

ห้องประชุม 302  
ด้านเทคโนโลยีอาคาร



# การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการเข้าแบบหล่อคอนกรีตเสริมเหล็กคานโดย VIKOR และค่าสัดส่วนการใช้แรงงานที่เป็นประโยชน์

## Performance Comparison of Formwork Installation Methods Using VIKOR and Labor Utilization Factor

วัฒนา ศรีสง่า<sup>1</sup> และ ดร. เทอดธิดา ทิพย์รัตน์<sup>2</sup>

Wattana Srosanga<sup>1</sup> and Thoedtida Thipparat, Ph.D.<sup>2</sup>

คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย

E-mail: campcamp2549@gmail.com<sup>1</sup>, thiprat.t@gmail.com<sup>2</sup>

### บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้เป็นการเปรียบเทียบวิธีการเข้าแบบหล่อคอนกรีตเสริมเหล็กคานโดยวิธีเสาค้ำยันและวิธีการรัดหัวเสาด้วยเหล็กรูปพรรณ โดยการประเมินค่าผลผลิตภาพของวิธีการเข้าแบบหล่อคอนกรีตเสริมเหล็กคานทั้งสองวิธีในการประเมินค่าผลผลิตภาพที่หน้างานการวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ค่าสัดส่วนการใช้แรงงานที่เป็นประโยชน์ นอกจากนี้การวิจัยนี้ยังทำการประยุกต์ใช้วิธีไวโกรีและกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ในการเปรียบเทียบวิธีการเข้าแบบหล่อคอนกรีตเสริมเหล็กคานทั้งสองวิธี เกณฑ์การประเมินแบ่งเป็น 5 กลุ่มคือ ประกอบด้วย 1) ด้านบุคลากร 2) ด้านวัสดุ 3) ด้านเครื่องมือเครื่องจักร 4) ด้านต้นทุน และ 5) ด้านการบริหารจัดการ การวิจัยนี้ใช้วิธี VIKOR วิเคราะห์ค่าช่องว่างจากค่าเป้าหมายและใช้วิธี AHP วิเคราะห์น้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์ เพื่อจัดอันดับวิธีการเข้าแบบหล่อคอนกรีตเสริมเหล็กคาน ผลการวิจัยพบว่า วิธีการรัดหัวเสาด้วยเหล็กรูปพรรณมีความเหมาะสมกับการเข้าแบบหล่อคอนกรีตเสริมเหล็กคานมากกว่าวิธีเสาค้ำยัน

### Abstract

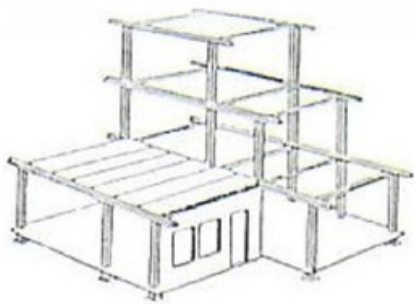
This study aims to compare two formwork installation methods including column support method and embracing column head with structural steel method. This study applies productivity rating method to evaluate productivity on formwork installation for reinforced concrete beam. This study applies a modified VIKOR method and an analytical hierarchy process (AHP) to solve formwork installation method selection problem. The criteria can be classified into five aspects: man, materials, machine, tools, cost and management. The VIKOR method was applied to establish the gaps of target values. The AHP method was used to provide the weights of the criteria and validate the results. Results show that the embracing column head with structural steel method is more suitable for formwork installation of reinforced concrete beam.

**คำสำคัญ (Keywords):** แบบหล่อ (Formwork), ค่าสัดส่วนการใช้คนงานที่เป็นประโยชน์ (Labor Utilization Factor), วิธีไวโกร์ (VIKOR method), กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytical hierarchy process), ผลิตภาพ (Productivity)

## 1. คำนำ

เนื่องจากธุรกิจอสังหาริมทรัพย์มีการขยายตัวอย่างรวดเร็วแต่อุตสาหกรรมก่อสร้างในปัจจุบันกำลังประสบปัญหาหลายด้าน เช่น ด้านแรงงาน และมีมือช่างก่อสร้าง ด้านราคาค่าก่อสร้าง ด้านคุณภาพงานก่อสร้าง เป็นต้น ทำให้ผู้ประกอบการธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ต้องปรับกลยุทธ์โดยการใช้วิธีการก่อสร้างใหม่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้ดียิ่งขึ้น

การก่อสร้างที่อยู่อาศัยทั่วไปเป็นการก่อสร้างระบบหล่อในสถานที่ก่อสร้าง (Conventional system) หรือ วิธีการก่อสร้างแบบหล่อชิ้นส่วนโครงสร้างในที่ (นคเรศ, 2557) และนิยมสร้างเป็นระบบเฟรม (Frame system) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ที่อยู่อาศัยระบบหล่อในที่แบบระบบเฟรม

การก่อสร้างระบบธรรมดาใช้ไม้แบบและเสาค้ำยันเป็นวัสดุในการก่อสร้างที่สำคัญมากอย่างหนึ่ง เนื่องจากระบบหล่อในที่ต้องมีไม้แบบประกอบเป็นโครงสร้างที่มีรูปร่างตามต้องการสำหรับเทคอนกรีตและรับน้ำหนักคอนกรีตที่ยังไม่แข็งตัว

การถอดแบบเป็นการเคลื่อนย้ายแบบหล่อและอุปกรณ์เสาค้ำยันออกจากชิ้นงานคอนกรีตในระยะเวลาที่เหมาะสมตามประเภทของโครงสร้างและลักษณะของส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้งาน การออกแบบและคำนวณงานแบบหล่อคอนกรีตจำเป็นต้องใช้วิศวกรที่มีความรู้ความเชี่ยวชาญและมีประสบการณ์มาทำการคำนวณออกแบบ การวางแผนงาน การบริหารแบบหล่อ การควบคุมการประกอบติดตั้ง การถอดแบบและการใช้เสาค้ำยันที่ถูกต้อง (จิรัฐวัฒน์, 2558)

ในการก่อสร้างระบบธรรมดาจะใช้เวลาในการประกอบและถอดไม้แบบและเสาค้ำยันยาวนาน ดังนั้นจึงควรจะมีการออกแบบให้การประกอบและถอดไม้แบบและเสาค้ำยันมีผลผลิตในการทำงาน (Productivity) สูงสุด (เอกสิทธิ์, 2539)

การวิจัยนี้จึงแสดงเทคนิคการก่อสร้างแบบหล่อคอนกรีต (Concrete Formwork) ของงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับอาคารบ้านพักอาศัย โดยนำเสนอวิธีการก่อสร้างแบบหล่อคอนกรีตคือ วิธีรัดหัวเสา ซึ่งผู้วิจัยได้พัฒนาแนวคิดมาจากการก่อสร้างแบบหล่อคอนกรีตอัดแรงแบบดึงที่หลัง (Post tensioned concrete) และทำการเปรียบเทียบวิธีการก่อสร้างแบบหล่อที่พัฒนาขึ้นนี้กับวิธีเสาค้ำยันซึ่งเป็นวิธีการก่อสร้างแบบหล่อคอนกรีตทั่วไป การวิจัยนี้ประยุกต์ใช้การประเมินค่าผลิตภาพที่หน้างานในการวิเคราะห์ค่าสัดส่วนการใช้คนงานที่เป็นประโยชน์ (Labor Utilization Factor) นอกจากนี้การวิจัยนี้ยังทำการประยุกต์ใช้วิธีไวโกร์ (Opricovic S, Tzeng GH.,

2004). และกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (เทอดติศา, 2557) ในการเปรียบเทียบวิธีการเข้าแบบหล่อคอนกรีตเสริมเหล็กคานด้วยวิธีเสาค้ำยันและวิธีรัดหัวเสา ทั้งนี้วัตถุประสงค์ในการวิจัยประกอบด้วย

(1) เพื่อนำเสนอวิธีการก่อสร้างแบบหล่อคอนกรีตแบบรัดหัวเสาสำหรับเป็นแนวทางในการปฏิบัติงานแก่ผู้มีหน้าที่ในการก่อสร้างแบบหล่อคอนกรีตของงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอาคารบ้านพักอาศัย

(2) เพื่อเสนอแนวทางเลือกวิธีการก่อสร้างแบบหล่อคอนกรีตด้วยวิธีวิธีไวโกรีและวิธีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์

## 2. วิธีการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัยเพื่อศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการเข้าแบบหล่อคอนกรีตเสริมเหล็กคานโดยวิธีไวโกรีและกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์และค่าสัดส่วนการใช้คนงานที่เป็นประโยชน์ สามารถแบ่งได้เป็น 8 ขั้นตอนหลักดังนี้

1) ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อศึกษาค้นคว้าความรู้และทฤษฎีต่างๆ ที่จำเป็นสำหรับงานวิจัย เช่น วิธีการเข้าแบบหล่อคอนกรีตเสริมเหล็กวิธีไวโกรีและกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์และค่าสัดส่วนการใช้คนงานที่เป็นประโยชน์ โดยรวบรวมจากวิทยานิพนธ์ บทความทางวิชาการ หนังสือเรียน และเอกสารต่างๆ จากทั้งในประเทศและต่างประเทศ

2) สรุปความรู้และทฤษฎีที่ได้จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3) ศึกษาวิธีการเข้าแบบหล่อคอนกรีตเสริมเหล็กคานด้วยวิธีเสาค้ำยันและวิธีเข้าแบบหล่อคอนกรีตอัดแรงแบบดิ่งที่หลัง

4) นำเสนอวิธีการเข้าแบบหล่อคอนกรีตเสริมเหล็กคานด้วยวิธีรัดหัวเสา

5) การประเมินค่าผลิตภาพที่หน้างานของการเข้าแบบหล่อคอนกรีตเสริมเหล็กคานด้วยวิธีรัดหัวเสาและวิธีเสาค้ำยัน

6) การวิเคราะห์ค่าสัดส่วนการใช้คนงานที่เป็นประโยชน์ของการเข้าแบบหล่อคอนกรีตเสริมเหล็กคานด้วยวิธีรัดหัวเสาและวิธีเสาค้ำยัน

7) ประเมินน้ำหนักความสำคัญของแต่ละการตัดสินใจด้วยวิธีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์

8) เปรียบเทียบวิธีการก่อสร้างแบบหล่อคอนกรีตด้วยวิธีวิธีไวโกรี

การวิจัยนี้ทำการเก็บข้อมูลการทำงานของคนที่หน้างานโดยติดตั้งกล้องวิดีโอในตำแหน่งที่ทำให้สามารถมองเห็นถึงชุดคนงานทั้งหมดขณะทำงาน การบันทึกวิดีโอนั้นจะทำการบันทึกลักษณะการทำงานของคนงานทุก ๆ 1 นาที โดยการบันทึกพยายามให้เห็นคนงานทุกคนในชุดคนงานของงานนั้น ๆ เพื่อให้เห็นถึงลักษณะของคนงานในขณะนั้น

การวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยการเปิดดูวิดีโอที่ทำการบันทึกวันต่อวันแล้วทำการบันทึกข้อมูลพฤติกรรมของคนงานลงในแบบจำลองการบันทึกข้อมูลเบื้องต้น จากนั้นจึงวิเคราะห์หาผลงานได้ประสิทธิผล (Effective Work) ของงานแต่ละงาน และวิเคราะห์หาผลงานที่ไร้ประสิทธิผล (Ineffective Work) โดยวิเคราะห์ถึงสาเหตุที่ทำให้เกิดของปัญหา โดยใช้วิธี Productivity Ratings จากนั้นจึงทำการคำนวณหาสัดส่วนการใช้คนงานที่เป็นประโยชน์ โดยแยกแต่ละกิจกรรมการทำงาน

6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการเข้าแบบหล่อคอนกรีตเสริมเหล็กคานโดย VIKOR และค่าสัดส่วนการใช้แรงงานที่เป็นประโยชน์  
 วัฒนา ศรีสง่า และ ดร. เทอดธิดา ทิพย์รัตน์

### 3. ผลการวิจัย

#### 3.1 แนวทางการพัฒนาวิธีการก่อสร้างแบบหล่อคอนกรีตแบบรัดหัวเสา

การวิจัยครั้งนี้ได้นำเสนอวิธีการก่อสร้างแบบหล่อคอนกรีตแบบรัดหัวเสาโดยผู้วิจัยได้นำแนวคิดในการก่อสร้างแบบหล่อคอนกรีตพื้นอัดแรงภายหลังมาเป็นแนวทางในการกำหนดวิธีดังกล่าว รูปที่ 2 แสดงแนวทางในการพัฒนาวิธีการก่อสร้างแบบหล่อคอนกรีตแบบรัดหัวเสา โดยวิธีการก่อสร้างแบบหล่อคอนกรีตพื้นอัดแรงภายหลังเริ่มจากการตั้งนั่งร้าน ระยะระหว่างเหล็กกล่อง 100x100 มม. เท่ากับความกว้างของนั่งร้าน จากนั้นจึงวางเหล็กกล่อง 50x50 มม. เพื่อรับไม้อัดปูพื้นระยะระหว่างเหล็กกล่องเท่ากับ 0.40 ม. แล้วจึงวางไม้แบบพื้น ขนาดไม้แบบ 15 มม. ส่วนวิธีการก่อสร้างแบบหล่อคอนกรีตแบบรัดหัวเสาเริ่มต้นจากการตั้งแบบหล่อ ระยะระหว่างเหล็กกล่อง 100x50 มม. เท่ากับระยะระหว่างเสา จากนั้นทำการวางตงไม้ 11/2" x 3" ระยะระหว่างตงไม้เท่ากับ 0.40 ม. แล้ววางไม้แบบท้องคาน และติดตั้งเสาค้ำยันรับท้องคานตามจุดที่เกิดแรงกระทำ เช่น บริเวณหัวเสา กลางคาน และช่วงต่อคาน

#### 3.2 เปรียบเทียบวิธีการก่อสร้างแบบหล่อคอนกรีตแบบเสาค้ำยันและแบบรัดหัวเสา

การวิจัยครั้งนี้เปรียบเทียบวิธีการก่อสร้างแบบหล่อคอนกรีตแบบรัดหัวเสาและแบบเสาค้ำยัน ดังแสดงในรูปที่ 3 ขั้นตอนวิธีการก่อสร้างแบบหล่อคอนกรีตแบบเสาค้ำยันมี 7 ขั้นตอนแบบรัดหัวเสามี 6 ขั้นตอน (ไม่มีขั้นตอนตั้งเสาค้ำยันและยึดขาเสาค้ำยัน) รายละเอียดมีดังนี้

- 1) ทหารดับท้องคาน
- 2) เตรียมเสาค้ำยัน ไม้ตั้งรับท้องคานและตั้งเสาค้ำยัน

- 3) ยึดขาเสาค้ำยัน ปูไม้แบบท้องคาน และปรับระดับเสาค้ำยัน
- 4) ผูกเหล็กเสริมคอนกรีต
- 5) เข้าแบบข้างคาน ยึดแบบข้างคานและรัดปากแบบหล่อ
- 6) เทคอนกรีต ทำความสะอาดเศษวัสดุที่ตกหล่น
- 7) รื้อแบบข้างคาน ทำความสะอาดเศษวัสดุที่ตกหล่น และพ่นน้ำยาบ่มคอนกรีต

วิธีการก่อสร้างแบบหล่อคอนกรีตพื้นอัดแรงภายหลัง	วิธีการก่อสร้างแบบหล่อคอนกรีตแบบรัดหัวเสา
 การตั้งไม้แบบ ระยะระหว่างเหล็กกล่อง 100 x 100 เท่ากับความกว้างของนั่งร้าน	 การตั้งไม้แบบ ระยะระหว่างเหล็กกล่อง 100 x 50 เท่ากับระยะระหว่างเสา
 วางเหล็กกล่อง 50 x 50 มม.รับไม้อัดปูพื้นระยะระหว่างเหล็กกล่องเท่ากับ 0.40 ม.	 วางตงไม้ 1 1/2" x 3" ระยะระหว่างตงไม้เท่ากับ 0.40 ม.
 วางไม้แบบพื้น ขนาดไม้แบบ 15 มม.	 วางไม้แบบท้องคาน
	 ย้ายไม้แบบที่ติดคานตามจุดที่เกิดแรงกระทำ ยึดขาเสาค้ำยันและรัดปากแบบ

รูปที่ 2 วิธีการก่อสร้างแบบหล่อคอนกรีตแบบรัดหัวเสาและแบบหล่อคอนกรีตพื้นอัดแรงภายหลัง

ขั้นตอนแรก	ขั้นตอนที่สอง
 1. ขยายไม้กระดาน	 1. ขยายไม้กระดาน
 2. เสริมเหล็ก - ฝังไม้กระดาน - ฝังเหล็ก	 2. เสริมเหล็ก - ฝังไม้กระดาน - ฝังเหล็ก
 3. เสริมเหล็ก - ฝังไม้กระดาน - ฝังเหล็ก	 3. เสริมเหล็ก - ฝังไม้กระดาน - ฝังเหล็ก
 4. ขุดเจาะเหล็กเสริม	 4. ขุดเจาะเหล็กเสริม
 5. ฝังไม้กระดาน - ฝังเหล็กเสริม - ฝังไม้กระดาน	 5. ฝังไม้กระดาน - ฝังเหล็กเสริม - ฝังไม้กระดาน
 6. ขุดเจาะเหล็กเสริม	 6. ขุดเจาะเหล็กเสริม
 7. ฝังไม้กระดาน - ฝังเหล็กเสริม - ฝังไม้กระดาน	 7. ฝังไม้กระดาน - ฝังเหล็กเสริม - ฝังไม้กระดาน
 8. ฝังไม้กระดาน - ฝังเหล็กเสริม - ฝังไม้กระดาน	 8. ฝังไม้กระดาน - ฝังเหล็กเสริม - ฝังไม้กระดาน

รูปที่ 3 การเปรียบเทียบวิธีการก่อสร้างแบบหล่อคอนกรีตแบบรัดหัวเสาและแบบเสาค้ำยัน

### 3.3 การวิเคราะห์ค่าสัดส่วนการใช้คนงานที่เป็นประโยชน์

การศึกษานี้ได้ทำการเก็บข้อมูลของงานก่อสร้างแบบหล่อคอนกรีตแบบรัดหัวเสาและแบบเสาค้ำยัน โดยการเก็บข้อมูลของโครงการก่อสร้างแบบรัดหัวเสาจากกรณีศึกษาโครงการก่อสร้างอาคารหอพัก 4 ชั้น ต.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ และเก็บข้อมูลของโครงการก่อสร้างแบบเสาค้ำยันจากกรณีศึกษาโครงการก่อสร้างอาคารฝึกปฏิบัติการคณะศิลปกรรมศาสตร์มธ. ศูนย์ลำปาง ผลการประเมินค่าผลิตภาพที่หน้างาน (Productivity Rating) ของงานก่อสร้างแบบหล่อคอนกรีต

แบบรัดหัวเสา รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างการจำแนกลักษณะการทำงานของคนงานในงานเข้าแบบข้างคาน ยึดแบบข้างคาน โดยคนงานที่ 1 รอคอย คนงานที่ 2 เข้าแบบ คนงานที่ 3 ชนส่งวัสดุ ตามลำดับ ตารางที่ 1 และ 2 แสดงผลการคำนวณหาสัดส่วนการใช้คนงานที่เป็นประโยชน์ในงานเข้าแบบข้างคาน ยึดแบบข้างคานด้วยวิธีเสาค้ำยัน และวิธีรัดหัวเสา ตามลำดับ พบว่าค่าสัดส่วนการใช้คนงานที่เป็นประโยชน์ของงานก่อสร้างแบบหล่อคอนกรีตในงานเข้าแบบข้างคาน วิธีรัดหัวเสามากกว่าวิธีเสาค้ำยันเล็กน้อย

ผลการประเมินค่าผลิตภาพที่หน้างานของงานก่อสร้างแบบหล่อคอนกรีตแบบเสาค้ำยัน รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างการจำแนกลักษณะการทำงานของคนงานในงานยึดแบบข้างคาน โดยคนงานที่ 1 หนุนลูกปูนข้างแบบ คนงานที่ 2 รอคอย 3 ยึดไม้แบบข้างคาน ตามลำดับ



รูปที่ 4 การจำแนกลักษณะการทำงานของคนงานชุดเข้าแบบข้างคาน ยึดแบบข้างคานด้วยวิธีรัดหัวเสา

8 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการเข้าแบบหล่อคอนกรีตเสริมเหล็กคานโดย VIKOR และค่าสัดส่วนการใช้คนงานที่เป็นประโยชน์  
 วัฒนา ศรีสง่า และ ดร. เทอดติศา ทิพย์รัตน์

**ตารางที่ 1** ตัวอย่างการวิเคราะห์ค่าสัดส่วนการใช้คนงานที่เป็นประโยชน์ในงานวิธีเสาค้ำยันในงานเข้าแบบข้างคาน

กิจกรรม	งานได้ประโยชน์	งานสนับสนุน	งานใช้ประโยชน์	LUF%
เข้าแบบข้างคาน	3			7.5
ยึดแบบข้างคาน	13			33.1
ยกไม้แบบ		3		1.875
ส่งไม้แบบ		2		1.250
ส่งอุปกรณ์ยึดแบบ		2		1.250
ล้างเครื่องมือ		1		0.625
ทำความสะอาดพื้น		4		2.500
แก้ไขงาน			1	0
พักผ่อน			2	0
รอคอย			1	0
เดินมือเปล่า			4	0
พูดคุย-สูบบุหรี่			4	0
เฉลี่ย	40.575	30	30	47.80

LUF คือ ค่าสัดส่วนการใช้คนงานที่เป็นประโยชน์ในงาน

**ตารางที่ 2** ตัวอย่างการวิเคราะห์ค่าสัดส่วนการใช้คนงานที่เป็นประโยชน์ในงานวิธีรัดหัวเสาในงานเข้าแบบข้างคาน

กิจกรรม	งานได้ประโยชน์	งานสนับสนุน	งานใช้ประโยชน์	LUF%
เข้าแบบข้างคาน	4			10
ยึดแบบข้างคาน	15			37.5
ยกไม้แบบ		3		1.875
ส่งไม้แบบ		1		0.625
ส่งอุปกรณ์ยึดแบบ		1		0.625
ล้างเครื่องมือ		1		0.625
ทำความสะอาดพื้น		3		1.875
แก้ไขงาน			1	0
พักผ่อน			2	0
รอคอย			1	0
เดินมือเปล่า			4	0
พูดคุย-สูบบุหรี่			4	0
เฉลี่ย	47.5	22.5	30	53.13

LUF คือ ค่าสัดส่วนการใช้คนงานที่เป็นประโยชน์ในงาน

ผลการคำนวณหาสัดส่วนการใช้คนงานที่เป็นประโยชน์ในงานก่อสร้างแบบหล่อคอนกรีตแบบรัดหัวเสาและแบบเสาค้ำยันแสดงในตารางที่ 3 พบว่าค่าสัดส่วนการใช้คนงานที่เป็นประโยชน์ในงานก่อสร้างแบบหล่อคอนกรีตแบบรัดหัวเสามากกว่าแบบเสาค้ำยันเล็กน้อย

**ตารางที่ 3** ผลการคำนวณหาสัดส่วนการใช้คนงานที่เป็นประโยชน์ในงานก่อสร้างแบบหล่อคอนกรีตแบบรัดหัวเสาและแบบเสาค้ำยัน

วิธีค้ำยัน	LUF%	วิธีรัดหัวเสา	LUF%
หาระดับท้องคาน	63.5	หาระดับท้องคาน	57.15
เตรียมค้ำยันและไม่ตั้งรับท้องคาน ตั้งค้ำยัน	58.3	เตรียมค้ำยันและไม่ตั้งรับท้องคาน ปรับระดับค้ำยันและปูไม้แบบท้องคาน	67.05
ยึดขาตั้งค้ำยันแบบท้องคาน และปรับระดับค้ำยัน			
ผูกเหล็กเสริมคอนกรีต	61.7	ผูกเหล็กเสริมคอนกรีต	70.96
เข้าแบบข้างคาน ยึดแบบข้างคาน รัดปากแบบหล่อ	47.8	เข้าแบบข้างคาน ยึดแบบข้างคาน รัดปากแบบหล่อ	53.13
เทคอนกรีต ทำความสะอาดเศษวัสดุที่ตกหล่น	57.2	เทคอนกรีต ทำความสะอาดเศษวัสดุที่ตกหล่น	65.78
รื้อแบบข้างคาน ทำความสะอาดเศษวัสดุที่ตกหล่น พ่นน้ำยาบ่มคอนกรีต	78.1	รื้อแบบข้างคาน ทำความสะอาดเศษวัสดุที่ตกหล่น พ่นน้ำยาบ่มคอนกรีต	66.39
เฉลี่ย	61.1	เฉลี่ย	63.41



**รูปที่ 5** การจำแนกลักษณะการทำงานของคนงานชุดเข้าแบบข้างคาน ยึดแบบข้างคานด้วยวิธีเสาค้ำยัน

### 3.4 การเลือกวิธีก่อสร้างแบบหล่อคอนกรีต

การศึกษานี้ได้ทำการประยุกต์ใช้วิธีไวโกรีและกระบวนการลำดับขั้นเชิงวิเคราะห์ในการเปรียบเทียบวิธีการเข้าแบบหล่อคอนกรีตเสริมเหล็กคานแบบรัดหัวเสาและแบบเสาค้ำยัน โดย

เกณฑ์การประเมินแบ่งเป็น 5 กลุ่มคือ ประกอบด้วย 1) ด้านบุคลากร 2) ด้านวัสดุ 3) ด้านเครื่องมือเครื่องจักร 4) ด้านต้นทุน และ 5) ด้านการบริหารจัดการ ใช้วิธีไวโกรีวิเคราะห์ค่าช่องว่างจากค่าเป้าหมายและใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์คำนวณน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์ทั้ง 5 เกณฑ์ดังกล่าว ตารางที่ 4 แสดงการคำนวณค่าน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจ ตารางที่ 5 แสดงผลการตัดสินใจเลือกวิธีก่อสร้างแบบหล่อคอนกรีตระหว่างแบบรัดหัวเสาและแบบเสาค้ำยันด้วยการประยุกต์ใช้วิธีไวโกรีรวมกับค่าน้ำหนักความสำคัญที่วิเคราะห์โดยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์

ผลการประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์คำนวณน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์ทั้ง 5 เกณฑ์ พบว่า เกณฑ์ที่น้ำหนักความสำคัญสูงสุดคือ เกณฑ์ด้านบุคลากร ส่วนเกณฑ์ที่น้ำหนักความสำคัญต่ำสุด คือ เกณฑ์ด้านวัสดุ ผลจากการประยุกต์ใช้วิธีไวโกรีรวมกับกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ในการเลือกวิธีก่อสร้างแบบหล่อคอนกรีต พบว่า วิธีรัดหัวเสาเป็นวิธีที่ดีกว่าวิธีเสาค้ำยัน

**ตารางที่ 4** การคำนวณค่าน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจ

เกณฑ์การตัดสินใจ	เกณฑ์ประเมิน					น้ำหนักความสำคัญ
	1) ด้านบุคลากร	2) ด้านวัสดุ	3) ด้านเครื่องมือเครื่องจักร	4) ด้านต้นทุน	5) ด้านการบริหารจัดการ	
1) ด้านบุคลากร	1.000	2.000	0.500	3.000	4.000	0.293
2) ด้านวัสดุ	0.500	1.000	0.200	0.500	2.000	0.106
3) ด้านเครื่องมือเครื่องจักร	2.000	6.000	1.000	0.250	0.200	0.226
4) ด้านต้นทุน	0.333	2.000	4.000	1.000	3.000	0.227
5) ด้านการบริหารจัดการ	0.250	0.500	6.000	0.333	1.000	0.148

**ตารางที่ 5** การเลือกวิธีก่อสร้างแบบหล่อคอนกรีตด้วยการประยุกต์ใช้วิธีไวโกรี

เกณฑ์ประเมิน	คะแนนประเมิน		น้ำหนักความสำคัญ (wt)	ค่าช่องว่างสัมพัทธ์วิธีประเมิน	
	วิธีเสาค้ำยัน	วิธีรับ		วิธีเสาค้ำยัน	วิธีรับ
1) ด้านบุคลากร	8	7	0.293	0.055	0.096
2) ด้านวัสดุ	9	6	0.106	0.012	0.047
3) ด้านเครื่องมือเครื่องจักร	7	6	0.226	0.076	0.100
4) ด้านต้นทุน	8	8	0.227	0.051	0.051
5) ด้านการบริหารจัดการ	9	6	0.148	0.016	0.066
Σ				0.219	0.261
μ <sub>1</sub>				0.078	0.100
σ				0.000	0.500
R				0.000	0.500
Q <sub>1</sub>				0.000	1.000
อันดับ				1	2

#### 4. สรุปผลการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการเปรียบเทียบวิธีการเข้าแบบหล่อคอนกรีตเสริมเหล็กคานโดยวิธีเสาค้ำยันและวิธีการรัดหัวเสาด้วยเหล็กรูปพรรณ โดยการประเมินค่าผลผลิตภาพของวิธีการเข้าแบบหล่อคอนกรีตเสริมเหล็กคานทั้งสองวิธีในการประเมินค่าผลผลิตภาพที่หน้างานการวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ค่าสัดส่วนการใช้คนงานที่เป็นประโยชน์จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยสัดส่วนการใช้คนงานที่เป็นประโยชน์ในงานก่อสร้างแบบหล่อคอนกรีตแบบรัดหัวเสาและแบบเสาค้ำยันพบว่า ค่าสัดส่วนการใช้คนงานที่เป็นประโยชน์ในงานก่อสร้างแบบหล่อคอนกรีตแบบรัดหัวเสามากกว่าแบบเสาค้ำยันเล็กน้อย

การวิจัยนี้ยังทำการประยุกต์ใช้วิธีไวโกรีและกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ในการเปรียบเทียบวิธีการเข้าแบบหล่อคอนกรีตเสริมเหล็กคานวิธีเสาค้ำยันและวิธีการรัดหัวเสา โดยเกณฑ์การประเมินแบ่งเป็น 5 กลุ่ม คือ ประกอบด้วย 1) ด้านบุคลากร 2) ด้านวัสดุ 3) ด้านเครื่องมือเครื่องจักร 4) ด้านต้นทุน และ 5) ด้านการบริหารจัดการ พบว่า ลำดับความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจเรียงจากมากไปหาน้อยคือ คือ เกณฑ์ด้านบุคลากร ด้านต้นทุน ด้านเครื่องมือเครื่องจักร ด้านการบริหารจัดการ และด้านวัสดุ ตาม

10 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการเข้าแบบหล่อคอนกรีตเสริมเหล็กคานโดย VIKOR และค่าสัดส่วนการใช้คนงานที่เป็นประโยชน์  
วัฒนา ศรีสง่า และ ดร. เทอดธิดา ทิพย์รัตน์

ลำดับ เมื่อเปรียบเทียบวิธีการเข้าแบบหล่อคอนกรีตเสริมเหล็กคานโดยวิธีเสาค้ำยันและวิธีการรัดหัวเสาโดยการประยุกต์ใช้วิธีไวโกรีร่วมกับกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ พบว่า ค่า  $Q_j$  ของวิธีรัดหัวเสามีค่าน้อยกว่าค่า  $Q_j$  ของวิธีเสาค้ำยัน ทำให้วิธีรัดหัวเสาเป็นวิธีที่ดีกว่าวิธีเสาค้ำยัน เมื่อพิจารณาค่าช่องว่างถ่วงน้ำหนักของเกณฑ์ด้านบุคลากร ด้านวัสดุ ด้านเครื่องมือเครื่องจักร และด้านการบริหารจัดการ พบว่า ค่าช่องว่างถ่วงน้ำหนักของวิธีรัดหัวเสามีค่าน้อยกว่าค่าช่องว่างถ่วงน้ำหนักของวิธีเสาค้ำยัน แสดงให้เห็นว่าวิธีรัดหัวเสาดีกว่าวิธีเสาค้ำยันในด้านวัสดุ ด้านเครื่องมือเครื่องจักร และด้านการบริหารจัดการ สำหรับด้านต้นทุน พบว่า วิธีทั้งสองมีค่าช่องว่างถ่วงน้ำหนักเท่ากัน แสดงให้เห็นว่าวิธีรัดหัวเสาและวิธีเสาค้ำยันมีผลประเมินเท่ากันในด้านต้นทุน

## รายการอ้างอิง

จิรัฐวัฒน์ เมืองแพน. (2558). *การก่อสร้าง Concrete Formwork สำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอาคารระบายน้ำล้นโครงการน้ำเลย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหวัดเลย*. กองพัฒนาแหล่งน้ำขนาดกลาง (สพท.6).  
เทอดธิดา ทิพย์รัตน์. (2557). การเลือกระบบผนังภายนอกอาคารด้วยการประยุกต์ใช้วิธีไวโกรีแบบปรับปรุงและกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์. *วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย*, 34(2), 57-74.  
นครเศ สกุลทอง. (2557). *ผลผลิตของการก่อสร้างอาคารที่ใช้ระบบโครงสร้างผนังรับน้ำหนักแบบหล่อในที่ด้วยเทคโนโลยีระบบแบบหล่ออุโมงค์*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ. (2539). *แบบหล่อคอนกรีต*. กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พ.ศ. 2539.

Opricovic, S. & Tzeng, G. H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: a comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 156(1), 445-455.

# การระบายอากาศธรรมชาติในหอผู้ป่วยรวมของโรงพยาบาล

## Natural Ventilation in Multiple-Beds Ward of Hospital

กิตติคุณ ยกทรัพย์<sup>1</sup> และ รศ. เฉลิมวัฒน์ ตันตสวัสต์<sup>2</sup>

Kittikun Yoksap<sup>1</sup> and Assoc. Prof. Chalermwat Tantasavadi<sup>2</sup>

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

E-mail: kittikun.yoksap@gmail.com<sup>1</sup>, tchalerm@engr.tu.ac.th<sup>2</sup>

### บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองเพื่อศึกษาการระบายอากาศธรรมชาติในหอผู้ป่วยรวมของโรงพยาบาลในประเทศไทย โดยเปรียบเทียบค่าการแลกเปลี่ยนอากาศ (Air Change Rate per Hour, ACH) และอายุของอากาศ (Age of Air, AGE) ของผังอาคารหอผู้ป่วยรวมแต่ละประเภท ซึ่งการวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การศึกษาผังอาคารหอผู้ป่วยมาตรฐาน และการจำลองการไหลของอากาศด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหล จากการศึกษาพบว่า ผังอาคารหอผู้ป่วยรวมมี 3 ประเภทคือ ผังอาคารระบายอากาศสองทิศทาง ผังอาคารระบายอากาศข้ามฟาก และผังอาคารระบายอากาศแบบผสม และจากการจำลองการไหลของอากาศด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหล พบว่า หอผู้ป่วยรวมทั้งสามมีค่าการแลกเปลี่ยนอากาศ 9.24 – 18.45 และมีค่าอายุของอากาศสูงสุด 311.9 – 388.5 วินาที แต่สำหรับผังอาคารระบายอากาศแบบผสมเมื่อมีอากาศไหลเข้าด้านที่มีสิ่งกีดขวางจะมีค่าการแลกเปลี่ยนอากาศ 10.13 และมีค่าอายุของอากาศ 0.2 – 2257.2 วินาที ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานอายุของอากาศที่กำหนดไว้

### Abstract

This experimental research is aimed at the study of natural ventilation and the enhancement of ventilation in multiple-beds wards of hospitals in Thailand. The research compared the air change rate per hour (ACH) and the age of air (AGE) in each types standard ward plans. The research consisted of two parts: inspecting and defining standard types of ward plans, and the simulation of airflow with the computational fluid dynamics software (CFD). After conducting a survey, it was found that floor plans of multiple-bed wards can be categorized into three types: two-way ventilation plans, cross ventilation plans and hybrid plans. CFD results showed that all ward types had ACH to 9.24 – 18.45 and AGE to 311.9 – 388.5 second. But for hybrid plan type that had wind coming from obstacle side, ACH was 10.13 and AGE was 0.2 – 2557.2 second which was higher than standard.

**คำสำคัญ (Keywords):** การระบายอากาศ (Ventilation), การระบายอากาศธรรมชาติ (Natural Ventilation), อายุของอากาศ (Age of Air), โรงพยาบาล (Hospital), หอผู้ป่วยรวม (Multiple-beds Ward)

## 1. บทนำ

โรงพยาบาลเป็นพื้นที่บริการด้านสุขภาพให้กับผู้มีปัญหาด้านสุขภาพ มุ่งเน้นส่งเสริม ป้องกัน รักษา และฟื้นฟูความเจ็บป่วยทั้งทางกายและจิตใจ ซึ่งในแต่ละปีมีผู้ใช้บริการทั้งเป็นผู้ป่วยนอก และผู้ป่วยในมากถึง 44.1 ล้านราย (พ.ศ.2555) และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดปัญหาในการใช้บริการ เช่น ความสะอาดของพื้นที่ การสร้างสภาวะปลอดเชื้อ และปัญหาสำคัญคือ การระบายอากาศที่ไม่เพียงพอและไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ก่อให้เกิดการติดเชื้อภายในโรงพยาบาล ซึ่งพบว่ามีผู้ใช้บริการติดเชื้อถึงร้อยละ 6.9 และพบว่ามีร้อยละ 43.2 ของผู้ติดเชื้อทั้งหมด ติดเชื้อในระบบทางเดินหายใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงในการติดเชื้อทางอากาศสูง เช่น หอผู้ป่วยรวมของโรงพยาบาล คุณภาพอากาศและการระบายอากาศในโรงพยาบาลจึงเป็นเรื่องสำคัญในการลดการติดเชื้อทางอากาศ ซึ่งสามารถทำได้ทั้งการปรับอากาศและการใช้การระบายอากาศธรรมชาติ ซึ่งโรงพยาบาลส่วนใหญ่ของไทยนิยมใช้การระบายอากาศธรรมชาติเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง บำรุงรักษา และการดำเนินงานต่ำกว่าการใช้การปรับอากาศ แต่ข้อเสียของการระบายอากาศธรรมชาติคือไม่สามารถควบคุมคุณภาพอากาศและทิศทางการไหลของอากาศให้คงที่ได้ตลอดเวลา หอผู้ป่วยรวมของโรงพยาบาลที่ระบายอากาศธรรมชาติ (รูปที่ 1) จึงเป็นพื้นที่ที่มีโอกาสในการติดเชื้อทางอากาศสูงจากการส่งผ่านอนุภาคเชื้อทางอากาศที่เกิดจากการหายใจพูด ไอ หรือจาม

โดยการวิจัยนี้ศึกษาคุณภาพอากาศภายในหอผู้ป่วยรวมที่ระบายอากาศธรรมชาติด้วยการจำลองการไหลของอากาศด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเพื่อเปรียบเทียบระหว่างผัง

อาคารหอผู้ป่วยรวมที่ระบายอากาศธรรมชาติรูปแบบต่างๆ โดยพิจารณาจากค่าการแลกเปลี่ยนอากาศ (Air Change Rate per Hour, ACH) และอายุของอากาศ (Age of Air, AGE) ซึ่งผู้ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบสามารถนำผลที่ได้ไปใช้ประกอบการออกแบบผังอาคารผู้ป่วยรวม และทำให้ผู้ป่วยและเจ้าหน้าที่ทราบว่าพื้นที่ใดในหอผู้ป่วยมีความเสี่ยงในการติดเชื้อทางอากาศ



รูปที่ 1 หอผู้ป่วยรวมที่ใช้การระบายอากาศธรรมชาติ

## 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาคุณภาพอากาศในหอผู้ป่วยรวมของโรงพยาบาลที่ใช้การระบายอากาศธรรมชาติ มีแนวทางในการศึกษา 3 ประเด็นสำคัญ

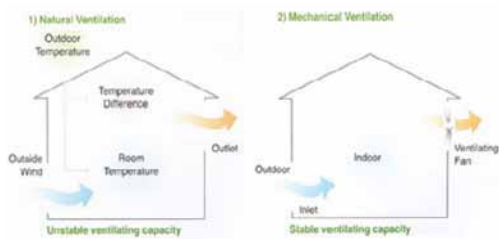
### 2.1 การแพร่เชื้อและการป้องกันเชื้อทางอากาศ

การแพร่กระจายเชื้อทางอากาศเกิดจากการกระจายตัวของส่วนหนึ่งของอนุภาค (Droplet Nuclei) ที่มีเชื้อจุลินทรีย์ลอยอยู่ในอากาศ หากมีขนาดเล็กกว่า 5 ไมโครเมตรจะสามารถเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจส่วนล่างได้ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดโรคในระบบทางเดินหายใจเช่นโรคหัดและวัณโรค โดยแนวทางในการป้องกันเชื้อทางอากาศจะเป็นการควบคุมสภาพแวดล้อมเพื่อลดความเข้มข้นของเชื้อที่อยู่ในรูปของละออง เช่น การควบคุมทิศทางการไหลของอากาศให้อากาศสะอาดไหลผ่านผู้ป่วย และการเจือจางเชื้อในอากาศโดยการ

เดิมอากาศภายนอกเพื่อลดความเข้มข้นของเชื้อ  
ที่ลอยอยู่ในอากาศ 6

**2.2 การระบายอากาศธรรมชาติในโรงพยาบาล**

การระบายอากาศธรรมชาติเป็นการเคลื่อนที่  
ของอากาศเข้ามาแทนที่พื้นที่ในอาคาร โดยมีจุด  
ประสงค์เพื่อให้อากาศที่มีดีพอสำหรับการหายใจ  
และเจือจางมลพิษที่เกิดขึ้นภายในพื้นที่ ทั้งนี้ใน  
อาคารที่ไม่ปรับอากาศมี 2 รูปแบบที่นิยมใช้ใน  
ปัจจุบันคือ 1) การระบายอากาศธรรมชาติ เป็น  
การระบายอากาศด้วยอากาศธรรมชาติเพียง  
อย่างเดียว เพื่อระบายภายในออกสู่ภายนอกซึ่ง  
ไม่สามารถควบคุมให้คงที่ได้ตลอดเวลา โดยห้อง  
หรืออาคารจะต้องมีผนังอย่างน้อย 1 ด้านมีช่อง  
เปิดออกสู่ภายนอก และ 2) การระบายอากาศ  
ด้วยระบบกล เป็นการนำเครื่องกลมาช่วยขับ  
เคลื่อนอากาศภายในพื้นที่ ซึ่งสามารถควบคุม  
คุณภาพอากาศให้ดีขึ้นกว่าการระบายอากาศ  
ธรรมชาติเพียงอย่างเดียว (รูปที่ 2)



รูปที่ 2 การระบายอากาศธรรมชาติ และระบบกล

ในการระบายอากาศ ค่าการแลกเปลี่ยน  
อากาศ (ACH) เป็นค่าที่บอกถึงปริมาณอากาศที่  
ไหลผ่านพื้นที่นั้น ซึ่งหากมีปริมาณอากาศแลกเปลี่ยน  
จำนวนมาก ระยะเวลาในการกำจัดเชื้อ  
ออกจากอากาศก็จะมีค่าน้อยลงด้วย การศึกษา  
ค่า ACH จึงเป็นแนวทางในการพิจารณาคุณภาพ

อากาศเบื้องต้น โดยอิทธิพลที่ส่งผลต่อค่า ACH  
คือ 1) สภาพแวดล้อมโดยรอบอาคาร หากอาคาร  
ล้อมรอบด้วยพื้นที่เปิดโล่งจะมีค่า ACH สูงกว่า  
อาคารที่ล้อมรอบด้วยอาคาร 2) ทิศทางลมและ  
ความเร็วลม เป็นเรื่องสำคัญตั้งแต่การออกแบบ  
ให้อาคารรับกับทิศทางลมในสถานที่นั้น จะ  
สามารถเพิ่มค่า ACH ได้ 3) การเปิดช่องเปิดและ  
การใช้ระบบกล จากการศึกษาการแลกเปลี่ยน  
อากาศในหอผู้ป่วยพิเศษ พบว่า เมื่อปิดประตูและ  
หน้าต่างจะมีค่า ACH 0.60 - 0.73 เมื่อเปิดประตู  
สู่ทางเดินหน้าห้องค่า ACH เพิ่มขึ้นเป็น 3.40 -  
8.70 เมื่อเปิดหน้าต่างและประตูพร้อมกันค่า ACH  
เพิ่มขึ้นเป็น 14.00-31.60 แต่เมื่อติดตั้งระบบกล  
ระบายอากาศร่วมด้วยค่า ACH เพิ่มสูงถึง 69.00

**2.3 มาตรฐานการระบายอากาศของโรงพยาบาล**

ในการวิจัยอ้างอิงเกณฑ์ค่าการแลกเปลี่ยน  
อากาศของ ASHRAE Standard 170 - 2008 ซึ่ง  
เกี่ยวกับการระบายอากาศในสถานพยาบาล โดย  
ได้กำหนดค่าการแลกเปลี่ยนอากาศมาตรฐานไว้  
ดังตารางที่ 1 ซึ่งใช้อ้างอิงในระดับสากล แต่  
สำหรับประเทศไทยได้กำหนดค่า ACH ไว้โดย  
วสท. และ สมาคมวิศวกรรมปรับอากาศแห่ง  
ประเทศไทย โดยใช้ค่าอ้างอิงจาก ASHRAE Stan-  
dard 170 เช่นกัน

ตารางที่ 1 ค่าการแลกเปลี่ยนอากาศมาตรฐาน

Function space	Pressure	Minimum Outdoor ACH	Minimum total ACH	Temp. C
Patient room	N/R	2	6	21 - 24
All room	Negative	N/R	10	N/R

นอกจากการวิเคราะห์ค่า ACH การพิจารณา  
อายุของอากาศ เป็นการประเมินคุณภาพอากาศ

ซึ่งบอกระยะเวลาของอากาศตั้งแต่ไหลเข้าจากช่องทางเข้าจนถึงจุดที่ศึกษา ซึ่งสัมพันธ์กับค่า ACH โดยคิดจาก 1 ชั่วโมง (60 นาที) ทหารด้วยค่า ACH ห้องที่ต้องการซึ่งหอผู้ป่วยกำหนดไว้ที่ 6 ซึ่งจะได้ระยะเวลาที่มากที่สุดที่อากาศสามารถไหลอยู่ในพื้นที่มีค่า 10 นาที หรือ 600 วินาที ซึ่งหากอายุของอากาศมีค่ามากกว่าที่กำหนดนั้น หมายความว่าพื้นที่นั้นเป็นจุดอับอากาศซึ่งมีการสะสมเชื้อในอากาศสูงกว่าที่มีอายุอากาศน้อยกว่า

### 3. ระเบียบวิธีวิจัย

การศึกษาแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ศึกษาผังอาคารมาตรฐานของหอผู้ป่วยรวม โดยพิจารณาลักษณะทางกายภาพของผังอาคารของหอผู้ป่วยรวมที่ใช้การระบายอากาศธรรมชาติ และลักษณะการไหลของอากาศ จำนวน 20 ตัวอย่าง (รูปที่ 3) ด้วยการลงพื้นที่ ศึกษางานวิจัยโรงพยาบาล ผังอาคารจากกองสนับสนุนบริการสาธารณสุข กระทรวงสาธารณสุข และกรมยุทธโยธธิการทหารบก แล้วจำลองการไหลของอากาศด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหล PHOENICS FLAIR เพื่อพิจารณาค่าความเร็วลม ค่าACH และอายุของอากาศ



รูปที่ 3 ตัวอย่างผังอาคารที่ทำการศึกษา

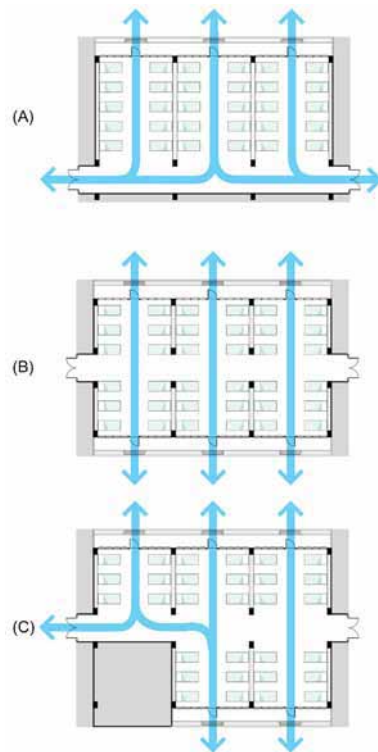
## 4. ผลการวิจัย

### 4.1 การศึกษาผังอาคารมาตรฐานของหอผู้ป่วย

จากการศึกษาผังอาคารหอผู้ป่วยรวมที่ใช้การระบายอากาศธรรมชาติ โดยแบ่งตามลักษณะทางกายภาพและทิศทางการไหลของอากาศ สามารถสรุปผังอาคารหอผู้ป่วยรวมได้ 3 รูปแบบ คือ (A) ผังอาคารระบายอากาศสองทิศทาง (B) ผังอาคารระบายอากาศข้ามฟาก และ (C) ผังอาคารระบายอากาศแบบผสม ดังรูปที่ 4

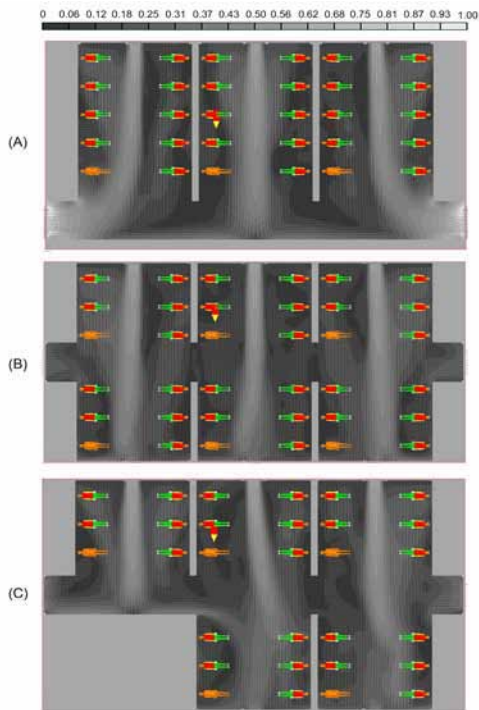
### 4.2 การศึกษาการไหลของอากาศในหอผู้ป่วย

ในการจำลองการไหลของอากาศได้กำหนดให้ความเร็วลมเริ่มต้น 0.92 m/s ซึ่งเป็นความเร็วลมเฉลี่ยกลางคืนของกรุงเทพฯ 4 ไหลผ่านช่องเปิดที่เป็นประตูและหน้าต่างบานเกล็ดที่ติดมุ้งลวดซึ่งมีค่า Cd (Discharge coefficient) 0.65 และ 0.29 ตามลำดับ



รูปที่ 4 ผังอาคารหอผู้ป่วยรวมที่ใช้การระบายอากาศธรรมชาติ

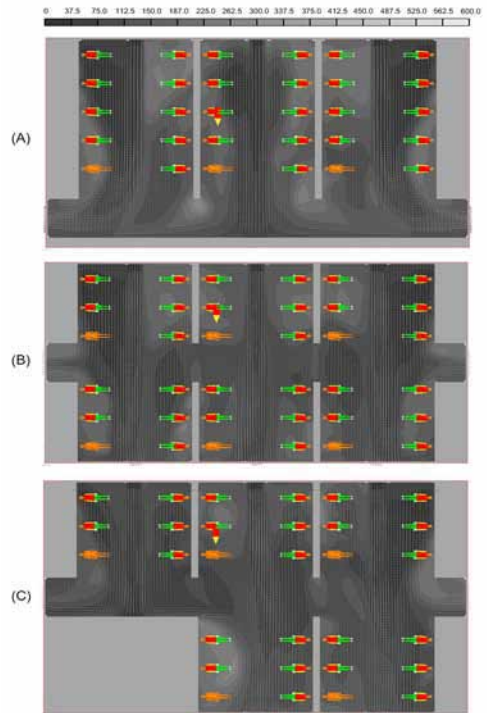
ทำให้ความเร็วลมเมื่อไหลผ่านลดลงเหลือ 0.59 m/s ที่ประตู และ 0.27 m/s ที่หน้าต่างบานเกล็ด และกำหนดให้ปริมาตรของห้องผู้ป่วยรวมมีปริมาตร 913 ลบ.ม. จำลองการไหลด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหล และมีผลการจำลองดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ภาพการจำลองการไหลของอากาศ

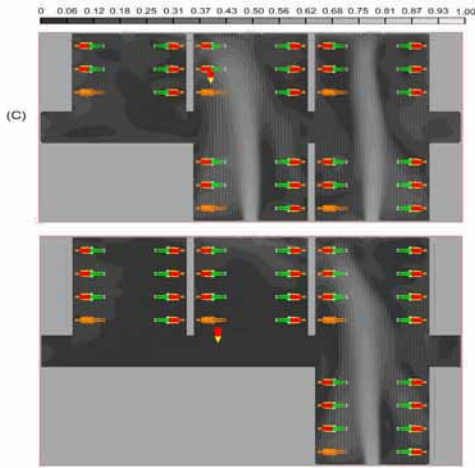
จากการจำลอง (A) ฟังอาคารระบายอากาศสองทิศทางมีค่า ACH 18.45 ลักษณะการไหลจะไหลผ่านเตียงผู้ป่วยและมีความเร็วเพิ่มขึ้นบริเวณทางออก ซึ่งมีความเร็วเฉลี่ยกลางห้อง 0.21 m/s (B) ฟังอาคารระบายอากาศข้ามฟาก มีค่า ACH 9.24 โดยอากาศจะไหลข้ามจากด้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่ง ซึ่งมีความเร็วลมเฉลี่ยกลางห้อง 0.17 m/s และ (C) ฟังอาคารระบายอากาศแบบผสม มีค่า ACH 13.6 ลักษณะการไหลบริเวณสิ่งกีดขวางจะทำให้อากาศไหลเปลี่ยนทิศทาง ทำให้เกิดการ

ไหลวนของอากาศซึ่งอาจเป็นจุดที่มีความเสี่ยงในการติดเชื้อสูงกว่าบริเวณอื่น ทั้งนี้มีความเร็วเฉลี่ยกลางห้อง 0.19 m/s



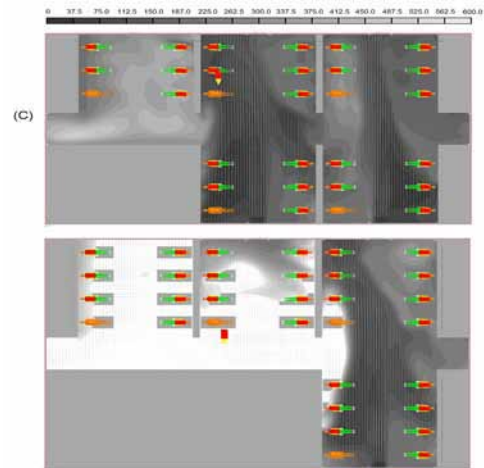
รูปที่ 6 ภาพการจำลองอายุของอากาศ

จากการจำลองอายุของอากาศ (รูปที่ 6) พบว่า ฟังอาคารทั้ง 3 รูปแบบ มีค่าอายุของอากาศสูงสุด 311.9 – 388.54 วินาที และมีอายุของอากาศเฉลี่ยที่เพียง 108.1-125.5 วินาที ซึ่งไม่เกิน 600 วินาที แต่ในกรณีของ (C) ฟังอาคารหอผู้ป่วยรวมแบบผสม ซึ่งมีสิ่งกีดขวางเป็นห้องเจ้าหน้าที่หรืออื่นๆ เมื่ออากาศไหลเข้าทางสิ่งกีดขวางปริมาตรอากาศที่ไหลเข้าได้จะน้อยลง ทำให้ค่า ACH ลดลงและ อายุของอากาศเพิ่มขึ้น โดยในการจำลองได้จำลองกรณีที่ย่ำที่สุดคือกรณีมีสิ่งกีดขวางจนเหลือพื้นที่สำหรับเตียงผู้ป่วย 1 ช่วงเสา (7ม.) ซึ่งสามารถจำลองได้ดังภาพที่ 6 และภาพที่ 7 ซึ่งคุณภาพอากาศที่ได้นั้นต่ำกว่ามาตรฐาน



รูปที่ 6 ความเร็วของอากาศในผังอาคารแบบผสมเมื่อไหลเข้าทางด้านที่มีสิ่งกีดขวาง

จากการจำลอง พบว่า (C) ผังอาคารแบบผสม เมื่อมีอากาศไหลเข้าทางด้านที่มีสิ่งกีดขวางเกิดการไหลวนของอากาศเพิ่มขึ้นและความเร็วของอากาศลดลงเมื่อสิ่งกีดขวางมีขนาดเพิ่มขึ้น โดยมีค่า ACH 10.13 มีความเร็วเฉลี่ยกลางห้อง 0.10 m/s และค่าอายุของอากาศในพื้นที่ตั้งแต่ 0.2 – 2257.2 วินาที โดยมีอายุเฉลี่ยที่เพียง 430 วินาที ซึ่งมีบางพื้นที่ที่มีค่าอายุของอากาศสูงและเกินกว่าค่าสูงสุดที่กำหนดไว้ 600 วินาที ซึ่งพื้นที่ที่อยู่หลังสิ่งกีดขวางหากในกรณีที่มีลมไหลเข้าทางด้านที่มีสิ่งกีดขวาง พื้นที่นั้นถือเป็นพื้นที่เสี่ยงในการติดเชืทางอากาศสูงมากกว่าพื้นที่อื่น ๆ ที่อยู่ในขอบเขตอายุของอากาศ 600 วินาที และกล่าวได้ว่าพื้นที่หลังสิ่งกีดขวางนั้นเป็นพื้นที่อับอากาศ และมีการสะสมเชื้อในอากาศสูงกว่าพื้นที่อื่น ซึ่งต้องทำการปรับปรุงให้คุณภาพอากาศดีขึ้น



รูปที่ 7 อายุของอากาศในผังอาคารแบบผสมเมื่อไหลเข้าทางด้านที่มีสิ่งกีดขวาง

## 5. สรุปผลการวิจัย

การระบายอากาศธรรมชาติของหอผู้ป่วยรวม จากการทดลองมีค่า ACH ผ่านมาตรฐานเมื่ออากาศไหลเข้าได้สะดวกและมีสิ่งกีดขวาง แต่ในกรณีที่ความเร็วลมตั้งต้นต่ำกว่า 0.50 m/s และมีสิ่งกีดขวางการไหลของอากาศขนาดใหญ่จะทำให้ช่องทางที่อากาศสามารถไหลผ่านเข้าไปได้น้อยลง ทำให้ค่า ACH ต่ำลงได้ และทำให้อายุของอากาศเพิ่มสูงขึ้นโดยสัมพันธ์กับความถี่ในการติดเชืทางอากาศที่เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเกิดจากอากาศไหลวน และมีความเร็วลมต่ำหรือหยุดนิ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในผังอาคารระบายอากาศแบบผสมที่มีความเสี่ยงมากกว่าผังอาคารประเภทอื่น แนวทางในการแก้ไขคุณภาพอากาศของอาคารที่ใช้การระบายอากาศธรรมชาติ ในผังอาคารระบายอากาศสองทิศทางและผังอาคารระบายอากาศข้ามฟากสามารถเพิ่มการไหลของอากาศได้โดยการเพิ่มขนาดและประเภทของหน้าต่าง และประตู หรือการเพิ่มช่องทางเดินบริเวณสิ่งกีดขวางในผังอาคารระบายอากาศแบบผสมเพื่อให้อากาศไหลผ่านได้มากยิ่งขึ้น และยัง

สามารถแก้ไขได้โดยการติดตั้งระบบระบายอากาศ ซึ่งช่วยเพิ่มความเร็วภายในพื้นที่ เพิ่มปริมาตรอากาศได้ และยังทำให้อายุของอากาศลดลง เช่น การติดตั้งพัดลมใบพัด หรือการจ่ายอากาศผ่านระบบท่อ ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้กับระบบทำความเย็นเพื่อสภาวะความสบายในหอผู้ป่วย แต่สิ่งที่ตามมาคือค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและดำเนินการ ซึ่งจะต้องศึกษาความคุ้มค่าในการติดตั้งระบบดังกล่าวเพื่อให้เกิดความเหมาะสมกับสถานที่

### รายการอ้างอิง

- กรุงเทพมหานครกิจ. (25 มีนาคม 2556). *ผู้ป่วยติดเชื้อดื้อยาปฏิชีวนะพุ่งสถิติปี 53 ตาย 3.84 หมื่นราย*. ฉบับ 8950 น.16.
- ปาริณี ศรีสุวรรณ. (2554). *คุณภาพอากาศภายในอาคารที่มีการรั่วซึมของอากาศสูงเมื่อมีการใช้ระบบเติมอากาศภายนอก*. วิทยานิพนธ์สถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- ผู้จัดการรายวัน. (6 มีนาคม 2556). *พบผู้ป่วยติดเชื้อในรพ. 6.9% รัฐบาลจ่ายค่ายา 4 พันล้านต่อปี*. ฉบับ 1293 น. 9.
- มาลินี ศรีสุวรรณ. (2543). *การศึกษาความสัมพันธ์ของทิศทางกระแสลมกับการเจาะช่องเปิดที่ผนังอาคารสำหรับภูมิอากาศร้อนชื้นในประเทศไทย*. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- สำนักงานสถิติแห่งชาติ. (2555). *การสำรวจโรงพยาบาลและสถานพยาบาลเอกชน*. สืบค้นเมื่อวันที่ 16 ตุลาคม 2558 จาก <http://service.nso.go.th/nso/nsopublish/themes/files/privatehospital55.pdf>

สถาบันบำราศนราดูร. (2550). *การปรับปรุงคุณภาพอากาศภายในอาคารสถานพยาบาล*. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์สำนักงานพระพุทธศาสนาแห่งชาติ.

