

บทความปริทัศน์

วิธีการศึกษาการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติ เพื่อเพิ่มความสบาย

พิมลศิริ ประจวบสาร

ภาควิชาสถาปัตยกรรม
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งทบทวนวิธีการที่ใช้ศึกษาการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติเพื่อเพิ่มความสบาย (comfort ventilation) ที่พบในเอกสารทางวิชาการในระดับนานาชาติในช่วง 30 ปีที่ผ่านมา มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาหลักการ ความสามารถ ข้อจำกัดและข้อพึงระวังของวิธีการต่างๆ รวมถึงเพื่อสำรวจทิศทางการศึกษาเกี่ยวกับการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติ จากการสำรวจพบว่าการศึกษเกี่ยวกับ comfort ventilation มีอยู่สองลักษณะ ประกอบด้วยการศึกษาประสิทธิภาพของ comfort ventilation ที่มีต่อสภาวะสบายของผู้ใช้อาคารโดยเฉพาะอย่างยิ่งสภาวะสบายแบบปรับตัว (adaptive thermal comfort) ซึ่งจะใช้วิธีการวัด (measuring methods) ร่วมกับการสำรวจสภาวะสบายเป็นวิธีการศึกษาหลัก และการประเมินการออกแบบอาคารและอุปกรณ์ในการเพิ่มประสิทธิภาพของ comfort ventilation ซึ่งจะใช้วิธีการจำลอง (modelling methods) เป็นวิธีการศึกษาหลัก ทั้งการใช้หุ่นจำลองย่อขนาดและการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลอง นอกจากนี้ยังพบว่าพัฒนาการของโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยเฉพาะอย่างยิ่งโปรแกรมในกลุ่มพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ส่งผลดีต่อการศึกษา comfort ventilation อย่างมากโดยจะเห็นได้จากความหลากหลายและจำนวนของการศึกษาที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ตั้งแต่ต้นศตวรรษที่ 21 เป็นต้นมา ทั้งนี้ ความถูกต้องของ inputs และการตั้งค่าต่างๆ ของโปรแกรมมีความสำคัญอย่างสูงต่อผลการศึกษา การศึกษาที่ใช้วิธีการจำลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จึงควรให้ความสำคัญกับการตรวจสอบความถูกต้อง และความน่าเชื่อถือของโปรแกรม (software verification) ด้วยเสมอ

คำสำคัญ: การระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติเพื่อเพิ่มความสบาย |
สภาวะสบายแบบปรับตัว | พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ |
วิธีการวัด | วิธีการจำลอง

* บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยเรื่อง “รูปแบบการเปิดหน้าต่างเพื่อลดการใช้พลังงานเพื่อปรับอากาศในอาคารสูงพักอาศัยในกรุงเทพมหานคร” ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สัญญารับทุน เลขที่ TRG5880165

Review Article

Methods for investigating comfort ventilation

Pimolsiri Prajongsan

Department of Architecture

Faculty of Architecture, Silpakorn University

Abstract

This paper looks at the methods used for investigating the performance of comfort ventilation found in international literatures published over the past 30 years. It is aimed at understanding the principles, capabilities and limitations of the different methods as well as surveying the trend of the study related to natural ventilation in building design. As a result, it was found that there are two main types of comfort ventilation studies: i) evaluating the effects of comfort ventilation on thermal comfort enhancement, in which measuring methods were used together with thermal comfort survey and ii) evaluating the performance of different building and device designs to improve comfort ventilation effectiveness, in which modelling methods were mainly used. It was also found that the development of building simulation software, especially Computational Fluid Dynamics (CFD) is beneficial for comfort ventilation study as can be seen from the increasing number of studies since the modelling software was developed. However a study that uses modelling software as the main tool has to include a section on software verification to show that inputs are correct and software settings are suitable.

Keywords: Comfort ventilation | Adaptive thermal comfort |
Computational Fluid Dynamics (CFD) | Measuring methods |
Modelling methods

1. กล่าวนำ

การระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติ (natural ventilation) มีหน้าที่หลักสามประการในการออกแบบอาคาร ประกอบด้วย การสร้างคุณภาพอากาศที่ดีโดยการเพิ่มอากาศบริสุทธิ์จากภายนอกเข้าสู่อาคาร (healthy ventilation) การลดภาระการทำความเย็นให้กับอาคารโดยถ่ายเทอากาศภายในที่มีอุณหภูมิสูงออกไป (cooling ventilation) และการสร้างสภาวะสบายโดยการสร้างความรู้สึกเย็นให้กับผู้ใช้อาคารโดยการเพิ่มความเร็วมวลที่ผ่านผิวกายของผู้ใช้อาคาร (comfort Ventilation) (Szokolay, 2008) ทั้งนี้ปัจจัยหลักในการสร้างคุณภาพอากาศที่ดีและการลดภาระการทำความเย็นนั้นขึ้นอยู่กับอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศระหว่างภายในและภายนอกอาคาร (air exchange rate) ส่วนปัจจัยหลักในการสร้างสภาวะสบายนั้นขึ้นอยู่กับความเร็วมวลที่ผ่านผิวกายของผู้ใช้อาคาร (air velocity) ในการศึกษาประสิทธิภาพของ comfort ventilation ผู้ศึกษาจึงจำเป็นต้องประเมินจากความเร็วมวลในพื้นที่ใช้งานหลักเป็นสำคัญ จากการทบทวนเอกสารพบว่าวิธีการที่ใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับ comfort ventilation นั้นสามารถแบ่งได้เป็นสองกลุ่มตามหลักการที่ต่างกัน ได้แก่ วิธีการวัด (measuring methods) และวิธีการจำลอง (modelling methods)

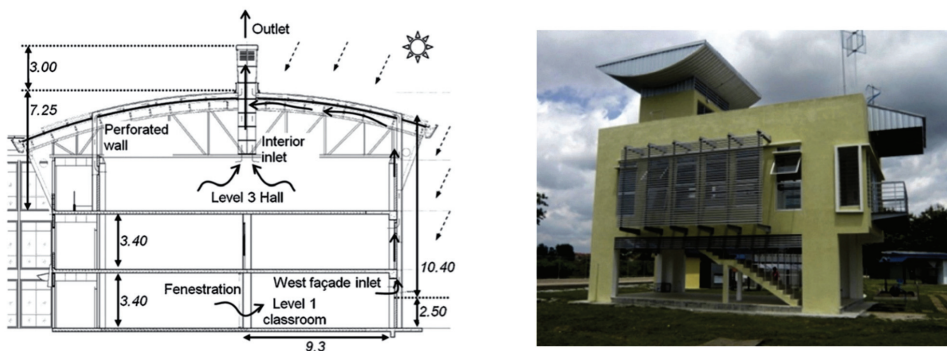
2. วิธีการวัด (measuring methods)

วิธีการวัด เป็นการใช้เทคนิคการวัดตามมาตรฐานเครื่องมือและการติดตั้ง (ASHRAE, 2013) เพื่อเก็บข้อมูลสภาพอากาศและความเร็วมวลในบริเวณพื้นที่ที่สนใจแล้วนำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์ตามวัตถุประสงค์ของการศึกษา ข้อมูลจากการวัดเป็นข้อมูลที่ได้รับการยอมรับว่าถูกต้องตรงกับความเป็นจริงและน่าเชื่อถือมากที่สุด เนื่องจากมีการตั้งสมมติฐานต่างๆ เช่น สภาพอากาศภายนอก รูปแบบอาคารรวมถึงการใช้งานอาคารน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น ทั้งนี้ข้อมูลที่ได้นำมาใช้เพื่อสร้างความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมของ comfort ventilation ในสถานการณ์ต่างๆ รวมทั้งใช้เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากวิธีการจำลอง (modelling methods) การสำรวจเอกสารยังพบว่ามีการศึกษาจำนวนมากที่ใช้วิธีการวัด ทั้งการเก็บข้อมูลจากสถานที่จริง (on-site measurements) และการทดลองในสภาพแวดล้อมแบบควบคุม (laboratory experiments) ร่วมกับการสำรวจสภาวะสบายของผู้ใช้อาคาร (thermal comfort survey) เพื่อศึกษาอิทธิพลของ comfort ventilation ที่มีต่อความรู้สึกสบายของผู้ใช้อาคารอีกด้วย

2.1 การเก็บข้อมูลจากสถานที่จริง (on-site measurement)

