การพัฒนาเกณฑ์ขั้นต่ำของคุณสมบัติการป้องกันความร้อนของเปลือกอาคารในอาคารทาวน์เฮ้าส์

Development of Minimum Requirements of Thermal Property of Building Envelopes for Townhouses

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรรจน์ เศรษฐบุตร
Assistant Professor Atch Sreshthaputra, Ph.D.

การพัฒนาเกณฑ์ขั้นต่ำของคุณสมบัติการป้องกันความร้อนของเปลือกอาคารในอาคารทาวน์เฮ้าส์

Development of Minimum Requirements of Thermal Property of Building Envelopes for Townhouses

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรรจน์ เศรษฐบุตร

Assistant Professor Atch Sreshthaputra, Ph.D.

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Faculty of Architecture, Chulalongkorn University

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการดำเนินโครงการจัดทำหลักเกณฑ์และแนวทางการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานในอาคาร (เรื่อง ข้อกำหนดและแนวทางการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานในอาคารขนาดต่ำกว่าอาคารควบคุมขนาดใหญ่พิเศษตาม พ.ร.บ. ควบคุมอาคารและอาคารที่พักอาศัย) ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเกณฑ์ขั้นต่ำในการเลือกใช้วัสดุเปลือกอาคารเพื่อการป้องกันความร้อนในส่วนของอาคารพักอาศัยประเภททาวน์เฮ้าส์ 2 ชั้น งานวิจัยนี้ได้ทำการสำรวจอาคารในท้องตลาดทางด้านลักษณะการออกแบบอาคารรูปแบบสถาปัตยกรรม การเจาะช่องเปิดประตูหน้าต่าง รวมทั้งการใช้วัสดุเปลือกอาคาร (ผนังทึบและกระจก) เพื่อนำมาสร้างเป็นต้นแบบอาคารอ้างอิง สำหรับการจำลองลักษณะการถ่ายเทความร้อน และการใช้พลังงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ DOE-2.1E ผลการจำลองอาคารอ้างอิงได้ถูกนำมากำหนดเป็นฐานการใช้พลังงานเฉลี่ย ในรูปแบบดัชนีการใช้พลังงานในหน่วย กิโลวัตต์ ช.ม./ตร.ม./ปี เพื่อที่จะปรับปรุงการออกแบบอาคารให้สามารถลดการใช้พลังงานลงได้ 10% จากฐานการใช้พลังงานเฉลี่ยของทาวน์เฮ้าส์ในปัจจุบัน โดยยังคงมีความเป็นไปได้ทางการลงทุน วัสดุเปลือกอาคารชนิดต่าง ๆ ได้ถูกเลือกนำมาใช้ทดสอบเพื่อหาค่าการประหยัดพลังงาน และค่าการลงทุนก่อสร้าง โดยทำการวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน และมูลค่าตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ผลจากการศึกษานี้ได้นำมาใช้เป็นเกณฑ์ขั้นต่ำของค่าความต้านทานความร้อนของเปลือกอาคาร รวมทั้งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และค่าสัมประสิทธิ์การบังเงาของกระจก ในรูปแบบของตารางการเลือกใช้งานเพื่อสะดวกแก่การนำมาใช้เป็นกฎหมายควบคุมอาคารต่อไป

Abstract

This paper presents partial results of a research titled "Guidelines and Promotion Schemes for Building Energy Conservation: Building Codes and Promotion Schemes for Residential and Commercial Buildings with Less Than 10,000 m^2 of Construction Area." The objective is to develop a set of criteria for designing energy-efficient building envelopes. For townhouses, a survey of space planning, architecture elements, opening, and envelope system was performed in order to establish a model of reference building in DOE-2.1E energy simulation. Baseline energy use index was obtained from calibrated simulations. In an effort to reduce energy consumption by 10% while retaining economic feasibility, different envelope materials were tested for energy-saving potentials and additional cost. Economic analysis in terms of

payback period and life-cycle cost were performed. The results of this study lead to an establishment of a set of requirements for designing energy-efficient building envelopes in terms of a prescriptive table containing thermal resistance values, overall heat transfer coefficients (U-value), and shading coefficients (SC) for building envelopes.

คำสำคัญ (Keywords)

การจำลองพลังงานในอาคาร (Building Energy Simulation)
โปรแกรม DOE-2.1E (DOE-2.1E Software)
ทาวน์เฮาส์ (Townhouse)
ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน (Life-Cycle Cost)
การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ (Economic Analysis)

1. บทนำ

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน หรือ พพ. เล็งเห็นว่ามีความเหมาะสมและความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์การลงทุน หากมีการบังคับใช้มาตรการอนุรักษ์พลังงาน สำหรับอาคารบ้านพักอาศัยตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบอาคารก่อนที่จะมีการขออนุญาตก่อสร้างอาคาร ซึ่งการใช้มาตรการบังคับแก่อาคารที่ยังไม่ได้รับใบอนุญาตก่อสร้างจะช่วยส่งผลให้อาคารที่จะก่อสร้างได้รับการออกแบบให้ประหยัดพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพเสียตั้งแต่ต้น และจะทำให้อาคารสามารถใช้พลังงานอย่างประหยัดเมื่อมีการใช้งานจริง แต่เนื่องจากพระราชกฤษฎีกา พ.ศ. 2538 ยังไม่มีเกณฑ์มาตรการบังคับควบคุมอาคารพักอาศัยขนาดเล็กและอาคารที่ไม่เข้าข่ายอาคารควบคุมตาม พ.ร.บ. การส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2535 [1] ให้ดำเนินการอนุรักษ์พลังงาน ในขณะที่อาคารประเภทดังกล่าวจัดว่ามีปริมาณการใช้พลังงานที่สูงมากขึ้นทุกขณะ อันเนื่องมาจากการใช้เครื่องปรับอากาศที่มากขึ้น ซึ่งทั้งนี้ทำให้ พพ. เล็งเห็นถึงความจำเป็นของการอนุรักษ์พลังงานในอาคารกลุ่มนี้ และควรจะให้มีการจัดทำมาตรการเพื่อการอนุรักษ์พลังงานในอาคารพักอาศัยและอาคารอื่น ๆ ที่มีขนาดต่ำกว่าอาคารใหญ่พิเศษตามกฎหมายควบคุมอาคาร โดย พพ. ได้ตั้งเป้าหมายขึ้นมาในเบื้องต้นที่การลดใช้พลังงานลง 10% ทั้งนี้ มาตรการควบคุมที่จะได้จะสามารถนำมาปรับใช้เป็นข้อบังคับทางกฎหมาย เพื่อควบคุมการก่อสร้างอาคารต่อไป

ในขั้นตอนการดำเนินการ คณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาลักษณะการออกแบบก่อสร้างอาคารจากการสำรวจอาคารจริงและทำการจำลองสภาพการใช้พลังงานในอาคารด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อนำผลที่ได้มาจัดทำเป็นฐานการใช้พลังงาน (baseline) ซึ่งหลังจากที่ได้ฐานการใช้พลังงานนี้แล้ว ได้ทำการวิเคราะห์หาแนวทางการออกแบบและการเลือกใช้วัสดุเปลือกอาคารชนิดต่าง ๆ เพื่อให้อาคารสามารถประหยัดพลังงานลงได้ไม่น้อยกว่า 10% ในขณะที่ยังคงมีความคุ้มค่าทางการลงทุนในระยะยาว เมื่อได้ผลการวิเคราะห์แล้วจึงจะนำแนวทางการออกแบบและเลือกใช้วัสดุเปลือกอาคารดังกล่าว มาร่างเป็นเกณฑ์ข้อบังคับเกี่ยวกับการควบคุมการก่อสร้างอาคารประเภทนี้ เพื่อเตรียมนำมาประกาศใช้เป็นกฎหมายควบคุมอาคารต่อไป

2. ขั้นตอนการศึกษา

2.1 ศึกษากฎหมายควบคุมอาคารที่บังคับใช้โดยกระทรวงมหาดไทย เกี่ยวกับประเภทและขนาดพื้นที่ใช้สอยของอาคารที่ต้องทำการขออนุญาตปลูกสร้างจากหน่วยงานราชการ

2.2 ทำการสำรวจเก็บตัวอย่างบ้านพักอาศัยแบบทาวน์เฮ้าส์ในท้องตลาด เพื่อศึกษาลักษณะรูปแบบการวางผัง การใช้สอยพื้นที่อาคาร การใช้วัสดุก่อสร้างเปลือกอาคาร งานระบบอาคาร และช่วงเวลาการใช้งานของอาคาร ลักษณะการใช้สอยพื้นที่ ช่วงเวลาที่ใช้งานอาคาร สัดส่วนเนื้อที่ใช้สอยที่ปรับอากาศและไม่ปรับอากาศ สัดส่วนช่องเปิดต่อพื้นที่ผนังอาคาร (window to wall ratio: WWR) วัสดุการก่อสร้างเปลือกอาคาร เป็นต้น เพื่อนำมาประกอบเป็นอาคารสมมติเพื่อให้เป็นอาคารอ้างอิง

2.3 จำลองสภาพการถ่ายเทความร้อนผ่านเปลือกอาคาร และการใช้พลังงานของอาคารตัวแทนโดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ DOE-2.1E [2, 3] และใช้ฐานข้อมูลสภาพอากาศเฉลี่ยรายชั่วโมงจากกรมอุตุนิยมวิทยา เพื่อนำผลที่ได้มาพัฒนาเป็นฐานการใช้พลังงาน [4, 5, 6]

2.4 วิเคราะห์รูปแบบการใช้พลังงานจากฐานการใช้พลังงาน นำมาสร้างเป็นทางเลือกการออกแบบ และเลือกใช้วัสดุเปลือกอาคารที่ช่วยให้อาคารสามารถประหยัดพลังงานลงได้ไม่น้อยกว่า 10% ต่อปี โดยจะมุ่งเน้นที่การลดการใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อการทำความเย็นอันเนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อนผ่านเปลือกอาคาร โดยวัสดุเปลือกอาคารที่จะนำมาใช้ในเป็นทางเลือกการประหยัดพลังงานจะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ [7, 8]

- วัสดุก่อสร้างที่หาได้ทั่วไปในท้องตลาด
- มีค่าความเป็นฉนวนกันความร้อน
- มีส่วนประกอบหลักที่สามารถผลิตได้ในประเทศ
- มีคุณสมบัติเหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศของเมืองไทย
- เป็นวัสดุที่มีแนวโน้มที่จะได้รับความนิยมใช้ก่อสร้างอาคารในอนาคต
- ไม่เป็นวัสดุที่มีแนวโน้มว่าจะก่อให้เกิดปัญหาต่อสุขภาพ
- ไม่เป็นวัสดุที่มีแนวโน้มว่าจะก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมภายหลัง

2.5 ทำการจำลองการใช้พลังงานของอาคารทางเลือกแบบต่าง ๆ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ DOE-2.1 E และนำผลการจำลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับฐานการใช้พลังงาน

ของอาคารตัวแทน รวมทั้งทำการคำนวณค่าการประหยัดพลังงานรายปีที่คาดว่าจะได้จากทางเลือกต่าง ๆ เมื่อเทียบกับฐานการใช้ [4, 9, 10]

2.6 ทำการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และการลงทุนอันเนื่องมาจากการเลือกใช้วัสดุเปลือกอาคารประสิทธิภาพสูงของทางเลือกต่าง ๆ โดยคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน หรือ Life-Cycle Cost (LCC) การคำนวณ LCC นี้จะคำนึงถึงอัตราเงินเฟ้อ และอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ที่จะคาดการณ์เป็นปัจจัยสำคัญ

2.7 นำทางเลือกการออกแบบอาคารที่ประหยัดพลังงานมาจัดทำเป็นอาคารต้นแบบ เพื่อสร้างเกณฑ์ขั้นต่ำของการใช้วัสดุเปลือกอาคารเพื่อการประหยัดพลังงาน หลังจากนั้นจึงเตรียมการบังคับใช้เป็นกฎหมายควบคุมอาคาร เพื่อการประหยัดพลังงานในอนาคต

3. การสำรวจเก็บข้อมูลรูปแบบทาวน์เฮ้าส์

การศึกษาการใช้พลังงานของอาคารพักอาศัยประเภททาวน์เฮ้าส์ 2 ชั้น ขนาดที่ดินไม่ต่ำกว่า 18 ตารางวา เริ่มต้นโดยการสุ่มเลือกตัวอย่างทาวน์เฮ้าส์ที่ปลูกสร้างในบริเวณกรุงเทพฯ และปริมณฑล การศึกษาอาคารตัวอย่างมีเกณฑ์ในการวิเคราะห์ ได้แก่ ขนาดอาคาร ลักษณะพื้นที่ใช้สอย ช่วงเวลาการใช้งานอาคาร สัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนังอาคาร วัสดุก่อสร้างเปลือกอาคาร และลักษณะทางสถาปัตยกรรมของอาคาร การเลือกเก็บตัวอย่างอาคารทาวน์เฮ้าส์ 2-3 ชั้น ทำได้โดยการสุ่มเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างทาวน์เฮ้าส์ที่ก่อสร้างในปัจจุบัน และภายใน 5 ปีที่ผ่านมา โดยได้ข้อมูลจากผู้ประกอบการบ้านจัดสรร