สุพจน์ เตชะอำนวยการวิทย์. (2551). *การออกแบบห้องแยกเดี่ยวผู้ป่วย*. กรุงเทพฯ: สมาคมวิศวกรรมปรับอากาศแห่งประเทศไทย.

หมอชาวบ้าน. (2550). *โรคติดเชื้อในโรงพยาบาล*. สืบค้นเมื่อวันที่ 14 ตุลาคม 2558 จาก <http://www.doctor.or.th/clinic/detail/7476>

อานุกาฬ ละออ. (2558). *ปัญหาระบบระบายอากาศธรรมชาติในโรงพยาบาลและแนวทางแก้ไข*. นครสวรรค์: ศูนย์วิศวกรรมกรรมแพทย์ที่ 3.

ASHRAE. (2008). *ASHRAE Standard 170-2008: Ventilation of health care facilities*. Atlanta: The American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers.

Etheridge, D. (1996). *Building ventilation of buildings: Theory and measurement*. UK: John Wiley & Son .

Inkarojrit, V. (2015). *Natural ventilation in Thai hospitals: A field study*. Bangkok, Thailand. Retrieved October 10, 2015, from <http://www.aivc.org/sites/default/files/8B-1.pdf>

Qian, H. & Li, Y. (2010). Building and environment: Natural ventilation for reducing airborne infection in hospitals. *Building and Environment*, 45, 559–565

# แนวทางการออกแบบแสงสว่างในบ้านพักอาศัยที่มีผู้สูงอายุ เพื่อคุณภาพแสงสว่างและประสิทธิภาพพลังงาน

## Lighting Design Guideline of Home Environment with Aging Users for Lighting Quality and Energy Performance

จิราภรณ์ หอมหวล<sup>1</sup> และ ผศ.ดร. พิมลมาศ วรรณคนาพล<sup>2</sup>

Jiraporn Homhual<sup>1</sup> and Asst. Prof. Pimonmart Wankanapon, Ph.D.<sup>2</sup>

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

E-mail: jiraporn.homhual@gmail.com<sup>1</sup>, pimonmart@ap.tu.ac.th<sup>2</sup>

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้แนวทางการออกแบบแสงสว่างในบ้านพักอาศัยที่มีผู้สูงอายุเพื่อคุณภาพแสงสว่างและประสิทธิภาพพลังงาน ขอบเขตการศึกษาได้แก่ การศึกษาภาระงานทั้งแนวนอนและแนวตั้งในพื้นที่ใช้งานขนาดมาตรฐาน ดังต่อไปนี้ 1) ห้องนั่งเล่น 2) รับประทานอาหาร 3) ห้องครัว 4) ห้องน้ำ และ 5) ห้องนอน โดยใช้โปรแกรมจำลองสภาพแสง AGI32 เพื่อดูผลคุณภาพแสงสว่างในด้านค่าความส่องสว่าง ความสม่ำเสมอของแสง และอัตราส่วนความเปรียบต่าง ความสว่างสะท้อนของพื้นผิวที่ใช้งาน ผลการศึกษาเบื้องต้นของงานวิจัยแสดงให้เห็นรูปแบบแสงสว่างที่เหมาะสมสำหรับผู้สูงอายุที่มีอายุมากกว่า 60 ปีขึ้นไปในพื้นที่ห้องนั่งเล่น คือ รูปแบบการจัดผังดวงโคมแบบกระจายที่มีปริมาณความสว่าง มีความสม่ำเสมอของแสง และมีอัตราส่วนความเปรียบต่างเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน IESNA (Illuminating Engineering Society of North America) และเป็นรูปแบบที่ใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อการส่องสว่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ทั้งนี้ผลการวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งซึ่งผู้วิจัยดำเนินการอยู่

### Abstract

This research study the use of lighting design guideline in home environment with aging users for lighting quality and energy performance. The scope of this research covers the working plane, both of horizontal and vertical in the following standard-size areas; 1) Living room, 2) dining room, 3) Kitchen, 4) Bathroom and 5) Bedroom. The lighting simulation program AGI32 are used to calculate appropriate illuminance level including illuminance uniformity and luminance ratio in order to analyze lighting quality. Preliminary results of research shows that the most appropriate design for aging users (age 60 years or older) in Living room should be point source with grid layout and provide illuminance level, illuminance uniformity and luminance ratio according to the standard of Illuminating Engineering Society of North America (IESNA). However, use of lighting energy will be increase at about 50% compared to a base case. This is an ongoing research.

**คำสำคัญ (Keywords):** ออกแบบแสงสว่าง (Lighting Design), บ้านพักอาศัย (Home Environment), ผู้สูงอายุ (Aging Users), คุณภาพแสงสว่าง (Lighting Quality), ประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Performance)

## 1. บทนำ

แสงสว่างในบ้านพักอาศัยมีความสำคัญในการเป็นปัจจัยที่ช่วยส่งเสริมการมองเห็น การทำกิจกรรม และลดการเกิดอุบัติเหตุ ผู้สูงอายุเป็นกลุ่มผู้ใช้งานที่มีความจำเป็นในเรื่องของแสงสว่าง เนื่องจากเป็นกลุ่มบุคคลที่มีการเปลี่ยนแปลงทางด้านร่างกายมากที่สุด จากสถิติประชากรผู้สูงอายุทั้งในต่างประเทศและประเทศไทยมีแนวโน้มที่สูงขึ้น โดยประเทศไทยมีประชากรผู้สูงอายุ (ที่มีอายุมากกว่า 60 ปี) มากกว่า 10.02 ล้านคน คิดเป็นร้อยละ 14.9 ของประชากรทั้งหมด และมีการคาดการณ์ว่าสังคมไทยจะเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุโดยสมบูรณ์ภายในระยะเวลา 10 ปี (สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, 2554) ผู้สูงอายุมีแนวโน้มในการใช้ชีวิตเพียงลำพังและดูแลตนเองมากขึ้นดังนั้นความปลอดภัยในบ้านพักอาศัยจึงมีความสำคัญในการดำรงชีวิตของผู้สูงอายุ



**รูปที่ 1** ภาพแสดงความแตกต่างระหว่างห้องที่แสงสว่างไม่เหมาะสม(ซ้าย) และเหมาะสม(ขวา) ดัดแปลงรูปภาพจาก <http://www.srangsookjai.com>

ผู้สูงอายุเป็นกลุ่มผู้ใช้งานที่มีความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุมากที่สุด กว่าร้อยละ 50-67 เกิดอุบัติเหตุล้มลงภายในบ้านพักอาศัย (ประเสริฐ

อัสสันตชัย, 2544) แสงสว่างที่ไม่เหมาะสมในบ้านพักอาศัยได้แก่แสงสลัว และความไม่สม่ำเสมอของแสง การแก้ไขปัญหาความปลอดภัยภายในบ้านพักอาศัยได้มีการนำเอาแนวคิดเรื่องการออกแบบเพื่อคนทั้งมวล Universal Design (อรุณ ศิริจานุสรณ์, 2558) มาปรับใช้ ซึ่งสามารถแก้ปัญหาได้เพียงลักษณะของพื้นที่ที่ไม่เหมาะสมซึ่งไม่ครอบคลุมการแก้ปัญหาอุบัติเหตุที่เกิดจากแสงสว่างไม่เหมาะสม ดังนั้นแนวทางในการออกแบบลักษณะทางกายภาพด้านแสงสว่าง จึงเป็นอีกหนึ่งแนวทางที่สามารถแก้ปัญหาเรื่องความปลอดภัยในบ้านพักอาศัยที่มีผู้สูงอายุและให้ความสำคัญกับการใช้พลังงานภายในบ้านพักอาศัยได้เหมาะสม

## 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แนวทางการออกแบบแสงสว่างในบ้านพักอาศัยที่มีผู้สูงอายุ มีแนวทางในการศึกษาแบ่งออกเป็น 3 ประเด็นหลัก คือ ผู้สูงอายุ แสงสว่าง และประสิทธิภาพพลังงาน

### 2.1 แนวคิดและทฤษฎีเกี่ยวกับผู้สูงอายุ

การจำแนกกลุ่มผู้สูงอายุมักแยกตามลักษณะทางสุขภาพและสังคม โดยแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มดังต่อไปนี้ 1) ผู้สูงอายุกลุ่มที่ช่วยตนเองได้ดีหรือกลุ่มติดสังคมสามารถทำกิจกรรมภายในและภายนอกบ้านได้ตามปกติไม่ต้องอาศัยผู้ดูแล 2) ผู้สูงอายุกลุ่มติดบ้าน เริ่มมีความเสื่อมของร่างกายแต่ยังสามารถช่วยเหลือตัวเองได้ หรือมีการใช้

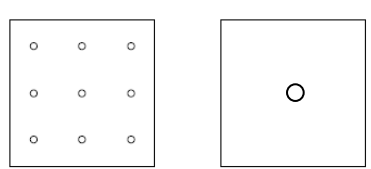
อุปกรณ์ในการช่วยเหลือตนเอง เช่น การใช้ไม้เท้าช่วยพยุง 3) ผู้สูงอายุกลุ่มมิดเดิลเอจ มีปัญหาสุขภาพที่อยู่กับบ้านและเตียงมากขึ้น ไม่สามารถช่วยเหลือตนเองได้ต้องการผู้ดูแล (สำนักงานหลักประกันสุขภาพแห่งชาติ, 2558) งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาในกลุ่มผู้สูงอายุ กลุ่มที่ 1) และ 2) เนื่องจากเป็นกลุ่มที่สามารถช่วยเหลือตนเอง และสามารถทำกิจกรรมต่าง ๆ ในบ้านได้

## 2.2 แนวคิดและทฤษฎีเกี่ยวกับแสงสว่างในบ้านพักอาศัย

### 2.2.1 การออกแบบแสงสว่างพื้นที่ห้องนั่งเล่น

สำหรับผู้สูงอายุกิจกรรมที่มักเกิดขึ้นในห้องนั่งเล่นมักเป็นการดูโทรทัศน์ การอ่านหนังสือ และกิจกรรมภายในครอบครัว ดังนั้นในการออกแบบสภาพแวดล้อมด้านแสงสว่างภายในห้องนั่งเล่นในช่วงเวลากลางวันจะใช้แสงธรรมชาติเป็นส่วนใหญ่ และใช้การให้แสงสว่างเฉพาะจุดในบริเวณที่ผู้สูงอายุใช้อ่านหนังสือ โดยที่การให้แสงสว่างเฉพาะจุดอาจใช้โคมไฟประเภทตั้งพื้นมาช่วยเพิ่มความสว่างให้กับกิจกรรม ระบายการใช้งานภายในห้องนั่งเล่น คือ บริเวณระดับพื้น (IESNA, 2009)

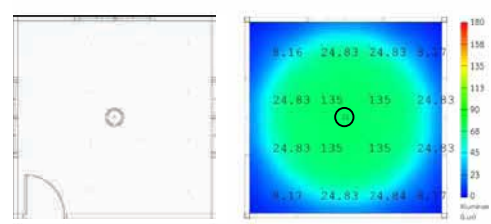
2.2.2 แหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ แบบจุด (point source) สามารถแบ่งรูปแบบการจัดออกเป็น 2 ประเภทหลักคือ ผังแบบกระจาย (grid layout) และผังแบบแบปึ่งกลาง (Centered layout)



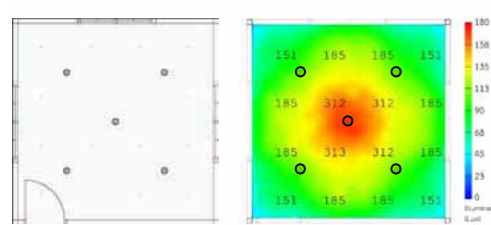
รูปที่ 2 แหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ผังแบบกระจาย (ซ้าย) ผังแบบกึ่งกลาง (ขวา) จาก Erco Guide [www.erco.com](http://www.erco.com)

## 2.3 แนวคิดและทฤษฎีเกี่ยวกับการใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อการส่องสว่าง

ในพื้นที่ใช้งานของกิจกรรมที่แตกต่างกันไปมีระดับความต้องการความส่องสว่าง (Illuminance) ที่แตกต่างกันออกไป โดยเฉพาะกลุ่มผู้สูงอายุที่มีความต้องการความส่องสว่างมากกว่ากลุ่มคนในช่วงวัยอื่น ดังนั้น การปรับเปลี่ยนชนิดของแหล่งกำเนิดแสงจึงเป็นสาเหตุให้เกิดการใช้พลังงานที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 3 ตัวอย่างการติดตั้งแหล่งกำเนิดแสง หลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ ขนาด 14 วัตต์ (790 ลูเมน) บริเวณกึ่งกลางของห้อง



รูปที่ 4 ตัวอย่างการติดตั้งแหล่งกำเนิดแสง หลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ ขนาด 14 วัตต์ (790 ลูเมน) แบบกระจายในบริเวณของห้อง จำนวน 5 จุด

หากต้องการเพิ่มระดับความส่องสว่างให้มากยิ่งขึ้น เพื่อผู้สูงอายุที่มีความต้องการความส่องสว่างมากกว่ากลุ่มคนวัยอื่นสองเท่าการปรับเปลี่ยนอย่างง่ายในเบื้องต้น คือ การปรับรูปแบบการวางผังซึ่งทำให้เกิดการเพิ่มจำนวน จากในรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่า บริเวณกึ่งกลางของห้องมีระดับความสว่างที่เพิ่มมากขึ้นเกินกว่า 2 เท่าของ

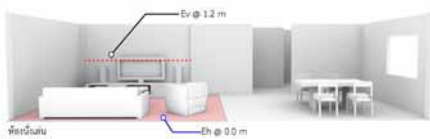
ระดับความส่องสว่างเดิม ในขณะที่ได้ปริมาณความส่องสว่าง เพิ่มมากขึ้น การใช้พลังงานเพื่อการส่องสว่างภายในห้องก็เพิ่มมากขึ้นถึง 5 เท่าเช่นกัน

### 3. ระเบียบวิธีวิจัย

การศึกษามีเกณฑ์ในการประเมินแสงสว่าง แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ปริมาณความส่องสว่าง และคุณภาพแสงสว่าง โดยประเมินตามเกณฑ์มาตรฐานของ IESNA โดยใช้การจำลองรูปแบบด้วยโปรแกรม AGI32 ส่วนที่ 1 พิจารณาปริมาณความส่องสว่างตามตารางมาตรฐาน IESNA ผู้ที่มีอายุมากกว่า 65 ปี โดยพิจารณาระนาบแนวนอน - พื้นที่ห้องนั่งเล่นวัดที่ระดับ 0.00 เมตร ระนาบแนวตั้ง - พื้นที่ห้องนั่งเล่น วัดที่ผนังระดับ 1.20 เมตร ส่วนที่ 2 พิจารณาคุณภาพของแสงสว่างโดยพิจารณาเรื่อง ความสม่ำเสมอของแสง อัตราส่วนความเปรียบต่างความสว่างสะท้อนของพื้นผิวที่ใช้งาน

ตารางที่ 1 แสดงค่าความส่องสว่างตามมาตรฐาน IESNA ของผู้สูงอายุ (มากกว่า 65 ปี)

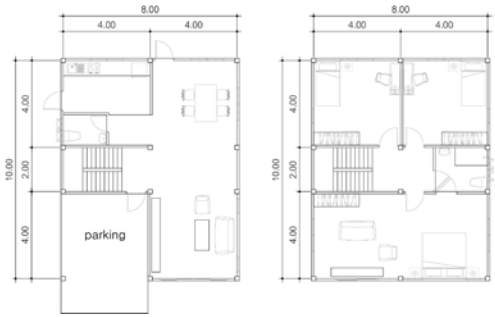
	Illuminance level		Uniformity
	Eh	Ev	
Living room	60	60	5:1
Dining room	200	80	4:1



รูปที่ 5 ระดับที่ทำกรวัดในระนาบแนวนอน-ตั้ง

### 3.1 การศึกษาสภาพแวดล้อมด้านแสงสว่างในบ้านพักอาศัยที่พบในปัจจุบัน

ศึกษาจากบ้านเดี่ยว กลุ่มราคา 3-5 ล้านบาท โดยกำหนดพื้นที่ศึกษาคือ ห้องนั่งเล่น ห้องรับประทานอาหาร ห้องครัว ห้องน้ำ และห้องนอน



รูปที่ 6 แบบบ้านขนาดมาตรฐาน

จำลองรูปแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และพิจารณาตามเกณฑ์มาตรฐาน

### 3.2 การศึกษาแนวทางเพื่อปรับปรุงแก้ไข

การศึกษาแนวทางการปรับปรุง เพื่อแก้ไข ปัญหาที่ทราบจากการศึกษาในขั้นตอนที่ 1 โดยอ้างอิงให้เป็นไปตามเกณฑ์จากมาตรฐานของ IESNA เพื่อหาแนวทางในการทำให้พื้นที่ใช้งาน มีปริมาณความส่องสว่างที่เพียงพอ และได้คุณภาพที่เหมาะสมกับการใช้งาน โดยมีขั้นตอนการศึกษาดังนี้ 1) การปรับตำแหน่งการติดตั้ง 2) การปรับจำนวนของแหล่งกำเนิด ทำการวัดค่าที่จำเป็น และประเมินผล

### 3.3 การประเมินผลด้านประสิทธิภาพพลังงาน

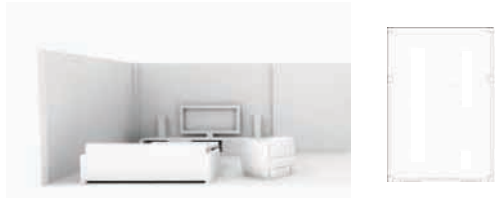
การประเมินรูปแบบที่ได้จากการศึกษาในขั้นตอนที่ 2 เพื่อสรุปเป็นรูปแบบสภาพแวดล้อมด้านแสงสว่างที่เหมาะสมสำหรับผู้สูงอายุ โดยมีเกณฑ์การพิจารณาใน 2 ส่วนคือ 1) รูปแบบที่ผ่าน

เกณฑ์การประเมินความสบายด้านการมองเห็น ประกอบด้วย ปริมาณความส่องสว่าง ความสม่ำเสมอของแสงอัตราส่วนความสว่างสะท้อน (พิมลมาศ วรรณคนาพล, 2554) ซึ่งเหมาะสมสำหรับผู้สูงอายุ 2) ประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงาน

#### 4. ผลการวิจัย

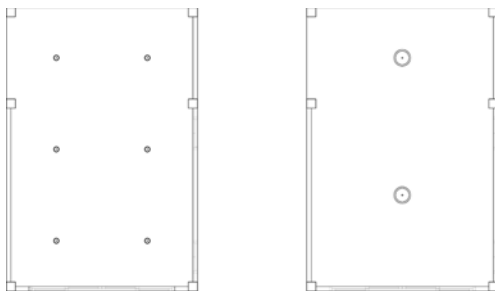
##### 4.1 ผลการศึกษาสภาพแวดล้อมด้านแสงสว่างในบ้านพักอาศัยที่พบในปัจจุบัน

พื้นที่การใช้งานหลักของห้องนั่งเล่นขนาด 4X6 เมตร



รูปที่ 7 พื้นที่ใช้งานหลักของห้องนั่งเล่น

ในปัจจุบันรูปแบบการจัดผังดวงโคมของบ้านพักอาศัยนิยมจัดโดยใช้แหล่งกำเนิดแบบจุด (Point source) โดยมี 2 รูปแบบผังหลัก คือ ผังแบบกระจาย และผังแบบกึ่งกลาง



รูปที่ 8 ผังแบบกระจาย (ซ้าย) ผังแบบกึ่งกลาง (ขวา)

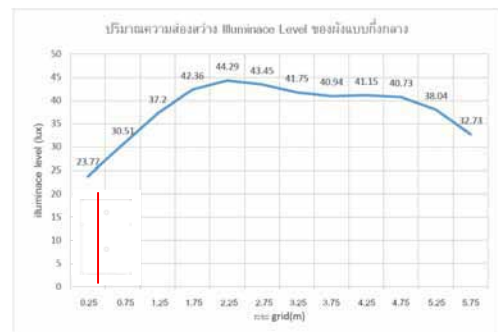
ตารางที่ 2 แสดงผลการศึกษารูปแบบการจัดผังแบบกระจาย และการจัดผังแบบกึ่งกลาง

	Illuminance level		Uniformity	
	Eh	Ev	(h)	(v)
ผังแบบกระจาย	52.55	38.57	1.76	1.3
ผังแบบกึ่งกลาง	33.72	16.24	1.82	1.46

จากการศึกษารูปแบบที่พบในปัจจุบันพบว่า การจัดผังแบบกระจายมีแนวโน้มของค่าความส่องสว่างใกล้เคียงกับเกณฑ์มาตรฐาน IESNA มากกว่าการจัดผังแบบกึ่งกลาง ดังนั้นในการศึกษาขั้นถัดไปจึงเลือกใช้การจัดผังแบบกระจายเพื่อทำการศึกษาในขั้นถัดไป



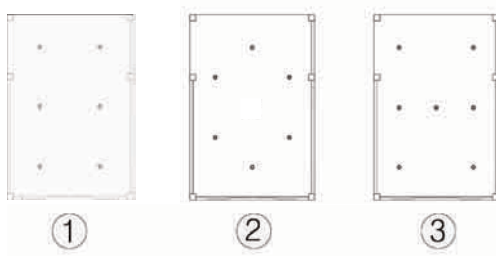
รูปที่ 9 ปริมาณความส่องสว่างของผังแบบกระจายตามแนวตัดของห้อง



รูปที่ 10 ปริมาณความส่องสว่างของผังแบบกึ่งกลางตามแนวตัดของห้อง

#### 4.2 ผลการศึกษาแนวทางเพื่อปรับปรุงแก้ไข

จากการศึกษารูปแบบการจัดผังแบบกระจาย  
ในลักษณะต่างกัน โดยการเลือกใช้หลอด คอม  
แพคฟลูออเรสเซนต์ ขนาด 14 และ 18 วัตต์ ที่  
ให้ความสว่าง 790 และ 1040 ลูเมนตามลำดับ  
ได้ผลการศึกษาใน 3 รูปแบบ ดังต่อไปนี้

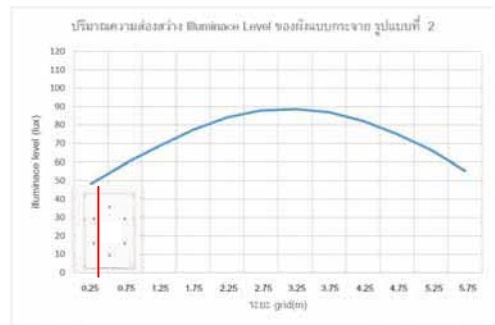


รูปที่ 11 การจัดผังแบบกระจายรูปแบบที่ 1-3

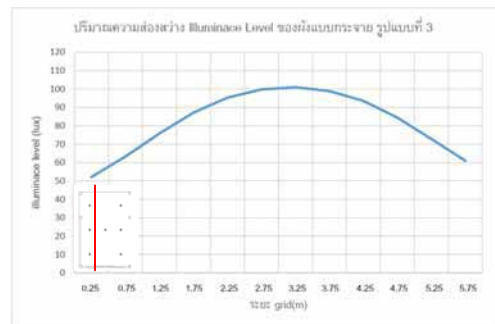
เพื่อให้การจัดรูปแบบได้ปริมาณและคุณภาพ  
เป็นไปตามมาตรฐาน IESNA ในรูปแบบที่ 1 เลือก  
ใช้หลอดที่มีกำลังไฟ 18 วัตต์จำนวน 6 หลอด,  
รูปแบบที่ 2 เลือกใช้หลอดที่มีกำลังไฟ 14 วัตต์  
จำนวน 6 หลอด, รูปแบบที่ 3 เลือกใช้หลอดที่มี  
กำลังไฟ 14 วัตต์ จำนวน 7 หลอด

ตารางที่ 3 แสดงผลการศึกษาของรูปแบบการจัดผังแบบ  
กระจายทั้ง 3 รูปแบบ

ผังแบบกระจาย	Illuminance level		Uniformity	
	Eh	Ev	(h)	(v)
รูปแบบที่ 1	84.49	70.00	1.70	1.34
รูปแบบที่ 2	65.69	60.50	1.78	2.60
รูปแบบที่ 3	74.01	70.97	1.77	1.35



รูปที่ 12 ปริมาณความส่องสว่างของผังแบบกระจายตาม  
แนวตัดของห้อง รูปแบบที่ 2



รูปที่ 13 ปริมาณความส่องสว่างของผังแบบกระจายตาม  
แนวตัดของห้อง รูปแบบที่ 3

#### 4.3 ผลการประเมินด้านประสิทธิภาพพลังงาน

การพิจารณาประสิทธิภาพพลังงานวัดเฉพาะ  
ปริมาณการใช้ไฟฟ้าเพื่อการส่องสว่างเท่านั้น  
โดยคิดจากปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในหนึ่งรูป  
แบบของการจัดผังแบบกระจาย โดยมีการใช้  
พลังงานเพื่อการส่องสว่างดังตารางต่อไปนี้

**ตารางที่ 4** กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในแต่ละรูปแบบ

ผังแบบกระจาย	กำลังไฟของหลอด (วัตต์)	จำนวนหลอด (หลอด)	กำลังไฟเฉลี่ย (วัตต์/ตร.ม.)
รูปแบบ 1	18	6	4.5
รูปแบบ 2	14	6	3.5
รูปแบบ 3	14	7	4

เมื่อเทียบปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของทั้ง 3 รูปแบบที่มีคุณภาพแสงสว่างเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน พบว่า รูปแบบที่ 1 (การจัดผังแบบกระจายที่พบทั่วไป) มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อหน่วยพื้นที่มากกว่ารูปแบบที่ 2 และ 3

### 5. บทสรุป

ผลที่ได้จากการวิจัยสามารถสรุปได้ว่ารูปแบบการจัดผังแบบกระจายสามารถช่วยให้เกิดสภาพแวดล้อมด้านแสงสว่างที่เหมาะสมกับผู้สูงอายุได้ เนื่องจากสามารถให้ปริมาณความส่องสว่างและคุณภาพแสงสว่างที่ใกล้เคียงกับเกณฑ์มาตรฐาน IESNA โดยรูปแบบการจัดผังแบบกระจายในลักษณะสมมาตร สามารถทำให้ได้ผลลัพธ์ที่เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานทั้งในระนาบนอนและระนาบตั้ง ดังที่ปรากฏในผลการวิจัยข้างต้นในด้านของประสิทธิภาพด้านพลังงาน หากต้องการให้การจัดผังแบบกระจายตามรูปแบบที่พบได้ทั่วไป (รูปแบบที่ 1) มีปริมาณและคุณภาพแสงสว่างเป็นไปตามมาตรฐานจำเป็นต้องใช้หลอดไฟที่มีจำนวนวัตต์สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับข้อเสนอในการจัดผังแบบใหม่ (รูปแบบที่ 2, 3) ดังนั้นการจัดรูปแบบผังมีผลต่อปริมาณ - คุณภาพการส่องสว่าง และประสิทธิภาพการใช้พลังงาน นอกจากนี้ยังมีข้อเสนอแนะเพิ่มเติมในด้านพลังงาน โดยการเปลี่ยนอุปกรณ์จากการใช้หลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ มาใช้หลอด LED ที่มีการให้

ความสว่างที่มากกว่าแต่ใช้กำลังไฟน้อยกว่า จะช่วยให้ภาพรวมการใช้พลังงานในแต่ละรูปแบบลดลงได้มากขึ้น

### รายการอ้างอิง

- ประเสริฐ อัสสันตชัย. (2554). ภาวะทงลัมในผู้สูงอายุและการป้องกัน. *ปัญหาสุขภาพที่พบบ่อยในผู้สูงอายุและการป้องกัน*, 51-66.
- พิมลมาศ วรรณคนาพล. (2554). *แสงธรรมชาติเชิงบูรณาการเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงทางสภาพภูมิอากาศโรงเรียนอนุรักษพลังงาน*. ปทุมธานี: คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- สว่างสุขใจ. (2553). *ตกแต่งภายในบ้าน*. สืบค้นเมื่อวันที่ 20 ธันวาคม 2558, จาก <http://www.srangsookjai.com>
- สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. (2554). *โครงสร้างประชากรมีแนวโน้มประชากรวัยสูงอายุเพิ่มขึ้น: แผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติฉบับที่ 11 พ.ศ. 2555-2559*. กรุงเทพฯ: สศช.
- สำนักงานหลักประกันสุขภาพแห่งชาติ. (2558). *การจำแนกผู้สูงอายุตามระดับการพึ่งพิง: คู่มือระบบดูแลระยะยาวด้านสาธารณสุขสำหรับผู้สูงอายุที่มีภาวะพึ่งพิงในพื้นที่ ปิงปวง ประมาณ 2559*, 5-9. กรุงเทพฯ: สปสช.
- อรุณ ศิริจานุสรณ์. (2558). อสังหาริมทรัพย์: ที่พักอาศัยและสภาพแวดล้อมของผู้สูงอายุ. *วารสารธนาคารอาคารสงเคราะห์*, 21(80), 55-59.

America. (2009). *Lighting your way to better vision*. New York: Illuminating Engineering Society of North America.

DiLaura, D. L. & Illuminating Engineering Society of North America. (2011). *The lighting handbook: Reference and application*. New York : illuminating Engineering Society of North America.

ERCO. (2016). *Erco guide*. Retrieved from December 13, 2015 from [http://www.ercos.com/download/en/Illuminating Engineering Society of North](http://www.ercos.com/download/en/IlluminatingEngineeringSocietyofNorth).

**แนวทางการตรวจสอบและวิเคราะห์อาคารเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้  
พลังงานไฟฟ้า กรณีศึกษาอาคารเฉลิมพระเกียรติ 55 พรรษา  
สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี สจล.**

**Guideline for Energy Monitoring and Analyzing Buildings in Order to  
Increase the Efficiency of Electricity Consumption.**

**Case study: 55<sup>th</sup> Year Princess Maha Chakri Sirindhorn Building**

**พิมประภา จินดากกร<sup>1</sup> และ ศุทธา ศรีเผด็จ<sup>2</sup>**

**Phimprapa Jindagon<sup>1</sup> and Sutta Sriphadej<sup>2</sup>**

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

E-mail: toi\_at08@hotmail.com<sup>1</sup>, sutta.sr@kmitl.ac.th<sup>2</sup>

**บทคัดย่อ**

บทความนี้เป็นการตรวจสอบและวิเคราะห์การใช้พลังงานในอาคารเฉลิมพระเกียรติ 55 พรรษา สจล. ซึ่งเป็นอาคารสถานศึกษาที่มีอายุมากกว่า 10 ปีและมีการใช้ระบบปรับอากาศในอาคาร ผลการศึกษาพบว่า ระบบกรอบอาคาร มีค่าการใช้พลังงานเท่ากับ 56.42 วัตต์/ตร.ม. และมีค่าระบบไฟฟ้าแสงสว่างเท่ากับ 8.17 วัตต์/ตร.ม. ซึ่งกรอบอาคารมีประสิทธิภาพไม่ผ่านเกณฑ์ขั้นต่ำของอาคารอนุรักษ์พลังงาน ทำให้สิ้นเปลืองไฟฟ้า จากนั้นจึงทำการทดลองปรับปรุงอุปกรณ์กันแดด เปลี่ยนหลอดไฟฟ้า และเครื่องปรับอากาศแล้วทำการวัดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าอีกครั้งพบว่าสามารถลดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้ โดยเฉลี่ยปีละ 324,676 กิโลวัตต์/ปี คิดเป็นเงิน 1,444,808 บาท/ปี จากการลงทุน 6,575,620 บาท ใช้ระยะเวลาคืนทุน 4.5 ปี

**Abstract**

This study aimed to inspect and analyse the consumption of the 55<sup>th</sup> Year Princess Maha Chakri Sirindhorn Building (PMCS Building), which is more than 10 years old and is air-conditioned. It was found that the building envelope system consumed energy at 56.42 watts/square meter, while the lighting system consumed energy at 8.17 watts/square meter. In terms of energy efficiency, the energy consumption of the building envelope system did not meet the Building Energy code of the energy saving building. As a result, the electricity bill of the PMCS Building was very high. A modification was then carried out. The shading device was improved, and the lighting system and the air-conditioning system were replaced. Following the modification, the expenses covering electricity were lowered to 324,676 kilowatts/year on average accounting for 1,444,808 baht/year. The investment cost totalled 6,575,620 baht and the pay-back period covered 4.5 years.

**คำสำคัญ (Keywords):** ประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficiency), การใช้พลังงานรวมของทั้งอาคาร (Whole Building Energy Compliance), เกณฑ์มาตรฐานประสิทธิภาพพลังงานอาคาร (Building Energy Code)

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันเจ้าของโครงการ เจ้าของอาคาร หน่วยงานต่าง ๆ ทั้งภาครัฐ และ ภาคเอกชนเริ่มให้ความสนใจอย่างมากในการจัดการกับสภาพสิ่งแวดล้อม และการใช้พลังงานในส่วนของอาคาร เพื่อช่วยแก้ปัญหาภาวะโลกร้อนโดยการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ และลดการใช้พลังงานซึ่งจะเป็นพื้นฐานเพื่อนำไปสู่การพัฒนาประเทศที่ยั่งยืน การถูกรับรองให้เป็นอาคารเขียวเป็นวิธีส่งเสริมภาพพจน์ของธุรกิจนั้นด้วยเนื่องจากเป็นตัวชี้วัดให้บุคคลภายนอกเห็นถึงความรับผิดชอบต่อความใส่ใจของเจ้าของอาคารที่มีต่อสังคมส่วนรวม ผู้ใช้งานและผู้อยู่อาศัยอีกด้วย สำหรับอาคารเดิมที่เปิดใช้งานแล้ว ณ ปัจจุบันภาครัฐให้ความสำคัญอย่างมากถึงขั้นมีการกำหนดแผนกลยุทธ์ และการปฏิบัติการมุ่งสู่การเป็นอาคารเขียวของภาครัฐระยะเวลา 6 ปี ให้ได้ภายในปี 2559 โดยที่กรมควบคุมมลพิษได้กำหนดเป็นยุทธศาสตร์ของกรม ขณะนี้ได้มีหลายหน่วยงานของภาครัฐได้นำกลยุทธ์ที่กรมควบคุมมลพิษได้กำหนดไว้ไปเริ่มศึกษาถึงขั้นตอน และวิธีการในการปรับปรุงอาคารเหล่านั้น รวมถึงเกณฑ์มาตรฐานขั้นต่ำของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (ศุทธา ศรีเผด็จ, 2551) ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษาพลังงานเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการพัฒนาทางเศรษฐกิจ และนำมาซึ่งความเจริญของประเทศโดยส่วนรวม การใช้พลังงานทุกรูปแบบให้ได้ประโยชน์สูงสุดเป็นการลดค่าใช้จ่ายของหน่วยงาน ลดการนำเข้าพลังงานลดการขาดดุลการค้าของประเทศ

และเป็นการสงวนทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่จำนวนจำกัดให้มีใช้ได้นานที่สุด

## 2. วิธีดำเนินการวิจัย

### 2.1 สํารวจและเก็บข้อมูลเบื้องต้นอาคาร

#### 2.1.1 สํารวจข้อมูลทางกายภาพของอาคาร

ศึกษาแปลนอาคาร ลักษณะอาคาร การแบ่งพื้นที่ใช้สอยในอาคาร (Zoning) สํารวจเก็บข้อมูลลักษณะการใช้งาน อาคาร และการจัดแบ่งพื้นที่ใช้สอยอาคารการศึกษาวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างอาคาร เก็บข้อมูลวัสดุก่อสร้างอาคาร วัสดุตกแต่ง และโครงสร้างอาคาร

ข้อมูลทั่วไปประเภทอาคารสถานศึกษา เจ้าของโครงการสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังสูง 8 ชั้นผนังภายนอกก่ออิฐฉาบปูนสีเทา, ส้ม ช่องเปิดเป็นกระจกใสและกระจกกันเสียง 6 มม. หลังคา ค.ส.ล. มีฉนวนกันความร้อน พื้นที่ใช้สอยรวม 9,419.54 ตร.ม พื้นที่ปรับอากาศ 4,746.94 ตร.ม พื้นที่ไม่ปรับอากาศ 3,738.7 ตร.ม. พื้นที่ใช้สอยดาดฟ้า 933.9 ตร.ม



**รูปที่ 1** ผังบริเวณอาคารเฉลิมพระเกียรติ 55 พรรษา สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ



รูปที่ 2 อาคารเฉลิมพระเกียรติ 55 พรรษา สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ

### 2.1.2 สํารวจข้อมูลผู้ใช้อาคาร

ลักษณะพฤติกรรมการใช้งานอาคารของผู้ใช้งานจำนวนผู้ใช้งานอาคารในแต่ละฝ่าย แต่ละแผนก และจำนวนผู้ใช้งานรวม ตารางการใช้งานอาคารของฝ่ายต่าง ๆ

### 2.1.3 สํารวจและเก็บข้อมูลการใช้พลังงานรวม

สํารวจข้อมูลระบบปรับอากาศชนิดและลักษณะของเครื่องปรับอากาศจำนวนปรับอากาศที่มีการใช้งานตารางการใช้งานเครื่องปรับอากาศ การตั้งค่าอุณหภูมิการปรับอากาศ การจัดกลุ่มและแบ่งพื้นที่ใช้สอยของเครื่องปรับอากาศและเครื่องมือในการหาประสิทธิภาพเครื่องปรับอากาศ

- สํารวจข้อมูลระบบไฟฟ้าแสงประดิษฐ์ สํารวจชนิด ขนาด และปริมาณดวงไฟ และลักษณะดวงโคม

- สํารวจข้อมูลระบบอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าในอาคารสํารวจชนิด ขนาด และปริมาณอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า ปริมาณการใช้ไฟฟ้าในระบบลิฟต์และอื่น ๆ

### 2.1.4 ประเมินการใช้พลังงานรวมทั้งอาคาร

ทำการประเมินค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าและพฤติกรรมทางอุณหภูมิของทุก ๆ ส่วนของอาคารโดยการสำรวจเก็บข้อมูลจากอาคารจริง และการจำลองสภาพในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ BEC นำข้อมูลที่รวบรวมได้ทั้งหมดเข้าจำลองในโปรแกรมให้มีผลรวมของการใช้พลังงานใกล้เคียงกับอาคารจริงมากที่สุดเพื่อใช้เป็นตัวแทนของอาคารจริงเป็นสภาพอาคารที่ถูกจำลองไว้ในคอมพิวเตอร์ (เอกสารประกอบการอบรมเชิงปฏิบัติการ, 2555)

### 2.1.5 เสนอแนวทางในการปรับปรุงรูปแบบอาคารกรณีศึกษา

เสนอแนวทางในการปรับปรุงรูปแบบของอาคารที่เป็นไปได้ให้เกิดการประหยัดพลังงานโดยวิธีการที่มีประสิทธิภาพ และทำการวิเคราะห์การใช้พลังงาน ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ BEC

## 3. ผลการวิเคราะห์การใช้พลังของอาคาร

จากการคำนวณหาค่าการใช้พลังงานของอาคารกรณีศึกษา การส่งผ่านความร้อนของตัวอาคาร การใช้พลังงานในระบบไฟฟ้าแสงสว่าง การใช้พลังงานในระบบปรับอากาศและการใช้พลังงานรวมของอาคาร โดยใช้โปรแกรม BEC โดยการป้อนค่าในโหมดของ ระบบกรอบอาคาร ระบบแสงสว่าง ระบบปรับอากาศ ระบบอื่น ๆ ให้ค่าดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ระบบกรอบอาคาร

รายการ	ผลการวิเคราะห์ (W/m <sup>2</sup> )	ค่ามาตรฐานขั้นต่ำ (W/m <sup>2</sup> )
ค่า OTTV	56.421	50
ค่า RTTV	4.399	15

จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม BEC พบว่าตัวอาคารมีค่าถ่ายเทความร้อนผ่านกรอบอาคารที่ไม่ผ่านตามมาตรฐานที่กำหนดในพระราชบัญญัติฯ มีค่าความต่างอยู่ที่ 6.421W/m<sup>2</sup> ส่วนหลังคาผ่านตามมาตรฐานที่กำหนด

**ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า**

รายการ	ผลการวิเคราะห์ (W/m <sup>2</sup> )	ค่ามาตรฐานขั้นต่ำ (W/m <sup>2</sup> )
การใช้พลังงานไฟฟ้า	8.167	14

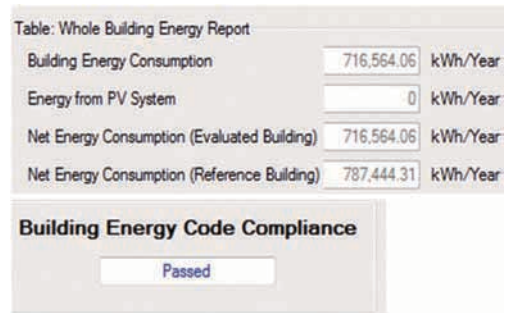
ส่วนของระบบไฟฟ้าแสงสว่างมีการใช้ หลอดและบัลลาสต์ ที่มีประสิทธิภาพสูง การใช้พลังงานของระบบไฟฟ้าแสงสว่างเฉลี่ย 8.167W/m<sup>2</sup> มีค่าน้อยกว่ามาตรฐานที่ 14W/m<sup>2</sup> ทำให้ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานขั้นต่ำมาก ดังนั้น จึงผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานขั้นต่ำที่กำหนด

**ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ระบบปรับอากาศ**

เครื่องปรับอากาศแยกส่วน	การใช้พลังงาน	ประสิทธิภาพ COP/2.82
48.00k Btu/h	7.99 kW	1.805
36.00k Btu/h	8.2 kW	1.272
24.00k Btu/h	8.55 kW	0.822
40.00k Btu/h	8.29 kW	1.336
16.00k Btu/h	7.89 kW	0.594
30.00k Btu/h	7.89 kW	0.594

ในส่วนของระบบปรับอากาศมีการวิเคราะห์เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนโดยการสุ่มตัวอย่างตามขนาดต่างๆ จำนวน 6 เครื่อง จากจำนวนเครื่องปรับอากาศทั้งหมด 101 เครื่องพบว่าเครื่องปรับอากาศมีประสิทธิภาพค่า COP ต่ำกว่ามาตรฐาน 2.82 ทุกเครื่องโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 1.805 - 0.594 การใช้พลังงานรวมของอาคาร

โดยการใช้โปรแกรม BEC ผลการวิเคราะห์ผ่านเกณฑ์มาตรฐานจากอาคารอ้างอิง



**รูปที่ 3 ผลการวิเคราะห์การใช้พลังงานรวมของอาคาร**

สรุปแล้วอาคารอาคารเฉลิมพระเกียรติ 55 พรรษา สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ มีส่วนที่ไม่ผ่านเกณฑ์ 2 ส่วนคือ กรอบอาคารและระบบปรับอากาศมีการใช้พลังงานรวมเท่ากับ 716,564.06 kWh/Year ดังนั้น การใช้พลังงานรวมในอาคาร จึงมีค่าน้อยกว่าอาคารอ้างอิง 787,444.31 kWh/Year ซึ่งผ่านเกณฑ์การใช้พลังงานโดยรวมของอาคารในกฎกระทรวงจึงได้ดำเนินการปรับปรุงส่วนที่ไม่ผ่านเกณฑ์และเปลี่ยนหลอดไฟจากหลอดฟลูออเรสเซนต์เป็น T5 ทั้งหมด เพื่อประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

**4. แนวทางการปรับปรุง**

จากการคำนวณการใช้พลังงานของอาคารจากโปรแกรม BEC พบว่า มีส่วนที่ไม่ผ่านเกณฑ์ 2 ส่วนคือ กรอบอาคารและระบบปรับอากาศ จึงได้ดำเนินการปรับปรุงส่วนที่ไม่ผ่านเกณฑ์และเปลี่ยนหลอดไฟจากหลอดฟลูออเรสเซนต์เป็น T5 ทั้งหมดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ดังนี้

1. ส่วนของกรอบอาคาร ปรับปรุงเฉพาะในส่วนของแผงบังแดด จากเดิมที่ทำมุม 0 องศาขนานกับพื้น ปรับให้ได้ 45 องศาเพื่อป้องกันแดด

30 แนวทางการตรวจสอบและวิเคราะห์อาคารเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้า กรณีศึกษาอาคารเฉลิมพระเกียรติ 55 พรรษา สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี สจล. พิมพ์ภา จินดากร และ ศุทธา ศรีเผด็จ

ส่องเข้าตัวอาคารแต่สามารถมองเห็นทัศนียภาพด้านนอกได้ (Olgay,1967)

2. ระบบปรับอากาศ เปลี่ยนเครื่องปรับอากาศ ใหม่เนื่องจากการใช้งานมากกว่า 10 ปี

## 5. ผลการปรับปรุง

จากการคำนวณหาค่าการใช้พลังงานของอาคาร การส่งผ่านความร้อนของตัวอาคาร การใช้พลังงานในระบบไฟฟ้าแสงสว่าง การใช้พลังงานในระบบปรับอากาศและการใช้พลังงานรวมของอาคาร โดยใช้โปรแกรม BEC ให้ผลการตรวจประเมินค่าการถ่ายเทความร้อนรอบอาคาร และหลังการรวมถึงการใช้พลังงานในระบบต่างๆ ที่ปรับปรุงในอาคาร แสดงในตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ระบบรอบอาคาร

รายการ	ผลการวิเคราะห์ (W/m <sup>2</sup> )	ค่ามาตรฐานขั้นต่ำ (W/m <sup>2</sup> )
ค่า OTTV	49.262	50
ค่า RTTV	4.399	15

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า

รายการ	ผลการวิเคราะห์ (W/m <sup>2</sup> )	ค่ามาตรฐานขั้นต่ำ (W/m <sup>2</sup> )
การใช้พลังงานไฟฟ้า	4.331	14

ในส่วนของระบบปรับอากาศเมื่อปรับปรุง เปลี่ยนเครื่องปรับอากาศใหม่ตามข้อเสนอแนะ เครื่องปรับอากาศมีประสิทธิภาพ ค่า COP มีค่าตามมาตรฐาน 2.82 ทุกเครื่อง

ผลการปรับปรุงตามมาตรการต่างๆ ได้ผล การใช้พลังงานของอาคารเปลี่ยนแปลง ดังนี้

Building Energy Consumption	391,887.40	kWh/Year
Energy from PV System	0	kWh/Year
Net Energy Consumption (Evaluated Building)	391,887.40	kWh/Year
Net Energy Consumption (Reference Building)	620,394.21	kWh/Year

**Building Energy Code Compliance**

Passed

รูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์การใช้พลังงานรวมของอาคาร

ซึ่งโดยสรุปแล้วอาคารเฉลิมพระเกียรติ 55 พรรษาสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ มีการใช้พลังงานรวมเท่ากับ 391,887.40 kWh/Year ดังนั้นการใช้พลังงานรวมในอาคารมีการใช้พลังงานน้อยกว่าเดิมที่ผ่านเกณฑ์ในครั้งแรกค่อนข้างมากจึงมีค่าน้อยกว่าอาคารอ้างอิง 620,394.21 kWh/Year ซึ่งผ่านเกณฑ์การใช้พลังงานโดยรวมของอาคารในกฎกระทรวง กำหนดประเภท หรือขนาดของอาคารและมาตรฐานหลังเกณฑ์ และวิธีการในการออกแบบเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2552 ค่าการใช้พลังงานรวมของอาคารก่อนปรับปรุงและหลังจากปรับปรุงแล้ว พบว่าค่าการใช้พลังงานลดลงถึง 324,676.66 kWh/Year เป็นจำนวนเงิน 1,444,808 บาท/ปี จากการลงทุน 6,575,620 บาท แยกเป็นระบบปรับอากาศ 5,467,000 บาท ระบบไฟฟ้า 197,820 บาท แผงบังแดด 910,800 บาทระยะเวลาคืนทุน 4.5 ปี

## 6. สรุปผลการศึกษา

การเสนอแนวทางการปรับปรุงอาคารเฉลิมพระเกียรติ 55 พรรษา สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีศักยภาพในการปรับปรุงอาคารได้และจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ BEC เพื่อตรวจสอบผลการปรับปรุงตาม

มาตรการต่าง ๆ สามารถดำเนินการได้ผลอย่าง  
น่าพอใจจึงเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยเพื่อ  
เป็นประโยชน์กับสถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณ  
ทหารลาดกระบัง และสถานศึกษาอื่น ๆ

### รายการอ้างอิง

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.  
(2555). เอกสารประกอบการอบรมเชิงปฏิบัติ  
การตรวจสอบประเมินอาคารที่จะก่อ-  
สร้างหรือดัดแปลงเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน  
ตามกฎหมาย. กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.  
ศุทธา ศรีเฟด็จ. (2551). กฎหมายอนุรักษ์พลัง-  
งานในอาคารฉบับใหม่. วารสารวิชาการคณะ  
สถาปัตยกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระ-  
จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 12(1), 1-8  
Olgay, V. (1967). *Design with climate: Biocli-  
matic approach to architectural region-  
alism*. New Jersey: University Press.

# การพัฒนาวัสดุพอร์นชุ่มน้ำสำหรับลดอุณหภูมิอากาศ

## Development of Water Soaked Porous Media for Air Temperature Reduction

สุขุม แส่นแก้วทอง<sup>1</sup> และ ผศ.ดร. สูดปรกรณ์ สูดประเสริฐ<sup>2</sup>

Sukhum Sankaewthong<sup>1</sup> and Asst. Prof. Sudaporn Sudprasert, Ph.D.<sup>2</sup>

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

E-mail: sukhumphed@gmail.com<sup>1</sup>, sudaporn@ap.tu.ac.th<sup>2</sup>

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปการพัฒนาวัสดุพอร์นชุ่มน้ำที่สามารถใช้ลดอุณหภูมิอากาศ แบบไม่ใช้พลังงาน (passive method) โดยการระเหยน้ำทางตรง วิธีการวิจัยประกอบด้วยการทดลองควบคุมรูพอร์น (pore of porous materials) ซึ่งถือว่าเป็นตัวแปรที่สำคัญในงานวิจัยนี้ แท่งวัสดุพอร์นที่ผลิตขึ้นมาใหม่นี้ จะควบคุมความพอร์นโดยการควบคุมส่วนผสมอินทรีย์วัตถุ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้แกลบเป็นตัวแปรต้นในการผลิตวัสดุพอร์นเนื่องจากแกลบเป็นอินทรีย์วัตถุที่มีความสามารถในการอุ้มน้ำสูง และสามารถทำได้ง่ายตามท้องถิ่น จึงได้นำวัสดุดังกล่าวมาประยุกต์ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตวัสดุพอร์น ซึ่งกระบวนการวิจัยจะมีการทดลอง 2 กระบวนการหลัก คือ การควบคุมอัตราส่วนของแกลบ และการควบคุมขนาดของแกลบตามลำดับ โดยความพอร์นและช่องว่างของแกลบหากมีมากจะส่งผลให้วัสดุดูดซึมน้ำได้ดี แต่หากความพอร์นมีมากจะทำให้ความทนทานของวัสดุน้อยลง ในงานวิจัยจึงได้เลือกใช้แกลบขนาดละเอียดกลาง เป็นส่วนผสมกับอินทรีย์วัตถุอื่นๆ เนื่องจากการผสมแกลบขนาดละเอียดกลางจะทำให้มีความพอร์นและช่องว่างที่มากกว่าแกลบขนาดละเอียดมากทำให้สามารถดูดซึมน้ำได้ดีกว่า ในขณะที่เดียวกันการผสมแกลบขนาดละเอียดกลางจะทำให้มีความพอร์นที่น้อยกว่าแกลบหยาบ จึงทำให้มีความทนทานมากกว่า เป็นผลทำให้เลือกใช้แกลบขนาดกลางเพราะคุณสมบัติทั้งด้านการดูดซึมน้ำและความคงทนที่ดี สำหรับแนวทางการนำไปปรับประยุกต์ใช้กับงานสถาปัตยกรรม เช่น กรอบอาคาร (façade) และพื้นที่สวน เป็นต้น

### Abstract

This research focuses on development of a new porous material that can reduce air temperature within a space by water absorption and direct evaporation. The procedures consist of controlling the rice husk ingredients in the mixture and variation of ingredients in order to have required porosity. The rice husk is the organic material with the ability of high water absorption. This research consists of two processes, control the ratios and sizes of rice husk. The porosity of the husk and the gap has much to contribute to the material absorbing water. However, if there is a lot of porosity, the material durability would be less. Therefore, medium-sized husk

was used in the research to make the porosity and size of the gap to be more than small husk resulting in much better ability to absorb water. Meanwhile, mixture of medium-sized husk will make it less porous than rough husk resulting in more durability as a result, medium-sized husk is used for it both water absorption and good durability features. The results from the research is a product can be applied to the building façade, public and semi-public areas.