การเก็บข้อมูลจากสถานที่จริงใช้เทคนิคการวัดเพื่อเก็บข้อมูลสภาพอากาศในสถานการณ์จริงโดยไม่มีการควบคุมหรือปรับเปลี่ยนสภาพแวดล้อม ผลการศึกษาจึงมีลักษณะเป็นช่วงข้อมูลที่บันทึกได้จากสถานการณ์จริง เช่น ช่วงของความเร็วมวลและอุณหภูมิอากาศที่พบในการเก็บข้อมูล มีการศึกษาจำนวนมากที่ใช้วิธีการนี้ร่วมกับการสำรวจสภาวะสบายของผู้ใช้อาคารเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ comfort ventilation เพื่อขยายขอบเขตสภาวะสบายแบบปรับตัว (adaptive thermal comfort) โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับอาคารในภูมิภาคเขตร้อนชื้น เช่นการศึกษาของ Brager and Dear (1998); Wong *et al.* (2002) และ Djamila *et al.* (2013) และ Djamila *et al.*, 2013 ซึ่งพบว่าขอบเขตสภาวะสบายของผู้ใช้อาคารในภูมิอากาศร้อนจะสูงกว่าที่กำหนดโดย ISO7730 (Nicol, 2004) และผู้ใช้อาคารที่คุ้นชิน (physiological acclimatization) กับภูมิอากาศ

ร้อนขึ้นจะสามารถทนต่อสภาพอากาศที่มีความชื้นและความเร็วลมได้สูงกว่าผู้ใช้อาคารในภูมิอากาศอื่น (Venko *et al.*, 2014) รวมถึงมีความคาดหวัง (thermal expectation) ต่อสภาพแวดล้อมของตนเองต่ำกว่าที่ระบุในมาตรฐานทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออยู่ในสถานการณ์ที่มีลักษณะแบบไม่เป็นทางการ (Liping and Hien, 2007)



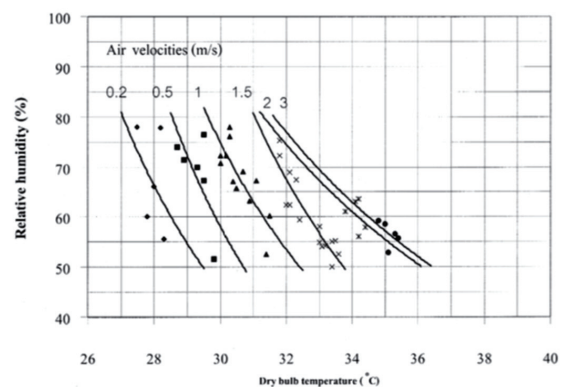
ภาพที่ 1: แสดงแนวคิดของ Solar chimney system ในการศึกษาของ Tan and Wong (2012) (ซ้าย) และภาพอาคารที่ติดตั้ง Wind-induced ventilation tower ในการศึกษาของ Haw *et al.* (2012) (ขวา)

นอกจากนี้มีการศึกษาจำนวนหนึ่งซึ่งใช้การเก็บข้อมูลจากสถานที่จริงเพื่อประเมินประสิทธิภาพของการออกแบบอาคารหรืออุปกรณ์อาคารที่มีต่อ comfort ventilation และความสบายของผู้ใช้อาคาร ทั้งเพื่อปรับปรุงอาคารให้สามารถสร้างสภาวะสบายได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น (Wong *et al.*, 2002) และเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการออกแบบอาคารเอง เช่นการศึกษาของ Tan and Wong (2012) ซึ่งศึกษาประสิทธิภาพของ solar chimney system (ภาพที่ 1 - ซ้าย) และพบว่าระบบดังกล่าวสามารถเพิ่มความเร็วลมเฉลี่ยและความสบายของผู้ใช้ภายในอาคาร zero energy building ในประเทศสิงคโปร์ได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงฤดูร้อน เช่นเดียวกับการศึกษาของ Haw *et al.* (2012) ซึ่งศึกษาประสิทธิภาพของ wind-induced ventilation tower ที่ติดตั้งบริเวณเหนือหลังคาบ้านพักอาศัยสองชั้นในประเทศมาเลเซียโดยใช้หลักการรีดลมแบบ venturi effect (ภาพที่ 1 - ขวา) และพบว่าอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถเพิ่มความเร็วลมเฉลี่ยและความสบายภายในอาคารได้

โดยภาพรวม การเก็บข้อมูลจากสถานที่จริงเป็นวิธีการที่เหมาะสมกับการศึกษาที่ต้องการประเมินประสิทธิภาพของ comfort ventilation ภายใต้อิทธิพลของสภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นจริง โดยความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของข้อมูลขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของเครื่องมือที่ใช้ประกอบกับการติดตั้งและขั้นตอนการเก็บข้อมูลที่ได้มาตรฐาน การศึกษาที่ใช้วิธีการนี้จึงมักอธิบายลักษณะของเครื่องมือรวมถึงวิธีการติดตั้งและการเก็บข้อมูลอย่างละเอียด ทั้งนี้วิธีการเก็บข้อมูลจากสถานที่จริงอาจไม่เหมาะสมกับการศึกษาในพื้นที่ที่มีขนาดใหญ่หรือต้องการข้อมูลที่มีความละเอียดสูง เนื่องจากจะต้องใช้เครื่องมือในการเก็บข้อมูลจำนวนมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งพื้นที่ที่มีความเร็วลมต่ำซึ่งยากต่อการตรวจวัด

2.2 การทดลองในสภาพแวดล้อมแบบควบคุม (laboratory experiments)

การทดลองในสภาพแวดล้อมแบบควบคุม เป็นวิธีการศึกษาที่ใช้เทคนิคการวัดเพื่อเก็บข้อมูลสภาพอากาศภายในห้องทดลอง (environmental chamber) ขนาดเท่าของจริง (full scale) ซึ่งสามารถควบคุมและปรับเปลี่ยนตัวแปรตามวัตถุประสงค์การศึกษาได้ วิธีการนี้จึงนิยมใช้ในการศึกษาเชิงทดลองเกี่ยวกับประสิทธิภาพของ comfort ventilation ที่มีต่อขอบเขตสภาวะสบายในสถานการณ์ต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภูมิอากาศเขตร้อน (Khedari *et al.*, 2000; Cândido *et al.*, 2010; Taleb, 2014)



ภาพที่ 2: แสดงบรรยากาศในการทดลองในสภาพแวดล้อมแบบควบคุม (ซ้าย) และ Thailand comfort ventilation chart (ขวา) จากการศึกษาของ Khedari *et al.* (2000)

ตัวอย่างเช่น Khedari *et al.* (2000) ได้ทำการศึกษาและนำเสนอ comfort ventilation chart สำหรับประเทศไทย (ภาพที่ 2 - ขวา) จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลสภาวะสบายของผู้ทดลองร่วมกับข้อมูลสภาพอากาศภายในห้องทดลองซึ่งมีการควบคุมสภาพอากาศรวมถึงลักษณะการแต่งกายและกิจกรรมของผู้ทดลอง (ภาพที่ 2 - ซ้าย) และ Fountain *et al.* (1994) ได้ทำการศึกษาในลักษณะเดียวกันและพบว่าความเร็วลมบริเวณพื้นที่ใช้งาน (พัดลม) 1 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป สามารถขยายขอบเขตอุณหภูมิอากาศสูงสุดที่ยอมรับได้ในภูมิอากาศร้อนชื้นขึ้นเป็น 31 และ 29 องศาเซลเซียส เมื่อกิจกรรมอยู่ในระดับ 1.0 met และ 1.2 met ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ Oropeza-Perez and Østergaard (2014) ซึ่งพบว่าความเร็วลมในช่วงระหว่าง 0.05 ถึง 1.70 เมตรต่อวินาที (พัดลม) สามารถขยายขอบเขตอุณหภูมิอากาศสูงสุดที่ยอมรับได้ขึ้นเป็น 30 องศาเซลเซียส (ความชื้นสัมพัทธ์ 60%) และการศึกษาของ Taleb (2014) ซึ่งพบว่าความเร็วลมในช่วงระหว่าง 0 ถึง 2 เมตรต่อวินาที (พัดลม) สามารถขยายอุณหภูมิอากาศสูงสุดที่ยอมรับได้ขึ้นเป็น 28-32 องศาเซลเซียส โดยในการศึกษานี้ยังตั้งข้อสังเกตเพิ่มเติมอีกว่าความเร็วลมที่ยอมรับได้นั้นเกิน 0.8 เมตรต่อวินาทีซึ่งเป็นความเร็วลมสูงสุดที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน ASHRAE 55-2010 ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าการศึกษาสภาวะสบายที่เกิดจาก comfort ventilation ในภูมิอากาศเขตร้อนนั้นมีผลไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ

- i) การเพิ่มความเร็วลมในพื้นที่ใช้งานสามารถขยายขอบเขตสภาวะสบายโดยขยายขอบเขตอุณหภูมิอากาศสูงสุดที่ยอมรับได้และ
- ii) ขอบเขตอุณหภูมิอากาศและความเร็วลมสูงสุดที่คนในภูมิภาคนี้ยอมรับได้จะสูงกว่า

