

การศึกษาเชิงตัวเลขของการระบายอากาศแบบธรรมชาติภายในอาคารด้วยระบบหลังคาแสงอาทิตย์แบบหนึ่งช่องทางไหล

ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา¹ ทวีศิลป์ เล็กประดิษฐ์² ศิวกร ศรีธัญญากร² และ พรสวรรค์ ทองใบ^{2*}

¹สาขาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

²สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

^{1,2,744} ถนนสุนทราราม ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รับบทความ 3 เมษายน 2566 แก้ไขบทความ 29 เมษายน 2568 ตอรับบทความ 4 มิถุนายน 2568

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบจากความเข้มของแสงอาทิตย์และตัวแปรเชิงเรขาคณิต ของหลังคาแสงอาทิตย์แบบหนึ่งช่องทางไหลต่อการระบายอากาศแบบธรรมชาติด้วยวิธีเชิงตัวเลข ตัวแปรบ่งชี้การระบายอากาศในที่นี้ คืออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ทำการสอบเทียบโปรแกรม SolidWorks Flow Simulation ด้วยการจำลองปัญหาการไหลผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้งเปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นยำ จากนั้นจำลองปัญหาการไหลผ่านอาคารใน 3 มิติ โดยให้การไหลของอากาศในตัวอาคารเป็นการไหลแบบธรรมชาติที่เกิดจากแรงลอยตัว กำหนดขนาดของอาคารจำลองเป็น กว้าง 1 เมตร ยาว 1 เมตร สูง 1 เมตร ผนัง พื้น และเพดานถูกกำหนดให้เป็นฉนวนสมบูรณ์ ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ ความเข้มของแสงอาทิตย์ ความกว้างของช่องทางเข้า ความกว้างของช่องทางไหลอากาศใต้ห้องหลังคา มุมเอียงของหลังคา ความสูงของปล่อง และมุมบานตัวของช่องทางไหลของอากาศใต้หลังคา ผลลัพธ์จากการจำลองพบว่าทุกตัวแปรส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศอย่างมีนัยสำคัญดังนี้ กรณีมีปล่องด้านบนของหลังคาที่มีความสูง 25 เซนติเมตร สามารถเพิ่มอัตราการไหลของอากาศได้ถึง 62 เปอร์เซ็นต์ เทียบกับกรณีไม่มีปล่อง กรณีหลังคาเอียง 30 องศา สามารถเพิ่มอัตราการไหลของอากาศได้ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ เทียบกับกรณีหลังคาเอียง 15 องศา กรณีความกว้างของช่องทางไหลของอากาศ 15 เซนติเมตร มีค่าอัตราการไหลของอากาศสูงกว่ากรณี 5 เซนติเมตรถึง 47 เปอร์เซ็นต์ และกรณีมุมบานตัวของหลังคา 9 องศา สามารถเพิ่มอัตราการไหลได้ 29 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มของแสงอาทิตย์ที่สูงขึ้นส่งผลให้อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศสูงขึ้นตามไปด้วย การยืนยันความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองนี้ นอกจากที่ได้ทำการสอบเทียบโปรแกรมกับปัญหาการไหลผ่านร้อนในแนวตั้งแล้ว ทีมผู้วิจัยยังทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองที่เคยทำไว้ในอดีต โดยเลือกผลลัพธ์จากกรณีศึกษาที่ความสูงปล่องและความกว้างของช่องทางเข้าของอาคารต่าง ๆ ซึ่งพบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และจากการทดลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน จึงทำให้มั่นใจในความถูกต้องของผลลัพธ์สำหรับการวิจัยในครั้งนี้

คำสำคัญ : ระบบหลังคาแสงอาทิตย์แบบหนึ่งช่องทางไหล; การระบายอากาศแบบธรรมชาติ; มุมบานตัวของช่องทางไหลของอากาศ

A Numerical Study of Natural Ventilation in Building by Using Roof Solar Collector with Single-Air Channel (RSC-SC)

Nuttapong Wongbubpa¹ Taveesin Lekpradit² Siwakorn Sritunyakorn² and Pornsawan Tongbai^{2*}

¹Department of mechatronics engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan

²Department of mechanical engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan

^{1, 2}744 Suranarai Road, Mueang, Nakhon Ratchasima, 30000

Received 3 April 2023; Revised 29 April 2025; Accepted 4 June 2025

Abstract

This study investigates the impact of solar radiation intensity and the geometrical parameters of a roof solar collector with a single-air channel (RSC-SC) on natural ventilation performance through numerical simulations. The mass flow rate of air was selected as the primary indicator of ventilation effectiveness. SolidWorks Flow Simulation was calibrated using the classical vertical heated plate problem, and three-dimensional airflow simulations were conducted for a model building sized 1x1x1 m, with perfectly insulated walls, floor, and ceiling. Key parameters examined include solar radiation intensity, inlet width, under-roof channel width, roof tilt angle, chimney height, and diffuser angle. The results revealed that all variables significantly enhanced the mass flow rate. For example, a 25 cm chimney increased airflow by 62% compared to no chimney; a 30-degree roof tilt improved airflow by 90% compared to a 15-degree tilt; increasing the under-roof channel width to 15 cm enhanced airflow by 47%; and a 9-degree diffuser angle increased airflow by 29%. Higher solar radiation intensity also corresponded to greater mass flow rates. The validity of the simulation results was confirmed through comparisons with both calibrated benchmark solutions and experimental data from previous studies. Consistent trends between simulations and experiments underscore the reliability of the simulation approach adopted in this research.

Keywords : Roof solar collector with a single air channel; Natural ventilation; Expansion angle of the air channel

** Corresponding Author. Tel.: +66 4423 3073, E-mail Address: pornsawan.to@rmuti.ac.th*

1. บทนำ

การประยุกต์ใช้หลังคาแสงอาทิตย์หรืออุปกรณ์เก็บรังสีอาทิตย์เพื่อช่วยระบายอากาศแบบธรรมชาติในอาคาร เป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ ประกอบกับประเทศไทยอยู่ในเขตร้อน ความเข้มของแสงอาทิตย์เฉลี่ยต่อปีมีค่าค่อนข้างสูงจึงยิ่งช่วยส่งเสริมอัตราการระบายอากาศ อีกทั้งพลังงานแสงอาทิตย์ยังเป็นพลังงานทางเลือกรูปแบบหนึ่งที่เป็นพลังงานสะอาดไม่ก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อช่วยในการระบายอากาศแบบธรรมชาติจึงสามารถช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ โดยอาจใช้ร่วมกับระบบระบายอากาศแบบใช้พลังงานไฟฟ้า เช่น เครื่องปรับอากาศและทำความเย็นหรือพัดลม เป็นต้น