**คำสำคัญ (Keywords):** วัสดุพรุน (Porous Media), แรงดันคาпилลารี (Capillary Force), การทำความเย็นด้วยการระเหย (Evaporative Cooling), การดูดซึมน้ำ (Water Absorption), ความพรุน (Porosity)

### 1. ความเป็นมาของปัญหา

สำหรับวิธีการลดความร้อนเข้าสู่ตัวอาคารหรือภายในบ้านพักอาศัยสามารถทำได้หลากหลายวิธี การสร้างสภาพแวดล้อมรอบบ้านให้เย็นโดยมีสวนหรือบ่อน้ำที่ช่วยบรรเทาความร้อน การวางอาคารให้ถูกทิศทาง หรือการเลือกใช้วัสดุหรือเทคโนโลยีที่ลดความร้อนให้กับอาคาร การใช้เครื่องปรับอากาศเป็นที่ยอมรับมากที่สุดในปัจจุบัน โดยจากสถิติตลาดเครื่องปรับอากาศปี 2556 จะโตถึงร้อยละ 21 ตามการเติบโตของคอนโดมิเนียมและสภาพอากาศร้อน (ศูนย์วิจัยกสิกรไทย, 2557) นั่นหมายถึง การใช้พลังงานไฟฟ้าในอนาคตมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามปัจจัยดังกล่าว ด้วยสาเหตุข้างต้นจึงทำให้ผู้วิจัย สนใจที่จะทำนวัตกรรมเพื่อการลดความร้อนเข้าสู่ตัวอาคาร หรือพื้นที่สาธารณะด้วยระบบพาสซีฟ (passive) สำหรับแนวทางการระเหยของน้ำถือเป็นอีกหนึ่งวิธีแบบพาสซีฟที่ช่วยในการลดความร้อนภายในห้อง โดยการลดความร้อนด้วยระบบการระเหยน้ำในปัจจุบันแบ่งออกเป็นการระเหยน้ำทางตรง (direct evaporative cooling) และการระเหยน้ำทางอ้อม (in-direct evaporative cooling) ในกรณีนี้ได้ศึกษาวิธีพัฒนานวัตกรรมเพื่อเพิ่มประ-

สิทธิภาพในการทำความเย็นให้กับอาคารหรือบ้านพักอาศัย โดยการใช่วัสดุพรุนที่ดูดซึมน้ำไว้ในตัว (porous materials) กล่าวคือ มีพื้นผิวที่ระเหยน้ำให้มีอุณหภูมิลดลง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการลดอุณหภูมิเฉลี่ย (mean radiant temperature) พื้นผิวที่มีการระเหยจะช่วยลดอุณหภูมิอากาศที่จะเข้าสู่พื้นที่ในบ้าน ทำให้การใช้งานพื้นที่อยู่ใกล้เคียงกับสภาวะสบายที่มนุษย์สามารถยอมรับได้

### 2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซึมน้ำในวัสดุพรุน
- 2.2 เพื่อศึกษาความพรุน (porosity) ของวัสดุที่มีผลต่อการดูดซึมน้ำ

### 3. ขอบเขตงานวิจัย

ศึกษาและเก็บข้อมูลจากการทดลองในห้องทดลอง เนื่องจากในสภาวะจำลองสามารถควบคุมตัวแปรให้มีค่าคงที่หรือเปลี่ยนแปลงตามที่ต้องการ เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นโดยมีขอบเขตการวิจัย ดังนี้

3.1 ศึกษาความสามารถในการดูดซึมน้ำของวัสดุพูน และอุณหภูมิผิวของวัสดุพูน

3.2 ศึกษาความพูนของวัสดุ ที่มีผลต่อการดูดซึมน้ำ โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเด็นคือ ศึกษาอัตราส่วนของแกลบ และขนาดความละเอียดของแกลบ

3.3 ศึกษาและทดลองปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการลดอุณหภูมิอากาศของระบบการระเหยน้ำทางตรงในห้องทดลอง

3.4 นำเสนอแนวทางการไปประยุกต์ใช้กับงานสถาปัตยกรรม

#### 4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

5.1 เพื่อทราบถึงตัวแปรที่มีผลต่อการดูดซึมน้ำของวัสดุพูน และตัวแปรที่ส่งผลต่อการระเหยของน้ำและประสิทธิภาพการลดอุณหภูมิอากาศ

5.2 เป็นแนวทางในการนำนวัตกรรมดังกล่าวไปประยุกต์ใช้กับอาคาร เช่น การนำไปใช้กับกรอบอาคาร (façade) เพื่อการลดความร้อนที่เข้าสู่อาคาร

5.3 เป็นแนวทางการนำไปพัฒนางานวิจัยเชิงนวัตกรรมต่อของผู้ที่สนใจทำเรื่องดังกล่าว

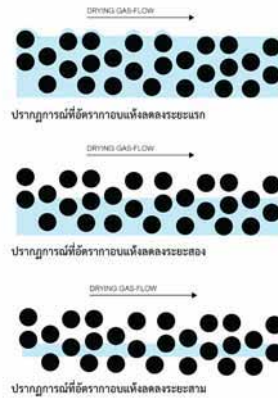
5.4 เป็นประโยชน์สำหรับผู้ประกอบการ ที่สนใจนำไปพัฒนาต่อยอด

#### 5. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**5.1 แรงยกตัว (capillarity force)** เกิดจากส่วนของผิวของของเหลวที่สัมผัสกับของแข็ง ซึ่งทำให้เกิดแรงยกตัวขึ้นกระบวนการแรงยกตัวที่เกิดจากแรงตึงผิวของน้ำ จะดึงดูน้ำไว้ในสภาพที่น้ำเคลื่อนตัวไปทิศตรงข้ามแรงดึงดูดของโลก โดยการอาศัยการแทรกตัวตามช่องว่างเล็กๆ ของวัสดุซึ่งน้ำจะแปรผันตามขนาดของท่อ ถ้าท่อของ

วัสดุเล็กน้ำก็จะยกตัวได้สูงมากขึ้นซึ่งหลักการดังกล่าวจะปรากฏกับวัสดุพูนเมื่อดูดซึมน้ำ

**5.2 พฤติกรรมของของไหลในวัสดุพูนเมื่อโดนความร้อน** (รูปที่ 1) จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมของไหลในวัสดุแบบง่าย ๆ 3 กระบวนการคือ ขั้นที่ 1 เมื่อวัสดุได้ดูดซึมน้ำเข้าไปโดยกระบวนการแบบแรงยกตัว (Capillarity action) เมื่อวัสดุเริ่มอึมน้ำแล้วจะเกิดการระเหยของน้ำออกจากตัววัสดุ ตามรูปแบบขั้นที่ 2 และจนถึงรูปแบบขั้นตอนที่ 3 ซึ่งวัสดุพูนเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า ค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content) และจะเป็นวงจรที่วนกลับไปแบบขั้นตอนที่ 1



รูปที่ 1 แสดงพฤติกรรมของของไหลในวัสดุพูน 3 ขั้นตอน เมื่อวัสดุได้รับความร้อน

#### 6. ระเบียบวิธีวิจัย

กระบวนการทดลองในงานวิจัย คือ การทดสอบประสิทธิภาพการดูดน้ำของวัสดุพูน โดยการควบคุมขนาดความพูน (POROSITY) ซึ่งขั้นตอนที่ใช้ในการทดลองมีดังต่อไปนี้

6.1 เปรียบเทียบอัตราส่วนของแกลบที่มีขนาดเท่ากันแต่ มีอัตราส่วนต่างกันสำหรับกระบวนการนี้จะใช้แกลบหยาบซึ่งคือขนาดปกติ

(ขนาดโดยเฉลี่ย 0.75-0.90 mm) โดยทำการสังเกตว่าอัตราส่วนแกลบเท่าใดจึงมีคุณสมบัติทั้งทางความคงทน และทางด้านการดูดซึมน้ำที่เหมาะสมที่สุด โดยผู้วิจัยจะเลือกอัตราส่วนที่ดีที่สุดของแ่งวัสดุพูน โดยคำนึงถึงคุณสมบัติทั้งทางความคงทน และทางด้านการดูดซึมน้ำ เพื่อนำไปทดลองในกระบวนการทดลองขั้นต่อไปคือการแยกความละเอียดของแกลบในระดับความละเอียด 3 ระดับ ได้แก่ ความละเอียดมาก ละเอียดกลาง และละเอียดน้อย

6.2 คัดเลือกอัตราส่วนจากข้อ 1 ที่มีคุณสมบัติตามต้องการ คือ อัตราส่วนแกลบ 3 ส่วนเพื่อนำมาควบคุมความพูน โดยใช้แกลบที่มีความละเอียดต่างกัน 3 แบบคือ แบบละเอียดมาก (ขนาดโดยเฉลี่ยน้อยกว่า 0.05 mm) แบบละเอียดกลาง (ขนาดโดยเฉลี่ย 0.25-0.50 mm) และแบบหยาบ (ขนาดโดยเฉลี่ย 0.75-0.90 mm) เป็นส่วนผสม ผู้วิจัยจะเลือกความละเอียดของแกลบที่ดีที่สุดของแ่งวัสดุพูน โดยคำนึงถึงคุณสมบัติทางความคงทน และทางด้านการดูดซึมน้ำ เพื่อนำไปทดลองในระบบที่ถูกออกแบบไว้เพื่อทดสอบอุณหภูมิหลังผ่านวัสดุ

6.3 นำวัสดุพูนที่คัดเลือกและศึกษามาในกระบวนการที่ 1 มาพัฒนาวัสดุต่อในกระบวนการที่ 2

6.4 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง เพื่อนำไปเสนอแนวทางในการประยุกต์ใช้ทางสถาปัตยกรรม

## 7. การกำหนดตัวแปรในงานวิจัย

กำหนดตัวแปรในการวิจัยดังต่อไปนี้

7.1 ตัวแปรต้น ได้แก่

7.1.1 อัตราส่วนของแกลบ

7.1.2 ความละเอียดของแกลบ

7.2 ตัวแปรตาม ได้แก่

7.2.1 ระดับของการดูดซึมน้ำของวัสดุพูน (เซนติเมตร)

7.2.2 ลักษณะความพูนของวัสดุ (สังเกตจากการใช้วิธีส่อง SEM)

7.3 ตัวแปรควบคุม ได้แก่

7.3.1 ส่วนผสมที่นำมาใช้ผลิตวัสดุพูน

7.3.2 ปริมาณน้ำตั้งต้น

7.3.3 ปริมาณน้ำที่เติมเข้าไป

7.3.4 อยู่ในสภาวะแวดล้อมเดียวกัน ได้แก่ ความเร็วลม, อุณหภูมิ

7.3.5 รูปทรงของวัสดุพูน

7.3.6 ขนาดของวัสดุพูน (หน้าตัด/เส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุ)

## 8. วัสดุที่ใช้ทดลองวิจัย

แบ่งการผลิตวัสดุออกเป็น 2 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการที่ 1 คือ การทดลองอัตราส่วนหรือปริมาณของแกลบ และขนาดของแกลบจำนวน 6 ชุด (รูปที่ 4) ส่วนกระบวนการที่ 2 คือ ขั้นตอนการพัฒนาวัสดุจากกระบวนการที่ 1 (รูปที่ 6) โดยส่วนผสมหลักของทั้ง 2 กระบวนการประกอบไปด้วย 1) ดินแดง 2) ทรายละเอียด 3) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 4) แกลบ (แกลบหยาบขนาดโดยเฉลี่ย 0.75-0.90 mm, แกลบละเอียดกลาง ขนาดโดยเฉลี่ย 0.25-0.50 mm และแกลบละเอียดมาก ขนาดโดยเฉลี่ย น้อยกว่า 0.05 mm) และ 5) น้ำสะอาด

**8.1 กระบวนการที่ 1:** วิเคราะห์อัตราส่วนที่เหมาะสมของแกลบโดยใช้แกลบหยาบเป็นส่วนผสมหลัก ซึ่งใช้ส่วนผสมคือ ดินแดง : ทรายละ-

เอียง : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : แกลบหยาบ :  
 น้ำสะอาด (ตารางที่ 1) จะแสดงชุดวัสดุที่ได้เลือก  
 นำไปพัฒนาต่อเพื่อหาขนาดของแกลบที่เหมาะสม  
 ซึ่งคือวัสดุชุดที่ 2 และ (ตารางที่ 2) จะแสดง  
 รายละเอียดของส่วนผสมต่าง ๆ ในวัสดุชุดที่ 2

**ตารางที่ 1** สรุปผลอัตราส่วนที่เหมาะสม

วัสดุชุดที่	อัตราส่วน (ถึงผสมขนาดเล็ก)	ชุดวัสดุที่เลือก
1	4:2:1:2:1/2	
2	4:2:1:3:1/2	๑
x	4:2:1:4:1/2	

(หมายเหตุ: วัสดุชุดที่ X คือ วัสดุที่ไม่ได้นำมาทดสอบ  
 เนื่องจากคุณสมบัติด้านความคงทนไม่เหมาะสม)

**ตารางที่ 2** แสดงส่วนผสมวัสดุพูนชุดที่ 2

ส่วนผสม	% โดยน้ำหนัก (%)	อัตราส่วน (ถึงผสมขนาดเล็ก)
ดินแดง	54.00	4
ทรายละเอียด	30.19	2
ปูนปอร์ต แลนด์	10.45	1
แกลบหยาบ	3.95	3
น้ำสะอาด	1.38	1/2

**8.2 กระบวนการที่1:** วิเคราะห์ขนาดที่  
 เหมาะสมของแกลบซึ่งใช้แกลบที่ต่างกัน 3 ขนาด  
 เป็นส่วนผสม โดยวัสดุชุดที่ 4 ใช้แกลบละเอียด  
 กลาง ชุดที่ 3, 5 ใช้แกลบละเอียดมาก และชุดที่  
 6 ใช้แกลบหยาบ (ตารางที่ 3) จะแสดงชุดวัสดุที่  
 ได้เลือกนำไปพัฒนาต่อในกระบวนการที่ 2 เพื่อ  
 ทำให้วัสดุเป็นแท่งเดียวกันไม่มีรอยต่อ ซึ่งคือวัสดุ  
 ชุดที่ 4 และ (ตารางที่ 4) จะแสดงรายละเอียด  
 ของส่วนผสมต่าง ๆ ในวัสดุชุดที่ 4

**ตารางที่ 3** สรุปผลขนาดของแกลบที่เหมาะสม

วัสดุชุดที่	อัตราส่วน (ถึงผสมขนาดเล็ก)	ชุดวัสดุที่เลือก
4	4:2:1:3:1/2	๑
3,5	4:2:1:3:1/2	
6	4:2:1:3:1/2	

**ตารางที่ 4** แสดงส่วนผสมวัสดุพูนชุดที่ 4

ส่วนผสม	% โดยน้ำหนัก (%)	อัตราส่วน (ถึงผสมขนาดเล็ก)
ดินแดง	50.90	4
ทรายละเอียด	28.46	2
ปูนปอร์ตแลนด์	9.85	1
แกลบละเอียดกลาง	9.46	3
น้ำสะอาด	1.30	1/2

**8.3 กระบวนการที่2:** ขั้นตอนการพัฒนา  
 วัสดุจากกระบวนการที่ 1 เพื่อให้วัสดุเป็นแท่ง  
 เดียวกันแบบไม่มีรอยต่อ (รูปที่ 6) โดยใช้ส่วนผสม  
 หลักคือแกลบขนาดกลาง (ขนาดโดยเฉลี่ย  
 0.25-0.50 mm) และได้ลองเพิ่มส่วนผสม คือ  
 เวย์ร์มิคูไลท์ (ขนาดโดยเฉลี่ย 0.90-1.10 mm)  
 และเพอร์ไลท์ (ขนาดโดยเฉลี่ยน้อยกว่า 0.05  
 mm) ลงไปในวัสดุแท่งที่ 1 และแท่งที่ 2 ตาม  
 ลำดับ เพื่อเป็นการทดสอบว่าหากลองนำวัสดุ  
 ที่มีความพูนสูงในตัวเองอยู่แล้วมาผสม จะ  
 สามารถเพิ่มอัตราการดูดน้ำให้กับตัววัสดุได้มาก  
 น้อยเพียงใด

โดยส่วนผสมของวัสดุแต่ละชุดประกอบด้วย  
**วัสดุชุดที่1:** ดินแดง: ทรายละเอียด: ปูนซีเมนต์  
 ปอร์ตแลนด์: แกลบละเอียดกลาง: เวย์ร์มิคูไลท์:  
 น้ำ

**วัสดุชุดที่2:** ดินแดง: ทรายละเอียด: ปูนซีเมนต์  
 ปอร์ตแลนด์: แกลบละเอียดกลาง: เพอร์ไลท์: น้ำ

**วัสดุชุดที่3:** ดินแดง: ทรายละเอียด: ปูนซีเมนต์  
 ปอร์ตแลนด์: แกลบละเอียดกลาง: น้ำ

วัสดุชุดที่ 4: ดินแดง: ทรายละเอียด: ปูนซีเมนต์  
ปอร์ตแลนด์: แกลบละเอียดกลาง: น้ำ

(ตารางที่ 5) จะแสดงชุดวัสดุที่ได้เลือกนำไปทดสอบคุณสมบัติหลังผ่านวัสดุต่อไป รวมถึงเสนอแนวทางการนำไปปรับประยุกต์ใช้กับงานสถาปัตยกรรม ซึ่งคือวัสดุชุดที่ 4 และ (ตารางที่ 6) จะแสดงรายละเอียดของส่วนผสมต่าง ๆ ในวัสดุชุดที่ 4

ตารางที่ 5 สรุปผลวัสดุที่เลือกเพื่อนำไปทดลองคุณสมบัติหลังผ่านวัสดุ

วัสดุชุดที่	ชุดวัสดุที่เลือก
1	
2	
3	
4	◎

ตารางที่ 6 แสดงส่วนผสมวัสดุชุดที่ 4

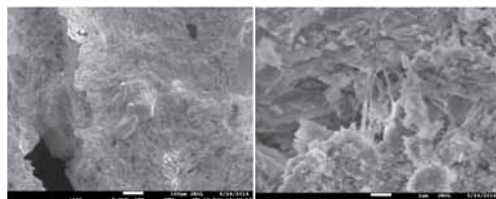
ส่วนผสม	% โดยน้ำหนัก
ดินแดง	40-45
ทรายละเอียด	30-35
ปูนปอร์ตแลนด์	10-15
แกลบขนาดกลาง	10-15
น้ำสะอาด	1-5

โดยวัสดุที่ถูกเลือกในกระบวนการที่ 1 ด้านการวิเคราะห์อัตราส่วนของแกลบ คือ วัสดุชุดการทดลองที่ 2 และด้านการวิเคราะห์อนุภาคของแกลบ คือ วัสดุชุดการทดลองที่ 4 เนื่องจากว่ามีคุณสมบัติที่เหมาะสมทั้งด้านการดูดซึมน้ำและความคงทน (ซึ่งสังเกตจากการสึกกร่อนระหว่างการทำทดลองดูดน้ำ) จึงได้นำข้อมูลจากกระบวนการที่ 1 มาพัฒนาในกระบวนการที่ 2 ซึ่งวัสดุชุดการทดลองที่ 4 คือวัสดุที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำไปทดสอบใช้งาน เพื่อศึกษาคุณสมบัติหลังผ่านวัสดุ และนำไปออกแบบด้านการใช้งานเพื่อไปปรับประยุกต์ใช้กับตัวงานสถาปัตยกรรม

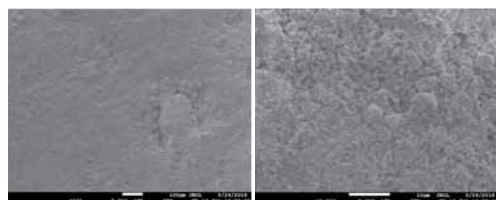
## 9.ผลการทดลอง

### 9.1 การวิเคราะห์วัสดุจาก SEM

สามารถตั้งข้อสรุปเบื้องต้นได้ว่า ในกระบวนการที่ 2 ในช่วงการพัฒนาวัสดุ (รูปที่ 2) อินทรีย์วัตถุที่ใส่ไปคือแกลบละเอียดกลาง จะเป็นตัวแปรในการทำให้วัสดุเกิดโพรง หรือช่องว่างขึ้นภายในได้มากกว่ากรณีที่ไม่ใส่แกลบละเอียดมากลงไป (รูปที่ 3) โดยความพรุนและช่องว่างของแกลบหากมีมากจะส่งผลให้วัสดุดูดซึมน้ำได้ดี แต่หากความพรุนมีมากจะทำให้ความทนทานของวัสดุน้อยลง ในงานวิจัยจึงได้เลือกใช้แกลบขนาดละเอียดกลาง เป็นส่วนผสมกับอินทรีย์วัตถุอื่น ๆ เนื่องจากการผสมแกลบขนาดละเอียดกลาง จะทำให้มีความพรุนและช่องว่างที่มากกว่าแกลบขนาดละเอียดมากทำให้สามารถดูดซึมน้ำได้ดีกว่า ในขณะที่เดียวกันการผสมแกลบขนาดละเอียดกลางจะทำให้มีความพรุนที่น้อยกว่าแกลบหยาบ จึงทำให้มีความทนทานมากกว่าเป็นผลทำให้เลือกใช้แกลบขนาดกลางเพราะคุณสมบัติทั้งด้านการดูดซึมน้ำและความคงทนที่ดี



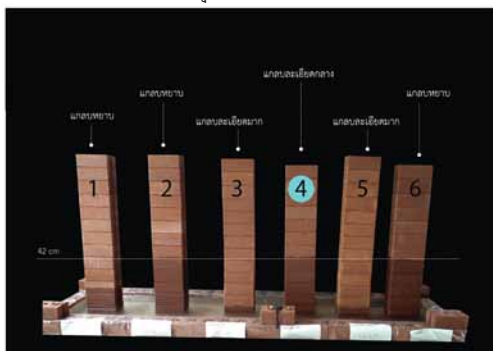
รูปที่ 2 พื้นผิวหน้าตัดของวัสดุชิ้นที่ 4 (กระบวนการที่ 2) ที่กำลังขยาย 100 เท่า และ 10,000 เท่า



รูปที่ 3 พื้นผิวหน้าตัดของวัสดุชิ้นที่ 3 (กระบวนการที่ 1) ที่กำลังขยาย 100 เท่า และ 2,000 เท่า

**9.2 ผลการทดลองวัสดุในการดูดซึมน้ำ**

ผลการทดลองในกระบวนการที่ 1 จะเป็น การทดลองปริมาตรของแกลบ และขนาดของ แกลบ เพื่อทดสอบว่าอัตราส่วนแกลบที่ใส่เข้าไป และขนาดของแกลบแบบไหนจะมีความเหมาะสมตรงกับความต้องการทางด้านความคงทน และการดูดซึมน้ำของวัสดุพูนมากที่สุด จากผล การทดลองเบื้องต้นในกระบวนการที่ 1 พบว่า วัสดุพูนแท่งที่ 4 (รูปที่ 4) ที่มีอัตราส่วน ดินแดง (50.90% โดยน้ำหนัก) + ทรายละเอียด (28.46% โดยน้ำหนัก) + ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (9.85% โดยน้ำหนัก) + แกลบละเอียดกลางขนาด 0.25-0.9 มิลลิเมตร (9.46 % โดยน้ำหนัก) น้ำ(1.30% โดยน้ำหนัก) มีความเหมาะสมในคุณสมบัติทาง ด้านความคงทน (บันทึกผลการทดลองสังเกตดู การสึกกร่อน) และการดูดซึมน้ำที่ค่อนข้างดี (วัด จากระดับความสูงที่วัสดุดูดน้ำ) จึงนำอัตราส่วน ดังกล่าวไปพัฒนาต่อในกระบวนการที่ 2 เพื่อให้ เกิดประสิทธิภาพสูงสุดทั้งด้านการดูดซึมน้ำและ ความคงทนของวัสดุ



รูปที่ 4 แสดงภาพการทดสอบการดูดซึมน้ำและความคงทนของอิฐประสานในอัตราส่วนและขนาดของแกลบต่างกันจำนวน6ชุดการทดลองในระยะเวลาทดลอง3วัน

จากกราฟ (รูปที่ 5) จะเห็นได้ว่าอัตราการดูดซึมน้ำที่ดีที่สุดคือ วัสดุพูนชุดที่ 6, 2 และ 4 ตามลำดับซึ่งมีความสูงเฉลี่ยของการดูดซึมน้ำของ

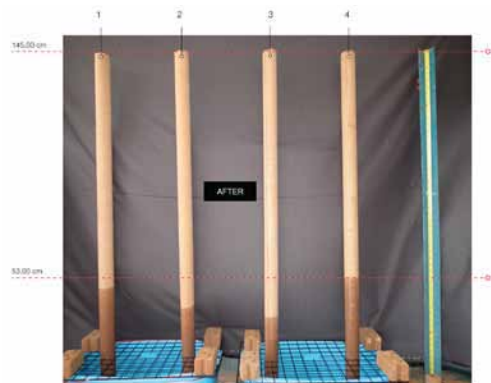
วัสดุจะอยู่ที่ 40-42 เซนติเมตร ส่วนวัสดุพูนชุดที่ 3 และ 5 มีอัตราการดูดซึมน้ำที่ต่ำที่สุดโดย ความสูงเฉลี่ยของการดูดซึมน้ำของวัสดุจะอยู่ที่ 3-4 เซนติเมตร และในส่วนของพฤติกรรมในการดูดซึมน้ำของวัสดุจากระยะเวลาการทดลอง 3 วัน จะเห็นได้ว่าในช่วง 1-9 ชั่วโมงแรก (6.00-14.00 น.) วัสดุจะมีอัตราการดูดซึมน้ำที่ค่อนข้างรวดเร็วและหลังจากนั้นจะขึ้นที่ล้นน้อย และเริ่มคงที่ในวันที่ 2 และ 3 แต่จะมีการระเหยของน้ำ ออกไปบางส่วนประมาณ 1-3 เซนติเมตรในช่วง เวลาประมาณ 11.00-19.00 น. แล้ววัสดุจะเริ่มดูดซึมน้ำขึ้นไปใหม่ในความสูงที่เท่าเดิมที่ตัววัสดุ เคยดูดขึ้นไป



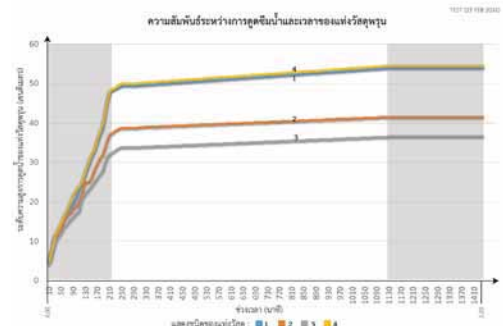
รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำของวัสดุพูนกับเวลาทดลองวันที่ 1-3 (2-4 มกราคม 2559)

ผลการทดลองในกระบวนการที่ 2 (รูปที่ 6) จะเป็นการทดลองประสิทธิภาพของขนาดของแกลบและสัดส่วนของแกลบที่เลือกมา รวมถึงการใช้วัสดุอื่นที่มีความพรุนสูงเข้ามาเป็นส่วนผสมเพื่อช่วยในการดูดซึมน้ำของวัสดุในงานวิจัยนี้วัสดุที่เพิ่มเข้ามาใหม่ในกระบวนการที่ 2 คือ เวอร์มิคูไลท์ (แท่งที่1) และ เพอร์ไลท์ (แท่งที่2) จากการทดลองดังกล่าวทำให้สามารถเลือกวัสดุเพื่อนำไปทดสอบในระบบที่ถูกออกแบบไว้คือ วัสดุพูนแท่งที่ 4 โดยมีส่วนผสมคือ ดินแดง (40-45% โดยน้ำหนัก) + ทรายละเอียด (30-35% โดยน้ำ

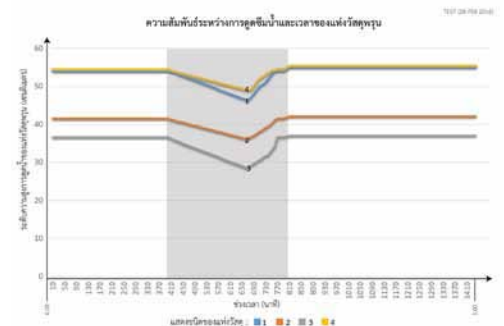
หนัก) + ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (10-15% โดยน้ำหนัก) + แกลบละเอียดกลางขนาด 0.25-0.9 มิลลิเมตร (10-15% โดยน้ำหนัก) + น้ำ (1-5 % โดยน้ำหนัก) เนื่องจากว่าวัสดุแห่งนี้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมทั้งด้านการดูดซึมน้ำ ความเบา และความคงทนที่ดี และจากกราฟ (รูปที่ 7 และ 8) การดูดซึมน้ำของวัสดุพูนทั้ง 4 แห่ง จะมีความสัมพันธ์กับเวลา กล่าวคือ วัสดุพูนทั้ง 4 แห่งมีแนวโน้มการดูดซึมน้ำอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 3 ชั่วโมงแรก (นาทิตี่ 5-210 ,ช่วงเวลา 06.00-08.00 น.) หลังจากนั้นจะมีการดูดซึมน้ำขึ้นเล็กน้อย 0.5-1 เซนติเมตร และจะคงที่ใน 6 ชั่วโมงหลัง (นาทิตี่ 1090-1440, ช่วงเวลา 0.00-5.00 น.) และเมื่อสังเกตจากกราฟจะเห็นได้ว่าในวันที่ 2 กราฟมีช่วงการแกว่งของการดูดน้ำในช่วงเวลา 12.00-18.00 น. (นาทิตี่ 400-800) เนื่องจากอุณหภูมิอากาศช่วงนั้นสูงจึงเป็นผลทำให้เกิดการระเหยของน้ำจากตัวถังวัสดุเกิดขึ้นมาก แล้วหลังจากนั้นตัววัสดุก็จะเริ่มดึงน้ำกลับขึ้นมา โดยวัสดุแห่งที่ 4 มีการดูดซึมน้ำได้ดีที่สุดซึ่งอยู่ในช่วง 50-54 เซนติเมตรโดยประมาณ รองมาจะเป็นวัสดุแห่งที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ



รูปที่ 6 แสดงภาพการทดสอบการดูดซึมน้ำและความคงทนของวัสดุพูนหลังการทดสอบ



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำของวัสดุพูนกับเวลาทดลองวันที่ 1 (27 กุมภาพันธ์ 2559)



รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำของวัสดุพูนกับเวลาทดลองวันที่ 2 (28 กุมภาพันธ์ 2559)

## 10. การนำไปประยุกต์ใช้ในงานสถาปัตยกรรม

สำหรับการนำนวัตกรรมดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในงานสถาปัตยกรรม สามารถนำเข้าไปใช้งานได้หลายพื้นที่ แต่จะแนะนำให้ใช้กับพื้นที่ที่กึ่งโล่งแจ้ง (semi - outdoor) เช่น เปลือกอาคาร บริเวณชานบ้านหรือแม้แต่พื้นที่ในสวน (รูปที่ 9 และ 10)

## 11. ข้อเสนอแนะ

12.1 การเลือกใช้รูปทรงของวัสดุที่มีพื้นผิวมากอาจจะช่วยลดอุณหภูมิอากาศได้ดีกว่าทรงกลม

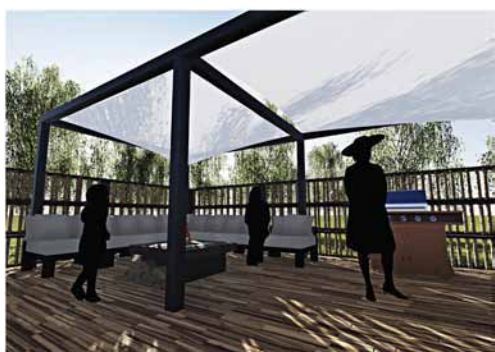
12.2 วัสดุพูนที่นำมาทดสอบหรือไปใช้งานควรเป็นเนื้อเดียวกันไม่ควรมีรอยต่อ เพราะจะมีผลต่อการดูดซึมของน้ำขึ้นไปในถัง วัสดุ ทำให้ไม่เห็นศักยภาพที่แท้จริงของวัสดุ

12.3 ควรมีการทดลองในสภาพแวดล้อมจริง เช่น กรณีที่มีแสงแดด และลมตามธรรมชาติ เป็นต้น เพื่อเป็นการทดสอบระบบที่แท้จริง

12.4 ในการประยุกต์ใช้งานจริงในอาคาร อาจจะมีการปรับเปลี่ยนจำนวนของถังวัสดุ ตามความเหมาะสมกับรูปแบบอาคารนั้นๆ



รูปที่ 9 แสดงการจำลองทัศนียภาพการนำนวัตกรรมไปใช้กับงานที่อยู่อาศัย (มุมมองจากภายนอก)



รูปที่ 10 แสดงการจำลองทัศนียภาพการนำนวัตกรรมไปใช้งานในพื้นที่สวนกลางแจ้ง

## รายการอ้างอิง

ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช. (2551). *พื้นฐานการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ*. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

มงคล ฟุ้งธนะกุล (2555). *การลดอุณหภูมิภายในอาคารโดยใช้การทำความเย็นแบบระเหย*. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เชียงใหม่

วัชรระ ยาวิวไซ. (2550). *การผลิตเซรามิกซิลิเกตรูพรุนสูงสำหรับปลูกพืช*. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัย เชียงใหม่.

ศูนย์วิจัยกสิกรรมไทย. (2557). *ตลาดเครื่องปรับอากาศปี 2556*. สืบค้นเมื่อวันที่ 30 ธันวาคม 2558, จาก <http://positioningmag.com/56390>

Green, D. J. (2001). *Processing porous ceramics, encyclopedia of materials: Science and technology* (edited by K. H. J. Buschow et al.), Elsevier Science, Oxford, UK.

He, J. (2011). *A design supporting simulation system for prediction and evaluating the cool microclimate creating effect of passive evaporation cooling wall*. Guangxi University, School of Civil Engineering

He, J. & Hoyano, A. (2011). *Experimental study of practical applications of a passive evaporative cooling wall with high water-soaking-up ability*. Guangxi University and Tokyo Institute of Technology.

He, J. & Hoyano, A. (2010). *Experimental study of cooling effects of a passive evaporative cooling wall constructed of porous ceramics with high water soaking-up ability*. Tokyo Institute of Technology.

# การศึกษาเชิงทดลองของพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังเบา ที่มีสารเปลี่ยนสถานะบรรจุแบบแมคโครแคปซูลเลตในเวลากลางวัน

## The Experimental Study of Thermal Behavior with Phase Change Material (PCM) Thermal Shield inside Lightweight Wall During the Daytime

แพรพรณ วัฒนวิเชียร<sup>1</sup> และ ผศ.ดร. สุดาภรณ์ สุดประเสริฐ<sup>2</sup>

Pearpran Wattanavichien<sup>1</sup> and Asst. Prof. Sudaporn Sudprasert, Ph.D.<sup>2</sup>

คณะสถาปัตยกรรมและการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

E-mail: pear.pearpran@gmail.com<sup>1</sup>, sudaporn@ap.tu.ac.th<sup>2</sup>

### บทคัดย่อ

งานวิจัยชิ้นนี้ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังเบาที่มีสารเปลี่ยนสถานะบรรจุแบบแมคโคร แคปซูลเลตในเวลากลางวัน โดยศึกษาอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของสารเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสมที่ใช้ใน ภูมิภาคเขตร้อนชื้น 3 ชนิด ได้แก่ SP26E SP29E และ SP31 และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุที่ เปลี่ยนแปลงจากค่ารังสีดวงอาทิตย์ และอุณหภูมิของอากาศ การศึกษานี้เป็นการศึกษาเชิงทดลองในห้องปรับอากาศ เวลา 08.00 - 20.00 น. ใช้ดวงโคมฮาโลเจนจำลองพลังงานแสงอาทิตย์ และรูปแบบผนังทดลองเป็น แบบระบบปิด ผลการทดลองพบว่าสารเปลี่ยนสถานะ SP31 มีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่เหมาะสมในการใช้งาน ในผนังเบาที่มีการปรับอากาศในเวลากลางวัน เนื่องจากมีการดูดซับพลังงานความร้อนโดยการเปลี่ยนสภาพจากของแข็งเป็นของเหลวในเวลากลางวันและคายความร้อนโดยการเปลี่ยนสภาพของเหลวเป็นของแข็งในเวลากลางคืนดีกว่าสารชนิดอื่น ส่งผลให้ผนังอาคารมีอุณหภูมิที่สม่ำเสมอในเวลากลางวัน และสามารถลดอุณหภูมิในผนังได้ 6 - 9 องศาเซลเซียสเมื่อเปรียบเทียบกับผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ ดังนั้นการนำสาร เปลี่ยนสถานะมาประยุกต์ใช้งานในอาคารที่มีการปรับอากาศในเวลากลางวันจึงเป็นวิธีการช่วยลดภาระความร้อนเข้าสู่อาคารที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่ง

### Abstract

Phase change material (PCM) has been recognized as one of the energy technologies in energy efficient and sustainability buildings. This research presents the results of an experimental study of thermal behavior of phase change material thermal shield (PCMTS) in air gap between the lightweight walls. The phase change material includes SP26E, SP29Eu, and SP31, which are claimed appropriate for reducing heat gain in office and commercial buildings in tropical climate. The experiment walls were exposed to solar radiation by using heat sources simulators during 8.00 a.m. - 8.00 p.m. in the experimental chamber. The results show that SP31 is an

appropriate PCM in application in the lightweight wall under tropical climate because it can delay the heat gain during daytime by absorbing solar energy into PCMTS and completely return to solid during nighttime. The peak temperatures in the interior wall were found reduced by 6 – 9 degrees Celsius when compared with a non-PCM lightweight wall. Therefore, the use of phase change material in daytime conditioning room can be considered as an effective way with lightweight wall to reduce building heat gain.

**คำสำคัญ (Keywords):** สารเปลี่ยนสถานะ (Phase Change Material (PCM)), การเก็บพลังงานความร้อน (Thermal Energy Storage), พหุติกรรมการถ่ายเทความร้อนในผนัง (Wall Heat Transfer)

## 1. บทนำ

ผนังอาคารมีอิทธิพลต่อภาระการทำเย็นในอาคารโดยผนังอาคารดูดซับพลังงานจากรังสีแสงอาทิตย์ไว้ในลักษณะของความร้อนสัมผัส (sensible heat) ทำให้วัสดุผนังมีอุณหภูมิสูงขึ้นและถ่ายเท ความร้อนไปยังอากาศภายในอาคารที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า เกิดเป็นภาระในการทำความเย็นของอาคารที่มี ปริมาณขึ้นลงตามปริมาณกำลังแสงอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามแต่ละวัน (ชลทิศ เขียมวรวิฑูกร, 2550) เนื่องจากสัดส่วนของพลังงานความร้อนเข้าสู่กรอบอาคารพบว่า ผนังทึบของอาคารมีส่วนในการส่งผ่าน เข้ามาของความร้อนมากที่สุดร้อยละ 60 รองลงมาคือกระจกโปร่งแสงร้อยละ 21 และหลังคาร้อยละ 19 ดังนั้น ผนังอาคารมีผลต่อภาระการทำเย็น ในระบบปรับอากาศ

จากสถิติการจำหน่ายไฟฟ้ารวมของการไฟฟ้านครหลวงพบว่ามี การเพิ่มขึ้นของการใช้ไฟฟ้าตั้ง แต่ปี 2545 – 2557 ถึงร้อยละ 25 โดยมีอัตราการ เพิ่มขึ้นของการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทุกปี ซึ่งเครื่องใช้ไฟ ฟ้าที่มีการใช้งานมากที่สุดคือ ระบบปรับอากาศมี การใช้งานร้อยละ 60 ของการใช้งานในอาคาร รองลงมา คือ ระบบ

ไฟฟ้าส่องสว่างร้อยละ 20 และ อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าร้อยละ 15 โดยสถิติการใช้ไฟ ฟ้าส่วนใหญ่มีการใช้ไฟฟ้ามากที่สุดช่วงเช้าถึงบ่ายตั้งแต่เวลา 9.00 – 16.00 น. (การไฟฟ้านครหลวง, 2558) ดังนั้นหากมีการลดการใช้พลังงาน การถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ผนังจะสามารถลดการใช้พลังงานในอาคารในเวลากลางวันได้

ปัจจุบันการลดความร้อนเข้าสู่ผนังโดยการ ใช้ โครงสร้างมีหลายรูปแบบ ได้แก่ การใช้ผนังที่มีมวล อุณหภูมิมาก (thermal mass) การใช้ช่องอากาศใน ผนัง (air gap) การใช้ฉนวนกันความร้อน (insulation) และการใช้สารเปลี่ยนสถานะ (phase change material) โดยจากการศึกษาการลดความร้อนเข้าสู่ อาคารพบว่าการใช้ สารเปลี่ยนสถานะในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ซึ่งมีภูมิอากาศแบบร้อนชื้นยังไม่แพร่หลาย แต่พบว่ามีการศึกษาการใช้สารเปลี่ยนสถานะในภูมิภาคต่าง ๆ เช่น ภูมิภาคแห้งแล้ง ภูมิภาคอบอุ่น และภูมิภาคหนาวเย็น เป็นต้น โดยข้อดีของการใช้สารเปลี่ยนสถานะคือ เพื่อเพิ่ม มวลอุณหภูมิกักเก็บวัสดุที่มีมวลอุณหภูมิต่ำน้อยทำ ให้สามารถลดความร้อนเข้าสู่ผนัง เพราะความร้อน บางส่วนถูกใช้ในสาร

เปลี่ยนสถานะทำให้ความร้อน ผ่านกรอบอาคาร มีน้อยลง (สิริรัช อัครโกสีย์, 2551) ส่งผลให้ภาระการทำความเย็นในอาคารน้อยลง

ดังในงานวิจัยชิ้นนี้จึงสนใจการใช้สารเปลี่ยนสถานะในผนังอาคารเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนาผนังอาคารที่มีสารเปลี่ยนสถานะเป็น องค์ประกอบ และการประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะ ในอาคารภายใต้ภูมิอากาศร้อนชื้นในเวลากลางวัน

## 2. วัตถุประสงค์

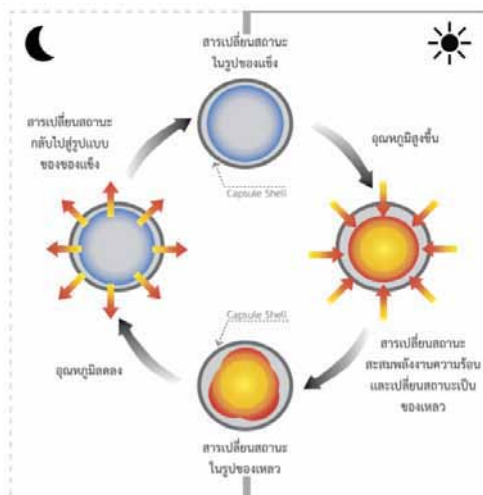
ศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะเป็นองค์ประกอบของสารเปลี่ยนสถานะที่มีจุดหลอมเหลว 3 ชนิด ได้แก่ SP26E SP29Eu และ SP31 เปรียบเทียบกับ ผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะในห้องปรับอากาศที่มี การปรับอากาศตั้งแต่เวลา 08.00 น. – 20.00 น.

## 3. ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 3.1 สารเปลี่ยนสถานะ

สารเปลี่ยนสถานะ คือ วัสดุที่มีค่าความร้อนแฝงที่จุดหลอมเหลว (heat of fusion) และช่วงอุณหภูมิจุดหลอมเหลว (melting point temperature) ที่ คงที่ทำให้สามารถกักเก็บพลังงาน หรือปลดปล่อย พลังงานได้ในปริมาณมากในช่วงอุณหภูมิที่ต้องการ การเปลี่ยนสถานะจะเกิดขึ้นเมื่อมีการสะสม หรือปลด ปล่อยพลังงานความร้อน เช่น การเปลี่ยนสถานะจาก ของแข็งเป็นของเหลว (solid to liquid PCM) หรือ เปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นก๊าซ (liquid to gaseous PCM) ซึ่งนิยมการใช้งานสถานะแบบของ แข็ง เป็นของเหลวมากกว่า เพราะเมื่อสารเปลี่ยนสถานะมีการเปลี่ยนสถานะจะมีการเปลี่ยนแปลง

ปริมาณน้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงสารเปลี่ยนสถานะเป็นก๊าซ ดังรูปที่ 1



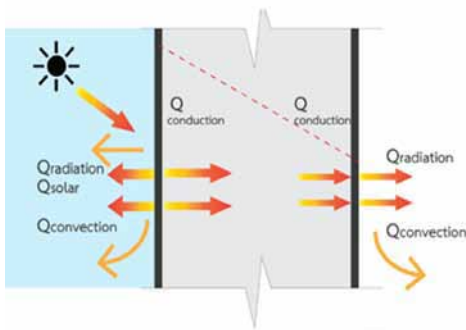
รูปที่ 1 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสาร เปลี่ยนสถานะเมื่อสะสมพลังงานในเวลากลางวัน และเมื่อสารเปลี่ยนสถานะคายความร้อนในเวลากลางคืน

เนื่องจากสมบัติของสารเปลี่ยนสถานะ ในด้านกักเก็บพลังงานหรือปลดปล่อยพลังงานได้ในปริมาณมากในช่วงอุณหภูมิที่ต้องการทำให้มีการใช้สาร เปลี่ยนสถานะในโครงสร้างอาคาร โดยทำหน้าที่ดูดซับพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ในเวลากลางวัน โดยการเปลี่ยนสถานะ จากของแข็งเป็นของเหลว ทำให้ช่วยลดอุณหภูมิผิวผนังภายในอาคาร และลดภาระการทำความเย็นในอาคาร ในขณะที่เดียวกันในเวลากลางคืน อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมภายนอกต่ำกว่า อุณหภูมิของสารเปลี่ยนสถานะทำให้สารเปลี่ยน สถานะเกิดการคายพลังงานความร้อนกลับสู่สถานะของแข็งได้

### 3.2 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนผ่านผนัง

พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังในเวลากลางวันเริ่มจากผนังด้านนอกมีการรับพลัง-

งานจากดวงอาทิตย์ ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นและมีการถ่ายเทความร้อนที่ได้รับออกจากผิวด้วยกระบวนการพาความร้อน (convection) การแผ่รังสีความร้อน (radiation) และการนำความร้อน (conduction) สู່ผนังภายใน โดยเมื่อผนังภายในได้รับความร้อนจะเกิดการถ่ายเทความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมด้วยกระบวนการแผ่รังสีความร้อนและการพาความร้อน ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนผ่านผนัง

การพิจารณาการถ่ายเทความร้อนรวม ผ่านผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะสามารถแสดงได้จากสมการที่ (1)

$$Q = U A \Delta T \quad (1)$$

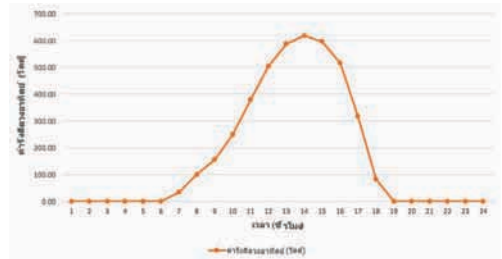
เมื่อ  $Q$  = อัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนในทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่ในแนวแกน  $x$  (watt, W)

$U$  = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ( $W/m^2k$ )

$A$  = พื้นที่ที่ความร้อนรวมไหลผ่าน ( $m^2$ )

$\Delta T$  = ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิผนังภายนอกและผนังภายใน (K)

ความเข้มการแผ่รังสีความร้อนของดวงอาทิตย์ระหว่างวันจะเปลี่ยนแปลงตามเวลาดังรูปที่ 3 ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิผิวผนังภายนอกมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แปรผันตามเวลาที่ความเข้มของการแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์เปลี่ยนแปลงไป



ที่มา: ชลทิศ เอี่ยมวรวิมลกุล, 2550  
รูปที่ 3 ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์รายชั่วโมงจากกรมอุตุนิยมวิทยาฯ (เฉลี่ยเดือนธันวาคม)

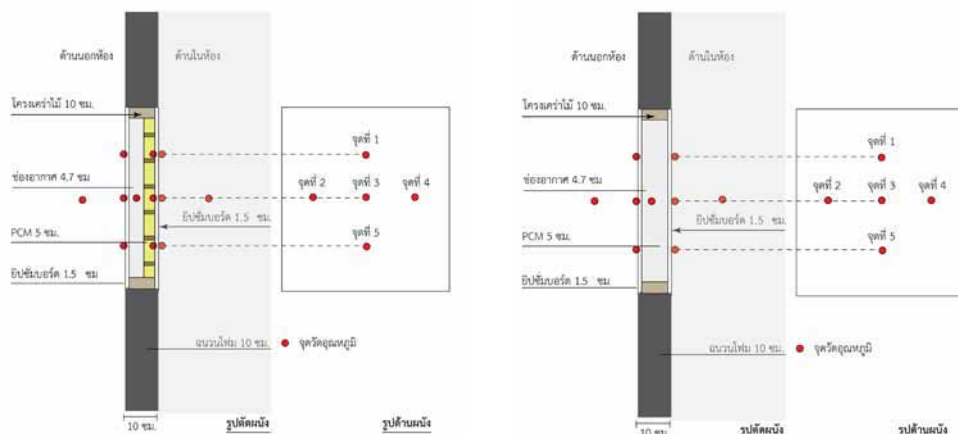
ดังนั้น การลดภาวะความร้อนเข้าอาคารเพื่อลดภาวะการปรับอากาศมักนิยมกระทำโดยการใส่ฉนวนความร้อน ซึ่งผลของการใช้ฉนวนความร้อนจึง เป็นการลดค่าสัมประสิทธิ์ การถ่ายเทความร้อน ( $U$ ) ทำให้อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ( $\Delta T$ ) ของผนังเพิ่มขึ้น ดังนั้น อุณหภูมิผนังภายในจึงมีค่าต่ำกว่าการไม่ใส่ฉนวนในการศึกษานี้จึงนำสารเปลี่ยนสถานะมาบรรจุอยู่ภายในผนังเพื่อให้ผนังสามารถปรับแปรลดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการดูดซับ ความร้อนที่เพิ่มมากขึ้นจากการดูดซับความร้อนแฝงของสารเปลี่ยนสถานะ ซึ่งในช่วงการหลอมละลายจะมีอุณหภูมิที่คงที่ ดังนั้น จึงทำให้อุณหภูมิ ผนังภายในมีค่าคงที่หรือเพิ่มสูงขึ้นต่ำกว่ากรณีที่ไม่มีการเปลี่ยนสถานะบรรจุอยู่

#### 4. ระเบียบการวิจัย

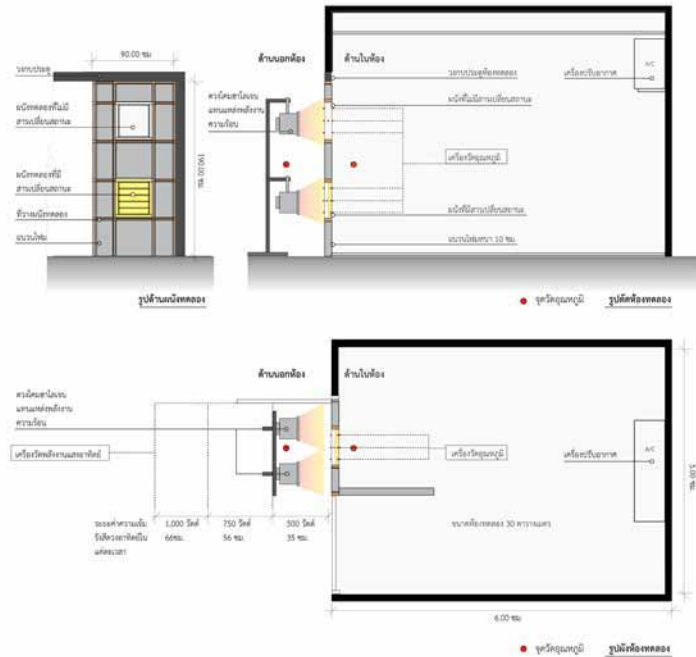
งานวิจัยชิ้นนี้มุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ

เป็นองค์ประกอบเพื่อป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคารที่ปรับอากาศในเวลากลางวันโดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย คือ สายวัดอุณหภูมิที่ผ่านการตรวจเทียบซึ่งมีความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิไม่เกิน 0.5 องศาเซลเซียส และมีการตรวจค่ารังสีความร้อนของดวงโคมิฮาโลเจน จำลองแสงอาทิตย์ที่กระทบผนัง การศึกษาทดลองเปรียบเทียบของพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคารของผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ และไม่มีสารเปลี่ยนสถานะในอาคารที่มีการปรับอากาศตั้งแต่เวลา 08.00 น. – 20.00 น.

ผนังทดลองเป็นแบบระบบปิดขนาดห้องทดลองมีขนาด 30 ตารางเมตร โดยผนังทดลองมีขนาด 0.40 เมตร x 0.40 เมตร 2 ชุดเพื่อใช้สำหรับวัดอุณหภูมิเปรียบเทียบผนังทดลองที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ และผนังทดลองที่มีสารเปลี่ยนสถานะ ดังรูปที่ 4 ภายในโครงเคร่าไม้ในส่วนหนึ่งของผนังทดลอง คือ ช่องอากาศกว้าง 4.70 เซนติเมตร สารเปลี่ยนสถานะบรรจุแบบแมคโครแคปซูลเลตหนา 5.00 เซนติเมตร และผนังด้านนอกและด้านใน คือ ผนังยิปซัมบอร์ดหนา 1.5 เซนติเมตร ในส่วนโครงเคร่าที่ไม่ใช่ส่วนของผนังทดลองบรรจุด้วยฉนวน โฟมโพลีสไตรีนหนา 5 นิ้ว เพื่อป้องกันการรบกวนของสิ่งแวดล้อมภายนอก ดังรูปที่ 5 และรูปที่ 6



รูปที่ 4 ตำแหน่งวัดอุณหภูมิผนังทดลองที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ (ซ้าย) และตำแหน่งวัดอุณหภูมิผนังทดลองที่มีสารเปลี่ยนสถานะ (ขวา)



รูปที่ 5 รูปด้านผนังทดลอง รูปตัดผนังทดลอง (บน) และรูปผังห้องทดลอง (ล่าง)



รูปที่ 6 ห้องทดลองและผนังทดลองผนังที่มีสาร เปลี่ยนสถานะและไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ

นอกจากนี้ การทดลองเป็นการทดลอง โดยใช้ ดวงโคมจำลองแสงอาทิตย์ ซึ่งอ้างอิงจากรังสีแสงอาทิตย์จากกรมอุตุนิยมวิทยาฯ โดยแบ่งความเข้ม ของแสงอาทิตย์เฉลี่ยเป็น 3 ช่วง ได้แก่ 500 วัตต์ ช่วงเวลา 07.00 น. – 10.00 น. และ 17.00 น. – 18.00 น. 750 วัตต์ ช่วงเวลา 10.00 น. – 13.00 น. และ 16.00 น. – 17.00 น. และ 1,000 วัตต์ ช่วงเวลา 13.00 น. – 16.00 น.

