

# วิธีการจำลองสภาพความชื้นของวัสดุรอบอาคาร ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับจำลอง การใช้พลังงานของอาคาร

ดร.ปรีชญา มัทธนนที

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำภาควิชาเทคนิคสถาปัตยกรรม  
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

ดร.ทยากร จารุชัยมนตรี

อาจารย์ ประจำภาควิชาเทคนิคสถาปัตยกรรม  
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

## บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอผลการศึกษาทบทวนทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสภาพความชื้นของวัสดุรอบอาคารที่มีผลต่ออุณหภูมิ สภาพความชื้นภายในห้อง และการใช้พลังงานงานของอาคาร วิธีการจำลองที่ศึกษามี 4 วิธี โดยแต่ละวิธีนั้น ได้นำเสนอรายละเอียดเกี่ยวกับหลักการคำนวณ ตัวอย่างของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง ข้อมูลที่ใช้ในการจำลอง ตัวอย่างการใช้วิธีการจำลองในงานวิจัยที่ผ่านมา ข้อดีและข้อจำกัดของแต่ละวิธีการจำลอง ผลจากการศึกษาได้สรุปเป็นข้อเสนอแนะแนวทางในการพิจารณาเลือกวิธีการจำลองที่เหมาะสม

คำสำคัญ: ความชื้น / การจำลองการใช้พลังงานของอาคาร / การห้วงความชื้น / พลศาสตร์ของไหล (CFD)

# Methods for Simulating Moisture Transfer in Building Envelope in Whole Building Energy Simulation

**Prechaya Mahattanatawe, Ph.D.**

Assistant Professor, Faculty of Architecture, Silpakorn University

**Tayagorn Charuchaimontri, Ph.D.**

Lecturer, Faculty of Architecture, Silpakorn University

## Abstract

This article presents the results of literature review on simulation methods employed in hygrothermal simulation programs. The programs concern on moisture transfer in building envelope which affects its moisture content, indoor humidity, and building energy consumption. Four simulation models, each includes calculation methods, examples of softwares, simulation inputs, an example of related research utilized the simulation models, as well as advantages and disadvantages. Finally, guidelines for selecting suitable modeling methods are suggested.

**Key words:** Moisture, Building Energy Simulation, Moisture Buffering, Computational Fluid Dynamics (CFD)

## 1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ความชื้นที่เกิดขึ้นภายในอาคารมีผลกระทบในหลายด้านทั้งต่อผู้ใช้อาคาร สภาพอาคาร และ การใช้พลังงานอาคาร สภาพความชื้นภายในอาคารที่ต่ำหรือสูงเกินไปมีผลทำให้ผู้ใช้อาคารจะรู้สึกไม่สบายได้ นอกจากนี้ความชื้นภายในอาคารยังมีผลต่อการรักษาสุขภาพของสิ่งของที่เก็บอยู่ภายในอาคาร การเปลี่ยนแปลงระดับความชื้นที่รวดเร็วจะส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของวัสดุ เช่น ภาพวาดที่เก็บอยู่ภายในพิพิธภัณฑ์ (Harriman et al., 2001) ความชื้นที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุ ที่ใช้เป็นฉนวนกันความร้อน มีผลทำให้ค่าการต้านทานความร้อนของวัสดุฉนวนนั้นลดลง (Sandberg et al., 2009) อันมีผลต่อภาระการปรับอากาศภายในอาคารที่สูงเพิ่มขึ้น การลดและเพิ่มความชื้นภายในอาคารมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การใช้เครื่องปรับอากาศ นอกจากนี้วัสดุภายในห้องที่สามารถดูดซับและคายออกความชื้นได้ (Hygroscopic Material) เช่น ไม้ ยิปซัมบอร์ด วัสดุประเภทนี้สามารถหน่วงความชื้น (Moisture Buffering) ภายในห้อง ทำให้ค่าความชื้นในอากาศของห้องไม่เปลี่ยนแปลงไปรวดเร็วเมื่อเทียบกับห้องที่ใช้วัสดุที่ไม่สามารถดูดซับความชื้นได้ (Tariku et al., 2010; Kunzel et al., 2005; Salonvaara et al., 2004)

Moon & Augenbroe (2003) ได้แบ่งโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับสภาพความชื้นของวัสดุอาคารเป็นสองประเภทหลัก คือ 1) การจำลองสภาพความชื้นที่วัสดุอาคารเพียงอย่างเดียว และ 2) การจำลองความชื้นของวัสดุอาคารที่เป็นส่วนหนึ่งของการจำลองการใช้พลังงานของอาคาร (Hygrothermal Model within a Whole Building Energy Simulation) โดยการศึกษาเน้นศึกษาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองประเภทหลัง การศึกษาวิจัยการใช้พลังงานของอาคารในประเทศไทยซึ่งมีลักษณะภูมิอากาศแบบร้อนชื้นโดยการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ ส่วนใหญ่จะไม่ได้คำนึงถึงผลของความชื้นของกรอบอาคารที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานของอาคาร จากผลการศึกษาวิจัยในต่างประเทศพบว่าค่าการใช้พลังงานของอาคารที่จำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในกรณีที่ไม่คำนึงถึงผลของความชื้นของวัสดุอาคารนั้นจะแตกต่างกันกับกรณีที่ไม่ได้คำนึงถึงผลของความชื้นของวัสดุอาคารอย่างมีนัยสำคัญ (Moon et al., 2014) อีกทั้งยังมีผลต่อค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องที่แตกต่างกันด้วย (Rode and Sørensen, 2010; Belarbi et al., 2006) อันเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการประเมินสถานะสบายภายในอาคารและความเสี่ยงต่อการเกิดของเชื้อราที่วัสดุอาคาร

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาโปรแกรมเพื่อจำลองสภาพความชื้นของวัสดุอาคารหลายโปรแกรม (Woloszyn & Rode, 2008) โดยแต่ละโปรแกรมนั้นมีวิธีการในการจำลองสภาพความชื้นที่แตกต่างกันไป ซึ่งแต่ละวิธีมีทั้งข้อดีและข้อจำกัด ดังนั้นการเลือกใช้วิธีการจำลองที่เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ที่จะนำมาใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของอาคารในประเทศไทย จะช่วยให้ได้ข้อมูลจากผลการจำลองในด้านสภาพอุณหภูมิ ความชื้น และ การใช้พลังงานที่ใกล้เคียงกับสภาพจริงมากขึ้น ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบและบริหารจัดการอาคารเพื่อการประหยัดพลังงานรวมถึงสถานะสบายของผู้ใช้อาคาร

## 2. วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อศึกษาถึงหลักการของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองสภาพความชื้นของวัสดุอาคาร ที่มีผลต่อสภาพอุณหภูมิ ความชื้น และการใช้พลังงานของอาคาร และศึกษาเปรียบเทียบข้อดีและข้อจำกัดของแต่ละวิธีการจำลอง

## 3. วิธีการศึกษา

1. ศึกษาจากหนังสือและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ทดลองใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถจำลองสภาพความชื้นของวัสดุอาคารที่มีผลต่ออุณหภูมิ ความชื้น และการใช้พลังงานของอาคาร เช่น โปรแกรม EnergyPlus และ WUFI PLUS
3. สรุปผลที่ได้จากการศึกษาและข้อเสนอแนะ

## 4. ผลการศึกษา

### 4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อความชื้นภายในอาคาร

ในการจำลองสภาพความชื้น จำเป็นต้องทราบถึงปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อสภาพความชื้นภายในอาคาร เพื่อนำปัจจัยต่างๆ ไปใช้ประกอบในการคำนวณ ได้แก่

1. ความชื้นที่เกิดขึ้นภายใน เช่น คน หม้อต้มน้ำ เครื่องอบผ้า
2. การใช้อุปกรณ์ที่มีผลต่อการลดหรือเพิ่มความชื้นภายในอาคาร เช่น เครื่องปรับอากาศ อุปกรณ์เพิ่มความชื้น (Humidifier) หรือ อุปกรณ์ลดความชื้น (Dehumidifier)
3. การรั่วซึมของอากาศจากภายนอกและจากบริเวณที่อยู่ติดกัน รวมถึงการระบายอากาศ
4. ความชื้นที่สะสมในอากาศ หรือ ความจุความชื้นของอากาศ
5. การดูดซับและการคายออก (Adsorption & Desorption) ของไอน้ำจากวัสดุภายในห้อง หรือความจุความชื้นของวัสดุภายในห้อง เช่น ผนัง พื้น ฝ้าเพดาน เฟอร์นิเจอร์ กระจาด ฯลฯ