ระบบหลังคาแสงอาทิตย์แบบหนึ่งช่องทางไหลในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 3 หนึ่งคือหลังคาชั้นนอก ทำจากวัสดุโปร่งใส (Transparent Roof) จึงมีค่าการส่งผ่านความร้อนสูงทำให้แสงอาทิตย์ทะลุผ่านได้มาก สองคือช่องทางไหลของอากาศ (Air Channel) สามคือหลังคาชั้นในหรือแผ่นดูดกลืนแสงอาทิตย์ (Absorber Plate) ทำหน้าที่ดูดกลืนความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ทะลุผ่านหลังคาชั้นนอกเข้ามาก่อนที่จะถ่ายเทความร้อนนี้ให้กับอากาศที่อยู่ในช่องทางไหล และส่วนที่ 4 คือปล่อง (Chimney) ติดตั้งที่ด้านบนสุดของหลังคาเอียงซึ่งเป็นปล่องธรรมชาติที่มีหน้าที่เพิ่มความสูงในแนวตั้งให้กับระบบเพื่อช่วยเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ (Stack Effect) โดยไม่ได้ทำหน้าที่รับแสงแดดแต่อย่างใด ซึ่งแตกต่างจากปล่องในงานวิจัยอื่น ๆ ที่ถูกออกแบบให้ปล่องมีหน้าที่หลักในการรับแสงอาทิตย์ ความร้อนที่ผ่านหลังคาโปร่งใสเข้ามาจะถูกกักให้อยู่ในช่องทางไหลของอากาศโดยพฤติกรรมเรือนกระจก (Greenhouse Effect) อากาศภายในช่องทางไหลจะได้รับความร้อนจากแผ่นดูดกลืนแสงอาทิตย์ เมื่ออุณหภูมิของอากาศสูงขึ้นความ

หนาแน่นจึงลดลง อากาศในช่องทางไหลที่มีน้ำหนักเบานี้จะลอยตัวขึ้นผ่านช่องทางไหล และไหลออกสู่บรรยากาศผ่านปล่องที่อยู่ด้านบนของหลังคา หากประยุกต์ระบบหลังคาแสงอาทิตย์เข้ากับบ้านหรืออาคารทั่วไป ระบบนี้ก็จะสามารถเหี่ยวนำอากาศจากด้านนอกซึ่งถือว่าเป็นอากาศบริสุทธิ์ (Fresh Air) เข้าสู่อาคารผ่านช่องเปิดที่เตรียมไว้ทางด้านล่าง ทำหน้าที่ระบายอากาศและ/หรือทำความเย็นไปพร้อมกัน หลักการทำงานของระบบนี้ค่อนข้างง่ายแต่การออกแบบให้ได้ประสิทธิภาพสูงนั้นมีความยุ่งยากพอสมควร เพราะต้องมีทั้งทฤษฎีการคำนวณและการทดสอบที่ดีเป็นเครื่องมือในการทำงาน

งานวิจัยในอดีตที่พบว่ามีการใช้ระบบหลังคาแสงอาทิตย์หรือระบบปล่องแสงอาทิตย์เพื่อการระบายอากาศมีทั้งการศึกษาเชิงทฤษฎี การศึกษาเชิงตัวเลข และการทดลอง ดังต่อไปนี้ งานวิจัยของ N.K. Bansal et al [1], [2] เป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการระบายอากาศแบบธรรมชาติด้วยการใช้ปล่องแสงอาทิตย์ พบว่าปล่องแสงอาทิตย์สามารถเหี่ยวนำให้เกิดอัตราการไหลต่อพื้นที่ 50-165 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ผลลัพธ์ที่สำคัญจากงานวิจัยหลายงานวิจัยพบว่าพารามิเตอร์ทางเรขาคณิต (ความกว้าง ความสูง มุมเอียง) ของปล่องส่งผลต่ออัตราการระบายอากาศ แต่ขนาดที่เหมาะสมของแต่ละพารามิเตอร์ยังมีความหลากหลาย [3]-[8] ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของปล่องด้วย โดยปี 2022 N. Goa et al [9] เสนอการออกแบบปล่องแสงอาทิตย์บนหลังคาที่ผสมพลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์ในการเพิ่มประสิทธิภาพการระบายอากาศภายในอาคารโดยทำการศึกษาเชิงตัวเลขพบว่ามุมเอียงของปล่องช่วยเพิ่มอัตราการระบายอากาศอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังพบการศึกษาการระบายอากาศภายในบ้านพักอาศัยที่อยู่ในพื้นที่ของกรุงเทพมหานคร ซึ่งออกแบบให้ปล่องเป็นส่วนหนึ่งของหลังคา หรือ

เรียกว่า หลังคาสองชั้น ซึ่งแนะนำขนาดที่เหมาะสมของความยาวปล่องคือ 1-2 เมตร ความกว้างของช่องอากาศ 10-14 เซนติเมตร และมุมเอียงของหลังคา 20-45 องศา โดยคำนึงถึงความสะดวก ต้นทุนและความสะดวกในทางปฏิบัติ [10]-[14]

P. Tongbai et al [15] เสนอวิธีการระบายอากาศด้วยห้องหลังคาและปล่องแสงอาทิตย์ที่สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการระบายอากาศในปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการของผู้อาศัย นอกจากนี้ยังพบว่าความสูงและขนาดของปล่องตลอดจนความเข้มของแสงแสงอาทิตย์ต่างส่งผลต่ออัตราการระบายอากาศ มุมเอียงที่ควรนำไปใช้ในทางปฏิบัติของหลังคาคือ 45 องศา จากผลลัพธ์ในงานวิจัยของ A. Koonsrisuk et al [16] ซึ่งศึกษาการไหลของอากาศผ่านปล่องแสงอาทิตย์เพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า พบว่าการทำให้ช่องทางไหลของอากาศบานตัวออกสามารถเพิ่มอัตราการไหลของอากาศในปล่องได้ P. Tongbai et al [17], [18] จึงนำแนวคิดนี้ไปใช้กับปล่องแสงอาทิตย์เพื่อการระบายอากาศ พบว่าอัตราการไหลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเกือบจะเป็นเชิงเส้นที่มุมบานตัวของหลังคาในช่วง 1-5 องศา โดยที่มุมบานตัว 6 องศา อัตราการไหลเพิ่ม 30 เปอร์เซ็นต์ (เทียบกับกรณีไม่มีมุมบานตัว) เมื่อเพิ่มมุมบานตัวไปจนถึง 12 องศา อัตราการไหลยังคงเพิ่มขึ้นแต่เพิ่มด้วยอัตราที่ลดลง จากนั้นศึกษาอัตราการเพิ่มขึ้นของการระบายอากาศเมื่อต่อปล่องแนวตั้งเข้ากับทางออกของห้องหลังคา โดยปล่องนี้เป็นปล่องแบบธรรมดาที่ช่วยเพิ่มความสูงระหว่างช่องทางเข้าและออกของระบบเท่านั้น ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มอัตราการไหลได้ถึง 38 เปอร์เซ็นต์ ที่ความสูงปล่อง 0.75 เมตร นอกจากนี้ P. Tongbai et al [19] ยังศึกษาเปรียบเทียบผลของลักษณะของหลังคาเอียงกับหลังคาแบบราบที่ต่อปล่องให้มีความสูงในแนวตั้งเท่ากัน ซึ่งพบว่าหลังคาแบบเอียงให้ค่าอัตราการไหลสูงกว่าหลังคาแบบราบที่มีปล่อง

นับเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะสามารถนำไปช่วยตัดสินใจในการสร้างอาคารเพื่อยุ่อาศัยต่อไป จากนั้น P. Tongbai et al [20] ได้ทำการศึกษาเชิงตัวเลขใน 3 มิติ และพบว่าตำแหน่งของปล่องบนหลังคาไม่มีผลอย่างมีนัยต่ออัตราการไหลที่เกิดขึ้นแต่อย่างใด ต่อมา P. Tongbai et al [21] ได้ทำการทดลองศึกษาตัวแปรทางโครงสร้างต่ออัตราการไหลเชิงมวล และอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมง (Air Change per Hour, ACH) ซึ่งคืออัตราการไหลที่ถูกแปลงเป็นปริมาตรของอากาศที่ไหลผ่านอาคารในเวลา 1 ชั่วโมง โดยคิดเป็นจำนวนเท่าของปริมาตรห้อง พบว่าตัวแปรทางโครงสร้างของหลังคาแสงอาทิตย์ต่างมีผลต่ออัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมงทั้งสิ้น

สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม SolidWorks Flow Simulation ถึงผลกระทบจากความเข้มของแสงแสงอาทิตย์ และตัวแปรเชิงเรขาคณิตต่าง ๆ ที่มีต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ และเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับผลการทดลองของ P. Tongbai et al [21] ซึ่งพบว่าทั้งความเข้มของแสงแสงอาทิตย์และตัวแปรเชิงเรขาคณิตต่าง ๆ นั้น ต่างมีผลต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศทั้งสิ้น ซึ่งหมายถึงย่อมส่งผลต่ออัตราการระบายอากาศที่จะเกิดขึ้นนั่นเอง นอกจากนี้จากการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับผลการทดลองในอดีต พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ทำให้มั่นใจได้ว่าการจำลองปัญหาการไหลเพื่อศึกษาการระบายอากาศภายในอาคารด้วยหลังคาแสงอาทิตย์แบบหนึ่งช่องทางไหลด้วยโปรแกรม SolidWorks Flow Simulation นี้ มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ ซึ่งจะสามารถช่วยลดเวลาและลดค่าใช้จ่ายในการศึกษาได้อีกทั้งผลลัพธ์ที่ได้ยังสามารถช่วยให้ได้แนวทางในการออกแบบอาคารหรือบ้านพักอาศัยเพื่อการระบายอากาศแบบธรรมชาติได้เป็นอย่างดี ซึ่งจะสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้เป็นอย่างมาก

2. เปรียบวิธีวิจัย

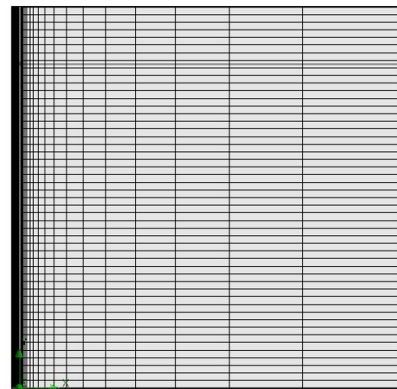
ทำการจำลองการไหลใน 3 มิติ ด้วยโปรแกรม SolidWorks Flow Simulation ผ่านบ้านจำลองขนาดเล็ก ทำการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมกับปัญหาการไหลผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้ง ซึ่งเป็นปัญหาที่มีรูปแบบคล้ายคลึงกับปัญหาการไหลผ่านอาคารที่จะทำการศึกษาในครั้งนี้ และเป็นปัญหาที่สามารถหาผลเฉลยแม่นยำตรงได้ จากนั้นจึงทำการจำลองการไหลผ่านบ้านจำลองที่ใช้ในการศึกษา และทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองกับผลลัพธ์จากการทดลองของงานวิจัยในอดีต [21] ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน

2.1 การทดสอบโปรแกรม

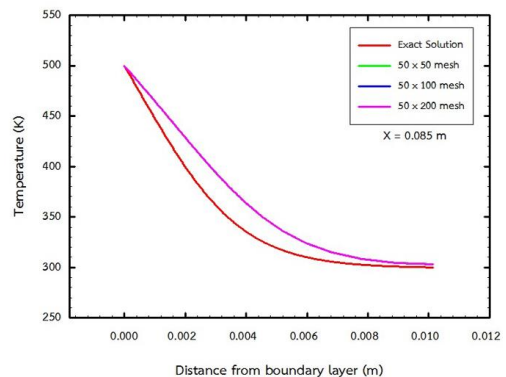
ทำการทดสอบโปรแกรม SolidWorks Flow Simulation ด้วยปัญหาการไหลแบบการพาอิสระ (Free Convection) ผ่านแผ่นร้อนแนวตั้งใน 2 มิติ ที่มีอุณหภูมิ 500 เคลวิน อากาศแวดล้อมมีอุณหภูมิ 300 เคลวิน ความดัน 1 บรรยากาศ เปรียบเทียบผลลัพธ์กับผลเฉลยแม่นยำตรงที่คำนวณจากกรรมวิธีความเสมือน (Similarity Method) ซึ่งใช้ Boussinesq Model ในการจัดจำลองความหนาแน่นของอากาศ ในการจำลองกำหนดขนาดของโดเมนเป็น 0.1×0.1 เมตร เมช (Mesh) ที่ใช้เป็นเมชสี่เหลี่ยมจำนวน 50×50 เมช ซึ่งจำนวนเมชนี้ได้ผ่านการปรับแต่งเมชให้เหมาะสม (Mesh Optimization) เรียบร้อยแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 1

ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองที่จำนวนเมชต่าง ๆ เปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงแสดงในรูปที่ 2 จะเห็นว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลเฉลยแม่นยำตรง (ทฤษฎี) นั่นคือลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีแนวโน้มลดลงตามระยะทางจากแผ่นร้อน ทำการคำนวณค่าผิดพลาดสูงสุดได้ประมาณ 5.6 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่าค่อนข้างน้อยและอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ อนึ่งพึงเข้าใจว่าผลเฉลยแม่นยำตรงนี้เป็นผลเฉลยของสมการในชั้นขีตผิวซึ่งเป็นสมการ

ประมาณการของสมการเต็มรูป จึงมีความผิดพลาดในตัวอยู่ระดับหนึ่ง (แม้จะเรียกว่าผลเฉลยแม่นยำตรงก็ตาม) นอกจากนี้จะเห็นว่าเส้นกราฟอุณหภูมิที่ได้จากการจำลองที่จำนวนเมช 50×50 , 50×100 และ 50×200 ซ้อนทับกันพอดี ซึ่งหมายถึงสามารถใช้เมชจำนวน 50×50 ก็เพียงพอแล้วนั่นเอง



รูปที่ 1 เมชที่ใช้ในการทดสอบโปรแกรม

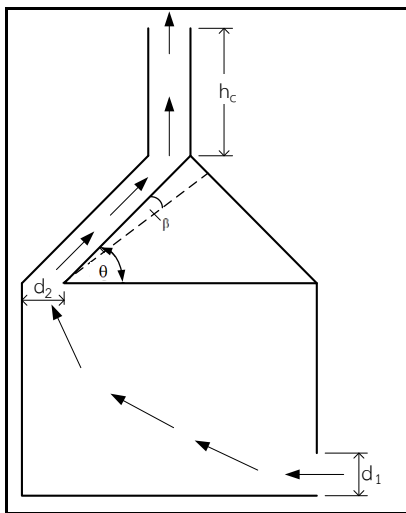


รูปที่ 2 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

2.2 ลักษณะของบ้านที่ใช้ในการจำลอง

กำหนดให้ขนาดของบ้านต้นแบบที่ใช้ในการจำลองมีขนาดเดียวกันกับบ้านที่ใช้ในการทดลองของงานวิจัยในอดีต [21] นั่นคือ กว้าง×ยาว×สูง เท่ากับ $1 \times 1 \times 1$ เมตร มุมเอียงของหลังคา 45 องศา ช่องเปิดด้านล่างถูกเปิดตลอดความกว้างของตัวบ้าน ขนาดพื้นที่หน้าตัดการไหลของปล่องมีค่าคงที่ กว้าง และยาว คือ 15 เซนติเมตร และ 15 เซนติเมตร ตามลำดับ

หลังคาด้านทิศใต้จะเป็นหลังคาสองชั้น ชั้นนอกเป็นหลังคาโปร่งใส ลักษณะของบ้านจำลองและตัวแปรเชิงเรขาคณิตต่าง ๆ ที่ทำการศึกษาแสดงในรูปที่ 3 โดยได้จำลองเพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ดังนี้ 1) ความเข้มของแสงอาทิตย์ (I): 500, 600, 700 และ 800 วัตต์ต่อตารางเมตร (ซึ่งเป็นช่วงความเข้มของแสงอาทิตย์โดยเฉลี่ยของประเทศไทย) 2) มุมเอียงของหลังคา (θ): 15, 30, 45 และ 60 องศา 3) ความสูงของปล่อง (h_c): 0, 25, 50, 75 และ 100 เซนติเมตร 4) ความกว้างของช่องทางเข้าของอากาศ (d_1): 5, 10 และ 15 เซนติเมตร 5) ความกว้างของช่องทางไหลของอากาศ (d_2): 5, 10 และ 15 เซนติเมตร และ 6) มุมบานตัวของช่องทางไหลของอากาศ (β): 0, 3, 6 และ 9 องศา



รูปที่ 3 ตัวแปรเชิงเรขาคณิตของอาคาร

2.3 สมมุติฐานที่ใช้ในการจำลอง

สมมุติฐานที่ใช้ในการจำลองด้วยวิธีเชิงตัวเลขมีดังนี้

1. เป็นปัญหาการไหลแบบ 3 มิติ ภายในอาคาร (Internal Flow)
2. ไม่พิจารณาการไหลที่เกิดจากแรงลมภายนอก (Wind Effect) โดยการไหลของอากาศผ่านอาคารเกิดจากแรงลอยตัว (Buoyancy-Driven Flow) เท่านั้น

3. แหล่งความร้อนกำหนดด้วยค่าความเข้มของแสงแดด โดยกำหนดเป็นค่าพลังความร้อนที่พื้นผิวของหลังคาชั้นในบริเวณช่องทางไหลของอากาศ

4. เป็นการไหลแบบมีความหนืดที่สภาวะคงตัว

5. สมมุติให้ผนัง พื้น และเพดาน เป็นผนังแบบฉนวนสมบูรณ์ (Adiabatic Wall)

6. อากาศภายนอกอาคารเป็นอากาศที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (ซึ่งเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศในฤดูร้อนของประเทศไทย) ที่ความดันบรรยากาศ

2.4 สมการควบคุมของแบบจำลองเชิงตัวเลข

สมการควบคุมของปัญหาการไหลแบบหนืดภายใต้สภาวะคงตัวใน 3 มิติ ประกอบด้วยสมการอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ สมการอนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และสมการอนุรักษ์พลังงาน [22] ตามลำดับ ดังนี้

$$\dot{m} = \rho AV \quad (1)$$

$$\frac{dM_{CV}}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \quad (2)$$

$$\frac{d(M\vec{V})_{CV}}{dt} = \vec{F}_{CV} + \dot{m}_{in} \vec{V}_{in} - \dot{m}_{out} \vec{V}_{out} \quad (3)$$

$$\frac{d(Me)_{CV}}{dt} = \dot{Q}_{CV} - \dot{W}_{CV} + \dot{m}_{in} e_{in} - \dot{m}_{out} e_{out} \quad (4)$$

โดยที่

$\dot{m}$ = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (กิโลกรัมต่อวินาที)

