a + 273.15 \quad (9)$$

โดยอุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อน, T_r สามารถหาได้ในสมการที่ (10) [9]

$$T_r = \frac{0.18(T_{up} + T_{down}) + 0.22(T_{right} + T_{left}) + 0.3(T_{front} + T_{back})}{2(0.18 + 0.22 + 0.3)} \quad (10)$$

เมื่อ T_{up} , T_{down} , T_{right} , T_{left} , T_{front} และ T_{back} คือ อุณหภูมิเฉลี่ยที่บริเวณขอบของผนังห้อง ได้แก่ บริเวณเพดาน พื้นด้านล่าง ผนังทางด้านขวา ผนังทางด้านซ้าย ผนังทางด้านหน้า และผนังทางด้านหลัง ตามลำดับ

โดยค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, h_c สามารถหาได้ในสมการที่ (11) [11]

$$h_c = 12.1 \sqrt{v_a} \quad (11)$$

เมื่อ v_a คือค่าความเร็วของอากาศ(m/s)

โดยอุณหภูมิภายนอกของเสื้อผ้า, T_{cl} สามารถหาได้ในสมการที่ (12) [4]

$$T_{cl} = 35.7 - 0.028(M - W) - 0.155 I_{cl} \left\{ 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(T_{cl} + 273)^4] + f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a) \right\} \quad (12)$$

เมื่อ I_{cl} คือ ค่าความเป็นฉนวนของเสื้อผ้า (clo) ซึ่งในการศึกษานี้กำหนดให้ผู้อยู่อาศัยสวมใส่เสื้อผ้าในช่วงฤดูร้อน ซึ่งมีค่า I_{cl} เท่ากับ 0.65 clo [11]

โดยค่าอัตราส่วนพื้นที่ที่ปกคลุมด้วยเสื้อผ้าต่อพื้นที่
เปลือย, f_{cl} หาได้จากสมการที่ (13) [11]

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.290 \cdot I_{cl} \\ \text{for } I_{cl} \leq 0.078 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \\ 1.05 + 0.645 \cdot I_{cl} \\ \text{for } I_{cl} \geq 0.078 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \end{cases} \quad (13)$$

และค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สบายของผู้อยู่อาศัยใน
ห้อง (Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD))
ซึ่งจะขึ้นกับค่าดัชนีทำนายการโหวตเฉลี่ย จะแสดงใน
สมการที่ (14) [4]

$$PPD = 100 - 95e^{(-0.03353PMV^4 + 0.2179PMV^2)} \quad (14)$$

2.3 เงื่อนไขขอบเขต

สำหรับเงื่อนไขขอบเขตสำหรับการวิเคราะห์รูปแบบ
การไหลของอากาศและการกระจายตัวของอุณหภูมิ
ภายในห้องจะมีดังนี้

- 1) แบบจำลองห้อง 3 มิติ พิจารณาแบบสมมาตร
รอบแกน (Axisymmetric)
- 2) เงื่อนไขขอบเขตแบบทางเข้า (Inlet) ความเร็ว
และอุณหภูมิของอากาศทางเข้าจากเครื่องปรับอากาศ
เพื่อเข้าสู่อากาศภายในห้องทำให้เกิดการเคลื่อนที่ และ
ผลต่างของอุณหภูมิภายในห้อง โดยค่าความเร็วและ
อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าได้จากการทดลองการวัด
โดยความเร็วและอุณหภูมิของอากาศมีค่าที่ 2.7 m/s
และ 23 °C ตามลำดับ
- 3) เงื่อนไขขอบเขตแบบทางออก (Outlet) ของ
เครื่องปรับอากาศกำหนดให้ความดันของอากาศเท่ากับ 0
Pa
- 4) บริเวณผนังด้านนอกพิจารณาเงื่อนไขขอบเขต
แบบการพาความร้อนของอุณหภูมิความร้อนจาก
อากาศด้านนอกด้วยอุณหภูมิกึ่งที่ ที่ส่งผ่านผนังด้วยการ
นำความร้อนเข้าสู่อากาศภายในห้องโดยกำหนดให้
อุณหภูมิกึ่งที่ด้านนอกเท่ากับ 32 °C และมีค่าสัมประสิทธิ์การ
พาความร้อน (h) เท่ากับ 0.125 W/m²K

5) หน้าต่างของแบบจำลองห้องประกอบด้วย
กระจกจะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับแสงแดด
ภายนอกด้วยการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) โดย
กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน ε เท่ากับ
0.95