ปัจจัยดังกล่าวสามารถนำมาเขียนเป็นสมการสมดุลความชื้นของอากาศภายในห้อง (Moisture Balance) ได้ดังสมการที่ 1 (Janssens et al., 2008) โดยสมมติว่าอากาศภายในห้องมีการผสมกันดี และอุณหภูมิ ความชื้น และความกดอากาศภายในห้องมีค่าที่เท่ากันทั้งห้อง

$$[1] + [2] + [3] = [4] + [5]$$

$$m_p + m_{sys} + \frac{V}{R_v T_i} (p_e - p_i) = \frac{V}{R_v T_i} \frac{dp_i}{dt} + \sum_j A_j \beta_j (p_i - p_{s,j}) \dots \text{(สมการที่ 1)}$$

(คำศัพท์เฉพาะ แสดงไว้ที่ส่วนท้ายของบทความนี้)

การถ่ายเทความชื้นโดยการแพร่ (Vapor Diffusion) ภายในผนัง สามารถนำมาเขียนเป็นสมการสมดุลมวล (Mass Balance) ซึ่งเป็นพื้นฐานของการจำลองความชื้นวิธีที่ 3 (HAM) โดยจะได้กล่าวในหัวข้อ 4.2.3 สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2

$$\begin{aligned}\frac{\partial w}{\partial t} &= \frac{\partial w}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \rho \xi(\phi) \frac{\partial \phi}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[ \delta(\phi) \frac{\partial}{\partial x} (\phi \cdot p_{sat}(\theta)) \right] \\ &= \rho \xi(\phi) \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{p}{p_{sat}(\theta)} \right) &= \frac{\partial}{\partial x} \left[ \delta(\phi) \frac{\partial p}{\partial x} \right] \quad \dots\dots (\text{สมการที่ 2})\end{aligned}$$

#### 4.2 วิธีการจำลองสภาพความชื้นของกรอบอาคารที่เป็นส่วนหนึ่งของการจำลองการใช้พลังงานของอาคาร

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับจำลองความชื้นของกรอบอาคารที่มีผลต่อสภาพอุณหภูมิความชื้น และการใช้พลังงานของอาคาร ที่จะนำเสนอมีวิธีการในการจำลอง 4 วิธีหลัก ได้แก่

1. Effective Moisture Capacitance Model (EC Model)
2. Effective Moisture Penetration Depth Model (EMPD Model)
3. Combined Heat Air and Moisture Transfer Model (HAM Model)
4. Combined Computational Fluid Dynamic Model (CFD Model) with EMPD / HAM Model

วิธีการจำลองในแต่ละวิธีนั้น มีรายละเอียดของหลักการคำนวณ ตัวอย่างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ข้อมูลที่ใช้ในการจำลอง ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้วิธีการดังกล่าว ตลอดจนข้อดีและข้อจำกัด ดังต่อไปนี้

##### 4.2.1 Effective Moisture Capacitance Model (EC Model)

**หลักการคำนวณ** วิธีการนี้นำเอาค่าความจุความชื้นของอากาศ (Moisture Capacitance) ภายในห้อง และค่าความจุความชื้นของวัสดุภายในห้องทั้งหมดมารวมกันเป็นค่าความจุของความชื้นรวมที่เรียกว่า “Effective Moisture Capacitance” (EC) ถ้าค่า EC นี้มีค่าเท่ากับ 10 หมายถึง ค่าความจุความชื้นของอากาศมีค่าเท่ากับ 1 หน่วย และค่าความจุความชื้นของวัสดุภายในห้องมีค่าเท่ากับ 9 หน่วย เมื่อรวมทั้งสองส่วนแล้วจะได้เท่ากับ 10 หน่วย (Woods et al., 2013) หรือหมายความว่า อากาศภายในห้องและวัสดุภายในห้องรวมกันสามารถที่จะดูดซับความชื้นได้เป็น 10 เท่าของค่าการดูดซับความชื้นของอากาศภายในห้องเพียงอย่างเดียว (Woods et al. 2013a) (ภาพที่ 1A) ดังนั้นจึงสามารถลดรูปของสมการที่ 1 ให้เป็นไปตามสมการที่ 3 ได้ โมเดลนี้มีข้อสมมติว่า 1) ปริมาณความชื้นของวัสดุ (Moisture Content) จะแปรเปลี่ยนอย่างรวดเร็วทันทีตามสภาพความชื้นของอากาศภายในห้อง โดยไม่คำนึงถึงการต้านทานการถ่ายเทความชื้นระหว่างอากาศกับวัสดุ 2) ความชื้นของวัสดุภายในห้องจะอยู่ในสภาวะที่สมดุลกับสภาพความชื้นของอากาศภายในห้องเสมอ (Janssen & Roels, 2009) ค่า EC ที่สูงจะทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไอน้ำในอากาศของ

ห้องไม่เปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็ว ค่า EC เป็นค่าที่ได้จากประสบการณ์หรือการทดลอง โดยทั่วไปมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 10-25 (Woods et al., 2013a) ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุภายในที่ใช้ภายในห้องที่แตกต่างกันตามประเภทของการใช้งานอาคาร เช่น สำนักงาน หรือ ห้องสมุด

$$m_p + m_{sys} + \frac{V}{R_v T_i} (p_e - p_i) = (EC) \frac{dp_i}{dt} \dots\dots \text{(สมการที่ 3)}$$

โดยค่าความจุความชื้นรวมสามารถเขียนในรูปดังนี้ได้  $EC = M \frac{V}{R_v T_i} \dots\dots \text{(สมการที่ 4)}$

$$M = 1 + \sum_j (A_j \rho \xi_j \Delta_j) \frac{R_v T_i}{v_{psat}(\theta_i)} \dots\dots \text{(สมการที่ 5)}$$

ซึ่งเป็นการนำเอาค่าคงที่คุณสมบัติของวัสดุ (Constant Material Properties) และค่าความลึกชั้นวัสดุดูดซึม (Penetration Depth) มาพิจารณา ซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อ 4.2.2

ตัวอย่างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โปรแกรมที่สามารถจำลองด้วยวิธีการนี้ เช่น โปรแกรม Bsim, EnergyPlus, Indoor Humidity Assessment Tool (IHAT), TRNSYS เป็นต้น รายละเอียดของโปรแกรมต่างๆ สามารถค้นคว้าเพิ่มเติมได้จากเว็บไซต์ที่แสดงไว้ในภาคผนวก

ข้อมูลที่ใช้ในการจำลอง การจำลองด้วยวิธีนี้ต้องระบุค่า EC ที่เลือกใช้ ตัวอย่างของค่า EC นี้ ที่นำมาใช้ในโปรแกรม IHAT (EPA, 2001) แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1: ค่า Moisture Capacitance Multipliers ที่ใช้ในโปรแกรม IHAT (EPA, 2001; p. 40)

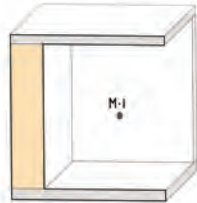
ประเภทการใช้งาน	Capacitance		
	Low	Medium	High
Classroom	10	15	20
Library	15	20	25
Gymnasium	10	N/A	N/A
Auditorium	10	15	20
Cafeteria	10	N/A	N/A
Office	10	15	20

หมายเหตุ: ในโปรแกรม IHAT ค่า Low ใช้สำหรับห้องที่พื้นผิววัสดุส่วนใหญ่เป็นวัสดุพื้นผิวแข็ง (Hard Surface) ยกเว้นฝ้าเพดานเป็นแผ่นยิปซัม, ค่า Medium ใช้สำหรับห้องที่มีวัสดุบุผนังและฝ้าเพดานเป็นยิปซัม และพื้นเป็นวัสดุพื้นผิวแข็ง, High ใช้สำหรับห้องที่วัสดุบุผนังและฝ้าเพดานเป็นยิปซัม และพื้นเป็นวัสดุพรม