ที่กำหนดโดยมาตรฐาน ASHRAE 55-2010 โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ใช้ผู้อาคารสามารถควบคุมความเร็วและทิศทางลมได้เอง (personally controlled air movement)

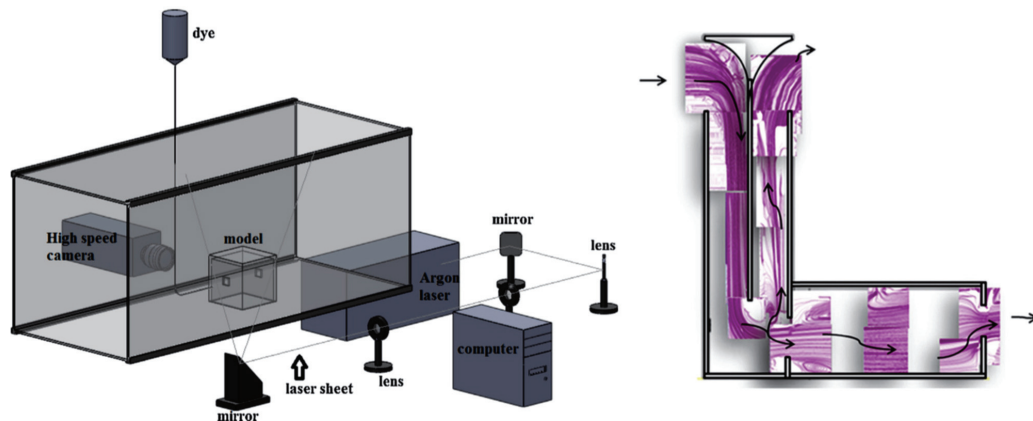
โดยภาพรวม การทดลองในสภาพแวดล้อมแบบควบคุมเป็นวิธีการที่ใช้เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของ comfort ventilation ที่มีต่อสภาวะสบายในรูปแบบการทดลองซึ่งสามารถควบคุมตัวแปรที่สนใจได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเร็วลมและทิศทางลม ทั้งนี้ การศึกษาที่ใช้วิธีการนี้มีกระบวนการซับซ้อนจำกัดในการนำผลการศึกษาไปใช้ได้ด้วยเสมอ เช่นลักษณะกิจกรรมและการแต่งกายรวมถึงสภาพอากาศและลักษณะของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง (พัทลม)

3. วิธีการจำลอง (modelling Methods)

วิธีการจำลองเป็นการใช้เทคนิคการจำลองเสมือนเหตุการณ์จริงในรูปแบบต่างๆ (modelling techniques) ได้แก่การใช้หุ่นจำลองย่อขนาด (scaled model) และการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical models) ในการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรภายนอก เช่นความเร็วลมและทิศทางลมภายนอก รวมถึงการออกแบบอาคารและอุปกรณ์อาคารที่มีต่อประสิทธิภาพของ comfort ventilation ภายใต้ข้อสันนิษฐานบางประการ

3.1 การจำลองโดยใช้หุ่นจำลองย่อขนาด

การจำลองโดยใช้หุ่นจำลองย่อขนาด (scaled model) เป็นวิธีการที่ใช้หลักการย่อขนาด (scaling laws) ซึ่งต้องจำลององค์ประกอบสำคัญต่างๆให้เหมือนกับสถานการณ์จริงมากที่สุดเพื่อที่จะสามารถให้ผลการศึกษาที่ถูกต้องแม่นยำและน่าเชื่อถือ ได้แก่ i) ลักษณะกายภาพของอาคาร รวมถึงคุณสมบัติของวัสดุอาคาร เช่นความหนาของผิววัสดุอาคาร ค่าการสะท้อนรังสีความร้อนของวัสดุ เป็นต้น ii) คุณสมบัติของของไหลซึ่งต้องสามารถใช้เป็นตัวแทนของอากาศในอาคารขนาดจริงได้และมักแสดงโดยใช้ค่า dimensionless numbers ต่างๆ เช่นเลขเรย์โนลด์ส์ เลขพรันด์เทิล เลขอาร์คิมิดีส และ iii) ลักษณะสภาพอากาศแวดล้อมโดยรอบบริเวณอาคารจำลอง ทั้งอุณหภูมิและลักษณะการไหลของอากาศรวมถึงขนาดและรูปแบบของช่องเปิดอาคาร (boundary conditions) (Ernest *et al.*, 1991; Etheridge and Sandberg, 1996; Awbi, 2003; 2008) ทั้งนี้การศึกษาที่พบส่วนใหญ่มักจะมีลักษณะเป็นการทดลองที่มีการควบคุมตัวแปรเพื่อสำรวจอิทธิพลของตัวแปรต้นที่มีต่อประสิทธิภาพของ comfort ventilation โดยการวางหุ่นจำลองย่อขนาดภายในอุโมงค์ลม (atmospheric boundary layer wind tunnel) ที่มีการจำลอง boundary conditions ให้เสมือนสถานการณ์จริงเพื่อสำรวจความเร็วลม (air velocity) และรูปแบบการกระจายลม (airflow distribution) ภายในอาคารเมื่อมีการปรับเปลี่ยนตัวแปรที่สนใจ โดยอาจมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบทางเลือกต่างๆในการออกแบบอาคารหรือนำผลการทดลองไปใช้ตรวจสอบความถูกต้องของผลการจำลองด้วยวิธีการอื่นโดยเฉพาะอย่างยิ่งการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 3: แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองด้วยเทคนิค PIV (ซ้าย) (Bangalee *et al.*, 2013) และภาพการเคลื่อนที่ของอากาศจากการใช้เทคนิค PIV ในการศึกษาของ (Reyes *et al.*, 2015) (ขวา)

ตัวอย่างการศึกษาเช่น Sharples and Bensalem (2001) ใช้การจำลองอาคารด้วยอัตราส่วน 1:100 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ courtyard และ atrium ที่มีต่อ comfort ventilation ภายในอาคาร โดยใช้เครื่องมือวัดความเร็วลมภายในหุ่นจำลองก่อนนำไปคำนวณหาค่าสัดส่วนความเร็วลมบริเวณช่องเปิดต่อความเร็วลมอ้างอิง ผลการศึกษาเสนอว่าการออกแบบโดยใช้ atrium ที่มีช่องเปิดใต้หลังคาหันไปทางด้านอับลมจะสามารถเพิ่มการระบายอากาศและความเร็วลมภายในอาคารได้ และการศึกษาของ Tecle *et al.* (2013) ซึ่งศึกษาเปรียบเทียบประเภท ขนาดและตำแหน่งของช่องเปิด รวมถึงรูปแบบการกันห้องภายในอาคารที่มีผลต่อ comfort ventilation โดยใช้วิธีการศึกษาล้ำคลึงกันและนำเสนอรูปแบบการใช้ช่องเปิดที่สามารถให้ความเร็วลมเฉลี่ยภายในอาคารสูงสุด เป็นต้น จากการศึกษายังพบว่ามีการใช้หุ่นจำลองย่อขนาดร่วมกับเทคนิค particle image velocimetry (PIV) เพื่อเก็บลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศในระนาบสองมิติที่สนใจผ่านการถ่ายภาพอนุภาคขนาดเล็ก (เช่น olive oil particle) ในระนาบของ laser sheet (Yu *et al.*, 2008; Bangalee *et al.*, 2013; Cao *et al.*, 2014) (ภาพที่ 3-ซ้าย) และการศึกษาของ Reyes *et al.* (2015) ซึ่งใช้เทคนิคเดียวกันในการศึกษา ลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศภายใน wind tower (ภาพที่ 3 - ขวา)

นอกจากนี้ยังพบการศึกษาจำนวนหนึ่งที่ใช้ข้อมูลที่ได้จากการจำลองโดยใช้หุ่นจำลองย่อขนาดเพื่อใช้เป็น inputs หรือเพื่อใช้ตรวจสอบความถูกต้องของ default setting ของโปรแกรมคอมพิวเตอร์อีกด้วย เช่นการศึกษาของ Wong and Heryanto (2004) และ Priyadarsini *et al.* (2004) ซึ่งใช้ข้อมูล wind velocity บริเวณช่องเปิดที่สนใจจากการใช้หุ่นจำลองเป็น inputs สำหรับโปรแกรม CFD ในการศึกษาประสิทธิภาพของปล่องอากาศทางตั้ง หรือการศึกษาของ Chu and Chiang (2014) ซึ่งใช้ผลจากการจำลองด้วยหุ่นจำลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของค่าความกดอากาศ (wind pressure coefficient) ของโปรแกรม CFD ก่อนทำการศึกษาอิทธิพลของรูปทรงอาคารที่มีต่อรูปแบบการกระจายลมและอัตราการระบายอากาศภายในอาคาร และการศึกษาของ Hooff *et al.* (2011) ซึ่งใช้ข้อมูลความกดอากาศที่ผิวภายนอกอาคาร (surface pressure) และค่าความเร็วลมภายในอาคารต่อความเร็วลมอ้างอิงที่ได้จากการศึกษาโดยใช้หุ่นจำลองย่อขนาดเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลการจำลองโดยโปรแกรม CFD ก่อนทำการศึกษาประสิทธิภาพของหลังคาที่ใช้หลักการรีดลม (venturi-shaped roof)