โดยการทดสอบเป็นการจำลองสภาวะอากาศภายนอกห้องทดสอบเป็นสภาวะอากาศนิ่ง ไม่มีอิทธิพลจากการพาดความร้อน (wind shield) และอากาศในห้องทดสอบปรับถูกควบคุมด้วยระบบปรับอากาศอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 08.00 น. – 20.00 น. ซึ่งเป็นการจำลองการใช้งาน ในอาคารที่ใช้งานในเวลากลางวัน เช่น สถานศึกษา อาคารพาณิชย์ และสำนักงาน ซึ่งทำการทดลองต่อ 1 กรณีศึกษาเป็นเวลา 48 ชั่วโมง

สารเปลี่ยนสถานะที่ใช้ในการทดลอง ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้กำหนดคุณสมบัติของสารเปลี่ยนสถานะพิจารณาจากการคำนวณเลือกอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของสารเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมในภูมิอากาศแบบร้อนชื้น โดยคำนวณจากอุณหภูมิเฉลี่ยของห้องในเวลา

48 การศึกษาเชิงทดลองของพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังเบาที่มีสารเปลี่ยนสถานะบรรจุแบบแมคโครแคปซูลในเวลากลางวัน แพรพรรณ วัฒนวิเชียร และ ผศ.ดร. สุดาภรณ์ สุดประเสริฐ

กลางคืนและพลังงานความร้อนของดวงอาทิตย์ที่สะสมอยู่ในแต่ละวันซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่นำเสนอโดย Pieppo (Baetens et al., 2010) ดังนี้

$$T_{pcm,opt} = T_i \times (Q_{store} / t_{store} h) \quad (2)$$

เมื่อ

$$T_i = (t_d T_{i,d} + t_n T_{i,n}) / (t_d + t_n) \quad (3)$$

โดย

$T_{pcm,opt}$  คือ อุณหภูมิของสารเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสม

$Q_{store}$  คือ พลังงานความร้อนที่สะสมต่อหน่วยพื้นที่

$t_{store}$  คือ ระยะเวลาที่พลังงานความร้อนสะสม

$T_i$  คือ อุณหภูมิห้อง

$T_{i,d}$  คือ อุณหภูมิห้องในเวลากลางวัน

$T_{i,n}$  คือ อุณหภูมิห้องในเวลากลางคืน

$t_d$  คือ ระยะเวลาในเวลากลางวัน

$t_n$  คือ ระยะเวลาในเวลากลางคืน

$h$  คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนระหว่างผนังกับอากาศในห้อง

จากการคำนวณจากสมการดังกล่าวทำให้พบว่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่เหมาะสมต่อสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้นคือ 27–33 องศาเซลเซียส ดังนั้นในการทดลองจึงแบ่งสาร เปลี่ยนสถานะเป็น 3 ชนิด คือ SP26E SP29Eu และ SP31 ดังรูปที่ 7 ซึ่งมีคุณสมบัติสารเปลี่ยนสถานะดังตารางที่ 1

รูปที่ 7 สารเปลี่ยนสถานะที่ใช้ในการทดลอง



ตารางที่ 1 คุณสมบัติของสารเปลี่ยนสถานะ

ชนิด	อุณหภูมิจุดหลอมเหลว (°C)	ค่าความจุความร้อน (KJ/Kg)
SP 6E	25 - 27	190
SP 9Eu	29 - 30	160
SP31	31 - 33	220

## 5. ผลการวิจัย

จากการทดลองของผนังทดลองที่มีสารเปลี่ยนสถานะที่มีจุดหลอมเหลว 3 ชนิด ได้แก่ SP26E SP29Eu และ SP 31 เปรียบเทียบกับผนังทดลองที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะเป็นเวลาทั้งสิ้น 48 ชั่วโมง โดยได้รับปริมาณรังสีจากดวงโคจรจำลองแสงอาทิตย์ในปริมาณที่เท่ากัน พบว่า ในวันที่ 1 อุณหภูมิของผนังภายในตอนกลางวันขณะปรับอากาศมีอุณหภูมิผิวผนังภายในที่สูงที่สุด คือ อุณหภูมิของผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ 35 องศาเซลเซียส ส่วนผิวผนังภายในที่มีสารเปลี่ยนสถานะทั้ง 3 ชนิดมีอุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส เนื่องจากการดูดซับพลังงานความร้อน

ในตอนกลางคืนวันที่ 1 เมื่อไม่มีการปรับอากาศอุณหภูมิผิวผนังภายในของ SP26E SP29Eu และ SP31 อุณหภูมิที่สูงที่สุดคือ อุณหภูมิผิวผนังภายในที่มีสารเปลี่ยนสถานะ 30 องศาเซลเซียส เนื่องจากสารเปลี่ยนสถานะมีการคายความร้อน

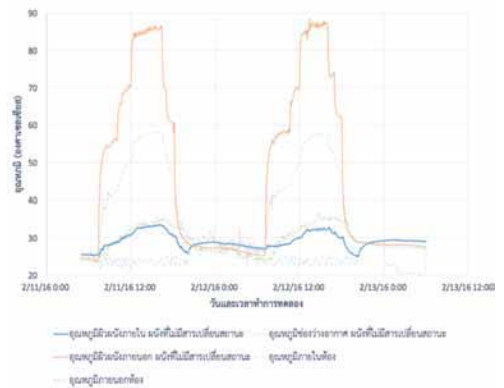
ที่สะสมในเวลากลางวันสู่สภาพแวดล้อมในเวลากลางคืน ในขณะที่อุณหภูมิผิวผนังภายในที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิสภาพแวดล้อม คือ อุณหภูมิห้อง ดังรูปที่ 8 - 11

ในตอนกลางวันวันที่ 2 เมื่อมีการปรับอากาศ อุณหภูมิผิวผนังภายในที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะสูงสุด คือ 35 องศาเซลเซียส เหมือนวันที่ 1 ส่วนผิวผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP26E มีอุณหภูมิสูงสุด 34 องศาเซลเซียส และ SP29Eu มีอุณหภูมิสูงสุด 29 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 8 - 11 เนื่องจากในเวลากลางคืนไม่สามารถคายความร้อนให้กลับเป็นสถานะของแข็งได้ทันเวลา เพราะมีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับสภาพแวดล้อมในขณะที่ SP31 มีอุณหภูมิ สูงสุด 26 องศาเซลเซียส ในเวลากลางวันเหมือน วันที่ 1 เพราะสามารถคายความร้อนในเวลากลางคืนเพื่อคืนสถานะเป็นของแข็งได้รวดเร็วกว่า SP26 E และ SP29Eu

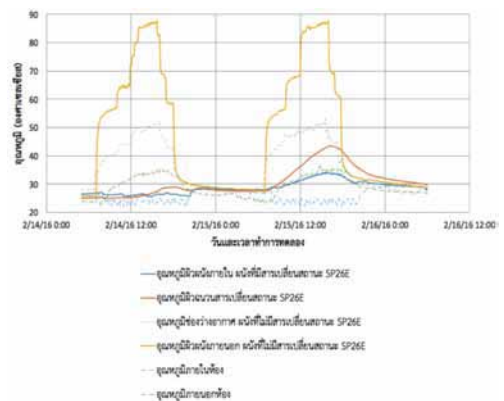
นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบจุดหลอมเหลวของสารเปลี่ยนสถานะ พบว่า สารเปลี่ยนสถานะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำมีศักยภาพในการดูดความร้อนเข้ามาทุกทิศทางมากกว่าสารเปลี่ยนสถานะที่มีจุดหลอมเหลวสูง ทำให้อุณหภูมิของผิวผนังภายในวันที่เริ่มต้นมีอุณหภูมิที่ต่ำแต่เมื่อภายหลังปิดเครื่องปรับอากาศ พบว่า การคายตัวกลับสู่สถานะของแข็งที่ช้ากว่าสารเปลี่ยนสถานะที่มีจุดหลอมเหลวสูง เพราะมีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมทำให้การคายตัวกลับเป็นของแข็งยากกว่าสารเปลี่ยนสถานะที่มีจุดหลอมเหลวสูง

ในขณะเดียวกันสารเปลี่ยนสถานะที่มีจุดหลอมเหลวสูงจะเกิดการเป็นของแข็งได้เร็วกว่าสารเปลี่ยนสถานะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ และมีอุณหภูมิผิวผนังไม่เกินอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของสารเปลี่ยนสถานะ คือ ไม่เกิน 30 - 33

องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิผิวผนังภายในที่สูงขึ้นจะเกิดขึ้นตั้งแต่เวลา 19.00 น. และค่อย ๆ ลดอุณหภูมิลงเรื่อย ๆ จนเท่ากับอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อมโดยในเวลา 7.00 - 19.00 น. มีอุณหภูมิผิวผนังภายในเฉลี่ยที่ 26-27 องศาเซลเซียส ซึ่งแตกต่างกับอุณหภูมิที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะในช่วงที่อุณหภูมิสูงสุด 8 - 9 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 12

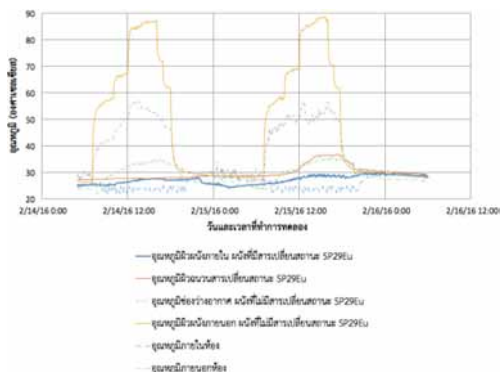


รูปที่ 8 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ

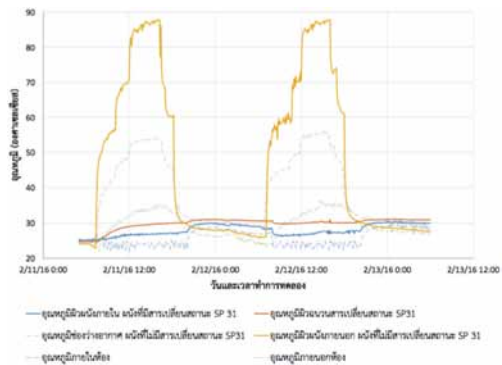


รูปที่ 9 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP26E

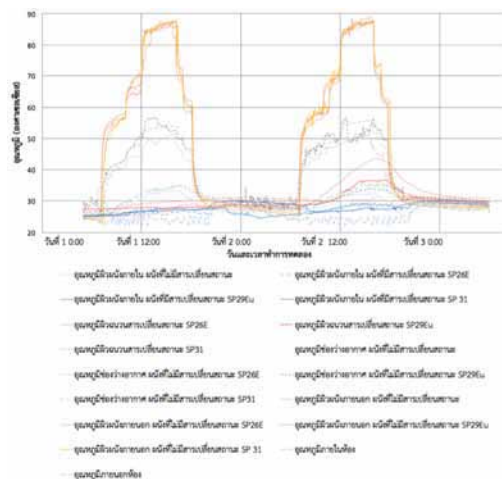
50 การศึกษาเชิงทดลองของพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังเบาที่มีสารเปลี่ยนสถานะบรรจุแบบแมคโครแคปซูลในเวลากลางวัน แพรพรรณ วัฒนวิเชียร และ ผศ.ดร. สุดาภรณ์ สุดประเสริฐ



รูปที่ 10 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP29Eu

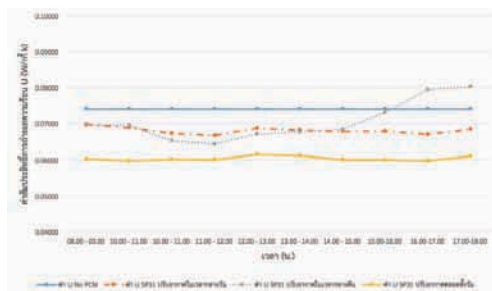


รูปที่ 11 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของผนัง ที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP31



รูปที่ 12 เปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะชนิดต่าง ๆ และไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ

พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของกรณีผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP31 จะมีความเป็นฉนวนสูงกว่า SP29Eu SP26E โดยสภาพความเป็นฉนวนจะแปรเปลี่ยนตามเวลาดังแสดงได้จากการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ในห้องปรับอากาศที่มีการปรับอากาศตั้งแต่เวลา 8.00 น. - 20.00 น. ซึ่งผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะมีค่าคงที่ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่ำกว่ากรณีที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะบรรจุอยู่ตลอดทั้งวัน ดังแสดงใน รูปที่ 13



รูปที่ 13 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

## 6. สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยพบว่า สารเปลี่ยนสถานะดูดความร้อนในเวลากลางวัน เมื่อมีความร้อนเข้ามาสู่ผนัง ทำให้อุณหภูมิของสารเปลี่ยนสถานะจนถึงจุด หลอมเหลว และรับความร้อนต่อไปเพื่อเกิดการเปลี่ยนสถานะ ในขณะที่อุณหภูมิของผิวผนังภายในไม่เปลี่ยนแปลง โดยถ้าปริมาณสารเปลี่ยนสถานะมีมากพอจะเพียงพอที่จะรับความร้อนจากดวงอาทิตย์ โดยที่อุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่เวลากลางคืนเมื่อไม่มีความร้อนจากดวงอาทิตย์ พลังงานความร้อนที่สะสมจะคายออกเพื่อให้สารเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งและอุณหภูมิของสารเปลี่ยนสถานะจะ

ลดลงเท่ากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเพื่อพร้อมที่จะเริ่มทำงานในวัฏจักรเช่นเดียวกันในวันต่อไป

ในด้านอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของสารเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสมควรมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิสภาพแวดล้อมในช่วงเวลากลางคืน โดยค่าความแตกต่างของอุณหภูมิจะต้องทำให้เกิดการคายความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะในปริมาณที่เพียงพอที่จะทำให้สารเปลี่ยนสถานะเกิดการคืนตัวเป็นของแข็ง

นอกจากนี้ การที่มีสารเปลี่ยนสถานะร่วมกับผนังอาคารที่มีการปรับอากาศและใช้งานในเวลากลางวันพบว่า การที่มีสารเปลี่ยนสถานะรับความร้อนจากดวงอาทิตย์สะสมไว้ในรูปแบบของความร้อนแฝงโดยที่อุณหภูมิของสารเปลี่ยนสถานะ มีค่าคงที่ซึ่งต่ำกว่ากรณีของผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะจะช่วยลดการนำความร้อนสู่ผิวผนังภายในอาคารเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของผนังต่ำกว่า

ผลการทดลองพบว่าสารเปลี่ยนสถานะ SP31 มีอุณหภูมิที่เหมาะสมในการใช้งานในผนังเบาที่มีการปรับอากาศในเวลากลางวัน เนื่องจากมีการดูดซับพลังงานความร้อนโดยการเปลี่ยนสภาพจากของแข็งเป็นของเหลวในเวลากลางวัน และคายความร้อนโดยการเปลี่ยนสภาพของเหลวเป็นของแข็งในเวลากลางคืนดีกว่าสารชนิดอื่น ส่งผลให้ผนังภายในอาคารมีอุณหภูมิที่สม่ำเสมอในเวลากลางวันและสามารถลดอุณหภูมิในผนังได้ 6 – 9 องศาเซลเซียสเมื่อเปรียบเทียบกับผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ

ดังนั้น การนำสารเปลี่ยนสถานะประยุกต์ใช้กับสถาปัตยกรรมที่ปรับอากาศและใช้งานในเวลากลางวันหากใช้ค่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่เหมาะสมแล้วจะทำให้ผนังมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่ำ จึงเป็นวิธีการช่วยลดภาวะ

ความร้อนเข้าสู่อาคารได้วิธีหนึ่งโดยหากต้องการลดความร้อนเข้าสู่อาคารในระดับเดียวกันผนังอาคารที่มีสารเปลี่ยนสถานะจะสามารถทำให้ผนังมีน้ำหนักลดลงต่ำกว่าการใช้ผนังมวลมากหรือสามารถใช้ความหนาของผนังได้บางกว่าการใช้ฉนวนความร้อนได้

## รายการอ้างอิง

- การไฟฟ้านครหลวง. (2558). *สถิติการใช้ไฟฟ้า*. สืบค้นเมื่อ 1 ธันวาคม 2558, จาก <http://www.mea.or.th>
- ชลทิศ เอี่ยมวรวิฑูฏกุล. (2550). *อิทธิพลของสารเปลี่ยนสถานะที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน*. กรุงเทพฯ:มหาวิทยาลัยศรีปทุม.
- สิริรัช อัครโกสิย์. (2551). *การเปรียบเทียบคุณสมบัตินวัตกรรมการผลิตวัสดุเปลี่ยนสถานะโดยวิธีรูปร่างคงตัวเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Baetens, R., Jelle, B. P. & Gustavsen, A. (2010). Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, 42(9), 1361–1368.doi:10.1016/j.enbuild.2010.03.026
- Feldman, D., Khan, M. A. & Banu, D. (1989). Energy storage composite with an organic PCM. *Solar Energy Materials*, 18(6), 333–341.doi:10.1016/0165-1633(89)90058-0
- Fiorito, F. (2012). *Trombe Walls for Lightweight Buildings in Temperate and Hot Climates*. Exploring the Use of Phase-change Materials for Performances Improvement. *Energy Procedia*, 30, 1110–1119.doi:10.1016/j.egypro.2012.11.124

52 การศึกษาเชิงทดลองของพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังเบา  
ที่มีสารเปลี่ยนสถานะบรรจุแบบแมคโครแคปซูลในตัวกลางวัน  
แพรพรณ วัฒนวิเชียร และ ผศ.ดร. สุดาภรณ์ สุดประเสริฐ

Jin, X., Medina, M. A. & Zhang, X. (2014). On the placement of a phase change material thermal shield within the cavity of buildings walls for heat transfer rate reduction. *Energy*, 73, 780–786. doi:10.1016/j.energy.2014.06.079

Kuznik, F., Virgone, J. & Roux, J.-J. (2008). Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: A full-scale experimental investigation. *Energy and Buildings*, 40(2), 148–156. doi:10.1016/j.enbuild.2007.01.022

Lee, K. O., Medina, M. A., Raith, E. & Sun, X. (2015). Assessing the integration of a thin phase change material (PCM) layer in a residential building wall for heat transfer reduction and management. *Applied Energy*, 137, 699–706. doi:10.1016/j.apenergy.2014.09.003

Peippo, P. & Kauranen, P. D. L. (1991). A multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating. *Energy and Buildings*, 17, 259–270. doi:10.1016/0378-7788(91)90009-R

Raj, V. A. A. & Velraj, R. (2010). Review on free cooling of buildings using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2819–2829. doi:10.1016/j.rser.2010.07.004

# การประยุกต์ใช้วิธีวิเคราะห์การวิบัติอย่างง่ายสำหรับพื้นอาคาร

## Application of Simplified Building Failure Assessment Method for Building Floor

พูลศักดิ์ ไทยสันติสุข<sup>1</sup> และ ดร. เทอดธิดา ทิพย์รัตน์<sup>2</sup>

Poonsak Thaisantisuk<sup>1</sup> and Thoedtida Thipparat, Ph.D.<sup>2</sup>

คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย

E-mail: aood\_bave@hotmail.com<sup>1</sup>, thiprat.t@gmail.com<sup>2</sup>

### บทคัดย่อ

โครงการนี้ทำการศึกษาสาเหตุของรอยร้าวที่เกิดขึ้นกับพื้นในอาคารด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายโดยทำการทดสอบพื้นโรงงานที่ก่อสร้างแล้วเสร็จ 2 ปีมาแล้ว โดยพื้นโรงงานดังกล่าวยังไม่ได้มีการใช้งานตามที่ออกแบบไว้แต่กลับพบว่าพื้นมีรอยร้าว ดังนั้นก่อนที่จะนำเครื่องจักรเข้ามาติดตั้ง จึงจำเป็นต้องตรวจสอบสภาพการใช้งานในปัจจุบันของพื้น โดยทำการศึกษาเกี่ยวกับการติดตามรอยร้าว โดยตรวจสอบการเคลื่อนตัวของรอยร้าว วิเคราะห์ระดับการทรุดของฐานราก การเจาะทดสอบแก่นคอนกรีตและให้วิศวกรระดับวุฒิวิศวกรตรวจสอบรอยร้าวกับพิจารณาความสามารถในการรับน้ำหนักของพื้นโรงงาน ผลการทดสอบพบว่า กำลังของโครงสร้างใกล้เคียงกับค่ากำลังที่ยอมให้ซึ่งใช้ในการออกแบบ การศึกษานี้ยังพบว่า การทดสอบรวมกับการวิเคราะห์ข้อมูลที่เกี่ยวข้องในหลากหลายมิติสามารถให้ผลการวิเคราะห์การวิบัติของพื้นอาคารที่เหมาะสมกว่าการทดสอบเพียงอย่างเดียว

### Abstract

This study is focused on nondestructive evaluation for identifying root causes of floor failure. The objective of this study is to find the causes of the cracks which occurred at a factory floor. The factory has been built two years ago. Before further installation of machine, cracks occurred at a factory floor. Thus it is imperative to assess the existing condition. For this purpose, behavior and propagation of the cracks, differential settlements of foundation, core test, site investigation by senior professional engineer are performed. The load carrying capacity for concrete slabs is determined by senior professional engineer. Test results show that the structure has adequate strength for further use although it has marginally pass. Study further confirms the findings of previous researchers that a combination of tests, instead of performing just one type of test, provide more suitable results to confidently accept or reject the structure as a whole or its component for future use.

**คำสำคัญ (Keywords):** ตรวจสอบอาคาร (Building Inspection), รอยร้าว (Crack), เจาะทดสอบแก่นคอนกรีต (Core Test), พื้นโรงงาน (Factory Floor), กำลังของโครงสร้าง (Structural Strength)

## 1. คำนำ

โครงการก่อสร้างในปัจจุบันมีการฟื้นตัวอย่างรวดเร็วและมีการแข่งขันกันสูง โครงการที่ประสบความสำเร็จตามเป้าหมายที่กำหนดนั้นเป็นไปด้วยความลำบาก โดยเฉพาะโครงการก่อสร้างโรงงานซึ่งต้องใช้ระยะเวลาที่เร่งรัด รวดเร็ว เพื่อให้ทันต่อกรวางแผนการผลิตที่ได้เตรียมไว้ ในปีนั้นๆ ไม่ว่าจะในเรื่องการติดตั้งเครื่องจักร หรือแผนการตลาดของทางเจ้าของโรงงานซึ่งสิ่งเหล่านี้มีผลต่อการกำหนดคุณภาพการก่อสร้างทั้งสิ้น สำหรับโครงการก่อสร้างโรงงานขนาดเล็กถึงขนาดกลางที่มีเจ้าของโครงการที่ยังใหม่ต่อการปลูกสร้างโรงงานใหม่ การควบคุมงานที่ไม่มีประสิทธิภาพ หรือได้ผู้รับเหมาขนาดเล็กถึงขนาดกลางที่มีประสบการณ์ในการบริหารงานที่ยังไม่ดีพอ ซึ่งสาเหตุเหล่านี้ทำให้การทำงานโครงการก่อสร้างโรงงานไม่ประสบความสำเร็จตามเป้าหมายที่วางไว้

ขั้นตอนการดำเนินการก่อสร้างโรงงาน งานส่วนใหญ่เป็นการปฏิบัติภาคสนาม มีบุคลากรหลายกลุ่มที่เกี่ยวข้อง ไม่ว่าจะเป็นเจ้าของโครงการ ผู้ควบคุมงาน ผู้รับเหมา การควบคุมงานที่ไม่มีประสิทธิภาพ นำไปสู่ผลงานที่ไม่มีคุณภาพ อันส่งผลต่อปัญหาไปยังขั้นตอนการส่งมอบงาน เนื่องจากมีการเปลี่ยนความรับผิดชอบจากการก่อสร้างของผู้รับเหมา ไปยังเจ้าของโครงการการส่งมอบงานที่ไม่มีคุณภาพจะทำให้เจ้าของโครงการประสบปัญหาเมื่อใช้งานสิ่งก่อสร้างได้

งานพื้นอุตสาหกรรม (Industrial Floor) เป็นอีกงานโครงสร้างที่กำลังเข้ามามีบทบาทในการก่อสร้างโรงงาน ไม่ว่าจะเป็นโรงงานสำหรับอุตสาหกรรมหนัก เช่น อุตสาหกรรมผลิตและประกอบรถยนต์ หรืออุตสาหกรรมทั่วไป เช่น อุตสาหกรรมชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมการผลิตอาหาร ฯลฯ และเนื่องจากพื้นอุตสาหกรรมเป็นโครงสร้างคอนกรีตที่ต้องเจอการขัดสีที่ผิวหน้าสูง ทั้งจากรถบรรทุกสินค้าหรือจากรถ Fork Lift ดังนั้น คอนกรีตที่ใช้เทพื้นอุตสาหกรรมจะต้องมีคุณสมบัติทนทาน มีความแข็งแรง ด้านทานการขัดสีได้ดี และสามารถทำผิวให้เรียบได้ง่าย โดยทั่วไปวิธีการหนึ่งเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้ผิวหน้าคอนกรีต คือการเทคอนกรีตปกติทั่วไป แล้วตามด้วยการทำ Floor Hardener บนผิวหน้าคอนกรีตที่เทซึ่งเป็นวิธีการที่ยุ่ยาก คุณภาพผิวหน้าคอนกรีตไม่สม่ำเสมอ อีกทั้งคุณภาพพื้นผิวที่สำเร็จแล้วจะขึ้นอยู่กับความสามารถและความชำนาญ ส่วนบุคคลของช่างผู้ปฏิบัติเป็นหลัก หากช่างไม่มีความชำนาญที่เพียงพอแล้ว และการควบคุมคุณภาพไม่ดีพอ กิจกรรมเทพื้นคอนกรีตและการวางเหล็กพื้น ดังแสดงในรูปที่ที่ 1 และ 2 ปัญหาที่มักพบในงานพื้นของโรงงานคือ Floor Hardener กระจายหลุดร่อนออกจากพื้นคอนกรีต ทำให้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมภายหลัง



รูปที่ 1 งานเทพื้นคอนกรีตในโรงงานอุตสาหกรรม



รูปที่ 2 งานวางเหล็กเพื่อเตรียมเทพื้นคอนกรีตในโรงงานอุตสาหกรรม

ปัจจัยที่ทำให้เกิดการแตกร้าวในงานพื้นอุตสาหกรรมมีหลากหลายปัจจัย ทั่วไปสรุปได้ดังนี้

1). วัสดุดิบและสัดส่วนการผสมคอนกรีต อันได้แก่ วัสดุมวลรวม ปูนซีเมนต์ น้ำ น้ำยาผสมคอนกรีต

2). การเทคอนกรีต (Placing) อัตราการเทและสภาพการทำงานมีผลต่อการแตกร้าวอย่างแน่นอน ซึ่งมักเป็นผลมาจากการเย็นของคอนกรีต (Bleeding)

3). สภาพการทำงาน อันประกอบด้วย อุณหภูมิและการสัมผัสกับสภาพรอบข้าง เนื่องจาก

- อุณหภูมิ (Temperature) ปกติอัตราการรับกำลังได้ของคอนกรีตจะแปรตามอุณหภูมิ

- การสัมผัสกับสภาพรอบข้าง (Exposure) ลักษณะอากาศที่คอนกรีตสัมผัสมีอิทธิพลอย่าง

มากต่อการแตกร้าวของคอนกรีต อุณหภูมิและความชื้นที่แตกต่างกันมากในช่วงวัน เป็นผลทำให้เกิดการรั้งภายในของคอนกรีตอย่างมาก (internal Restraint) เพราะการยึดหดตัวของผิว และส่วนที่อยู่ภายในจะไม่เท่ากันทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้

4). การบ่มคอนกรีต (Curing) ความชื้นในคอนกรีต เป็นสิ่งสำคัญมาก ไม่ว่าจะก่อนหรือหลังการบ่ม สำหรับงานพื้นถ้าคอนกรีตแห้งเร็วเกินไป อัตราการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าคอนกรีต อาจจะเร็วกว่าอัตราการเย็น (Bleeding)

5). การยึดรั้งตัว (Restraint) คอนกรีตที่ถูกยึดรั้งไว้ไม่สามารถเคลื่อนตัวได้ไม่ว่าจะเป็นการยึดรั้งจากรูปร่างหรือโครงสร้างใกล้เคียงก็ทำให้เกิดการแตกร้าวขึ้นได้

เห็นได้ว่าสาเหตุการแตกร้าวของคอนกรีตนั้นมีมากมายซึ่งมักจะไม่ได้เกิดจากสาเหตุใดสาเหตุหนึ่งเพียงอย่างเดียว แต่มักจะเกิดจากหลาย ๆ สาเหตุพร้อมกัน

การวิจัยนี้จะนำเสนอกรณีศึกษาปัญหาและแนะนำวิธีการแก้ไขการแตกร้าวของงานพื้นอุตสาหกรรมในโรงงานกรณีศึกษา เนื่องจากโรงงานกรณีศึกษาประสบปัญหาการแตกร้าวของงานพื้นภายหลังจากก่อสร้างแล้วเสร็จ พบว่า มีการแตกร้าวที่พื้นในโรงงานกรณีศึกษาทั้งที่พื้นดังกล่าวยังไม่ได้มีการใช้งานรถบรรทุกสินค้าหรือจากรถ Fork Lift และยังไม่ได้ติดตั้งเครื่องจักร

รูปที่ 3 แสดงการแตกร้าวของพื้นในโรงงานกรณีศึกษา คณะผู้วิจัยเล็งเห็นถึงความสำคัญของปัญหาดังกล่าว จึงจะทำการศึกษาปัญหาและแนวทางแก้ไขการแตกร้าวของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กในอาคารโรงงานโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ

1) เพื่อศึกษาถึงสาเหตุของการเกิดรอยร้าวของพื้นในโรงงาน

2) เพื่อเสนอแนะวิธีการแก้ไข ซ่อมแซมพื้น  
โรงงานที่เกิดรอยร้าว



รูปที่ 3 การแตกร้าวของพื้นในโรงงานกรณีศึกษา

## 2. วิธีการวิจัย

แนวทางการดำเนินการของงานวิจัยนี้ สามารถ  
แบ่งออกเป็น 9 ขั้นตอน คือ

1) ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง  
(Literature Review) เพื่อศึกษาค้นคว้าความรู้และ  
ทฤษฎีต่าง ๆ ที่จำเป็นสำหรับงานวิจัย เช่น ประเภท  
ของรอยร้าว สาเหตุของการเกิดรอยร้าวในคอน-  
กรีตเสริมเหล็กโดยรวบรวมจากวิทยานิพนธ์บท-  
ความทางวิชาการ หนังสือเรียน และเอกสารต่าง ๆ  
จากทั้งในประเทศและต่างประเทศ

2) สรุปความรู้และทฤษฎีที่ได้จากการทบทวน  
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และนำข้อสรุปที่ได้มาประ-  
ยุกต์กับสมมติฐานการเก็บข้อมูลประกอบงาน  
วิจัย

3) ศึกษาวิธีวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดกับ  
โครงสร้าง

4) รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโรงงานกรณี  
ศึกษาและพื้นโรงงาน อันประกอบด้วย ข้อมูล  
การออกแบบ รายการคำนวณ แบบของอาคาร  
ในส่วนของพื้นโรงงาน รายการประกอบแบบ

ผลการทดสอบ ดังนี้ Soil investigation (Sub  
surface investigation) Compressive strength  
concrete test Tension test of reinforcing steel  
Mill quality and test certification รายการวัสดุ  
key list และ key plan รายการผู้ขายวัสดุ (list of  
vender)

5) รวบรวมผลสำรวจชั้นดินและคอนกรีต อัน  
ประกอบด้วย ผลการทดสอบดิน ผลการทดสอบ  
วัสดุ

6) รวบรวมข้อมูลการก่อสร้างพื้นโรงงาน อัน  
ประกอบด้วย แผนงาน บันทึกการปฏิบัติงาน  
ประจำวัน รายงานความก้าวหน้างานก่อสร้าง

7) ทำการสำรวจ โดยสร้างหมุดหลักฐาน  
สำหรับทำระดับ และวัดค่าระดับของพื้นโรงงาน

8) ตั้งสมมติฐานของสาเหตุการเกิดรอยร้าว  
จาก

8.1) ผู้เชี่ยวชาญสังเกตรอยร้าวด้วยสายตา

8.2) ผู้เชี่ยวชาญวิเคราะห์สาเหตุการเกิด  
รอยร้าว

9) เลือกสมมติฐานที่เป็นไปได้ 2 กรณี แล้วหา  
ข้อมูลเพื่อวิเคราะห์แต่ละกรณี โดยการทดสอบ  
ตัวอย่างลูกปูนที่ตัดจากพื้นห้องปฏิบัติการ

10) รวบรวม วิเคราะห์และประมวลผลข้อ-  
มูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลข้างต้น

11) ระบุสาเหตุของการแตกร้าวของพื้นโรงงาน

12) เสนอแนะวิธีการแก้ไขพื้นโรงงานที่แตกร้าว

13) สรุปผลการวิจัย ข้อจำกัดของงานวิจัย  
ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

## 3. ผลการวิจัย

### 3.1 ผลการรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิ

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ได้รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง  
กับการแตกร้าวของพื้นโรงงานประกอบด้วยแบบ

ก่อสร้าง รายการคำนวณ ข้อมูลช่วงการก่อสร้าง เช่น กระบวนการเทคอนกรีต ผลการทดสอบคอนกรีตโดยผู้จำหน่ายคอนกรีต เป็นต้น

พบว่าเงื่อนไขในการออกแบบประกอบด้วย กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้ในการออกแบบ  $f'_c$  เท่ากับ 23.544 MPa หรือ 240 ksc. กำลังรับแรงดึงของเหล็ก  $f_y$  เท่ากับ 392 MPa หรือ 4004 ksc. โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบคือ spSlab v3.11 (TM) รูปที่ 4 แสดงข้อมูลเงื่อนไขในการออกแบบที่รวบรวมได้จากเอกสารรายการคำนวณ

Material Properties			
	Slabs/Beams		Columns
wc	=	2400	2400 kg/m <sup>3</sup>
$f'_c$	=	23.544	23.544 MPa
$E_c$	=	23100	23100 MPa
$f_r$	=	3.3966	3.3966 MPa
$f_y$	=	392 MPa, Bars are not epoxy-coated	
$f_{yv}$	=	392 MPa	
$E_s$	=	200000 MPa	

รูปที่ 4 เงื่อนไขในการออกแบบ

เมื่อคำนวณโมเมนต์รับแรงดัดตามข้อมูลในแบบก่อสร้างพบว่าค่าโมเมนต์ลบของพื้นในแถบเสา (5339 kgm) น้อยกว่าค่าโมเมนต์ที่ต้องการ (6055 kgm) นอกจากนี้ค่าหน่วยแรงเฉือนทะลุที่เกิดขึ้น 12.57 (ksc) น้อยกว่าค่าหน่วยแรงเฉือนทะลุที่ต้องการ 13.98 (ksc) พื้นเป็นพื้นคอนกรีตหล่อในที่ที่เทคอนกรีตครั้งเดียว ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 การหล่อพื้นคอนกรีต

### 3.2 ผลการสังเกตรอยร้าวด้วยสายตา

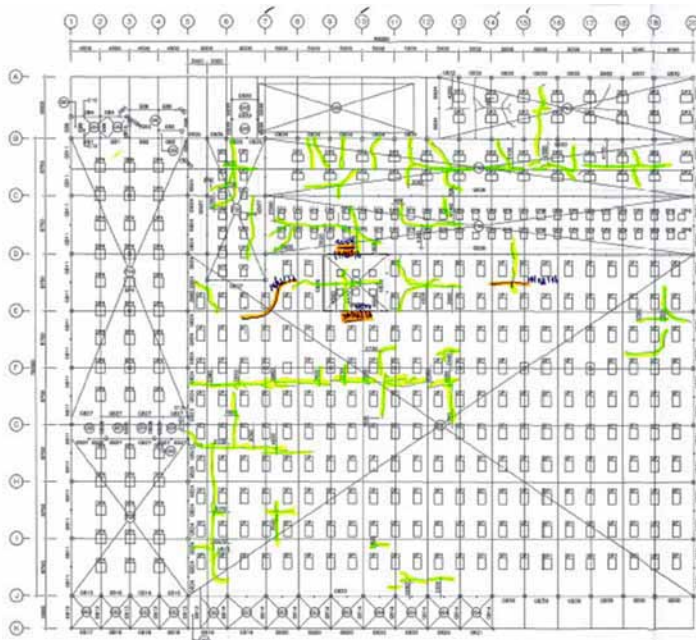
การวิจัยครั้งนี้ได้ให้ผู้เชี่ยวชาญระดับวุฒิวิศวกรและวิศวกรอาวุโสทำการสังเกตรอยร้าวด้วยสายตารวมกับข้อมูลแบบก่อสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 6 นอกจากนี้ ผู้เชี่ยวชาญได้ใช้ค้อนเคาะฟังเสียงพื้นบริเวณที่มีรอยแตกร้าว ผลการวิเคราะห์เบื้องต้น พบว่า รูปแบบของรอยแตกร้าวไม่อยู่บริเวณหัวเสา ดังแสดงในรูปที่ 7 ทำให้ผลการรับน้ำหนักของพื้นไม่เป็นสาเหตุการแตกร้าว รูปที่ 8 แสดงการแตกร้าวเนื่องจากการรับน้ำหนักเห็นได้ชัดว่ารอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นไม่ได้เกิดจาก Bending stress



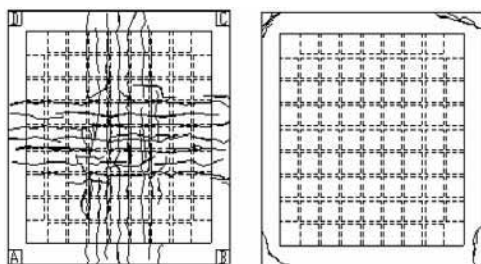
รูปที่ 6 การสังเกตรอยร้าวโดยผู้เชี่ยวชาญ

### 3.3 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

การวิจัยนี้ได้ทำการเจาะพื้นในบริเวณที่พบรอยร้าวเพื่อทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตจำนวน 12 ตัวอย่าง รูปที่ 9 แสดงตำแหน่งที่มีการเจาะเก็บตัวอย่าง เมื่อพิจารณาถึงลักษณะของแก่นคอนกรีตที่ทำเจาะขึ้นมาเพื่อทำการทดสอบ พบว่า ไม่มีรอยร้าวทั้งด้านเหนือและใต้ Neutral axis ดังรูปที่ 10

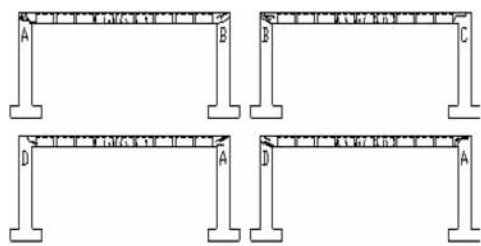


รูปที่ 7 รูปแบบการแตกร้าว



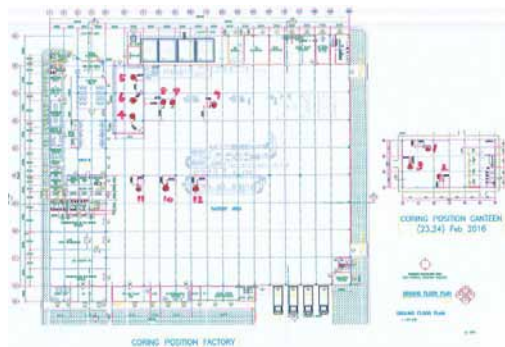
(a) bottom

(b) top



(c) interior

รูปที่ 8 การแตกร้าวเนื่องจากการรับน้ำหนัก



รูปที่ 9 ตำแหน่งเจาะเก็บตัวอย่าง



รูปที่ 10 รอยร้าวบริเวณ Neutral axis

เมื่อเปรียบเทียบกำลังของคอนกรีตเจาะทดสอบกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้ในการออกแบบตามมาตรฐาน ACI 318 ในกรณีที่มีจำนวนตัวอย่างน้อยกว่า 15 ตัวอย่าง สมการ 1 แสดงการคำนวณกำลังของคอนกรีตที่ต้องการ รูปที่ 11 แสดงลักษณะการวิบัติของคอนกรีตทดสอบตารางที่ 1 แสดงผลการคำนวณกำลังของคอนกรีตทดสอบ พบว่า กำลังของคอนกรีตเจาะทดสอบน้อยกว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้ในการออกแบบ เมื่อพิจารณาตามมาตรฐาน ACI 214R-02 กำหนดให้ 10% ของกำลังของคอนกรีตเจาะทดสอบไม่น้อยกว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้ในการออกแบบซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2 และ 3 ผลลัพธ์แสดงในตารางที่ 1 พบว่า กำลังของคอนกรีตเจาะทดสอบมากกว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้ในการออกแบบเล็กน้อย

$$f_c = f_{cr} - 8.3 \quad (1)$$

$$f_c = f_{cr} - zS \quad (2)$$

$$f_c = f_{cr}(1 - zV) \quad (3)$$



รูปที่ 11 ลักษณะการวิบัติของคอนกรีตทดสอบ

### 3.4 ผลการตรวจสอบ Slump ของคอนกรีต

การวิจัยนี้ได้พิจารณา ค่า Slump ของคอนกรีตที่ใช้ในโครงการเปรียบเทียบกับค่า Slump ของคอนกรีตที่กำหนดในมาตรฐาน ASTM C 94 ในตารางที่ 2 พบว่า ค่า Slump ของคอนกรีตที่ใช้ในโครงการเท่ากับ 12 เซนติเมตร ในขณะที่มาตรฐาน ASTM C 94 กำหนดให้ค่า Slump ของคอนกรีตสำหรับงานพื้นเท่ากับ 7.5 เซนติเมตร รูปที่ 12 แสดงการทดสอบ ค่า Slump ของคอนกรีตที่ใช้ในโครงการ



รูปที่ 12 การทดสอบ ค่า Slump ของคอนกรีต

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์กำลังของคอนกรีตเจาะทดสอบตามมาตรฐาน ACI

ที่	$f_{cr}$ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทดสอบ	$f_c$ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ต้องการ (MPa)		
		$f_c = f_{cr} - 8.3$ ตามข.11	$f_c = f_{cr} - zS$ ตามข.12	$f_c = f_{cr}(1 - zV)$ ตามข.13
1	27.300	19.000	23.358	23.454
2	27.500	19.200	23.558	23.626
3	29.200	20.900	25.258	25.086
4	26.000	17.700	22.058	22.337
5	32.900	24.600	28.958	28.265
6	28.300	20.000	24.358	24.313
7	24.600	16.300	20.658	21.134
8	30.000	21.700	26.058	25.774
9	23.200	14.900	19.258	19.932
10	32.900	24.600	28.958	28.265
11	24.800	16.500	20.858	21.306
12	29.100	20.800	25.158	25.001
เฉลี่ย	27.983	19.683-23.544	24.041-23.544	24.041-23.544
		ไม่ผ่าน	ผ่านเล็กน้อย	ผ่านเล็กน้อย

### 4. สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้ประยุกต์ใช้การทดสอบรวมกับการวิเคราะห์ข้อมูลที่เกี่ยวข้องในหลากหลายมิติเพื่อ

วิเคราะห์การวิบัติของพื้นโรงงานที่ก่อสร้างแล้วเสร็จ 2 ปี โดยพื้นโรงงานดังกล่าวยังไม่ได้มีการใช้งานตามที่ออกแบบไว้แต่กลับมีรอยร้าว

**ตารางที่ 2** ค่า Slump ของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 94

Concrete construction	Slump, mm (in.)	
	Maximum*	Minimum
Reinforced foundation walls and footings	75 (3)	25 (1)
Plain footings, caissons, and substructure walls	75 (3)	25 (1)
Beams and reinforced walls	100 (4)	25 (1)
Building columns	100 (4)	25 (1)
Pavements and slabs	75 (3)	25 (1)
Mass concrete	75 (3)	25 (1)

ผลการวิจัยพบว่ารอยร้าวเกิดขึ้นจาก 2 สาเหตุ คือ การออกแบบที่ไม่ถูกต้อง และคุณสมบัติของคอนกรีตพื้นที่ไม่เหมาะสม เนื่องจากพบว่าค่าโมเมนต์ลบของพื้นในแถบเสาที่ออกแบบน้อยกว่าค่าโมเมนต์ที่ต้องการ และค่าหน่วยแรงเฉือนทะเลที่ออกแบบน้อยกว่าค่าหน่วยแรงเฉือนทะเลที่ต้องการ และเมื่อพิจารณากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเจาะทดสอบจำนวน 12 ตัวอย่าง พบว่ากำลังรับแรงอัดมีค่าน้อยกว่าค่าที่ยอมให้ตามมาตรฐาน ACT 318 เมื่อพิจารณาค่า Slump ของคอนกรีตที่ใช้ในโครงการพบว่ามีความมากกว่าค่า Slump ของคอนกรีตงานพื้นที่กำหนดในมาตรฐาน ASTM C 94

## รายการอ้างอิง

ACI 318-05. (2005). *Building code requirements for structural concrete and commentary*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

ASTM C 94. (2005). *Standard test method for obtaining and testing drilled cores and sawed beams of concrete*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

ห้องประชุม 314  
ด้านเทคโนโลยีอาคาร



การประยุกต์ใช้วิศวกรรมคุณค่าเป็นแนวทางในการเลือกวิธีติดตั้ง  
โครงสร้างหลังคาเหล็กรูปพรรณพาดช่วงกว้างสนามฟุตซอล  
Application of Value Engineering for Installation Method Guideline  
of Wide-Span Steel Roof Structure of Futsal Stadium

ศราวดี ทรัพย์มากมี<sup>1</sup> และ ดร. เทอดธิดา ทิพย์รัตน์<sup>2</sup>  
Sarawat Sapmakmee<sup>1</sup> and Thoedtida Thipparat, Ph.D.<sup>2</sup>  
คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย  
E-mail: sapmakmee@hotmail.com<sup>1</sup>, thiprat.t@gmail.com<sup>2</sup>

### บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรมคุณค่าในการเลือกวิธีการติดตั้งโครงสร้างหลังคาเหล็กรูปพรรณพาดช่วงกว้างสนามฟุตซอล การศึกษาในครั้งนี้ได้ศึกษาในส่วนที่เป็นโครงสร้างหลังคาเหล็กรูปพรรณพาดช่วงกว้างของสนามฟุตซอลกรณีศึกษา ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรมคุณค่ามีทั้งภาพถ่าย ขนาดของอาคาร แบบก่อสร้าง รายการคำนวณ และวิธีติดตั้งโครงสร้างหลังคาเหล็กรูปพรรณ เพื่อนำมาวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรมคุณค่าระบบหลังคาเคเบิลรับแรงดึงช่วยรับการทรุดตัวของหลังคา ทางเลือกแบบเคเบิลซึ่งเป็นทางเลือกที่ระบุในสัญญาก่อสร้าง ส่วนแบบใช้เหล็กรับแรงดึง ได้ถูกนำมาสร้างเป็นแบบจำลองเพิ่มเติม เพื่อนำไปวิเคราะห์หาผลประโยชน์ที่เพิ่มขึ้น ผลการศึกษา พบว่า โครงสร้างหลังคาเหล็กรูปพรรณพาดช่วงกว้างสนามฟุตซอลแบบเคเบิลซึ่ง ต้องมีการทดสอบแรงดึง ซึ่งกินเวลาถึง 2 เดือน ซึ่งจะไม่ทันการใช้งานสนามฟุตซอล การเปลี่ยนจากวิธีเคเบิลซึ่งมาใช้เป็นใช้เหล็กรับแรงดึงแทนจะสามารถประหยัดเวลาได้ถึงครึ่งหนึ่งของวิธีเคเบิลซึ่ง

### Abstract

This research aims to apply the value engineering analysis for selecting an appropriate installation method for wide-span steel roof structure of a futsal stadium. A case study was used for data collection. Data to be acquired include site picture, construction drawings, calculation sheets, construction standard, building plans, and construction method statement. Value engineering analysis is conducted for cable suspended roof system. The system is used to protect roof settlement. Original installation method is cable stayed system. After initial value engineering, cable rod system is created. The results showed that the cable rod system had shorter installation time for the duration of only one month comparing to the original alternative which required 2 months construction. Time can be saved by 50% comparing to the original installation method.

**คำสำคัญ (Keywords):** วิศวกรรมคุณค่า (Value Engineering), สนามฟุตบอล (Futsal Stadium), หลังคาซิง (Cable Suspended Roof), หลังคาเหล็ก (Steel Roof), เวลา (Duration)

## 1. คำนำ

ปัจจุบันกีฬาฟุตบอล (Futsal) ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในประเทศไทย เนื่องจากเป็นเกมกีฬาที่มีความน่าตื่นเต้นและสนุกสนานและมีความเหมาะสมในทุกสภาพอากาศ ปัจจัยสำคัญที่ทำให้ความนิยมมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นคือประเทศไทยได้เป็นเจ้าภาพจัดการแข่งขันฟุตบอลชิงแชมป์โลกครั้งที่ 7 อย่างไรก็ตามพบว่า ปัญหาในการแข่งขันกีฬาฟุตบอล คือ ความจำกัดพื้นที่ของสนามที่ดำเนินการโดยภาครัฐบาล ซึ่งปัจจุบันพบว่ามีความค่อนข้างน้อย และพบว่าสภาพอากาศที่ค่อนข้างร้อนอบอ้าวไม่มีหลังคาปกคลุมพื้นที่สนาม แต่ด้วยความเป็นที่นิยมของกีฬาฟุตบอลทำให้มีธุรกิจประเภทสนามฟุตบอลของเอกชนเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ปัจจุบันพบว่ามีสนามฟุตบอลในเขตกรุงเทพมหานครทั้งสิ้น 102 โครงการ แบ่งเป็นสนามฟุตบอลในร่ม จำนวน 68 โครงการ สนามฟุตบอลกลางแจ้ง จำนวน 34 โครงการ (ธนศักดิ์, 2557)

โดยทั่วไปลักษณะของสนามฟุตบอลจะมีการใช้โครงสร้างหลังคาผาดช่วงกว้างครอบคลุมพื้นที่เพื่อให้สามารถดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ ได้ และสามารถป้องกันสภาพดินฟ้าอากาศได้ ด้วยความต้องการพื้นที่โล่งภายในอาคารเพื่อการใช้งานลักษณะต่าง ๆ การออกแบบระบบโครงสร้างจึงเป็นโครงสร้างหลังคาช่วงผาดกว้าง โดยผู้ออกแบบจะเลือกใช้เหล็กรูปพรรณในโครงสร้างลักษณะดังกล่าวเนื่องจากมีความแข็งแรงของวัสดุมาก สามารถใช้ปริมาณวัสดุที่น้อยกว่าโครงสร้างประเภทอื่น การใช้เหล็กรูปพรรณทำให้หน้า

ตัดโครงสร้างเล็ก น้ำหนักโครงสร้างเบา และ การใช้เหล็กรูปพรรณทำให้รูปแบบการก่อสร้างมีหลากหลายซึ่งตอบสนองต่อรูปแบบของโครงสร้างที่หลากหลายทั้งด้านรูปทรงและขนาด รูปหน้าตัดองค์อาคารของโครงสร้างนั้น ๆ ผู้ออกแบบและผู้รับเหมาก่อสร้างต้องพิจารณาถึงพฤติกรรมโดยรวมของโครงสร้างสนามกีฬาแตกต่างกันออกไป

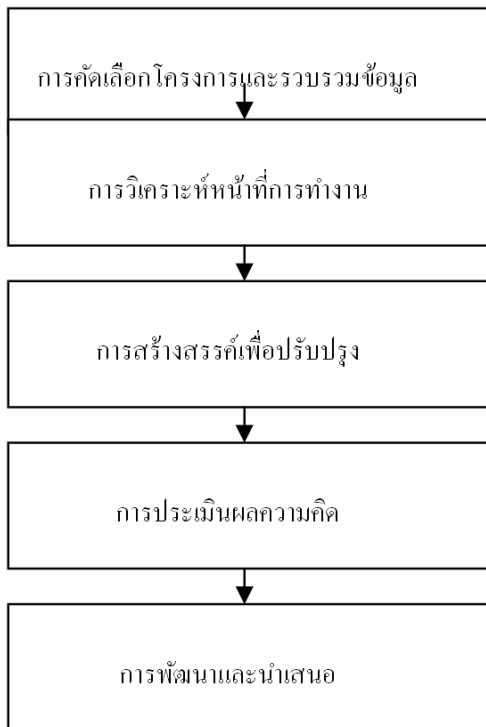
โครงการสนามกีฬาบางกอกอารีนา (Bangkok Arena) หรือบางกอกฟุตซอลอารีนา เป็นสนามกีฬาในร่มของประเทศไทยสร้างขึ้นเพื่อรองรับการแข่งขันฟุตบอลชิงแชมป์โลกครั้งที่ 7 ซึ่งประเทศไทยเป็นเจ้าภาพ โดยมีโครงการพัฒนาเป็นศูนย์กีฬาทางฝั่งตะวันออกของกรุงเทพมหานครในอนาคต โครงการดังกล่าว มีระยะเวลาการก่อสร้าง 250 วันจากปกติต้องใช้เวลา 500 วัน เป็นผลให้ต้องเร่งงานก่อสร้าง เพื่อให้การก่อสร้างเป็นไปด้วยความรวดเร็วยิ่งขึ้น การนำเทคโนโลยีเข้ามาช่วยจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มความสามารถในการเร่งงาน การจำลองอาคารเสมือนจริงในคอมพิวเตอร์จึงเป็นทางเลือกทางหนึ่งที่มีประสิทธิภาพเนื่องจากใช้เวลาน้อยและมีค่าใช้จ่ายต่ำ ในงานวิจัยนี้จึงได้มีการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และนำแนวคิดทางด้านวิศวกรรมคุณค่ามาประยุกต์ในการจัดขั้นตอนที่เหมาะสมในการปรับเปลี่ยนวิธีการก่อสร้าง

1) เพื่อศึกษาวิธีการก่อสร้างระบบช่วยรับภาระตัวของหลังคาหรือระบบหลังคาเคเบิลรับแรงดึงด้วยวิธีเคเบิลซิงและวิธีใช้เหล็กกับแรงดึง

2) เพื่อเปรียบเทียบวิธีก่อสร้างวิธีเคเบิลซิง และวิธีใช้เหล็กรับแรงดึงโดยการประยุกต์ใช้แนวคิดทางด้านวิศวกรรมคุณค่า

## 2. วิธีการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัยเพื่อศึกษาการเปรียบเทียบวิธีก่อสร้างวิธีเคเบิลซิง และวิธีใช้เหล็กรับแรงดึง โดยการประยุกต์ใช้แนวคิดทางด้านวิศวกรรมคุณค่าสามารถแบ่งได้เป็น 5 ขั้นตอนหลัก ดังแสดงในรูปที่ 1 (มานพ และคณะ, 2558)



รูปที่ 1 ผังแสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

### 2.1 การคัดเลือกโครงการ และการรวบรวมข้อมูล

ในกรณีศึกษานี้ได้เลือกโครงการสนามกีฬาบางกอกอารีนา เนื่องจากในการออกแบบได้กำหนดให้ใช้งานได้หลากหลาย คำนึงถึงประโยชน์

การใช้งานในอนาคต ที่สามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบการใช้งานได้หลากหลาย (Multi-Purpose) เพื่อรองรับกิจกรรมทั้งในระดับประเทศและระดับนานาชาติ อีกทั้งมีความโดดเด่นด้วยโครงสร้างทางวิศวกรรมขั้นสูง ด้วยการออกแบบโครงสร้างเป็นโครงสร้างรับแรงดึง (Tensile Structure) ในลักษณะเดียวกับสะพานซิง (Cable-stayed Bridge) ซึ่งใช้วิศวกรรมขั้นสูงและมีประสิทธิภาพสูงสุดในโลก ณ ปัจจุบัน ซึ่งเรียกว่า ระบบหลังคาเคเบิลรับแรงดึง

### 2.2 การวิเคราะห์หน้าที่การทำงาน

เริ่มต้นจากการจัดหมวดหมู่และจำแนกส่วนประกอบของอาคารสนามกีฬาบางกอกอารีนา โดยยึดตามการแยกโครงสร้างงานและแผนงานก่อสร้างของโครงการ เพื่อให้สะดวกในการใช้ในการสอบถามในส่วนถัดไป

### 2.3 การสร้างสรรค์เพื่อปรับปรุง

นำความเป็นไปได้ในการใช้วิธีการก่อสร้างที่ต่างกันคือวิธีเคเบิลซิง และวิธีใช้เหล็กรับแรงดึง มาวิเคราะห์และสังเคราะห์ เพื่อให้ได้วิธีการก่อสร้างที่สร้างสรรค์ใหม่ โดยยังคงเน้นจุดมุ่งหมายของระบบหลังคาเคเบิลรับแรงดึง

### 2.4 การประเมินผลความคิด

นำวิธีเคเบิลซิง และวิธีใช้เหล็กรับแรงดึง มาสร้างแบบจำลอง 3 มิติในคอมพิวเตอร์ โดยสร้างแบบจำลอง 3 มิติทุกรูปแบบที่ได้วิเคราะห์และสังเคราะห์ในขั้นตอนที่กล่าวมาแล้ว

### 2.5 การพัฒนาและนำเสนอ

ภายหลังจากการสร้างแบบจำลอง 3D ได้นำข้อมูลทั้งหมดมาวิเคราะห์เป็น 2 ส่วนคือ เวลาที่

การประยุกต์ใช้วิศวกรรมคุณค่าเป็นแนวทางในการเลือกวิธีติดตั้งโครงสร้าง  
หลังคาเหล็กรูปพรรณพาดช่วงกว้างสนามฟุตบอล  
ศรวาตรี ทรัพย์มากมี และ ดร. เทอดธิดา ทิพย์รัตน์

ลดลง และส่วนที่สอง คือ ค่าใช้จ่ายที่ลดลง โดย  
นำข้อมูลจากแบบจำลอง 3D ไปวิเคราะห์ต่อโดย  
ผู้เชี่ยวชาญ

### 3. ผลการวิจัย

#### 3.1 ข้อมูลในส่วนของโครงการกรณีศึกษา

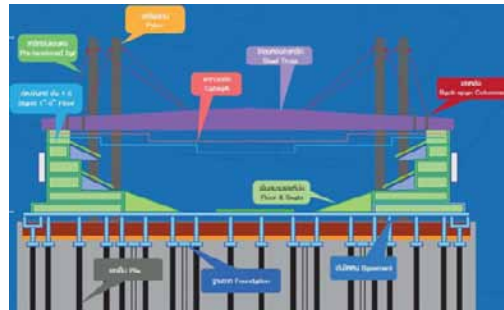
โครงการตัวอย่างที่จะนำมาประกอบการ  
วิจัยนี้คือโครงการสนามกีฬาบางกอกอารีนา ตัว  
อาคารสนามเป็นทรงแปดเหลี่ยม ซึ่งได้รับแรง  
บันดาลใจจากรูปทรงของดอกจอกหลังคามี  
ลักษณะเหมือนกลีบดอกจอกที่วางเรียงเป็นชั้น  
ดังแสดงในรูปที่ 1 ตัวอาคารมีพื้นที่ใช้ประโยชน์  
5 ชั้น พื้นที่รวม 30,000 ตารางเมตร เป็นอาคาร  
สูง 34 เมตร และเสาไฟลอน (Pylon) สูง 56  
เมตร ดังแสดงในรูปที่ 2 รูปที่ 3 แสดงภาพตัดตัว  
อาคาร ฐานรากและโครงสร้างรับแรงดึง