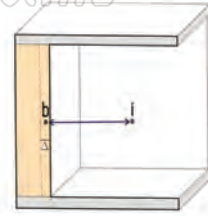
**ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้หลักการนี้** Janssen & Christensen (2013) จำลองสภาพความชื้นภายในอาคารที่ใช้เก็บวัตถุที่แสดงในพิพิธภัณฑ์ (Museum Storage Space) โดยได้เลือกใช้วิธี EC นี้ของโปรแกรม BSIm ในการจำลองผลการห้วงของความชื้นของวัตถุที่เก็บไว้ในอาคาร เนื่องจากวิธีการอื่น ๆ นั้น จำเป็นจะต้องทราบขนาดพื้นที่ผิวของวัตถุและคุณสมบัติของวัสดุ ซึ่งการคำนวณขนาดพื้นที่ผิวของวัตถุที่จัดเก็บในอาคารที่มีจำนวนมากและมีวัสดุที่หลากหลายนั้นเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก โดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่า EC เท่ากับ 5 แต่ในส่วนของการจำลองสภาพความชื้นของวัสดุอาคาร เช่น ผนัง พื้น ฝ้าเพดาน นั้นได้เลือกใช้วิธี EMPD (รายละเอียดของวิธีการนี้แสดงไว้ในหัวข้อ 4.2.2)

**ข้อดีและข้อจำกัด** ข้อดีของการจำลองด้วยวิธีการนี้คือ สามารถคำนวณผลได้อย่างรวดเร็วกว่าวิธีอื่น และจำนวนข้อมูลที่ต้องใส่ในโปรแกรมเพิ่มเติมจากการจำลองการใช้พลังงานโดยทั่วไปมีเพียงค่า Effective Moisture Capacitance ส่วนข้อจำกัดของวิธีการนี้ เนื่องจากความชื้นของอากาศและวัสดุถูกนำมาคิดรวมเป็นส่วนเดียวกัน การจำลองด้วยวิธีการนี้จึงไม่สามารถศึกษาได้ถึงสภาพความชื้นที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุได้ และเนื่องจากวิธีนี้จะไม่คำนึงถึงการต้านทานความชื้นระหว่างวัสดุและอากาศภายในห้อง ดังนั้นในกรณีที่อยู่ในอาคารมีความชื้นสูงและมีรอบการเกิดขึ้นที่ถี่ วิธีการนี้จะหวน ความชื้นได้ทันทีตามค่า EC ที่กำหนดไว้ แต่ในขณะที่ในสภาพจริงนั้นการดูดซับความชื้นที่เกิดขึ้นในวัสดุจะเกิดขึ้นในอัตราที่ช้า (Wood et al., 2013)

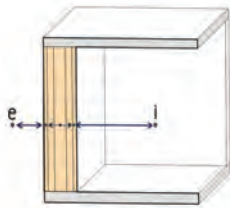
มหาวิทยาลัยศิลปากร สวทช. นวัตกรรม



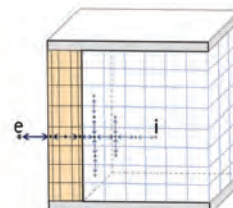
(A) Effective Moisture Capacitance



(B) Effective Moisture Penetration Depth



(C) Heat Air and Moisture (HAM) Transfer



(D) CFD + HAM

ภาพที่ 1: แสดงหลักการในการจำลองความชื้นของ 4 วิธี

หมายเหตุ: ภาพแสดงเฉพาะการถ่ายเทความชื้นของผนัง (ยังไม่รวมส่วนอื่นๆ เช่น พื้น และ ฝ้าเพดาน)

i: Room air node, e: Exterior air node, b: Wall node, M: Moisture capacitance multiplier,

$\Delta$ : Moisture penetration depth

#### 4.2.2 Effective Moisture Penetration Depth Model (EMPD Model)

**หลักการคำนวณ** โมเดลนี้มีข้อสมมุติว่ามีเพียงชั้นวัสดุบางของผนังด้านที่อยู่ติดกับอากาศภายในห้องเท่านั้นที่จะมีการแลกเปลี่ยนความชื้นกับอากาศภายในห้อง โดยชั้นวัสดุนี้จะมีความชื้นที่สม่ำเสมอและเป็นตัวแทนของปริมาณความชื้นทั้งหมดที่มีอยู่ในผนัง (DOE, 2014) ชั้นวัสดุนี้มีชื่อเรียกว่า “Sorptions-active-layer” หรือ “Humidity Buffer” (ภาพที่ 1B) ความหนาของชั้นวัสดุบางนี้มีชื่อเรียกว่า “ความลึกชั้นวัสดุดูดซึมประสิทธิภาพ” (Effective Moisture Penetration Depth (EMPD)) ค่าระยะความลึกของชั้นวัสดุนี้คำนวณได้จากค่าคุณสมบัติในด้านความชื้นของวัสดุและช่วงระยะเวลาของความชื้นที่แปรเปลี่ยนไปในหนึ่งรอบที่นำมาพิจารณา ดังแสดงในสมการที่ 6 (Janssens & Paepe, 2005) โดยถ้าช่วงระยะเวลาคือหนึ่งวัน ค่า EMPD นี้จะมีค่าเป็นหลักมิลลิเมตร แต่ถ้าช่วงระยะเวลาเพิ่มขึ้นเป็นหนึ่งปี จะมีค่าเพิ่มเป็นหลักเซนติเมตร (Janssens & Paepe, 2005)

$$EMPD = \sqrt{\frac{\delta \cdot p_{sat}(\theta) \cdot T_p}{\rho \xi \pi}} \dots\dots \text{(สมการที่ 6)}$$

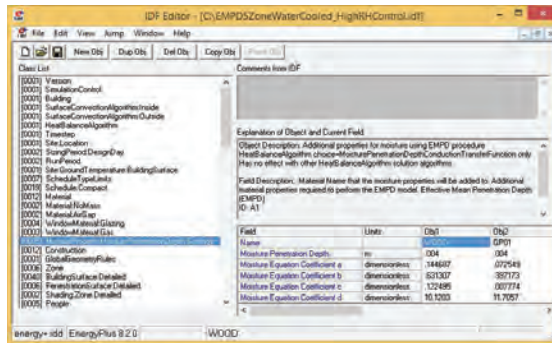
$$\rho \xi = \rho \frac{du}{d\phi} = \frac{dw}{d\phi} \dots\dots \text{(สมการที่ 7)}$$

การคำนวณด้วยวิธีนี้ไม่คำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้คือ 1) การแพร่ของความชื้นระหว่างชั้นของวัสดุที่อยู่ติดกัน 2) การแพร่ของไอน้ำระหว่างภายนอกและภายในอาคารที่ผ่านทางวัสดุอาคาร (Janssens & Paepe, 2005) 3) ความร้อนแฝงที่เกิดขึ้นอันเป็นผลมาจากการดูดเข้าและคายความชื้นออกของวัสดุ (Wood et al., 2013) และ 4) การถ่ายเทของไอน้ำที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (Steeman et al., 2010) การจำลองด้วยวิธีนี้มีข้อสมมุติว่าคุณสมบัติในการจุความชื้นและความสามารถในการแพร่ไอน้ำของวัสดุมีค่าที่คงที่ไม่ขึ้นกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ (Steeman et al., 2009)