โดยภาพรวม การใช้หุ่นจำลองย่อขนาดเป็นวิธีการที่นิยมนำมาใช้เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการออกแบบอาคารและอุปกรณ์อาคารที่มีต่อ comfort ventilation ซึ่งสามารถให้ข้อมูลได้ทั้งความเร็วลมและรูปแบบการกระจายลมภายในอาคาร โดยผู้ศึกษาสามารถควบคุมตัวแปรให้มีลักษณะเหมือนสถานการณ์ที่สนใจได้โดยใช้เวลาและงบประมาณน้อยกว่าการศึกษาแบบ full scale ทั้งนี้ ผู้ศึกษาต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการย่อขนาดและต้องระบุข้อสันนิษฐานต่างๆที่ใช้ในการทดลองซึ่งจะเป็นข้อจำกัดในการนำผลการศึกษาไปใช้ได้ด้วยเสมอ

3.2 การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical models)

การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เป็นการใช้ตัวเลขและวิธีการทางคณิตศาสตร์ (arithmetic operations) เพื่อช่วยในการศึกษาประสิทธิภาพของ comfort ventilation ทั้งนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถแบ่งได้เป็นสองประเภทตามความซับซ้อนของแบบจำลองและวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้

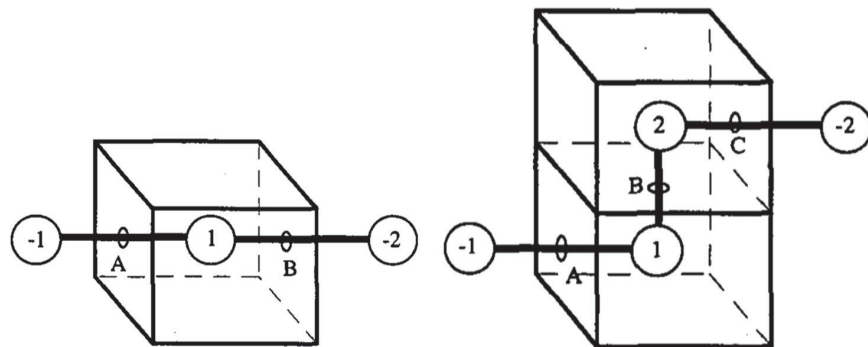
1) Analytical and empirical models เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เรียบง่ายไม่ซับซ้อนซึ่งอาจพัฒนาขึ้นจากหลักการพื้นฐานทางฟิสิกส์ (เรียกว่า analytical models) หรือพัฒนาขึ้นจากผลการทดลอง (เรียกว่า empirical models) จากการศึกษาที่มีรูปแบบไม่ซับซ้อนและมีข้อสันนิษฐานเฉพาะ จึงมักถูกนำมาใช้ในลักษณะคู่มือในการออกแบบอาคารในเบื้องต้นเท่านั้น เช่นแบบจำลองของ Givoni (สมการที่ 1) ซึ่งพัฒนาขึ้นมาจากผลการทดลองโดยใช้หุ่นจำลองย่อขนาด โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมภายนอก (V_r) ความเร็วลมเฉลี่ยภายในห้อง (V_i) และสัดส่วนของขนาดพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนังด้านที่มีช่องเปิดนั้น (x) และแสดงให้เห็นว่าความเร็วลมเฉลี่ยภายในห้องจะแปรผันตามความเร็วลมภายนอกและสัดส่วนระหว่างพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนัง ทั้งนี้แบบจำลองดังกล่าวระบุให้ใช้สำหรับห้องที่มีผนังสี่เหลี่ยมจัตุรัสและมีช่องเปิด 2 ช่องซึ่งมีขนาดเท่ากันและติดตั้งอยู่ทางปะทะลมและอับลมเท่านั้น (Givoni, 1978 cited in Allard, 1998)

$$V_i = 0.45(1 - e^{-3.48x})V_r \quad \text{สมการที่ 1}$$

โดยภาพรวม แบบจำลองในกลุ่ม analytical and empirical models มีลักษณะเรียบง่ายและสามารถใช้สื่อสารความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อ comfort ventilation ได้อย่างชัดเจน จากการทบทวนเอกสารพบว่า analytical models ส่วนใหญ่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้คาดการณ์ประสิทธิภาพของ natural ventilation ในลักษณะของอัตราการระบายอากาศ (ventilation Rate) เท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากแบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับการคาดการณ์ความเร็วลมภายในอาคารนั้นมีความซับซ้อนและไม่สามารถแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการปกติได้ แบบจำลองจากการศึกษาเกี่ยวกับ comfort ventilation จึงมักมีลักษณะเป็น empirical models เพื่อช่วยในการออกแบบอาคารในขั้นต้นภายใต้ข้อสันนิษฐานเฉพาะเท่านั้นแต่ไม่สามารถใช้ในกรณีที่มีความซับซ้อนได้

2) Computer simulation programs เป็นการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง analytical models และ empirical models ที่เกี่ยวข้องมาพัฒนาเป็นโปรแกรมการจำลองเพื่อคาดการณ์ประสิทธิภาพของ natural ventilation ทางด้านต่างๆรวมถึง comfort ventilation ทั้งนี้สามารถแบ่งโปรแกรมที่นิยมใช้ในการศึกษาได้สามกลุ่มตามหลักการและข้อสันนิษฐานของโปรแกรมได้แก่ i) Multizone network models ii) Zonal models และ iii) Computational Fluid Dynamics (CFD) models

โปรแกรมในกลุ่ม Multizone network models เช่น BREEZE, COMIS, AIRNET, ESP-r, Tas-Flows, AIOLOS และ CONTAM เป็นกลุ่มโปรแกรมที่มีความซับซ้อนน้อยที่สุด โดยโปรแกรมในกลุ่มนี้มีการสันนิษฐานว่าอากาศภายในห้องหนึ่งๆเป็นโซนที่มีอุณหภูมิอากาศสม่ำเสมอเท่ากันทั้งห้อง (uniform หรือ fully-mixed zone) และส่วนต่างๆของอาคารเชื่อมโยงกันในลักษณะเครือข่ายของจุดเชื่อมต่อและสิ่งกีดขวาง (nodes และ resistances ซึ่งแสดงด้วยตัวเลขและตัวอักษรในภาพที่ 4 ตามลำดับ) โดยการไหลของอากาศภายในอาคารทั้งหมดมีลักษณะเป็น single flow และความต้านทานอากาศของ resistances จะมีมากกว่าความต้านทานอากาศภายในโซนนั้นๆเองเสมอ ก่อนทำการคาดการณ์อัตราการถ่ายเทของปริมาตรอากาศ (volumetric flow rate) ของ nodes ต่างๆจากความแตกต่างของความกดอากาศ (pressure differences) ระหว่างทั้งสองด้านของ nodes นั้นๆ โดยยึดหลักการคงมวล (mass balance) กล่าวคือปริมาตรอากาศเข้าและขาออกจากระบบจะเท่ากันไม่มีสูญหายหรือเพิ่มเติม (J.M. *et al.*, 1996)

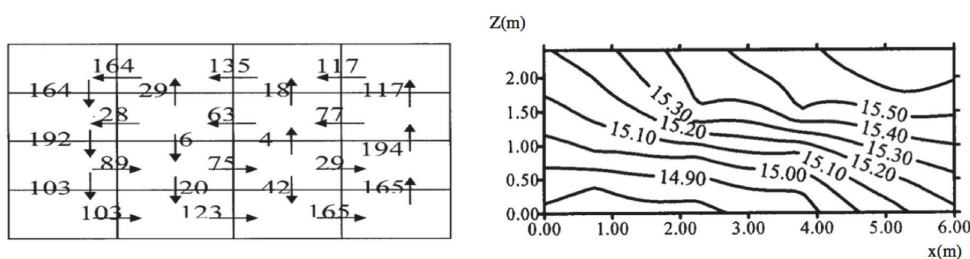


ภาพที่ 4: แสดงแนวคิดของ Multizone network models (COMIS) ในการตีความ Nodes และ Resistances: (ซ้าย) กรณี Singer Zone และ (ขวา) กรณี 2 Zones ที่เชื่อมต่อกันทางตั้ง (J.M. *et al.*, 1996)

จากการสันนิษฐานดังกล่าวทำให้โปรแกรมในกลุ่ม multizone network models สามารถคาดการณ์อัตราการถ่ายเทปริมาตรอากาศสำหรับอาคารขนาดใหญ่ที่มี node จำนวนมากในระยะเวลานั้นได้ การศึกษาที่ใช้โปรแกรมในกลุ่มนี้จึงมักมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของการออกแบบที่มีต่ออัตราการแลกเปลี่ยนอากาศเพื่อสร้างคุณภาพอากาศที่ดีสำหรับผู้ใช้งาน (Dascalakia *et al.*, 1999; Koinakis, 2005; Bojic and Kostic, 2006) แต่ไม่สามารถใช้เพื่อคาดการณ์ความเร็ว

ลมหรือลักษณะการกระจายลมภายในอาคารได้ จึงไม่สามารถใช้เพื่อประเมินประสิทธิภาพของการออกแบบต่อ comfort ventilation ได้โดยตรง

โปรแกรมในกลุ่ม Zonal models เช่น POMA (Pressurized zOnal Model with Air-diffuser) (Haghighat *et al.*, 1999; Haghighat *et al.*, 2001) และ ESP-r ถูกพัฒนาขึ้นในช่วงปลายคริสต์ศตวรรษที่ 20 จากหลักการที่เชื่อว่าสภาพอากาศภายในพื้นที่ใดพื้นที่หนึ่งมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ (non-uniform) โปรแกรมจะแบ่งพื้นที่ออกเป็น sub-zones โดยสันนิษฐานว่าแต่ละ sub-zone มีอุณหภูมิอากาศและอนุภาคภายในแบบสม่ำเสมอ (uniform) แล้วทำการคำนวณอัตราการไหลของอากาศและอนุภาคอากาศระหว่าง sub-zones โดยใช้หลักการคงมวลและคงอุณหภูมิ (mass and thermal balance equations) (Awbi, 2003) โปรแกรมในกลุ่มนี้จึงสามารถใช้เพื่อคาดการณ์ลักษณะการถ่ายเทปริมาตรอากาศและอุณหภูมิอากาศภายในพื้นที่ที่สนใจได้ (ภาพที่ 5-ซ้าย และขวา) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีพื้นที่ที่มีปริมาตรขนาดใหญ่ซึ่งลักษณะการไหลของอากาศมักมีอิทธิพลจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิร่วมด้วย (Inard *et al.*, 1998; Gao *et al.*, 2006; Jiru and Haghighat, 2008) ทั้งนี้จากการทบทวนเอกสารพบว่าโปรแกรมในกลุ่ม zonal models ไม่ได้เป็นที่นิยมนัก ซึ่งอาจเกิดจากจำนวนโปรแกรมที่มีอยู่น้อยประกอบกับเป็นโปรแกรมที่พัฒนาในช่วงเวลาใกล้เคียงกับโปรแกรมในกลุ่ม CFD ซึ่งมีความสามารถหลากหลายและมีรูปแบบการใช้งานที่สะดวกกว่า

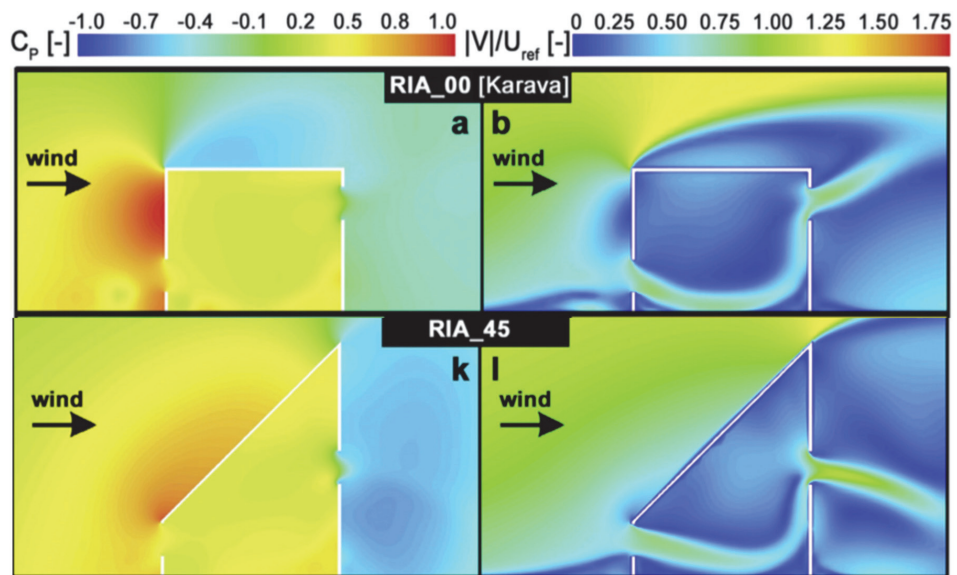


ภาพที่ 5: แสดงตัวอย่างผลการศึกษาโดยใช้โปรแกรม Zonal models (POMA); (ซ้าย) Airflow pattern (kg/h) และ Temperature distribution (°C) ในระนาบทางตั้งของห้องกรณีศึกษา (ขวา) ในการศึกษาของ Haghighat *et al.* (1999)

โปรแกรมในกลุ่ม CFD (Computational Fluid Dynamics) เช่น ANSYS FLUENT, FloVent, N3S และ DesignBuilder เป็นกลุ่มโปรแกรมที่มีความซับซ้อนมากที่สุดในสามกลุ่มพัฒนาขึ้นจากหลักการคงโมเมนตัม (conservation of momentum) ซึ่งมีลักษณะเป็นสมการไม่เชิงเส้น (nonlinear) และไม่สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์โดยตรงแต่ต้องใช้วิธีเชิงตัวเลข (numerical method) โดยโปรแกรมจะแบ่งอาคารออกเป็น cells ขนาดเล็กจำนวนมากก่อนจะใช้สมการนาเวียร์-สโตกส์ (navier-Stokes equations) ตามหลักการคงโมเมนตัมเพื่อทำการประมาณ (approximations) การเปลี่ยนแปลงปริมาตรอากาศ ความเร็วและทิศทางการไหลของอากาศรวมถึง

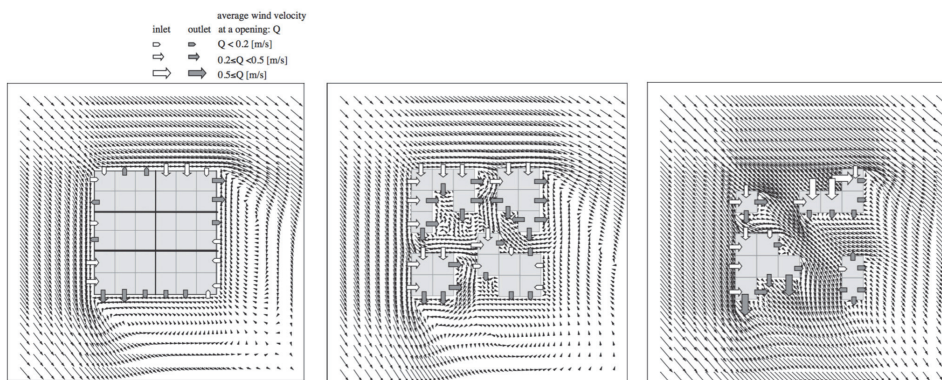
อุณหภูมิและอนุภาคสิ่งปนเปื้อนระหว่างแต่ละ cell ทั้ง 6 ทิศทาง จนผลการกะประมาณสมบูรณ์ทั้งระบบ (convergence) ตามหลักการคงมวล หลักการคงโมเมนตัมและหลักการคงพลังงาน (Nielsen, 2007)

โปรแกรมในกลุ่ม CFD สามารถใช้ศึกษาการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติได้ทั้งภายนอกและภายในอาคาร โดยสามารถจำลองผลได้ทั้งอุณหภูมิอากาศ ความดันอากาศ ความเร็วและทิศทางการไหลของอากาศรวมถึงการถ่ายเทอนุภาคปนเปื้อนภายในพื้นที่ที่ศึกษาได้อย่างละเอียด โปรแกรมในกลุ่มนี้จึงเป็นเครื่องมือที่นิยมใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพของ comfort ventilation ที่มีต่อความสบายและการอนุรักษ์พลังงานในอาคารจำนวนมาก ทั้งการศึกษาที่มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้าง guidelines สำหรับการออกแบบในเบื้องต้น เช่นการศึกษาประสิทธิภาพในการระบายอากาศในห้องที่มีช่องเปิดทางเดียว (Gan, 2000) ห้องที่มีช่องเปิดสองทาง (Shetabivash, 2015) และห้องที่มีช่องเปิดมากกว่าสองทาง (Bangalee *et al.*, 2012) รวมถึงการออกแบบวางผังกลุ่มอาคาร เช่นการศึกษาการวางผังกลุ่มบ้านพักอาศัยในประเทศไทยของ Tantasavasdi *et al.* (2006) เป็นต้น และการศึกษาที่มีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจอิทธิพลของปัจจัยต่างๆที่มีต่อประสิทธิภาพของ comfort ventilation อีกด้วย เช่นทิศทางและความเร็วลมภายนอกที่กระทำต่ออาคาร (Nikas *et al.*, 2010) ขนาดของช่องเปิดและการจัดองค์ประกอบภายในห้อง (Nikas *et al.*, 2010) รูปทรงหลังคา (Kindangen *et al.*, 1997) ความลาดเอียงของหลังคาและตำแหน่งของหน้าต่าง (Peren *et al.*, 2015) (ภาพที่ 6)