ρ = ความหนาแน่นของอากาศ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

A = พื้นที่หน้าตัด (ตารางเมตร)

V = ความเร็วของอากาศ (เมตรต่อวินาที)

$$\frac{dM_{CV}}{dt} = \text{อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในปริมาตร}$$

ควบคุม (กิโลกรัมต่อวินาที)

$$\dot{m}_{in} = \text{อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศขาเข้า}$$

(กิโลกรัมต่อวินาที)

$$\dot{m}_{out} = \text{อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศขาออก}$$

(กิโลกรัมต่อวินาที)

$$\frac{d(M\bar{V})_{CV}}{dt} = \text{อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมใน}$$

ปริมาตรควบคุม (กิโลกรัม-เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)

$$\bar{F}_{CV} = \text{แรงที่กระทำต่อปริมาตรควบคุม (กิโลกรัม-}$$

เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)

$$\bar{V}_{in} = \text{ความเร็วของอากาศขาเข้าปริมาตรควบคุม}$$

(เมตรต่อวินาที)

$$\bar{V}_{out} = \text{ความเร็วของอากาศขาออกปริมาตรควบคุม}$$

(เมตรต่อวินาที)

$$\frac{d(Me)_{CV}}{dt} = \text{อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานใน}$$

ปริมาตรควบคุม (กิโลกรัม-จูลต่อวินาที)

$$\dot{Q}_{CV} = \text{อัตราการถ่ายโอนความร้อนจากสิ่งแวดล้อม}$$

เข้าปริมาตรควบคุม (กิโลกรัม-จูลต่อวินาที)

$$\dot{W}_{CV} = \text{อัตราการถ่ายโอนงานจากสิ่งแวดล้อมเข้า}$$

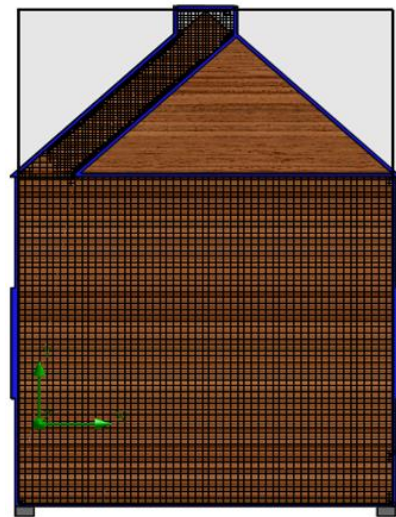
ปริมาตรควบคุม (กิโลกรัม-จูลต่อวินาที)

$$e_{in} = \text{พลังงานที่ไหลเข้าปริมาตรควบคุม (จูล)}$$

$$e_{out} = \text{พลังงานที่ไหลออกปริมาตรควบคุม (จูล)}$$

หาคำตอบให้กับปัญหาการไหลผ่านอาคารด้วยวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite Volume Method) โดยใช้โปรแกรม SolidWorks Flow Simulation กำหนดเงื่อนไขขอบเขตบริเวณช่องทางเข้าเป็นแบบ Inlet ที่ความดันรวม (Total Pressure) เท่ากับความดันบรรยากาศ บริเวณทางออกที่ปลายปล่องเป็นแบบ Outlet ที่ความดันสถิต (Static Pressure) เท่ากับความดันบรรยากาศ เมชที่ใช้ในการจำลองเป็นเมชแบบกล่องสี่เหลี่ยม โดยกำหนดเมชบริเวณช่องทางเข้า

ช่องทางไหลของอากาศและกล่องให้มีความละเอียดกว่าเมชภายในห้อง ทำการปรับแต่งเมช (Mesh Optimization) จนได้จำนวนเมชที่เหมาะสม ซึ่งมีค่าโดยประมาณเท่ากับ 7500 เมช ตัวอย่างเมชที่ใช้ในการจำลองเชิงตัวเลขแสดงดังรูปที่ 4 ทำการตรวจสอบค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ช่องเปิดทางเข้าและทางออกที่ได้จากการจำลองพบว่ามีค่าเท่ากันทุกกรณีศึกษาซึ่งเป็นไปตามกฎอนุรักษ์มวล



รูปที่ 4 ตัวอย่างเมชที่ใช้ในการจำลองในมุมมอง 2 มิติ

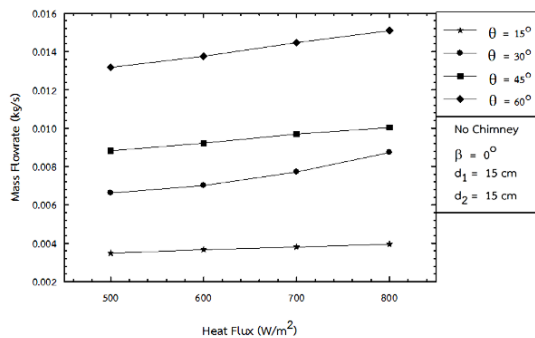
3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ไหลผ่านบ้านจำลอง (ซึ่งเป็นตัวแปรที่บ่งชี้ปริมาณการระบายอากาศ) เป็นดังนี้

3.1 ผลกระทบของความเข้มของแสงอาทิตย์ต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าความเข้มของแสงอาทิตย์ที่มากขึ้นส่งผลให้อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเพิ่มขึ้น ซึ่งนับเป็นพฤติกรรมที่ดีเนื่องจากอากาศที่ร้อนขึ้นยิ่งก่อให้เกิดการระบายอากาศที่มากขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเมื่อแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นมีค่าไม่สูงมากเมื่อเทียบกับผลกระทบจากการเพิ่มค่า

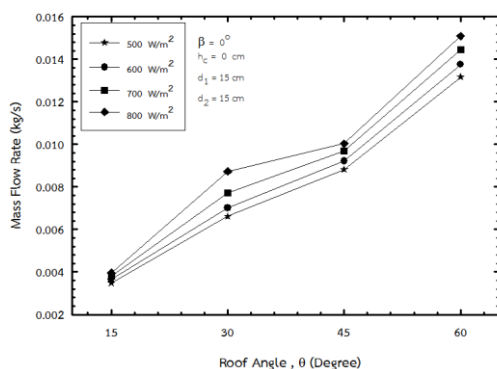
ตัวแปรเชิงเรขาคณิตอื่น ๆ ดังจะเห็นได้จากความชันของเส้นกราฟที่มีค่อนข้างน้อย โดยกรณีบ้านที่มีหลังคาเอียง 60 องศา ที่ความเข้มข้นของแสงอาทิตย์ 800 วัตต์ต่อตารางเมตร สามารถเพิ่มอัตราการไหลเชิงมวลได้มากที่สุดเท่ากับ 13.6 เปอร์เซ็นต์ เทียบกับกรณีความเข้มข้นของแสงอาทิตย์ที่ 500 วัตต์ต่อตารางเมตร