การกำหนดระยะความลึกจะมีผลต่อการคำนวณสภาพความชื้นภายในห้องค่อนข้างมาก Janssens & Paepe (2005) ได้ทดลองเปรียบเทียบผลการจำลองห้องขนาด 6 x 8 x 2.7 เมตร ที่ใช้วัสดุผนังเป็นคอนกรีตมวลเบา (Aerated Concrete) โดยการกำหนดค่า EMPD เป็น d/2, d, และ 3d และ พบว่าช่วงห่างระหว่างค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่ำสุดและสูงสุดของวันที่ทำการศึกษามีค่าที่แตกต่างกันมากคือ 14.8%, 9.0%, และ 4.3% ตามลำดับ เนื่องจากการกำหนดความลึกเพียงระดับเดียวจะไม่เหมาะกับการจำลองสภาพความชื้นที่เกิดในช่วงระยะเวลาที่ยาวนาน ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เช่น TRNSYS จึงได้พัฒนาให้มีระยะความลึกเป็นสองแบบ คือ ความลึกที่ระดับผิว (Surface Layer) สำหรับการจำลองสภาพความชื้นช่วงในช่วงระยะเวลาที่สั้น และ ระดับที่ลึกเพิ่มขึ้น (Deep Layer) สำหรับการจำลองสภาพความชื้นช่วงในช่วงระยะเวลานานขึ้น เช่น ในช่วงระยะเวลา 1 ปี (Steeman et al., 2010)

**โปรแกรมคอมพิวเตอร์** โปรแกรมที่สามารถจำลองด้วยวิธีการนี้ เช่น โปรแกรม Bsim, EnergyPlus, TRNSYS เป็นต้น





ภาพที่ 2: ตัวอย่างการใส่ข้อมูลในการจำลองด้วยวิธี EMPD ในโปรแกรม EnergyPlus (ค่า Moisture Penetration Depth และ Moisture Equation Coefficient a, b, c, d)

**ข้อมูลที่ใช้ในการจำลอง** การจำลองด้วยวิธีนี้ต้องทราบขนาดพื้นที่ผิวของวัสดุที่อยู่ภายในห้อง ความหนาแน่นของวัสดุ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ (Water Vapor Permeability) ระยะความลึก (EMPD) ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลของวัสดุและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (Moisture Sorption Curve) ซึ่งข้อมูลส่วนหลังนี้ในโปรแกรม EnergyPlus ให้ระบุเป็นค่าของ Moisture Equation Coefficient จำนวนสี่ค่า ดังแสดงใน (ภาพที่ 2)

ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้หลักการนี้ Yeh et al. (2012) ได้เลือกใช้วิธี EMPD นี้ ของโปรแกรม EnergyPlus เพื่อศึกษาการใช้วัสดุผนังที่ปลูกด้วยไม้ (Pine Wood) ในการหน่วงความชื้นภายในห้องพักอาศัย ในสภาพภูมิอากาศของประเทศไต้หวัน พบว่าการจำลองสภาพอากาศที่คำนึงถึงผลของความชื้นที่ผนังโดยวิธี EMPD นี้ ทำให้ค่าความชื้นภายในห้องไม้แปรเปลี่ยนไปอย่างรวดเร็ว เมื่อเทียบกับการจำลองที่ไม่ได้คำนึงถึงผลของการหน่วงความชื้นของวัสดุอาคาร ในส่วนของการประเมินคุณภาพอากาศภายในอาคาร พบว่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องยังคงมีค่าที่สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน เนื่องจากการใช้วัสดุอาคารในการหน่วงความชื้นเพียงอย่างเดียวยังไม่พอ จำเป็นต้องมีวิธีการอื่นๆ ร่วมด้วยเช่น การระบายอากาศ

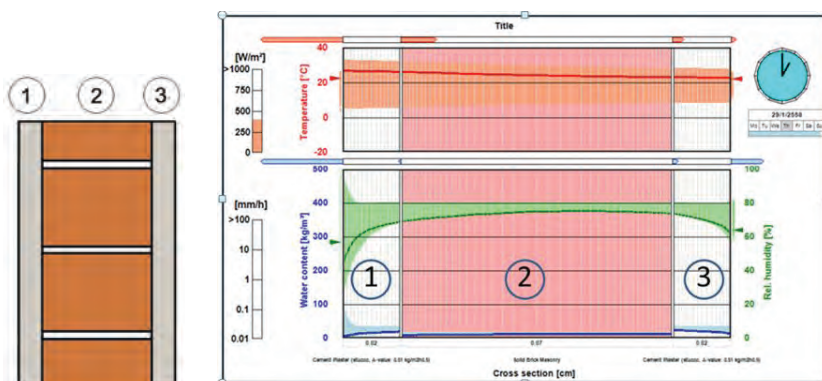
**ข้อดีและข้อจำกัด** ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถจำลองสภาพความชื้นได้ใกล้เคียงกับสภาพจริงมากกว่าวิธีแรก (EC) (Woods et al., 2013a) และเมื่อเทียบผลการจำลองด้วยวิธี EMPD นี้ กับ วิธี HAM (ในหัวข้อ 4.2.3) ซึ่งเป็นวิธีการจำลองที่มีความถูกต้องมากขึ้น การจำลองด้วยวิธี EMPD จะได้ค่าที่ใกล้เคียงกับการจำลองด้วย HAM ในกรณีที่อุณหภูมิภายในห้องนั้นมีค่าที่คงที่และไม่คำนึงถึงผลของความร้อนแฝง (Steehan et al., 2010) อีกทั้งวิธี EMPD สามารถคำนวณผลได้รวดเร็ว ถ้าเวลาที่ใช้ในการคำนวณของวิธี EC เทียบเท่ากับ 1 เวลาที่ใช้ในการคำนวณด้วยวิธี EMPD นี้มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยคือประมาณ 1.05 เท่า (Woods et al., 2013a) ส่วนข้อจำกัดนั้น จากการศึกษาเปรียบเทียบการจำลองด้วย EMPD กับวิธี HAM พบว่าการจำลองด้วยวิธี EMPD นี้จะได้ผลที่แตกต่างจาก HAM อย่างชัดเจนมากขึ้นในกรณีที่ 1) ความหนาของชั้นวัสดุที่ดูดซับความชื้นได้นั้นไม่ถูกจำกัด เช่น ไม่มีวัสดุป้องกันการแพร่ของไอน้ำ (Vapor Barrier) คั่นอยู่ระหว่างวัสดุผนัง 2) ปริมาณความชื้นที่เกิดขึ้นภายในห้อง เช่น จากคน หรือ การระบายอากาศมีค่าไม่คงที่ และ 3) มีความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในผนัง (Koronthaljova & Milhaka, 2008)

## 4.2.3 Combined Heat and Moisture Transfer Model (HAM Model)

**หลักการคำนวณ** การจำลองด้วยวิธีนี้สามารถที่จะจำลองการถ่ายเทความชื้นระหว่างชั้นวัสดุอาคาร การแพร่ของไอน้ำระหว่างภายนอกและภายในอาคารที่ผ่านทางกรอบอาคาร ค่าความร้อนแฝงที่เป็นผลมาจากการดูดซับและคายความชื้นที่ส่งผลต่อสมดุลความชื้นของอากาศภายในห้อง และผลของความชื้นของวัสดุที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) (Steeman et al., 2010, Tariku et al., 2010) ดังนั้นจึงทำให้ผลการคำนวณด้วยวิธีนี้ได้ค่าความชื้น อุณหภูมิ และการใช้พลังงานของอาคารได้ใกล้เคียงกับสภาพจริงมากกว่าสองวิธีการแรก

ในการจำลองความชื้นของผนังด้วยวิธีนี้ วัสดุผนังแต่ละชนิดที่ประกอบขึ้นเป็นผนังจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนย่อยๆ (Cell) เพื่อใช้ในการคำนวณ การแบ่งแต่ละช่วงจะมีขนาดความหนาที่ไม่เท่ากัน โดยบริเวณช่วงต่อระหว่างวัสดุแต่ละชนิด และวัสดุส่วนที่อยู่ติดกับภายนอกหรือภายในอาคาร จะถูกแบ่งให้มีความหนาที่ละเอียดกว่าบริเวณตรงกลางของวัสดุ เนื่องจากเป็นบริเวณที่จะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นมากกว่าที่อื่น (DOE, 2014) (ภาพที่ 1C, ภาพที่ 3) การจำลองประเภทนี้โดยทั่วไปจะต้องการจำนวนรอบในการคำนวณ (Iterations) ตามสมการสมดุลความร้อน (สมการที่ 8) และสมดุลของมวล (สมการที่ 2) ที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การคำนวณด้วยวิธีการนี้ใช้ระยะเวลานาน ตัวอย่างเช่น การประมวลผลด้วยวิธีการนี้ในโปรแกรม EnergyPlus แนะนำให้ใช้ค่า Time Step อย่างน้อยเท่ากับ 20 (ช่วงละ 3 นาที) ซึ่งจะแตกต่างจากการคำนวณการใช้พลังงานที่ไม่ได้คำนวณร่วมกับ HAM ซึ่งใช้ค่า Time Step ที่น้อยกว่าคือเท่ากับ 6 (ช่วงละ 10 นาที) ในกรณีที่อาคารมีการใช้ HVAC ด้วย (DOE, 2014a)