6) เพดานและพื้นห้องกำหนดให้เป็นเงื่อนไข
ขอบเขตแบบไม่มีการถ่ายเทความร้อน (Insulated
Boundary Condition)

7) เงื่อนไขขอบเขตของหลอดไฟภายในห้อง
กำหนดให้เป็นฟลักซ์ความร้อน (Heat Flux Boundary
Condition) โดยค่าฟลักซ์ความร้อนเท่ากับ 72 W/m²

8) ผนังด้านในที่สัมผัสกับอากาศภายในของ
แบบจำลองห้องกำหนดให้มีขอบเขตแบบไม่ลื่นไถล (No-
Slip) โดยเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการวิเคราะห์จะแสดงใน
รูปที่ 3

สมการหลักในการวิเคราะห์จะถูกแก้ปัญหาคำนวณด้วย
ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite
Element Method (FEM)) ผ่านโปรแกรม COMSOL™
Multiphysic เพื่อคำนวณค่าความเร็ว ค่าอุณหภูมิของ
อากาศภายในห้อง และนำไปวิเคราะห์ภาวะความสบาย
เชิงความร้อน โดยในการวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม
คอมพิวเตอร์จะทำการวิเคราะห์ความเป็นอิสระของ
จำนวนเอลิเมนต์ (Element-Independent Analysis)
ซึ่งแบบจำลองจะถูกคำนวณโดยใช้เอลิเมนต์ (Element)
รูปสามเหลี่ยมในการวิเคราะห์ เพื่อหาจำนวนเอลิเมนต์ที่
เหมาะสมในการคำนวณและเพื่อความแม่นยำของผลการ
คำนวณ โดยพบว่าจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมในการ
วิเคราะห์ปัญหาคือ 1,140,414 เอลิเมนต์

3. ผลการจำลองเชิงคอมพิวเตอร์และการวิเคราะห์ผล

3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองเชิง
โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ จึงทำการ
ทดลองเก็บข้อมูลของค่าอุณหภูมิกึ่งที่ได้จากการทดลอง

ภายในห้องจริงในกรณีไม่มีผู้อยู่อาศัยอยู่ในห้อง โดยทำการวัดค่าอุณหภูมิตามความสูงในแนวตั้ง 3 ตำแหน่ง โดยจุดที่ทำกรวัดมีความสูงจากพื้นห้อง 200 mm, 440 mm และ 740 mm ในจุดตำแหน่งการวัดที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยทำการวัดค่าอุณหภูมิของอากาศทุก 1 min ในช่วงเวลา 30 min แล้วนำค่าอุณหภูมิที่แปรเปลี่ยนตามเวลาไปทำการเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิที่ได้จากการใช้การจำลองเชิงตัวเลข โดยกราฟเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองและจากการใช้การจำลองเชิงตัวเลขในจุดตำแหน่งการวัดที่ 1, 2 และ 3 ดังแสดงในรูปที่ 5 - 7 ตามลำดับ

จากการทดลองและจากการค่าอุณหภูมิลดลงเล็กน้อยหาความคลาดเคลื่อนที่คลาดเคลื่อนของข้อมูล 0.6% ในตำแหน่งการวัดที่ 1, 2 ผลการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองและรูปที่ 3 เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