ในกลุ่มตัวอย่างจากผู้ประกอบการบ้านจัดสรร ทั้งรายใหญ่ที่มีการจดทะเบียนบริษัทในตลาดหลักทรัพย์ และผู้ประกอบการรายย่อยต่าง ๆ ส่วนใหญ่แบบทางสถาปัตยกรรมจะไม่ซับซ้อน โครงสร้างเรียบง่าย เพื่อประสิทธิภาพในการก่อสร้างและการควบคุมต้นทุนค่าก่อสร้าง การเลือกใช้วัสดุก่อสร้างตามมาตรฐานการก่อสร้างโดยทั่วไป และหาได้ในท้องตลาด กลุ่มตัวอย่างอาคารทาวน์เฮ้าส์ 2-3 ชั้น ที่ได้สำรวจมาจากแหล่งข้อมูลดังกล่าวข้างต้น มีลักษณะดังต่อไปนี้

ทางด้านการใช้พื้นที่ ขนาดหน้ากว้างของทาวน์เฮาส์ ขึ้นอยู่กับระยะโครงสร้างที่เหมาะสม และพระราชบัญญัติควบคุมอาคารที่กำหนดให้ห้องแถว หรือตึกแถวที่สร้างติดต่อกันที่มีความยาวรวมกัน 40 เมตร ให้มีที่ว่างระหว่างแถวด้านข้างของอาคารไม่ต่ำกว่า 4 เมตร อาคารทาวน์เฮาส์ในกลุ่มตัวอย่างที่ทำการศึกษาทั้งหมดพบว่า มีหน้ากว้างแต่ละยูนิต อยู่ที่ระยะ 5-5.50 เมตร ในขณะที่ความลึกของแถวอาคารอยู่ระหว่าง 11-18 เมตร ดังนั้น ในการจำแนกกลุ่มตามพื้นที่ใช้สอยรวม (gross area) จะพบว่าในอาคารทาวน์เฮาส์พื้นที่ใช้สอย 160-200 ตารางเมตรต่อยูนิตจะเป็นทาวน์เฮาส์ 3 ชั้น ในขณะที่อาคารพื้นที่ 200 ตารางเมตรขึ้นไปต่อยูนิต ความสูงจะเพิ่มเป็น 4 ชั้น กลุ่มตัวอย่างอาคารทาวน์เฮาส์ 2 ชั้น ที่ได้สำรวจมาจากแหล่งข้อมูลดังกล่าวข้างต้น มีจำนวนทั้งสิ้น 24 หลัง ตารางที่ 1 แสดงตัวอย่างข้อมูลและรูปแบบอาคารกลุ่มตัวอย่างทาวน์เฮาส์สำหรับการศึกษานี้

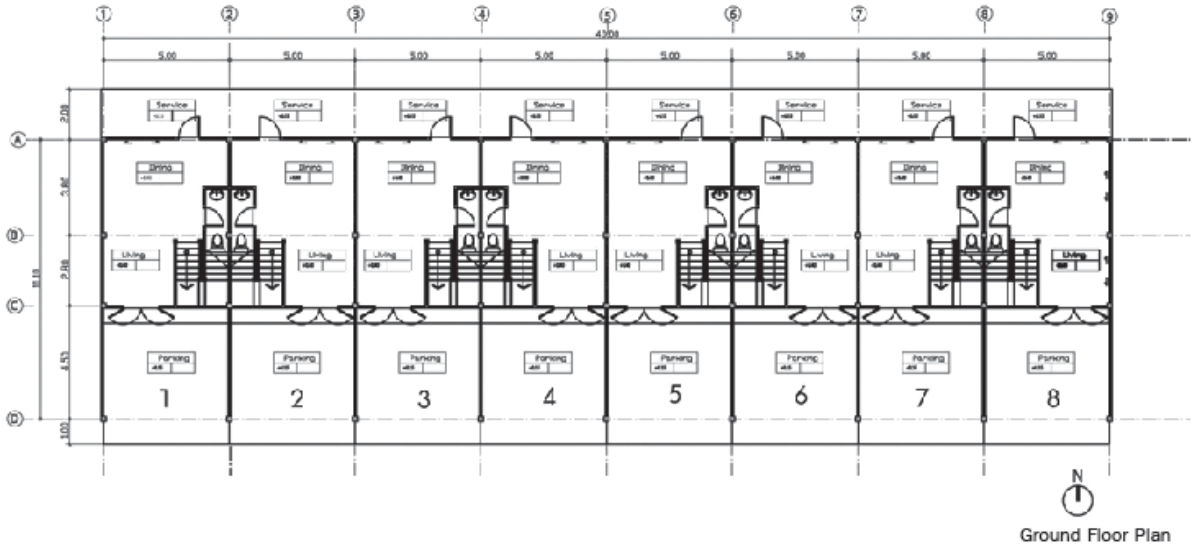
จากการศึกษากลุ่มตัวอย่างอาคารทาวน์เฮาส์พบว่าทาวน์เฮาส์ทั้งหมด ไม่ว่าจะเป็นอาคาร 2 ชั้นหรือมากกว่าจะมีลักษณะรูปทรงเหมือนกัน แตกต่างเพียงขนาด ความลึกของอาคาร ซึ่งเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยส่วนใหญ่ด้านข้างของห้องริมเป็นผนังทึบ (ยกเว้นอาคารบางหลังที่มีการแต่งเติมด้านข้างให้มีช่องเปิด) ชั้นล่างส่วนหน้าเป็นที่ว่างใต้อาคารสำหรับจอดรถ ส่วนชั้นบนมีช่องเปิดที่ผนังด้านหน้าและด้านหลัง บางอาคารมีระเบียงห้องชั้นบน ทำโดยการยื่นส่วนของพื้นออกจากโครงสร้างหลัก หรือถอยช่วงผนังเข้าไปในตัวโครงสร้างหลัก อาคารทาวน์เฮาส์อ้างอิงที่ใช้จำลองเพื่อการศึกษานี้มีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ความสูง 2 ชั้น หน้ากว้างแต่ละยูนิต กว้าง 5 เมตร จำนวน 8 ยูนิตต่ออาคาร ชั้นล่างมีที่ว่างจอดรถใต้อาคาร ชั้นบนมีระเบียงในส่วนด้านหน้าอาคาร ช่องเปิดอาคารทั้งหมดอยู่ที่ผนังด้านหน้าและด้านหลัง สัดส่วนช่องเปิดต่อผนังพื้นที่อาคาร มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 30% อาคารอ้างอิงมีพื้นที่ใช้สอยรวมต่อยูนิตเท่ากับ 131 ตารางเมตร คิดเป็นพื้นที่ใช้สอยภายใน (net area) ต่อยูนิตเท่ากับ 89 ตารางเมตร พื้นที่ใช้สอยรวมทั้งหมดของทั้งอาคาร (8 ยูนิต) คิดเป็น 1,048 ตารางเมตร พื้นที่ใช้สอยภายในมีทั้งสิ้น 711 ตารางเมตร รูปแบบทางสถาปัตยกรรมและแปลนอาคาร แสดงในรูปที่ 1

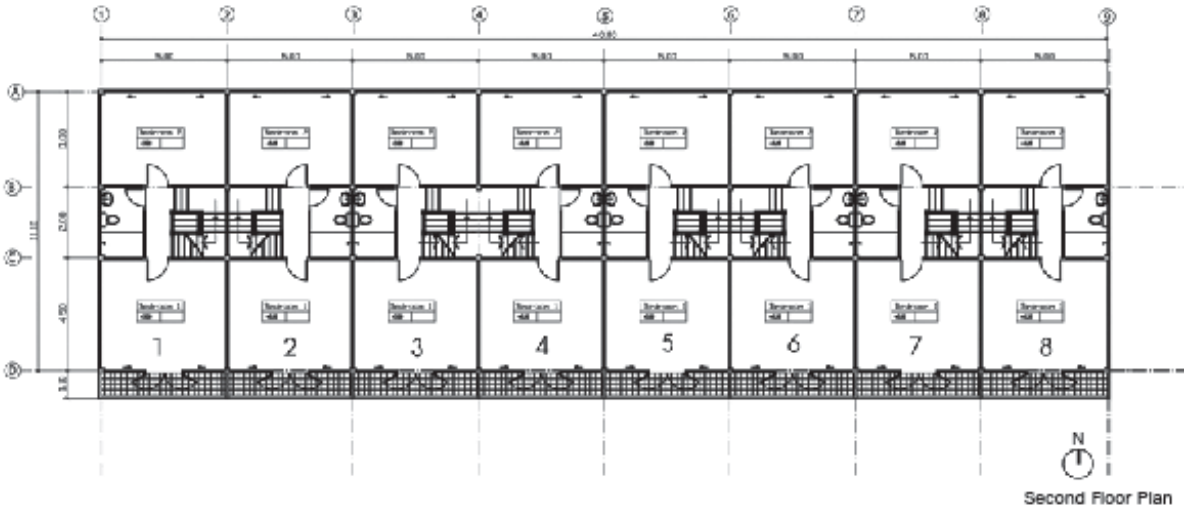
ทางด้านการใช้วัสดุเปลือกอาคารจากการศึกษากลุ่มตัวอย่างของอาคารทาวน์เฮาส์ทั้งหมดดังกล่าว สามารถจำแนกรายละเอียด วัสดุ และโครงสร้างอาคารมาตรฐานได้ดังตารางที่ 2

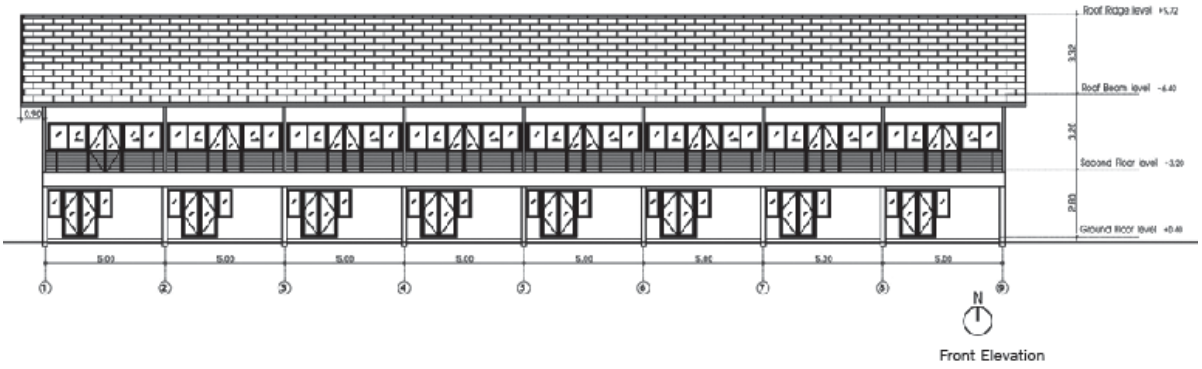
ทางด้านสภาพแวดล้อมในอาคารจากผลการสำรวจตัวอย่างอาคารร่วมกับการสร้างสมมติฐานของคณะผู้วิจัยเองในการจำลองอาคารอ้างอิง ได้มีการกำหนดค่าสภาพแวดล้อมในอาคารที่ศึกษาดังต่อไปนี้

ตารางที่ 1 แสดงตัวอย่างข้อมูลการสำรวจอาคารทาวน์เฮ้าส์ในท้องตลาด

ลำดับที่		รูปทรง	พื้นที่ (m^2)	WWR	โครงสร้าง	หลังคา	ผนัง	พื้น	หน้าต่าง	เพดาน
1			90	0.50	เสาคาน คสล. หลังคาโครงเหล็ก	กระเบื้องซีเมนต์แผ่นเรียบ	ก่ออิฐมอญ ฉาบปูน หนา 10 cm.	คสล. พื้นสำเร็จรูป	กระจกใส วงกบไม้เนื้อแข็ง	ยิปซั่มบอร์ด 9 มม.
2			99	0.40	เสาคาน คสล. หลังคาโครงเหล็ก	กระเบื้องโมเนียร์	ก่ออิฐมอญ ฉาบปูน หนา 10 cm.	คสล. พื้นสำเร็จรูป	กระจกใส วงกบไม้เนื้อแข็ง	ยิปซั่มบอร์ด 9 มม.
3			100	0.50	เสาคาน คสล. หลังคาโครงเหล็ก	กระเบื้องโมเนียร์	ก่ออิฐมอญ ฉาบปูน หนา 10 cm.	คสล. พื้นสำเร็จรูป	กระจกใส วงกบไม้อะลูมิเนียม	ยิปซั่มบอร์ด 9 มม.
4			120	0.50	เสาคาน คสล. หลังคาโครงเหล็ก	กระเบื้องโมเนียร์	ก่ออิฐมอญ ฉาบปูน หนา 10 cm	คสล. พื้นสำเร็จรูป	กระจกใส วงกบไม้อะลูมิเนียม	ยิปซั่มบอร์ด 9 มม.
5			120	0.60	เสาคาน คสล. หลังคาโครงเหล็ก	กระเบื้องโมเนียร์	ก่ออิฐมอญ ฉาบปูน หนา 10 cm	คสล. พื้นสำเร็จรูป	กระจกใส วงกบไม้อะลูมิเนียม	ยิปซั่มบอร์ด 9 มม.