รูปที่ 1 ตัวอาคารสนามเป็นทรงแปดเหลี่ยม



รูปที่ 2 ภาพรวมโครงการ



รูปที่ 3 รูปตัดโครงการ

โครงสร้างหลักของระบบหลังคาเคเบิลรับ  
แรงดึง ประกอบด้วย 4 ส่วน ดังนี้

1) เสาไฟลอน เป็นเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก  
ขนาด 2.50x2.50x56.00 เมตร สูง 56 เมตร ตั้ง  
อยู่ 4 มุมของสนาม มุมละ 2 ต้น ทำหน้าที่รับ  
แรงอัดจากน้ำหนักบรรทุกของโครงหลังคาเหล็ก  
ที่ส่งแรงมายังเหล็กรับแรงดึงตัวหน้าและด้านข้าง  
ซึ่งอยู่ระหว่างเสาไฟลอนกับโครงหลังคาเหล็ก  
หากงานก่อสร้างเสาไฟลอนไม่แล้วเสร็จจะ  
ไม่สามารถติดตั้งโครงหลังคาได้

2) เสาหลัง เป็นเสาเหล็กรูปตัว H หล่อคอน-  
กรีตหุ้มผิวนอกไว้ สูง 34 เมตร ตั้งอยู่ด้านหลัง  
และขนานกับเสาไฟลอน มุมละ 2 ต้น ทำหน้าที่  
รับแรงดึงที่ถ่ายจากเสาไฟลอนมายังเหล็กรับ  
แรงดึง ซึ่งอยู่ระหว่างเสาไฟลอนกับเสาหลัง

3) โครงหลังคาเหล็ก เป็นหลังคาที่มีช่วงยาว  
116x132 เมตร โดยไม่มีเสากลาง น้ำหนักโครง  
หลังคาเหล็กประมาณ 2,600 ตัน น้ำหนักรวม  
โครงสร้างอื่นๆ ประมาณ 3,800 ตัน โครงสร้าง  
อื่นๆ ประกอบด้วย โครงเหล็กย่อย แป้ แผ่น  
หลังคาโลหะ แผ่นโพลีคาร์บอเนต ฝ้าเพดานผ้า  
ใบแคทวอลค์ และจอแสดงผลขนาดใหญ่ภายใน  
สนามที่เกาะเกี่ยวโครงหลังคา

4) เหล็กรับแรงดึง มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 40-  
95 มิลลิเมตร ขนาดท่อนละอย่างน้อย 5.8 เมตร

นำมาต่อกันด้วยข้อต่อ (Coupler) ที่มีคุณสมบัติแน่นเหนียวเป็นพิเศษ เพื่อถ่ายเทน้ำหนักบรรทุกจากโครงหลังคาเหล็กลงบนเสาไฟลอนและถ่ายเทแรงดึงจากเสาไฟลอนลงบนเสาหลัง มีจำนวน 32 ชุด ชุด 4 เส้น รวม 128 เส้น

### 3.2 การเปรียบเทียบขั้นตอนการก่อสร้าง

วิธีการก่อสร้างของระบบหลังคาเคเบิ้ลรับแรงดึง ที่นำมาเปรียบเทียบกับได้แก่วิธีเคเบิ้ลซิง และวิธีใช้เหล็กรับแรงดึง รูปที่ 4 และ 5 แสดงวิธีการก่อสร้างด้วยวิธีเคเบิ้ลซิง และวิธีใช้เหล็กรับแรงดึงตามลำดับ รูปที่ 6 และ 7 แสดงขั้นตอนการก่อสร้างด้วยวิธีเคเบิ้ลซิง และวิธีใช้เหล็กรับแรงดึง ตามลำดับ

ขั้นตอนการก่อสร้างด้วยวิธีเคเบิ้ลซิง ประกอบด้วย

ขั้นตอน 1 จัดทำฐานรากและ temporary support ติดตั้งlifting tower และ lifting jack จำนวน 8 ตำแหน่ง ติดตั้ง lifting frame ที่เสาไฟลอน จำนวน 4 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 6

ขั้นตอน 2 เคลื่อนย้าย roof truss part 1 และ 2 มาที่หน้างานโดยวางบน JC assembly ดังแสดงในรูปที่ 6

ขั้นตอน 3 เคลื่อนย้าย roof truss part 1 และ 2 มาที่หน้างานโดยวางบน JC assembly ดังแสดงในรูปที่ 6

ขั้นตอน 4 ยก roof truss ส่วนกลางขึ้นมาที่ level 2 เพื่อเชื่อมต่อกับ roof truss ส่วนปลายทั้งสองด้าน

ขั้นตอน 5 ยก roof truss ขึ้น level 5 ใช้ mobile crane ยก roof truss part 3 ส่วนปลายทั้งสองด้านมาเชื่อมต่อกับ roof truss หลัก

ขั้นตอน 6 ติดตั้งและทดสอบแรงดึงของเคเบิ้ลซิง

ขั้นตอน 7 รื้อถอน temporary support ขั้นตอนการก่อสร้างด้วยวิธีใช้เหล็กรับแรงดึง ประกอบด้วย

ขั้นตอน 1 งานเชื่อม

ขั้นตอน 2 งานฐานราก สำหรับฐานราก temporary support มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบ

ขั้นตอน 3 งานเสาไฟลอน เสา คาน พื้น โดยเสา temporary support ที่ออกแบบใหม่จะวางบนพื้นอัดจันทร์ ทำให้ต้อง block out พื้นคอนกรีตอัดแรงที่หลัง ดังรูปที่ 8

ขั้นตอน 4 ทำการแบ่ง main truss ออกเป็นส่วน ๆ แล้วทำการยกขึ้นติดตั้ง ดังรูปที่ 9

ขั้นตอน 5 ยก main truss ขึ้นติดตั้งบนตำแหน่งจนครบพร้อมดำเนินงานเสาคานและพื้นด้านล่าง

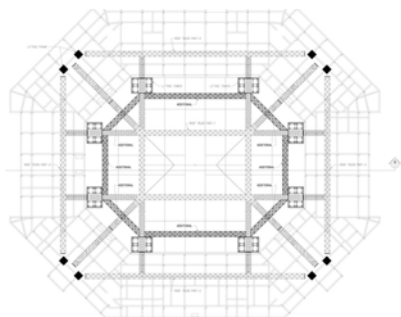
ขั้นตอน 6 ติดตั้ง sub truss ดำเนินงานเสาคาน และพื้นบริเวณชั้น 3

ขั้นตอน 7 ติดตั้งใช้เหล็กรับแรงดึง ตามขั้นตอนที่กำหนด ดังรูปที่ 10 ติดตั้ง catwalk รื้อถอน temporary support

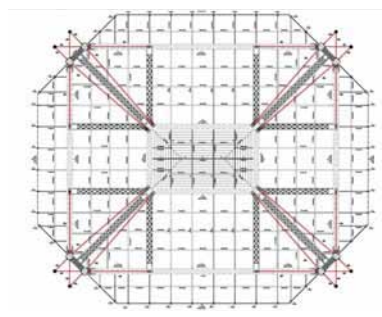
ขั้นตอน 8 และ 9 งานสถาปัตยกรรม เช่น งานฉาบ งานปูพื้น งานติดตั้งฝ้า ประตู หน้าต่าง และงานทาสี

การแบ่ง main truss ออกเป็นส่วน ๆ แล้วทำการยกขึ้นติดตั้งทำให้สามารถใช้พื้นที่ด้านล่างในการดำเนินงานก่อสร้างพื้น คาน และเสาในชั้นต่าง ๆ ได้โดยไม่ต้องรอให้โครงหลังคาประกอบเสร็จก่อนบนพื้นล่าง ดังรูปที่ 11 ที่แสดงการทำงานเสาและคานด้านล่างตลอดจนการวางขึ้น main truss เพื่อเตรียมยกขึ้นติดตั้ง รูปที่ 12 แสดงแผนการทำงานที่สามารถทำไปพร้อม ๆ กัน ซึ่งแตกต่างจากวิธียก main truss ทั้งตัวขึ้น

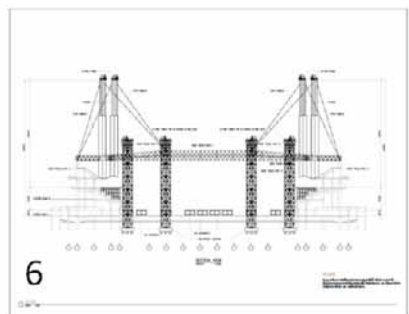
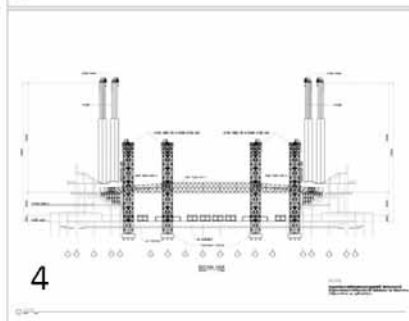
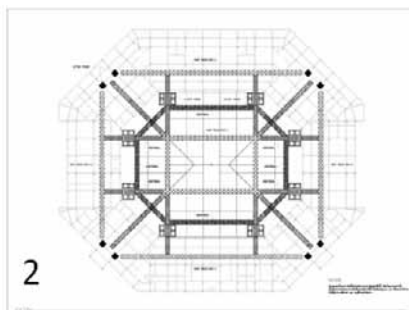
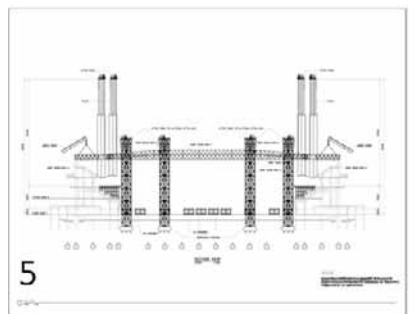
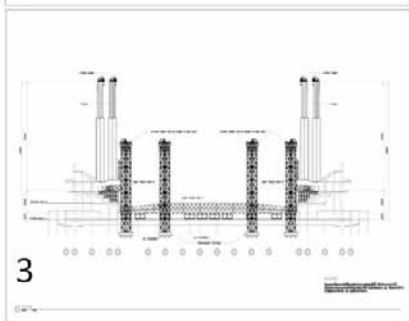
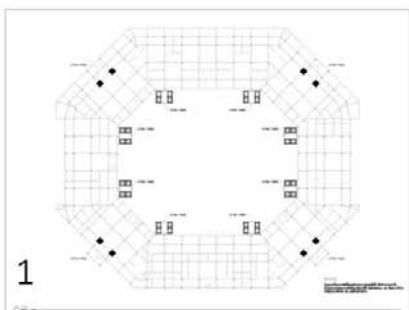
68 การประยุกต์ใช้วิศวกรรมคุณค่าเป็นแนวทางในการเลือกวิธีติดตั้งโครงสร้าง  
 หลังคาเหล็กรูปพรรณพาดช่วงกว้างสนามฟุตบอล  
 ศรวาตมิ ทรัพย์มากมี และ ดร. เทอดธิดา ทิพย์รัตน์



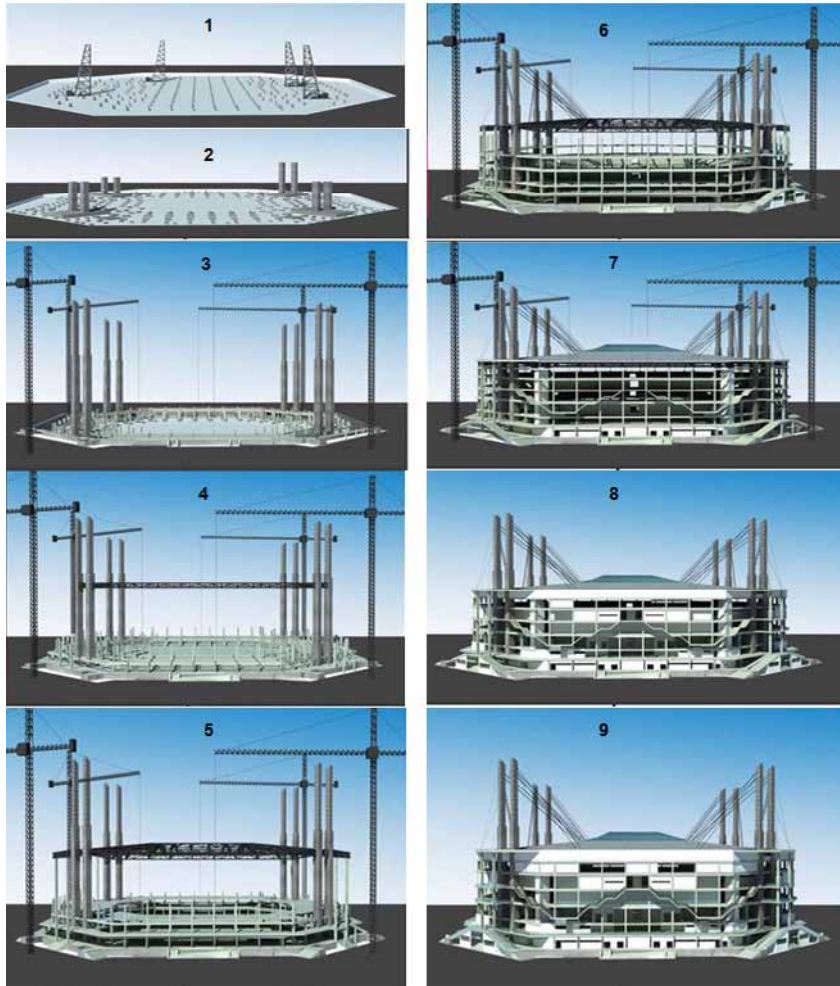
รูปที่ 4 วิธีการก่อสร้างด้วยวิธีเคเบิลซิง



รูปที่ 5 วิธีการก่อสร้างด้วยวิธีใช้เหล็กรับแรงดึง



รูปที่ 6 ขั้นตอนก่อสร้างด้วยวิธีเคเบิลซิง



รูปที่ 7 ขั้นตอนก่อสร้างด้วยวิธีใช้เหล็กรับแรงดึง



รูปที่ 8 เสา temporary support ที่ออกแบบใหม่สำหรับวิธีใช้เหล็กรับแรงดึง



รูปที่ 9 การยกติดตั้ง main truss ที่แบ่งเป็นส่วนสำหรับวิธีใช้เหล็กรับแรงดึง

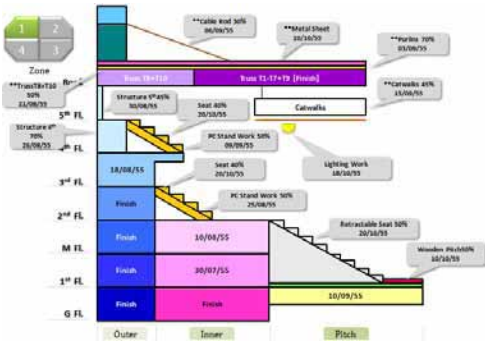


รูปที่ 10 การติดตั้งโดยใช้เหล็กรับแรงดึง

วิธีเคเบิลซิง สำหรับงานก่อสร้างโครงสร้าง  
 หลังคาเหล็กรูปพรรณพาดช่วงกว้างต้องมีกร  
 ทดสอบแรงดึง ซึ่งผู้เชี่ยวชาญประมาณเวลาที่ใช้  
 เวลา 2 เดือน ซึ่งจะไม่ทันการใช้งานสนาม เมื่อ  
 ทำการเปลี่ยนวิธีจากเคเบิลซิง มาใช้ป็นวิธีใช้  
 เหล็กรับแรงดึง ทำให้สามารถประหยัดเวลาได้ถึง  
 1 เดือน หรือเป็นครึ่งหนึ่งของวิธีเคเบิลซิง

#### 4. สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์  
 ทางด้านวิศวกรรมคุณค่าในการเลือกวิธีการติด  
 ตั้งโครงสร้างหลังคาเหล็กรูปพรรณพาดช่วงกว้าง  
 สนามฟุตบอล เพื่อลดระยะเวลาในการก่อสร้าง  
 ด้วยเวลาในการก่อสร้างมีเพียง 8 เดือนครึ่ง เพื่อ  
 ให้พร้อมสำหรับการเป็น เจ้าภาพการแข่งขัน  
 ฟุตบอลโลกครั้งที่ 7 พบว่า วิธีใช้เหล็กรับแรงดึง  
 ทำให้สามารถประหยัดเวลาได้ถึง 1 เดือน หรือ  
 เป็นครึ่งหนึ่งของวิธีเคเบิลซิง ที่เสนอในตอนแรก  
 นอกจากนี้ด้วยภายใต้เงื่อนไขอันจำกัดจึงได้ใช้  
 เทคโนโลยีการก่อสร้างที่สามารถลดเวลาในทุก  
 ขั้นตอน เช่น การประกอบชิ้นส่วนโครงหลังคา  
 main truss บริเวณข้างสนามตั้งแต่ช่วงตอกเสา  
 เข็ม เพื่อยกไปประกอบบนเสานั่งร้านชั่วคราว  
 ในช่วงเสาไหลอนใกล้แล้วเสร็จทำให้งานเดิน  
 หน้าไปพร้อมกัน โดยไม่ต้องรอให้โครงหลังคา  
 ประกอบเสร็จก่อนบนพื้นล่างลดความเสี่ยงใน  
 การยกโครงหลังคาทั้งชิ้นซึ่งน้ำหนักมาก



รูปที่ 11 แผนการทำงานส่วน main truss และโครงสร้าง  
 ด้านล่างสำหรับวิธีใช้เหล็กรับแรงดึง



รูปที่ 12 การทำงานด้านล่างตลอดจนการวางชิ้น main  
 truss เพื่อเตรียมยกขึ้นติดตั้งสำหรับวิธีใช้เหล็กรับแรงดึง

## รายการอ้างอิง

- ธนศักดิ์ พิทยากร. (2557). *โครงสร้างหลังคาเหล็ก  
รูปพรรณพาดช่วงกว้างสนามฟุตบอลในเขต  
กรุงเทพมหานคร*. วิทยานิพนธ์สถาปัตยกรรมศาสตร์มหาบัณฑิตสถาบันเทคโนโลยี  
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- มานพ แก้วโมราเจริญ, ชัชวิทย์ รื่นนารีนารถ,  
สุนิตา เอื้อวิริยานุกูล และ พิมพ์สิริ ไตวิจิตร.  
(2558). *การประยุกต์ใช้วิศวกรรมคุณค่าและ  
บิม เป็นแนวทางในการเลือกรูปแบบโดย  
วิเคราะห์อุณหภูมิในอาคารที่พักอาศัย*. การ  
ประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่  
ที่ 20 วันที่ 8-10 กรกฎาคม 2558 จ. ชลบุรี

# สมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาผสมต้นข้าวโพด

## Mechanical Properties of Lightweight Concrete Mixed Corn Stalks

เสาวนีย์ ศึกษา<sup>1</sup> และ ธานัท วรณกุล<sup>2</sup>

Saowanee Sueksa<sup>1</sup> and Tanut Waroonkun<sup>2</sup>

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

E-mail: sueksa.s@gmail.com<sup>1</sup>, tanut.w@cmu.ac.th<sup>2</sup>

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลองมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมในการพัฒนาคอนกรีตมวลเบาผสมต้นข้าวโพดเพื่อให้ได้คอนกรีตน้ำหนักเบาแต่มีความแข็งแรงตามมาตรฐานอุตสาหกรรมคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ (มอก. 2601-2556) ซึ่งต้นข้าวโพดเป็นเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีมากทางภาคเหนือของประเทศไทย การนำต้นข้าวโพดกลับมาใช้ใหม่จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ที่ช่วยลดการเผาทำลายอันเป็นสาเหตุหลักของปัญหาหมอกควันได้ โดยอัตราส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาทั่วไปจะมีอัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์กับวัสดุมวลรวมอยู่ที่ 1:1 โดยน้ำหนัก งานวิจัยนี้จะนำต้นข้าวโพดมาบดละเอียดผ่านตะแกรงขนาด 5 มม. แล้วนำมาผสมแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 และ 0.7 โดยน้ำหนัก ซึ่งทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาผสมต้นข้าวโพด ขนาด 7x7x7 ซม. ที่อายุครบ 28 วัน ผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วนการแทนที่ทรายด้วยต้นข้าวโพดที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความต้านแรงอัดและค่าความหนาแน่นลดลงโดยอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการทำคอนกรีตมวลเบาผสมต้นข้าวโพด คืออัตราส่วนการแทนที่ทรายด้วยต้นข้าวโพดร้อยละ 5 จะมีความต้านแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 61.22 กก./ตร.ซม. และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมคือ 0.5 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ผ่านมาตรฐานอุตสาหกรรมคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ (มอก. 2601-2556)

### Abstract

This research is an experimental research aims to study the development of lightweight concrete mixed with corn stalks to reduce weight and yield the strength according to industry-standard cellular lightweight concrete (TIS 2601-2556), Corn stalks are agricultural waste generally obtained from Northern Thailand. Corn stalks are used as an alternative to reduce the waste incineration which is the main cause of haze. Normally, general lightweight concrete use cement and sand in the ratio of 1:1 by weight. The ground corn stalks passing through a standard 5 mm sieve were used to replace sand in the ratio of 0%, 5%, 10%, 15% and 20% by weight, and the ratio of water per cement were 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 and 0.7 by weight. The compressive strengths of 7x7x7 centimeter lightweight concrete mixed with corn stalks were

tested at the age of 28 days. The results showed that the increase of corn stalks replacing sand, resulted in a decrease of compressive strength and density. For the appropriate mixture lightweight concrete mixed with corn stalks, corn stalks was used to replace sand in the ratio of 5% to achieve the average compressive strength of 61.22 kg/cm<sup>2</sup>, and the water to cement ratio was 0.5. According to the industry-standard cellular lightweight concrete (TIS 2601-2556), the results were comparable to the standard.

**คำสำคัญ (Keywords):** คอนกรีตมวลเบา (Lightweight Concrete), ต้นข้าวโพด (Corn Stalk)

## 1. บทนำ

ข้าวโพด (Corn) เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญในหลายประเทศทั่วโลก โดยมีแหล่งเพาะปลูกที่สำคัญอยู่ในทวีปอเมริกา เอเชีย และแอฟริกา ซึ่งประเทศไทยมีปริมาณผลผลิตข้าวโพดต่อไร่ มากเป็นอันดับสองของทวีปเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยชนิดของข้าวโพดที่มีการเพาะปลูกมากที่สุดคือข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ปริมาณผลผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ของโลกในปี พ.ศ. 2553-2557 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 825.62 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2553 เป็น 989.19 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2557 หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.08 ต่อปี (Office of Global Analysis, 2015) ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของผลผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในประเทศไทย โดยเนื้อที่เพาะปลูก ปี พ.ศ. 2553-2557 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 7.10 ล้านไร่ ในปี พ.ศ. 2553 เป็น 7.54 ล้านไร่ ในปี พ.ศ. 2557 หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.28 ต่อปี เนื่องจากปี พ.ศ. 2553-2554 ภาครัฐมีการประกันรายได้เกษตรกรผู้ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ประกอบกับในปี พ.ศ. 2556 เกิดภาวะภัยแล้ง ราคาข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จึงปรับตัวสูงขึ้นมาก จึงทำให้เกษตรกรขยายเนื้อที่เพาะปลูกเพิ่มขึ้น ความต้องการใช้ข้าวโพดในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์มีมากขึ้น ตามการขยายตัวของ

อุตสาหกรรมการเลี้ยงสัตว์ โดยภาคเนื้อหมูมีผลผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มากที่สุด คิดเป็น 70% ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ คิดเป็น 21% และภาคกลาง คิดเป็น 9% ของผลผลิตทั้งประเทศ ตามลำดับ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2557)

จากแนวโน้มของปริมาณผลผลิตและความต้องการใช้ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้เกิดเศษวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดอัน ได้แก่ ต้น ใบ เปลือก และขังข้าวโพด เป็นจำนวนมาก ส่งผลตามมาซึ่งการกำจัดเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรอย่างผิดวิธี ด้วยการเผาทำลาย ซึ่งการเผาทำลายเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรส่งผลกระทบต่อคุณภาพอากาศ เป็นสาเหตุหลักของการเกิดหมอกควันเนื่องมาจากการเผาในที่โล่งทำให้ซึ้เฝ้าและฝุ่นละอองจากการเผาฟุ้งกระจายไปทั่วบริเวณ (เจียมใจ เครือสุวรรณ, 2551) โดยกรมควบคุมมลพิษได้ระบุค่าการปลดปล่อยฝุ่นละอองขนาดเล็กหรือฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน (PM<sub>10</sub>) จากการเผาเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมีค่า 7 กิโลกรัมทุก 1,000 กิโลกรัมของเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ถูกเผาไหม้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2555) และจากการศึกษาพบว่าสัดส่วนเศษวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดต่อผลผลิตข้าวโพดเท่ากับ 1.48 (วีรัชย์ อาหาญ, 2555) หากนำข้อมูลข้างต้นมาคำนวณ

ปริมาณผลผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ของประเทศ  
ไทยปี พ.ศ. 2557 เป็น 5.06 ล้านตัน พบว่าหลัง  
จากเก็บเกี่ยวจะทำให้เกิดเศษวัสดุเหลือทิ้งจาก  
ข้าวโพดมากถึง 7.49 ล้านตัน และหากทั้งหมดถูก  
กำจัดด้วยวิธีเผาทำลายจะก่อให้เกิดฝุ่นละออง  
ขนาดเล็กในปริมาณมากถึง 52,421.6 ตัน ฝุ่น  
ละอองขนาดเล็กเหล่านี้คือตัวชี้วัดคุณภาพอากาศ  
โดยกรมควบคุมมลพิษได้กำหนดค่ามาตรฐาน  
ฝุ่นละอองขนาดเล็ก เฉลี่ย 24 ชั่วโมง ไม่เกิน  
120 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) ประ  
เทศไทยประสบปัญหาภาวะหมอกควันบริเวณ  
พื้นที่ภาคเหนือในช่วงต้นปีตั้งแต่เดือนมกราคม-  
พฤษภาคมเป็นประจำทุกปี จากรายงานสถาน  
การณ์คุณภาพอากาศปี พ.ศ. 2557 พบว่า ค่า  
ฝุ่นละอองขนาดเล็ก ตรวจพบปริมาณสูงกว่าค่า  
มาตรฐานใน 23 จังหวัด จากทั้งหมด 29 จังหวัด  
ที่มีการตรวจวัด โดยค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมงสูงสุด  
เฉลี่ยทั่วประเทศ  $154 \mu\text{g}/\text{m}^3$  และค่าสูงสุดตรวจ  
วัดได้  $318 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ณ ตำบลจองคำ อำเภอเมือง  
จังหวัดแม่ฮ่องสอน ซึ่งเกินค่ามาตรฐานกำหนด  
อยู่ในระดับที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ (กรมควบคุม  
มลพิษ, 2557) ปัญหาหมอกควันส่งผลกระทบต่อ  
สุขภาพของประชาชน การสูญเสียทางเศรษฐกิจ  
และเป็นอุปสรรคในการคมนาคมขนส่ง

การเผาทำลายเศษวัสดุเหลือทิ้งทางจากข้าว  
โพดนอกจากจะเป็นสาเหตุหลักของปัญหาหมอก  
ควันแล้วยังเป็นการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก  
ซึ่งเป็นสาเหตุของภาวะโลกร้อน(Global Warming)  
โดยภาวะโลกร้อนเป็นภาวะที่อุณหภูมิโดยเฉลี่ย  
ของโลกสูงขึ้น ปัญหาภาวะโลกร้อนส่งผลต่อ  
การเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศในประเทศไทย  
ผลของอุณหภูมิในปัจจุบันที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อ  
นำมาวิเคราะห์ในเรื่องสภาวะน่าสบาย พบว่า  
จำนวนชั่วโมงที่อุณหภูมิสูงกว่าเขตสบายมีมาก

ถึง 90 % ต่อปี ซึ่งขอบเขตสภาวะน่าสบายที่  
เหมาะสมในสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้นของ  
ประเทศไทยควรอยู่ในระดับความชื้นสัมพัทธ์  
ระหว่าง 20 - 75% และอุณหภูมิระหว่าง 22 -  
27 °C (สุนทร บุญญาธิการ, วรสิทธิ์ บูรณา  
กาญจน์ และอรรจน์ เศรษฐบุตร, 2553) อุณหภูมิ  
ที่สูงเกินขอบเขตสภาวะน่าสบายทำให้ผู้อยู่  
อาศัยต้องอยู่ในสภาวะไม่สบาย ส่งผลต่อสุข  
ภาวะของผู้อยู่อาศัย และพลังงานที่เสียไปกับ  
การใช้เครื่องปรับอากาศเพื่อช่วยปรับอุณหภูมิ  
ให้อยู่ในสภาวะน่าสบาย

จากวิกฤติสภาวะโลกร้อนและปัญหาหมอก  
ควันในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ จึงได้มองเห็น  
โอกาสในการแก้ไขปัญหผ่านสถาปัตยกรรมโดย  
มุ่งเน้นที่การนำเศษวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพด  
กลับมาใช้ใหม่ในการพัฒนาวัสดุครอบอาคาร  
(Building Envelope Material) เพื่อใช้เป็นวัสดุ  
ทดแทนหรือเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุครอบ  
อาคาร งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองเพื่อ  
วิเคราะห์ถึงความเป็นไปได้ในการนำต้นข้าวโพด  
มาใช้เป็นวัสดุมวลรวมของผนังคอนกรีตมวลเบา  
ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ได้รับผลกระทบโดยตรง  
จากการแผ่รังสีความร้อนของดวงอาทิตย์ แนว  
คิดการนำต้นข้าวโพดกลับมาใช้ใหม่จึงเป็นอีก  
หนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจในการจัดการเพื่อเพิ่ม  
มูลค่าของเศษวัสดุเหลือทิ้ง ลดต้นทุนในการผลิต  
คอนกรีต และช่วยลดการเผาอันเป็นสาเหตุหลัก  
ของการเกิดหมอกควัน โดยจะคำนึงถึงความเป็น  
ไปได้ในการผลิตที่ลดต้นทุนการผลิต มีกระบวนการ  
ที่ไม่ซับซ้อน และสามารถผลิตในระดับครัว  
เรือนได้

## 2. วัสดุและวิธีการทดสอบ

การพัฒนาคอนกรีตมวลเบาผสมต้นข้าวโพด

มีแนวคิดในการนำต้นข้าวโพดมาเป็นวัสดุมวลรวมผสมกับปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตมวลเบา เพื่อช่วยลดปริมาณทรายและปูนซีเมนต์ ลดต้นทุนในการผลิต และทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักเบาขึ้น นอกจากนี้ การนำเศษวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดกลับมาใช้ใหม่ยังเป็นอีกทางเลือกที่ช่วยลดการเผาทำลายอันเป็นสาเหตุของปัญหาหมอกควัน โดยทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกลตามมาตรฐาน มอก. 2601-2556 ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine

## 2.1 อัตราส่วน

### 2.1.1 อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อวัสดุมวลรวม

โดยทั่วไปอัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ต่อวัสดุมวลรวมของคอนกรีตมวลเบาเท่ากับ 1:1 (Alida Abdullah and others, 2011) ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement) ตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 1-2553 โดยการผลิตคอนกรีตมวลเบาจะใช้วัสดุมวลรวมชนิดมวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า 4.75 มม. หรือสามารถร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ต้องไม่เล็กกว่า 0.07 มม. หรือร่อนค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200 (สำเร็จ รักซ้อน, 2552) ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้วัสดุมวลรวมได้แก่ ทรายกลาง และต้นข้าวโพดที่บดละเอียดด้วยเครื่องบดผ่านตะแกรงขนาด 5 มม. ซึ่งเป็นตะแกรงเหล็กปัมเจาะรูที่ใช้ติดตั้งในเครื่องบด การเลือกใช้ตะแกรงขนาดนี้เพื่อให้สอดคล้องกับขนาดของมวลรวมละเอียด เป็นขนาดของตะแกรงที่หาซื้อได้ง่ายทั่วไปและสะดวกในการผลิตภาคครัวเรือน

### 2.1.2 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 0.4 – 0.6 (อภิวิชญ์ พูลสง, 2556) โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เบื้องต้นเท่ากับ 0.5 คงที่ทุกส่วนผสม (Price, Yeargin, Fini & Abu-Lebdeh, 2014) ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรม พบว่า เป็นอัตราส่วนที่นิยมใช้และสะดวกต่อการทดลอง

### 2.1.3 อัตราส่วนการแทนที่ทรายด้วยต้นข้าวโพด

จากการศึกษาการนำเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาผสมกับเป็นมวลรวมคอนกรีตในงานวิจัยส่วนใหญ่จะทำได้ในปริมาณน้อย เนื่องจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับมวลรวมอื่นๆ การนำมาผสมเป็นมวลรวมจึงทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นลดลงส่งผลให้ความแข็งแรงของคอนกรีตลดลงด้วย โดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยต้นข้าวโพดร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่อยู่ในช่วงที่คอนกรีตมีความต้านแรงอัดที่ดี (Sisman, Gezer & Kocaman, 2011) และสะดวกต่อการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของชั้นทดสอบ

สูตร	อัตราส่วนผสม (โดยน้ำหนัก)	
	น้ำ:ปูนซีเมนต์:วัสดุมวลรวม	แทนที่ทรายด้วยต้นข้าวโพด
C00	0.5 : 1 : 1	0%
C05	0.5 : 1 : 1	5%
C10	0.5 : 1 : 1	10%
C15	0.5 : 1 : 1	15%
C20	0.5 : 1 : 1	20%

## 2.2 การผลิตชิ้นทดสอบ

### 2.2.1 วัสดุ

- 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ที่ผลิตได้ตามมาตรฐานมอก. 15 เล่ม 1-2553
- 2) ทราaylorกลาง ขนาด 1-3 มม.
- 3) ต้นข้าวโพดที่บดละเอียด ด้วยเครื่องบดเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร
- 4) น้ำประปา

### 2.2.2 การเตรียมชิ้นทดสอบ

- 1) ชำระล้างสิ่งสกปรกออกจากต้นข้าวโพด จากนั้นนำไปตากแดดให้แห้ง เป็นเวลา 7 วัน
- 2) บดย่อยต้นข้าวโพดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร
- 3) ทำการผสมปูนซีเมนต์และทรายในสภาพแห้งก่อน จากนั้นจึงเติมน้ำตามอัตราส่วนที่เตรียมไว้แล้วผสมให้เข้ากัน
- 4) นำต้นข้าวโพดลงไปผสมเป็นอันดับสุดท้าย เนื่องจากต้นข้าวโพดเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา มาก จึงอาจไปขัดขวางการผสมกันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำได้
- 5) นำวัสดุที่ผสมไว้มาใส่ในแบบหล่อขนาด 7x7x7 cm ที่เตรียมไว้ ปาดผิวหน้าให้เรียบ
- 6) ตั้งไว้ในแบบเป็นเวลา 3 วัน ก่อนถอดแบบ เนื่องจากคอนกรีตในอัตราส่วนที่มีต้นข้าวโพดเป็นส่วนผสมจะแห้งช้ากว่าปกติ
- 7) ถอดแบบให้ได้รูปทรงตามเกณฑ์มาตรฐาน บ่มในบรรยากาศปกติจนครบ 28 วัน
- 8) เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนดในการบ่ม ได้ชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ

## 2.3 วิธีการทดสอบ

วิธีการทดสอบแบ่งเป็น 2 ชุด ดังนี้

2.3.1 ชุดที่ 1 ทดสอบอัตราส่วนการแทนที่ทรายด้วยต้นข้าวโพด

2.3.1 ชุดที่ 2 ทดสอบอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

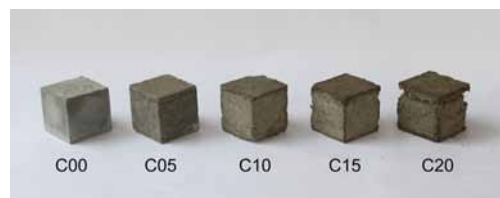
โดยแต่ละชุดจะทำการทดสอบ 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 เป็นการทดสอบลักษณะทางกายภาพ โดยศึกษาลักษณะของการขึ้นรูป สี และพื้นผิวของชิ้นทดสอบ ส่วนที่ 2 เป็นการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล โดยทำการทดสอบความหนาแน่นและความต้านแรงอัด ตามมาตรฐาน มอก.2601-2556 ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine จากนั้นนำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์และสรุปผล

## 3. ผลการศึกษา

ในศึกษาคอนกรีตมวลเบาผสมต้นข้าวโพด จะแบ่งเป็นการทดลองเป็น 2 ชุด คือ ชุดที่ 1 ทำการศึกษาอัตราส่วนการแทนที่ทรายด้วยต้นข้าวโพดที่เหมาะสม ชุดที่ 2 นำอัตราส่วนที่ผ่านมาตรฐาน มอก.2601-2556 จากการทดลองช่วงที่ 1 มาทำการทดสอบเพื่อหาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม

3.1 ผลการศึกษาอัตราส่วนการแทนที่ทรายด้วยต้นข้าวโพดที่เหมาะสม

3.1.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของอัตราส่วนการแทนที่ทรายด้วยต้นข้าวโพด



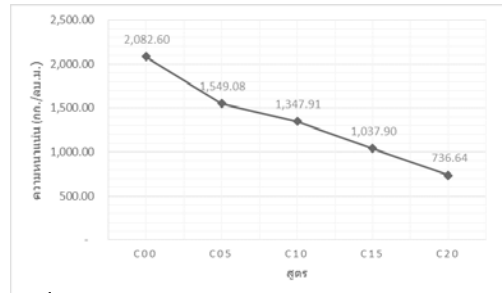
รูปที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของอัตราส่วนการแทนที่ทรายด้วยต้นข้าวโพด

จากการศึกษาการนำต้นข้าวโพดมาเป็นมวลรวมผสมกับคอนกรีตในอัตราส่วนการแทนที่ทรายด้วยต้นข้าวโพดร้อยละ 0, 5, 10,15 และ 20 พบว่า การหล่อขึ้นรูปในอัตราส่วนการแทนที่ทรายด้วยต้นข้าวโพดร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 สามารถหล่อขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบได้และมีรูปทรงลูกบาศก์ที่ค่อนข้างสมบูรณ์ ส่วนการแทนที่ทรายด้วยต้นข้าวโพดร้อยละ 20 ไม่สามารถหล่อขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบได้ เนื่องจากการเพิ่มปริมาณต้นข้าวโพดมากขึ้นทำให้การผสมมวลรวมให้จับตัวเป็นเนื้อเดียวกันได้ยากขึ้น ผลจากการศึกษาสีของชิ้นทดสอบพบว่าในอัตราส่วนที่มีต้นข้าวโพดเป็นส่วนผสมมีลักษณะโทนสีเทาอมน้ำตาลและมีแนวโน้มของสีเข้มขึ้นในอัตราส่วนที่มีปริมาณต้นข้าวโพดมากขึ้น ในขณะที่ชิ้นทดสอบที่ไม่มีส่วนผสมของต้นข้าวโพดจะเป็นสีเทาซึ่งเป็นสีปกติของมอร์ต้าทั่วไป จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวชิ้นของทดสอบ พบว่า การผสมต้นข้าวโพดในปริมาณมากขึ้นทำให้พื้นผิวของชิ้นทดสอบมีความหยาบและขรุขระมากขึ้น

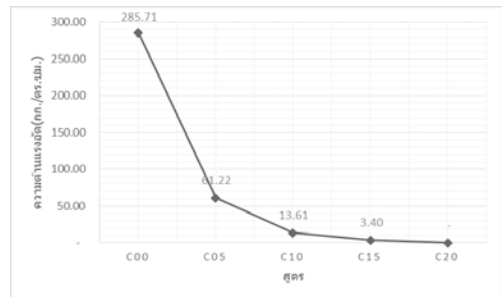
3.1.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของอัตราส่วนการแทนที่ทรายด้วยต้นข้าวโพด

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของอัตราส่วนการแทนที่ทรายด้วยต้นข้าวโพดร้อยละ 0, 5, 10,15 และ 20

สูตร	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	ความต้านแรงอัด (kg/cm <sup>2</sup> )
C00	2,082.60	285.71
C05	1,549.08	61.22
C10	1,347.91	13.61
C15	1,037.90	3.40
C20	736.64	-



รูปที่ 2 ค่าความหนาแน่นของการทดสอบอัตราส่วนการแทนที่ทรายด้วยต้นข้าวโพดร้อยละ 0, 5, 10,15 และ 20



รูปที่ 3 ค่าความต้านแรงอัดของการทดสอบอัตราส่วนการแทนที่ทรายด้วยต้นข้าวโพดร้อยละ 0, 5, 10,15 และ 20

ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของอัตราส่วนการแทนที่ทรายด้วยต้นข้าวโพด แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ

ส่วนที่ 1 การทดสอบความหนาแน่นของชิ้นทดสอบ พบว่า ปริมาณการแทนที่ทรายด้วยต้นข้าวโพดที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าความหนาแน่นลดลง โดยอัตราส่วนการแทนที่ทรายด้วยต้นข้าวโพดร้อยละ 0, 5, 10,15 และ 20 มีอัตราความหนาแน่นลดลงคิดเป็นร้อยละ 14.36 ดังแสดงในรูปที่ 2

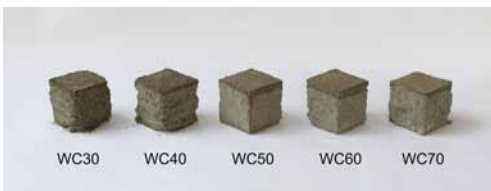
ส่วนที่ 2 การทดสอบความต้านแรงอัดของชิ้นทดสอบ พบว่า ปริมาณการแทนที่ทรายด้วยต้นข้าวโพดที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าความต้านแรงอัดลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยคอนกรีตสูตร C05 มีอัตราการลดลงจากสูตร C00 คิดเป็นร้อยละ

ละ 78.57 จากการทดสอบความต้านแรงอัดพบว่าสูตรที่ผ่านมาตรฐานอุตสาหกรรมคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ (มอก.2601-2556) ซึ่งกำหนดไว้ค่าความต้านแรงอัดต้องไม่น้อยกว่า  $20.4 \text{ kg/cm}^2$  มีอยู่ 2 สูตร ได้แก่ C00 และ C05 ซึ่งเป็นสูตรที่มีอัตราส่วนการแทนที่ทรายด้วยต้นข้าวโพดร้อยละ 0 และ 5 โดยมีค่าความต้านแรงอัดเท่ากับ 285.71 และ  $61.22 \text{ kg/cm}^2$  ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3

โดยสรุปผลการทดสอบอัตราส่วนการแทนที่ทรายด้วยต้นข้าวโพด พบว่า การเพิ่มปริมาณต้นข้าวโพดทำให้การผสมให้มวลรวมเป็นเนื้อเดียวกันยากขึ้น จึงสันนิษฐานว่าปริมาณน้ำอาจมีผลต่อการผสมขึ้นรูป และความแข็งแรงของชิ้นทดสอบ โดยสูตร C05 มีความเหมาะสมที่จะนำไปทดสอบเพื่อหาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมต่อไป

### 3.2 ผลการศึกษาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม

ในการทดสอบชุดที่ 2 นี้เป็นการนคอนกรีตมวลเบาผสมต้นข้าวโพดสูตร C05 จากการทดสอบในชุดที่ 1 มาทำการทดสอบเพื่อหาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม โดยกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 และ 0.7 ตามลำดับ ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 2



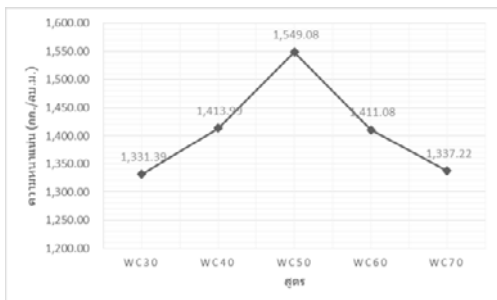
รูปที่ 4 ลักษณะทางกายภาพของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

### 3.2.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

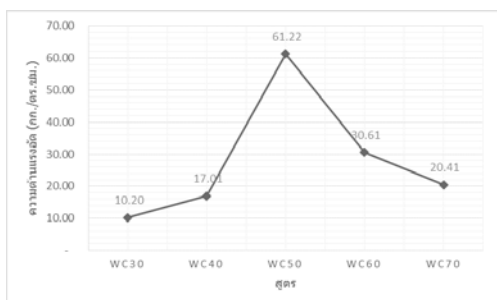
จากการศึกษาในภาพรวมพบว่า การเพิ่มปริมาณน้ำทำให้ขั้นตอนการผสมง่ายขึ้น ในด้านการผสมขึ้นรูปขึ้นทดสอบพบว่า WC30 และ WC40 มีรูปทรงที่ไม่ค่อยสมบูรณ์และมีลักษณะการแหงนหลุดร่อนของทรายและต้นข้าวโพด ในขณะที่ WC50 มีรูปทรงที่ค่อนข้างสมบูรณ์ที่สุดในชุดทดสอบ สำหรับ WC60 และ WC70 พบว่าการหลุดร่อนบ้าง โดยลักษณะสีของชิ้นทดสอบเป็นสีเทาอมน้ำตาล ซึ่งอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มากจะทำให้เนื้อคอนกรีตสีจางลง ลักษณะผิวของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์น้อยจะมีพื้นผิวที่ขรุขระและหยาบกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มากดังแสดงในรูปที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

สูตร	ความหนาแน่น ( $\text{kg/m}^3$ )	ความต้านแรงอัด ( $\text{kg/cm}^2$ )
WC30	1,331.39	10.20
WC40	1,413.99	17.01
WC50	1,549.08	61.22
WC60	1,411.08	30.61
WC70	1,337.22	20.41



รูปที่ 5 ค่าความหนาแน่นของการทดสอบอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์



รูปที่ 6 ค่าความต้านแรงอัดของการทดสอบอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

### 3.2.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

ผลการทดสอบพบว่า คอนกรีตมวลเบาผสมต้นข้าวโพดสูตร WC50 ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 มีค่าความหนาแน่นและความต้านแรงอัดสูงที่สุดอยู่ที่ 1,549.08 kg/m<sup>3</sup> และ 61.22 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ โดยค่าความหนาแน่นและความต้านแรงอัดมีความแปรผันตามกัน ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ โดยทั่วไปอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นมักส่งผลให้ความต้านแรงอัดของคอนกรีตลดลง แต่ในการทดลองนี้กลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วง W/C ที่ 0.3-0.5 และมีแนวโน้มลดลงอีกในช่วง W/C ที่ 0.5-0.7 เนื่องจากในช่วง W/C ที่ 0.3-0.4 อาจมีปริมาณน้ำน้อยเกินไปซึ่งไม่เพียงพอในการ

ผสมมวลรวมที่มีต้นข้าวโพดเป็นส่วนประกอบ จึงทำให้การผสมของมวลรวมเข้ากันได้ยาก และส่งผลให้คอนกรีตสูตร WC40 และ WC30 มีรูปทรงที่ไม่ค่อยสมบูรณ์ มีความหนาแน่นและความต้านแรงอัดลดลงตามลำดับ ในอัตราส่วน W/C ที่ 0.5 เป็นอัตราส่วนที่มีปริมาณน้ำพอดีกับความต้องการในการผสมคอนกรีต จึงส่งผลให้คอนกรีตมีการขึ้นรูปขึ้นทดสอบได้ดี มีความหนาแน่นและความต้านแรงอัดเพิ่มขึ้น ในขณะที่ W/C 0.6 และ 0.7 คอนกรีตมีแนวโน้มความหนาแน่นและความต้านแรงอัดลดลงอันเนื่องมาจากปริมาณน้ำที่มากเกินไปทำให้คอนกรีตมีความเหลวมากขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นและความต้านแรงอัดลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบคอนกรีตบล็อกผสมซังข้าวโพดของ (ทรัพย์ทวี, พงษ์สุวรรณ, และ คงพาลา, 2556)

## 4. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำต้นข้าวโพดเพื่อนำมาใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตผนังคอนกรีตมวลเบาสามารถสรุปได้ว่า

ต้นข้าวโพดสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุมวลรวมในการผลิตผนังคอนกรีตที่มีน้ำหนักเบาได้

การใช้ต้นข้าวโพดเป็นวัสดุมวลรวมในการผลิตผนังคอนกรีตจะทำให้มีค่าความหนาแน่นและความต้านแรงอัดลดลงตามปริมาณต้นข้าวโพดที่เพิ่มขึ้น

ลักษณะทางกายภาพโดยรวมการเพิ่มปริมาณต้นข้าวโพดมากขึ้นจะทำให้คอนกรีตมีการรวมตัวกันของมวลรวมยากขึ้น และมีลักษณะพื้นผิวที่หยาบขรุขระมากขึ้น ด้านสีของคอนกรีตมวลเบาผสมต้นข้าวโพดมีสีเทาอมน้ำตาล ซึ่งแตกต่างจากคอนกรีตที่ไม่มีส่วนผสมของต้นข้าวโพดที่เป็นสีเทา

อัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตมวลเบาผสมต้นข้าวโพดที่แนะนำเบื้องต้น คืออัตราส่วนระหว่างน้ำ:ปูนซีเมนต์:ทราย เท่ากับ 0.5 : 1 : 1 โดยมีการแทนที่ทรายด้วยต้นข้าวโพดร้อยละ 5 ซึ่งจะทำให้มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1,549.08 kg/m<sup>3</sup> และมีความต้านแรงอัดเท่ากับ 61.22 kg/cm<sup>2</sup>

ดังนั้นการนำต้นข้าวโพดซึ่งเป็นเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรนำกลับมาใช้ใหม่ในการผลิตคอนกรีตมวลเบาผสมต้นข้าวโพดจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจในการจัดการเพื่อเพิ่มมูลค่าของเศษวัสดุเหลือทิ้ง ลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีต และช่วยลดการเผาอันเป็นสาเหตุหลักของการเกิดหมอกควันได้

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.อานันท์ วรณกุล อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำแนะนำในการทำวิจัย

ขอขอบคุณกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน ที่ได้ให้การสนับสนุนงานวิจัยฉบับนี้เป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ คณาจารย์คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือในการทดลองสำหรับงานวิจัย

ขอขอบคุณ ผศ.ทวิชัย นิมาแสง อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เครื่องบดเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

ขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนช่วยเหลือและคอยให้กำลังใจเสมอมาทุกท่านที่ไม่ได้เอ่ยนาม

### รายการอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. (2557). รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทยปี 2557. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กองแผนงานและประเมินผล.

ชัยยันต์ ทรัพย์ทวี, อติสรณ์ พงษ์สุวรรณ และดำเนินกร คงพาลา. (2556). บล็อกซีเมนต์ผสมซังข้าวโพด. วารสารวิชาการและวิจัย มทร. พระนคร, 538-545.

ชาคริต โชติอมรศักดิ์, ภาคมุณี รัตน์จิรานุกุล และ อรวรรณวิรัชท์เวษยันต์เจียมใจเครือสุวรรณ. (2551). โครงการการวิเคราะห์สภาพอากาศและการเฝ้าระวังการเกิดมลภาวะอากาศ. สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย.

วีรัชย์ อาหาญ. (2555). การศึกษาแนวทางบริหารจัดการเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงและลดการเกิดหมอกควัน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์.

สำเริง รักซ้อน. (2552). ทฤษฎีและการทดสอบคอนกรีตเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2557). สถานการณ์สินค้าเกษตรที่สำคัญและแนวโน้ม ปี 2558. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2556). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเต็มพองอากาศ (มอก. 2601-2556). กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม.

สุนทร บุญญาธิการ, วรสิทธิ์ บุรณากาญจน์ และอรรจน์ เศรษฐบุตร. (2553). *เอกลักษณ์การประหยัดพลังงานที่ค้นพบจากสถาปัตยกรรมไทยในอดีตและหลักฐานองค์ความรู้สุดท้ายอดภูมิปัญญาไทยที่ค้นพบในเชิงวิทยาศาสตร์*. กรุงเทพฯ.

อภิวิชญ์ พูลสง. (2556). *การพัฒนาคอนกรีตมวลเบาผสมผงฝุ่นหินจากโรงโม่หิน*. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก, 94-102.

AlidaAbdullah, S. B. (2011). Composite Cement Reinforced coconut fiber: Physical and mechanical properties and fracture behavior. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 1228-1240.

Office of Global Analysis. (2015). *World agricultural production*. United States Department of Agriculture. United States Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service.

Price, A., Yeargin, R., Fini, E. & Abu-Lebdeh, T. (2014). Investigating effects of introduction of corncob ash into portland cements concrete: Mechanical and thermal properties. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 137-148.

Sisman, C. B., Gezer, E. & Kocaman, I. (2011). Effects of organic waste (Rice Husk) on the concrete properties for farm buildings. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 40-48.

# การใช้การวิเคราะห์ฟอลท์ทรีในการแสดงผลกระทบจากปัจจัยเสี่ยงต่อ เวลาในการก่อสร้างระบบป้องกันดินพังแบบเข็มพืดเหล็ก

## The Use of Fault Tree Analysis to Visualize the Impact of Risk Factors on Sheet Pile Construction Duration

กัณฑพล ชีวะถาวร<sup>1</sup> และ ดร. เทอดธิดา ทิพย์รัตน์<sup>2</sup>

Kantaphol Chevatavorn<sup>1</sup> and Thoedtida Thipparat, Ph.D.<sup>2</sup>

คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย

E-mail: kurn\_68@hotmail.com<sup>1</sup>, thiprat.t@gmail.com<sup>2</sup>

### บทคัดย่อ

การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อเวลาในการก่อสร้างระบบป้องกันดินพังแบบเข็มพืดเหล็กเพื่อวางแผนการก่อสร้างอาคาร โดยประยุกต์ใช้วิธีฟอลท์ทรี (Fault Tree Analysis: FTA) การวิจัยเริ่มจากรวบรวมและศึกษาเอกสารและงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมก่อสร้างระบบป้องกันดินพังแบบเข็มพืดเหล็กและปัจจัยที่ทำให้งานล่าช้า และวิเคราะห์หาสาเหตุรากเหง้าของความเสียหายที่ทำให้เกิดความล่าช้าแล้วแสดงในรูปแบบแผนภาพฟอลท์ทรีจากนั้นจึงเก็บข้อมูลความน่าจะเป็น และผลกระทบของแต่ละสาเหตุต่อเวลาในการก่อสร้าง โดยใช้แบบสอบถามร่วมกับการประชุมระดมสมอง โดยทำการวิจัยในกิจกรรมก่อสร้างระบบป้องกันดินพังแบบเข็มพืดเหล็ก 10 กิจกรรม พบว่า วิธีฟอลท์ทรี สามารถระบุปัจจัยเสี่ยงของการก่อสร้างระบบป้องกันดินพังแบบเข็มพืดเหล็กเรียงตามผลกระทบจากความล่าช้าได้ โดยสาเหตุที่มีระดับความเสี่ยงที่จะทำให้การก่อสร้างระบบป้องกันดินพังแบบเข็มพืดเหล็กล่าช้าสูงสุดคือ ความเสี่ยงในการติดตั้ง Bracing เพื่อเป็นเหมือนการค้ำยัน Sheet Pile วิธีการที่นำเสนอสามารถระบุกิจกรรมที่มีความเสี่ยงสูงสุดและสามารถระบุสาเหตุพื้นฐานของความเสียหายในแต่ละกิจกรรม อีกทั้งยังสามารถประเมินและจัดลำดับความสำคัญของสาเหตุพื้นฐานที่มีผลกระทบต่อหลายกิจกรรม ทำให้ผู้จัดการโครงการสามารถจัดการมาตรการจัดการความเสี่ยงในแต่ละกิจกรรมและภาพรวมของโครงการได้

### Abstract

This research aims to analyze the factors having impact on sheet pile construction duration. The methodology is composed of studying literature review associated with activities of sheet pile construction and factors causing delays. Then, problems and delay causes in sheet pile construction are collected from literature reviews and brainstorming sessions. Fault Tree Analysis (FTA) is used to analyze root causes of delay problems. Probabilities of occurrences, and consequences of delay causes are collected by using questionnaires and brainstorming. Factors

affecting sheet pile construction duration are analyzed qualitatively by using FTA. This study focused on 10 activities of sheet pile construction. The most significant cause of delay was bracing installation. The proposed approach can help a project manager prioritize risky activities and risk factors having impact on activity and the entire project. The suitable proactive risk measures can be developed to undertake risks.