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \rho c_p \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(\phi) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + h_v \frac{\partial}{\partial x} \left[ \delta(\phi) \frac{\partial}{\partial x} (\phi \cdot p_{sat}(\theta)) \right] \dots \text{(สมการที่ 8)}$$



ภาพที่ 3: ตัวอย่างผนังก่ออิฐฉาบปูนสองด้าน (รูปซ้าย) และการแบ่ง cell ของผนังในการคำนวณด้วยวิธี HAM และกราฟที่แสดงอุณหภูมิ (รูปขวาบน) และความชื้นในวัสดุของโปรแกรม WUFI Plus (รูปขวาล่าง)

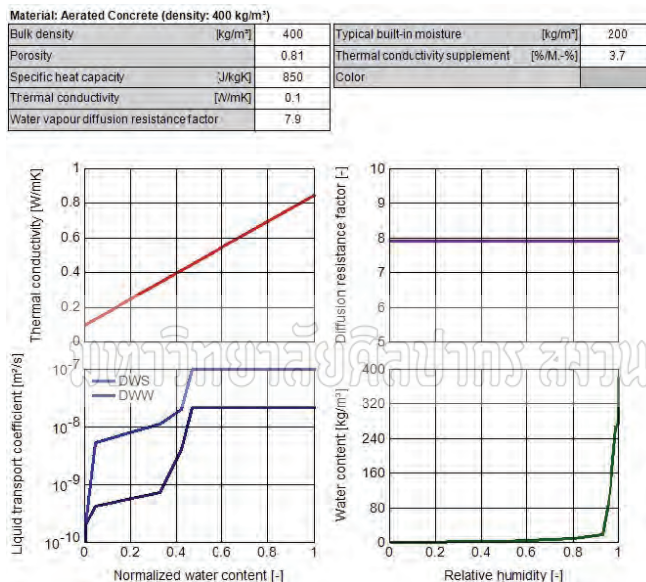
งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเปรียบเทียบผลระหว่างการจำลองด้วยวิธี HAM กับผลที่ได้จากการวัดในสถานที่จริงว่าได้ค่าที่ใกล้เคียงกันหรือไม่ เช่น งานวิจัยของ Kunzel et al. (2005) ได้ศึกษาเปรียบเทียบผลการจำลองด้วยวิธีการนี้ โดยใช้โปรแกรม WUFI Plus เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดค่าภายในห้องที่ตั้งอยู่ในประเทศเยอรมนี ห้องที่ทดสอบมีขนาดพื้นที่ 20 ตารางเมตร ใช้ผนังก่ออิฐ ผิวด้านในเป็นปูนฉาบหนา 12 มม. และมีฉนวนอยู่ที่ด้านนอก โดยทดสอบกับวัสดุผิวภายในสามแบบคือ ปูนฉาบ อะลูมิเนียมพอยล์ และไม้ พบว่าผลจากการจำลองและจากการวัดค่าในสถานที่จริงได้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องที่มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน โดยห้องที่บุด้วยไม้จะมีความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่ำที่สุด รองลงมาคือห้องที่บุด้วยปูนฉาบ และอะลูมิเนียมพอยล์ ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุผิวด้วยไม้ช่วยหน่วงความชื้นได้ดีกว่าวัสดุอื่น

**โปรแกรมคอมพิวเตอร์** โปรแกรมที่สามารถจำลองด้วยวิธีการนี้ เช่น Bsim, EnergyPlus, HAMFitPlus, WUFI Plus โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองประเภทนี้โดยทั่วไป นอกจากให้ค่าการใช้พลังงาน อุณหภูมิ และ ความชื้นภายในห้องแล้วยังสามารถให้ผลการคำนวณค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณความชื้น (Water Content) ของแต่ละ Cell ที่ได้แบ่งไว้ และค่าปริมาณความชื้นเฉลี่ยของผนังอาคารแต่ละส่วน (Surface Average Water Content Ratio) โดยบางโปรแกรมให้ผลเป็นเพียงค่าตัวเลข เช่น EnergyPlus แต่บางโปรแกรมสามารถแสดงผลเป็นภาพกราฟิก ช่วยให้เข้าใจสภาพอุณหภูมิความชื้นภายในผนังได้ง่ายขึ้น เช่น โปรแกรม WUFI Plus (ภาพที่ 3) เนื่องจากการถ่ายเทความชื้นผ่านวัสดุอาคารนั้นมีหลายลักษณะ เช่น การแพร่ของไอน้ำ (Vapor Diffusion) การแพร่ของของเหลว (Liquid Diffusion) การแพร่ของอากาศที่มีความชื้น (Moist Air Diffusion) โปรแกรมคอมพิวเตอร์ส่วนใหญ่จะสามารถจำลองการแพร่ของไอน้ำ (Vapor Diffusion) ได้ แต่จะมีเพียงบางโปรแกรมที่จำลองได้ครบทั้งหมด (Woloszyn & Rode, 2008)

นอกจากนี้จำนวนชั้นของการแบ่งวัสดุเป็น Cell ย่อย ของแต่ละโปรแกรมจะแตกต่างกัน เช่น โปรแกรม EnergyPlus สามารถแบ่งชั้นของวัสดุแต่ละชนิดเพื่อใช้ในการคำนวณได้มากที่สุด 10 Cell (DOE, 2014) ทั้งนี้ผู้ใช้โปรแกรมไม่สามารถกำหนดค่าเองได้โดยโปรแกรมจะคำนวณให้อัตโนมัติ แต่ในโปรแกรม WUFI Plus ผู้ใช้โปรแกรมสามารถที่จะกำหนดความละเอียดเป็นสามระดับ คือ Course (หยาบ) Medium (ปานกลาง) และ Fine (ละเอียด)

**ข้อมูลที่ใช้ในการจำลอง** การจำลองด้วยวิธีการนี้จะต้องใช้ข้อมูลมากกว่าการจำลองด้วยวิธี EMPD ข้อมูลที่ใช้ ได้แก่ ค่าปริมาณความชื้นในวัสดุเริ่มต้น (Initial Moisture Content) ความพรุนของวัสดุ (Porosity), ค่าความต้านทานการแพร่ของไอน้ำ (Water Vapor Diffusion Resistance Factor), ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลของวัสดุและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (Moisture Sorption Curve) นอกจากนี้ถ้าโปรแกรมสามารถจำลองการแพร่ของของเหลวและผลของความชื้นที่มีต่อคุณสมบัติในด้าน การนำความร้อนหรือการแพร่ของไอน้ำ ข้อมูลที่ต้องใช้ในการจำลองเพิ่มขึ้น ได้แก่ Liquid Transport Coefficient, Heat Conductivity Moisture Dependent, และ Diffusion Resistance Factor Moisture Dependent ตามลำดับ (ภาพที่ 4)

เนื่องจากการจำลองด้วยวิธีการนี้จะต้องกำหนดค่าความชื้นเริ่มต้นของวัสดุที่ใช้ (Initial Moisture Content) ซึ่งอาจเลือกใช้จากค่า Typical Built-in ที่มีมาให้ในโปรแกรม ค่านี้ของวัสดุ โดยทั่วไปจะมีค่าความชื้นของวัสดุที่สูง ดังนั้นเพื่อลดกระทบจากกำหนดค่านี้ที่อาจสูงหรือต่ำไปจากสภาพความชื้นภายในผนังอาคารจริง ที่จะส่งผลต่อการคำนวณสภาพความชื้นและการใช้พลังงานของอาคารในช่วงระยะเวลาหนึ่งปีได้ ในงานวิจัยของ (Woods et al., 2013) จึงกำหนดช่วงระยะเวลาการรันโปรแกรมที่มีระยะเวลาที่นานขึ้น คือ 2 ปี โดยใช้ผลการคำนวณของช่วงปีที่ 2 แทนผลการคำนวณในช่วงปีแรก