รูปที่ 1 อาคารอ้างอิง (reference building) ที่สมมติขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 2 วัสดุเปลือกอาคารจากการศึกษากลุ่มตัวอย่างของอาคารทาวน์เฮาส์จากการสำรวจเพื่อใช้เป็นอาคารอ้างอิง

รายการ	รายการ	รายละเอียด	วัสดุเก็บผิว
พื้น	พื้นที่ชั้นล่าง พื้นที่จอดรถ พื้นที่ชั้นบน พื้นที่ห้องน้ำ	พื้นที่คอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป ชนิดลอน พื้นที่คอนกรีตหล่อกับที่ พื้นที่คอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป ชนิดแผ่นเรียบ คอนกรีตหล่อกับที่	กระเบื้องเซรามิก คอนกรีตฉาบเรียบ ไม้เนื้อแข็ง กระเบื้องเซรามิก
ผนัง	ผนังทั่วไป ผนังห้องน้ำ	ก่ออิฐมอญ ผิวฉาบปูนเรียบ ก่ออิฐมอญ ผิวฉาบปูนเรียบ	ทาสีน้ำพลาสติก กระเบื้องเซรามิก
ฝ้าเพดานภายนอก ฝ้าเพดานภายใน		ฝ้าซีเมนต์แผ่นเรียบ ฝ้ายิปซัมบอร์ด	ทาสีน้ำพลาสติก ทาสีน้ำพลาสติก
หลังคา	กระเบื้องหลังคาซีแพคโมเนีย		
ประตู	วงกบ บานประตูภายนอก บานประตูภายใน บานประตูห้องบริการ	ไม้เนื้อแข็ง ไม้เนื้อแข็ง บาน H.D.F. บานพลาสติกสังเคราะห์ (PVC)	
หน้าต่าง	วงกบ 1 บานหน้าต่างทั่วไป 1 วงกบ 2 บานหน้าต่างทั่วไป 2	ไม้เนื้อแข็ง ไม้เนื้อแข็ง ลูกฟักกระจกใส อะลูมิเนียม สี Powder Coat อะลูมิเนียม สี Powder Coat ลูกฟักกระจกใส	

- จำนวนผู้อาศัย 4 คนต่อหลัง
- การตั้งค่าอุณหภูมิปรับอากาศ 25 องศาเซลเซียส
- ใช้เครื่องปรับอากาศที่ห้องนอนชั้นบนเท่านั้น ในวันจันทร์-ศุกร์ ใช้เครื่องปรับอากาศเวลา 22:00-06:00 น. วันหยุดสุดสัปดาห์ใช้เวลา 21:00-07:00 น.
- ตั้งแต่วันจันทร์-ศุกร์ กำหนดให้มีผู้อาศัยเต็มจำนวน ในระหว่างเวลา 18:00-07:00 น.
- วันหยุดสุดสัปดาห์ กำหนดให้มีผู้อาศัยคิดเป็นจำนวน 80% ตลอดเวลา 24 ชั่วโมง
- การใช้พลังงานไฟฟ้าแสงสว่าง คิดเป็นปริมาณ 7.53 วัตต์/ตร.ม. (คำนวณจากแบบก่อสร้างอาคารที่คล้ายคลึงกัน)
- การใช้พลังงานจากอุปกรณ์ไฟฟ้า คิดเป็นปริมาณ 8.61 วัตต์/ตร.ม. (ประมาณการจากชนิดและจำนวนอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าทั่วไป ซึ่งประกอบด้วยโทรทัศน์ 3 เครื่อง วิทยุเครื่องเสียง 2 ชุด พัดลมตั้งโต๊ะ 1 เครื่อง คอมพิวเตอร์และพรินเตอร์ 2 ชุด เตาไมโครเวฟ 1 เครื่อง หม้อหุงข้าว 1 เครื่อง เครื่องทำน้ำร้อน 2 เครื่อง เครื่องปั๊มน้ำ 1 เครื่อง)
- ตารางเวลาการใช้ไฟฟ้าแสงสว่างในพื้นที่ทั้งหมดคิดรวมเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 40% ในแต่ละชั่วโมง
- ตารางเวลาการใช้ไฟฟ้าอุปกรณ์ในพื้นที่ทั้งหมดคิดรวมเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 35% ในแต่ละชั่วโมง

4. การจำลองการใช้พลังงานของอาคาร

งานวิจัยนี้ทำการจำลองการใช้พลังงานรายชั่วโมงตลอดระยะเวลา 1 ปี ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยรูปแบบการใช้พลังงานของอาคารอ้างอิงนี้ จะนำไปใช้เป็นฐานการใช้เฉลี่ย เพื่อศึกษาวิธีการลดการใช้พลังงานต่อไป โดยการสร้างแบบจำลองอาคารอ้างอิงจะสมมติสภาพทั่วไปของอาคารดังต่อไปนี้

- เป็นอาคารสร้างขึ้นเดี่ยว ๆ ไม่มีการบังแดดจากอาคารข้างเคียงหรือต้นไม้
- ไม่มีการใช้ม่านบังแดดภายในประตูหน้าต่าง
- เปลือกอาคารมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U-value) ค่าสัมประสิทธิ์การบังเงา (Shading Coefficient: SC) และค่าคุณสมบัติอื่น ๆ ตามที่ได้สำรวจมา
- โครงสร้างอาคารมีลักษณะตามผลการสำรวจอาคารที่ได้กล่าวมา

- ระบบวิศวกรรมอาคารเป็นชนิดและลักษณะตามผลการสำรวจอาคารที่ได้กล่าวมา
- ทำการจำลองโดยการปรับเปลี่ยนค่าสัดส่วนพื้นที่หน้าต่าง กระจก ต่อพื้นที่ผนังภายนอกทั้งหมด ตั้งแต่ 10% จนถึง 80% แต่จะเลือกใช้ค่า 30% เป็นค่าอ้างอิงของทาวน์เฮ้าส์ทั่วไปเพื่อกำหนดเป็นฐานการใช้เฉลี่ย

จะเห็นว่าการกำหนดสภาพอ้างอิงดังที่กล่าวมานี้อาจจะไม่เหมือนสภาพความเป็นจริงทั้งหมดของทาวน์เฮ้าส์ที่เป็นอยู่ ทั้งนี้เพื่อต้องการตัดตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่น ลักษณะอาคารข้างเคียงที่ช่วยบังแดด และการใช้ม่านบังแดดภายใน ซึ่งมีความหลากหลายแตกต่างกันอย่างมาก และจะส่งผลให้ค่าการจำลองแตกต่างกันด้วยปัจจัยที่ไม่ต้องการศึกษา นอกจากนี้ การศึกษานี้มิใช่การศึกษาเพื่อพัฒนาวิธีการจำลองให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงที่สุด แต่เป็นการศึกษาเพื่อดูผลความแตกต่างระหว่างเปลือกอาคารชนิดต่าง ๆ ภายใต้สถานการณ์จำลองภายนอกที่เหมือนกัน ผลที่ได้จากการจำลองอาคารอ้างอิงภายใต้สภาวะอ้างอิงนี้ จึงอาจจะไม่เหมือนสภาวะจริงที่เกิดขึ้นกับอาคารจริงทุกประการ แต่ผู้วิจัยจะสามารถมั่นใจได้ว่าผลการประหยัดพลังงานที่จะเกิดขึ้นจะมาจากตัวแปรเปลือกอาคารที่กำลังศึกษาอย่างแน่นอน

4.1 โปรแกรม DOE-2.1E

โปรแกรม DOE-2.1E เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งพัฒนาโดย Lawrence Berkeley Laboratory ประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้ช่วยคำนวณการใช้พลังงานในอาคารเป็นรายชั่วโมงตลอดทั้งปี โดยอาศัยฐานข้อมูลสภาพอากาศรายชั่วโมงที่ได้จากกรมอุตุนิยมวิทยา DOE- 2.1E เป็นโปรแกรมที่ได้รับการพัฒนาและทดสอบความแม่นยำโดยนักวิจัยจากทั่วโลกมาตลอดระยะเวลากว่า 20 ปี ซึ่ง DOE-2.1E ยังได้ถูกนำมาใช้เพื่อช่วยพัฒนามาตรการและกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการใช้พลังงานในหลายประเทศทั่วโลกอีกด้วย องค์ประกอบหลักของ DOE-2.1E จะมีทั้งสิ้น 4 ส่วน ได้แก่ LOADS SYSTEM PLANT และ ECONOMIC [2, 3] ซึ่งจะทำหน้าที่ตั้งแต่การคำนวณภาระการทำความเย็น (cooling load) จนถึงการใช้พลังงานในส่วนประกอบต่าง ๆ ของอาคาร ทั้งในส่วนของระบบแสงสว่างและอุปกรณ์ไฟฟ้า

DOE-2.1E จะคำนวณภาระการทำความเย็นจากปัจจัยภายนอกอาคาร ซึ่งได้แก่ การนำความร้อนจากผนังภายนอก การแผ่รังสีดวงอาทิตย์ผ่านช่องหน้าต่าง และการรั่วซึมของอากาศภายนอกนำมารวมกับภาระการทำความเย็นภายในอาคาร ซึ่งได้แก่ ความร้อนจากผู้ใช้อาคาร ความร้อนจากหลอดไฟฟ้าแสงสว่าง และความร้อนจากอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า เมื่อนำภาระการทำความเย็นจากภายนอกมารวมกับภาระการทำความเย็นภายในแล้ว DOE-2.1E ก็จะสามารถคำนวณขนาดของเครื่องปรับอากาศและปริมาณการใช้พลังงานได้

4.2 ฐานข้อมูลสภาพอากาศเพื่อการจำลองการใช้พลังงานด้วยโปรแกรม DOE-2.1E

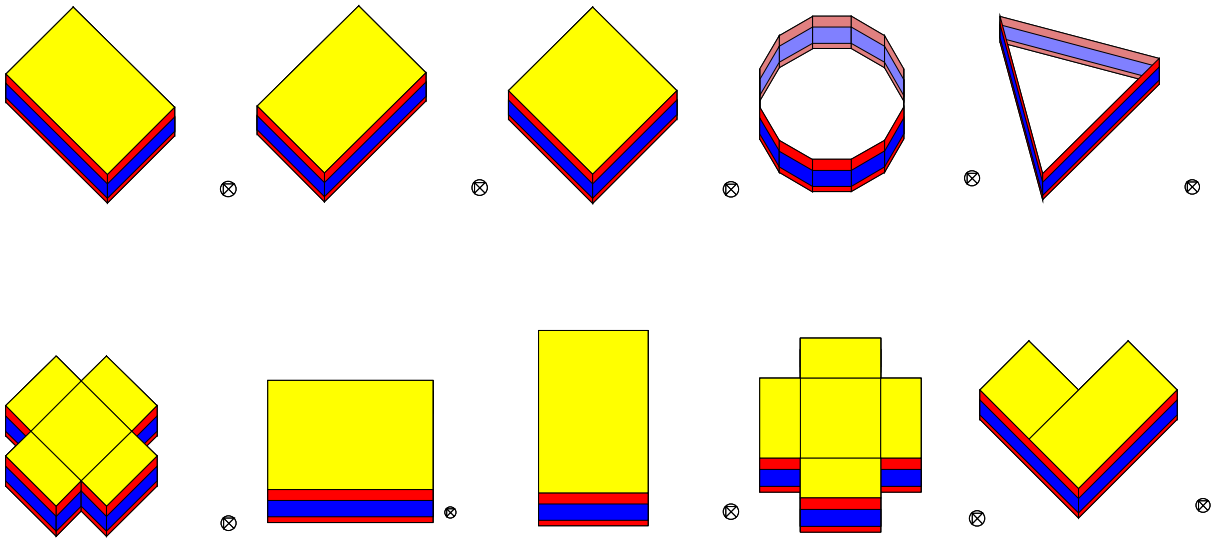
ในการจำลองการใช้พลังงานด้วยโปรแกรม DOE-2.1E นี้ได้ใช้ไฟล์ข้อมูลสภาพอากาศของกรุงเทพจากกรมอุตุนิยมวิทยาที่จัดทำเป็นไฟล์ TMY โดยภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [11] โดยจะประกอบด้วยข้อมูลอากาศรายชั่วโมงตลอดหนึ่งปีที่ประกอบด้วยอุณหภูมิกระเปาะแห้ง อุณหภูมิหยดน้ำค้าง ความเร็วลม ทิศทางลม ความกดอากาศ ค่าการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ (ทั้งรังสีตรงและรังสีกระจาย)

4.3 การพัฒนาฐานการใช้พลังงานจากการจำลอง

ผลการจำลองจากโปรแกรม DOE-2.1E ได้นำมาใช้วิเคราะห์รูปแบบการใช้พลังงานของอาคาร และจากการวิเคราะห์ฐานการใช้พลังงาน ผลที่ได้นำมาพัฒนาเป็นรูปแบบการใช้พลังงานของอาคาร (energy use profile) ตามรายละเอียดต่อไปนี้

- ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าตลอดทั้งปี (kWh ต่อปี)
- สัดส่วนปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อพื้นที่ใช้สอย (kWh/sq.m. ต่อปี)
- ความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดตลอดทั้งปี (Peak kW)
- สัดส่วนความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อพื้นที่อาคาร (Peak kW/sq.m.)
- รูปแบบการใช้พลังงานเฉลี่ยรายชั่วโมงในฤดูต่าง ๆ และรูปแบบการใช้พลังงานเฉลี่ยรายชั่วโมงของวันที่มีการใช้พลังงานสูงสุด
- สัดส่วนการใช้พลังงานจากกลุ่มการใช้หลัก 3 กลุ่ม ซึ่งได้แก่ การทำความเย็น แสงสว่าง และอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า
- สัดส่วนการใช้พลังงานเพื่อการทำความเย็นอันเนื่องมาจากส่วนประกอบสถาปัตยกรรมต่าง ๆ เช่น ผนัง พื้น หลังคา ประตู หน้าต่าง หลอดไฟ แหล่งความร้อนภายในอื่น ๆ และการรั่วซึมของอากาศจากภายนอก