**คำสำคัญ (Keywords):** เข็มพืด (Sheet Pile), โครงสร้างใต้ดิน (Substructure), ความเสี่ยง (Risk), เวลา (Duration), ฟอลท์ทรี (Fault Tree)

## 1. คำนำ

โครงการก่อสร้างอาคารสูงประกอบกิจกรรมที่มีความเสี่ยงหลายหลายกิจกรรม กิจกรรมก่อสร้างที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างใต้ดินเป็นกิจกรรมก่อสร้างที่ได้รับการยอมรับว่ามีความเสี่ยงสูง เนื่องจากเมื่อดินใต้ฐานรากของอาคารเกิดการเคลื่อนตัวจะส่งผลให้ฐานรากของอาคารเกิดการเคลื่อนตัวได้ อาคารที่มีฐานรากตันหรือเสาเข็มสั้นจะเกิดความเสียหายได้ง่ายเมื่อดินเริ่มเคลื่อนตัวเนื่องจากเกิดความเครียดในแนวราบของอาคารได้จากการเคลื่อนตัวของดินในแนวราบ ปัจจุบันโครงสร้างอาคารมีลักษณะ Frame Structure และก่อสร้างด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นส่วนใหญ่ แรงต้านของอาคารที่ไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัวในแนวราบเกิดจากแรงของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในแต่ละส่วนของอาคาร เช่น เสา คาน พื้น ซึ่งมีความสามารถในการรับแรงดึงหรือแรงเฉือนแตกต่างกันในแต่ละส่วน ความเสียหายของสิ่งปลูกสร้างข้างเคียงจากระบบป้องกันดินพังแบบเข็มพืดเหล็ก มีปัจจัยสำคัญอยู่ 2 ปัจจัย คือ ปัจจัยจากแรงที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของเข็มพืดเหล็กและปัจจัยจากความแข็งแรงของอาคาร ความเสียหายของอาคารจะเกิดขึ้นเมื่อขีดจำกัดความแข็งแรงของอาคารมีค่าน้อยกว่าแรงที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของเข็มพืดเหล็ก

บทความวิจัยนี้อภิปรายถึงความเสี่ยงในงานก่อสร้างระบบป้องกันดินพังแบบเข็มพืดเหล็ก ผู้วิจัยได้เสนอแบบจำลองประเมินความเสี่ยงด้วยวิธีการวิเคราะห์ฟอลท์ทรี Fault Tree Analysis (FTA) ในการประเมินความเสี่ยง วิธี FTA การวิเคราะห์ฟอลท์ทรีเป็นเทคนิคการวิเคราะห์ระบบ (System Analysis) อย่างหนึ่ง ที่ใช้หลักการการอนุมาน (Deductive Principle) โดยเหตุการณ์ที่ไม่พึงประสงค์ (Undesired Event) ของระบบถูกกำหนดขึ้น จากนั้น ระบบจะถูกวิเคราะห์ในรายละเอียดลักษณะการทำงานและสิ่งแวดล้อมเพื่อหาหนทางหรือสาเหตุที่มีความเป็นไปได้ ในการทำให้เกิดเหตุการณ์ที่ไม่พึงประสงค์ [1] นอกจากนี้ การวิเคราะห์ฟอลท์ทรี ยังถูกนำมาใช้ในการหาสาเหตุที่มีความเป็นไปได้สูงในการทำให้ระบบเกิดความล้มเหลว

## 2. วิธีการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัยเพื่อศึกษาความเสี่ยงในงานก่อสร้างระบบป้องกันดินพังแบบเข็มพืดเหล็ก สามารถแบ่งได้เป็น 6 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

1. รวบรวม ศึกษา ค้นคว้า เอกสารและงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์วิธี FTA ระบบป้องกันดินพังแบบเข็มพืดเหล็ก และความเสี่ยงในโครงการก่อสร้างกรณีศึกษา

การใช้การวิเคราะห์ฟลอร์ทรีในการแสดงผลกระทบจากปัจจัยเสี่ยงต่อเวลาในการก่อสร้าง ระบบป้องกันดินพังแบบเข็มพืดเหล็ก กันตพล ชีวะถาวร และ ดร. เทอดธิดา ทิพย์รัตน์

2. รวบรวม สำรวจ ความเสี่ยงและสาเหตุของความเสียหายในขั้นตอนต่าง ๆ ของระบบป้องกันดินพังแบบเข็มพืดเหล็กในโครงการก่อสร้างกรณีศึกษาทั้งจากเอกสารอ้างอิงและจากการสัมภาษณ์ผู้เกี่ยวข้องในโครงการก่อสร้างเพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปทำการระบุปัจจัยเสี่ยงในการโครงการก่อสร้างกรณีศึกษา

3. วิเคราะห์ค่าระดับความน่าจะเป็นและระดับผลกระทบด้านเวลาของแต่ละปัจจัยเสี่ยงที่ทำให้ความล่าช้าในการก่อสร้างโดยใช้ check list สอบถาม วิศวกร ผู้ควบคุมงาน เจ้ารับจ้าง และผู้ว่าจ้างแล้วประเมินดัชนีความล่าช้า (Delay Index: DI)

$$DI = P \times C \quad (1)$$

โดย P คือระดับความน่าจะเป็นและ C คือ ระดับผลกระทบของปัจจัยเสี่ยง ซึ่งกำหนดเกณฑ์การให้คะแนนเป็น 5 ระดับ คือ มากที่สุด มาก ปานกลาง น้อย และน้อยที่สุด ซึ่งมีคะแนนตั้งแต่ 5 ไปถึง 1

4. สร้างแผนภาพฟลอร์ทรีและวิเคราะห์หาสาเหตุของความเสียหายในงานก่อสร้างของระบบป้องกันดินพังแบบเข็มพืดเหล็กโดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธี FTA เชิงคุณภาพ (เทอดธิดา, 2556)

5. เสนอแนะมาตรการจัดการความเสี่ยงของระบบป้องกันดินพังแบบเข็มพืดเหล็กในโครงการก่อสร้างกรณีศึกษา

6. สรุปผล และขอเสนอแนะของงานวิจัย

### 3. ผลการวิจัย

#### 3.1 ข้อมูลในส่วนขอโครงการกรณีศึกษา

โครงการตัวอย่างที่จะนำมาประกอบการวิจัยนี้คือ โครงการ Ashton Asoke ที่ตั้งโครงการ

อยู่บริเวณถนนนอโคกมนตรี พื้นที่โครงการโดยประมาณ : 2-3-47.60 ไร่ ความสูงอาคาร 50 ชั้น ชั้นใต้ดินเป็นบ่อน้ำดี บ่อบำบัดน้ำเสีย และบ่อดับเพลิงรายละเอียดอาคารแบ่งเป็นตามนี้ จำนวนห้องพัก 783 ยูนิต จำนวนที่จอดรถ 371 คัน ลิฟท์โดยสารจำนวน 6 ตัว และลิฟท์ดับเพลิง 1 ตัว รูปที่ 1 แสดงภาพโครงการ Ashton Asoke พื้นที่ก่อสร้างโครงการ Ashton Asoke ตั้งอยู่กลางใจเมืองและเป็นแหล่งธุรกิจสำคัญ ผลกระทบจากการดำเนินงานก่อสร้างต่ออาคารข้างเคียงเป็นปัจจัยสำคัญที่ทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้างให้ความสำคัญ รูปที่ 2 แสดงอาคารข้างเคียงประกอบด้วยอาคารที่อยู่อาศัยและหน่วยงานเอกชน และศูนย์การค้า

ดังนั้น ในการทำงานก่อสร้างของโครงการ Ashton Asoke จึงต้องคำนึงถึงความเสี่ยงที่จะเกิดขึ้นในหลาย ๆ ด้าน เช่น งานระบบป้องกันดินพัง รายละเอียดของงานป้องกันดินพัง และความเสี่ยงที่จะเกิดขึ้นในงานป้องกันดินพัง เช่น ความเสี่ยงจากเครื่องจักรในการทำงาน ความเสี่ยงจากเทคนิคการทำงาน ความเสี่ยงจากแรงงาน ความเสี่ยงจากสภาพแวดล้อมโดยรอบโครงการ และ ความเสี่ยงจากการขนส่ง



รูปที่ 1 ภาพรวมโครงการ Ashton Asoke



รูปที่ 2 อาคารข้างเคียงโครงการ Ashton Asoke

### 3.2 กิจกรรมในงานระบบป้องกันดินพังแบบ เข็มพืดเหล็ก

ในการดำเนินงานก่อสร้างระบบป้องกันดินพังแบบเข็มพืดเหล็กนั้นจะเป็นไปตามมาตรฐานคุณภาพงานที่กำหนด โดยกิจกรรมสำคัญ 10 กิจกรรม ประกอบด้วย

- 1) การเตรียมวัสดุอุปกรณ์
- 2) การเตรียมเครื่องจักรและพื้นที่
- 3) การจัด Layout กำหนดแนวระบบป้องกันดินพังแบบเข็มพืดเหล็กและแนวพื้นที่ทำงานขุดดิน รูปที่ 3 และ 4 แสดงแบบ Plan และ Section ของระบบป้องกันดินพังแบบเข็มพืดเหล็ก
- 4) การกด Sheet Pile ตามแบบการติดตั้งเสา King Post การติดตั้ง Plat Form ดังแสดงในรูปที่ 5
- 5) การขุดดินถึง Layer 1 ที่ระดับ -1.50 m. และการติดตั้ง Bracing Layer 1 ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยการขุดดินนั้นให้เริ่มขุดจากบริเวณตรงกลางโดยทั้ง Berm ดินไว้ข้าง Sheet pile ประมาณ 10 เมตร จากนั้นติดตั้ง Strut ที่ระดับ -1.50 เมตร บริเวณตรงกลางก่อน เมื่อติดตั้ง Strut line แนวใดเสร็จให้ทำการขุด Berm ดินทั้งสองข้าง พร้อมติดตั้ง Waller และ Strut ให้ชน Sheet pile แล้วเท Packing Concrete ทันทันที จาก

นั้นให้ Preload ที่ Strut Line ซึ่งติดตั้งแล้วเสร็จ โดยไม่ต้องรอให้ทุก Strut Line แล้วเสร็จ

6) การขุดดินถึง Layer 2 ที่ระดับ -3.60 m. และการติดตั้ง Bracing Layer 2 ดำเนินการเช่นเดียวกับชั้นที่ 5) แต่ติดตั้ง Strut ที่ระดับ -3.00 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 7

7) การขุดดินถึงระดับใต้ห้องฐานรากที่ระดับ -6.35 m โดยในการขุดดินนั้นให้ขุดเริ่มจากด้านในก่อน กว้างประมาณ 15.00 เมตร และทิ้ง Berm ดินไว้ 5.00 เมตรโดยรอบ บริเวณที่ขุดดินถึงระดับ -6.35 เมตรแล้วให้เท Lean Concrete จนถึงระดับ -6.20 เมตร ทันทันที จากนั้นให้ขุดดินบริเวณ Berm ดิน 5.00 เมตร แล้วเท Lean Concrete ชน Sheet pile พร้อมไปกับการขุดดินตรงกลางต่ออีก 15.00 เมตร เมื่อเท Lean Concrete แล้วเสร็จให้ก่อสร้างฐานรากจนถึงระดับ -3.60 เมตร แล้วทำการ Back Fill ทรายและบดอัดระหว่างฐานรากกับ Sheet pile และเท Lean Concrete ตามระบุในแบบ ดังแสดงในรูปที่ 8

8) การก่อสร้างฐานรากจนถึงระดับ -3.60m. การ Back Fill การบดอัดทรายก่อนการเทคอนกรีต Lean ดังแสดงในรูปที่ 9 และการรื้อ Bracing Layer 2 ที่ระดับ -3.00 เมตร ออกโดยทำการก่อสร้างผนังจนถึงใต้ห้อง Bracing Layer 1 ที่ระดับ -1.70 เมตร แล้วทำการ Back Fill ทรายและบดอัดระหว่างผนังกับ Sheet pile แล้วเท Lean Concrete ตามที่ระบุในแบบ ดังแสดงในรูปที่ 10

9) การก่อสร้างโครงสร้างใต้ดิน จนถึงระดับ -1.70m. และการรื้อ Bracing Layer 1 ที่ระดับ -1.05 เมตร ออกโดยเริ่มรื้อ Bracing Line ด้านออกก่อน โดยทำการก่อสร้างผนังจนถึงระดับดินเดิมที่ระดับ 0.00 เมตร แล้วทำการ Back Fill

การใช้การวิเคราะห์พอลท์ทรีในการแสดงผลกระทบจากปัจจัยเสี่ยงต่อเวลาในการก่อสร้าง ระบบป้องกันดินพังแบบเข็มพืดเหล็ก กันตพล ชีวะถาวร และ ดร. เทอดธิดา ทิพย์รัตน์

และการบดอัดทรายก่อนการเทคอนกรีต (Lean concrete) ดังแสดงในรูปที่ 11

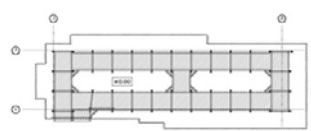
10) การรื้อถอน Platform และ King Post ดังแสดงในรูปที่ 12



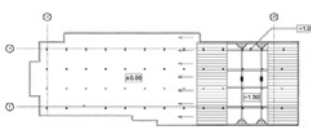
รูปที่ 3 แบบ Plan ของระบบป้องกันดินพังแบบเข็มพืดเหล็ก



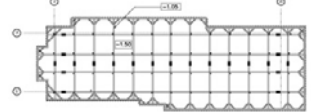
รูปที่ 4 แบบ Section ของระบบป้องกันดินพังแบบเข็มพืดเหล็ก



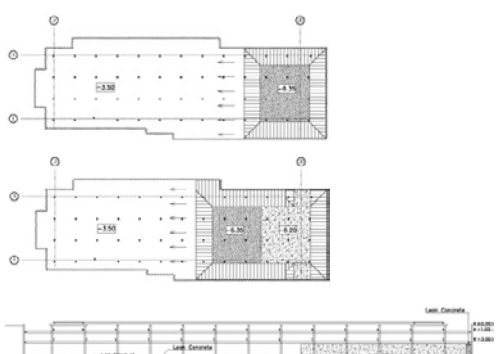
รูปที่ 5 การกดเข็มพืดเหล็ก



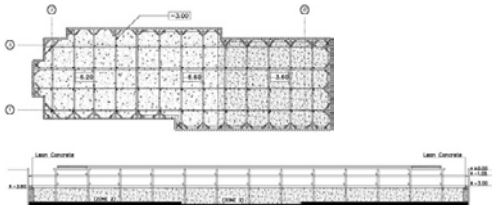
รูปที่ 6 การขุดดินถึง Layer 1 และติดตั้ง Bracing



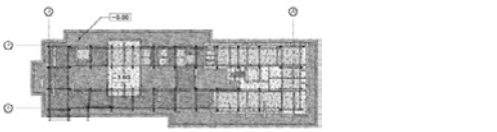
รูปที่ 7 การขุดดินถึง Layer 2 และติดตั้ง Bracing



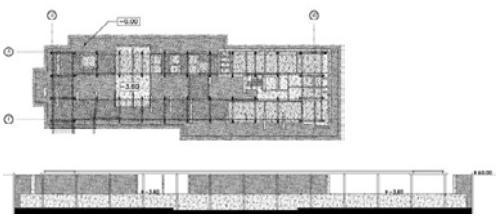
รูปที่ 8 การขุดดินถึงระดับใต้ห้องฐานราก



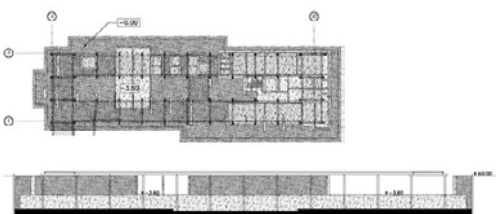
รูปที่ 9 การก่อสร้างฐานราก



รูปที่ 10 การรื้อ Bracing Layer 2



รูปที่ 11 การก่อสร้างโครงสร้างใต้ดินและรื้อ Bracing Layer 1

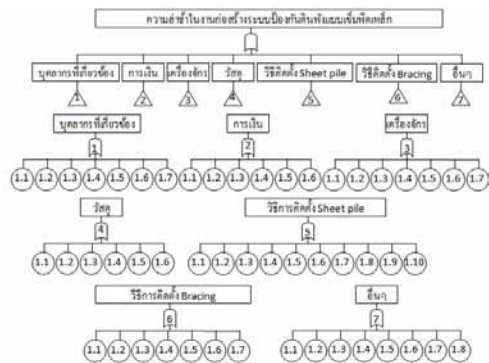


รูปที่ 12 การรื้อถอน Platform และ King Post

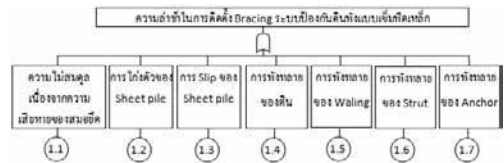
### 3.3 ระบุความเสี่ยงและแสดงความเสี่ยงโดย FTA

หลังจากพิจารณากิจกรรมการก่อสร้างระบบป้องกันดินพังแบบเข็มพืดเหล็กของโครงการตัวอย่างดังแสดงในหัวข้อ 3.2 แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการระบุความเสี่ยงและแสดงแผนภาพพอลท์ทรีของการก่อสร้างระบบป้องกันดินพังแบบเข็มพืดเหล็ก รูปที่ 13 แสดงแผนภาพพอลท์ทรีในการประเมินความเสี่ยงในภาพรวม รูปที่ 14 แสดงแผนภาพพอลท์ทรีในกิจกรรมติดตั้ง Bracing โดยปัจจัยเสี่ยงในกิจกรรมติดตั้ง Bracing มีดังนี้

- 1.1 ความไม่สมดุลเนื่องจากความเสียหายของสมอยึด
- 1.2 การโค้งตัวของ Sheet pile
- 1.3 การ Slip ของ Sheet pile
- 1.4 การพังทลายของดิน
- 1.5 การพังทลายของ Waling
- 1.6 การพังทลายของ Strut
- 1.7 การพังทลายของ Anchor



รูปที่ 13 แผนภาพพอลท์ทรีในการประเมินความเสี่ยงในภาพรวม



รูปที่ 14 แผนภาพพอลท์ทรีกิจกรรมติดตั้ง Bracing

### 3.4 ประเมินระดับความเสี่ยง

หลังจากพิจารณาปัจจัยเสี่ยงที่มีผลกระทบต่อกิจกรรมการก่อสร้างระบบป้องกันดินพังแบบเข็มพืดเหล็กของโครงการตัวอย่างแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการประเมินค่าระดับความน่าจะเป็นระดับผลกระทบ และระดับความเสี่ยงของแต่ละปัจจัยเสี่ยง ตารางที่ 1 แสดงผลการประเมินระดับความเสี่ยงของกิจกรรมติดตั้ง Bracing

ตารางที่ 1 ผลการประเมินระดับความเสี่ยงในกิจกรรมติดตั้ง Bracing

ความเสี่ยง	ความน่าจะเป็น (P)	ผลกระทบ (C)	ระดับความเสี่ยง (DI)
1.1	3	3	9
1.2	5	4	20
1.3	4	4	16
1.4	4	4	16
1.5	3	4	12
1.6	3	4	12
1.7	3	4	12

โดย 1.1 แทนความไม่สมดุลเนื่องจากความเสียหายของสมอยึด 1.2 แทนการโค้งตัวของ Sheet pile 1.3 แทนการ Slip ของ Sheet pile 1.4 แทนการพังทลายของดิน 1.5 แทนการพังทลายของ Waling 1.6 แทนการพังทลายของ Strut 1.7 แทนการพังทลายของ Anchor ตามลำดับ พบว่า ความเสี่ยงเนื่องจากการโค้งตัวของ Sheet pile มีระดับความเสี่ยงสูงสุด ผลจากการประเมินระดับ

88 การวิเคราะห์ความไวของอิทธิพลตัวแปรองค์ประกอบรอบอาคารที่มีผลต่อปริมาณการใช้ไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศในบ้านจัดสรรประเภทบ้านเดี่ยว  
 ณัฐฐาอัมพร อินทร์พรหม และ ดร. ดารณี จาริมิตร

ความเสี่ยงจะเป็นข้อมูลในการกำหนดมาตรการ  
 มาตรการป้องกันความเสี่ยงต่อไป

### 3.5 มาตรการป้องกันความเสี่ยง

การกำหนดมาตรการมาตรการป้องกันความเสี่ยงในกิจกรรมติดตั้ง Bracing พิจารณาจากปัจจัยเสี่ยงที่จะทำให้เกิดกิจกรรมนี้ล่าช้าได้มากที่สุด ซึ่งการวิจัยนี้พบว่าปัจจัยเสี่ยงสำคัญคือ การโก่งตัวของ Sheet pile เพื่อป้องกันความเสี่ยงจากปัจจัยเสี่ยงนี้จึงได้กำหนดมาตรการคือการตรวจสอบการคำนวณการออกแบบค่าแรงอัดและตรวจสอบกระบวนการอัดแรงเข้าไปใน Bracing เพื่อลดผลกระทบกับบ้านข้างเคียงโดยรอบโครงการ อันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของดินจนอาจทำให้เกิดการแตกร้าวของตัวบ้านหรือโครงสร้างหลักของสิ่งปลูกสร้างโดยรอบโครงการ รูปที่ 15 แสดงการอัดแรง (Pre Load) เข้า Bracing ตามรายการคำนวณ รูปที่ 16 แสดงรายการคำนวณการออกแบบค่าแรง Preload นอกจากนี้ยังเพิ่มมาตรการลดความเสี่ยงอื่นๆ เช่น การตรวจสอบรอยเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 17



รูปที่ 15 การอัดแรง (Pre Load) เข้า Bracing

#### Summary of Analysis

##### 1 Sheet Pile

Type 4  
 Length 16 m.

##### Force induced in sheet pile from FEM Analysis

Maximum Lateral Movement	61.3	mm.
Maximum Shear Force	27.16	t/m.
Maximum Bending Moment	32	t-m/m.

##### 2 Strut

Force induced in strut

Strut Layer	Section	Elevation (m.)	FEM (t/m)	Brace Cut (t/m)
1	WF 350x350x137 kg/m.	-1.05	8.56	11.48
2	WF 400x400x172 kg/m.	-3.00	34.11	25.65

##### 3 Ground Surface Settlement

Ground Settlement from FEM

Maximum Settlement	54.22	mm.
--------------------	-------	-----

รูปที่ 16 การคำนวณการออกแบบค่าแรงอัด



รูปที่ 17 การตรวจสอบรอยเชื่อม

## 4. สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้ประยุกต์ใช้วิธีฟอลท์ทรี ในการระบุความเสี่ยงในการก่อสร้างระบบป้องกันดินพังแบบเข็มพืดเหล็กซึ่งทำให้สามารถวิเคราะห์หาสาเหตุรากเหง้าของความเสี่ยงที่ทำให้เกิดความล่าช้าได้ การวิจัยนี้ได้ประเมินระดับความเสี่ยงโดยพิจารณาค่าความน่าจะเป็นและผลกระทบของแต่ละสาเหตุต่อเวลาในการก่อสร้างโดยกิจกรรมที่มีระดับความเสี่ยงที่จะทำให้การก่อสร้างระบบป้องกันดินพังแบบเข็มพืดเหล็กล่าช้าสูงสุดคือ การติดตั้ง Bracing เพื่อเป็น

เหมือนการค้ำยัน Sheet Pile โดยปัจจัยเสี่ยง  
สำคัญคือ การโก่งตัวของ Sheet pile มาตรการ  
จัดการความเสี่ยงคือการอัดแรงเข้า Bracing และ  
ตรวจสอบการคำนวณการออกแบบค่าแรงอัด

### รายการอ้างอิง

เทอดธิดา ทิพย์รัตน์. (2556). การใช้การวิเคราะห์  
ฟอลท์ทรีในการแสดงผลกระทบจากปัจจัย  
เสี่ยงต่อเวลาในการก่อสร้างบ้านพักอาศัย.  
วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., 36(3), 361-  
379.

การศึกษาคุณภาพอากาศภายในหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจ  
กรณีศึกษา: โรงพยาบาลรัฐขนาดกลางในจังหวัดนนทบุรี  
A Study of Indoor Air Quality in Cardiac Care Unit (C.C.U.)  
Case Study a Medium-Sized Government Hospital  
in Nonthaburi Province

ธีรพงศ์ กาญจนเจริญนนท์<sup>1</sup> และ เรกซ์ ธนศักดิ์ เรืองเทพรัตน์<sup>2</sup>  
Teerapong Kanjanaroennon<sup>1</sup> and Rex Tanasak Ruangteprat<sup>2</sup>  
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม  
E-mail: teerapong.kanj@gmail.com<sup>1</sup>, rexruangteprat@yahoo.com<sup>2</sup>

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณภาพอากาศภายในหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจของโรงพยาบาลรัฐแห่งหนึ่งในจังหวัดนนทบุรี เพื่อเปรียบเทียบค่ามาตรฐานโดยอ้างอิงกับค่ามาตรฐานของกระทรวงสิ่งแวดล้อมสิงคโปร์ และนำค่ามาวิเคราะห์สาเหตุและแนวทางแก้ไขในกรณีที่คุณภาพอากาศภายในมีค่าไม่เป็นไปตามค่ามาตรฐาน โดยในการศึกษาวิจัยนี้ใช้แบบบันทึกการสังเกตการณ์การใช้งานหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจและดำเนินการตรวจวัดคุณภาพอากาศภายในตามแผน โดยทำการเก็บข้อมูลค่าคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ทุก 3 ชั่วโมง บันทึกค่าลงในแบบบันทึกข้อมูลการตรวจวัดคุณภาพอากาศภายใน เพื่อวิเคราะห์สาเหตุที่คุณภาพอากาศไม่ผ่านมาตรฐานและนำเสนอแนวทางแก้ไขคุณภาพอากาศภายในหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจ เพื่อลดอัตราการติดเชื้อของผู้ป่วยที่เข้ารับการรักษาในหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจ รวมถึงช่วยเสริมคุณภาพชีวิตการทำงานของเจ้าหน้าที่ประจำหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจ และลดความเสี่ยงจากการติดเชื้อจากที่ทำงาน

### Abstract

This research studied about indoor air quality on Cardiac Care Units, Medical of the governmental hospital in Nonthaburi province. The research aims to compare indoor air quality standard with the standard of Ministry of environment, Singapore and analyzed causes of problem and find the solving in the case of the results are substandard. In this case, researcher observed and recorded user behaviors in Cardiac Care Units, Medical and conducted indoor air quality monitoring follow the plan by recording Carbon Dioxide quantity, temperature, and relative humidity values every three hours to indoor air quality recording form for analyze cause of problem and present problem solving. The research will decrease the infection rate of patients

admitted in this department including to enhance the quality of working life of staff and decrease the risk of infection from working place.

**คำสำคัญ (Keywords):** คุณภาพอากาศภายในอาคาร (Indoor Air Quality), หอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจ (Cardiac Care Unit)

## 1. บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

เนื่องจากประเทศไทยมีลักษณะภูมิอากาศแบบร้อนชื้นและมีแนวโน้มอุณหภูมิสูงขึ้นทุกปี เพื่อสร้างสภาวะน่าสบายและปลอดภัยภายในโรงพยาบาลจึงติดตั้งระบบปรับอากาศเพิ่มมากขึ้น หากไม่สามารถควบคุมคุณภาพอากาศให้เป็นไปตามมาตรฐานจะเพิ่มความเสี่ยงต่อการติดเชื้อแทรกซ้อนกับผู้ป่วยและมีโอกาสเสียชีวิต

การตรวจวัดคุณภาพอากาศภายในอาคารมีองค์การที่กำหนดค่าแนะนำเพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิงในการตรวจวัดคุณภาพอากาศ เช่น องค์การอนามัยโลก (WHO) สมาคมวิศวกรการทำความร้อนการทำความเย็นและการปรับอากาศแห่งสหรัฐอเมริกา (ASHRAE) กระทรวงสิ่งแวดล้อมประเทศสิงคโปร์ (Singapore standard SS 554: 2009) เป็นต้น สำหรับประเทศไทยยังไม่มีหน่วยงานใดกำหนดค่ามาตรฐานคุณภาพอากาศภายในอาคารสำหรับประเทศไทย ในส่วนมาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.) กำหนดเพียงมาตรฐานการระบายอากาศเพื่อคุณภาพอากาศภายในอาคารที่ยอมรับได้ ซึ่งเน้นเรื่องการระบายอากาศและไม่ได้ระบุถึงค่ามาตรฐานของคุณภาพอากาศ ดังนั้นผู้วิจัยจึงพิจารณาใช้ค่ามาตรฐานของกระทรวงสิ่งแวดล้อมประเทศสิงคโปร์ในการเปรียบเทียบในการวิจัยเนื่องจากความคล้าย-

คลึงกันด้านภูมิประเทศ การศึกษานี้ได้ทำการศึกษาในหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจ เนื่องจากเป็นพื้นที่รวมมีผู้ป่วยหนักที่ไม่สามารถช่วยเหลือตนเองได้และต้องมีเจ้าหน้าที่ประจำหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจเฝ้าระวังตลอดเวลา ซึ่งผู้วิจัยมีคำถามการวิจัยในเรื่องพฤติกรรมการใช้หอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจของเจ้าหน้าที่ ผู้ป่วยและญาติผู้ป่วยเป็นอย่างไร และคุณภาพอากาศภายในหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจ เป็นอย่างไร เมื่อเทียบกับมาตรฐานโดยมาตรฐานของกระทรวงสิ่งแวดล้อม ประเทศสิงคโปร์ในการตรวจวัดคุณภาพอากาศจะดำเนินการตรวจวัด 10 พารามิเตอร์ดังรูปที่ 3 ค่ามาตรฐานของกระทรวงสิ่งแวดล้อมประเทศสิงคโปร์ ซึ่งการตรวจวัดค่าแต่ละพารามิเตอร์จะมีค่าใช้จ่ายที่แตกต่างกันตามวิธีการ ระยะเวลาและเครื่องมือตรวจวัด เพื่อให้การตรวจวัดคุณภาพอากาศสามารถตรวจวัดได้สะดวกต้นทุนไม่สูงและสามารถดำเนินการได้โดยเจ้าของอาคาร ผู้วิจัยจึงเลือกทำการตรวจวัดค่าคาร์บอนไดออกไซด์ (หน่วยเป็น ppm), อุณหภูมิ (หน่วยเป็น °C) และความชื้นสัมพัทธ์ (หน่วยเป็น %RH) ที่ครอบคลุมการพิจารณาคุณภาพอากาศภายในอาคาร หากค่าใดไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานจะแสดงถึงโอกาสที่คุณภาพภายในเกิดความผิดปกติ ซึ่งจะใช้พิจารณาคุณภาพอากาศภายในหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจร่วมกับแบบสัมภาษณ์สภาพแวดล้อมทาง

สภาพของงานหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจ กรณีที่คุณภาพอากาศภายในหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ได้แก่ ระดับคาร์บอนไดออกไซด์ต้องต่ำกว่า 700 ppm เมื่อเทียบกับอากาศภายนอก, อุณหภูมิต้องอยู่ระหว่าง 24-26 °C และความชื้นสัมพัทธ์ต้องต่ำกว่า 70%RH ผลการวิจัยนี้จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา และใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงคุณภาพอากาศภายในหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1) เพื่อศึกษาสภาพแวดล้อมทางกายภาพในปัจจุบันของหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจ
- 2) เพื่อศึกษาพฤติกรรมของผู้ใช้งานหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจ
- 3) เพื่อเปรียบเทียบคุณภาพอากาศภายในหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจกับมาตรฐานของกระทรวงสิ่งแวดล้อมประเทศสิงคโปร์

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1) ศึกษาพฤติกรรมการใช้หอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจของเจ้าหน้าที่ โดยวิเคราะห์หาปัจจัยที่อาจกระทบค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจ
- 2) ศึกษาพฤติกรรมการใช้หอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจของญาติผู้ป่วยโดยวิเคราะห์หาปัจจัยที่อาจกระทบค่าคาร์บอนไดออกไซด์ และอุณหภูมิภายในหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจ
- 3) เครื่องมือและวิธีการเก็บข้อมูล
  - 3.1 แบบบันทึกค่าคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิ และความชื้น
  - 3.2 แบบบันทึกการสังเกตการณ์จำนวนผู้ใช้หอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจ

3.3 แบบสัมภาษณ์สภาพแวดล้อมทางกายภาพของงานหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจ

4) ศึกษาคุณภาพอากาศภายในหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจตามค่ามาตรฐานของกระทรวงสิ่งแวดล้อมประเทศสิงคโปร์

## 2. ขั้นตอนดำเนินการศึกษาวิจัย

1) ศึกษาและเก็บข้อมูลสภาพแวดล้อมทางกายภาพของหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจ จากการสัมภาษณ์เจ้าหน้าที่ประจำหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจจำนวน 40 คน สัมภาษณ์กรรมการใช้งาน โดยใช้แบบสัมภาษณ์สภาพแวดล้อมทางกายภาพของงานหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจ ดังรูปที่ 1 แบบสัมภาษณ์สภาพแวดล้อมทางกายภาพของงานหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจ

2) ตรวจวัดค่าตัวแปรที่มีนัยสำคัญกับคุณภาพอากาศภายในอาคารในระดับการหายใจ ซึ่งสูงจากพื้น 110-130 เซนติเมตร โดยการตรวจวัดใช้เครื่องมือระดับคาร์บอนไดออกไซด์ วัดอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ดังรูปที่ 4 เครื่องมือตรวจวัดคุณภาพอากาศร่วมกับแบบฟอร์มการตรวจวัด ดังรูปที่ 2 แบบบันทึกค่าคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิ ความชื้น และแบบบันทึกการสังเกตการณ์จำนวนผู้ใช้หอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจ ในช่วงเวลาเช็ดตัวผู้ป่วยและช่วงการเข้าเยี่ยมของญาติ โดยกำหนดจุดตรวจวัด 3 จุด ได้แก่ จุดที่ 1 บริเวณเตียงผู้ป่วย, จุดที่ 2 บริเวณเคาน์เตอร์เจ้าหน้าที่, จุดที่ 3 นอกอาคารบริเวณจุดเติมอากาศภายในห้อง ซึ่งทำการเก็บข้อมูลค่าคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ 3 ช่วงเวลา จำนวน 9 ครั้งต่อวัน ในช่วงเดือนธันวาคม 2555 - มกราคม 2556

3) วิเคราะห์และเปรียบเทียบคุณภาพอากาศกับมาตรฐานของกระทรวงสิ่งแวดล้อมประเทศสิงคโปร์ ดังรูปที่ 3 ค่ามาตรฐานของกระทรวงสิ่งแวดล้อมประเทศสิงคโปร์ เพื่อรายงานผลการตรวจสอบคุณภาพอากาศภายในและเสนอแนะแนวทางการปรับปรุงในกรณีคุณภาพอากาศภายในของหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

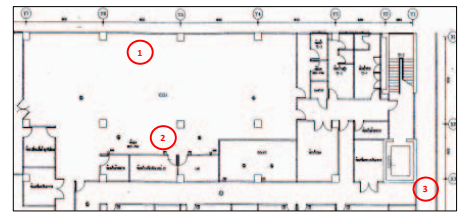
**แบบสัมภาษณ์สภาพแวดล้อมทางกายภาพของงานหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจ**  
**เรื่อง การศึกษาคุณภาพอากาศภายในหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจ**  
**กรณีศึกษาโรงพยาบาลรัฐแห่งหนึ่งในจังหวัดนนทบุรี**

1. การเข้าเวรของเจ้าหน้าที่ประจำหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจแบ่งเป็นกี่เวร .....เวร  
แต่ละเวรมีช่วงเวลาเป็นอย่างไร .....เวร
2. ในแต่ละเวรมีเจ้าหน้าที่กี่คน  
วันทำงานปกติ เวรเช้า .....คน บ่าย .....คน ดึก .....คน  
วันหยุดราชการ เวรเช้า .....คน บ่าย .....คน ดึก .....คน
3. รอบการเข้าเยี่ยมอนุญาตให้เข้ากี่ครั้งต่อวัน ช่วงเวลาใดบ้าง  
จำนวนการเข้าเยี่ยม .....รอบต่อวัน  
ครั้งที่ 1 เวลา .....น. - .....น.  
ครั้งที่ 2 เวลา .....น. - .....น.
4. ภายในหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจมีการทำความสะอาดอย่างไร  
.....  
.....
5. การเข้าเยี่ยมผู้ป่วยต้องเปลี่ยนชุดอย่างไรบ้าง  
.....  
.....
6. ช่วงเวลาการเช็ดตัวคนไข้ทุกวันและกี่ครั้ง ช่วงเวลาใดบ้าง  
รอบการเช็ดตัว .....ครั้งต่อวัน  
ครั้งที่ 1 เวลา .....น. - .....น.  
ครั้งที่ 2 เวลา .....น. - .....น.  
ครั้งที่ 3 เวลา .....น. - .....น.
7. แหล่งกำเนิดความร้อนภายในหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจมีที่ใดบ้าง  
.....  
.....
8. แหล่งกำเนิดความชื้นภายในหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจมีที่ใดบ้าง  
.....  
.....

รูปที่ 1 แบบสัมภาษณ์สภาพแวดล้อมทางกายภาพของงานหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจ

แบบสำรวจบันทึกค่าคาร์บอนไดออกไซด์(หน่วย ppm),ค่าอุณหภูมิ(หน่วย °C)  
ค่าความชื้น(หน่วย %RH) วันที่...../...../.....  
เลขที่.....  
แบบบันทึกการสังเกตการณ์จำนวนผู้ใช้หอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจ  
**เรื่อง การศึกษาคุณภาพอากาศภายในหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจ**  
**กรณีศึกษาโรงพยาบาลรัฐแห่งหนึ่งในจังหวัดนนทบุรี**

	จุดวัดที่ 1		จุดวัดที่ 2		จุดวัดที่ 3		จำนวน(คน)		หมายเหตุ
	ppm	%RH	ppm	%RH	ppm	%RH	คนเยี่ยม	คนไข้	
เวลา 05:00 น.									
เวลา 06:00 น.									
เวลา 07:00 น.									
สรุป									
เวลา 12:00 น.									
เวลา 13:00 น.									
เวลา 14:00 น.									
สรุป									
เวลา 19:00 น.									
เวลา 20:00 น.									
เวลา 21:00 น.									
สรุป									



**หมายเหตุ** จุดที่ 1 บริเวณเตียงผู้ป่วย ppm : หน่วยวัดค่าคาร์บอนไดออกไซด์  
จุดที่ 2 บริเวณเคาน์เตอร์เจ้าหน้าที่ °C : หน่วยวัดค่าอุณหภูมิ  
จุดที่ 3 นอกอาคารบริเวณจุดเชื่อมอากาศเข้าหอผู้ป่วย %RH : หน่วยวัดค่าความชื้น  
ช่วงเวลาที่การเช็ดตัวผู้ป่วย 5:00น.-7:00น. ,13:00น.-14:00น. ,21:00น.-22:00น.  
ช่วงเวลาที่การเยี่ยมผู้ป่วย 11:00น.-13:00น. ,17:00น.-20:00น.  
ช่วงเวลาที่การขึ้นเวร 08:00น.-16:00น. ,16:00น.-24:00น. ,24:00น.-08:00น.

รูปที่ 2 แบบบันทึกค่าคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิ ความชื้น และแบบบันทึกการสังเกตการณ์จำนวนผู้ใช้หอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจ

SS 554 : 2009

Table 1 - Recommended IAQ parameters			
Parameter	Acceptable limit (8hours)	Unit	Measurement method / Analytical method
<b>i. Thermal comfort parameters</b>			
Operative temperature <sup>1)</sup>	24 to 26	°C	Air temperature - by hot wire, thermistor, thermomet sling or equivalent method. Globe temperature - by Globe thermometer.
Relative humidity	<65 (for new buildings) <70(for existing building)	%	By thin film capacitor, hygrometer, thermometer sling or equivalent method.
Air movement	0.10 - 0.30	m/s	By hot wire method for linear air velocity or Kata thermometer for omni-directional air velocity method or equivalent.
<b>ii. Chemical parameters</b>			
Carbon dioxide	700 above outdoor	ppm	By real-time non-dispersive infra-red sensor or equivalent method.
Carbon monoxide	9	ppm	By real-time electrochemical sensor or equivalent method (NIOSH Manual of Analytical Methods 6604).
Formaldehyde	120	µg/m <sup>3</sup>	By detection tubes, real-time electrochemical sensor or equivalent method for screening (ISO 16000-2).  When formaldehyde concentration is higher than the limit, collect continuous air samples using dinitrophenylhydrazone (DNPH) cartridges and analyse by High Performance Liquid Chromatography (HPLC) using : NIOSH Manual of Analytical Methods 2016 or EPA Method 0100: Sampling for Formaldehyde and other Carbonyl Compounds. ISO 16000-3 or NIOSH Manual of Analytical Methods 2016
	0.1	ppm	
Total volatile organic compounds (TVOC) that are photoionisable (10.6	3000	ppb	By real-time photoionisation detector or equivalent method.
<b>iii. Respirable suspended particles (aerodynamic diameter less than 10 µm sampled with a particle size-selective device having a median cut point of µm)</b>	50	µg/m <sup>3</sup>	By real-time optical scattering or piezoelectric monitors or equivalent method.
<b>iv. Biological parameters</b>			
Total viable bacterial count	500	cfu/m <sup>3</sup>	By Andersen single-stage impactor (N6), or equipment designed for airborne microbial sampling, flow rate at 28.3 L/min (1 ft <sup>3</sup> /min) for 4 minutes or equal volume of air.  Bacteria is cultured by Tryptone Soya Agar (TSA) media and incubated for 48 hours at 35 °C
Total viable mould count	up to 500 is acceptable, if the species present are primarily Cladosporium	cfu/m <sup>3</sup>	By Andersen single-stage impactor (N6), or equipment designed for airborne microbial sampling, flow rate at 28.3 L/min (1 ft <sup>3</sup> /min) for 4 minutes or equal volume of air.  Mould is cultured by 2 % Malt Extract Agar (MEA) and incubated for 5 days at 25 °C.

รูปที่ 3 ค่ามาตรฐานของกระทรวงสิ่งแวดล้อมประเทศไทย สิงคโปร์ (Singapore standard SS 554: 2009)



รูปที่ 4 เครื่องวัดคาร์บอนไดออกไซด์ (TELAIRE 7001) และเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (TES-1364)

### 3. ผลการศึกษา

จากการศึกษาตรวจวัดคุณภาพอากาศภายในหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจ โดยใช้แบบสัมภาษณ์สภาพแวดล้อมทางกายภาพของงานหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจทราบถึงลักษณะการใช้งานหอผู้ป่วยในแต่ละช่วงเวลา การไม่ควบคุมจำนวนการเข้าเยี่ยมผู้ป่วย ระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์ที่มีเพียง 1 ชุด ที่เริ่มเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งานและไม่สามารถบำรุงรักษาได้ตามแผนจากการที่ต้องใช้งานอย่างต่อเนื่อง จึงใช้การหยุดพักเครื่องปรับอากาศช่วงเวลา 05.00 น.-07.00 น. ซึ่งจากการตรวจวัดค่าตัวแปรทั้ง 3 ที่ผู้วิจัยได้ทำการเลือกโดยใช้แบบบันทึกค่าคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิ ความชื้น และแบบบันทึกการสังเกตการณ์จำนวนผู้ใช้หอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจได้ผลดังนี้

1. ค่าคาร์บอนไดออกไซด์ โดยรวมอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานไม่เกิน 700 ppm เมื่อเทียบกับอากาศภายนอกซึ่งมีเพียงช่วงเวลา 12.00 น. และ 19.00 น. ที่ระดับค่าคาร์บอนไดออกไซด์สูงเกินค่ามาตรฐาน จากแบบสัมภาษณ์สภาพแวดล้อมทางกายภาพของงานหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรม

หัวใจพบช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงเวลาของการเยี่ยมผู้ป่วย

2. ค่าอุณหภูมิโดยรวมอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ในช่วง 24°C -26°C ซึ่งมีเพียงช่วงเวลา 12.00 น. และ 19.00 น. ที่อุณหภูมิภายในไม่ผ่านค่ามาตรฐาน จากแบบสัมพัทธ์สภาพแวดล้อมทางกายภาพ ของงานหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจพบช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงเวลาของการเยี่ยมผู้ป่วย

3. ความชื้นสัมพัทธ์ โดยรวมอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานไม่เกิน 70%RH ซึ่งมีเพียงบางช่วงเวลา 05.00 น.-07.00 น. 13.00 น.-14.00 น. และ 21.00 น. ที่ระดับความชื้นสูงเกินค่ามาตรฐาน จากแบบสัมพัทธ์สภาพแวดล้อมทางกายภาพ ของงานหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจพบช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงเวลาเช็ดตัวผู้ป่วย

#### 4. สรุปและเสนอแนะ

##### 4.1 สรุป

จากการศึกษาวิจัยและดำเนินการตรวจวัดคุณภาพอากาศภายในหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจเนื่องจากผู้ป่วยมีสภาพร่างกายอ่อนแอกว่าคนปกติมากมีโอกาสติดเชื้อแทรกซ้อนได้ง่ายกว่าปกติ จึงต้องควบคุมคุณภาพอากาศภายในหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตลอดเวลา ซึ่งการวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบคุณภาพอากาศกับค่ามาตรฐานของกระทรวงสิ่งแวดล้อมประเทศสิงคโปร์ จากคำถามการวิจัยที่ว่า “พฤติกรรมการใช้หอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจของเจ้าหน้าที่ ผู้ป่วยและญาติผู้ป่วยเป็นอย่างไร และคุณภาพอากาศภายในหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจของเป็นอย่างไร เทียบกับมาตรฐานของกระทรวงสิ่งแวดล้อมประเทศสิงคโปร์” ผลการวิจัยพบพฤติกรรมการใช้หอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจของเจ้าหน้าที่

ผู้ป่วยและญาติผู้ป่วยส่งผลต่อคุณภาพอากาศภายในดังนี้

1. การที่หอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจไม่จำกัดจำนวนผู้เข้าเยี่ยมผู้ป่วย ช่วงเวลาการเข้าเยี่ยมจึงมีการเข้า-ออก หอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจบ่อยครั้งและจากที่มีผู้เข้าเยี่ยมจำนวนมาก เป็นเหตุให้ระดับค่าคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิสูงมากกว่าความสามารถของระบบปรับอากาศและระบายอากาศที่จะควบคุมระดับค่าคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิภายในหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ประกอบกับเครื่องปรับอากาศมีอายุการใช้งานมากกว่า 15 ปี และไม่สามารถบำรุงรักษาได้ตามแผน ประสิทธิภาพการทำงาน จึงลดลงประกอบกับจากการใช้งานอย่างต่อเนื่องของหอผู้ป่วยฯ ระบบปรับอากาศจึงไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิภายใน และระดับค่าคาร์บอนไดออกไซด์ได้ตามเกณฑ์มาตรฐาน

2. การหยุดระบบปรับอากาศเพื่อพักการทำงานของเครื่องปรับอากาศช่วงเวลา 05.00 น. - 07.00 น. ซึ่งเป็นช่วงการเช็ดตัวผู้ป่วยทำให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์สูงเกินค่ามาตรฐาน โดยค่ามาตรฐานของกระทรวงสิ่งแวดล้อมประเทศสิงคโปร์ กำหนดค่าความชื้นสัมพัทธ์ต้องไม่เกิน 70%RH

ผลจากพฤติกรรมการใช้หอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจ ส่งผลต่อคุณภาพอากาศภายในหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจเป็นเหตุให้ผู้ป่วยมีความเสี่ยงต่อการติดเชื้อแทรกซ้อนมากขึ้น จากความความชื้นที่สูงกว่าค่ามาตรฐานทำให้เชื้อโรคสามารถเจริญเติบโตและมีชีวิตอยู่ในอากาศได้นานขึ้น ระดับค่าคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิที่ผิดจากค่ามาตรฐานบ่งชี้ว่าระบบปรับอากาศและระบายอากาศมีปัญหาไม่สามารถควบคุม

ความชื้น ควบคุมระดับคาร์บอนไดออกไซด์ และอุณหภูมิภายในหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจได้ตามค่ามาตรฐาน การเจ็บจางและระบายอากาศเสียที่อาจมีการปนเปื้อนเชื้อโรคยังไม่เพียงพอควรเร่งดำเนินการแก้ไขเพื่อลดความเสี่ยงต่อการติดเชื้อของผู้ป่วย และควรตรวจวัดคุณภาพอากาศภายในอย่างน้อยปีละ 1 ครั้ง พร้อมทั้งควรบำรุงรักษาระบบปรับอากาศและระบายอากาศให้สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพตลอดเวลา

#### 4.2 ข้อเสนอแนะ

ผลการวิจัยจากข้อมูลการสำรวจและตรวจวัดคุณภาพอากาศภายในหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจ ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาปรับปรุงแก้ไขปัญหาคุณภาพอากาศภายในหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจ ซึ่งอ้างอิงมาตรฐานของกระทรวงสิ่งแวดล้อมประเทศสิงคโปร์ โดยแบ่งแนวทางการแก้ไขเป็น 2 ส่วน ดังนี้

1. แนวทางแก้ไขปัญหาระยะสั้นหรือการแก้ปัญหาเบื้องต้นโดยการปรับพฤติกรรมการทำงานและการใช้งานหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจ ดังนี้

1.1 ปรับช่วงเวลาการหยุดพักการทำงานของระบบปรับอากาศจากช่วงเวลา 05.00 น. - 07.00 น. เป็นช่วงเวลา 01.00 น. - 03.00 น. เพื่อลดปัญหาความชื้นสูงเกินค่ามาตรฐานช่วงเวลาเช็ดตัวผู้ป่วย

1.2 กำหนดจำนวนผู้เยี่ยมไม่เกิน 2 คน ต่อผู้ป่วย 1 คน ควบคุมการเข้า-ออกภายในหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจ เพื่อควบคุมระดับคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

1.3 บำรุงรักษาให้มีประสิทธิภาพการทำงานสูงสุด และเพิ่มรอบการบำรุงรักษาจากปกติบำรุงรักษาทุก 3 เดือนเป็นทุก 1 เดือน เพื่อลดความเสี่ยงเครื่องปรับอากาศชำรุดไม่สามารถใช้งานได้

2. แนวทางแก้ไขปัญหาระยะยาวสามารถดำเนินการได้โดยการปรับปรุงหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจ ดังนี้

2.1 ปรับปรุงระบบปรับอากาศและระบายอากาศ โดยเพิ่มจากเดิมที่มีอยู่จำนวน 1 ชุดเป็น 2 ชุดหรือมากกว่า เพื่อการบำรุงรักษาระบบปรับอากาศและระบายอากาศได้เต็มประสิทธิภาพ และเป็นการลดความเสี่ยงจากเครื่องปรับอากาศชำรุด

2.2 ติดตั้งเครื่องควบคุมความชื้นเพื่อรักษาระดับความชื้นให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน เนื่องจากเครื่องปรับอากาศมีข้อจำกัดด้านการควบคุมความชื้นในช่วงที่เครื่องปรับอากาศลดอุณหภูมิภายในได้ตามค่ามาตรฐานเรียบร้อย เครื่องปรับอากาศจะหยุดการลดความชื้นภายใน

2.3 ปรับปรุงประตู เข้า-ออก สำหรับผู้เข้าเยี่ยมผู้ป่วยเป็นประตู 2 ชั้น และปิด-เปิดอัตโนมัติ เพื่อควบคุมการไหลเวียนของอากาศภายในระบบปรับอากาศและระบายอากาศจึงสามารถควบคุมอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และระดับคาร์บอนไดออกไซด์ได้เต็มประสิทธิภาพ

จากการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยคาดว่าจะเริ่มต้นในการให้ความสำคัญกับปัญหาคุณภาพอากาศภายในอาคาร โดยเฉพาะคุณภาพอากาศภายในอาคารโรงพยาบาลที่มีผู้ป่วยจำนวนมาก เข้ารับการรักษาพยาบาล ซึ่งผู้ป่วยนั้นมีสภาพร่างกายที่อ่อนแอต่อการติดเชื้อ การตรวจวัดคุณภาพอากาศภายในสามารถช่วยวิเคราะห์ปัญหาด้านคุณภาพอากาศภายในอาคาร กรณี

ที่มีผู้สนใจปัญหาด้านคุณภาพอากาศภายในอาคารโรงพยาบาลหรือที่อาคารประเภทอื่นสามารถประยุกต์เพื่อดำเนินการศึกษาได้ โดยผู้วิจัยคาดว่าการศึกษาคุณภาพอากาศภายในหอผู้ป่วยหนักอายุรกรรมหัวใจสามารถเป็นประโยชน์ต่อที่สนใจต่อไป

### รายการอ้างอิง

SPRING Singapore. (2009). *Code of practice for Indoor air quality for air-conditioned buildings*. Singapore: SPRING Singapore

# การพัฒนาอิฐบล็อกซีเมนต์ผสมเศษจากขวดน้ำพลาสติกประเภท PET ให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานเป็นผนังชนิดไม่รับน้ำหนัก

## Development of Cement Brick with Recycling PET Plastic Bottle Flakes for Using as Non-Load Bearing Wall

ธนพงศ์ พ่วงภิญโญ<sup>1</sup> และ รศ.ดร. ธาณัท วรณกุล<sup>2</sup>

Tanapong Puangpinyo<sup>1</sup> and Assoc. Prof. Tanut Waroonkun, Ph.D.<sup>2</sup>

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

E-mail: taotanapong@hotmail.com<sup>1</sup>, waroonkun@yahoo.com<sup>2</sup>

### บทคัดย่อ

ในปัจจุบันขยะประเภทพลาสติกมีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะที่อยู่ในรูปของบรรจุภัณฑ์ใช้แล้วทิ้ง (Disposable Packaging) ชนิดต่างๆ เช่น ขวดน้ำดื่มที่ถูกลบแบบให้มีความสะดวก ราคาถูกและหาซื้อได้ง่ายแต่การกำจัดพลาสติกเป็นไปได้ยาก และยังมีอัตราการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ต่ำกว่าวัสดุประเภทอื่นๆ เช่น แก้วและกระดาษ งานวิจัยนี้ได้เล็งเห็นโอกาสในการนำพลาสติกเหลือใช้มาใช้ในการงานสถาปัตยกรรมเพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งในการลดปริมาณขยะประเภทพลาสติก โดยการนำมาพัฒนาเพื่อใช้งานเป็นผนังอาคารชนิดไม่รับน้ำหนักเพื่อให้สามารถใช้งานพลาสติกได้อย่างมีประสิทธิภาพและยังมุ่งเน้นที่การลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคารในสภาวะที่โลกมีอุณหภูมิสูงขึ้น ในการพัฒนาผนังซีเมนต์บล็อกจะทำการทดสอบคุณสมบัติด้านกายภาพ การรับแรงอัด และการถ่ายเทความร้อน ผลการวิจัยพบว่า การผสมเศษพลาสติกโดยการแทนที่ในอัตรา 20% ของมวลรวมละเอียดโดยน้ำหนักผนังยังสามารถรับแรงอัดได้ในระดับที่เพียงพอต่อการใช้งาน และมีความเป็นฉนวนความร้อนที่ดีในระดับหนึ่ง

### Abstract

Amount of plastic waste is increasing steadily. The products made by disposable plastic packaging are widely used. For example, water bottle consumed by most people is easy to use and inexpensive. While the disposal of plastic waste is difficult and recycling efficiency of plastics is not as good as other materials such as glass or paper. Use of plastic bottle waste as alternative building material is an opportunity to reduce the plastic waste. This study aims to develop a brick unit for non-load bearing wall that plastic waste can be efficiently used, and focuses on reducing the heat transfer through building due to climate change. The properties of material studied include basic physical properties, compressive strength and heat transfer. Research results show that the specimen with 20% replacement of plastic waste by weight of fine aggregate, the brick has passed the compressive strength standards with good thermal insulation performance.