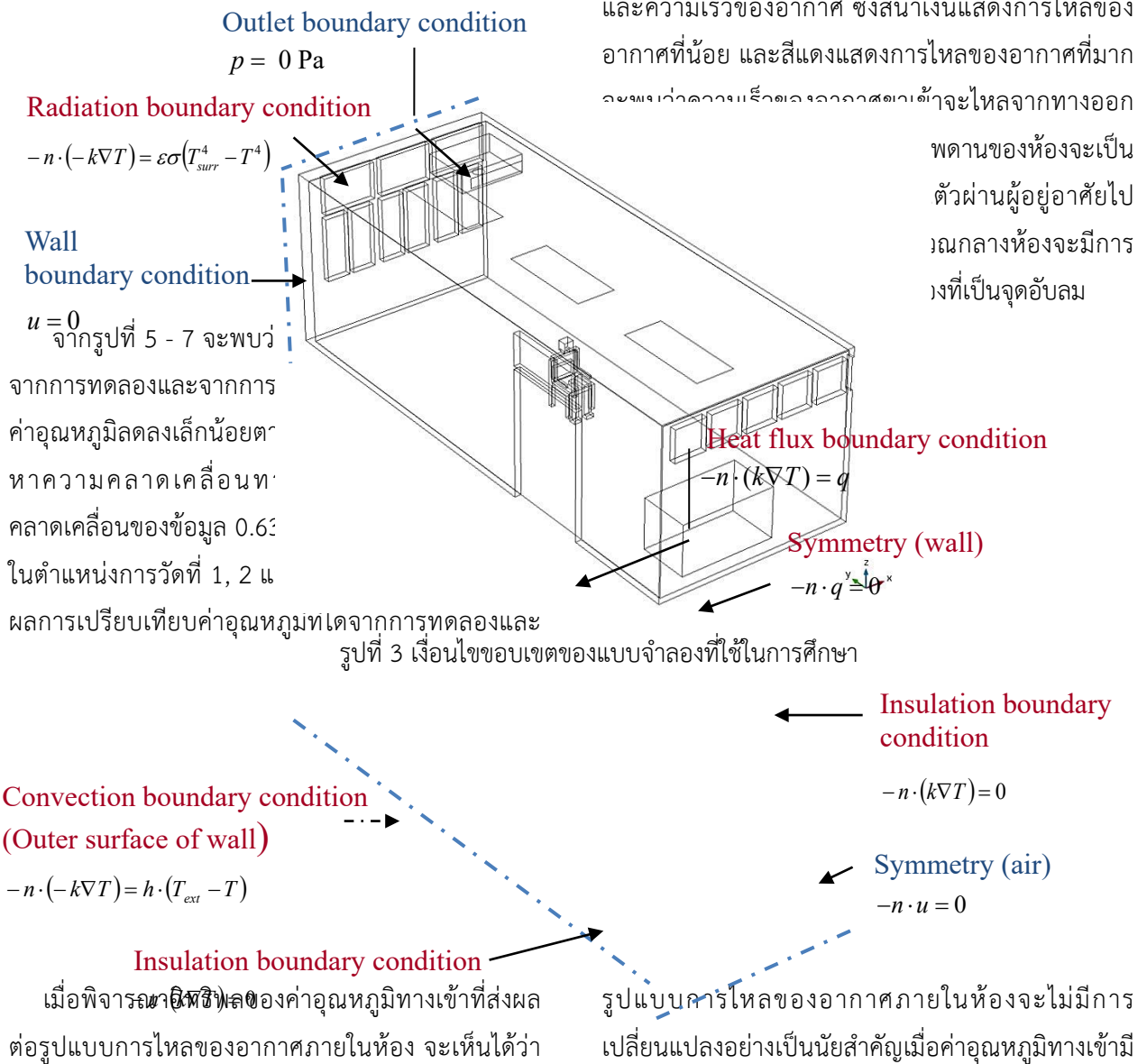
เมื่อพิจารณาถึงผลของค่าอุณหภูมิทางเข้าที่ส่งผลต่อรูปแบบการไหลของอากาศภายในห้อง จะเห็นได้ว่า

จากการใช้การจำลองเชิงตัวเลขจะมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี ดังนั้นแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์และระเบียบวิธีการจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้จึงมีความน่าเชื่อถือสามารถนำไปใช้ในการศึกษาในส่วนอื่น ๆ ต่อไปได้

3.2 การไหลของอากาศภายในห้อง

การไหลของอากาศภายในห้องเกิดจากความเร็วขาเข้าของเครื่องปรับอากาศ ทำให้อากาศในห้องเกิดการไหลหมุนเวียน ในรูปที่ 8 - 10 จะแสดงรูปแบบการไหลของอากาศโดยมีค่าอุณหภูมิทางเข้าเท่ากับ 10 °C 15 °C และ 25 °C และความเร็วทางเข้าของอากาศ 2.7 m/s ณ เวลา 30 min ตามลำดับ โดยสีของลูกศรแสดงทิศทางและความเร็วของอากาศ ซึ่งสีน้ำเงินแสดงการไหลของอากาศที่น้อย และสีแดงแสดงการไหลของอากาศที่มาก

พดานของห้องจะเป็นตัวผ่านผู้อยู่อาศัยไป ผนกล่างห้องจะมีการงที่ เป็นจุดอับลม



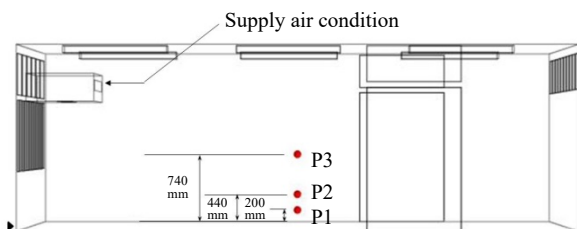
รูปแบบการไหลของอากาศภายในห้องจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงอย่าง เป็นนัยสำคัญเมื่อค่าอุณหภูมิทางเข้ามี