ก่อนที่จะตัดสินใจเลือกใช้แบบอาคารในรูปที่ 1 เพื่อ



รูปที่ 2 การทดลองปรับเปลี่ยนรูปทรงและทิศทางอาคารแบบต่าง ๆ

ตารางที่ 3 ผลการจำลองการใช้พลังงานเพื่อการทำความเย็นของอาคารพักอาศัยรูปทรงต่าง ๆ

รูปทรง	พื้นที่ (m^2)	เปลือกอาคาร/พื้นที่อาคาร	WWR	Peak Cooling Load ($KBtu/hr.m^2$)	m^2/Ton	Cooling Energy ($MBtu/m^2.Yr$)
	150	1	50%	0.508	23.6	1.01
	150	1	50%	0.458	26.2	0.97
	150	0.98	50%	0.477	25.2	0.98
	150	**0.87**	50%	**0.416**	**28.8**	**0.92**
	150	**1.12**	50%	**0.529**	**22.7**	**1.06**
	150	1.13	50%	0.485	24.7	1.01
	150	1	50%	0.505	23.8	1.00
	150	1	50%	0.508	23.6	0.99
	150	1.13	50%	0.486	24.7	1.02
	150	1.13	50%	0.524	22.9	1.06

เป็นอาคารตัวแทนสำหรับทำการจำลองให้ได้ฐานการใช้พลังงาน จำเป็นต้องทำการทดสอบหาอิทธิพลของรูปทรงต่าง ๆ หรือการจัดวางทิศทางตัวอาคารแบบต่าง ๆ เพื่อให้แน่ใจเสียก่อนว่ารูปทรงอาคารที่หลากหลาย อาจจะมีผลต่อการใช้พลังงานอย่างไรหรือไม่ ทั้งนี้เนื่องจากอาคารในเขตร้อนจะได้รับอิทธิพลจากแสงแดดมากกว่าอาคารในเขตหนาวที่ต้องระวังเรื่องการสูญเสียความร้อนในเวลากลางคืน ดังนั้น การเลือกรูปทรงของอาคารในเขตร้อนจึงเป็นสิ่งสำคัญ ในการวิจัยนี้ได้ทดลองทำการจำลองอาคารที่มีรูปทรงต่าง ๆ เพื่อตรวจสอบระดับความแตกต่างของการใช้พลังงาน และผลที่ได้นำมาแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงผลการจำลองอาคารรูปทรงต่าง ๆ พบว่า อาคารรูปทรงกลมจะประหยัดพลังงานในแง่การทำความเย็นมากที่สุด ในขณะที่รูปทรงสามเหลี่ยมจะมีภาระการทำความเย็นสูงที่สุด แต่โดยภาพรวม สำหรับอาคารพักอาศัยที่ใช้งานส่วนใหญ่เวลากลางคืน จะพบว่ารูปทรงอาคารจะไม่ได้มีผลมากนักต่อการใช้พลังงาน ทั้งนี้เพราะการใช้พลังงานเพื่อทำความเย็น มักจะเกิดขึ้นในเวลากลางคืนที่ไม่มีแสงแดด จากตารางที่ 3 จึงสามารถสรุปได้ว่า สำหรับอาคารประเภททาวน์เฮ้าส์ รูปทรงอาคารและการหันทิศทางที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อการใช้พลังงานมากนัก ดังนั้น จึงสามารถเลือกใช้แบบอาคารอ้างอิงในรูปที่ 1 เพื่อใช้เป็นตัวแทนอาคารพักอาศัยในท้องตลาดต่อไปได้

4.4 ผลการจำลองการใช้พลังงานในอาคารทาวน์เฮ้าส์ 2 ชั้น

ในการศึกษาผลการใช้พลังงานในอาคาร โดยเฉพาะพลังงานในการทำความเย็นอาคาร รวมถึงการถ่ายเทพลังงานความร้อนผ่านเปลือกอาคาร ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4 ภาระการทำความเย็นสูงสุดของแต่ละชั้นในทาวน์เฮ้าส์ 2 ชั้น

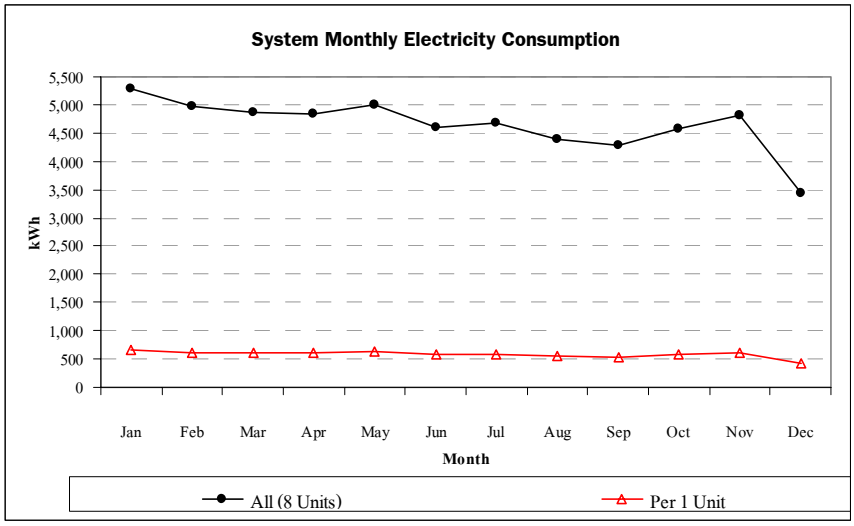
Zone	Gross Area (sq.m.)	Peak Cooling (kBtu/hr)	Peak Cooling (kW)	Peak Cooling/Area (kBtu/hr-sq.m.)	Peak Time	Dry Bulb (°C)
ใต้หลังคา	550.20	302.45	88.65	0.68	May14 2PM	35
ชั้นล่าง ยูนิตทิศตะวันตก	70.00	11.53	3.38	0.35	May10 6PM	36
ชั้นล่าง ยูนิตกลาง	420.00	44.40	13.01	0.22	May10 4PM	36
ชั้นล่าง ยูนิตทิศตะวันออก	70.00	10.59	3.10	0.32	May 17 1PM	35
ชั้นบน ยูนิตทิศตะวันตก	61.00	17.99	5.27	0.32		
ชั้นบน ยูนิตกลาง	366.00	88.45	25.93	0.27		
ชั้นบน ยูนิตทิศตะวันออก	61.00	19.05	5.58	0.34		

ตารางที่ 5 ปริมาณการใช้ไฟฟ้ารายเดือนของทาวน์เฮ้าส์ 2 ชั้น

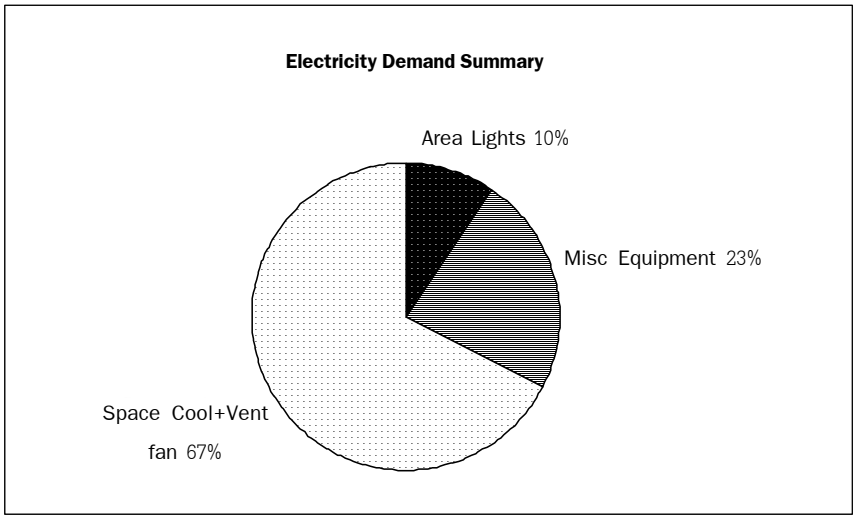
Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Electricity (MBtu)	18.04	16.94	16.61	16.52	17.06	15.72	15.95	15.01	14.58	15.60	16.46	11.73
Electricity (kWh)	5,288	4,965	4,868	4,843	4,999	4,606	4,676	4,398	4,273	4,571	4,823	3,437
per unit (kWh)	661	621	609	605	625	576	585	550	534	571	603	430

ตารางที่ 6 ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอาคารทาวน์เฮ้าส์ 2 ชั้น

Category of Use	Area Lights	Equipment	Space Cooling	Total	Total Per Unit	Max. Cooling (kBtu/hr)	AC Loads (sq.m./ton)
Electricity (MBtu)	18.10	43.90	128.30	190.30	23.79	243.85	**34.84**
Electricity (kWh)	5,305	12,867	37,605	55,777	6,972.12		
per unit (kWh/sq.m.)	7.49	18.17	53.11	78.78			



รูปที่ 3 ปริมาณการใช้ไฟฟ้ารายเดือนในทาวน์เฮ้าส์ 2 ชั้น รวมทั้ง 8 ห้อง และเฉลี่ย 1 ห้อง



รูปที่ 4 สัดส่วนการใช้พลังงานในทาวน์เฮ้าส์ 2 ชั้น

จากการจำลองอาคารทาวน์เฮาส์ 2 ชั้นนี้ ได้จำแนกศึกษาผลของความร้อนที่เกิดขึ้นในส่วนต่าง ๆ ของแต่ละยูนิต ออกเป็น 3 พื้นที่ ได้แก่ พื้นที่ส่วนใต้หลังคา พื้นที่ชั้นบน และพื้นที่ชั้นล่าง พื้นที่ใต้หลังคาของทุกยูนิตได้รับปริมาณความร้อนสูงสุด คิดเป็นปริมาณความต้องการปรับอากาศสูงสุดเท่ากับ 0.68 kBtu/hr-sq.m. เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่อยู่อาศัยทั้ง 2 ส่วนของแต่ละยูนิตจะพบว่า ห้องริมทั้งสองด้านมีปริมาณความต้องการปรับอากาศสูงกว่ายูนิตช่วงกลางที่เหลือ โดยในพื้นที่ชั้นบนของยูนิตทิศตะวันตกมีปริมาณความต้องการปรับอากาศ 0.32 kBtu/hr-sq.m. พื้นที่ชั้นบนของยูนิตทิศตะวันออกเท่ากับ 0.34 kBtu/hr-sq.m. ในขณะที่พื้นที่ชั้นบนของยูนิตกลางมีค่าเพียง 0.27 kBtu/hr-sq.m. เช่นเดียวกันกับพื้นที่ชั้นล่าง ปริมาณความต้องการปรับอากาศของยูนิตตะวันตก ยูนิตกลาง และยูนิตทิศตะวันออก มีค่าเท่ากับ 0.35 0.22 และ 0.32 kBtu/hr-sq.m. ตามลำดับ ช่วงเวลาที่เกิดภาระการทำความเย็นสูงสุดแตกต่างกันขึ้นอยู่กับทิศทางของยูนิตนั้น ตัวอย่างเช่น ยูนิตริมทางทิศตะวันตกจะมีภาระการทำความเย็นสูงสุดที่ 6 โมงเย็น เนื่องจากมุมกระทำของดวงอาทิตย์เกือบตั้งฉากกับผนังด้านข้างในเวลาดังกล่าว ในขณะที่ช่วงเวลาก่อนหน้านั้นยูนิตริมจะไม่ได้รับแสงแดดตรงอย่างเต็มที่ เพราะถูกบังโดยยูนิตข้างเคียง สภาวะดังกล่าวยังเกิดขึ้นกับยูนิตริมทางทิศตะวันออกที่มีภาระการทำความเย็นสูงสุดเวลาบ่ายโมง ยูนิตกลางที่เกิดขึ้นเวลา 4 โมงเย็น และพื้นที่ใต้หลังคาที่จะเกิดขึ้นเวลาบ่าย 2 โมง

ซึ่งทั้งหมดนี้แสดงให้เห็นว่าอาคารที่มีรูปร่างแคบและยาว การแบ่งโซนปรับอากาศเป็นส่วน ๆ แยกกัน จะมีผลทำให้ภาระการทำความเย็นสูงสุดเกิดขึ้นไม่พร้อมกันอันเนื่องมาจากทิศทางของดวงอาทิตย์ที่โคจรเปลี่ยนไปตามแต่ละช่วงเวลา