**คำสำคัญ (Keywords):** อิฐบล็อก (Cement Brick), วัสดุทางเลือก (Recycle material), ขวดเพท (PET Bottle), การต้านทานแรงอัด (Compressive Strength), การป้องกันความร้อน (Thermal Insulation)

## 1. ที่มาและความสำคัญ

จากที่ประชากรโลกเพิ่มมากขึ้น เทคโนโลยีในด้านต่างๆ จึงพัฒนาก้าวหน้าไปมาก เพื่อตอบสนองต่อการใช้ชีวิตให้มีความสะดวกสบาย อันนำมาซึ่งปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะปัญหาที่เกิดจากการบริโภคซึ่งเป็นปัจจัยพื้นฐานที่ต้องการความสะดวก ทำให้บรรจุภัณฑ์เครื่องดื่มที่เป็นขวดพลาสติก (PET Bottle) ที่พกพาได้ง่าย สามารถทิ้งได้ทันทีโดยไม่ใช้ซ้ำ ส่งผลทำให้ปริมาณขยะชนิดนี้มีจำนวนเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากในกระบวนการกำจัดขยะนั้น(กรมควบคุมมลพิษ, 2002) ระบุว่าขยะพลาสติกเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่มีปริมาณ 15-20 % แต่สามารถนำมากำจัดได้เพียง 30% ซึ่งหากปล่อยให้ย่อยสลายเองจะต้องใช้นานกว่า 700 ปี ขณะเดียวกันการนำกลับมาใช้ใหม่มีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าวัสดุชนิดอื่นๆ เช่น แก้วและกระดาษ งานวิจัยชิ้นนี้เล็งเห็นถึงโอกาสในการนำขยะพลาสติกเหลือใช้มาใช้งานให้เกิดประโยชน์ในทางสถาปัตยกรรม โดยเลือกพัฒนาเป็นส่วนผนังอาคารชนิดที่ไม่รับน้ำหนักเหมาะต่อการนำวัสดุทางเลือกมาใช้ ซึ่งปลอดภัยกว่าการใช้เป็นส่วนโครงสร้างอาคาร ขณะเดียวกันผนังยังเป็นผนังที่ต้องรับมือกับความร้อนจากภายนอกอาคาร โดยเฉพาะในประเทศไทยที่มีภูมิอากาศแบบร้อนชื้น นอกจากนี้ในปัจจุบันสภาพอากาศโดยรวมของทั่วทั้งโลกมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจากปรากฏการณ์ภาวะเรือนกระจก (Cox, 1995) ในการพัฒนาผนังอาคารจากขยะพลาสติกนี้ จะนำขยะขวดพลาสติกมาใช้ออกแบบส่วนผสมและอัตราส่วนผสม แล้วจึงทำการทดสอบด้านการรับแรงอัด

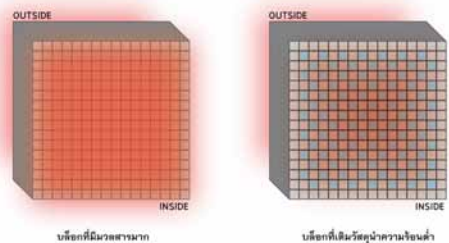
และทดสอบการถ่ายเทความร้อนเพื่อศึกษากลไกและวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการนำวัสดุผนังไปใช้งาน และการลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร

## 2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 คุณสมบัติทั่วไปของพลาสติก PET

ขวดน้ำสำหรับบรรจุน้ำเป่าชนิดใสส่วนใหญ่จะผลิตจากพลาสติกประเภทที่ 1 หรือ PET เป็นพลาสติกที่มีความใส เหนียว ไม่เปราะแตกง่าย ป้องกันความชื้นและแสงแดดได้ดี มีช่วงอุณหภูมิใช้งานได้ระหว่าง -40°C ถึง 54°C ซึ่งครอบคลุมการใช้งานในสภาพแวดล้อมปกติของประเทศไทยที่มีอุณหภูมิประมาณไม่เกิน 50°C ในช่วงที่มีอากาศร้อนจัด พลาสติก PET จะมีความหนาแน่นอยู่ที่ประมาณ 15-60 kg/m<sup>3</sup> และมีค่าการนำความร้อนที่ประมาณ 0.034-0.039 W/m K

### 2.2 แนวคิดในออกแบบผนังที่มีคุณสมบัติลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร



รูปที่ 1 แนวคิดในลดการถ่ายเทความร้อนด้วยการเติมเศษพลาสติกลงในส่วนผสมผนัง

ด้วยแนวคิดที่ต้องการนำวัสดุเหลือใช้ที่อยู่ในรูปขยะเศษพลาสติก PET มาใช้งานให้เกิดประโยชน์ในทางสถาปัตยกรรม พบว่า พลาสติกประเภทดังกล่าวมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสอดคล้องกับปัจจัยในการลดการถ่ายเทความร้อนหลายประการ โดยพลาสติก PET เป็นโพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักเบา มีค่าความหนาแน่นที่ค่อนข้างต่ำกว่าพลาสติกชนิดอื่นโดยอยู่ที่ประมาณ 15-60 kg/m<sup>3</sup> มีค่าการนำความร้อนต่ำที่ประมาณ 0.034-0.039 W/m K (Asdrubali, 2015) ซึ่งหากนำมาผสมหรือแทนที่กับมวลรวมของวัสดุก่อสร้างทั่วไป ดังรูปที่ 1 เช่น การนำมาผสมกับคอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูงและมีคุณสมบัติเป็นวัสดุมวลสารมาก (High Thermal Mass) จะทำให้วัสดุนั้น ๆ มีความหนาแน่นลดลงหรือมีคุณสมบัติความเป็นฉนวนความร้อนเพิ่มมากขึ้นได้

จากการศึกษาวัสดุก่อสร้งทั่วไปเพื่อนำมาปรับใช้ในการออกแบบผนัง พบว่า “ผนังอิฐมวลเบา” เป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าคอนกรีตบล็อกมากเนื่องจากมีอากาศที่เกิดจากรูพรุนแทรกอยู่ภายในซึ่งอากาศเป็นสสารที่มีค่าการนำความร้อนต่ำมากที่สุดที่ = 0.027 W/m K (Cengel, 2006)

จากคุณสมบัติดังกล่าวของอิฐมวลเบา การนำพลาสติกมาผสมหรือแทนที่ในส่วนผสมทั่วไป เช่น คอนกรีตบล็อกที่มีความหนาแน่นสูง อาจลดการสะสมความร้อนและเพิ่มความเป็นฉนวนความร้อนให้กับผนังได้

### 3. การออกแบบการวิจัย

จากงานวิจัยด้านการนำพลาสติกมาใช้งานในสถาปัตยกรรม (Albano, 2009) และ (Akcaozoglu, 2013) พลาสติกจะอยู่ในรูปของเศษพลาสติก (Plastic Flakes) ที่มีขนาดใกล้เคียง

กับมวลรวมอื่น ๆ เช่น ทราย กรวด สำหรับการถ่ายเทความร้อน การเติมเศษพลาสติกผสมในมวลรวมคอนกรีตสามารถลดค่าการนำความร้อนลงได้เนื่องจากพลาสติกมีค่าการนำความร้อนและมีความหนาแน่นที่ต่ำกว่าทรายและซีเมนต์ (Mazouk, 2007) และ (Akcaozoglu, 2013)

โดยงานวิจัยส่วนใหญ่จะนำเศษพลาสติกมาผสมเพื่อผลิตเป็นคอนกรีตโครงสร้าง เช่น พื้นคาน เสา ดังนั้น ในการนำมาศึกษาเพื่อใช้งานในด้านผนังอาคารจึงจะปรับให้มีรูปแบบที่เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน โดยเน้นที่การออกแบบให้สามารถรับแรงอัดได้เพียงพอต่อการใช้งานเป็นผนังไม่รับน้ำหนัก และมีคุณสมบัติในการลดการถ่ายเทความร้อน

#### 3.1 การเลือกรูปแบบและระบบผนัง

รูปแบบของผนังจะออกแบบเป็น “วัสดุก่อผนังชนิดซีเมนต์บล็อก” ซึ่งเป็นรูปแบบที่ผลิตได้ง่าย สะดวกกว่าอิฐมวลเบาที่ต้องนำไปเผา มีลักษณะที่เป็นบล็อกหรือมีลักษณะเป็นหน่วยย่อย (module) ที่ก่อได้อย่างเป็นระบบและไม่ซับซ้อนสามารถนำไปผลิตเป็นจำนวนมากได้ง่าย

ในเบื้องต้นจะเลือกใช้ขนาดอ้างอิงจากคอนกรีตบล็อกมวลเบาที่มีขนาด 600x200x75 ซม. ตาม มอก.1505-2541 มาใช้ในการออกแบบบล็อกตัวอย่าง

#### 3.2 การออกแบบส่วนผสม

ในการออกแบบผนังให้มีประสิทธิภาพที่ดีในด้านการรับแรงอัดและลดการถ่ายเทความร้อน จะเกี่ยวข้องกับปัจจัยทางด้านเนื้อวัสดุหรือส่วนผสมหลักของบล็อกผนังโดยตรง ซึ่งประกอบด้วย 1. ชนิดส่วนผสม 2. อัตราส่วนผสมและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 3. เศษพลาสติก

### 3.2.1 ชนิดของส่วนผสม

ส่วนผสมหลักจะเลือกใช้เป็น 1.ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งเป็นวัสดุประสานที่หาได้ง่าย มีความแข็งแรง ราคาไม่แพง 2.ทรายเป็นวัสดุมวลรวมทั่วไปมีความละเอียดเข้ากับซีเมนต์ได้ดี 3.น้ำ และ 4.ขยะพลาสติก ซึ่งอยู่ในรูปเศษย่อยขนาดเล็ก (Flakes) สามารถผสมกับวัสดุมวลรวมอื่นได้ง่าย โดยในการทดสอบจะนำมาแทนที่ทรายตามสัดส่วนที่กำหนด

### 3.2.2 อัตราส่วนผสมและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

จากการสำรวจโรงงานผลิตคอนกรีตบล็อกและงานวิจัย พบว่า อัตราส่วนระหว่าง ซีเมนต์: ทราย จะอยู่ที่ประมาณ 1:6-1:8 ทั้งนี้การเติมเศษพลาสติกซึ่งมีใช้มวลรวมทั่วไปในการทำซีเมนต์บล็อก อัตราส่วนซีเมนต์จึงควรมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ในเบื้องต้นได้ทำการทดสอบแรงอัดที่อัตราส่วน 1:1-1:6 พบว่า ที่อัตราส่วน 1:3 มีความเหมาะสม สามารถรับแรงอัดได้เพียงพอ โดยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) จะอยู่ที่ 0.5

### 3.2.3 ขนาดพลาสติกที่เหมาะสม และสัดส่วนการแทนที่

จากการสำรวจโรงงานคัดแยกพลาสติก พบว่าเศษที่บดได้จากขวดน้ำพลาสติกจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ขนาดในสัดส่วน 1:1 ประกอบด้วย 1. ขนาดกลาง (M) มีขนาดประมาณ 5-10 มม. และ 2. ขนาดเล็ก (S) มีขนาดไม่เกิน 5 มม. มีขนาดใกล้เคียงกันเมื่อเปรียบเทียบกับที่ใช้ในงานวิจัยซึ่งมีขนาดอยู่ระหว่าง 1-5 mm เช่น (Rahman, 2013), (Albano, 2009)

จากการทดสอบเบื้องต้น การนำพลาสติกทั้ง 2 ขนาดมาผสมในสัดส่วน 1:1 สามารถรับแรงอัดได้ดี และยังเป็นการใช้พลาสติกได้ทั้งหมดซึ่งประหยัด และคุ้มค่ากว่าการใช้พลาสติกเพียงขนาดเดียว

สำหรับการแทนที่เศษพลาสติกในมวลรวมหรือทรายจะกำหนดไว้ที่ 0% หรือบล็อกสำหรับอ้างอิง และบล็อกที่เติมพลาสติก 5, 10, 15, 20% เป็นสัดส่วนที่ใช้ในหลายงานวิจัย (Mazouk, 2007; Rahman, 2013; Mohd Daud, 2012) เช่น ซึ่งการเติมในสัดส่วนที่มากกว่านี้จะยิ่งทำให้ค่ารับแรงอัดลดลง

## 4. การดำเนินการวิจัย

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมของบล็อกตัวอย่างในการทดสอบ

บล็อก	%การแทนที่พลาสติก
P3-00(ref)	ไม่มี
P3-05	5
P3-10	10
P3-15	15
P3-20	20

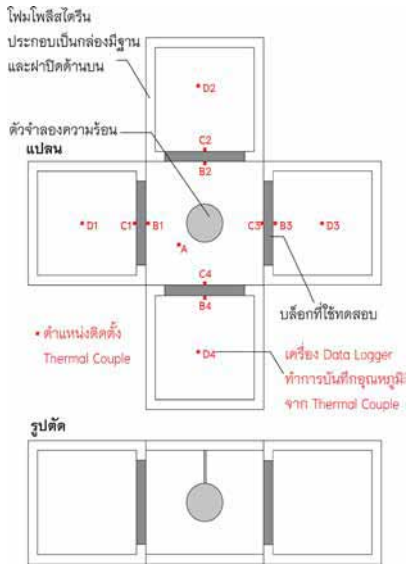
บล็อกตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบจะมีอัตราส่วน ซีเมนต์: ทราย= 1:3 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 แทนที่มวลรวมละเอียด (ทราย) ด้วยเศษพลาสติกในสัดส่วน 0 (ไม่มีการผสมพลาสติกซึ่งเป็นบล็อกอ้างอิง), 5, 10, 15, 20% โดยใช้เศษพลาสติกขนาด S และ M ผสมกันในสัดส่วน 1:1 รวมบล็อกตัวอย่างทั้งหมด 5 ชิ้นดังตารางที่ 1 โดยการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักคือ 1.การทดสอบการรับแรงอัด 2.การทดสอบการถ่ายเทความร้อน

### 4.1 การทดสอบการรับแรงอัด

เมื่อได้ทำการผสมส่วนผสมและขึ้นรูปบล็อกตัวอย่างแล้ว ในขั้นแรกจะทำการวัดค่าความหนาแน่น และจึงไปทดสอบหาค่ารับแรงอัดด้วยเครื่อง Universal Testing Machine โดยค่าที่วัดได้จะเทียบเคียงกับมาตรฐานค่ารับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา (มอก. 1505-2541) ควรมีค่าไม่ต่ำกว่า 2 MPa

การพัฒนาอิฐบล็อกซีเมนต์ผสมเศษจากขวดน้ำพลาสติกประเภท PET ให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานเป็นผนังชนิดไม่รับน้ำหนัก  
 ธนพงศ์ พ่วงวิญญู และ รศ.ดร. ธาณัท วรณกุล

4.2 การทดสอบการถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 2 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับทดสอบการถ่ายเทความร้อน

ในการทดสอบจะจำลองการให้ความร้อนด้วยวิธี Heat-flow Method และเป็นการวัดในสภาวะคงที่ Steady-state ด้วยการสร้างกล่องทดสอบที่ติดตั้งบล็อกตัวอย่างไว้ที่ด้านหนึ่ง และติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิและบันทึกข้อมูล ดังรูปที่ 2

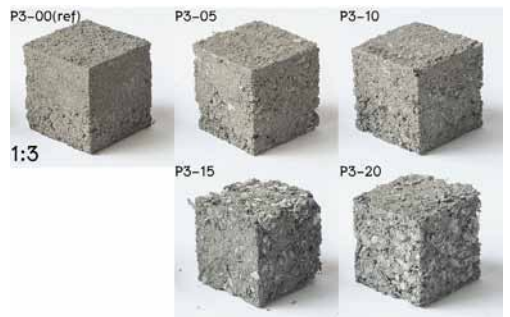
ในการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ 1. ช่วงให้ความร้อนเป็นการให้ความร้อนกับบล็อกตัวอย่าง 2. ช่วงคายความร้อนเป็นการคายความร้อนที่สะสมภายในกล่องทดสอบนำข้อมูลอุณหภูมิอากาศภายนอกและอุณหภูมิภายในกล่องทดสอบมาทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบและสรุปผล

5. ผลการวิจัย

5.1 ลักษณะโดยทั่วไป และการนำไปใช้งาน

ในการหล่อผสมและแกะออกจากไม้แบบสามารถทำได้ง่าย ผิวที่ค่อนข้างเรียบแต่ในบล็อกที่มีสัดส่วนของเศษพลาสติกตั้งแต่ 10% ขึ้นไป จะมีผิวค่อนข้างขรุขระ และเกิดการหลุดร่อนของทรายที่ผิวหน้าเล็กน้อย มีการกะเทาะของเศษพลาสติกที่มากขึ้นเมื่อเทียบกับบล็อกตัวอย่าง P3-00, P3-05 โดยเฉพาะที่สัดส่วนการแทนที่ 15 และ 20% (P3-15, P3-20) ซึ่งในภาพรวมบล็อกตัวอย่างที่ได้ยังคงมีลักษณะเป็นรูปทรงลูกบาศก์ที่สมบูรณ์ ดังรูปที่ 3

ด้านสีของผิวบล็อกจะมีสีเทาผสมกับสีส้มของทรายเล็กน้อย ซึ่งบล็อกที่มีสัดส่วนขอพลาสติกมากกว่าที่ 15 และ 20% บล็อกจะมีสีเทาที่อ่อนกว่า และเห็นสีที่ออกขาวของพลาสติกได้ชัดเจน ในภาพรวมบล็อกตัวอย่างจะสามารถนำไปใช้งานเป็นผนังอาคารชนิดไม่รับน้ำหนักได้ อาจฉาบปูนเล็กน้อยเพื่อให้ร่องที่ขรุขระลดน้อยลงอันเกิดจากการผสมเศษพลาสติกในสัดส่วนที่มาก ซึ่งจะทำได้ก่อนเป็นแนวได้ง่ายขึ้น



รูปที่ 3 ลักษณะภายนอกของบล็อกตัวอย่าง

## 5.2 ผลการทดสอบด้านการรับแรงอัด

**ตารางที่ 2** ผลการทดสอบความหนาแน่น และค่ารับแรงอัด

บล็อก (ID)	% PET	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	ค่ารับแรงอัด (MPa)
P3-00	ไม่มี	1.65	9.75
P3-05	5%	1.61	10.2
P3-10	10%	1.64	14.4
P3-15	15%	1.35	2.25
P3-20	20%	1.36	2.4
	เฉลี่ย	1.52	7.80

จากตารางที่ 2 การรับแรงอัดของบล็อกตัวอย่างที่มีสัดส่วนการแทนที่ 5 และ 10% (P3-05, P3-10) จะรับแรงอัดได้ดีเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับบล็อกอ้างอิง โดยมีค่ารับแรงอัดมากที่สุดที่การแทนที่ 10% = 14.4 MPa ซึ่งสูงกว่าค่ารับแรงอัดขั้นต่ำซึ่งกำหนดไว้ที่ 2 MPa แต่จะรับแรงอัดได้ลดลงอย่างมากที่การแทนที่ 15 และ 20% (P3-15, P3-20) ที่มีค่าประมาณ 2.2-2.4 MPa ซึ่งทั้ง 2 บล็อกค่อนข้างมีค่าใกล้เคียงกับค่ารับแรงอัดขั้นต่ำ ดังนั้น ในการนำบล็อกตัวอย่างที่มีส่วนผสมของเศษพลาสติกตั้งแต่ 15% หรือในปริมาณที่มากกว่านั้นควรต้องคำนึงถึงความปลอดภัยมากขึ้น โดยอาจปรับสัดส่วนผสมในด้านอื่น ๆ เพิ่มเติม เช่น เพิ่มปริมาณซีเมนต์ ลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลง เป็นต้น

ในด้านความหนาแน่นของบล็อกตัวอย่างสัดส่วนการแทนที่ไม่เกิน 10% จะมีความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกับบล็อกอ้างอิง และจะเริ่มมีความหนาแน่นลดลงอย่างมากที่สัดส่วนการแทนที่ตั้งแต่ 15% ขึ้นไป สอดคล้องกับค่ารับแรงอัดที่ลดลง

ในภาพรวมการทดสอบด้านการรับแรงอัดจะสอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยในการแทนที่เศษพลาสติกในสัดส่วนไม่เกิน 5-10% บล็อก

จะมีค่ารับแรงอัดที่ลดลงเล็กน้อยหรือในบางกรณีอาจมากกว่าได้เช่นกัน (Mazouk, 2007) โดยในสัดส่วนการแทนที่ตั้งแต่ 15% ขึ้นไปจะมีค่ารับแรงอัดที่ลดลงเป็นอย่างมาก จากที่เศษพลาสติกซึ่งมีขนาดโดยรวมใหญ่กว่าเม็ดทรายมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น จึงเพิ่มโอกาสในการเกิดช่องว่าง รุพุนภายในบล็อก ทำให้แรงยึดเกาะระหว่างคอนกรีตกับเศษพลาสติกลดลง บล็อกตัวอย่างจึงมีค่ารับแรงอัดลดลง และเปราะแตกหักได้ง่าย (Mazouk, 2007; Rahman et al., 2013; Shalaby et al., 2013)

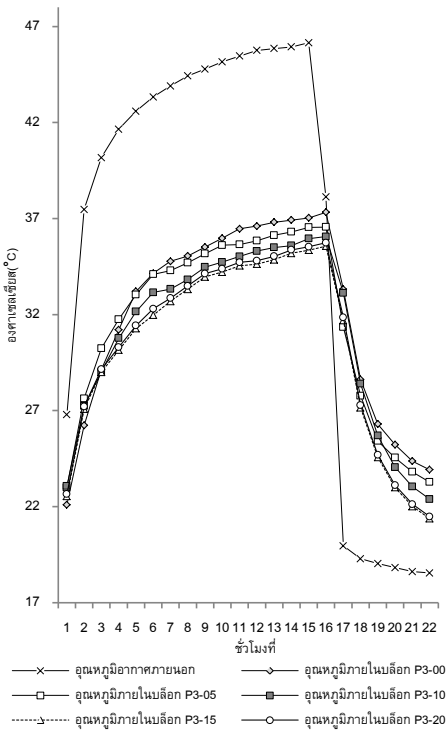
## 5.3 ผลการทดสอบการถ่ายเทความร้อน

**ตารางที่ 3** ผลอุณหภูมิในการถ่ายเทความร้อน

บล็อก	อุณหภูมิ (°C) ช่วงให้ความร้อน		อุณหภูมิ (°C) ช่วงคายความร้อน	
	ภายในเฉลี่ย	ภายในสูงสุด	ภายในเฉลี่ย	ภายในต่ำสุด
P3-00	33.32	37.32	27.72	22.77
P3-05	33.33	36.55	26.84	23.27
P3-10	32.6	36.06	26.84	22.34
P3-15	32.05	35.56	27.05	22.5
P3-20	32.22	35.74	25.92	21.48

จากตารางที่ 3 พบว่าในช่วงการให้ความร้อน บล็อก P3-15 จะมีอุณหภูมิภายในเฉลี่ย (Mean Temperature) และอุณหภูมิภายในสูงสุด (Max Temperature) ต่ำที่สุด รองลงมาคือ P3-20, P3-10, P3-05 และบล็อก P3-00 (บล็อกอ้างอิง) ขณะที่ในช่วงการคายความร้อนจะมีอัตราการลดลงของอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งบล็อกที่ผสมเศษพลาสติกในปริมาณมากกว่าจะมีแนวโน้มในการคายความร้อนได้เร็วกว่า

การพัฒนาอิฐบล็อกซีเมนต์ผสมเศษจากขวดน้ำพลาสติกประเภท PET ให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานเป็นผนังชนิดไม่รับน้ำหนัก  
ธนพงศ์ พ่วงวิญญู และ รศ.ดร. ธาณัท วรณกุล



รูปที่ 4 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในของแต่ละบล็อก

จากรูปที่ 4 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในของแต่ละบล็อก พบว่า บล็อก P3-00 มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นช้ากว่าบล็อกอื่นที่ผสมเศษพลาสติก และมีลักษณะของวัสดุที่มีการหน่วงเหนี่ยวความร้อนในช่วง 4 ชั่วโมงแรกมากกว่า สำหรับในบล็อกที่ผสมเศษพลาสติกอื่นๆ จะมีรูปแบบการเพิ่มอุณหภูมิในลักษณะเดียวกันโดยมีลักษณะที่แตกต่างจากบล็อกอ้างอิงคือมีลักษณะของวัสดุจนวนความร้อนที่มีการถ่ายเทความร้อนต่ำมากกว่า และมีลักษณะการหน่วงเหนี่ยวความร้อนที่น้อยกว่า ซึ่งบล็อกที่มีเศษพลาสติกผสมอยู่มากคือบล็อก P3-15 และ P3-20 จะมีอุณหภูมิภายในเฉลี่ยในช่วงการให้ความร้อนเฉลี่ยต่ำใกล้เคียงกัน โดยตั้งแต่ชั่วโมงที่ 4 บล็อกทั้ง 2 จะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นช้ากว่าบล็อกที่

มีเศษพลาสติกผสมอยู่น้อยกว่า (บล็อก P3-05, P3-10) สำหรับในช่วงการคายความร้อน บล็อกที่ผสมเศษพลาสติกในปริมาณมากกว่าจะการคายความร้อนได้เร็วกว่า ทั้งนี้ อาจเป็นผลจากในช่วงการให้ความร้อนมีการสะสมความร้อนภายในกล่องทดสอบได้น้อยกว่า

ในภาพรวมการทดสอบการถ่ายเทความร้อนพบว่า บล็อกตัวอย่างที่มีการเติมเศษพลาสติกซึ่งเป็นวัสดุที่มีค่านำความร้อนที่ต่ำกว่ามวลรวมทั่วไปคือซีเมนต์และทรายจะมีประสิทธิภาพในการลดการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าบล็อกที่ไม่มีเศษพลาสติกผสมอยู่ ดังเช่น (Akçaözoglu et al., 2013) ที่ระบุว่าบล็อกที่มีการแทนที่เศษพลาสติกจะทำให้ค่าการนำความร้อนรวมของวัสดุคอนกรีตลดลงกว่าคอนกรีตอ้างอิง จากที่พลาสติกมีค่าการนำความร้อน 0.15 W/m K ขณะที่มวลรวมอื่นจะมีค่าอยู่ที่ 2 W/m K

## 6. สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดสอบในด้านการรับแรงอัดพบว่าบล็อกที่ผสมเศษพลาสติกมีค่ารับแรงอัดมากกว่าที่กำหนดไว้ที่ 2 MPa ซึ่งเป็นค่าที่เพียงพอในการนำไปใช้งานเป็นผนังอาคารชนิดไม่รับแรงได้ โดยเมื่อนำผลการทดสอบการถ่ายเทความร้อนมาพิจารณาร่วมด้วย บล็อกที่มีการผสมเศษพลาสติกในปริมาณที่มากกว่าจะสามารถลดการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าคือ บล็อก P3-15 ซึ่งให้ผลการทดสอบการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด ขณะที่บล็อก P3-20 จะประสิทธิภาพในการเป็นวัสดุจนวนความร้อนที่ค่อนข้างใกล้เคียงกันดังรูปที่ 4 แต่บล็อกดังกล่าวจะมีประโยชน์ในแง่การนำเศษพลาสติกมาใช้ได้มากกว่าบล็อก P3-15 ซึ่งเป็นข้อดีในแง่การช่วยลดปริมาณขยะ

จากผลการทดสอบการถ่ายเทความร้อนพบข้อสังเกตว่าบล็อก P3-20 ควรจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าบล็อก P3-15 ซึ่งค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกันมาก อย่างไรก็ตามบล็อกทั้ง 2 มีประสิทธิภาพดีกว่าบล็อกที่เศษพลาสติกในปริมาณน้อยกว่าค่อนข้างชัดเจน การนำบล็อก P3-20 ไปใช้งานจึงมีความเหมาะสมเช่นเดียวกับบล็อก P3-15

ทั้งนี้ ในการนำบล็อก P3-15 และ P3-20 ไปใช้งาน ควรมีการทดสอบหรือปรับปรุงประสิทธิภาพการรับแรงอัดเพิ่มเติม เนื่องจากค่ารับแรงอัดของบล็อกทั้ง 2 อยู่ที่ 2.2-2.4 MPa ซึ่งค่อนข้างใกล้เคียงกับค่ารับแรงอัดที่กำหนดให้ไม่ควรต่ำกว่า 2 MPa โดยอาจเป็นการปรับปรุงอัตราส่วนผสม ปริมาณของการเติมเศษพลาสติก รวมถึงการเติมสารผสมเพิ่ม(Admixtures) เพื่อเพิ่มให้บล็อกมีประสิทธิภาพการรับแรงอัดที่ดีขึ้นเป็นต้น

### รายการอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. (2002). *รายงานสถานการณ์มลพิษ ของประเทศไทย ปี 2546*. กรุงเทพฯ: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

Akçaözoglu, S., Akçaözoglu, K. & Atis, C. D. (2013). *Thermal conductivity, compressive strength and ultrasonic wave velocity of cementitious composite containing waste PET lightweight aggregate (WPLA)*. Composites: Part B 45 (2013), 721-726.

Albano, C., Camacho, N., Hernández, M., Matheus, A. & a, A. G. (2009). Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior. *Waste Management* 29(2009), 2707-2716.

Asdrubali, F., D'Alessandro, F. & Schiavoni, S. (2015). A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies* 4(2015), 1-17.

Cengel, Y. A. (2006). *Heat and mass transfer 3<sup>rd</sup> edition*. New York: McGraw Hill.

Cox, P. M., Betts, R. A., Jones, C. D., Spal, S. A. & Totterdell, I. J. (2000, November 9). *Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate mode*. *Macmillan Magazine*, pp. 184-187.

Daud, M. A., Desa, H. M., Wahidudin, u. & Mohamed, K. (2012). Influence of polymer waste (polyethylene terephthalate) in composites structure materials. *European International Journal of Science and Technology*, 15-22.

Marzouk, O. Y., Dheilly, R. & Queneudec, M. (2007). Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites. *Waste Management* 27(2007), 310-318.

Rahman, M., Mah, M. & Chowdhury, T. (2013). Utilization of waste PET bottles as aggregate in masonry mortar. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2(11), 1300-1305.

- 106 การพัฒนาอิฐบล็อกซีเมนต์ผสมเศษจากขวดน้ำพลาสติกประเภท PET ให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานเป็นผนังชนิดไม่รับน้ำหนัก  
ธนพงศ์ พ่วงภิญโญ และ รศ.ดร. ธานัท วรณกุล

Shalaby, A., Ward, A., Refaee, A., Abd-El-Messieh, S., Abd-El-Nour, K., El-Nashar, D., et al. (2013). Compressive Strength and Electrical Properties of Cement Paste Utilizing Waste Polyethylene Terephthalate Bottles. *Journal of Applied Sciences Research*, 9(7), 4160-4173.

การวิเคราะห์ความไวของอิทธิพลตัวแปรองค์ประกอบรอบอาคาร  
ที่มีผลต่อปริมาณการใช้ไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศในบ้านจัดสรร  
ประเภทบ้านเดี่ยว

Sensitivity Index of Building Envelope on Energy Consumption  
for Space Cooling in Thai Detached Houses

ณัฐรฐา อัมพร อินทร์พรหม<sup>1</sup> และ ดร. ดารณี จารีมิตร<sup>2</sup>

Natthaumporn Inprom<sup>1</sup> and Daranee Jareemit, Ph.D.<sup>2</sup>

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

E-mail: ntip\_ip@hotmail.com<sup>1</sup>, jdaranee@gmail.com<sup>2</sup>

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรองค์ประกอบรอบอาคารที่มีผลต่อปริมาณการใช้ไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศในบ้านจัดสรรประเภทบ้านเดี่ยว จำนวน 131 หลัง การจำลองค่าการใช้พลังงานใช้โปรแกรม eQUEST3.64 และผลจากการจำลองพลังงานนำมาวิเคราะห์หาลำดับความสำคัญโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความถดถอยมาตรฐาน (beta) จากการวิเคราะห์ความไวแบบมหภาคโดยผลการวิเคราะห์พบว่า ตัวแปรที่มีอิทธิพลมากที่สุด 3 ลำดับแรก คือ ตัวแปรสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรังสีอาทิตย์ที่ส่งผ่านกระจกมีอิทธิพลต่อการใช้พลังงานมากที่สุด (beta = 0.773) รองลงมาคือ ตัวแปรค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของผนัง (beta = 0.563) และตัวแปรค่าการดูดกลืนแสงของสีผนัง (beta = 0.201) ตามลำดับ

### Abstract

This research studied an influence of envelope design parameters on energy consumption for space cooling in 131 Thai detached houses. The total energy consumption (kWh) for space cooling was performed via using eQUEST3.65. The global sensitivity analysis was used to determine the parameters, which significantly impacted the building energy performance. It was found that three of the most significant parameters were SHGC (beta = 0.773) followed by U-value of walls (beta = 0.563) and absorption of wall colors (beta = 0.201), respectively.

**คำสำคัญ (Keywords):** กรอบอาคาร (Building Envelope), บ้านจัดสรรประเภทบ้านเดี่ยว (Detached Houses), แบบจำลองด้านพลังงาน (Energy Simulation Model), การประหยัดพลังงาน (Energy Saving), การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis)

## 1. บทนำ

แนวทางการออกแบบและการปรับปรุงอาคารที่พักอาศัยภายในประเทศไทยในปัจจุบันมีหลายวิธี โดยส่วนใหญ่เน้นไปที่การลดปริมาณความร้อนที่ผ่านเข้ามาจากกรอบอาคาร เนื่องจากกรอบอาคารเป็นส่วนที่ส่งผลโดยตรงกับปริมาณความร้อนที่ผ่านเข้าสู่อาคารมากที่สุด โดยปริมาณความร้อนนี้เป็นสาเหตุหลักของการเกิดภาระการทำความเย็นในระบบปรับอากาศ ซึ่งมีสัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคารที่พักอาศัยที่มากที่สุด จากการศึกษาของงานวิจัย พบว่าการออกแบบอาคารเพื่อการประหยัดพลังงานส่วนใหญ่เน้นไปที่การเลือกเปลี่ยนวัสดุก่อสร้างกรอบอาคารเป็นหลัก อาทิ การปรับเปลี่ยนวัสดุฉนวนที่หลังคา (กฤษณ์ อ่อนงาม, 2554) การปรับเปลี่ยนวัสดุก่อสร้างและวัสดุฉนวนที่ผนัง (กฤษณ์ อ่อนงาม, 2554), (ศิลาชัย ทับทิมทอง, 2553), (กัญญาภัค แต่พิพัฒน์พงศ์, 2553), และการปรับเปลี่ยนวัสดุก่อสร้างกระจกที่ช่องเปิด (กฤษณ์ อ่อนงาม, 2554), (ประวิตร กิตติชาญธีระ, 2553), (กัญญาภัค แต่พิพัฒน์พงศ์, 2553) เป็นต้น แต่จากประเด็นที่มีการศึกษาในข้างต้นนี้ยังไม่ได้มีการเรียงลำดับเปรียบเทียบผลจากการปรับปรุงที่แน่ชัด โดยเฉพาะการเปรียบเทียบผลกระทบจากการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบสำหรับการออกแบบอื่น ๆ อาทิ อัตราส่วนช่องเปิดต่อพื้นที่ผนัง ระยะเวลาชายคา หรือสีที่ใช้ทาภายนอกอาคาร ซึ่งตัวแปรองค์ประกอบเหล่านี้ล้วนแต่มีผลกระทบโดยตรงต่อปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเช่นกัน

จากการพิจารณาแนวทางการออกแบบและการปรับปรุงอาคารที่พักอาศัยในต่างประเทศพบว่ามีการนำเอาทฤษฎีการวิเคราะห์ความไวของตัวแปร (sensitivity analysis) ซึ่งถูกใช้กัน

อย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์ความเสี่ยงเพื่อช่วยในการตัดสินใจ (Hamby, 1994) และนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานจากแนวทางต่าง ๆ ซึ่งสามารถใช้ประกอบการตัดสินใจได้ตั้งแต่เริ่มต้นกระบวนการออกแบบไปจนถึงกระบวนการบริหารจัดการอาคาร การประเมินอาคารหรือการปรับปรุงอาคาร (Tian, 2013)

จากประเด็นข้างต้นนี้ ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาวิเคราะห์ความไวของอิทธิพลองค์ประกอบกรอบอาคารต่าง ๆ เพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณา สำหรับการออกแบบที่พักอาศัยประเภทบ้านเดี่ยวในโครงการจัดสรรในอนาคตซึ่งมีรูปแบบที่พักอาศัยที่มีแนวโน้มความต้องการซื้อมากที่สุด (ธนาคารอาคารสงเคราะห์, 2557) ตลอดจนการปรับปรุงบ้านในโครงการจัดสรรที่มีอยู่เดิมให้สามารถลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 2. ทฤษฎีและแนวความคิดที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาแนวทางการออกแบบและการปรับปรุงเพื่อการประหยัดพลังงานภายในอาคารที่พักอาศัยที่มีอยู่ในปัจจุบัน สามารถแบ่งตามรายละเอียดออกเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

### 2.1 การวิเคราะห์ความไวของตัวแปรแบบมหภาค (global sensitivity analysis)

คือ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นหลายตัวแปรที่มีต่อตัวแปรตาม โดยทดลองเปลี่ยนค่าตัวแปรต้นที่ต้องการศึกษาทั้งหมดพร้อมกันในแบบจำลองข้อมูลแต่ละกรณี เพื่อประมาณค่าความแตกต่างที่เกิดขึ้น (Hamby, 1994) ซึ่งเมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับด้านการวิเคราะห์พลังงานสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนและรายละเอียดต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ (Rodríguez, Andrés, Muñoz,

López & Zhang, 2013)

2.1.1 กำหนดรายละเอียดของแบบจำลองอาคารที่จะศึกษา

2.1.2 กำหนดช่วงการกระจายของตัวแปรต้น โดยสามารถแบ่งลักษณะการกระจายของตัวแปรต้นได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

- 1) การกระจายแบบต่อเนื่อง
- 2) การกระจายแบบเป็นสัดส่วนกัน
- 3) การกระจายแบบไม่ต่อเนื่อง

2.1.3 สร้างแบบจำลองของข้อมูลจากการสุ่มตัวอย่าง ในที่นี้ใช้หลักการละตินไฮเปอร์คิวบ์ (Latin-Hypercube Sampling; LHS) ที่มีการสุ่มค่าของแต่ละตัวแปรจากทุก ๆ อินตรภาคชั้นของข้อมูล ทำให้แบบจำลองที่ได้นั้นมีประสิทธิภาพในการเป็นตัวแทนของข้อมูลทั้งหมด โดยพบว่าจำนวนของการสุ่มที่ 200 กรณี สามารถให้ผลที่ยอมรับได้

2.1.4 ประมวลผลและเก็บรวบรวมผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองพลังงาน

2.1.5 วิเคราะห์ความไวของตัวแปรโดยใช้การวิเคราะห์ความถดถอยเพื่อจัดลำดับอิทธิพลตัวแปรต้นที่มีผลต่อปริมาณการใช้ไฟฟ้าจากค่าสัมประสิทธิ์ความถดถอยมาตรฐาน (beta)

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาแนวทางการออกแบบและปรับปรุงกรอบอาคารเพื่อการประหยัดพลังงานสำหรับอาคารที่พักอาศัยจากหลายงานวิจัยที่มีอยู่ในปัจจุบัน พบว่า มีผลสรุปแนวทางที่เลือกใช้แตกต่างกันไปตามตัวแปรที่นำมาศึกษาดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปงานวิจัยภายในประเทศที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัย (ปีวิจัย)	ปัจจัยด้านกรอบอาคาร							
	หลังคา		ผนังข้าง		ผนังโปร่งแสง		แผงบังแดด	
	ขนาด, รูปทรง, ตำแหน่ง, ทิศทาง, สีพื้นผิว	ขนาด, รูปทรง, ตำแหน่ง, ทิศทาง, สีพื้นผิว	ขนาด, รูปทรง, ตำแหน่ง, ทิศทาง, สีพื้นผิว	ขนาด, รูปทรง, ตำแหน่ง, ทิศทาง, สีพื้นผิว	ขนาด, รูปทรง, ตำแหน่ง, ทิศทาง, สีพื้นผิว	ขนาด, รูปทรง, ตำแหน่ง, ทิศทาง, สีพื้นผิว	ขนาด, รูปทรง, ตำแหน่ง, ทิศทาง, สีพื้นผิว	ขนาด, รูปทรง, ตำแหน่ง, ทิศทาง, สีพื้นผิว
กฤษณ์ (2554)								
กัญญาภัก (2553)								
ประวิตร (2553)								
พิลปชัย (2553)								
เฉลิมชัย และคณะ (2550)								
พงษ์กานต์ (2549)								
ศักดิ์ (2547)								
อธิศน (2547)								
พนิตา (2543)								
เอกพันธ์ (2539)								

เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 1 พบว่า ตัวแปรด้านวัสดุของผนังและช่องเปิดมีการนำไปศึกษาแนวทางการออกแบบและการปรับปรุงมากที่สุด ส่วนตัวแปรด้านตำแหน่งและทิศทางขององค์ประกอบกรอบอาคารมีการนำไปศึกษาแนวทางการออกแบบและการปรับปรุงน้อยที่สุด โดยงานวิจัยของกฤษณ์ อ่อนงาม (2554) ได้ศึกษาตัวแปรครอบคลุมที่สุด ซึ่งทำการวิจัยเชิงคำนวณตัวเลขของปริมาณการใช้พลังงานเพื่อการปรับอากาศภายในอาคาร โดยใช้โปรแกรม TAS simulation วิเคราะห์แบบจำลองอาคารที่มีลักษณะเป็นบ้านเดี่ยว ขนาด 8.0 ม. x 8.0 ม. มีรูปแบบอัตราส่วนช่องเปิดร้อยละ 16.67 และ 33.33 เพื่อศึกษาผลกระทบจากการเลือกปรับเปลี่ยนวัสดุก่อสร้างชนิดต่าง ๆ ในแต่ละองค์ประกอบของกรอบอาคารที่มีต่ออุณหภูมิเฉลี่ยภายในอาคารและปริมาณการใช้พลังงาน แต่จากการสรุปผลการทดลอง พบว่า มีการเปรียบเทียบผลจากการเลือกปรับเปลี่ยนวัสดุแต่ละกรณี เฉพาะในส่วนขององค์ประกอบของกรอบอาคารประเภทเดียวกัน แต่ไม่มีการเปรียบเทียบผลโดยภาพรวมที่เกิดจากการปรับปรุงแต่ละส่วน เช่น

การวิเคราะห์ความไวของอิทธิพลตัวแปรองค์ประกอบอาคารที่มีผลต่อปริมาณการใช้ไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศในบ้านจัดสรรประเภทบ้านเดี่ยว  
 ณัฐราอัมพร อินทร์พรหม และ ดร. ดารณี จาริมิตร

การเปรียบเทียบระหว่างผลการปรับปรุงหลังคาเทียบกับปรับปรุงผนัง เป็นต้น นอกจากนี้ยังไม่มีการศึกษาองค์ประกอบการออกแบบอื่นที่นอกเหนือจากอัตราส่วนช่องเปิดเลย และจากการทบทวนอาคารกรณีศึกษาในแต่ละงานวิจัยพบว่า ยังไม่มีการศึกษาที่ครอบคลุมกลุ่มอาคารบ้านจัดสรรประเภทบ้านเดี่ยว โดยงานวิจัยส่วนใหญ่เลือกที่จะกำหนดแบบจำลองอาคารขึ้นเองไม่ได้มาจากตัวแทนข้อมูลที่มีอยู่จริง จึงทำให้ยังไม่มีข้อสรุปที่ชัดเจนสำหรับการเปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณการใช้พลังงานที่มีผลมาจากองค์ประกอบอาคารอื่น ๆ ที่ครอบคลุมในกลุ่มอาคารที่พักอาศัยประเภทนี้

**3. ระเบียบวิธีวิจัย**

งานวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ช่วงและมีรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินการ ดังนี้

**3.1 ช่วงสำรวจ**

งานวิจัยนี้เก็บข้อมูลจากบ้านเดี่ยว 2 ชั้น ในโครงการจัดสรรที่ยังเปิดขายอยู่ในปัจจุบัน โดยแบ่งประเภทข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

**3.1.1 ข้อมูลที่เก็บสำหรับบ้านกรณีศึกษา**

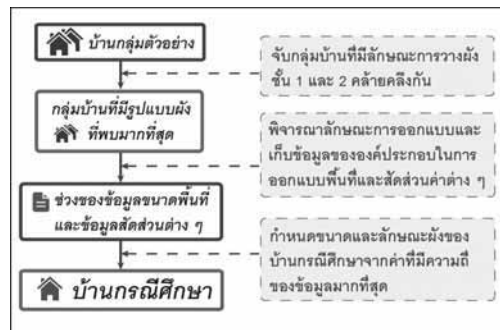
- 1) รูปแบบการวางผังห้องแต่ละชั้น
- 2) ขนาดพื้นที่ใช้สอยห้องต่าง ๆ
- 3) สัดส่วนกว้างยาวผนังและห้องต่าง ๆ

ข้อมูลในส่วนนี้จะถูกนำมาวิเคราะห์จัดกลุ่มข้อมูลผ่านขั้นตอนดังรูปที่ 1 เพื่อใช้กำหนดบ้านกรณีศึกษา

**3.1.2 ข้อมูลที่เก็บสำหรับกำหนดช่วงตัวแปรต้นที่ใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลขของปริมาณการใช้ไฟฟ้าต่อปีของเครื่องปรับอากาศ** ทำการเก็บข้อมูลจากกลุ่มบ้านที่มีรูปแบบผังที่พบมากที่สุด โดยบ้านในกลุ่มนี้จะถูกนำมาพิจารณาองค์ประกอบอาคารแล้วเก็บข้อมูล ดังนี้

- 1) อัตราส่วนช่องเปิดต่อพื้นที่ผนัง
- 2) รูปแบบหลังคา
- 3) ระยะเวลาชายคา
- 4) ระดับสีของผนังและหลังคา

ข้อมูลส่วนนี้จะถูกนำไปวิเคราะห์ค่าต่ำสุด (min) ค่าสูงสุด (max) ค่าเฉลี่ย (mean) และค่าการกระจาย (SD) เพื่อทำการกำหนดรูปแบบการกระจายตัวของข้อมูลแล้วนำไปสร้างแบบจำลองข้อมูลขึ้นมา 200 กรณี โดยการสุ่มตัวอย่างด้วยวิธี LHS ในโปรแกรม Simlab 2.2 เพื่อกำหนดชุดข้อมูลตัวแปรต้น



รูปที่ 1 ขั้นตอนการจัดกลุ่มข้อมูล

**3.2 ช่วงการคำนวณเชิงตัวเลขของปริมาณการใช้ไฟฟ้าต่อปีของเครื่องปรับอากาศ**

งานวิจัยนี้ทำการสร้างแบบจำลองพลังงานของบ้านกรณีศึกษาขึ้นในโปรแกรม eQUEST 3.64 แล้วทำการวิเคราะห์ตามขั้นตอน ดังต่อไปนี้

**3.2.1 คำนวณปริมาณการใช้ไฟฟ้าต่อปีของเครื่องปรับอากาศภายในบ้านกรณีศึกษา** โดยการป้อนข้อมูลค่าของตัวแปรต้นประเภทต่าง ๆ ที่ได้จากการสร้างแบบจำลองข้อมูล

**3.2.2 วิเคราะห์ความไวของตัวแปรแบบมหภาค** โดยการวิเคราะห์ความถดถอยระหว่างความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นกับตัวแปรตามในโปรแกรม SPSS

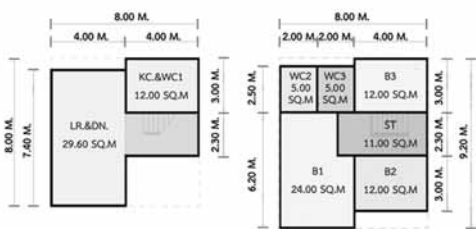
3.2.3 นำเสนอแนวทางการปรับปรุงแก้ไขหรือแนวทางในการออกแบบใหม่ โดยใช้วิธีการพิจารณาจากลำดับของอิทธิพลตัวแปรต้น

#### 4. ผลการสำรวจข้อมูล

งานวิจัยนี้แบ่งการสรุปผลจากการสำรวจข้อมูลออกเป็น 3 ส่วน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 4.1 แบบบ้านกรณีศึกษา

จากการสำรวจองค์ประกอบกรอบอาคารของบ้านเดี่ยว 2 ชั้น ในโครงการจัดสรรภายในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลจาก 14 บริษัทอสังหาริมทรัพย์ รวม 167 โครงการ พบว่าแบบบ้านทั้งหมดมี 328 แบบ ซึ่งเมื่อนำมาจัดกลุ่มตามการวางผังห้องต่าง ๆ พบว่า กลุ่มที่มีรูปแบบการวางผังที่พบมากที่สุดมีจำนวนแบบบ้านทั้งหมด 131 แบบ จึงทำการศึกษาแบบบ้านทั้งหมดในกลุ่มนี้เพื่อนำมาใช้กำหนดรูปแบบผังและสัดส่วนความกว้างยาวของห้องต่าง ๆ ของบ้านกรณีศึกษาได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ผังพื้นที่ชั้น 1 และ 2 ของบ้านกรณีศึกษา

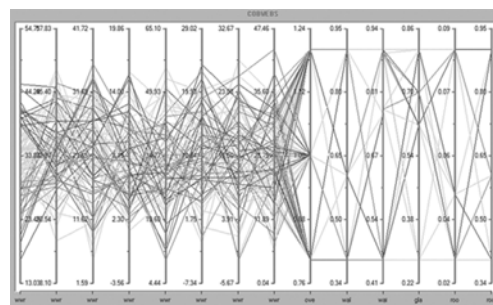
##### 4.2 ตัวแปรต้นที่ใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลข

ตารางที่ 2 แสดงช่วงการกระจายตัวของตัวแปรต้นประเภทต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วย 1) อัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนังในแต่ละด้านในชั้นต่าง ๆ 2) ระยะยื่นชายคา 3) ค่าการดูดกลืนรังสี

อาทิตย์ของสีผนัง 4) U-value ของผนัง 5) ค่า SHGC ของกระจก 6) ค่า U-value ของหลังคา และ 7) ค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของสีหลังคา โดยช่วงการกระจายของข้อมูลตัวแปรต้นนี้ถูกนำไปใช้สร้างแบบจำลองข้อมูลด้วยการสุ่มตัวอย่างทั้งหมด 200 กรณี ดังรูปที่ 3 และตารางที่ 3 แสดงตัวอย่างผลการสร้างแบบจำลองข้อมูลตัวแปรต้นในแต่ละกรณี

ตารางที่ 2 ช่วงของข้อมูลตัวแปรต้นแต่ละประเภท

ตัวแปรต้น	ข้อมูลกระจายแบบต่อเนื่อง			
	mean	SD		
WWR Front1	33.00	6.03		
WWR Right1	34.34	7.60		
WWR Back1	22.10	6.45		
WWR Left1	7.90	3.68		
WWR Front2	33.09	9.07		
WWR Right2	11.69	5.51		
WWR Back2	13.21	6.01		
WWR Left2	22.24	7.11		
ตัวแปรต้น	ข้อมูลกระจายแบบไม่ต่อเนื่อง			
	level 1	level 2	level 3	level 4
ระยะยื่นชายคา	0.80	1.00	1.20	
สีผนัง (abs.)	อ่อน (0.4)	กลาง (0.6)	เข้ม (0.9)	
U-value ผนัง (Btu/ft <sup>2</sup> hr°F.)	0.459	0.760	0.893	
SHGC ของกระจก	จอนกรีตสำเร็จรูป			
	0.81	0.62	0.70	0.28
	กระจกใส	กระจกเขียว	กระจกสะท้อน	กระจก low-e
U-value หลังคา (Btu/ft <sup>2</sup> hr°F.)	0.086 0.046 0.028			
	กระเบื้องคอนกรีต			
	Reflective Foil			
	ไม่มีฉนวน ฉนวนใยแก้ว 3" ฉนวนใยแก้ว 6"			
สีหลังคา (abs.)	อ่อน (0.4)	กลาง (0.6)	เข้ม (0.9)	



รูปที่ 3 การสุ่มตัวอย่างข้อมูลในตัวแปรประเภทต่าง ๆ

การใช้การวิเคราะห์ฟอลท์ฟรีในการแสดงผลกระทบจากปัจจัยเสี่ยงต่อเวลาในการก่อสร้างระบบป้องกันดินพังแบบเข็มพืดเหล็ก กันตพล ชีวะถาวร และ ดร. เทอดธิดา ทิพย์รัตน์

ตารางที่ 3 ตัวอย่างชุดข้อมูลตัวแปรต้นแต่ละกรณี

ตัวแปรต้น	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่....	กรณีที่ 200
WWR ด้านหน้า 1	39.65	37.88	....	35.85
WWR ด้านหลัง 1	32.37	30.57	....	16.59
WWR ด้านซ้าย 1	4.93	7.17	....	10.71
WWR ด้านขวา 1	30.76	33.42	....	25.37
WWR ด้านซ้าย 2	31.26	24.37	....	26.72
WWR ด้านขวา 2	13.97	7.64	....	15.99
WWR ด้านหน้า 2	42.41	28.41	....	30.37
WWR ด้านหลัง 2	4.53	13.80	....	18.97
ระยะยื่นชายคา	1.20	1.00	....	1.00
SHGC	0.28	0.62	....	0.81
U-value หน้า	0.89	0.89	....	0.89
สีผนัง (abs.)	0.40	0.90	....	0.90
U-value หลังคา	0.09	0.05	....	0.09
สีหลังคา (abs.)	0.90	0.60	....	0.90

4.3 ตัวแปรควบคุมที่ใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลข

จากชุดข้อมูลตัวแปรต้น 200 กรณีมีการกำหนดตัวแปรควบคุมในแต่ละกรณีดังนี้ โดยตัวแปรควบคุมประกอบไปด้วยตัวแปรในด้านต่าง ๆ ได้แก่ สภาพแวดล้อมภายนอก ภายนอกของบ้านกรณีศึกษาอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและตารางเวลาของกิจกรรมการใช้งานภายในอาคารดังตารางที่ 4 ตารางที่ 4 ตัวแปรควบคุมด้านต่าง ๆ

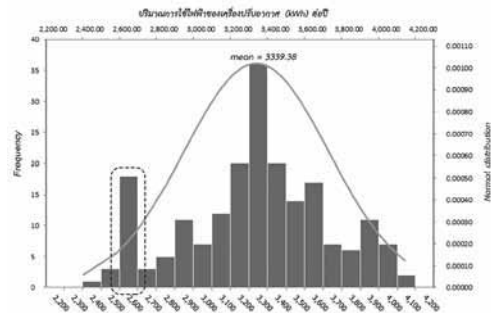
5. ผลจากคำนวณเชิงตัวเลข

งานวิจัยนี้แบ่งการสรุปผลจากการคำนวณเชิงตัวเลขออกเป็น 2 ส่วน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณการใช้ไฟฟ้า

จากการวิเคราะห์ปริมาณการใช้ไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศทั้งหมด 200 กรณี พบว่า มีช่วงปริมาณการใช้ไฟฟ้าตั้งแต่ 2,405.80 กิโลวัตต์ถึง 4,141.80 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อปีและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3,339.38 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อปี โดยมีค่าการกระจายเท่ากับ 390.95 แสดงในรูปที่ 4 และจากทางด้านซ้ายของแผนภูมิมีความถี่สะสมในช่วง 2,600 ถึง 2,700 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อปีมากผิด

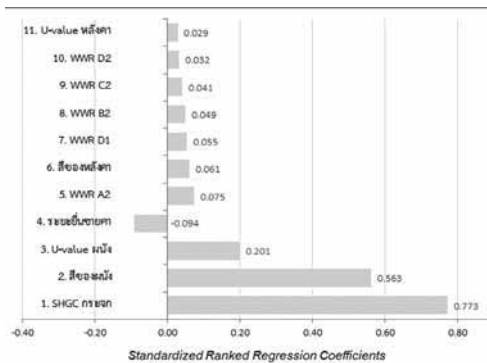
ปกติซึ่งเมื่อพิจารณาร่วมกับแบบจำลองข้อมูลตัวแปรต้นของค่าปริมาณการใช้ไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศต่อปีในข้อมูลกลุ่มนี้ พบว่า ส่วนใหญ่มีค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากรังสีอาทิตย์ของกระจก (SHGC) อยู่ในช่วงที่ต่ำกว่าข้อมูลช่วงอื่น ๆ คือ มีค่าเท่ากับ 0.28 ซึ่งเป็นค่าของกระจก 2 ชั้นชนิด low-e



รูปที่ 4 การแจกแจงความถี่ของปริมาณการใช้ไฟฟ้าของ เครื่องปรับอากาศต่อปีทั้งหมด 200 กรณี

5.2 ผลการวิเคราะห์สมการถดถอย

จากแบบจำลองข้อมูลตัวแปรองค์ประกอบรอบอาคารประเภทต่าง ๆ ทั้ง 14 ตัวแปรและผลการวิเคราะห์ปริมาณการใช้ไฟฟ้าในส่วนขอเครื่องปรับอากาศต่อปีทั้งหมด 200 กรณี ถูกนำมากำหนดเป็นตัวแปรต้น 14 ตัวแปรและตัวแปรตามลำดับ เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์สมการถดถอย (regression) โดยเลือกใช้วิธีการนำเข้าตัวแปรแบบเป็นขั้นตอน (stepwise) เพื่อคัดตัวแปรต้นที่ละตัวแปรโดยวิเคราะห์จากอิทธิพลตัวแปรต้นนั้น ๆ ที่มีต่อปริมาณการใช้ไฟฟ้า ผลจากการศึกษาสามารถสรุปการจัดลำดับอิทธิพลแต่ละตัวแปรเปรียบเทียบกับกันจากค่า beta ได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ผลการจัดลำดับอิทธิพลตัวแปรองค์ประกอบรอบอาคารแต่ละประเภท

จากการพิจารณารูปที่ 5 พบว่า เหลือตัวแปรต้นที่ถูกคัดเลือกอยู่ทั้งหมด 11 ตัวแปรที่พบว่ามีอิทธิพลต่อปริมาณการใช้พลังงาน โดยมีลำดับของอิทธิพลตัวแปรองค์ประกอบของกรอบอาคาร ได้แก่ ตัวแปรค่า SHGC ของกระจกซึ่งมีค่า beta มากที่สุด รองลงมาคือ ตัวแปรค่า U-value ของผนัง และตัวแปรสีผนัง ตามลำดับ ซึ่งทั้ง 3 ตัวแปรนี้มีค่า beta ค่อนข้างสูงแตกต่างจากตัวแปรลำดับอื่น ๆ ที่มีค่า beta แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยตัวแปรค่า U-value ของหลังคามีค่า beta น้อยที่สุด

## 6. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

ตัวแปรที่ควรให้ความสำคัญในการออกแบบหรือการตัดสินใจเลือกปรับปรุงเพื่อลดปริมาณการใช้พลังงานที่เหมาะสมกับกลุ่มอาคารบ้านจัดสรรประเภทบ้านเดี่ยวมากที่สุด คือ ตัวแปรที่มีค่า Beta มากที่สุด 3 ลำดับแรก ได้แก่ ตัวแปรค่า SHGC ของกระจก ซึ่งสามารถลดปริมาณการใช้พลังงานได้โดยการเลือกใช้กระจกที่มีค่า SHGC ต่ำ เนื่องจาก เป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านกระจก โดยมีค่าแตกต่างกันไปตามชนิดของกระจก ลำดับถัดมาคือ สีของ

ผนัง ซึ่งสามารถลดปริมาณการใช้พลังงานได้โดยการเลือกทาสีผนังที่มีสีอ่อนซึ่งมีค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ต่ำ เนื่องจากจะช่วยลดการดูดกลืนความร้อนเข้าสู่อาคารได้ดีกว่าผนังที่มีสีเข้ม และลำดับสุดท้ายคือ ตัวแปรค่า U-value ของผนัง ซึ่งสามารถลดปริมาณการใช้พลังงานได้โดยการเลือกใช้วัสดุก่อสร้างที่มีค่า U-value ต่ำ หรือเพิ่มการติดตั้งฉนวนที่ผนังเพื่อลดค่า U-value รวมของผนังลง ซึ่งจะช่วยในการลดปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่อาคารผ่านผนังได้ดีขึ้น

จากผลการวิจัยในข้างต้นนี้ อาจมีข้อจำกัดจากขอบเขตของบ้านกรณีศึกษาที่ได้ทำการคัดเลือกมา ดังนั้น เพื่อประสิทธิภาพในประยุกต์ใช้จึงควรพิจารณาควบคู่ไปกับขอบเขตขององค์ประกอบรอบอาคารและตัวแปรควบคุมด้านต่าง ๆ ที่งานวิจัยนี้ได้กำหนดไว้ นอกจากนี้ แนวทางที่ได้นำเสนอไปข้างต้นเป็นเพียงแนวทางที่นำเสนอจากการเปรียบเทียบในด้านปริมาณการใช้พลังงานเพียงด้านเดียว ยังไม่ได้มีการพิจารณาในแง่ของค่าใช้จ่ายในการลงทุนซึ่งเป็นอีกประเด็นที่สำคัญสำหรับการนำไปศึกษาต่อในอนาคต

## รายการอ้างอิง

- กฤษณ์ อ่อนงาม. (2554). *การศึกษาเปรียบเทียบวัสดุเปลือกอาคารสำหรับบ้านพักอาศัยในเชิงการประหยัดพลังงานและราคา*. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์, สาขาวิชาสถาปัตยกรรม.
- กัญญาภัค แต่พิพัฒน์พงศ์. (2553). *การศึกษาวัสดุและอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนังอาคารเพื่อการลดการใช้พลังงานในอาคารพักอาศัย*. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหา

การวิเคราะห์ความไวของอิทธิพลตัวแปรองค์ประกอบรอบอาคารที่มีผลต่อปริมาณการใช้ไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศในบ้านจัดสรรประเภทบ้านเดี่ยว

ณัฐฐาอัมพร อินทร์พรหม และ ดร. ดารณี จาริมิตร

บัณฑิต, คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ธนาคารอาคารสงเคราะห์.(2557).*แนวโน้มตลาดที่อยู่อาศัยไทย*. สืบค้นเมื่อวันที่ 24 สิงหาคม 2558. จาก <http://www.ghbhomecenter.com/journal/download.php?file=1426Mar15LhaEkn.064>

ประวิตร กิตติชาญธิระ. (2553). *ประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานของอุปกรณ์กันแดดแบบผนัง 2 ชั้น: กรณีศึกษาอาคารพักอาศัยในกรุงเทพมหานคร*. วิทยานิพนธ์ปริญญา-มหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์.