การเปลี่ยนแปลง กล่าวคือมีความเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในรูปแบบการไหลของอากาศภายในห้องเมื่อค่าอุณหภูมิทางเข้ามีการเปลี่ยนแปลง

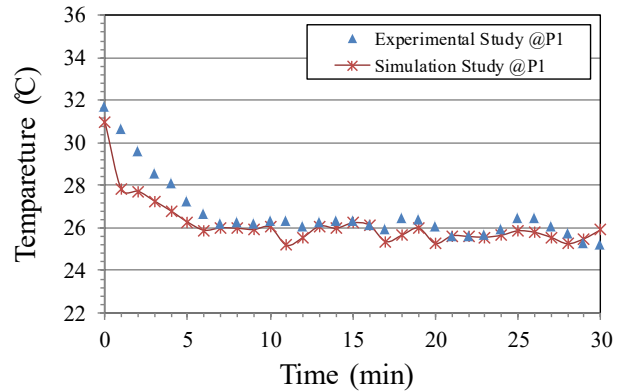
3.3 การกระจายตัวอุณหภูมิของอากาศภายในห้อง

ในรูปที่ 11 - 13 จะแสดงรูปแบบการกระจายตัวอุณหภูมิของอากาศภายในห้องโดยมีค่าอุณหภูมิทางเข้าเท่ากับ 10 °C 15 °C และ 25 °C และความเร็วทางเข้าของอากาศ 2.7 m/s ณ เวลา 30 min ตามลำดับ โดยแถบสีน้ำเงินจะแสดงถึงค่าอุณหภูมิที่ต่ำ และแถบสีแดงแสดงถึงค่าอุณหภูมิที่สูง จากรูปที่ 11 - 13 จะเห็นได้ว่าความร้อนจากอากาศด้านนอกห้องจะไหลผ่านผนังของห้องตัวอย่างด้วยการนำความร้อนเข้าสู่อากาศภายในห้อง และเมื่อความร้อนถ่ายเทเข้าสู่อากาศภายในห้องที่มีทั้งการถ่ายเทความร้อนแบบนำความร้อนและการพาความร้อน รวมทั้งอิทธิพลของอากาศทางเข้าที่ถูกส่งมาจากทางออกของเครื่องปรับอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอากาศในห้อง ส่งผลให้อากาศที่มีอุณหภูมิต่ำปะทะกับอากาศที่มีอุณหภูมิสูง และเกิดการถ่ายเทความร้อนภายในห้อง โดยจะเห็นได้ว่าค่าอุณหภูมิภายในห้องจะมีค่าสูงในบริเวณรอบ ๆ ผนังของห้อง และในบริเวณรอบ ๆ ของผู้อยู่อาศัยภายในห้อง เนื่องจากความร้อนที่จากการเผาผลาญพลังงานของร่างกายผู้อยู่อาศัยภายในห้อง

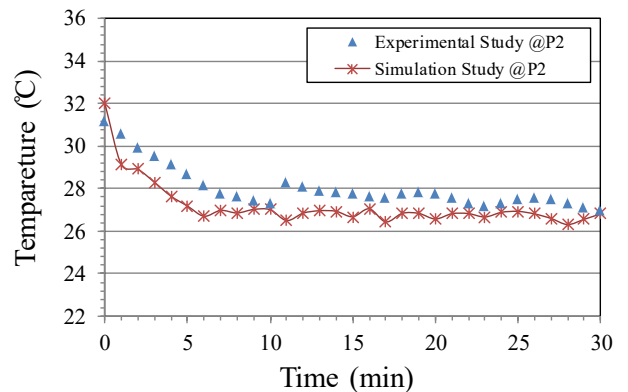
เมื่อพิจารณาอิทธิพลของค่าอุณหภูมิทางเข้าที่ส่งผลต่อการกระจายตัวอุณหภูมิของอากาศภายในห้อง จะเห็นได้ว่าที่ค่าอุณหภูมิทางเข้าที่สูงจะส่งผลให้อุณหภูมิภายในห้องมีค่าอุณหภูมิสูงกว่าค่าอุณหภูมิทางเข้าที่ต่ำกว่า