ทางด้านปริมาณการใช้ไฟฟ้ารายเดือนในช่วง 1 ปี ที่ทำการจำลองพบว่า ถ้าคิดรวมทั้งอาคาร (8 ยูนิต) อาคารอ้างอิงมีค่าการใช้ไฟฟ้าในแต่ละเดือนอยู่ระหว่าง 3,437–5,288 กิโลวัตต์ การใช้ไฟฟ้ารายเดือนของแต่ละยูนิตจะอยู่ระหว่าง 430–661 กิโลวัตต์ คิดเป็นค่าเฉลี่ยการใช้ไฟฟ้าของแต่ละยูนิตเท่ากับ 580 กิโลวัตต์/เดือน เดือนที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำสุดคือ เดือนธันวาคม (430 กิโลวัตต์) เนื่องจากเวลากลางคืน อากาศจะหนาวกว่าปกติจนไม่ต้องใช้เครื่องปรับอากาศ ส่วนเดือนที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดคือ เดือนมกราคม (661 กิโลวัตต์) ซึ่งดูเหมือนจะผิดปกติ เพราะเดือนที่มีอากาศร้อนที่สุดจะเป็นเดือนเมษายน โดยทั่วไปก็ควรจะเป็นเดือนที่มีค่าไฟฟ้าสูงสุด แต่ในการจำลองด้วยโปรแกรม DOE–2.1E นี้ ได้ตรวจสอบข้อมูลอากาศและพบว่า เดือนมกราคมเป็นเดือนที่อากาศร้อนมากพอสมควร และปริมาณรังสีตรงจากดวงอาทิตย์มีมาก ประกอบกับทำมุมตกกระทบน้อยผ่านชายคาลงบนผิวหน้าต่าง ส่งผลให้ปริมาณความร้อนจากการแผ่รังสีผ่านกระจกเข้ามาสะสมในอาคารในเวลากลางวันเป็นจำนวนมาก และก่อให้เกิดภาระการทำความเย็นในเวลากลางคืนเมื่อทำการเปิดใช้เครื่องปรับอากาศทางด้านการแบ่งสัดส่วนการใช้ไฟฟ้า เมื่อคำนวณการใช้ไฟฟ้าทั้งหมดพบว่า ทั้งปีทั้งอาคารมีค่าเท่ากับ 55,777 กิโลวัตต์ แบ่งเป็นพลังงานไฟฟ้าแสงสว่าง 10% ของการใช้ไฟฟ้าทั้งหมด (หรือเท่ากับ 5,305 กิโลวัตต์) พลังงานไฟฟ้าจากอุปกรณ์ทั่วไปคิดเป็น 23% (12,867 กิโลวัตต์) พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการปรับอากาศมีสัดส่วนสูงสุด คือ 67% (37,605 กิโลวัตต์)

ในการจำลองนี้ วันที่มีความต้องการใช้พลังงานปรับอากาศสูงสุดเกิดขึ้นในเดือนมกราคม โดยข้อมูลจากการจำลองเฉพาะยูนิตที่มีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดพบว่า การใช้พลังงานไฟฟ้าปรับอากาศสูงสุดแบ่งเป็น 2 ช่วงเวลา คือ ระหว่างเวลา 24:00–06:00 น. ในวันธรรมดา และ 11:00–18:00 น. ในวันหยุด ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการใช้เครื่องปรับอากาศ โดยมีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 3.17 กิโลวัตต์ จากผลการจำลองการถ่ายเทความร้อนผ่านเปลือกอาคาร ในวันดังกล่าวพบว่า ช่วงเวลาที่มีการถ่ายเทความร้อนมากที่สุดอยู่ในช่วงระหว่างเวลา 10:00–18:00 น. ซึ่งแปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิอากาศภายนอก และปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ นอกจากนี้ การถ่ายเทพลังงานความร้อนผ่านเปลือกอาคารในพื้นที่ส่วนชั้นล่างจะมีปริมาณน้อยกว่าพื้นที่ชั้นบนประมาณ 38% เนื่องจากไม่ได้รับอิทธิพลจากหลังคา

5. การวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าต่อปีของอาคารอ้างอิง

เนื่องจากการออกแบบบ้านพักอาศัยในปัจจุบันมีความหลากหลายทางด้านรูปร่างหน้าตา และขนาดช่องเปิดโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ส่วนที่จะมีผลต่อการใช้พลังงานจะได้แก่ ขนาดและปริมาณของช่องเปิดหน้าต่างกระจก ดังนั้น การพัฒนาเกณฑ์ขั้นต่ำจึงจำเป็นต้องทำการทดลองซ้ำ ๆ สำหรับทาวน์เฮ้าส์ที่มีสัดส่วนช่องเปิดต่อผนังพื้นที่อาคารหลากหลายครอบคลุมตั้งแต่ 10%–80% โดยแบบอาคารอ้างอิงที่ใช้จำลองจะต้องปรับให้มีพื้นที่กระจกเพิ่มมากขึ้นตามด้วย

ตารางที่ 7 แสดงการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อปีของทาวน์เฮ้าส์ที่มีสัดส่วน WWR 10 ถึง WWR 80 จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่า พลังงานการใช้ไฟฟ้าปรับอากาศที่ใช้ในทาวน์เฮ้าส์แปรผันโดยตรงกับสัดส่วนขนาดช่องเปิดต่อพื้นที่

ตารางที่ 7 ผลการจำลองการใช้พลังงานสำหรับทาวน์เฮ้าส์ที่มี WWR = 10–80 %

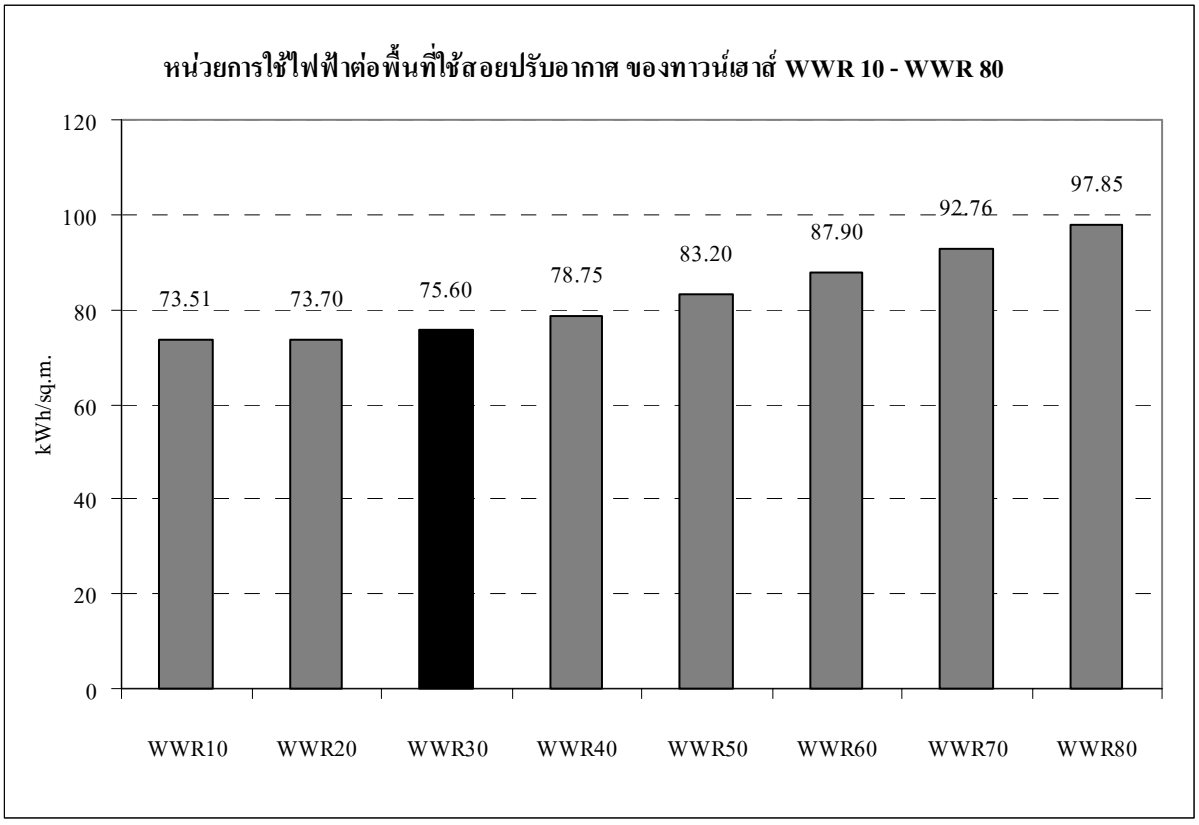
หน่วยการใช้ไฟฟ้าต่อปี (kWh/year)	**สัดส่วนช่องเปิดต่อพื้นที่ผนังอาคาร (Window to Wall Ratio, %)**							
	WWR10	**WWR20**	**WWR30**	**WWR40**	**WWR50**	**WWR60**	**WWR70**	**WWR80**
แสงสว่าง	5,301	5,301	5,301	5,301	5,301	5,301	5,301	5,301
อุปกรณ์ไฟฟ้า	12,849	12,849	12,849	12,849	12,849	12,849	12,849	12,849
ปรับอากาศ	33,895	34,027	35,378	37,604	40,753	44,082	47,523	51,129
รวม	52,045	52,177	53,528	55,754	58,903	62,232	65,673	69,279
หน่วยการใช้ไฟฟ้าต่อพื้นที่ใช้สอย (kWh/sq.m. ต่อปี)	**73.51**	**73.70**	**75.60**	**78.75**	**83.20**	**87.90**	**92.76**	**97.85**

ผนังอาคารตามลำดับ ซึ่งหมายความว่า การเลือกใช้วัสดุและขนาดผนังเปลือกอาคารมีผลต่อการใช้พลังงานในอาคารอย่างมาก ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 73.51 กิโลวัตต์ ช.ม./ตร.ม./ปี ในทาวน์เฮ้าส์ที่มีสัดส่วน WWR 10 ขึ้นเป็น 97.85 กิโลวัตต์ ช.ม./ตร.ม./ปี ในทาวน์เฮ้าส์ที่มีสัดส่วน WWR 80

ในการพยายามลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลง 10% (ตามข้อกำหนดเบื้องต้นของ พพ.) ทาวน์เฮ้าส์ที่มีสัดส่วนช่องเปิดต่อพื้นที่ผนัง 30% (WWR 30) ได้ถูกนำมาพิจารณาเป็นอาคารต้นแบบเพื่อการศึกษา เนื่องจากสัดส่วนช่องเปิดดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับทาวน์เฮ้าส์ส่วนใหญ่ที่สร้างในบริเวณกรุงเทพฯ และปริมณฑล โดยทั้งนี้ ฐานการใช้พลังงานที่ได้จากอาคาร WWR 30% คือ 75.60 กิโลวัตต์ ช.ม./ตร.ม./ปี ดังนั้นเป้าหมายของค่าการใช้พลังงานต่อปีต่อหน่วยพื้นที่ที่ต้องการจึงได้อิงกับค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าในบ้าน WWR 30 หลังปรับลดลง 10% ซึ่งเท่ากับ 68.04 กิโลวัตต์ ช.ม./ตร.ม./ปี แต่เมื่อพิจารณาข้อมูลจากผลการจำลองดังกล่าวพบว่าทาวน์เฮ้าส์ที่มีค่า WWR ต่างกัน การใช้พลังงานที่แตกต่างกันจะเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อปรับอากาศเท่านั้น พลังงานไฟฟ้าแสงสว่าง และไฟฟ้าอุปกรณ์ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อสัดส่วนช่องเปิดต่อพื้นที่ผนังอาคารเปลี่ยนไป ดังนั้นในการคำนวณหาเป้าหมายการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ต้องการ (target annual electricity use) หากทำการปรับลดเฉพาะค่าพลังงานไฟฟ้า เพื่อการปรับอากาศลง 10% ซึ่งจะได้ค่าเป้าหมายการใช้พลังงานที่ประมาณไม่เกิน 70.61 กิโลวัตต์ ช.ม./ตร.ม./ปี คณะผู้วิจัยจึงเลือกค่าดังกล่าวนี้เพื่อนำไปใช้กำหนดแนวทางการออกแบบเปลือกอาคารต่อไป

6. ทางเลือกการใช้วัสดุเปลือกอาคารเพื่อการประหยัดพลังงาน

จากผลการจำลองอาคารอ้างอิงข้างต้น ได้ทำการกำหนดเป้าหมายการใช้พลังงานในทาวน์เฮ้าส์ 2 ชั้นว่าควรจะอยู่ระหว่าง 68.04–70.61 กิโลวัตต์ ช.ม./ตร.ม./ปี ซึ่งจะนำไปใช้ในการหาแนวทางการออกแบบเปลือกอาคารเพื่อการปรับลดการใช้พลังงานต่อไป แต่สำหรับทาวน์เฮ้าส์ที่มี WWR 10 และ WWR 20 เมื่อได้รับการออกแบบตามลักษณะการใช้วัสดุแบบเดียวกับอาคารอ้างอิงจะพบว่า อาคารมีการใช้พลังงานต่ำกว่าฐานการใช้อยู่แล้ว ดังนั้น จึงไม่ได้ถูกนำมาใช้ในการศึกษาเพื่อปรับลด ซึ่งหมายความว่า ทาวน์เฮ้าส์ที่มี



รูปที่ 5 ปริมาณการใช้ไฟฟ้าของทาวน์เฮ้าส์ 2 ชั้น (กิโลวัตต์ ช.ม./ตร.ม./ปี) สำหรับ WWR 10–80%

ตารางที่ 8 สรุปค่าการใช้พลังงานของทาวน์เฮ้าส์ที่มี WWR 30–80% เปรียบเทียบระหว่างเปลือกอาคารมาตรฐาน (base case) และทางเลือกเปลือกอาคารแบบต่าง ๆ

การใช้พลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ (kWh/sq.m.)	WWR 30	WWR 40	WWR 50	WWR 60	WWR 70	WWR 80
BASECASE ผนังก่ออิฐชั้นเดียว กระจกใส	**75.60**	**78.75**	**83.20**	**87.90**	**92.76**	**97.85**
อลูมีเนียมฟอยล์ ใต้แปหลังคา	75.23	78.34	82.79	87.47	92.32	97.40
ฉนวนใยแก้ว 6 นิ้วบนฝ้าเพดาน	**78.46**	**82.30**	**87.11**	**92.07**	**97.10**	**102.43**
ผนังก่ออิฐมอญ 2 ชั้น	74.69	**78.99**	**83.65**	**88.63**	**93.52**	**98.46**
ผนังก่ออิฐมวลเบา	74.36	**78.77**	**83.71**	**88.97**	**93.85**	**98.86**
ผนังก่ออิฐมอญ 2 ชั้น + ฉนวนหนา 3 นิ้ว	74.93	**79.73**	**85.00**	**90.37**	**95.10**	**99.96**
กระจกเขียว 1 ชั้น	73.64	74.98	76.99	79.93	83.03	86.32
กระจกสะท้อนแสง Low SC	71.48	70.62	**69.84**	**69.18**	**69.18**	**68.66**
กระจกสะท้อนแสง Medium SC	71.53	70.75	**70.23**	**70.33**	**70.12**	**70.39**
กระจกเขียว 2 ชั้น ระยะห่าง 6.3 มม.	72.94	73.89	74.87	76.82	79.41	82.33
กระจกเขียว 2 ชั้น ระยะห่าง 12.7 มม.	73.06	73.98	74.94	76.96	79.50	82.47

ค่า WWR น้อยกว่า 30% ไม่จำเป็นต้องทำการปรับปรุงการใช้วัสดุเปลือกอาคารให้ดีกว่าวัสดุมาตรฐานใหม่แต่อย่างใด ดังนั้น การศึกษาวิจัยขั้นต่อไปจะวิเคราะห์หาทางเลือกวัสดุเปลือกอาคารที่จะนำมาซึ่งการประหยัดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงให้ได้ตามเกณฑ์เป้าหมายดังกล่าว โดยทาวน์เฮ้าส์ 2 ชั้นที่อยู่ในขอบเขตศึกษาจะครอบคลุมตั้งแต่อาคาร WWR 30 ถึง WWR 80

จากตารางสรุปค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากทางเลือกเปลือกอาคารต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

- ในตารางที่ 8 ช่องที่แรเงาหมายความว่า เมื่อใช้ทางเลือกเปลือกอาคารนั้น ๆ แล้ว กลับทำให้การใช้พลังงานเพิ่มขึ้นมากกว่าในกรณี base case ที่ใช้ผนังก่ออิฐมอญชั้นเดียวร่วมกับกระจกใส
- ถ้าหากฐานการใช้พลังงานที่ถูกกำหนดสำหรับอาคารส่วนใหญ่ที่มี WWR = 30% ทาวน์เฮ้าส์ที่ได้รับการออกแบบให้มีพื้นที่หน้าต่างเกินกว่ามาตรฐานมาก ๆ เช่นในกรณีของ WWR 80 ซึ่งจะต้องออกแบบให้มีการลดใช้พลังงานลงอย่างมากถึงจะผ่านเกณฑ์ อาคารดังกล่าวจะถูกบังคับให้ใช้เปลือกอาคารประสิทธิภาพสูงมากกว่าอาคารทั่วไป ซึ่งเปรียบเสมือนการลงโทษทางอ้อมแก่อาคารที่ออกแบบก่อสร้าง โดยไม่ได้คำนึงถึงสภาพอากาศแบบร้อนชื้นของประเทศไทย
- การใช้อะลูมิเนียมฟอยล์บุใต้แปหลังคาช่วยลดพลังงานการใช้ไฟฟ้าได้เล็กน้อยในทุก WWR
- การใช้ฉนวนใยแก้วบนฝ้าเพดาน ไม่ช่วยลดการใช้พลังงาน แต่กลับเพิ่มค่าการใช้พลังงานในอาคารทุก WWR ซึ่งเป็นข้อที่น่าสังเกต และจะอธิบายในหัวข้อต่อไป
- ผนังก่ออิฐมอญ 2 ชั้นสามารถช่วยลดการใช้พลังงานได้สำหรับอาคาร WWR 30 เท่านั้น แต่มิได้ช่วยลดการใช้พลังงานในอาคาร WWR 40–80 (ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อต่อไป)
- ผนังก่ออิฐมวลเบาสามารถช่วยลดการใช้พลังงานได้สำหรับอาคาร WWR 30 เท่านั้น แต่มิได้ช่วยลดการใช้พลังงานในอาคาร WWR 40–80 (ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อต่อไป)
- การใช้ผนังก่ออิฐมอญ 2 ชั้น ระหว่างชั้นเป็นฉนวนได้ผลเช่นเดียวกับอาคารก่ออิฐมอญ 2 ชั้น และอิฐมวลเบา ซึ่งช่วยลดการใช้พลังงานได้สำหรับอาคาร WWR 30 เท่านั้น แต่มิได้ช่วยลดการใช้พลังงานในอาคาร WWR 40–80
- การใช้กระจกช่องเปิดเป็นกระจกเขียว 1 ชั้น สามารถช่วยลดการใช้พลังงานของอาคารในทุก WWR ได้

อัตราการลดจะยิ่งมากขึ้นในอาคารที่มีพื้นที่ช่องเปิดมาก แต่อย่างไรก็ดีก็ยังไม่สามารถทำให้ลดลงได้จนถึงเกณฑ์เป้าหมายที่ 70.61 กิโลวัตต์ ช.ม./ตร.ม.

- การใช้กระจกสะท้อนแสงแบบ low SC (SC = 0.23, SHGC = 0.19) ไม่เพียงแต่ช่วยลดการใช้พลังงานของอาคารทุกกรณี แต่ยังช่วยลดได้จนถึงเกณฑ์เป้าหมาย (สำหรับกรณี WWR 50–80)
- การใช้กระจกสะท้อนแสงแบบ medium SC (SC = 0.29, SHGC = 0.25) ช่วยลดการใช้พลังงานของอาคารทุกกรณี และในอาคาร WWR 50–80 ยังสามารถลดได้จนถึงเกณฑ์เป้าหมายที่ 70.61 กิโลวัตต์ ช.ม./ตร.ม.
- การใช้กระจกเขียว 2 ชั้น ที่มีระยะห่างระหว่างแผ่นกระจก 6.3 มม. และ 12.7 มม. ช่วยลดการใช้พลังงานได้ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ยังไม่สามารถทำให้ลดลงได้ถึงเกณฑ์เป้าหมายที่ 70.61 กิโลวัตต์ ช.ม./ตร.ม.

ตารางที่ 9 ค่าลงทุนการก่อสร้างเปลือกอาคารทางเลือกสำหรับ WWR 30

ทางเลือก	เปลือกอาคาร	ทางเลือกเปลือกอาคารทาวน์เฮาส์ WWR 30	ปริมาณ (เนื้อที่)	ราคาต่อหน่วย	ลงทุนค่าก่อสร้าง
			(Sq. m., *Sq. ft.*)	(บาท)	(บาท)
Base case	หลังคา	หลังคากระเบื้อง	675.62	220	148,637
WWR 30	ฝ้าเพดาน	ฝ้าเพดานยิปซัมบอร์ด หนา 1.2 ซม.	453.34	110	49,868
	ผนัง	ผนังก่ออิฐมอญชั้นเดียว + ปูนฉาบ	528.08	440	232,356
	กระจก	กระจกใสชั้นเดียว	*131.35*	*35*	4,597
ค่าลงทุนบ้านมาตรฐาน				**รวม**	**435,458**
ทางเลือก 1	หลังคา	หลังคากระเบื้อง	675.62	220	148,637
	ฝ้าเพดาน	ฝ้าเพดานยิปซัมบอร์ด หนา 1.2 ซม.	453.34	110	49,868
	ผนัง	**ผนังก่ออิฐมวลเบาฉาบปูนเรียบ**	528.08	646	341,141
	กระจก	**กระจกสะท้อนแสงชนิด** Medium SC	***131.35***	***225***	29,554
ค่าลงทุนทางเลือก 1				**รวม**	**569,199**
ทางเลือก 2	หลังคา	หลังคากระเบื้อง	675.62	220	148,637
	ฝ้าเพดาน	ฝ้าเพดานยิปซัมบอร์ด หนา 1.2 ซม.	453.34	110	49,868
	ผนัง	**ผนังก่ออิฐมวลเบาฉาบปูนเรียบ**	528.08	646	341,141
	กระจก	**กระจกสะท้อนแสงชนิด** Low SC	***131.35***	***280***	36,778
ค่าลงทุนทางเลือก 2				**รวม**	**576,424**
ทางเลือก 3	**หลังคา**	**หลังคากระเบื้อง และแผ่น** aluminum foil with air bubble **ใต้แปหลังคา**	675.62	359.8	243,088
	ฝ้าเพดาน	ฝ้าเพดานยิปซัมบอร์ด หนา 1.2 ซม.	453.34	110	49,868
	ผนัง	**ผนังก่ออิฐมวลเบาฉาบปูนเรียบ**	528.08	646	341,141
	กระจก	**กระจกสะท้อนแสงชนิด** Medium SC	***131.35***	***225***	29,554
ค่าลงทุนทางเลือก 3				**รวม**	**663,651**
ทางเลือก 4	**หลังคา**	**หลังคากระเบื้อง และแผ่น** aluminum foil with air bubble **ใต้แปหลังคา**	675.62	359.8	243,088
	ฝ้าเพดาน	ฝ้าเพดานยิปซัมบอร์ด หนา 1.2 ซม.	453.34	110	49,868
	ผนัง	**ผนังก่ออิฐมวลเบาฉาบปูนเรียบ**	528.08	646	341,141
	กระจก	**กระจกสะท้อนแสงชนิด** Low SC	***131.35***	***280***	36,778
ค่าลงทุนทางเลือก 4				**รวม**	**670,875**

หมายเหตุ: ราคากระจกอยู่ในหน่วยบาทต่อตารางฟุต ราคาวัสดุอื่นอยู่ในหน่วยบาทต่อตารางเมตร

7. การวิเคราะห์ความคุ้มค่าของการลงทุนเลือกใช้วัสดุอาคารประหยัดพลังงาน

จากตารางที่ 8 จะเห็นประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานของทางเลือกวัสดุเปลือกอาคารเดี่ยว ๆ คือ ผนังทึบ ฉนวนหรือกระจก ซึ่งในหลายกรณียังไม่สามารถทำให้ลดการใช้พลังงานลงได้ถึงเป้าหมาย ดังนั้น ในการศึกษานี้จึงได้พยายามจัดชุดทางเลือกเปลือกอาคารที่ประกอบด้วยทั้งผนัง กระจก และฉนวนกันความร้อนชนิดต่าง ๆ ประกอบเข้าเป็นชุดทางเลือกหลาย ๆ ชุด และได้ทำการจำลองผลการประหยัดพลังงานเพิ่มสำหรับอาคารที่มี WWR 20–80 โดยในที่นี้ได้เลือกเฉพาะชุดทางเลือกที่ช่วยให้ประหยัดพลังงานลงตามเป้าหมายที่ 70.61กิโลวัตต์ ช.ม./ตร.ม. มาแสดง ตารางที่ 9 แสดงตัวอย่างชุดทางเลือก 4 ชุดสำหรับอาคาร WWR = 30%

จากตารางที่ 10 สำหรับอาคาร WWR 30 การใช้เปลือกอาคารทั้ง 4 ชุด ล้วนสามารถช่วยลดการใช้พลังงานลงได้ต่ำกว่าเป้าหมาย โดยทางเลือกที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยผนังก่ออิฐมวลเบา และการใช้กระจกสะท้อนแสงชนิด low

ตารางที่ 10 การวิเคราะห์ความคุ้มทุนของวัสดุทางเลือก สำหรับอาคาร WWR 30

ทางเลือก WWR 30	เงินลงทุนเริ่มแรก	เงินลงทุนเพิ่มจาก Base Case	การใช้ไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่	การใช้ไฟฟ้า ต่อปี	ค่าไฟฟ้าต่อปี	ค่าไฟฟ้าลดลงจาก Base Case	Simple Payback (Additional Cost/Savings)	Internal Rate of Return (IRR)
	(บาท)	(บาท)	(kWh/Sq.	(kWh/ปี)	(บาท/ปี)	(บาท/ปี)	ปี	(%)
Base Case	**435,458**	**-**	**75.60**	**53,527**	**160,581**	**-**	**-**	**-**
ทางเลือก 1	569,199	133,742	**68.88**	48,770	146,310	14,271	9.37	10.67
ทางเลือก 2	576,424	140,966	**68.03**	48,165	144,495	16,086	8.76	11.41
ทางเลือก 3	663,651	228,193	**68.54**	48,528	145,584	14,997	15.22	6.57
ทางเลือก 4	670,875	235,418	**67.74**	47,963	143,889	16,692	14.10	7.09

ตารางที่ 11 การวิเคราะห์มูลค่าตลอดช่วงอายุการใช้งาน สำหรับ WWR 30

ทางเลือก	ทางเลือกเปลือกอาคาร	First Cost (บาท)	ค่าไฟฟ้า (บาทต่อปี)	Simple Payback (Year)	Present Worth of Energy Cost (บาท)	Total Present Worth (บาท)
Base Case WWR 30	หลังคากระเบื้อง ฝ้าเพดานยิปซัมบอร์ด หนา 1.2 ซม. ผนังก่ออิฐมอญชั้นเดียว + ปูนฉาบ กระจกใสชั้นเดียว		160,581		2,431,196	2,431,196
ทางเลือก 1	ผนังก่ออิฐมวลเบาฉาบปูนเรียบ กระจกสะท้อนแสงชนิด medium SC	133,742	146,310	9.37	2,215,133	2,348,875
ทางเลือก 2	**ผนังก่ออิฐมวลเบาฉาบปูนเรียบ** **กระจกสะท้อนแสงชนิด low SC**	**140,966**	**144,495**	**8.76**	**2,187,654**	**2,328,620**
ทางเลือก 3	หลังคากระเบื้อง และแผ่น aluminium foil with air bubble ใต้แปหลังคา ผนังก่ออิฐมวลเบาฉาบปูนเรียบ กระจกสะท้อนแสงชนิด medium SC	228,193	145,584	15.22	2,204,142	2,432,335
ทางเลือก 4	หลังคากระเบื้อง และแผ่น aluminium foil with air bubble ใต้แปหลังคา ผนังก่ออิฐมวลเบาฉาบปูนเรียบ กระจกสะท้อนแสงชนิด low SC	235,418	143,889	14.10	2,178,479	2,413,897

SC จะมีระยะเวลาคุ้มทุนเร็วที่สุด คือที่ 8.76 ปี เมื่อเทียบกับอาคารอ้างอิงที่ใช้ผนังก่ออิฐมอญร่วมกับกระจกใสชั้นเดียว

จากตารางที่ 11 แสดงการคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดช่วงอายุการใช้งาน โดยตั้งสมมติฐานว่าอัตราดอกเบี้ยเท่ากับ 7.5% (อัตราดอกเบี้ย MLR ณ เดือนมีนาคม 2549) และอัตราเงินเฟ้อ เท่ากับ 4.56% (อ้างอิงตามประกาศของธนาคารแห่งประเทศไทย เมื่อสิ้นปี 2548) มูลค่าระยะเวลาการลงทุนใน 20 ปี พบว่า ทางเลือกที่ 2 การออกแบบด้วยผนังก่ออิฐมวลเบาร่วมกับกระจกสะท้อนความร้อน low SC (SC = 0.23, SHGC = 0.19) จะมีค่าใช้จ่ายตลอดระยะเวลา 20 ปีน้อยที่สุด คือ 2,328,620 บาท ซึ่งน้อยกว่าค่าใช้จ่ายตลอดอายุ 20 ปีของ base case ประมาณ 102,576 บาท อย่างไรก็ดี ทางเลือกที่ 1 ที่ใช้กระจกสะท้อนความร้อน medium SC (SC = 0.26; SHGC = 0.25) ก็ยังจัดว่าเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน และยังมีค่าก่อสร้างเริ่มต้นต่ำกว่าอีกด้วย ซึ่งปัจจุบันยังต้องยอมรับว่าราคาค่าก่อสร้างเริ่มต้นยังเป็นปัจจัยหลักในการตัดสินใจเลือกซื้อบ้านของประชาชน และเป็นข้อพิจารณาสำคัญของผู้ประกอบการอสังหาริมทรัพย์

8. เกณฑ์ขั้นต่ำของการใช้วัสดุเปลือกอาคารเพื่อการประหยัดพลังงานในทาวน์เฮ้าส์ 2 ชั้น

คณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาด้วยวิธีเดียวกันนี้สำหรับทาวน์เฮ้าส์ที่มี WWR อื่น ๆ ตั้งแต่ 20-80 % และนำมาพัฒนาเกณฑ์การเลือกใช้วัสดุเปลือกอาคาร โดยเฉพาะของอาคารทุก WWR แต่ไม่สามารถนำรายละเอียดการจำลองมานำเสนอในที่นี้ได้ จากการศึกษาประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานของการออกแบบเปลือกอาคารด้วยวัสดุเปลือกอาคารแบบต่าง ๆ พบว่า คุณสมบัติการเป็นฉนวนของผนังภายนอกที่ดีนั้นมีความสัมพันธ์กับค่าการประหยัดพลังงานในอาคาร แต่อย่างไรก็ดี จากการที่อาคารทาวน์เฮ้าส์ส่วนใหญ่ใช้เครื่องปรับอากาศเวลากลางคืน ซึ่งไม่มีผลจากรังสีดวงอาทิตย์ ทำให้ประสิทธิผลของการใช้ฉนวนกันความร้อนน้อยลง เมื่อเทียบกับอาคารที่ใช้งานเวลากลางวันที่ได้รับแสงแดดทั้งวัน การใช้ฉนวนกันความร้อนจะช่วยลดภาระการทำความเย็นสูงสุดของเครื่องปรับอากาศ แต่ในกรณีของทาวน์เฮ้าส์นั้น ช่วงเวลาที่อากาศร้อนที่สุดและเป็นช่วงเวลาที่เกิดภาระการทำความเย็นสูงสุดมักจะเป็นช่วงเวลาที่อาคารมิได้เปิดใช้ จึงไม่มีผลต่อภาระการทำความเย็นของอาคาร ในทางกลับกันการใช้ฉนวนมากเกินไปโดยเฉพาะในส่วนห้องนอนจะทำให้อาคารคายความร้อนที่สะสมในเวลากลางวันออกสู่สภาพแวดล้อมในช่วงเวลากลางคืนได้ช้าลง ซึ่งทำให้พบว่ามีการใช้พลังงานมากขึ้นเล็กน้อยในทาวน์เฮ้าส์ที่ติดตั้งฉนวนใยแก้วบนฝ้าเพดานห้องนอน ซึ่งในกรณีนี้ควรจะต้องทำการศึกษาโดยละเอียดต่อไป

จากการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในอาคารทาวน์เฮ้าส์ 2 ชั้นพบว่า ปัจจัยที่ก่อให้เกิดภาระการทำความเย็นในอาคารมากที่สุดคือ ขนาดและวัสดุกระจกหน้าต่าง ซึ่งพบว่าอาคารที่มีช่องเปิดหน้าต่างมาก จะมีการใช้พลังงานเพื่อทำความเย็นมาก เนื่องจากรังสีดวงอาทิตย์ที่ทะลุผ่านกระจกเวลากลางวันจะเข้ามาสะสมในตัวอาคารและก่อให้เกิดภาระการทำความเย็นในเวลากลางคืนต่อมา ดังนั้น ประสิทธิภาพการกันความร้อนของวัสดุกระจกหน้าต่างจะมีผลต่อการใช้พลังงานในอาคารที่สูงมาก ในการศึกษานี้แนวทางการประหยัดพลังงานในอาคารที่มีขนาดช่องเปิดมากจึงได้เน้นที่การเพิ่มประสิทธิภาพการป้องกันความร้อนของกระจกหน้าต่าง ซึ่งการปรับลดค่า SC หรือ SHGC จะช่วยให้เกิดการประหยัดพลังงานอย่างเห็นได้ชัด สำหรับอาคารที่มีขนาดช่องเปิดน้อย (WWR 20) จะพบว่ามีการใช้พลังงานน้อย และไม่แตกต่างจากอาคาร WWR 30

สำหรับทาวน์เฮ้าส์ที่มีขนาดช่องเปิดหน้าต่างปานกลาง (WWR 30) พบว่าการใช้ฉนวนผนังอาคารยังมีความสำคัญอยู่พอสมควร มีความเป็นไปได้ที่จะใช้ผนังที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าผนังทั่วไป แล้วยังเห็นผลการลดการใช้พลังงาน แต่อย่างไรก็ดี เพื่อให้ลดการใช้พลังงานลงได้ประมาณ 10% ยังคงต้องประกอบด้วยการใช้กระจกประสิทธิภาพสูง สำหรับทาวน์เฮ้าส์ที่มีขนาดช่องเปิดหน้าต่างมากขึ้น (WWR 40-80) ซึ่งเป็นกรณีที่พบได้น้อยมาก พบว่า ความสำคัญของฉนวนผนังมีน้อยลงมาก เมื่อเทียบกับความสำคัญของประสิทธิภาพการกันความร้อนของกระจก ดังนั้น แนวทางในการลดการใช้พลังงานในกรณีนี้ คือ การใช้ผนังก่ออิฐชั้นเดียวแบบเดิม แต่เพิ่มประสิทธิภาพของกระจกให้เป็นกระจกที่มี SC ไม่ต่ำกว่า 0.29 หรือ SHGC ไม่ต่ำกว่า 0.25

ทางด้านการคำนวณความคุ้มค่าทางการลงทุน พบว่า สำหรับอาคารประเภททาวน์เฮ้าส์ การลงทุนเพื่อการประหยัดพลังงานลง 10% และให้มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์นั้นมีความเป็นไปได้สูง ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าระยะเวลาคืนทุนจะน้อยกว่า 10 ปี และค่าใช้จ่ายอายุการใช้งานตลอด 20 ปี มีค่าต่ำกว่า base case อย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากอาคารทาวน์เฮ้าส์ 2 ชั้นเป็นอาคารที่มีสัดส่วนของพื้นที่เปลือก

อาคารต่อพื้นที่ใช้สอยน้อย และนอกจากนี้ เปลือกอาคารส่วนที่เป็นกระจกจะค่อนข้างน้อย รวมทั้งไม่ได้รับแดดทุกทิศทางเหมือนบ้านเดี่ยว 2 ชั้น การปรับปรุงเปลือกอาคารให้มีผลการประหยัดพลังงานจึงสามารถทำได้ไม่ยากนัก

สำหรับการนำผลที่ได้ไปใช้เพื่อเป็นเกณฑ์บังคับต่อไปนั้น จำเป็นต้องแปรชนิดวัสดุให้เป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ค่า Shading Coefficient (SC) และค่า Solar Heat Gain Coefficient (SHGC) ที่เทียบเท่าตามตารางที่ 12 ไปเป็นค่าตัวเลขที่แสดงในตารางที่ 13 โดยได้คำนวณเปรียบเทียบค่า OTTV และ RTTV ตามพระราชบัญญัติการอนุรักษ์พลังงานในอาคาร พ.ศ. 2535 ซึ่งจะได้ค่า OTTV อยู่ระหว่าง 29.5–63.2 วัตต์/ตร.ม. นอกจากนี้จะเห็นว่า อาคารพักอาศัยขนาดเล็กที่มีการใช้พลังงานส่วนใหญ่ในเวลากลางคืน การบังคับใช้ค่า OTTV ตามกฎหมายอาคารขนาดใหญ่ที่ 45 วัตต์/ตร.ม. จะไม่เหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์การลงทุนสำหรับการก่อสร้างอาคารขนาดเล็กที่มีสัดส่วนของพื้นที่เปลือกอาคารต่อพื้นที่ใช้งานมาก ดังเช่นทาวน์เฮ้าส์ 2 ชั้นที่ได้ทำการศึกษานี้

นอกจากนี้ ถึงแม้ว่าผลการวิเคราะห์ค่าการประหยัดพลังงาน และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จะออกมาว่าทางเลือกที่ 2 ซึ่งใช้ผนังก่ออิฐมวลเบาและกระจก SC = 0.23 เป็นทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับอาคารที่มี WWR = 30% แต่ในการนำมาใช้เป็นเกณฑ์บังคับขั้นต่ำตามกฎหมาย คณะผู้วิจัยจำเป็นต้องเลือกเปลือกอาคารที่มีประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานอย่างน้อยที่สุดเท่าที่จะทำให้เกิดการลดใช้พลังงานลง 10% ดังนั้น ทางเลือกเปลือกอาคารในตารางที่ 12 จึงอาจจะไม่ใช่ทางเลือกที่ดีที่สุด ทั้งในแง่พลังงานและความคุ้มค่าตลอดอายุการใช้งาน แต่จะเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้เป็นเกณฑ์ขั้นต่ำเพื่อบังคับใช้ เพราะสามารถช่วยลดการใช้พลังงานลงจนต่ำกว่าเป้าหมายที่ 70.61 กิโลวัตต์ ช.ม./ตร.ม. โดยมีค่าลงทุนเริ่มต้นที่ต่ำที่สุด

ตารางที่ 14 แสดงเกณฑ์ขั้นต่ำของค่าการถ่ายเทความร้อนของวัสดุเปลือกอาคารสำหรับทาวน์เฮ้าส์ที่จะนำไปใช้เป็นกฎหมายควบคุมอาคารต่อไป โดยผู้ออกแบบอาคารจะต้องประเมินว่าอาคารที่กำลังออกแบบอยู่นั้นมีค่า WWR เท่าไหร่ แล้วจึงเลือกเปลือกอาคารที่มีคุณสมบัติการกันความร้อนตามค่าที่ระบุในตาราง ซึ่งจะมีชุดทางเลือกให้เลือกได้ 2 ชุด หากอาคารที่กำลังออกแบบอยู่นั้นมีสัดส่วนพื้นที่กระจกมาก ค่าการถ่ายเทความร้อนก็จะต้องน้อยลงตามสัดส่วนในตาราง ด้วยวิธีที่เสนอนี้ ผู้ออกแบบอาคารจะสามารถนำไปใช้ได้ทันทีโดยไม่ต้องทำการคำนวณค่า OTTV หรือทำการจำลองการใช้พลังงาน โดยไม่ว่าจะออกแบบอาคารให้มีสัดส่วนช่องเปิดเท่าใดก็ตาม การใช้พลังงานที่จะเกิดขึ้นจากทุกชุดทางเลือกจะมีปริมาณใกล้เคียงกัน ซึ่งจะมีค่าประมาณเท่ากับค่าการใช้พลังงานของ baseline ที่มีการปรับลดลงแล้ว 10% อาคารที่มีการออกแบบโดยใช้วัสดุตามตารางดังกล่าวนี้จะช่วยให้เกิดการประหยัดพลังงานลงได้