รูปที่ 5 ผลกระทบของความเข้มข้นของแสงอาทิตย์ต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

3.2 ผลกระทบของมุมเอียงของหลังคาต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

จากรูปที่ 6 พบว่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเพิ่มขึ้นตามมุมเอียงของหลังคาที่มากขึ้น ยกเว้นที่มุมเอียง 45 องศา ที่พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศมีค่าลดลงเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลจากการสูญเสียเนื่องจากการหมุนวนของอากาศ

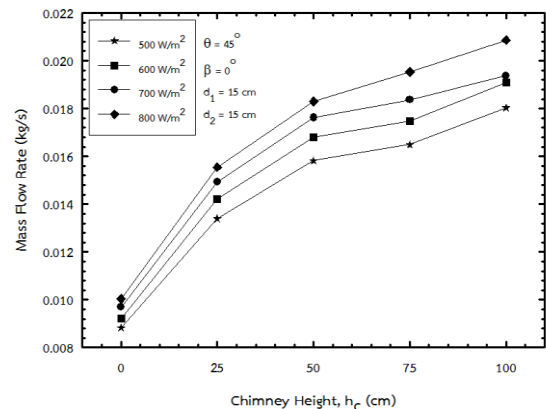


รูปที่ 6 ผลกระทบของมุมเอียงของหลังคาต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

นอกจากนั้นยังพบอีกว่าการเพิ่มมุมเอียงของหลังคาสามารถเพิ่มอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศได้ค่อนข้างมาก ดังจะเห็นได้จากความชันของเส้นกราฟที่เกือบจะเป็น 45 องศา ที่ทุก ๆ ความเข้มข้นของแสงอาทิตย์ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัตินั้นอาจจะต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่น ๆ เช่น รูปลักษณ์ของอาคารโดยรวม ความสวยงาม หรือต้นทุนวัสดุที่ต้องใช้ในการทำหลังคา เป็นต้น

3.2 ผลกระทบของความสูงของปล่องต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

จากรูปที่ 7 พบว่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความสูงของปล่อง ซึ่งเป็นผลของ Stack Effect กล่าวคืออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแปรผันตรงกับระยะความสูงในแนวตั้งระหว่างช่องทางเข้าและช่องทางออกของอากาศ



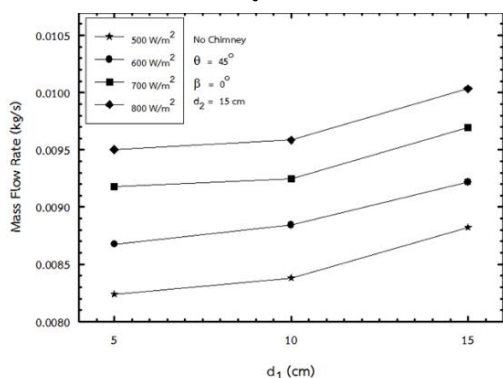
รูปที่ 7 ผลกระทบของความสูงปล่องต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

จากรูปจะเห็นได้ว่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงความสูงของปล่องจาก 0 ไปจนถึง 50 เซนติเมตร จากนั้นอัตราการเพิ่มขึ้นจะมีค่าลดลงเล็กน้อย พิจารณาได้จากความชันของเส้นกราฟที่มากในช่วงแรกและน้อยลงหลังค่า $h_c = 50$ เซนติเมตร เป็นต้นไป เหตุที่อัตราการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศลดลงในช่วงความสูงปล่องตั้งแต่ 50 เซนติเมตร เป็นต้นไปนั้นคาดว่าน่าจะเกิดจาก

การสูญเสียอันเนื่องมาจากความเสียดทานภายในปล่องที่มากขึ้นเมื่อปล่องสูงหรือมีระยะที่ยาวขึ้น

3.3 ผลกระทบของความกว้างของช่องทางเข้าของอากาศต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

จากรูปที่ 8 พบว่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศจะสูงขึ้นเมื่อความกว้างของช่องทางเข้าของอากาศสูงขึ้น โดยสามารถเพิ่มอัตราการไหลได้ 6 เปอร์เซ็นต์ ที่ d_1 เท่ากับ 15 เซนติเมตร เมื่อเทียบกับกรณี d_1 เท่ากับ 5 เซนติเมตร การเพิ่มอัตราการไหลเชิงมวลนี้เกิดจากพื้นที่หน้าตัดการไหลของทางเข้าช่องอากาศเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย

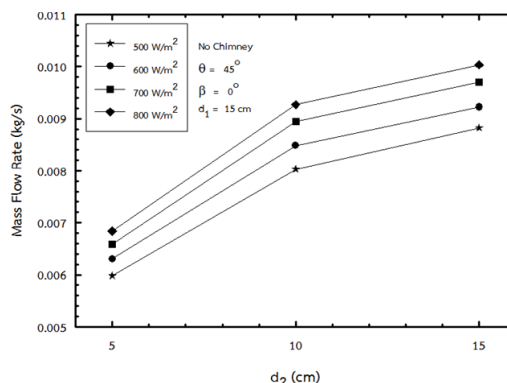


รูปที่ 8 ผลกระทบของความกว้างของช่องทางเข้าของอากาศต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

3.4 ผลกระทบของความกว้างของช่องทางไหลของอากาศใต้หลังคาต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

จากรูปที่ 9 พบว่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศสูงขึ้นตามขนาดของช่องทางไหลของอากาศใต้หลังคาที่เพิ่มขึ้น โดยอัตราการเพิ่มสูงสุดเมื่อเพิ่มความกว้างของช่องทางไหลจาก 5 เซนติเมตร เป็น 10 เซนติเมตร โดยเพิ่มขึ้นถึง 36 เปอร์เซ็นต์ แต่อัตราการเพิ่มขึ้นจะลดลงเมื่อเพิ่มความกว้างของช่องทางไหลจาก 10 เซนติเมตร เป็น 15 เซนติเมตร ดังจะเห็นได้จากความชันของเส้นกราฟทั้งสองช่วงในรูปที่ 9 ซึ่งเหตุของการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ คือเหตุเดียวกันกับการเพิ่มขึ้นของช่องทางเข้าของอากาศที่กล่าว