ภาพที่ 4: ตัวอย่างข้อมูลวัสดุที่ใช้ในการจำลองแบบ HAM ของโปรแกรม WUFI Plus

ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้หลักการนี้ Moon & Ryu (2014) ศึกษาเปรียบเทียบการจำลองอาคารสองวิธี วิธีแรกจำลองโดยที่คำนึงถึงการถ่ายเทความร้อนและความชื้นของวัสดุอาคาร (Hygrothermal Model) และวิธีที่สองจำลองโดยคำนึงถึงการถ่ายเทความร้อนของวัสดุอาคารเท่านั้น (Thermal-only Model) โดยการใช้โปรแกรม WUFI Plus ห้องที่จำลองเป็นห้องพักอาศัยในประเทศเกาหลี พบว่าการจำลองด้วยวิธีแรก มีผลทำให้ค่าการใช้พลังงานในการปรับอากาศนั้นสูงเพิ่มขึ้น 4.4 % เนื่องจากความชื้นที่เพิ่มขึ้นในวัสดุอาคารมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุเพิ่มสูงขึ้น พลังงานที่ใช้ในการปรับอากาศ (Cooling and Heating) จึงเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องที่จำลองด้วยวิธีแรกจะมีช่วงความแตกต่างในระหว่างวันที่น้อยกว่าวิธีที่สอง เนื่องจากผลของการหน่วงความชื้นของวัสดุอาคารภายในห้อง ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกันนี้มีผลต่อการประเมินความเสี่ยงของการเกิดเชื้อราที่วัสดุอาคาร โดยพบว่าห้องที่ใช้วิธีจำลองแบบที่สองจะมีความเสี่ยงในการเกิดเชื้อราที่วัสดุอาคารที่สูงกว่าห้องที่จำลองด้วยวิธีการแรก เนื่องจากอากาศภายในห้องมีความชื้นที่สูงกว่า

**ข้อดีและข้อจำกัด** ข้อดีของการใช้วิธี HAM คือสามารถนำไปใช้ในการศึกษาสภาพความชื้นภายในของวัสดุอาคารได้ และโดยหลักการในการคำนวณของ HAM นั้นอาจถือได้ว่าทำให้สามารถจำลองสภาพความชื้นภายในห้องได้ใกล้เคียงกับสภาพจริงมากกว่าวิธี EC และ EMPD (Steehan, 2010; Steeman, 2010a) นอกจากนี้งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าผลการจำลองด้วยวิธีนี้เมื่อเทียบกับการวัดค่าในอาคารจริงมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน (Moon et al., 2014; Tariku et al., 2010; Kunzel et al., 2005) แต่วิธี HAM มีข้อจำกัดที่สำคัญคือใช้เวลาในการคำนวณที่ยาวนานกว่าสองวิธีแรก ถ้าเทียบเวลาในการคำนวณของ EC เท่ากับ 1 เวลาที่ใช้ในการคำนวณด้วยวิธี HAM มีค่าประมาณ  $10^2-10^4$  เท่า (Wood et al., 2013a) นอกจากนี้ข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุที่ต้องใช้ในการคำนวณมีมาก การจำลองโดยทั่วไปจึงมักใช้ข้อมูลที่โปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้มีมาให้แล้ว ซึ่งจากงานวิจัยของ Moon et al. (2014) พบว่าข้อมูลที่ใช้ในโปรแกรมกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบวัสดุในห้องนั้นๆ มีค่าที่แตกต่างกันซึ่งอาจมีผลต่อค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรม

#### 4.2.4 4. Combined Computational Fluid Dynamic Model (CFD Model) with EMPD / HAM

**หลักการคำนวณ** การจำลองทั้งสามแบบที่ผ่านมานั้น ตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่าสภาพอากาศภายในห้อง ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น ความดันอากาศ มีค่าเท่ากันทั้งห้อง ซึ่งในสภาพอาคารจริงอาจไม่ได้เป็นแบบนั้น เช่น บริเวณที่มีลมจากเครื่องปรับอากาศมาตกกระทบบ หรือ บริเวณมุมห้องซึ่งเป็นจุดที่อับลม ซึ่งมีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนและความชื้นของอากาศและผนังในบริเวณนั้นแตกต่างจากบริเวณอื่น อันมีผลต่อการสภาพความชื้นของผนังและสภาวะสบายในบริเวณนั้นได้ เนื่องจากโปรแกรมประเภท CFD (Computational Fluid Dynamics) นั้น สามารถที่จะจำลองสภาพการถ่ายเทความร้อนและความชื้นและการไหลของอากาศภายในห้องที่ละเอียดมากขึ้นได้โดยขึ้นอยู่กับที่ตั้งค่าในการแบ่งกริด แต่โปรแกรม CFD ส่วนใหญ่จะไม่ได้คำนึงถึงการถ่ายเทความร้อนระหว่างผนังอาคารกับอากาศภายในห้อง (Janssens et al., 2008) จึงได้มีแนวคิดในการพัฒนาโปรแกรมที่นำ CFD มาใช้ร่วมกันกับวิธีการคำนวณการถ่ายเทความร้อนระหว่างวัสดุอาคารกับอากาศภายในห้อง โดยมีการพัฒนาโปรแกรมในหลายลักษณะ เช่น 1) การใช้ CFD ร่วมกับ EMPD (Steehan et al., 2009) 2) การใช้ CFD ร่วมกับ HAM (Bellegheem et al., 2010) (ภาพที่ 1D) และ 3) การใช้ CFD โดยการจำลองผนังเสมือนของไหลที่อยู่นิ่งเพื่อให้สามารถคำนวณการแพร่ของไอน้ำในผนังได้ (Hedegaard et al., 2004) นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาโปรแกรมแบบที่ทำงานร่วมกันระหว่าง BES + CFD + EMPD (Mirsadeghi et al., 2009)

**โปรแกรมคอมพิวเตอร์** โปรแกรม CFD ที่ได้มีการพัฒนาเพิ่มเติมเพื่อให้สามารถจำลองด้วยวิธีการนี้ เช่น โปรแกรม Fluent โดยใช้วิธีการคำนวณความชื้นแบบ EMPD หรือ HAM และ โปรแกรม Fluent ที่ทำงานร่วมกันโปรแกรมจำลองการใช้พลังงาน คือ ESP-r

**ข้อมูลที่ใช้ในการจำลอง** การจำลองด้วยวิธีการนี้จะต้องใช้ข้อมูลในการจำลองตามวิธีการคำนวณการถ่ายเทความร้อนที่นำมาใช้ประกอบกัน เช่น EMPD หรือ HAM นอกจากนี้ยังต้องใส่ข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อใช้ในการรันโปรแกรม CFD

### ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้หลักการนี้

Mirsadeghi et al. (2009) ได้พัฒนาโปรแกรมที่ทำงานร่วมกันระหว่างโปรแกรม Building Energy Simulation Program (BES) ในที่นี้คือโปรแกรม ESP-r และ โปรแกรม CFD คือโปรแกรม Fluent ในส่วนของการคำนวณผลการห้วงความชื้นของผนังอาคารใช้วิธี EMPD ระหว่างโปรแกรม BES และ CFD จะมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณในแต่ละช่วง Time Step โดย BES ทำการคำนวณหาค่าอุณหภูมิและอัตราส่วนความชื้น (Humidity Ratio) ที่ผิวภายใน และส่งต่อข้อมูลนี้ไปยังโปรแกรม CFD จากนั้นโปรแกรม CFD จะคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทของไอน้ำด้วยการพาที่บริเวณผิวของผนัง และส่งกลับให้กับโปรแกรม BES ซึ่งจะนำไปใช้ในการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนและความชื้นด้วยการพาตามสมการสมดุลความร้อนและความชื้นต่อไป ในการศึกษานี้ได้เปรียบเทียบค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่คำนวณได้ระหว่าง BES+EMPD และ BES+CFD+EMPD ห้องที่จำลองเป็นห้องขนาด  $6 \times 8 \times 2.7$  เมตร พบว่า ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่คำนวณได้นั้นแตกต่างกันสูงสุดที่ 6.5% ผลที่แตกต่างกันนี้ส่วนหนึ่งเนื่องมาจากการคำนวณด้วย CFD นั้น ทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทของไอน้ำด้วยการพาที่บริเวณผิวของผนังที่สูงกว่าของ BES