ตารางที่ 12 เกณฑ์ขั้นต่ำของการใช้วัสดุเปลือกอาคารเพื่อการประหยัดพลังงานในทาวน์เฮ้าส์ 2 ชั้น

WWR	แนวทางการใช้เปลือกอาคารที่ช่วยประหยัดพลังงานลง 10%
WWR 20–WWR 30	1. ผนังก่ออิฐมวลเบา + กระจกตัดแสงสีเขียว 1 ชั้น
	2. ผนังก่ออิฐ 2 ชั้นมี airgap 5 cm + กระจก reflective M 1 ชั้น
WWR 40–WWR 80	1. ผนังก่ออิฐชั้นเดียว + กระจก reflective L 1 ชั้น
	2. ผนังก่ออิฐชั้นเดียว + bubble aluminum foil + กระจก reflective M 1 ชั้น

ตารางที่ 13 ค่าการถ่ายเทความร้อนในทาวน์เฮ้าส์ 2 ชั้น เพื่อการประหยัดพลังงาน 10%

WWR	ทางเลือก	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน U (W/m^2-K)				กระจก	กระจก	OTTV	RTTV
		หลังคา	ฝ้าเพดาน	ผนัง	กระจก	SC	SHGC	เทียบเท่า	เทียบเท่า
WWR 20–WWR 30	1	4.074	2.480	1.226	5.410	0.71	0.61	36.4–50.3	43.2
	2	4.074	2.480	1.725	5.110	0.29	0.25	29.5–35.2	43.2
WWR 40–WWR 80	1	4.074	2.480	3.320	4.900	0.23	0.19	46.1–55.2	43.2
	2	1.629	2.480	3.320	5.110	0.29	0.25	49.8–63.2	6.1

ตารางที่ 14 เกณฑ์ขั้นต่ำของค่าการถ่ายเทความร้อนในทาวน์เฮ้าส์ 2 ชั้น เพื่อนำไปใช้เป็นกฎหมาย

WWR	ชุดทางเลือก	R-value (m^2/K-W)	U-value (W/m^2-K)		SC	SHGC
		หลังคา และ ฝ้าเพดาน	ผนังทึบด้านนอก	ช่องโปร่งแสง	ช่องโปร่งแสง	ช่องโปร่งแสง
ไม่เกิน 20%	1	มากกว่า 1.3	ไม่เกิน 1.226	ไม่เกิน 5.41	ไม่เกิน 0.71	ไม่เกิน 0.61
	2	มากกว่า 1.3	ไม่เกิน 1.725	ไม่เกิน 5.11	ไม่เกิน 0.29	ไม่เกิน 0.25
ไม่เกิน 30%	1	มากกว่า 1.3	ไม่เกิน 1.226	ไม่เกิน 5.41	ไม่เกิน 0.71	ไม่เกิน 0.61
	2	มากกว่า 1.3	ไม่เกิน 1.725	ไม่เกิน 5.11	ไม่เกิน 0.29	ไม่เกิน 0.25
ไม่เกิน 40%	1	มากกว่า 1.3	ไม่เกิน 3.320	ไม่เกิน 4.90	ไม่เกิน 0.23	ไม่เกิน 0.19
	2	มากกว่า 1.3	ไม่เกิน 3.320	ไม่เกิน 5.11	ไม่เกิน 0.29	ไม่เกิน 0.25
ไม่เกิน 50%	1	มากกว่า 1.3	ไม่เกิน 3.320	ไม่เกิน 4.90	ไม่เกิน 0.23	ไม่เกิน 0.19
	2	มากกว่า 1.3	ไม่เกิน 3.320	ไม่เกิน 5.11	ไม่เกิน 0.29	ไม่เกิน 0.25
ไม่เกิน 60%	1	มากกว่า 1.3	ไม่เกิน 3.320	ไม่เกิน 4.90	ไม่เกิน 0.23	ไม่เกิน 0.19
	2	มากกว่า 1.3	ไม่เกิน 3.320	ไม่เกิน 5.11	ไม่เกิน 0.29	ไม่เกิน 0.25
ไม่เกิน 70%	1	มากกว่า 1.3	ไม่เกิน 3.320	ไม่เกิน 4.90	ไม่เกิน 0.23	ไม่เกิน 0.19
	2	มากกว่า 1.3	ไม่เกิน 3.320	ไม่เกิน 5.11	ไม่เกิน 0.29	ไม่เกิน 0.25
ไม่เกิน 80%	1	มากกว่า 1.3	ไม่เกิน 3.320	ไม่เกิน 4.90	ไม่เกิน 0.23	ไม่เกิน 0.19
	2	มากกว่า 1.3	ไม่เกิน 3.320	ไม่เกิน 5.11	ไม่เกิน 0.29	ไม่เกิน 0.25

9. สรุปผล

การวิจัยเพื่อกำหนดเกณฑ์ขั้นต่ำของการออกแบบและเลือกใช้วัสดุเปลือกอาคารบ้านพักอาศัยแบบทาวน์เฮ้าส์ 2 ชั้น เพื่อการประหยัดพลังงานลง 10% และยังคงมีความคุ้มค่าทางการลงทุนนี้ ได้ทำการสำรวจรูปแบบอาคารในท้องตลาดเพื่อนำมาสร้างอาคารอ้างอิงสำหรับการจำลองการใช้พลังงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ DOE-2.1E ค่าเฉลี่ยการใช้พลังงานที่ได้ ได้นำมาใช้เป็นฐานการใช้ เพื่อหาแนวทางปรับลดการใช้พลังงาน โดยเน้นที่การลดภาระการปรับอากาศด้วยการเลือกใช้วัสดุเปลือกอาคารที่มีประสิทธิภาพการป้องกันความร้อนสูงขึ้น ควบคู่กับการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการประหยัดพลังงานในทาวน์เฮ้าส์ตั้งแต่การออกแบบอาคารมีความเป็นไปได้ ถึงแม้ว่าความคุ้มค่าทางการลงทุนในปัจจุบัน ยังมีไม่มากนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การออกแบบทาวน์เฮ้าส์ในภูมิอากาศร้อนชื้นแบบกรุงเทพฯ โดยมีพื้นที่ช่องเปิดกระจกมาก ๆ แต่ไม่มีการบังแดดเพียงพอ ยิ่งจะไม่มีความคุ้มค่าทางการลงทุนใด ๆ เพื่อให้อาคารประหยัดพลังงาน อย่างไรก็ดี ในอนาคตอันใกล้นี้ ราคาพลังงานมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ประกอบกับปัญหาสิ่งแวดล้อมที่ตามมาจากการใช้พลังงานที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้ค่าลงทุนก่อสร้างอาคารในระยะเริ่มแรก มิใช่ปัจจัยหลักที่สำคัญที่สุดในการพิจารณาแนวทางการออกแบบอาคารพักอาศัยอีกต่อไป ทั้งนี้ เพราะค่าใช้จ่ายด้านพลังงานหลังจากอาคารเปิดใช้งานจะมีมูลค่ามหาศาล ที่ผู้ซื้อบ้านต้องรับผิดชอบตลอดช่วงชีวิตของบ้าน ซึ่งหากมีการกำหนดประสิทธิภาพการใช้พลังงานของบ้านให้ผู้ประกอบการอสังหาริมทรัพย์ปฏิบัติตามในแง่ของกฎหมายควบคุมอาคาร ประชาชนผู้ซื้อบ้านจะมั่นใจมากขึ้นว่าบ้านที่กำลังจะซื้อนั้นจะไม่เป็นภาระค่าใช้จ่ายในอนาคต

10. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงการจำลอง (simulation research) ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดเกณฑ์การเลือกใช้วัสดุเปลือกอาคารที่จะช่วยให้อาคารสามารถประหยัดพลังงานลงได้ประมาณ 10% ซึ่งจะมองในภาพรวมเพื่อการสร้างดัชนีการใช้พลังงานรายปี (energy utilization index) งานวิจัยนี้จึงไม่ได้ทำการศึกษาลงในรายละเอียดทางด้านคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุที่จะส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน การสะสมความร้อน และภาระการทำความเย็นของอาคาร ซึ่งหากเป็นเช่นนั้น จะต้องทำการปรับเทียบผลการจำลองกับการวัดจริงด้วยกล่องทดลองที่อยู่ในสภาพแวดล้อมจริง (calibration) โดยใช้วิธีทางสถิติเพื่อวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวน แต่ในการวิจัยนี้ได้ใช้อาคารสมมติจำลองด้วยสภาพอากาศจำลองที่เป็นตัวแทนของอากาศกรุงเทพ ฯ ภายใต้สภาวะแวดล้อมจำลองที่ไม่มีอยู่จริง เพื่อที่จะสามารถ

ตัดตัวแปรที่ไม่ต้องการศึกษาออกไป พร้อมกับควบคุมตัวแปรที่ต้องการควบคุมให้ได้อย่างเต็มที่ การปรับเทียบค่าความถูกต้องกับอาคารจริงในงานวิจัยนี้จึงทำได้ในระดับหนึ่ง ซึ่งไม่สามารถบ่งแสดงได้ว่าทำการปรับเทียบกับอาคารใดอย่างเฉพาะเจาะจง ในขั้นตอนการดำเนินการนี้ คณะผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบการใช้พลังงานที่ได้จากการจำลองนี้กับค่าเฉลี่ยการใช้พลังงานจากบิลล์ค่าไฟฟ้าในอาคารทั่วไปที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับอาคารอ้างอิงนี้ สำหรับข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต คณะผู้วิจัยเห็นว่ามีความจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาต่อยอดจากผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ว่าเกณฑ์ที่เสนอมาในตารางที่ 14 จะสามารถนำไปปฏิบัติได้จริงโดยมีผลกระทบใด ๆ ตามมาหรือไม่อย่างไร รวมทั้งขอบเขตและข้อจำกัดของการนำไปใช้จริง

11. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน โดยความร่วมมือจากสถาบันวิจัยพลังงาน และคณะสถาปัตย-กรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีผู้จัดการโครงการคือ รองศาสตราจารย์ ธนิต จินดาวณิค และคณะผู้ช่วยวิจัย ได้แก่ คุณภัทรยุส จุลสุคนธ์ คุณนายะรัตน์ ชินธรรมมิตร คุณดลยา ศิริปรุ และคุณชัยวัฒน์ มุตติศานต์

รายการอ้างอิง (References)

[1] กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน. (2535). พระราชบัญญัติการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2535. กรุงเทพฯ: กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม.

[2] LBNL. (1994). The DOE-2.1E supplement. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory.

[3] LBNL. (2001). The DOE-2.1E documentation update package #4. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory.

[4] อรรจน์ เศรษฐบุตร. (2546). ขั้นตอนการบริหารจัดการพลังงานในอาคาร. วารสารวิชาการ "สถาปัตยกรรม", 2(2546), 60-79. คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[5] Haberl, J., Bou-Saada, T., Soebarto, V., & Reddy, A. (1998). Use of calibrated simulation for the evaluation of residential energy conservation options of two habitat for humanity houses in Houston, Texas. Proceedings of the Eleventh Symposium on Improving Building Systems in Hot and Humid, Forth Worth, Texas, 359-369.

[6] Haberl, J., Sreshthaputra, A., Claridge, D., & Turner, D. (2002). Baseline report for the 87000 block complex at Ft. Hood, Texas. A research project for the U.S. Army C.E.R.L. and the Ft. Hood Energy Office (Technical Report). Energy Systems Laboratory, Texas A&M University.

[7] อธิคม วิมลวัตรเวที ธนิต จินดาวณิค และอรรจน์ เศรษฐบุตร. (2549). แนวทางการออกแบบปรับปรุงบ้านเอื้ออาทร เพื่อสภาวะน่าสบายและการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ. วารสารวิจัยพลังงาน, 3(2549), 51-88. สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[8] อมรรัตน์ พงศ์พิศิษฎ์สกุล ธนิต จินดาวณิค และอรรจน์ เศรษฐบุตร. (2549). การออกแบบบ้านพักอาศัย เพื่อการประหยัดพลังงานด้วยแนวคิดสถาปัตยกรรมยั่งยืน. วารสารวิจัยพลังงาน. 3(2549), 1-30. สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[9] Sreshthaputra, A. (2003). Building design and operation for improving thermal comfort in naturally ventilated buildings in a hot-humid climate. Ph.D. Dissertation, Texas A&M University, College Station, Texas.

[10] Sreshthaputra, A., Haberl, J., & Andrews, M. J. (2004). Improving building design and operation of a Thai Buddhist temple using transient coupled DOE-2/CFD simulations. Energy and Buildings Journal, 36(6), 481-494.

[11] สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ เขมชาติ มังกรศักดิ์สิทธิ์ และสุรสิทธิ์ ทองจินทรัพย์ (2542). รายงานวิจัยเรื่องข้อมูลภูมิอากาศมาตรฐานสำหรับใช้กับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการทำนายการใช้พลังงานของอาคาร. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.