ศิลปชัย ทับทิมทอง. (2553). *การวิเคราะห์การประหยัดพลังงานในเครื่องปรับอากาศสำหรับบ้านพักอาศัย*. วิทยานิพนธ์ปริญญา-มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี.

Carrillo Andrés, A., Domínguez Muñoz, F., Cejudo López, J. M. & Zhang, Y. (2013). *Uncertainties and sensitivity analysis in building energy simulation using macro parameters*. Energy and Buildings, 67, 79–87. Retrieved June 15, 2015, from <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.009>

Hamby, D. M. (1994). *A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models*. Environmental Monitoring and Assessment, 32(2), 135 – 154. Retrieved June 18, 2015, from <http://doi:10.1007/BF00547132>

Matala, A. (2008). *Sample size requirement for monte carlo – simulations using Latin hypercube sampling*. Helsinki University of Technology. Retrieved March 22, 2015, from [http://salserver.org.aalto.fi/vanhat\\_sivut/Opinnot/Mat-2.4108/pdf-files/emat08.pdf](http://salserver.org.aalto.fi/vanhat_sivut/Opinnot/Mat-2.4108/pdf-files/emat08.pdf)

Tian, W. (2013). *A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 20, 411–419. Retrieved June 19, 2015, from [doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.014](http://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.014)

การศึกษาเชิงตัวเลขเพื่อทำนายอิทธิพลของต้นไม้รอบอาคาร  
ต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวอาคารเตี้ย  
Numerical Study of the Impact of Trees around Building  
on Heat Transfer Coefficient at Low-Rise Building Façade.

ณัช จรูญรักษ์<sup>1</sup> และ ผศ.ดร. สุดาภรณ์ สุดประเสริฐ<sup>2</sup>

Nanat Charoonrak<sup>1</sup> and Asst. Prof. Sudaporn Sudprasert, Ph.D.<sup>2</sup>

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

E-mail: nanat.charoonrak@gmail.com<sup>1</sup>, sudaporn@ap.tu.ac.th<sup>2</sup>

### บทคัดย่อ

การปลูกต้นไม้รอบอาคารทำให้เกิดร่มเงาที่ผิวของอาคารซึ่งส่งผลให้อิทธิพลของการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ลดลงการพาความร้อนส่งผลต่อภาระการทำความเย็นและการนำความร้อนเข้าไปภายในอาคาร ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเป็นตัวแปรสำคัญในการคำนวณความร้อนที่ผิวอาคารงานวิจัยนี้จำลองการไหลของอากาศโดยใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล (ANSYS Fluent 16.0) ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและจำลองการไหลของอาคารเมื่อมีอากาศไหลปะทะเข้ากับอาคารโดยมีอิทธิพลของการวางต้นไม้รอบอาคาร โดยการศึกษาที่ใช้ปัจจัยในเรื่องของ ตำแหน่งและรูปทรงของต้นไม้เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งการจากจำลองกรณีควบคุมและกรณีศึกษาต่าง ๆ โดยการแบ่งกรณีศึกษาที่ 1 เป็นการวางตำแหน่งของต้นไม้ด้านหน้าอาคารในรูปแบบวางเรียงหน้ากระดานและวางสลับกันสองแถวหน้าอาคารในความเร็วลมที่ 4 และ 10 เมตรต่อวินาที และกรณีศึกษาที่ 2 แบ่งเป็นการศึกษารูปทรงของต้นไม้โดยทรงพุ่มที่ใช้ในการศึกษาคือทรงปิรามิดและแผ่เป็นชั้นโดยใช้ความเร็วลมที่ 4 เมตรต่อวินาที ผลที่ได้คือ อิทธิพลของการวางต้นไม้ในรูปแบบวางสลับกันสองแถวหน้าอาคารนั้นส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวอาคารเพิ่มขึ้นที่ 20.5 เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่วางต้นไม้เรียงกันหน้ากระดานซึ่งได้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเท่ากับ 4.9 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสามารถเป็นตัวแปรสำคัญในการนำไปประยุกต์ใช้ในการคำนวณพลังงานของอาคารและเป็นข้อเสนอแนะสำหรับภูมิสถาปนิกหรือเจ้าของโครงการในการวางต้นไม้เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ที่ดีที่สุด

### Abstract

Trees around building provide shades that can reduce heat on the building façade. In the building with shading, heat convection would have high effect on the cooling load. Therefore, convection heat transfer coefficient is the important variable used to compute convective heat through building envelope. This research simulates low-rise building by using a computational fluid dynamics program ANSYS Fluent 16.0 to investigate the airflow and convective heat transfer

coefficient around the building surrounded by plants. This study covers the effect of position, and shape of trees on the heat transfer coefficient on the building façade.

From the simulation with control case and studies cases divided by studies case no.1 is the linear position of the trees and the zigzag position of the trees in front of building with 4 and 10 meter/second of wind speed and studies case no.2 is the shape of the trees, Pyramid and Layer shape has been use for simulation with 4 meter/second of wind speed. The result is the zigzag pattern is more effect to heat transfer coefficient with 20.5 compare to the linear pattern is 4.9 of heat transfer coefficient. This research can provide recommendation for architect or project's owner who would like to arrange the plants around buildings and utilize the tree to maximize convective heat transfer.

**คำสำคัญ (Keywords):** ต้นไม้รอบอาคาร (Trees Around Building), การพาความร้อน (Convective Heat Transfer), ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Heat Transfer Coefficient), การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Fluid Dynamics), ผิวอาคารเดี่ยว (Low-rise Building Façade)

## 1. บทนำ

อาคารปรับอากาศมีภาระการทำความเย็นที่เป็นผลมาจากการคำนวณความร้อนด้วยการนำ การพา และการแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ซึ่งปริมาณของความร้อนที่ผ่านเข้ามาคิดเป็น 60% ของภาระการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศภายในอาคาร อาคารรอบอาคารส่งผลต่อภาระการทำความเย็นโดยวิธีการพาความร้อนในกรณีที่มีการปลูกต้นไม้รอบอาคารทำให้เกิดร่มเงาที่ผิวของอาคารซึ่งส่งผลให้อิทธิพลของการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ลดลงและการพาความร้อนส่งผลต่อภาระการทำความเย็นและการนำความร้อนเข้าไปภายในอาคาร

ค่า  $h_c$  หรือค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเป็นตัวแปรสำคัญในการคำนวณความร้อนที่ผิวอาคาร โดยค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$h_c = q_{conv} / (T_s - T_\infty) \quad (1)$$

โดยค่า  $q_{conv}$  คือฟลักซ์ความร้อน (Heat Flux)

$T_s$  ค่าอุณหภูมิที่พื้นผิว  $T_\infty$  คือค่าอุณหภูมิอ้างอิง ซึ่งอาจจะเป็นค่าอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมจากการศึกษางานวิจัยก่อนหน้าเกี่ยวกับค่า  $h_c$  ที่ผนังอาคารพบว่า การติดตั้งอุปกรณ์ก่อวนกระแสนลมบริเวณผิวของวัตถุสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งทำให้เกิดลักษณะการเคลื่อนที่ของลมหมุนวนซึ่งส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวเพิ่มขึ้นประมาณ 14-17% (Hemida et al., 2008) และการเพิ่มกระแสลมแบบปั่นป่วนในการจำลองจาก 1.5% เป็น 6.7% ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มขึ้น 49% (Blocken et al., 2009) ซึ่งเห็นได้ชัดว่าลักษณะการเคลื่อนที่ของลมนั้นส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ซึ่งการปลูกต้นไม้รอบอาคารก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนของกระแสลมบริเวณผิวอาคารซึ่งส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

งานวิจัยนี้ศึกษาโดยการจำลองด้วยโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) ANSYS Fluent 16.0 เพื่อให้ทราบถึงอิทธิพลของรูปทรง ตำแหน่ง และความสูงของต้นไม้รอบอาคารที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวอาคาร

## 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาการวางต้นไม้บริเวณโดยรอบอาคารที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่รอบอาคาร ได้มีการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเป็นส่วนต่าง ๆ ได้แก่ ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อน ความรู้พื้นฐานเรื่องต้นไม้ อิทธิพลของต้นไม้ต่อการเคลื่อนที่ของอากาศ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจำลองผลด้วยโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล

### 2.1 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อน

2.1.1 การพาความร้อน คือเมื่ออากาศไหลผ่านหรือสัมผัสกับพื้นผิวบริเวณที่มีอุณหภูมิต่างกัน จะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนระหว่างอากาศกับวัตถุนั้น ๆ ซึ่งสามารถแบ่งการพาความร้อนเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะคือ การพาความร้อนแบบอิสระ และการพาความร้อนแบบบังคับ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการกฎการทำความเย็นของนิวตัน ดังต่อไปนี้

$$q_{conv} = h_c A (T_s - T_\infty) \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{conv} = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \quad (3)$$

เมื่อ  $q$  = พลักซ์ความร้อน

$\dot{Q}$  = อัตราการพาความร้อน (W)

$$h_c = \text{ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน} \quad (W / m^2 K)$$

$$A = \text{พื้นที่ผิวของวัตถุที่สัมผัสกับของไหล} \quad (m^2)$$

$$T_s = \text{อุณหภูมิพื้นผิวของวัตถุ} \quad (^\circ C)$$

$$T_\infty = \text{อุณหภูมิของไหล} \quad (^\circ C)$$

และทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนใกล้ผิว

$$q_{cond} = \dot{q}_{conv} = -k_{fluid} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (4)$$

$$\dot{q}_{conv} = h \cdot (T_s - T_\infty) \quad (5)$$

$$(4) = (5) \quad h = \frac{-k_{fluid} (\partial T / \partial x)_{x=0}}{(T_s - T_\infty)} \quad (6)$$

เลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number)

$$R_{ex} = \frac{\rho \cdot V_\infty \cdot x}{\mu} \quad (7)$$

เลขพรันด์เทิล (Prandtl Number)

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad (8)$$

กฎการไหลแบบปั่นป่วนผ่านระนาบเรียบเลขนัสเซลท์ (Nusselt Number)

$$Nu_x = \frac{h_x x}{k_{fluid}} = 0.0296 \cdot R_{ex}^{0.8} \cdot Pr^{1/3} \quad (9)$$

กำหนดให้

$$0.6 \leq Pr \leq 60$$

$$5 \times 10^5 \leq Re_x \leq 10^7$$

นอกจากนี้ ได้มีการทำการศึกษาในงานวิจัยก่อนหน้าในเรื่องของสมการเชิงประจักษ์ของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน โดยความสัมพันธ์ของสมการดังกล่าวจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวอาคารในด้านต้นลมกับช่วงของความเร็วม (ดังตารางที่ 1)

**ตารางที่ 1** สมการเชิงประจักษ์ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของงานวิจัยก่อนหน้า (Montazeri, 2015)

ช่วงความเร็วม (m/s)	สมการ
1.00 - 15.00	$\overline{h_c} = 5.15U_{10}^{0.81}$
1.00 - 4.00	$\overline{h_c} = 4.60U_{10}^{0.89}$
0.50 - 5.00	$\overline{h_c} = 5.15U_{10}^{0.82}$
0.15 - 7.50	$\overline{h_c} = 5.01U_{10}^{0.85}$

เมื่อ  $U_{10}$  = ความเร็วม ( m/s )

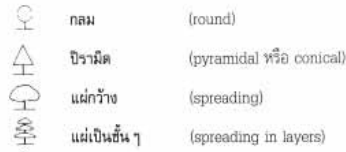
จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยก่อนหน้าพบว่า ความเร็วมเป็นตัวแปรสำคัญในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวอาคารได้

**2.2 ความรู้พื้นฐานเรื่องต้นไม้**

ต้นไม้สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทใหญ่ได้แก่ ไม้ยืนต้น ไม้พุ่ม ไม้เลื้อย ไม้คลุมดิน (เอื้อมพร วิสมหมาย, 2551)

ลักษณะทางกายภาพของกลุ่มไม้ยืนต้นรูปร่างหรือลักษณะของต้นไม้จำแนกตามการพบเห็น

และใช้งานจริงในทางภูมิสถาปัตยกรรม (เอื้อมพร วิสมหมาย, 2551) (ดังภาพที่ 1)



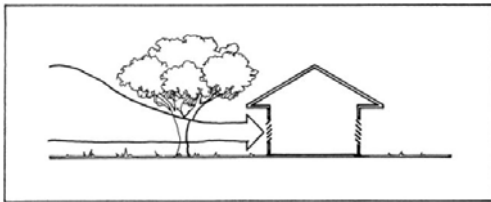
**ภาพที่ 1** รูปทรงทางกายภาพของไม้ยืนต้น

**2.3 อิทธิพลของต้นไม้ต่อการเคลื่อนที่อากาศ ผลกระทบของต้นไม้** ต้นไม้บริเวณรอบอาคาร

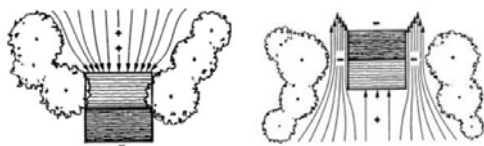
มีอิทธิพลต่อลมธรรมชาติที่พัดเข้าสู่ตัวอาคาร โดยจากการทดลอง (White, 1953) อ้างจาก สุตสวาท ศรีสถาปัตยกรรม (2545) พบว่า

- ต้นไม้มีผลต่อการเคลื่อนที่ของลมที่พัดผ่านอาคารหรือรอบอาคารได้
- สามารถกำหนดการใช้งานของต้นไม้ในการเพิ่มหรือลดลมธรรมชาติที่พัดผ่านอาคารได้
- การวางต้นไม้สามารถทำให้ทิศทางลมที่พัดเข้าสู่อาคารเปลี่ยนไปได้
- การวางต้นไม้บริเวณใต้ลมของอาคารจะมีผลกระทบน้อยมากต่อลมธรรมชาติที่พัดเข้าสู่ตัวอาคาร

ดังนั้นต้นไม้จะสามารถกำหนดทิศทางลมได้ และเพิ่มความเร็วมโดยใช้ลักษณะการบีบตัวของอากาศเพื่อให้ความเร็วมสูงขึ้นก่อนจะไหลเข้าปะทะตัวอาคาร และการวางผังของต้นไม้ยังสามารถบังคับทิศทางลมเพื่อให้อากาศไหลเข้าสู่ตัวอาคารโดยทำให้เกิดความต่างของความดันอากาศที่มากขึ้นส่งผลให้อากาศเคลื่อนที่เร็วขึ้น (ดังภาพที่ 2 และ 3)



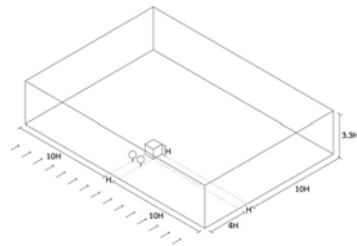
ภาพที่ 2 การบิบลมของต้นไม้ส่งผลให้ความเร็วลมเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 3 การบังคับทิศทางลมจากการวางต้นไม้

### 3. ระเบียบวิธีวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงจำลองโดยการใช้อัลกอริทึมการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) ANSYS Fluent 16.0 ในการจำลอง โดยมีตัวแปรของการศึกษาคือตำแหน่งของต้นไม้เพื่อนำมาจำลองการไหลของอากาศและคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวอาคารจากการศึกษางานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่า (Blocken, 2009) ได้ศึกษาโดยการจำลองเพื่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวอาคารเดี่ยวโดยได้มีการกำหนดขนาดของอาคารกว้าง 10.0 เมตร ยาว 10.0 เมตร และสูง 10.0 เมตร มีการกำหนดขอบเขตทั้งด้านข้าง ด้านหน้า และด้านหลังเป็น 10 เท่า 4 เท่าและ 10 เท่าของความสูงอาคารตามลำดับ ส่วนระยะความสูงของขอบเขตในการทดลองกำหนดเป็น 3.3 เท่าของความสูงอาคาร (Montazeri, 2015) (ดังภาพที่ 4)




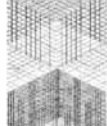
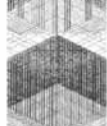
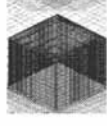

ภาพที่ 4 ตัวอย่างแบบจำลองที่จะทำการศึกษา

### 4. ผลการวิจัย

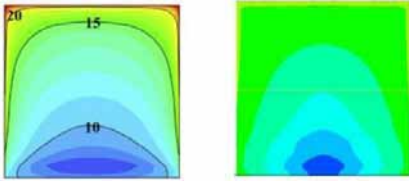
#### 4.1 ผลการจำลองแบบจำลองในโปรแกรม ANSYS Fluent 16.0

ในการศึกษาแบบจำลองนี้ จะสร้างแบบจำลองผลเป็น 3 มิติและการกำหนดขนาดของ mesh ที่จะใช้สำหรับงานโดยจะทำการศึกษาวิเคราะห์ผลความไว mesh เปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้า (Blocken, 2009) ในการกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวอาคาร ซึ่งทำการจำลองโดยใช้การปรับขนาด mesh (ดังตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ความไวเมช

ภาพขนาด mesh	ขนาด mesh
	1 เมตร
	0.75 เมตร
	0.5 เมตร
	0.25 เมตร
	0.1 เมตร

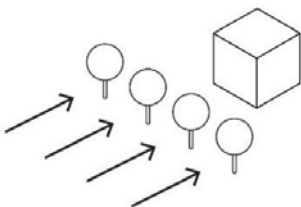
ซึ่งจากการจำลองจะได้รับการกระจายของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวอาคารที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยก่อนหน้า (Blocken, 2009) ที่ขนาด 0.25 เมตร (ดังภาพที่ 5)



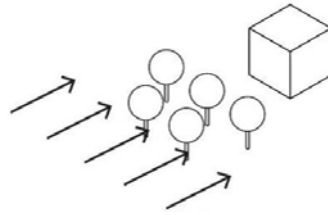
ภาพที่ 5 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวอาคารโดย (ก) งานวิจัยของ Blocken, 2009 (ข) การทดลองโดยใช้ขนาด mesh 0.25 เมตร

**4.2 ผลการจำลองการศึกษาอิทธิพลของต้นไม้รอบอาคารที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวอาคาร**

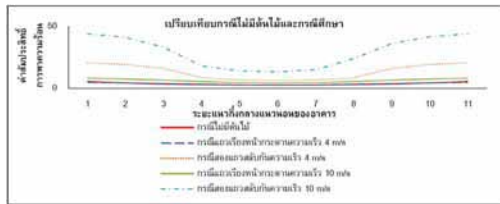
การจำลองในส่วนนี้จะศึกษาอิทธิพลของต้นไม้รอบอาคารที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวอาคารเดี่ยว โดยจะกำหนดตัวแปรในการจำลอง คือ ตำแหน่งของต้นไม้ ซึ่งจะแบ่งการจำลองเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกคือ การจำลองตำแหน่งการวางของต้นไม้เป็นหน้ากระดานด้านหน้าอาคารโดยใช้ความเร็วลมในการจำลองที่ 4 และ 10 เมตรต่อวินาที (ดังภาพที่ 6) การจำลองในส่วนต่อมาคือ การจำลองตำแหน่งการวางต้นไม้สลับกันสองแถวด้านหน้าอาคารโดยใช้ความเร็วลมเหมือนกันการจำลองแรก (ดังภาพที่ 7)



ภาพที่ 6 การจำลองที่ 1 การวางต้นไม้หน้าอาคารแบบเรียงหน้ากระดาน



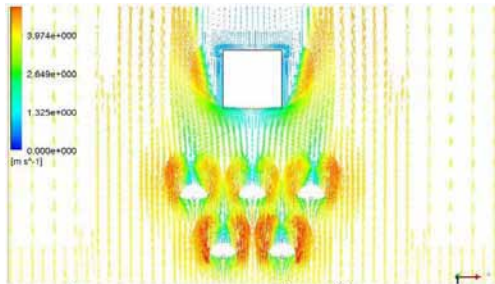
ภาพที่ 7 การจำลองที่ 2 การวางต้นไม้หน้าอาคารแบบเรียงสลับกันสองแถว



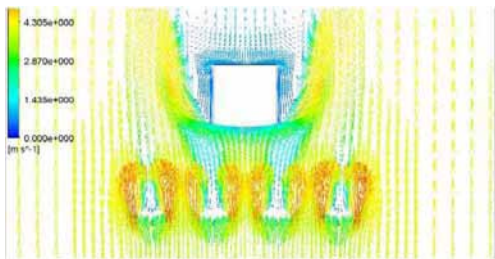
ภาพที่ 8 เปรียบเทียบกรณีควบคุมกับกรณีศึกษาอิทธิพลของต้นไม้

จากการทดลองอิทธิพลของต้นไม้ในรูปแบบต่าง ๆ พบว่าอิทธิพลของการวางต้นไม้ที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมากที่สุด ซึ่งส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวอาคารให้เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับอิทธิพลอื่น ๆ โดยการจำลองตำแหน่งการวางของต้นไม้ระหว่างเรียงหน้ากระดานและสลับกันสองแถวด้วยความเร็ว 4 เมตรต่อวินาที พบว่าการวางต้นไม้แบบสลับกันสองแถวจะมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงกว่าที่ประมาณ  $20.5 (W/m^2)$  ซึ่งมากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในรูปแบบการวางต้นไม้แบบแถวหน้ากระดานที่  $4.9 (W/m^2)$  (ดังภาพที่ 8) เนื่องจากการวางแบบสลับกันสองแถวจะทำให้ลมที่พัดเข้าสู่อาคารนั้นมีความเร็วที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดการบีบของลมที่มากขึ้นของต้นไม้จึงทำให้ลมพัดเข้าสู่อาคารแรงขึ้น ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนนั้นสูงขึ้นตามความเร็วลม (ดังภาพที่ 9) เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาการวางต้นไม้เป็นหน้ากระดานด้าน

หน้าอาคาร จะพบว่าความเร็วลมที่ปะทะอาคาร นั้นมีค่าน้อยกว่าจึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนนั้นน้อยกว่า (ดังภาพที่ 10)



ภาพที่ 9 ภาพความเร็วลมที่เกิดขึ้นในการจำลองกรณีการวางต้นไม้แบบสลักกันสองแถวที่ความเร็วลม 4 m/s



ภาพที่ 10 ภาพความเร็วลมที่เกิดขึ้นในการจำลองกรณีการวางต้นไม้แบบเรียงหน้ากระดานที่ความเร็วลม 4 m/s

## 5. สรุปผลการวิจัย

อิทธิพลของต้นไม้สามารถส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวอาคารได้ โดยอิทธิพลของการวางต้นไม้จากการจำลองพบว่าเมื่อวางต้นไม้ในรูปแบบสลักกันสองแถวจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวอาคารนั้นสูงขึ้นเนื่องจากการวางต้นไม้แบบสลักกันสองแถวทำให้ลมที่พัดเข้าอาคารมีความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวอาคารนั้นสูงขึ้นตามความเร็วลม ดังนั้นจึงเป็นผลดีในการจัดต้นไม้แบบสลักกันสองแถวในงานภูมิสถาปัตยกรรมเพื่อเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวอาคาร

## 6. ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษานี้ศึกษาแค่อาคารเดี่ยวที่มีความสูง 10 เมตร ยาว 10 เมตร และกว้าง 10 เมตร ซึ่งอาคารที่มีขนาดแตกต่างจากนี้อาจจะส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่เปลี่ยนไป
2. การศึกษานี้ไม่ได้คำนึงถึงบริบทของอาคารจริงในการจำลองเพราะฉะนั้นการวิจัยในอนาคตอาจจะคำนึงถึงสภาพแวดล้อมของอาคารจริง
3. เนื่องจากต้นไม้เป็นสิ่งที่เกิดตามธรรมชาติ จึงมีตัวแปรอีกจำนวนมากที่ยังไม่ได้คำนึงถึง ซึ่งในงานวิจัยในอนาคตอาจจะมีกรนำตัวแปรอื่น ๆ เช่นการคายความร้อนของต้นไม้ หรือการบังเงาของต้นไม้ เพื่อให้งานวิจัยมีความสมจริงมากขึ้น

## รายการอ้างอิง

- สุดสวาท ศรีสถาปัตย์. (2545). *การออกแบบวัสดุพืชพันธุ์และการประหยัดพลังงาน*. กรุงเทพฯ: บริษัทด้านสถาปัตย์การพิมพ์
- สุดาภรณ์ จุ่งลู่. (2555). การจำลองเชิงตัวเลขเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบบังคับภายใต้กระแสลมหมุนบนหลังคาอาคารเดี่ยวที่มีอุปกรณบังแดด. *วารสารวิจัยและสาระสถาปัตยกรรม/การผังเมือง*, 9(2), 63-80.
- เอี่ยมพร วิสมหมาย. (2551). *พรรณไม้ในงานภูมิสถาปัตยกรรม 1*. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ เอเชียน กรุ๊ป จำกัด.
- Blocken, B. (2009). High-resolution CFD Simulations for forced convective heat transfer coefficients at the façade of a low-rise building. *Building and Environment*, 44(2009), 2396-2412

Department of the Navy, Naval Facilities Engineering Command. (1986). *Design Manual 11.02*. Natural ventilative cooling of buildings, DM-11.02, 23-25.

Montazeri, H. (2015). CFD analysis of forced convective heat transfer coefficients at windward building facades: Influence of building geometry. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 145(2015), 102-116

Cheng, Y. (2003). A comparison of large Eddy simulations with a standard Reynolds-averaged Navier-Stokes model for the prediction of a fully developed turbulent flow over a matrix of cubes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91(2003), 1301-1328

# การพัฒนาแผ่นประกอบชนิดอัดราบจากยางพาราผสมเยื่อกระดาษเหลือใช้ เพื่อประสิทธิภาพในการดูดซับเสียงสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานอาคาร

## Development of Flat Pressed Particle Composite Board from Natural Rubber and Waste Paper for Sound Absorption Efficiency in Building Applications

ปนิพันธ์ สุนทรักษ์<sup>1</sup> รศ.ดร. ภูษิต เลิศวัฒนารักษ์<sup>2</sup> และทรงกลด จารุสมบัติ<sup>3</sup>  
Panipan Soonthornruk<sup>1</sup> Assoc. Prof. Pusit Lertwattanaruk, Ph.D.<sup>2</sup>  
and Songklod Jarusombuti<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

<sup>3</sup>คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

E-mail: panipanfoil@gmail.com<sup>1</sup>, lertwatt@gmail.com<sup>2</sup>, fforsoj@ku.ac.th<sup>3</sup>

### บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาวัสดุก่อสร้างประเภทวัสดุแผ่นประกอบซึ่งผลิตจากยางพาราซึ่งเป็นวัตถุดิบจากธรรมชาติและเยื่อกระดาษซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ เพื่อการใช้งานเป็นแผ่นผนังและแผ่นฝ้าเพดานในงานสถาปัตยกรรม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความหนาแน่น กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง อัตราการเผาไหม้ และประสิทธิภาพในการดูดซับเสียงของวัสดุแผ่นประกอบโดยสัดส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ประกอบด้วย เยื่อกระดาษเหลือใช้ ในสัดส่วนร้อยละ 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนักของยางพารา และทำการทดสอบหาความหนาแน่น ความต้านทานแรงดึง ความสามารถในการกันไฟลาม และประสิทธิภาพในการดูดซับเสียงของวัสดุแผ่นประกอบตามมาตรฐาน ASTM ผลจากการศึกษา พบว่า การผสมเยื่อกระดาษเหลือใช้ในปริมาณมากขึ้น มีผลทำให้แนวโน้มของความหนาแน่น ความต้านทานแรงดึง และประสิทธิภาพการดูดซับเสียงมีค่าเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้าม วัสดุแผ่นประกอบที่ผสมเยื่อกระดาษเหลือใช้ในปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการเผาไหม้มีค่าลดลง และต้นทุนการผลิตลดลงเมื่อเปรียบเทียบวัสดุแผ่นประกอบในห้องตลาด ผลที่ได้จากการวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการนำวัตถุดิบเหลือใช้มาผลิตเป็นวัสดุแผ่นประกอบที่มีคุณสมบัติเชิงกายภาพ คุณสมบัติเชิงกล และคุณสมบัติในการดูดซับเสียงที่ดี โดยควรเลือกสัดส่วนผสมและวิธีการติดตั้งให้เหมาะสมเพื่อให้งานใช้งานวัสดุเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

### Abstract

This article presents the development of composite materials produced from domestic natural rubber and waste paper pulp to be used as wall panels and ceiling tiles in architectural works. The main objective of this research is to study the density, compressive strength, tensile strength, rate of burning and sound absorption coefficients of the composite materials. The mix

การพัฒนาแผ่นประกอบชนิดอัดราบจากยางพาราผสมเยื่อกระดาษเหลือใช้ เพื่อประสิทธิภาพในการดูดซับเสียงสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานอาคาร ปณิพันธ์ สุนทรวิทย์ รศ.ดร. ภูษิต เลิศวัฒนารักษ์ และ ทรงกลด จารุสมบัติ

proportions of composite materials products contain waste paper pulp of 10, 20, 30 and 40 percent by weight of natural rubber. The density, tensile strength, rate of burning and sound absorption coefficients of the composite materials were tested according to ASTM standards. Test results showed that an increase in the waste paper pulp ratios have a better density, tensile strength and sound absorption performance of composite materials. In contrary, the product with an increase of the waste paper pulp ratios tends to reduce rate of burning and lower production cost in comparison with the composite materials available in the market. The results of this research can be used as a guideline for using waste materials to produce composite panels for building construction with the acceptable physical, mechanical and sound absorption properties. Mix proportions and installation of composite panels products can be optimally arranged for various applications.

**คำสำคัญ (Keywords):** ยางพาราธรรมชาติ (Natural Rubber), กระดาษเหลือใช้ (Waste Paper), สารตัวเติม (Filler), ประสิทธิภาพการดูดซับเสียง (Sound Absorption Efficiency)

## 1. ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันด้วยปัญหาการปรับตัวขึ้นของ อัตราค่าจ้างขั้นต่ำ โดยกระทรวงแรงงาน ส่งผลให้เทคโนโลยีก่อสร้างแบบเดิมๆ เช่น การใช้ผนังอิฐมวลเบา ผนังอิฐมวลเบา ไม่เหมาะสมกับสภาพบริบททางด้านทุนการก่อสร้างอีกต่อไป เป็นเหตุให้เทคโนโลยีการก่อสร้าง มีแนวโน้มของการติดตั้งอุปกรณ์เป็นชุดสำเร็จ เช่น วัสดุแผ่นประกอบมากขึ้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาวัสดุแผ่นประกอบจากวัสดุดิบยางพาราซึ่งเป็นผลผลิตภายในประเทศ สำหรับนำมาผลิตเป็นวัสดุแผ่นผนังและแผ่นฝ้าเพดาน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับเสียงสำหรับการใช้งานเป็นวัสดุอาคาร

## 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 วัสดุแผ่นประกอบ

ผลิตภัณฑ์ประเภทแผ่น สามารถนำมาใช้ในงานสถาปัตยกรรมได้หลากหลาย เช่น แผ่นผนัง และฝ้าเพดาน ซึ่งผลิตขึ้นจากส่วนประกอบ 2

ชนิดขึ้นไป โดยส่วนประกอบทั้ง 2 ส่วนต้องแสดงคุณสมบัติของแต่ละส่วนแยกกันชัดเจน และเมื่อนำมาผสมกันจะได้คุณสมบัติที่ส่งเสริมกัน เช่น ไม้ในรูปแบบต่างๆ ผสมกับสารเติมแต่งอื่นๆ (วรรณกรรม อุ่นจิตติชัย, 2541) โดยวัสดุแผ่นประกอบในท้องตลาดมักผลิตจากวัตถุดิบตามธรรมชาติหรือวัตถุดิบที่เป็นวัสดุเหลือใช้ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

2.1.1 *ผลิตภัณฑ์ตราช่างสมาร์ทบอร์ด (Smart Board)* เป็นวัสดุแผ่นประกอบไฟเบอร์ซีเมนต์บอร์ดผลิตจากปูนซีเมนต์ผสมเส้นใยเซลลูโลส ทรายซิลิกา สามารถนำมาใช้งานได้ทั้งแผ่นพื้น ผนัง และฝ้าเพดาน สามารถใช้งานได้ทั้งภายในและภายนอกอาคาร

2.1.2 *ผลิตภัณฑ์วีว้าบอร์ด (Viva Board)* เป็นวัสดุแผ่นประกอบซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติ สามารถนำมาใช้งานได้ทั้งแผ่นพื้น และผนัง การนำวัสดุวีว้าบอร์ดมาใช้ในงานอาคารช่วยให้การทำงานมีความสะดวกรวดเร็ว

2.1.3 **ผลิตภัณฑ์แผ่นยิปซัมดูดซับเสียง ตรา ยิปไทน์ (Gyptone)** ผลิตจากยิปซัม สามารถดูดซับเสียงสะท้อน ช่วยในการปรับคุณภาพเสียงภายในห้องได้ดี สามารถใช้งานเป็นแผ่นฝ้าเพดาน และฉาบติดกับผนังอาคาร



รูปที่ 1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์แผ่นประกอบในห้องตลาด

## 2.2 ยางพารา

คุณสมบัติของยางพาราและยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลสูง มีจุดอ่อนตัวที่อุณหภูมิประมาณ 120 องศาเซลเซียส และจะมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นเมื่อใส่สารเสริมแรง เช่น เขม่าดำ หรือ เส้นใย การนำยางพารามาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ทั่วไป โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (วารสารณ์ ขจรไชยกุล, 2545)

2.2.1 **ขั้นตอนการผลิตสายยาง** ทำได้โดยกำหนดปริมาณสารต่าง ๆ ในร้อยละโดยน้ำหนักของยางพารา ซึ่งมีสัดส่วนส่วนของสารที่นำมาขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางทั่วไป คือ ซิงค์ออกไซด์ ร้อยละ 5 กรดสเตียริก ร้อยละ 1 กำมะถัน ร้อยละ 3 และ 2-mercaptobenzothiazole (MBT) ร้อยละ 0.7 โดยน้ำหนักของยางพารา ซึ่งเป็นสัดส่วนผสมที่ทำให้คุณสมบัติเชิงกายภาพ และคุณสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางมีความเสถียร (พรพรรณ นิธิอุทัย, 2528)

2.2.2 **ขั้นตอนการบดยาง** การบดยางสามารถทำได้โดยการฉีกตัดเนื้อยางของเครื่องบดระบบเปิด (Two-roll Mill) ในอุณหภูมิการบดไม่เกิน 100

องศาเซลเซียส

2.2.3 **ขั้นตอนการขึ้นรูปยาง** โดยอาศัยความร้อนและแรงอัด การอัดด้วยวิธีนี้สามารถทำได้กับผลิตภัณฑ์ทั่วไป โดยการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150-180 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาประมาณ 7-10 นาที สำหรับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ชนิดแผ่นประกอบที่มีความหนาแน่นในช่วง 800 - 1,200 กก./ลบ.ม. (García, 2007)

## 2.3 สารตัวเติม

2.3.1 **สารตัวเติม (Filler)** คือ สารที่ไม่ใช่ยาง ซึ่งถูกผสมลงในยาง เช่น เศษกระดาษ หรือเส้นใยธรรมชาติ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการปรับปรุงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ เช่น เพิ่มความแข็งแรง เพิ่มความยืดหยุ่น (สมาคมอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษไทย, 2547)

2.3.2 **เยื่อกระดาษเหลือใช้** งานวิจัยชิ้นนี้เลือกใช้เยื่อกระดาษเหลือใช้ในการผสมกับยางพารา เนื่องจากมีคุณสมบัติบางประการที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพกับแผ่นประกอบยาง เช่น ความแข็ง และความทนทานต่อแรงดึง

## 2.4 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับเสียง

2.4.1 **ระดับความดังของเสียง** โดยปกติแล้วมนุษย์เราจะได้ยินเสียงคืออยู่ในช่วงความถี่ระหว่าง 20 -20,000 เฮิรตซ์ หรือ 0 - 130 เดซิเบล (Egan, 1972)

2.4.2 **ความสามารถในการลดระดับความดังของวัสดุ** จากการตกกระทบของเสียงสามารถจำแนกได้เป็นหลักการ ดังต่อไปนี้ (Cavanaugh, 1998)

1. การดูดกลืนเสียง คือ ความสามารถของวัสดุในการดูดกลืนพลังงานเสียงและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน
2. การลดระดับความดังของเสียง คือ ประสิทธิภาพในการลดระดับพลังงานเสียงที่ส่งผ่านวัสดุ

การพัฒนาแผ่นประกอบชนิดอัดราบจากยางพาราผสมเยื่อกระดาษเหลือใช้ เพื่อประสิทธิภาพในการดูดซับเสียงสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานอาคาร ปันพันธ์ สุนทรวัชร รัต.ดร. ภูษิต เลิศวัฒนารักษ์ และ ทรงกลด จารุสมบัติ

3. ระเบียบวิธีการวิจัย การวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาเชิงทดลอง เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการออกแบบแผ่นประกอบยางพารา โดยใช้เยื่อกระดาษเหลือใช้เป็นตัวผสมเพิ่มยางพารา สำหรับการสร้างรูปทรงภายในเนื้อวัสดุเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในการดูดซับเสียง ในปริมาณร้อยละ 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนักของยางพารา อ้างอิงการทดสอบมาตรฐาน ASTM D1037-06a ASTM D882 ASTM D635 และมาตรฐาน ASTM C0423

### 3.1 การผลิตวัสดุแผ่นประกอบยางพารา

ในการผลิตวัสดุแผ่นประกอบยางพารา ประกอบด้วยลำดับขั้นตอน ดังต่อไปนี้

3.1.1 *เตรียมสัดส่วนผสม* 4 สัดส่วนผสม โดยผสมเยื่อกระดาษเหลือใช้ในสัดส่วนผสมร้อยละ 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนักของยางพารา (R1P10, R1P20, R1P30, R1P40) แล้วบดผสมยางพารากับเยื่อกระดาษด้วยเครื่องบดระบบเปิดชนิด Two-roll mills ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาทีต่อสูตร

3.1.2 *เติมซิงค์ออกไซด์* ร้อยละ 5 กรดเตียริก ร้อยละ 1 MBT ร้อยละ 0.7 กำมะถัน ร้อยละ 3 ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ร้อยละ 4 ระหว่างที่บดผสมยางพารากับเยื่อกระดาษ (มาลินี ชัยคุภกิจสินธ์, 2553) แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 เครื่องบดผสมระบบเปิดชนิด Two-roll mills

3.1.3 *เตรียมวัตถุดิบที่ผสมได้ขึ้นรูปด้วย* เครื่องอัดความร้อนชนิดราบในอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้ได้วัสดุแผ่นประกอบที่มีความหนา 12 มม. และความหนาแน่นประมาณ 1,000 กก./ลบ.ซม.



รูปที่ 3 เครื่องอัดความร้อนชนิดอัดราบ

### 3.2 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกายภาพ

ในการทดสอบค่าความหนาแน่นของวัสดุแผ่นประกอบโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D1037-06a และทดสอบอัตราการเผาไหม้ของวัสดุแผ่นประกอบโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D 635

### 3.3 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

ในการทดสอบ กำลังรับแรงดึงของวัสดุแผ่น ประกอบโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D882

### 3.4 การทดสอบคุณสมบัติเชิงเสียง

ในการทดสอบประสิทธิภาพในการกันเสียง และประสิทธิภาพการดูดซับเสียงของวัสดุ แผ่นประกอบโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C0423

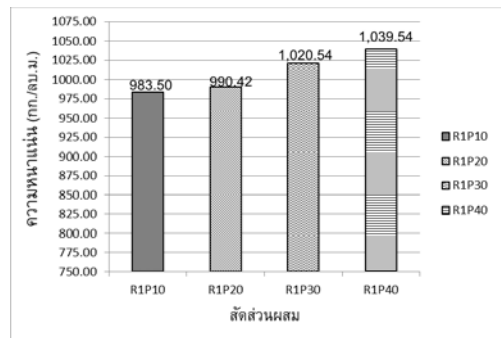
## 4. ผลการทดลอง

### 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุแผ่น ประกอบบางพารา

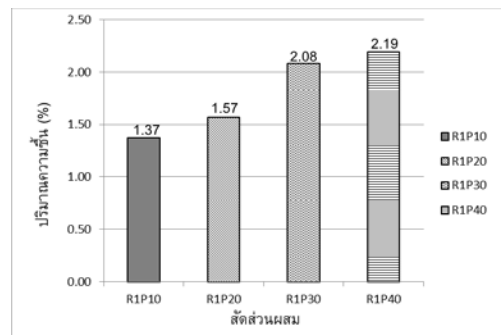
4.1.1 ความหนาแน่น ปริมาณความชื้น และ ความสามารถในการดูดซึมน้ำของวัสดุแผ่น ประกอบบางพารา พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วน ของสารผสมเพิ่มเยื่อกระดาษเหลือใช้ส่งผลให้ ค่าความหนาแน่น ปริมาณความชื้น และ ความสามารถในการดูดซึมน้ำของวัสดุแผ่นประกอบ เพิ่มขึ้นในระดับที่สอดคล้องกับงานวิจัยอื่น (Rivero, 2012) เนื่องจากเยื่อกระดาษเหลือ ใช้ที่ผสมเพิ่มสำหรับการสร้างรูพรุน และช่องว่างอากาศ ทำให้น้ำหนักโดยรวมของวัสดุแผ่น ประกอบมากขึ้น และเพิ่มประสิทธิภาพในการ ดูดซึมน้ำ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อค่าความ หนาแน่น ปริมาณความชื้น และความสามารถ ในการดูดซึมน้ำของวัสดุแผ่นประกอบ จึงทำให้ วัสดุแผ่นประกอบบางพาราที่มีอัตราส่วนการ ผสมเพิ่มด้วยเยื่อกระดาษเหลือใช้ร้อยละ 40 โดย น้ำหนักของบางพารามีความหนาแน่น ที่มีความ เป็นไปได้ในการนำไปใช้งานมากที่สุด



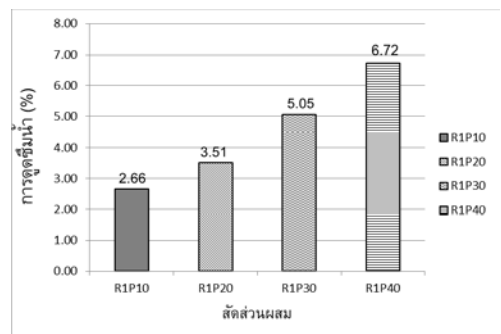
รูปที่ 4 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุแผ่นประกอบ



รูปที่ 5 ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)



รูปที่ 6 ปริมาณความชื้น (%)

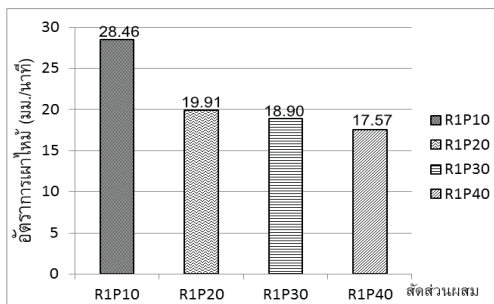


รูปที่ 7 ค่าความสามารถในการดูดซึมน้ำ (%)

4.1.2 อัตราการเผาไหม้ของวัสดุแผ่นประกอบ บางพาราที่ผลิตได้ พบว่า เมื่อเกิดการเผาไหม้แล้ว วัสดุแผ่นประกอบบางพาราไม่สามารถหยุดการ เผาไหม้เองได้ สอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ (มาลินี ชัยศุภกิจสินธ์, 2553) และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการ ผสมเพิ่มด้วยเยื่อกระดาษเหลือใช้ส่งผลให้อัตรา

การพัฒนาแผ่นประกอบชนิดอัดราบจากยางพาราผสมเยื่อกระดาษเหลือใช้ เพื่อประสิทธิภาพในการดูดซับเสียงสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานอาคาร ปณิพันธ์ สุนทรลักษณ์ รศ.ดร. ภูษิต เลิศวัฒนารักษ์ และ ทรงกลด จารุสมบัติ

การเผาไหม้ของวัสดุลดลง ดังแสดงในรูปที่ 8 เนื่องจากเยื่อกระดาษเหลือใช้ที่ผสมเพิ่มสำหรับการสร้างช่องว่างอากาศ มีผลโดยตรงต่ออัตราการเผาไหม้ ส่งผลให้วัสดุแผ่นประกอบยางพาราที่มีอัตราส่วนการผสมเพิ่มด้วยเยื่อกระดาษเหลือใช้ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของยางพารา มีอัตราการเผาไหม้ต่ำที่สุดซึ่งเป็นสัดส่วนผสมที่มีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานมากที่สุด

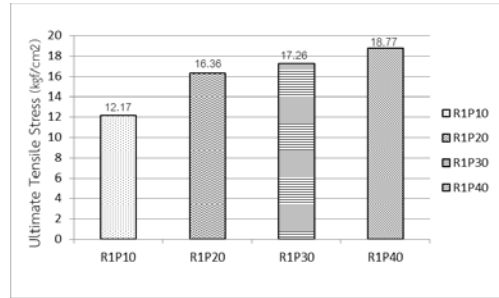


รูปที่ 8 อัตราการเผาไหม้

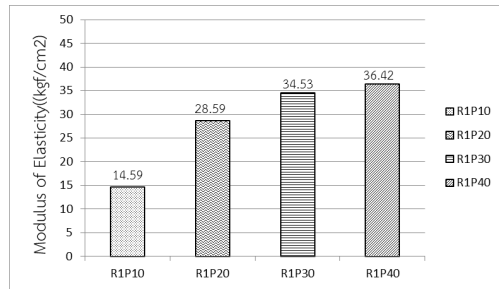
#### 4.2 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุแผ่นประกอบยางพารา

4.2.1 ความต้านทานแรงดึงของวัสดุแผ่นประกอบยางพาราที่ผลิตได้ พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเยื่อกระดาษเหลือใช้ ส่งผลให้ความต้านทานแรงดึง และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 9 และรูปที่ 10 เนื่องจากเยื่อกระดาษเหลือใช้ที่ผสมเพิ่มสอดคล้องกับสัดส่วนผสมของสารผสมเพิ่มในงานวิจัยอื่น (García, 2007) เนื่องจากเยื่อกระดาษเหลือใช้ที่ผสมเพิ่มทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความแข็งให้กับวัสดุแผ่นประกอบยางพารา ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อค่าความต้านทานแรงดึงและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นส่งผลให้วัสดุในอัตราส่วนการผสมเพิ่มด้วยเยื่อกระดาษในปริมาณ ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของยางพารา เป็นสัดส่วนผสมที่มี

คุณสมบัติเชิงกลดีที่สุด ซึ่งมีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานมากที่สุด



รูปที่ 9 ความต้านทานแรงดึง (กก./ตร.ซม.)

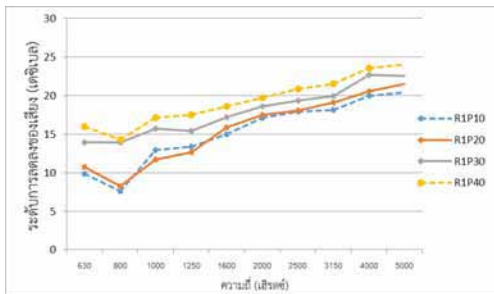


รูปที่ 10 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ( กก./ตร.ซม.)

#### 4.3 คุณสมบัติเชิงเสียงของวัสดุแผ่นประกอบยางพารา

4.3.1 ประสิทธิภาพการกันเสียงของวัสดุแผ่นประกอบยางพารา พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเยื่อกระดาษเหลือใช้ ส่งผลให้ค่าการลดระดับความดังเสียงของวัสดุแผ่นประกอบยางพาราเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 11 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยด้านอื่น ๆ (Rivero, 2012) เนื่องจาก เยื่อกระดาษเหลือใช้ที่ผสมเพิ่มทำให้ความหนาแน่น และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุแผ่นประกอบยางพาราเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผิวหน้าและเนื้อวัสดุมีความแข็งมากขึ้น ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อค่าการลดระดับความดังเสียงของวัสดุแผ่นประกอบยางพารา จึงทำให้วัสดุในอัตราส่วนการ

ผสมเพิ่มด้วยเยื่อกระดาษในปริมาณ ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของยางพารามีค่าการลดระดับความดั่งเสียงสูงสุด ซึ่งเป็นสัดส่วนผสมที่มีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานมากที่สุด



รูปที่ 11 ค่าการลดระดับความดั่งเสียง ( เดซิเบล)

## 5. ข้อสรุปจากการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 5.1 ข้อสรุปจากการศึกษาวิจัย

#### 5.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุแผ่นประกอบยางพาราที่ผลิตได้

1. ความหนาแน่น ปริมาณความชื้นและความสามารถในการดูดซึมน้ำ ของวัสดุแผ่นประกอบเพิ่มขึ้นของวัสดุแผ่นประกอบมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการผสมเพิ่มด้วยเยื่อกระดาษเหลือใช้ และสัดส่วนผสมที่ผสมเยื่อกระดาษในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของยางพารามีความหนาแน่นเหมาะแก่การนำมาใช้งานที่สุด

2. อัตราการเผาไหม้ของวัสดุแผ่นประกอบลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการผสมเพิ่มด้วยเยื่อกระดาษเหลือใช้ โดยสัดส่วนผสมที่ผสมเยื่อกระดาษในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของยางพารา มีอัตราการเผาไหม้ต่ำที่สุดซึ่งเป็นสัดส่วนผสมที่มีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานมากที่สุด

#### 5.1.2 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุแผ่นประกอบยางพาราที่ผลิตได้

1. ความต้านทานแรงดึง และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ของวัสดุแผ่นประกอบเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการผสมเพิ่มด้วยเยื่อกระดาษเหลือใช้ และสัดส่วนผสมที่ผสมเยื่อกระดาษในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของยางพารามีความต้านทานแรงดึง และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเหมาะแก่การนำมาใช้งานที่สุด

#### 5.1.3 คุณสมบัติเชิงเสียงของวัสดุแผ่นประกอบยางพาราที่ผลิตได้

1. ค่าการลดระดับความดั่งเสียงของวัสดุแผ่นประกอบยางพาราเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการผสมเพิ่มด้วยเยื่อกระดาษเหลือใช้ และสัดส่วนผสมที่ผสมเยื่อกระดาษในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของยางพารา มีประสิทธิภาพการป้องกันเสียงดีที่สุด ซึ่งเหมาะแก่การนำมาใช้งานที่สุด

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในขั้นตอนการบดผสมวัตถุดิบ เครื่องบดผสมมีขนาดเล็กทำให้ต้องบดผสมวัตถุดิบสัดส่วนผสมเดิมหลายครั้ง และส่งผลให้เกิดความเสี่ยงในความแปรปรวนของการทดสอบ ดังนั้น ในขั้นตอนการผลิตควรเลือกใช้เครื่องบดผสมที่มีขนาดเหมาะสมกับปริมาณวัสดุที่ทำการผลิต

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ สำหรับทุนสนับสนุนการวิจัย หจก.บราเดอร์ส รับเบอร์ที่ให้การสนับสนุนการใช้งานอุปกรณ์สำหรับบดผสมยางพารา และ รองศาสตราจารย์ ทรงกลด จารุสมบัติ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนในส่วนของการผลิตและทดสอบวัสดุ

การพัฒนาแผ่นประกอบชนิดอัดราบจากยางพาราผสมเยื่อกระดาษเหลือใช้ เพื่อประสิทธิภาพในการดูดซับเสียงสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานอาคาร ปณิพันธ์ สุนทรภักษ์ รศ.ดร. ภูษิต เดิศจันทร์ภักษ์ และ ทรงกลด จารุสมบัติ

## รายการอ้างอิง

- พรพรรณ นิธิอุทัย. (2528). *สารเคมีสำหรับยาง*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์วิทยาเขตปัตตานี.
- มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์. (2553). *สมบัติของแผ่นใยไม้อัดจากใยมะพร้าวกับโฟมพอลิสไตรีนผสมสารหน่วงไฟ*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต, ภาควิชาเคมี, คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- วรรธรม อุจน์จิตติชัย. (2541). *อุตสาหกรรมผลิตแผ่นปาร์ติเคิลและกรรมวิธีการผลิต*. วารสารวิจัยสำนักวิจัยการจัดการป่าไม้และผลิตผลป่าไม้, กรมป่าไม้, เอกสารวิชาการเลขที่ร.514
- วารภรณ์ ขจรไชยกุล & นุชานาฏ ณ ระนอง. (2545). *คู่มือเทคโนโลยียาง*. กรมวิชาการเกษตร, วารสารวิจัยสถาบันวิจัยยาง.
- สมาคมอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษไทย. (2547). *สภาวะอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษไทย ปี 2547*. สืบค้นเมื่อ 11 สิงหาคม 2558, จาก <http://www.ftiweb.off.fti.or.th>
- เสาวนีย์ ก่อวุฒิภูงรังษี. (2551). *การนำกระดาษหนังสือพิมพ์ผสมยางธรรมชาติทำผลิตภัณฑ์ยางใหม่*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์วิทยาเขตปัตตานี.
- ASTM. (2006). *ASTM C0423 Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficient by the Reverberation Room Method*. Philadelphia: American Society of Testing and Material (ASTM).
- ASTM. (2006). *ASTM D 1037 – 06a Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials*. Philadelphia: American Society of Testing and Material (ASTM).
- ASTM. (2012). *ASTM D882-12, Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting*. Philadelphia: American Society of Testing and Material (ASTM).
- ASTM. (2014). *ASTM D635-14, Standard Test Method for Rate of Burning and/or Extent and Time of Burning of Plastics in a Horizontal Position*. Philadelphia: American Society of Testing and Material (ASTM).
- Cavanaugh, W. J., Tocci, G. C. & Wilkes, J. A. (1998). *Architectural acoustics: Principles and practice*. New York: McGraw-Hill.
- Egan, M. D. (1972). *Concept in architectural acoustic*. New York: McGraw-Hill.
- García, D., Lopez, J., Balart, R., Ruseckaite, R. A. & Stefani, P. M. (2007). Composites based on sintering rice husk-waste tire rubber mixtures. *Journal of University of Valencia*, 28, 223-238.
- Rivero, A. J., De Guzmán, A. B. & Navarro, J. G. (2012). New composite gypsum plaster –ground waste rubber coming from pipe foam insulation. *Journal of Universidad Politécnica de Madrid*, 55 (2014), 146-152.