**ข้อดีและข้อจำกัด** ข้อดีของการใช้วิธีการนี้คือสามารถคำนวณสภาพความชื้นภายในห้องในบริเวณเฉพาะจุดได้ดีกว่าการจำลองด้วยโปรแกรมการจำลองการใช้พลังงานโดยทั่วไป ที่สมมติว่าอุณหภูมิและความชื้นภายในห้องมีค่าที่เท่ากันตลอดทั้งหมด แต่การคำนวณด้วยวิธีนี้จะใช้เวลานานเพิ่มขึ้น และ ผู้ใช้โปรแกรมต้องมีความรู้เพิ่มเติมในด้านการจำลองด้วยวิธี CFD

## 5. ข้อพิจารณาในการเลือกวิธีการจำลองความชื้นของวัสดุอาคารที่มีผลต่อการใช้พลังงาน

จากข้อมูลการศึกษาที่ได้กล่าวมาพบว่าแต่ละวิธีการจำลองนั้นมีทั้งข้อดีและข้อจำกัด โดยสามารถสรุปเป็นข้อพิจารณาในการเลือกวิธีการจำลองความชื้นของวัสดุอาคารที่มีผลต่อการใช้พลังงานได้ดังนี้

1) **สภาพความชื้นในผนัง** การจำลองด้วยวิธีการ EC และ EMPD นั้นจะไม่สามารถทราบค่าความชื้นรวมของผนังและค่าความชื้นของแต่ละชั้นของวัสดุได้ ดังนั้นถ้าต้องการข้อมูลในลักษณะนี้จำเป็นจะต้องใช้การจำลองด้วยวิธีของ HAM หรือ CFD + HAM

2) **ขนาดของอาคารในการจำลอง** การจำลองอาคารที่มีจำนวนโซนและพื้นผิว (Surface) จำนวนมาก ด้วยวิธีการ HAM จะใช้เวลาในการประมวลผลที่นานกว่าวิธี EC และ EMPD มาก ดังนั้นถ้ามีข้อจำกัดในเรื่องของระยะเวลาและจำนวนเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง การจำลองด้วยวิธี HAM นี้จึงอาจไม่เหมาะสม

3) **สภาพความเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นภายในอาคาร** จากการศึกษาวิจัยของพบว่าถ้าสภาพการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นภายในอาคารนั้นมีมาก การจำลองด้วยวิธีการแบบ EC และ EMPD จะได้ค่าที่แตกต่างออกไปจากการจำลองด้วยวิธี HAM มากยิ่งขึ้น

4) **สภาพปัญหาความชื้นเฉพาะบริเวณ** เนื่องจากในการจำลองด้วยวิธี EC, EMPD, และ HAM นั้น อยู่บนสมมติฐานว่าอุณหภูมิและความชื้นภายในห้องเท่ากันทุกจุด ดังนั้นถ้าต้องการทราบปัญหาของความชื้นของผนังอาคารในบางบริเวณเป็นพิเศษ จำเป็นจะต้องใช้วิธีการ CFD + HAM

5) **ข้อมูลที่จะนำมาใช้ในโปรแกรม** ในการจำลองด้วย HAM จำเป็นต้องทราบข้อมูลวัสดุที่มากกว่าวิธีการ EC และ EMPD ดังนั้นถ้าข้อมูลดังกล่าวมีไม่ครบถ้วน จะเป็นข้อจำกัดหนึ่งในการใช้วิธีการนี้

6) **ระดับความถูกต้องแม่นยำที่ต้องการ** การใช้วิธี EMPD นั้น ถึงแม้ว่าความถูกต้องในการคำนวณจะรองจากวิธีการ HAM แต่สามารถคำนวณผลสภาพความชื้นของอากาศภายในห้องได้รวดเร็วกว่ามาก ในกรณีที่ต้องการทราบค่าโดยประมาณเพื่อใช้ในการประเมินผลเบื้องต้น วิธี EMPD นี้จะเหมาะสมกว่า

## 6. บทสรุป

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการจำลองสภาพความชื้นของวัสดุรอบอาคารที่มีผลต่อสภาพความชื้นภายในอาคารและการใช้พลังงานของอาคาร จำนวน 4 วิธี การศึกษาทำให้ได้ทราบถึงข้อดีและข้อจำกัดของแต่ละวิธี ในแง่ของความถูกต้องของผลการคำนวณ ระยะเวลาที่ใช้ในการประมวลผลของโปรแกรม ข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้ในการรันโปรแกรม และความสามารถในการจำลองสภาพความชื้นในวัสดุอาคาร จากผลการศึกษานี้ได้สรุปเป็นแนวทางในการพิจารณาเลือกวิธีการที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการศึกษาสภาพความชื้นและการใช้พลังงานของอาคาร ในปัจจุบันโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถจำลองสภาพความชื้นได้หลายวิธี ซึ่งผู้ใช้โปรแกรมสามารถเลือกวิธีการที่เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ในการใช้งานได้ เช่น โปรแกรม EnergyPlus TRANSYS และ Bsim มีวิธีการจำลองให้เลือกได้ทั้ง EC, EMPD, และ HAM การศึกษาในขั้นต่อไปเป็นการนำวิธีการจำลองที่ได้ศึกษามาใช้ในการศึกษาวิเคราะห์สภาพความชื้นของผนัง ความชื้นภายในอาคาร และการใช้พลังงานของอาคารในประเทศไทย ที่มีการใช้ผนังภายนอกและลักษณะการใช้เครื่องปรับอากาศที่แตกต่างกัน และเพื่อเปรียบเทียบผลความแตกต่างของวิธีการจำลองที่คำนึงถึงและไม่คำนึงถึงสภาพความชื้นของวัสดุอาคารในสภาพอากาศของประเทศไทยที่แตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมาในต่างประเทศ เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบและบริหารจัดการอาคารเพื่อการประหยัดพลังงาน

## ศัพท์เฉพาะ

$m_p$	ความชื้นที่เกิดขึ้นภายในอาคารที่มาจากคนและอุปกรณ์เครื่องใช้ต่างๆ [kg/s]
$m_{sys}$	ความชื้นที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงจากระบบปรับอากาศ [kg/s]
$p_e, p_i$	แรงดันของไอน้ำในอากาศ (Partial Vapor Pressure) ที่อยู่ภายนอกอาคารและภายในอาคาร [Pa]
$R_v$	ค่าคงที่ของน้ำในสถานะก๊าซมีค่าเท่ากับ 462 [J/kg/K]
$T_i$	อุณหภูมิอากาศภายในห้อง [K]

$\dot{V}$	อัตราการไหลของอากาศภายนอก [ $m^3/s$ ]
$V$	ปริมาตรของห้อง [ $m^3$ ]
$t$	เวลา [s]
$A_j$	ขนาดพื้นที่ของวัสดุที่อยู่ภายในห้องลำดับที่ $j$ [ $m^2$ ]
$B_j$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทของไอน้ำด้วยการพาที่บริเวณผิวของผนัง [s/m]
$p_{s,j}$	แรงดันของไอน้ำที่บริเวณผิวของวัสดุลำดับที่ $j$ [Pa]
$u$	ปริมาณความชื้นในวัสดุ [ $kg_{moisture}/kg_{dry\ material}$ ]
$w$	ปริมาณความชื้นในวัสดุ [ $kg/m^3$ ]
$t$	เวลา [s]
$\phi$	ความชื้นสัมพัทธ์ [%]
$\rho\xi$	ความจุความชื้นของวัสดุ โดยขึ้นกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ (Specific Moisture Capacitance) [ $kg/m^3$ ]
$\theta$	อุณหภูมิ [K]
$\delta$	ค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ [ $kg/(m\cdot s\cdot Pa)$ ]
$\Delta$	ความหนาชั้นวัสดุดูดซึมประสิทธิผล (Effective Moisture Penetration Depth) [m]
$p_{sat}(\theta)$	แรงดันไอน้ำที่ภาวะอิ่มตัวโดยขึ้นกับอุณหภูมิ [Pa]
$T_p$	ช่วงระยะเวลาของความชื้นที่แปรเปลี่ยนไปในหนึ่งรอบ (Period of the Cyclic Variation) [s]
$h$	เอนทัลปี [J/kg]
$h_v$	ความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำ [ $2.5 \times 10^6$ J/kg]
$c_p$	ค่าความถ่วงความร้อนจำเพาะ (J/kg·K)
$\lambda$	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m·K)
EC	Effective Moisture Capacitance
EMPD	Effective Moisture Penetration Depth
HAM	Heat Air and Moisture
BES	Building Energy Simulation