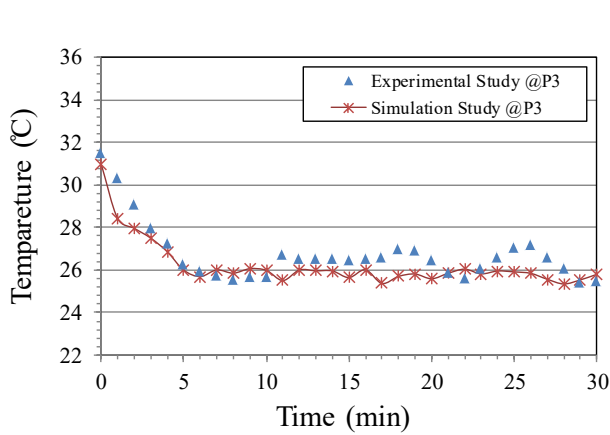
รูปที่ 4 ตำแหน่งในการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองและจากการใช้การจำลองเชิงตัวเลข



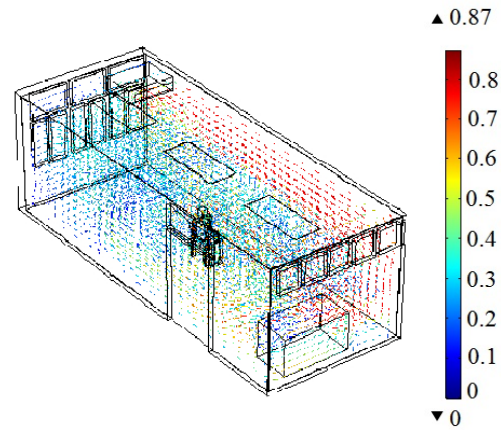
รูปที่ 5 กราฟเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ ที่ได้จากการทดลองและจากการใช้การจำลองเชิงตัวเลข ณ ตำแหน่งการวัดที่ 1



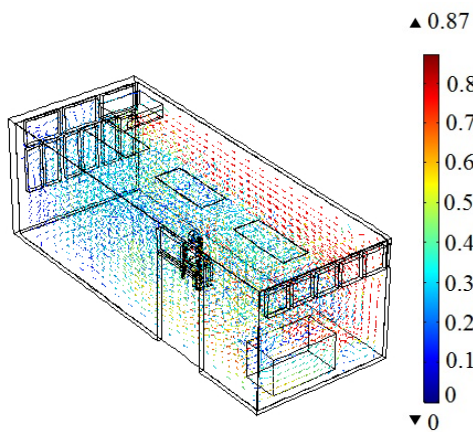
รูปที่ 6 กราฟเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ ที่ได้จากการทดลองและจากการใช้การจำลองเชิงตัวเลข ณ ตำแหน่งการวัดที่ 2



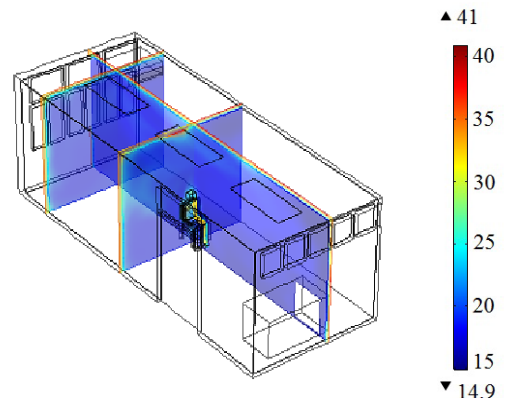
รูปที่ 7 กราฟเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอากาศ ที่ได้จากการทดลองและจากการใช้การจำลองเชิงตัวเลข ณ ตำแหน่งการวัดที่ 3



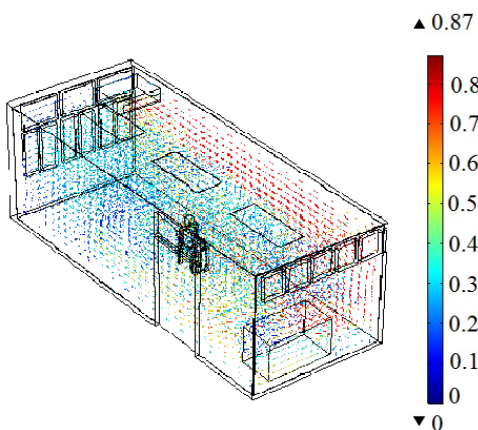
รูปที่ 10 รูปแบบการไหลของอากาศในห้องตัวอย่าง ที่อุณหภูมิขาเข้า 25 °C ณ เวลา 30 min



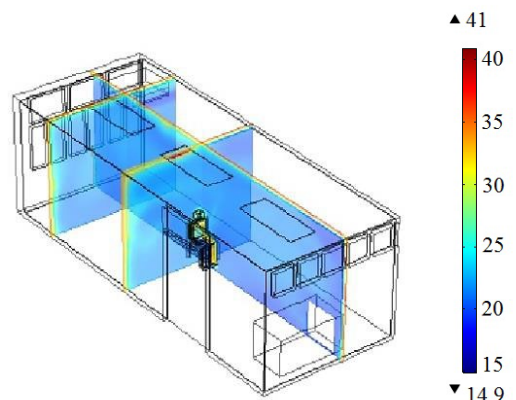
รูปที่ 8 รูปแบบการไหลของอากาศในห้องตัวอย่าง ที่อุณหภูมิขาเข้า 10 °C ณ เวลา 30 min



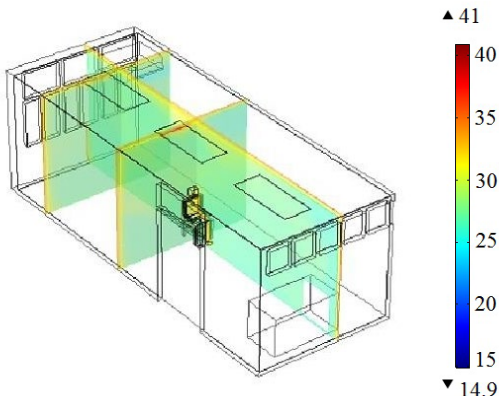
รูปที่ 11 รูปแบบการกระจายตัวอุณหภูมิของอากาศในห้องตัวอย่าง ที่อุณหภูมิขาเข้า 10 °C ณ เวลา 30 min



รูปที่ 9 รูปแบบการไหลของอากาศในห้องตัวอย่าง ที่อุณหภูมิขาเข้า 15 °C ณ เวลา 30 min

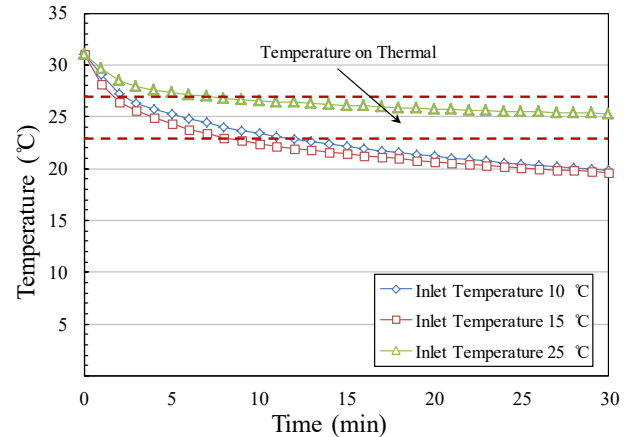


รูปที่ 12 รูปแบบการกระจายตัวอุณหภูมิของอากาศในห้องตัวอย่าง ที่อุณหภูมิขาเข้า 15 °C ณ เวลา 30 min



รูปที่ 13 รูปแบบการกระจายตัวอุณหภูมิของอากาศในห้องตัวอย่าง ที่อุณหภูมิขาเข้า 25 °C ณ เวลา 30 min

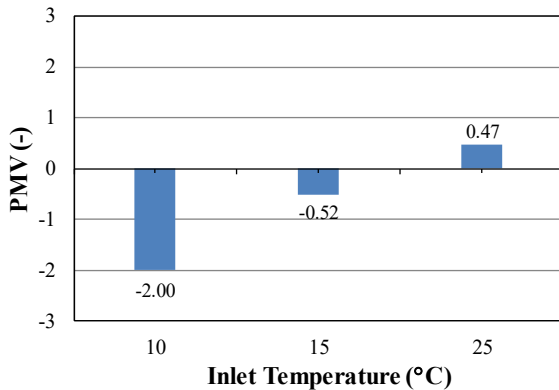
ในรูปที่ 14 จะแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศในห้องที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยมีค่าอุณหภูมิทางเข้าเท่ากับ 10 °C 15 °C และ 25 °C และความเร็วทางเข้าของอากาศ 2.7 m/s โดยเส้นประจะแสดงช่วงอุณหภูมิที่มีภาวะความสบายของผู้อยู่อาศัยในห้อง คือค่าอุณหภูมิ 23 °C - 27 °C [9] โดยจะพบว่าที่ค่าอุณหภูมิทางเข้าเท่ากับ 10 °C และ 15 °C จะมีช่วงเวลาที่ทำให้เกิดภาวะความสบายอยู่ในช่วงเวลาที่ใกล้เคียงกัน คือช่วงเวลาที่ช่วงแรกระหว่าง 2 - 10 min หลังจากนั้นจะพบว่าค่าอุณหภูมิจะค่อย ๆ ลดลงต่ำกว่าค่าอุณหภูมิของค่ามาตรฐานที่ทำให้ผู้อยู่อาศัยรู้สึกสบาย และที่ค่าอุณหภูมิทางเข้าเท่ากับ 25 °C อุณหภูมิจะค่อย ๆ ลดลงจากอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 31 °C และเข้าสู่ภาวะความสบายที่เวลา 6 min เป็นต้นไป



รูปที่ 14 การกระจายตัวของอุณหภูมิของห้องตัวอย่างที่อุณหภูมิทางเข้าต่างกัน ณ ตำแหน่งกึ่งกลางห้อง ที่เวลา 30 min

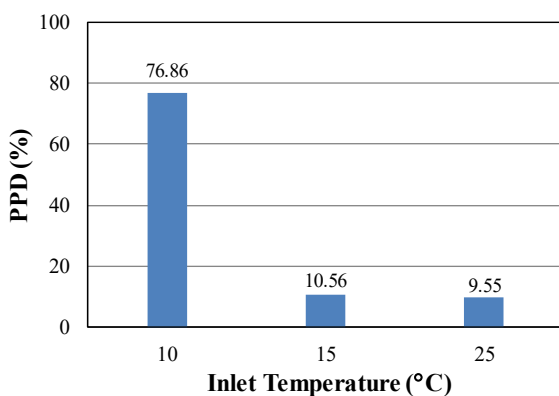
3.4 ภาวะความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัย

ภาวะความสบายเชิงความร้อนจะพิจารณาจากค่าดัชนีทำนายการไหลเวียน (PMV) โดยนำค่าอุณหภูมิของอากาศและค่าความเร็วของอากาศในตำแหน่งด้านบนศีรษะ แขนด้านซ้าย แขนด้านขวา และด้านล่างของขา โดยรอบของแบบจำลองผู้อยู่อาศัยภายในห้องที่เวลา 30 min มาคำนวณในสมการที่ (6) - (13) โดยรูปที่ 15 จะแสดงค่าดัชนีทำนายการไหลเวียน (PMV) ที่ค่าอุณหภูมิทางเข้าเท่ากับ 10 °C 15 °C และ 25 °C ตามลำดับ โดยพบว่า ค่าอุณหภูมิทางเข้าของอากาศที่ทำให้รู้สึกสบายที่สุดคือค่าอุณหภูมิทางเข้า 25 °C โดยมีค่า PMV เท่ากับ +0.47 (อยู่ระหว่าง -0.5 ถึง +0.5 ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้รู้สึกสบาย) รองลงมาคือที่ค่าอุณหภูมิทางเข้า 15 °C มีค่า PMV เท่ากับ -0.52 ซึ่งแสดงถึงค่าสภาวะอากาศที่ทำให้รู้สึกค่อนข้างหนาว โดยที่ค่าอุณหภูมิทางเข้า 10 °C มีค่า PMV เท่ากับ -2.00 ซึ่งแสดงถึงค่าสภาวะอากาศที่ทำให้รู้สึกหนาว



รูปที่ 15 กราฟแสดงค่าดัชนีทำนายการไหลเวียน (PMV) ของผู้อยู่อาศัยภายในห้องตัวอย่าง

ค่าเปอร์เซ็นต์ความรู้สึกไม่สบายของผู้อยู่อาศัยในห้อง (PPD) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าดัชนีทำนายการไหลเวียน (PMV) จะแสดงในรูปที่ 16 โดยพบว่า ค่าอุณหภูมิทางเข้าของอากาศที่ทำให้รู้สึกไม่สบายที่สุดคือค่าอุณหภูมิทางเข้า 10 °C โดยมีค่า PPD เท่ากับ 76.86 % รองลงมาคือที่ค่าอุณหภูมิทางเข้า 15 °C มีค่า PPD เท่ากับ 10.56 % โดยที่ค่าอุณหภูมิทางเข้า 25 °C มีค่า PPD เท่ากับ 9.55 % ซึ่งแสดงถึงค่าเปอร์เซ็นต์ความรู้สึกไม่สบายที่น้อยที่สุด โดยจะเห็นได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความรู้สึกไม่สบายจะมีความสอดคล้องกับค่าดัชนีทำนายการไหลเวียนในรูปที่ 15