ภาพที่ 6: แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความกดอากาศ (C_p) และความเร็วลมภายในต่อความเร็วลมอ้างอิง (V/U_{ref}) ของอาคารที่มีความลาดเอียงของหลังคาต่างกันโดยใช้โปรแกรม FLUENT ในการศึกษาของ Peren *et al.* (2015); (บน) กรณีหลังคาไม่มีความลาดเอียงและ (ล่าง) กรณีหลังคาลาดเอียง 45 องศา

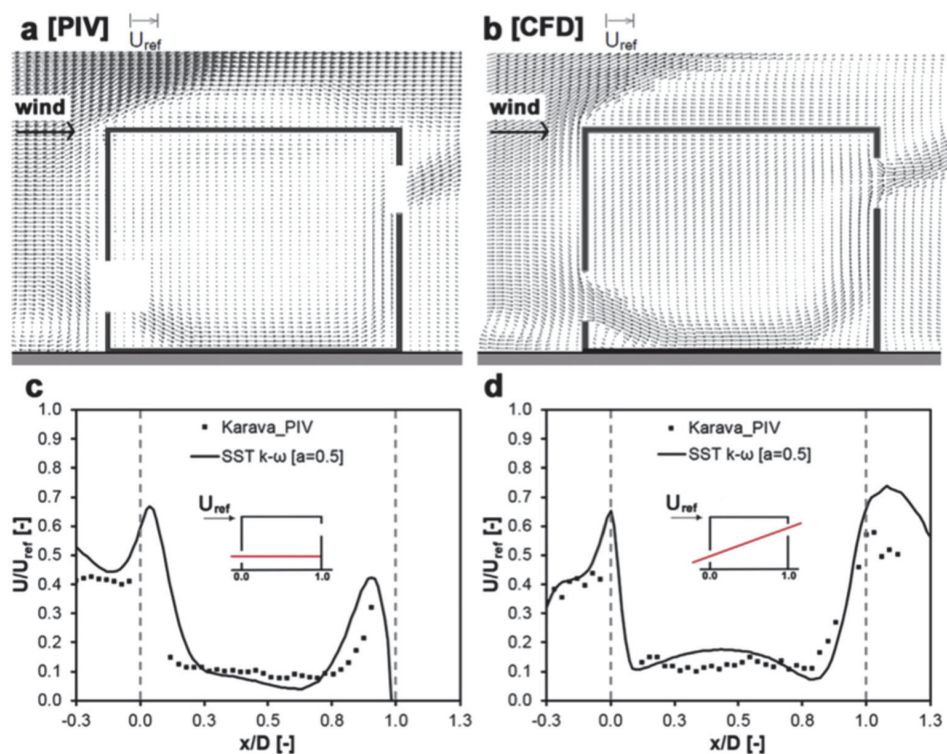
การทบทวนเอกสารยังพบว่ามีการศึกษาจำนวนมากที่ใช้โปรแกรมในกลุ่ม CFD เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของกลยุทธ์ในการออกแบบอาคารที่มีต่อ comfort ventilation ภายในอาคาร เช่นการศึกษาของ Hirano *et al.* (2006) ซึ่งเสนอแนวทางการออกแบบกลุ่มอาคารที่พักอาศัย (6 apartments) โดยแบ่งส่วนอาคารออกเป็นส่วนย่อยๆ เพื่อสร้าง cross ventilation ภายในส่วนต่างๆของอาคาร (ภาพที่ 7) หรือการศึกษาของ Gomaa (2012) ซึ่งเสนอแนวทางในการใช้ช่องลมเหนือฝ้าเพดานสำหรับห้องที่มีช่องเปิดเพียงด้านเดียว และการศึกษาของ Farea *et al.* (2015) ซึ่งนำเสนอปล่องอากาศทางตั้ง (lightwell) บริเวณส่วนกลางของอาคารเพื่อเพิ่มโอกาสในการใช้ลมธรรมชาติสำหรับห้องที่อยู่ด้านในของอาคาร รวมถึงการศึกษาของ Prianto and Depecker (2002) ซึ่งศึกษาอิทธิพลของการออกแบบระเบียง (balcony) จากหลักการตีลมแบบ venturi effect ร่วมกับการออกแบบตำแหน่งหน้าต่างและการจัดพื้นที่ภายในเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของ comfort ventilation ในพื้นที่ใช้งานหลักภายในบ้านพักอาศัยสองชั้นในภูมิภาคร้อนชื้น นอกจากนี้ยังพบว่ามีการศึกษาจำนวนหนึ่งที่ใช้โปรแกรม CFD ในการศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพของอุปกรณ์อาคารในการเพิ่ม comfort ventilation ภายในอาคารอีกด้วย เช่น Rotating rooftop turbine ventilators (Lien and Ahmed, 2010), Windvent (Hughes and Ghani, 2008), Windcatcher system (Liu *et al.*, 2011), Double-skin facade unit with movable shading devices (Baldinelli, 2009) หรือ Ventec roof (Hooff *et al.*, 2012)



ภาพที่ 7: แสดงผลการจำลองความเร็วและทิศทางลมภายในอาคารพักอาศัยในการศึกษาของ Hirano *et al.* (2006); (ซ้าย) ภาพตัดทางนอนของอาคารพักอาศัยแบบเดิมและ (กลางและขวา) ภาพตัดทางนอนชั้นล่างและชั้นบนของอาคารที่นำเสนอใหม่ตามลำดับ

จากการทบทวนเอกสารพบว่าโปรแกรมในกลุ่ม CFD ได้รับความนิยมในการศึกษา comfort ventilation มากจากความสามารถในการคาดการณ์ความเร็วลมและลักษณะการกระจายลมภายในพื้นที่ที่สนใจได้อย่างละเอียด โดยผู้ศึกษาสามารถควบคุมและปรับเปลี่ยนตัวแปรในการศึกษาได้อย่างสะดวก ทั้งนี้การศึกษาที่ใช้ CFD เป็นเครื่องมือจำเป็นต้องแสดงการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม (software verification) ด้วยเสมอ โดยเปรียบเทียบผลการจำลองกับข้อมูลที่นำเชื่อถือ ซึ่งมักจะเป็นข้อมูลจากการวัดในสถานที่จริงหรือจากการทดลองในห้องควบคุมโดยอาจเป็นข้อมูลจากการศึกษาของตนเองหรือการ

ศึกษาของผู้อื่นที่น่าเชื่อถือ เช่นในการศึกษาของ Peren *et al.* (2015) ซึ่งมีการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมโดยเปรียบเทียบสัดส่วนความเร็วลมภายในห้องต่อความเร็วลมอ้างอิง (U/U_{ref}) และลักษณะการกระจายลมที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรม CFD กับข้อมูลจากการทดลองในห้องควบคุม (ภาพที่ 8) เป็นต้น



ภาพที่ 8: แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายลม (บนซ้ายและขวา) และสัดส่วนของความเร็วลมในระนาบทางตั้งภายในห้องต่อความเร็วลมอ้างอิง (U/U_{ref}) (ล่างซ้ายและขวา) ที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิค PIV และจากการจำลองโดยโปรแกรม CFD ในการศึกษาของ Peren *et al.* (2015)

นอกจากนี้ ผู้ใช้โปรแกรม CFD จะต้องมีความเข้าใจหลักการทำงานของโปรแกรมรวมถึงความสำคัญของการตั้งค่าต่างๆ เช่นขนาดของ computational domain, mesh type และระยะของ computational grid รวมถึงความถูกต้องของ inputs ที่เกี่ยวข้องในการจำลอง เช่น boundary condition และข้อมูลลักษณะการใช้งานอาคาร เพื่อจะได้ผลการศึกษาที่ถูกต้องน่าเชื่อถือและตรงกับวัตถุประสงค์ของการศึกษา ทั้งนี้ความสำคัญของการตั้งค่าและ inputs ต่างๆที่อาจส่งผลให้ผลการศึกษาคลาดเคลื่อนนั้นสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากการศึกษาอื่นๆ (Papakonstantinou *et al.*, 2000; Awbi, 2003; Wong and Heryanto, 2004; Evola and Popov, 2006; Ramponi and Blocken, 2012; Lo *et al.*, 2013; Du *et al.*, 2014; Peren *et al.*, 2015; Jones *et al.*, 2016)

4. บทสรุป

จากการทบทวนเอกสารทางวิชาการในระดับนานาชาติในช่วง 30 ปีที่ผ่านมา พบว่ามีจำนวนการศึกษาเกี่ยวกับการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติเพื่อเพิ่มความสะดวกสบาย (comfort ventilation) เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การศึกษาในกลุ่มที่สนใจอิทธิพลของ comfort ventilation ต่อความสะดวกสบายของผู้ใช้อาคาร ซึ่งจำเป็นต้องใช้วิธีการวัด (measuring methods) ร่วมกับการสำรวจความสะดวกสบายนั้นมีการศึกษาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศเขตร้อนชื้นรวมทั้งประเทศไทย ซึ่งผลการศึกษามีข้อสรุปไปในทิศทางเดียวกันกล่าวคือ i) comfort ventilation สามารถเพิ่มความรู้สึกสบายและขยายขอบเขตอุณหภูมิอากาศสูงสุดที่ผู้ใช้อาคารในเขตร้อนชื้นยอมรับได้และ ii) ขอบเขตความเร็วลมสูงสุดที่คนในภูมิภาคร้อนชื้นยอมรับได้นั้นสูงกว่าที่กำหนดโดยมาตรฐานนานาชาติเช่น ASHRAE 55 มาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสถานการณ์ที่ผู้ใช้อาคารสามารถควบคุมสภาพแวดล้อมของตนเองได้ หรือเป็นอาคารที่มีลักษณะการใช้งานแบบไม่เป็นการซึ่งผู้ใช้อาคารสามารถปรับเปลี่ยนกิจกรรมหรือเครื่องแต่งกายได้ เช่นอาคารในกลุ่มที่พักอาศัย การใช้การระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติเพื่อเพิ่มความสะดวกสบายเพื่อลดการใช้พลังงานในการปรับอากาศภายในอาคารในกลุ่มนี้จึงมีความเป็นไปได้สูงและเป็นประเด็นที่น่าสนใจในการศึกษาต่อไป

ส่วนการศึกษาในกลุ่มที่สนใจการออกแบบอาคารและอุปกรณ์อาคารเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของ comfort ventilation ซึ่งจำเป็นต้องใช้วิธีการจำลอง (modelling methods) ในการศึกษา นั้น มีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างมากตั้งแต่ต้นศตวรรษที่ 21 เป็นต้นมา จากการที่นักวิชาการบางกลุ่มหันกลับมาให้ความสนใจกับแนวทางการออกแบบอาคารที่สามารถอยู่ร่วมกับสภาพแวดล้อมให้ได้มากที่สุดก่อนที่จะใช้ระบบปรับอากาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งหลังจากมีการนำเสนอหลักการ physiological cooling effect และการประเมินความสะดวกสบายแบบปรับตัว (adaptive thermal comfort) ในช่วงปลายศตวรรษที่ 20 นอกจากนี้ยังเกิดจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์และการพัฒนาโปรแกรมต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโปรแกรมในกลุ่มพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ซึ่งทำให้การศึกษาความเร็วลมและการกระจายลมที่เป็นปัจจัยหลักในการตรวจสอบประสิทธิภาพของการออกแบบที่มีต่อ comfort ventilation โดยละเอียดนั้นเป็นไปได้โดยไม่ยุ่งยากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการศึกษาประเภทอื่น จากลักษณะดังกล่าวทำให้เกิดผลงานการศึกษาซึ่งใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมือหลักเป็นจำนวนมาก ในขณะเดียวกันการสำรวจเอกสารยังพบว่ามีเอกสารทางวิชาการจำนวนหนึ่งซึ่งเน้นศึกษาความถูกต้องแม่นยำของโปรแกรกดังกล่าวในการคาดการณ์ผล ซึ่งความถูกต้องแม่นยำนั้นจะขึ้นอยู่กับ inputs วิธีการทางตัวเลขและข้อสมมติฐานต่างๆ ของโปรแกรม การตั้งข้อสังเกตเกี่ยวกับความถูกต้องของ inputs และข้อสันนิษฐานของโปรแกรม เช่นลักษณะการใช้งานอาคารหรือการเปิดปิดช่องเปิดซึ่งมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพทางด้านพลังงานของอาคาร จึงเป็นประเด็นสำคัญที่น่าสนใจและต้องการการศึกษาเพิ่มเติม

สุดท้าย จากการทบทวนเอกสารพบว่าวิธีการและเครื่องมือในการศึกษานั้นเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อความก้าวหน้าทางวิชาการเกี่ยวกับการออกแบบอาคารโดยใช้การระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติ เพื่อเพิ่มความสะดวกสบายอย่างชัดเจน จากเดิมซึ่งวิธีการศึกษามีข้อจำกัดอยู่เพียงแค่การวัดและการจำลองโดยใช้หุ่นจำลองซึ่งไม่สามารถตรวจวัดข้อมูลความเร็วลมและการกระจายลมได้อย่างละเอียดและมีความยุ่งยากในการปรับเปลี่ยนอาคารในรูปแบบต่างๆ ที่สนใจ พัฒนาเป็นการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบอาคารและปัจจัยต่างๆได้โดยสะดวก การจำลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จึงส่งผลดีต่อวงการการศึกษาการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติอย่างสูง หากแต่วิธีการดังกล่าวก็มีข้อจำกัดเช่นเดียวกับวิธีการจำลองรูปแบบอื่น คือผู้ใช้จะต้องตรวจสอบความถูกต้องและความเหมาะสมของโปรแกรมรวมศึกษาข้อสันนิษฐานต่างๆเกี่ยวกับโปรแกรมอย่างรอบคอบก่อนใช้งานเสมอ ผลการศึกษาจึงจะถูกต้องแม่นยำและก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

บรรณานุกรม

- Allard, F. (Ed.). (1998). **Natural ventilation in buildings: a design handbook**. London: James&James (Science Publishers) Ltd.,
- ASHRAE. (2013). **ASHRAE handbook – fundamentals** American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Awbi, H. B. (2003). **Ventilation of buildings** (2nd edition). London: Spon Press.
- Awbi, H. B. (Ed.). (2008). **Ventilation systems: design and performance**. London: Taylor&Francis.
- Baldinelli, G. (2009). **Double-skin facades for warm climate regions: Analysis of a solution with an integrated movable shading system**. Building and Environment, 44, 1107-1118.
- Bangalee, M. Z. I., Lin, S. Y., & Miao, J. J. (2012). **Wind driven natural ventilation through multiple windows of a building: A computational approach**. Energy and Buildings, 45, 317-325.
- Bangalee, M. Z. I., Miao, J. J., Lin, S. Y., & Yang, J. H. (2013). **Flow visualization, PIV measurement and CFD calculation for fluid-driven natural cross-ventilation in a scale model**. Energy and Buildings, 66, 306-314.
- Bojic, M., & Kostic, S. (2006). **Application of COMIS software for ventilation study in a typical building in Serbia**. Building and Environment, 41, 12-20.
- Cândido, C., de Dear, R. J., Lamberts, R., & Bittencourt, L. (2010). **Air movement acceptability limits and thermal comfort in Brazil's hot humid climate zone**. Building and Environment, 45(1), 222-229.
- Cao, X., Liu, J., Jiang, N., & Chen, Q. (2014). **Particle image velocimetry measurement of indoor airflow field: A review of the technologies and applications**. Energy and Buildings, 69, 367-380.
- Chu, C.-R., & Chiang, B.-F. (2014). **Wind-driven cross ventilation in long buildings**. Building and Environment, 80, 150-158.
- Dascalakia, E., Santamouris, M., Bruant, M., Balaras, C. A., Bossaer, A., Ducarme, D., & Wouters, P. (1999). **Modeling large openings with COMIS**. Energy and Buildings, 30(1), 105-115.
- Du, X., Bokel, R., & Dobbeltstein, A. v. d. (2014). **Building microclimate and summer thermal comfort in free-running buildings with diverse spaces: A Chinese vernacular house case**. Building and Environment, 82, 215-227.
- Ernest, D., Bauman, F., & Arens, E. (1991). **The prediction of indoor air motion for occupant cooling in naturally ventilated buildings**. ASHRAE Transactions, 97(1), 539-552.