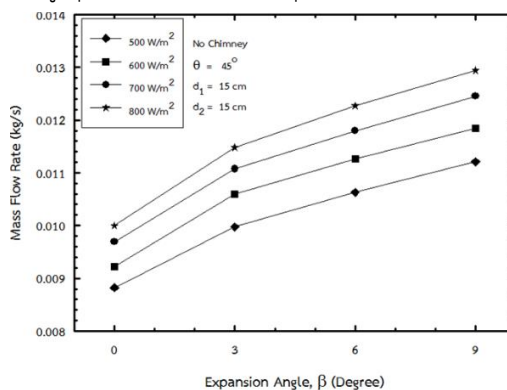
ไว้ก่อนหน้านี้ นั่นคือเมื่อพื้นที่หน้าตัดการไหลมากขึ้นย่อมส่งผลให้อัตราการไหลของอากาศสูงขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 9 ผลกระทบของความกว้างของช่องทางไหลของอากาศใต้หลังคาต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

3.5 ผลกระทบของการบานตัวของช่องทางไหลของอากาศใต้หลังคาต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

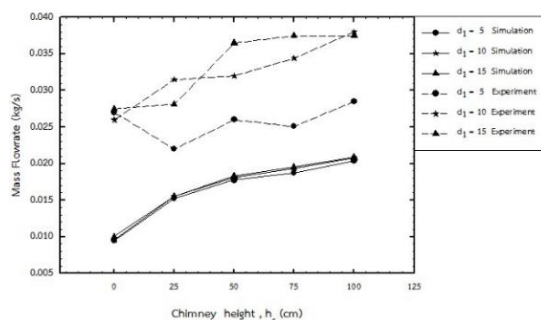
จากรูปที่ 10 พบว่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศจะสูงขึ้นตามมุมบานตัวของช่องทางไหลของอากาศใต้หลังคาที่มากขึ้น ซึ่งนับว่าเป็นการพบที่สำคัญมาก เพราะเพียงเพิ่มการบานตัวของช่องทางไหลของอากาศโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอาคารหรือเพิ่มค่าใช้จ่ายในการลงทุนเพิ่มเติมแต่อย่างใด แต่กลับสามารถเพิ่มการระบายอากาศได้ค่อนข้างมาก โดยที่มุมบานตัว 3 องศา อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเพิ่มขึ้นถึง 14 เปอร์เซ็นต์ และสูงสุดถึง 29 เปอร์เซ็นต์ ที่มุมบานตัวเท่ากับ 9 องศา



รูปที่ 10 ผลกระทบของมุมบานตัวของช่องทางไหลของอากาศใต้หลังคาต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

3.6 การเปรียบเทียบผลลัพธ์กับผลการทดลอง

นำผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองกรณีความเข้มของแสงอาทิตย์เท่ากับ 800 วัตต์ต่อตารางเมตร ที่ค่าความสูงปล่องและความกว้างของช่องอากาศต่าง ๆ มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ P. Tongbai et al [21] ที่กรณีเดียวกันกับการทดลอง นั่นคือ มุมเอียงของหลังคาเท่ากับ 45 องศา ไม่มีการบานตัวของช่องทางไหล ($\beta=0$) ความกว้างของช่องทางไหลเท่ากับ 15 เซนติเมตร ผลการเปรียบเทียบแสดงในรูปที่ 11 จะเห็นว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม SolidWorks Flow Simulation นั้นมีค่าแตกต่างกันค่อนข้างมากแต่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง โดยค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้การจำลองเสมอเนื่องจากในขณะทำการทดลองมีผลกระทบจากการไหลของอากาศที่ไหลเข้าบ้านจำลองอันเนื่องมาจากแรงลมที่อยู่รอบ ๆ ตัวบ้านในระหว่างทำการทดลอง จึงทำให้ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ได้มีค่าสูงกว่าการจำลองด้วยโปรแกรมนั้นเอง โดยค่าความแตกต่างของผลลัพธ์จากการจำลองและการทดลองสูงสุด 44.7 เปอร์เซ็นต์ (ที่ความสูงปล่อง 100 เซนติเมตร ความกว้างของช่องทางเข้าของอากาศ 10 เซนติเมตร) ต่ำสุด 29.3 เปอร์เซ็นต์ (ที่ความสูงของปล่อง 100 เซนติเมตร ความกว้างของช่องทางเข้าของอากาศ 10 เซนติเมตร) อย่างไรก็ตามความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลกระทบเชิงบวก นั่นคือในทางปฏิบัติจริงนั้นการไหลที่เกิดขึ้นจริงจะมีผลกระทบเนื่องจากแรงลมภายนอกอาคารด้วย ซึ่งจะช่วยให้ส่งเสริมค่าอัตราการไหลของอากาศได้มากยิ่งขึ้น



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบผลลัพธ์กับผลการทดลองของ P. Tongbai et al [21]

4. สรุป

ผลลัพธ์จากการจำลองปัญหาการไหลในสามมิติผ่านอาคารขนาดเล็กด้วยโปรแกรม SolidWorks Flow Simulation เพื่อศึกษาผลกระทบจากความเข้มของแสงอาทิตย์และตัวแปรทางโครงสร้างต่าง ๆ ของอาคารสามารถสรุปผลได้ว่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

1. ความเข้มของแสงอาทิตย์มีผลโดยตรงต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ เมื่อเพิ่มความเข้มของแสงอาทิตย์จาก 500 วัตต์ต่อตารางเมตร เป็น 800 วัตต์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเพิ่มขึ้น 13.6 เปอร์เซ็นต์ ที่กรณีบ้านไม่มีปล่อง หลังคาเอียง 60 องศา ไม่มีการบานตัวของช่องทางไหล ช่องทางเข้าและช่องทางไหลของอากาศมีค่าเท่ากับ 15 เซนติเมตร
2. มุมเอียงของหลังคามีผลโดยตรงกับต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ เมื่อเพิ่มมุมเอียงของหลังคาจาก 15 องศา เป็น 30 องศา อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเพิ่มมากขึ้นถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในการเลือกใช้งานอาจต้องคำนึงถึงต้นทุนในการก่อสร้าง เพราะหากมุมเอียงของหลังคาจำเป็นต้องใช้กระเบื้องหรือวัสดุโปร่งใสมากขึ้นตามไปด้วย
3. ความสูงของปล่องมีผลโดยตรงต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ เมื่อเพิ่มความสูงของปล่องเป็น 25 เซนติเมตร อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเพิ่มขึ้น 62 เปอร์เซ็นต์ (เทียบกับกรณีไม่มีปล่อง)
4. ความกว้างช่องทางเข้าของอากาศมีผลโดยตรงต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ เมื่อเพิ่มความกว้างของช่องทางเข้าของอากาศจาก 5 เซนติเมตร เป็น 10 เซนติเมตร อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเพิ่มขึ้น 6 เปอร์เซ็นต์
5. ความกว้างของช่องการไหลของอากาศใต้หลังคามีผลโดยตรงต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ เมื่อเพิ่มความกว้างของช่องการไหลจาก 5 เซนติเมตร เป็น 15 เซนติเมตร อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเพิ่มมากขึ้นถึง 47 เปอร์เซ็นต์

6. มุมบานตัวของช่องทางไหลของอากาศใต้หลังคา มีผลโดยตรงต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเมื่อเพิ่มมุมบานตัว (β) เป็น 3 องศา และ 9 องศา ตามลำดับ ทำให้อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเพิ่มขึ้น 14 เปอร์เซ็นต์ และ 29 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นับเป็นการพบแนวทางการออกแบบที่น่าสนใจ เพราะเมื่อเพิ่มมุมบานตัวของช่องทางไหลของอากาศโดยไม่เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือเพิ่มต้นทุนการก่อสร้างแต่อย่างใด แต่สามารถเพิ่มการระบายอากาศได้มากขึ้น

7. ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองและการทดลอง เป็นไปในลักษณะเดียวกัน ซึ่งจะสามารถช่วยลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการศึกษาลงไปได้มาก

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ที่สนับสนุนพื้นที่ในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] N. K. Bansal, R. Methur, and M. S. Bhandari "Solar chimney stack ventilation," *Building and Environment*, vol. 28, no. 3, pp. 373-377, Jul. 1993.
- [2] N. K. Bansal, J. Methur, S. Methur, and Jane M. "Modeling of window-sized solar chimneys for ventilation," *Building and Environment*, vol. 40, no. 10, pp. 373-377. Oct. 2005.
- [3] M. M. Padki and S. A. Sherif "On a simple analytical model for solar chimneys," *International Journal of Energy Research*, vol. 23, no. 4, pp. 345-349, 1999.
- [4] C. Afonso and A. Oliveira "Solar chimneys: simulation and experiment," *Energy and Buildings*, vol. 32, no. 1, pp. 71-79, 2000.
- [5] G. Gan "A parametric study of Trombe walls for passive cooling of buildings," *Energy and Buildings*, vol. 27, no. 1, pp. 37-43, 1998.
- [6] I. Hamdy and M. Fikry "Passive solar ventilation," *Renewable Energy*, vol. 14, no. 1-4, pp. 381-386, 1998.
- [7] X. Q. Zhai, Y. J. Dai, and R. Z. Wang, "Comparison of heating and natural ventilation in a solar house induced by two roof solar collectors," *Applied Thermal Engineering*, vol. 25, no. 5-6, pp. 741-757, Apr. 2005.
- [8] N. Gao, Y. Yan, R. Sun, and Y. Lei "Natural Ventilation Enhancement of a Roof Solar Chimney with Wind-Induced Channel," *Energies*, vol. 15, no. 17, pp. 6492, 2022.
- [9] O. Ardila, J. Quiroga, and C. Amaris "Assessment of solar chimney potential for passive ventilation and thermal comfort in the northeast of Colombia," *Results in Engineering*, vol. 20, pp. 101641, 2023.
- [10] J. Hirunlabh, S. Washirapuwadon, N. Pratinthong, and J. Khedari, "New configurations of a roof solar collector maximizing natural ventilation," *Building and Environment*, vol. 36, no. 3, pp. 383-391, Apr. 2001.
- [11] J. Khedari, J. Hirunlabh, and T. Bunnag, "Experimental study of a roof solar collector towards the natural ventilation of

- new houses,” *Energy and Buildings*, vol. 26, no. 2, pp. 159-164, 1997.
- [12] J. Khedari, W. Mansirisub, S. Chaima, N. Pratinthong, and J. Hirunlabh "Field measurements of performance of roof solar collector," *Energy and Buildings*, vol. 31, no. 3, pp. 171-178, 2000.
- [13] J. Khedari, S. Ingkawanich, J. Waewsak, and J. Hirunlabh "A PV system enhanced the performance of roof solar collector," *Building and Environment*, vol. 37, no. 12, pp. 1317-1320, 2002.
- [14] J. Khedari, P. Yimsamerjit, and J. Hirunlabh "Experimental investigation of free convection in roof solar collector," *Building and Environment*, vol. 37, no. 5, pp. 455-459, 2002.
- [15] P. Tongbai and T. Chitsomboon, "The Use of Attic and Chimney to Enhance Air Ventilation: A Numerical Analysis," in *Proceedings of the 18th National Mechanical Engineering Conference*, Khonkaen, Thailand, 2004, pp. 263-268.
- [16] A. Koonsrisuk and T. Chitsomboon, "Effect of Tower Area Change on the Potential of Solar Tower," in *Proceedings of the 2nd Join International Conference on "Sustainable Energy and Environment"*, Bangkok, Thailand. 2006.
- [17] P. Tongbai and T. Chitsomboon, "Enhancements of solar chimney for building ventilation," in *Proceedings of the 4th Conference on Energy Network of Thailand*, Nakhon Pathom, Thailand, 2008.
- [18] P. Tongbai and T. Chitsomboon, "Parameters Affecting Ventilation in Building using Solar Chimney," in *Proceedings of the 22nd National Mechanical Engineering Conference*, Thailand, 2008.
- [19] P. Tongbai and T. Chitsomboon, "Efficiency Enhancement for Natural Ventilation in Building Using Solar Chimney System," in *Proceedings of the 23rd National Mechanical Engineering Conference*, Chiangmai, Thailand, 2008.
- [20] P. Tongbai and T. Chitsomboon, "Three Dimensional Simulation of Natural Ventilation in Building using Solar Chimney System," in *Proceedings of the 25th National Mechanical Engineering Conference*, Krabi, Thailand, 2011.
- [21] P. Tongbai and T. Lekpradit, "Experimental Investigation on the Natural Ventilation in Building by Using Integrated Roof Solar Collector and Chimney," in *Proceedings of the 31st National Mechanical Engineering Conference*, Nakhon Nayok, Thailand, 2017. pp. 195-202.
- [22] J. M. Cimbala and Y. A. Cengel, "in *Essential of Fluid Mechanics*," Higher de. New York: McGraw-Hill 2008.