รูปที่ 16 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความรู้สึกไม่สบายของผู้อยู่อาศัยภายในห้องตัวอย่าง

4. สรุปผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะการไหลของอากาศ การกระจายตัวของอุณหภูมิ และภาวะความสบายเชิงความร้อนภายในห้องตัวอย่างที่มีผู้อยู่อาศัยอยู่ภายในและมีเครื่องปรับอากาศในการทำงานจากการวิเคราะห์เชิงโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้แบบจำลองของห้องตัวอย่างและผู้อยู่อาศัยแบบ 3 มิติ ผลการศึกษาพบว่า ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศทั้ง 3 ตำแหน่ง ที่ได้จากวิธีการจำลองเชิงตัวเลขจะสอดคล้องกับค่าอุณหภูมิของอากาศที่ได้จากการทดลอง และจากการศึกษาอิทธิพลของค่าอุณหภูมิของอากาศทางเข้าที่ส่งผลต่อลักษณะการไหลของอากาศ การกระจายตัวของอุณหภูมิ และภาวะความสบายเชิงความร้อนจะพบว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิของอากาศทางเข้าจะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญต่อรูปแบบการไหลของอากาศภายในห้อง แต่จะส่งผลโดยตรงต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศภายในห้อง และค่าอุณหภูมิทางเข้าของอากาศที่ 25 °C จะทำให้ผู้อยู่อาศัยภายในห้องมีภาวะความสบายมากที่สุด รองลงมาคือที่ค่าอุณหภูมิทางเข้าของอากาศที่อุณหภูมิ 15 °C และที่อุณหภูมิ 10 °C ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าอุณหภูมิทางเข้าของอากาศที่ 10 °C จะทำให้ผู้อยู่อาศัยภายในห้องมีภาวะความรู้สึกไม่สบายสูงสุด รองลงมาคือที่ค่าอุณหภูมิทางเข้าของอากาศที่ 15 °C และ 25 °C ตามลำดับ ผลที่ได้จากการศึกษาจะสามารถใช้เป็นแนวทางในการประยุกต์ในการออกแบบอาคารเพื่อให้เหมาะสมกับสภาวะของสิ่งแวดล้อมภายนอก เพื่อให้มีความเหมาะสมแก่ผู้อยู่อาศัยภายในอาคารเพื่อช่วยในการประหยัดพลังงานในอาคาร

5. เอกสารอ้างอิง



- [1] สรญา ประวิตธีรางกูร (2543). อิทธิพลของมวลสารผนังภายนอกที่มีต่อสภาวะน่าสบายและภาระการปรับอากาศในการออกแบบอาคาร. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [2] Nada S.A., El-Batsh H.M., Elattar H.F., and Ali N.M. (2016). CFD investigation of airflow pattern, temperature distribution and thermal comfort of UFAD system for theater buildings applications, *Journal of Building Engineering*, vol. 6, pp. 274 – 300.
- [3] Valeria V. and Ginevra S. (2017). A numerical prediction of the passive cooling effects on thermal comfort for a historical building in Rome, *Energy and Buildings*, vol. 157, pp. 1 – 10.
- [4] Atish D. and Upender G. (2015). A case study on human bio-heat transfer and thermal comfort within CFD, *Building and Environment*, vol. 94, pp. 122 – 130.
- [5] Peter V. (2015). Fifty years of CFD for room air distribution, *Building and Environment*, vol. 91, pp.78 – 90.
- [6] Aditya L., Mahlia, T.M.I., Rismanchi B., Hasan M.H., Metselaar H.S.C., Muraza O. and Aditiya H.B. (2017). A review on insulation materials for energy conservation in buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 73, pp. 1352 – 1365.
- [7] Database for thermal and electromagnetic parameters of biological tissues. Tissue properties, (Online) <http://www.itis.ethz.ch/database>
- [8] Fanger P.O. (1972). Thermal comfort analysis and application in environmental engineering. McGraw-Hill, New York, p. 244.
- [9] ANSI/ ASHRAE Standard 55-2004, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, (2004).
- [10] Orosa, J.A. and Oliveira A.C. (2011). Passive Methods as a Solution for Improving Indoor environments, Springer.
- [11] Diana E. (2017). A review of thermal comfort models and indicators for indoor environment, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 79, pp. 1353 – 1379.