- Etheridge, D., & Sandberg, M. (1996). **Building ventilation: theory and measurement**. Chichester: John Wiley & Sons.
- Evola, G., & Popov, V. (2006). **Computational analysis of wind driven natural ventilation in buildings**. *Energy and Buildings*, 38, 491-501.
- Farea, T. G., Ossen, D. R., Alkaff, S., & Kotani, H. (2015). **CFD modeling for natural ventilation in a lightwell connected to outdoor through horizontal voids**. *Energy and Buildings*, 86, 502-513.
- Fountain, M., Bauman, F., Arens, E., Miura, K., & Dear, R. d. (1994). **Locally controlled air movement preferred in warm isothermal environments**. *ASHRAE Transactions*, 100(2), 937-952.
- Gan, G. (2000). **Effective depth of fresh air distribution in rooms with single-sided natural ventilation**. *Energy and Buildings*, 31(1), 65-73.
- Gao, J., Zhao, J. N., Li, X. D., & Gao, F. S. (2006). **A zonal model for large enclosures with combined stratification cooling and natural ventilation: Part 1-Model generation and its procedure**. *Journal of Solar Energy Engineering*, 128, 367-375.
- Gomaa, B. (2012). **A Wind Channel Passive Ventilation System for Deep-Plan, High-Rise Residential Buildings**. *International Journal of Ventilation*, 11(3), 247-254.
- Haghighat, F., Li, Y., & Megri, A. C. (2001). **Development and validation of a zonal model - POMA**. *Building and Environment*, 36, 1039-1047.
- Haghighat, F., Lin, Y., & Megri, A. C. (1999). **Zonal Model – A Simplified Multiflow Element Model**. Paper presented at the HybVent Forum'99, Sydney, Australia.
- Haw, L. C., Saadatian, O., Sulaiman, M. Y., Mat, S., & Sopian, K. (2012). **Empirical study of a wind-induced natural ventilation tower under hot and humid climatic conditions**. *Energy and Buildings*, 52, 28-38.
- Hirano, T., Kato, S., Murakami, S., Ikaga, T., & Shiraishi, T. (2006). **A study on a porous residential building model in hot and humid regions: Part 1 - the natural ventilation performance and the cooling load reduction effect of the building model**. *Building and Environment*, 41, 21-32.
- Hooff, T. V., Blocken, B., Aanen, L., & Bronsema, B. (2011). **A venturi-shaped roof wind-induced natural ventilation of buildings: Wind tunnel and CFD evaluation of different design configurations**. *Building and Environment*, 46, 1797-1807.
- Hooff, T. v., Blocken, B., Aanen, L., & Bronsema, B. (2012). **Numerical analysis of the performance of a venturi-shaped roof for natural ventilation: Influence of building width**. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 104-106, 419-427.
- Hughes, B. R., & Ghani, S. A. A. A. (2008). **Investigation of a windvent passive ventilation device against current fresh air supply recommendations**. *Energy and Buildings*, 40, 1651-1659.
- Inard, C., Meslem, A., & Depecker, P. (1998). **Energy consumption and thermal comfort in dwelling-cells: A zonal model approach**. *Building and Environment*, 33(5), 279-291.
- J.M., F., C.A., R., & R., B. (1996). **Evaluation of COMIS**. Lausanne: Swiss Federal Institute of Technology.
- Jiru, T. E., & Haghighat, F. (2008). **Modeling ventilated double skin facade—A zonal approach**. *Energy and Buildings*, 40, 1567-1576.

- Jones, B. M., Cook, M. J., Fitzgerald, S. D., & Iddon, C. R. (2016). **A review of ventilation opening area terminology.** *Energy and Buildings*, 118, 249-258.
- Khedari, J., Yamtraipat, N., Pratintong, N., & Hirunlabh, J. (2000). **Thailand ventilation comfort chart.** [doi: 10.1016/S0378-7788(00)00050-5]. *Energy and Buildings*, 32(3), 245-249.
- Kindangen, J., Krauss, G., & Depecker, P. (1997). **Effects of Roof Shapes on Wind-Induced Air Motion Inside Buildings.** *Building and Environment*, 32, 1-11.
- Koinakis, C. J. (2005). **The effect of the use of openings on interzonal air flows in buildings: an experimental and simulation approach.** *Energy and Buildings*, 37, 813-823.
- Lien, S.-T. J., & Ahmed, N. A. (2010). **Numerical simulation of rooftop ventilator flow.** *Building and Environment*, 45, 1808-1815.
- Liping, W., & Hien, W. N. (2007). **The impacts of ventilation strategies and facade on indoor thermal environment for naturally ventilated residential buildings in Singapore.** *Building and Environment*, 42(12), 4006-4015.
- Liu, S., Mak, C. M., & Niu, J. (2011). **Numerical evaluation of louver configuration and ventilation strategies for the windcatcher system.** *Building and Environment*, 46, 1600-1616.
- Lo, L. J., Banks, D., & Novoselac, A. (2013). **Combined wind tunnel and CFD analysis for indoor airflow prediction of wind-driven cross ventilation.** *Building and Environment*, 60, 12-23.
- Nicol, F. (2004). **Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics.** *Energy and Buildings*, 36, 628-637.
- Nielsen, P. V. (Ed.). (2007). **Computational Fluid Dynamics in Ventilation Design.** Brussels: Rehva.
- Nikas, K.-S., Nikolopoulos, N., & Nikolopoulos, A. (2010). **Numerical study of a naturally cross-ventilated building.** *Energy and Buildings*, 42, 422-434.
- Oropeza-Perez, I., & Østergaard, P. A. (2014). **Energy saving potential of utilizing natural ventilation under warm conditions – A case study of Mexico.** *Applied Energy*, 130(0), 20-32.
- Papakonstantinou, K. A., Kiranoudis, C. T., & Markatos, N. C. (2000). **Numerical simulation of air flow field in single-sided ventilated buildings.** *Energy and Buildings*, 33(1), 41-48.
- Peren, J. I., Hooff, T. v., Leite, B. C. C., & Blocken, B. (2015). **Impact of eaves on cross-ventilation of a generic isolated leeward sawtooth roof building: Windward eaves, leeward eaves and eaves inclination.** *Building and Environment*, 92, 578-590.
- Prianto, E., & Depecker, P. (2002). **Characteristic of airflow as the effect of balcony, opening design and internal division on indoor velocity: A case study of traditional dwelling in urban living quarter in tropical humid region.** *Energy and Buildings*, 34, 401-409.
- Priyadarsini, R., Cheong, K. W., & Wong, N. H. (2004). **Enhancement of natural ventilation in high-rise residential buildings using stack system.** *Energy and Buildings*, 36(1), 61-71.
- Ramponi, R., & Blocken, B. (2012). **CFD simulation of cross-ventilation flow for different isolated building configurations: Validation with wind tunnel measurements and analysis of physical and numerical diffusion effects.** *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 104-106, 408-418.

- Reyes, V. A., Sierra-Espinosa, F. Z., Moya, S. L., & Carrillo, F. (2015). **Flow field obtained by PIV technique for a scaled building-wind tower model in a wind-tunnel.** Energy and Buildings, 107, 424-433.
- Sharples, S., & Bensalem, R. (2001). **Airflow in courtyard and atrium buildings in the urban environment: a wind tunnel study.** Solar Energy, 70(3), 237-244.
- Shetabivash, H. (2015). **Investigation of opening position and shape on the natural cross ventilation.** Energy and Buildings, 93, 1-15.
- Szokolay, S. (2008). **Introduction to architectural science: the basis of sustainable design**, 2nd ed. Oxford: Architectural Press.
- Taleb, H. M. (2014). **Using passive cooling strategies to improve thermal performance and reduce energy consumption of residential buildings in U.A.E. buildings.** Frontiers of Architectural Research, 3(2), 154-165.
- Tan, A. Y. K., & Wong, N. H. (2012). **Natural ventilation performance of classroom with solar chimney system.** Energy and Buildings, 53, 19-27.
- Tantasavasdi, C., Jareemit, D., Suwanchaiskul, A., & Naklada, T. (2006). **Natural ventilation: Evaluation and design of houses in Thailand.** Paper presented at the Conference on Energy Technology Network of Thailand (E-NETT), Bangkok.
- Tecle, A., Bitsuamlak, G. T., & Jiru, T. E. (2013). **Wind-driven natural ventilation in a low-rise building: A boundary layer wind tunnel study.** Building and Environment, 59, 275-289.
- Venko, S., Vidal de Ventós, D., Arkar, C., & Medved, S. (2014). **An experimental study of natural and mixed convection over cooled vertical room wall.** Energy and Buildings, 68, Part A(0), 387-395.
- Wong, N. H., & Heryanto, S. (2004). **The study of active stack effect to enhance natural ventilation using wind tunnel and computational fluid dynamics (CFD) simulations.** Energy and Buildings, 36, 668-678.
- Yu, J., Yang, C., & Tian, L. (2008). **Low-energy envelope design of residential building in hot summer and cold winter zone in China.** Energy and Buildings, 40(8), 1536-1546.