## ภาคผนวก

รายชื่อของเว็บไซต์ที่มีรายละเอียดเพิ่มเติมของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่กล่าวถึงในบทความ

BSim	<a href="http://sbi.dk/en/bsim">http://sbi.dk/en/bsim</a>
EnergyPlus	<a href="http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/">http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/</a>
ESP-r	<a href="http://www.esru.strath.ac.uk/">http://www.esru.strath.ac.uk/</a>
Fluent	<a href="http://www.fluent.com/">http://www.fluent.com/</a>
IHAT	<a href="http://www.epa.gov/iaq/schooldesign/saves.html">http://www.epa.gov/iaq/schooldesign/saves.html</a>
TRNSYS	<a href="http://sel.me.wisc.edu/trnsys/">http://sel.me.wisc.edu/trnsys/</a>
WUFI Plus	<a href="http://www.wufi.de/index_e.html">http://www.wufi.de/index_e.html</a>



## บรรณานุกรม

- Belarbi, R., Qin, M., AïT-Mokhtar, A. (2006). **Simulation of Coupled Heat and Moisture Transfer in Air-Conditioned Buildings**. Annex 41 MOIST-ENG, Working meeting, October 25-27, 2006, Lyon, France.
- Bellegheem, M. V., Steeman, H. J., Steeman, M., Janssens, A., Paepe, M. D. (2010). **Sensitivity Analysis of CFD Coupled Non-Isothermal Heat and Moisture Modelling**. *Building and Environment* 45: 2485-2496.
- DOE. (2014). **EnergyPlus Engineering Reference**. September 2014.
- DOE. (2014a). **EnergyPlus Input Output Reference**, September 2014.
- EPA. (2001). **Indoor Humidity Assessment Tool (IHAT) Reference Manual**. U.S. Environmental Protection Agency. December 2001.
- Harriman, L. G., Brundrett, G. Kittler, R. (2001). **Humidity Control Design Guide for Commercial and Institutional Buildings**. Chapter 23 Museums, Libraries & Archives. ASHRAE.
- Hedegaard, L., M. Woloszyn and G. Rusaouen. (2004). **Moisture Interactions between Air and Constructions Modelled with CFD**. IEA Annex 41 Report A41-T1-DK-04-4.
- Janssen, H., Christensen, J. E., (2013). **Hygrothermal Optimisation of Museum Storage Spaces**. *Energy and Buildings* 56: 169-178.
- Janssen, H., Roels, S. (2009). **Qualitative and Quantitative Assessment of Interior Moisture Buffering by Enclosures**. *Energy and Buildings* 41: 382-394.
- Janssens, A., Paepe, M. D. (2005). **Effect of Moisture Inertia Models on the Predicted Indoor Humidity in a Room**. 26<sup>th</sup> AIVC Conference, Brussels, 21-23 September 2005.
- Janssens, A., Rode, C., Paepe, M. D., Woloszyn, M., Kalagasidis, A. S. (2008). **From CPM to CFD – Overview of Different Approaches for Heat Air and Moisture Modeling in IEA Annex 41**. IEA ECBCS Annex 41 Closing Seminar. Copenhagen, June 19, 2008.
- Koronhalyova, O., and Mihalka, P. (2008). **Accuracy of Simplified Indoor Humidity Simulation**. Proceedings of the 8<sup>th</sup> Symposium on building physics in the Nordic countries. Vol. 2: 817-824.
- Kunzel, H.M., Holm, A., Zirkelbach, D., Karagiozis, A. N. (2005). **Simulation of Indoor Temperature and Humidity Conditions Including Hygrothermal Interactions with the Building Envelope**. *Solar Energy* 78: 554-561.
- Mirsadeghi, M., Blocken, B., Hensen, J. (2009). **Application of Externally-Coupled BES-CFD in HAM Engineering of the Indoor Environment**. Eleventh International IBPSA Conference Glasgow, Scotland, July 27-30, 2009.
- Moon, H. J., Augenbroe, G. (2003). **Evaluation of Hygrothermal Models for Mold Growth Avoidance Prediction**. In Eight International IBPSA Conference, Eindhoven, Netherlands; August 11-14., p 895-902.
- Moon, H. J., Ryu, S. H., Kim, J. T. (2014). **The Effect of Moisture Transportation on Energy Efficiency and IAQ in Residential Buildings**. *Energy and Buildings* 75: 439-446.

- Rode, C., Sørensen, K. G. (2010). **Whole Building Hygrothermal Simulation Model**. Paper presented at American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Recent Advances in Energy Simulation: Building Loads, Symposium CH-03-09, Chicago, United States.
- Salonvaara, M., Kunzel, H. M., Ojanen, T., Karagiozis, A. N., Holm, A. (2004). **Moisture Buffering Effects on Indoor Air Quality—Experimental and Simulation Results**. ASHRAE.
- Sandberg, P. I. (2009). **Effects of Moisture on the Thermal Performance of Insulating Materials**. In *Moisture Control in Buildings: The Key Factor in Mold Prevention*. 2<sup>nd</sup> Edition. Baltimore, MD.
- Steeman, H.J., Janssens, A., Carmeliet, J., Pape, M. D. (2009). **Modelling Indoor Air and Hygrothermal Wall Interaction in Building Simulation: Comparison between CFD and a Well-Mixed Zonal Model**. *Building and Environment* 44: 572–583.
- Steeman, M., Janssens, A., Steeman, H.J., Bellghem, M. V., Paepe, M. D. (2010). **On Coupling 1D Non-Isothermal Heat and Mass Transfer in Porous Materials with a Multizone Building Energy Simulation Model**. *Building and Environment* 45: 865-877.
- Steeman, H.J., Janssens, A., Pape, M. D. (2010a). **Impact of Whole-Building Hygrothermal Modelling on the Assessment of Indoor Climate in a Library Building**. *Building and Environment* 45: 1641–1652.
- Tariku, F., Kumaran, K., Fazio, P. (2010). **Integrated Analysis of Whole Building Heat, Air and Moisture Transfer**. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53: 3111–3120.
- Woloszyn, M., Rode, C. (2008). **Tools for Performance Simulation of Heat, Air and Moisture Conditions of Whole Buildings**. *Building Simulation* 1: 5-24.
- Woods, J., Winkler, J., Christensen, D. (2013). **Moisture Modeling: Effective Moisture Penetration Depth Versus Effective Capacitance**. *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XII International Conference*. ASHRAE 2013.
- Woods, J., Winkler, J., Christensen, D. (2013a). **Evaluation of the Effective Moisture Penetration Depth Model for Estimating Moisture Buffering in Buildings**. National Renewable Energy Laboratory. Technical Report. NREL/TP-5500-57441.
- Yeh, Y. C., Tsay, Y. S., Chiang, C. M. (2012). **Study on Numerical Simulation Applied to Moisture Buffering Design Method—The Case Study of Pine Wood in a Single Zone Residential Unit in Taiwan**. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. Vol:6 2012-07-22.

### กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของผลการศึกษาวิจัยในโครงการ “การศึกษาเปรียบเทียบสภาพความชื้นและการใช้พลังงานของอาคารปรับอากาศที่ใช้ผนังภายนอกแบบต่างๆ โดยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์” ซึ่งได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยศิลปากร