

การศึกษาแบบจำลองค่าพลังงานไฟฟ้าการปรับอากาศและระยะเวลาการคืนทุน ของการใช้ฉนวนกันความร้อนในกรอบอาคารพักอาศัยประเภทบ้านเดี่ยว Simulation Study of Air-Conditioning Energy Consumption and Payback Period of Using Thermal Insulation in the Detached Houses

สุดาภรณ์ สุดประเสริฐ¹

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลจากการใช้ฉนวนกับบ้านพักอาศัยในด้านการลดพลังงานไฟฟ้าในการปรับอากาศและด้านความคุ้มค่าสำหรับบ้านเดี่ยว วิธีการศึกษาได้แก่การสร้างแบบจำลองทางพลังงานของบ้านเดี่ยวกรณีฐานในโปรแกรมจำลองทางพลังงาน eQuest 3.65 ซึ่งจะคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าของบ้านกรณีฐานได้โดยใช้ข้อมูลสภาพอากาศของกรุงเทพมหานคร ค.ศ.1998-2002 ซึ่งสร้างขึ้นในรูปแบบไฟล์ Typical Meteorological Year (TMY) บ้านเดี่ยวกรณีฐานมีข้อมูลของปัจจัยต่าง ๆ ของบ้านที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าในการปรับอากาศ งานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองบ้านกรณีฐานขึ้นมาแล้วนำผลการจำลองทางพลังงานมาเปรียบเทียบกับการใช้ไฟฟ้าที่เก็บข้อมูลได้จากบ้านจริง ซึ่งได้พบว่าพลังงานไฟฟ้าในการปรับอากาศของบ้านกรณีฐานและบ้านจริงมีความแตกต่างเฉลี่ย 12 เดือนเท่ากับ 10.2% ดังนั้นแบบจำลองบ้านกรณีฐานสามารถเป็นตัวแทนการใช้พลังงานในการปรับอากาศของบ้านทั่วไปได้ จากนั้นได้ป้อนข้อมูลการติดตั้งฉนวนหนา 75 และ 150 มม. ที่ผนังและ/หรือเพดานในแบบจำลองบ้านกรณีฐานซึ่งหันไปทางทิศเหนือ ได้ตะวันออกและตะวันตก แล้วคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าในการปรับอากาศจากการใช้ฉนวนดังกล่าว ผลการศึกษาพบว่า การติดตั้งฉนวนสามารถลดพลังงานไฟฟ้าในการปรับอากาศลงได้ 19.08-38.8% เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีติดตั้งฉนวน บ้านที่หันไปทางทิศใต้และมีการติดตั้งฉนวนที่ฝ้าเพดานมีการลดลงของพลังงานในการปรับอากาศมากที่สุดโดยสามารถคืนทุนได้เร็วที่สุด 0.9 ปีเมื่อติดตั้งกับฝ้าเพดานเดิมโดยไม่ต้องลงทุนโครงสร้างเพิ่มเติม การติดตั้งที่ผนังอย่างเดียวสามารถคืนทุนได้เร็วที่สุดคือ 5 ปีโดยติดตั้งฉนวนหนา 75 มม. กับผนังภายนอกของบ้านที่หันไปทางทิศใต้

คำสำคัญ: แบบจำลองทางพลังงานของอาคาร การทำความเย็น การต้านทานความร้อน ค่าพลังงานไฟฟ้า
ระยะเวลาคืนทุน

Abstract

The purpose of this research is to evaluate the effect of insulation on electric energy consumption in air conditioning and the cost-effectiveness of using insulation in the detached houses. A model of Base Case house was simulated in eQuest 3.65, a building energy simulation program, to calculate the baseline energy under the Bangkok meteorological data year 1998-2002 generated in Typical Meteorological Year (TMY) format. The Base Case was a single-detached house contained information on various factors affecting the use of electrical energy in air conditioning. This research constructed and simulated the Base Case model and compared the simulated results with the electric consumption collected from a real house. It was found that the electric consumption in the Base Case averagely differences from the real house by 10.2 %. Therefore, the Base Case model can represent the energy consumption of the house. Then, the fiberglass insulation of 75 and 150 mm thickness were input into the Base Case model facing North, South, East and West. The results showed that insulation can reduce electrical energy in air conditioning by 19.08-38.8% compared to the non-insulated Base Case. The south

¹ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

facing house with insulated ceiling showed highest electric energy reduction. The 75 mm insulation installed over the original ceiling without additional frame investment gave the fastest payback of 0.9 years. Wall insulation needed frames and finishing boards can pay off at 5 years by installing insulation with a 75 mm thickness on the exterior wall of the house facing south.

Keywords: Building Energy Simulation, Cooling Load, Heat Resistance, Energy Consumption, Payback Period

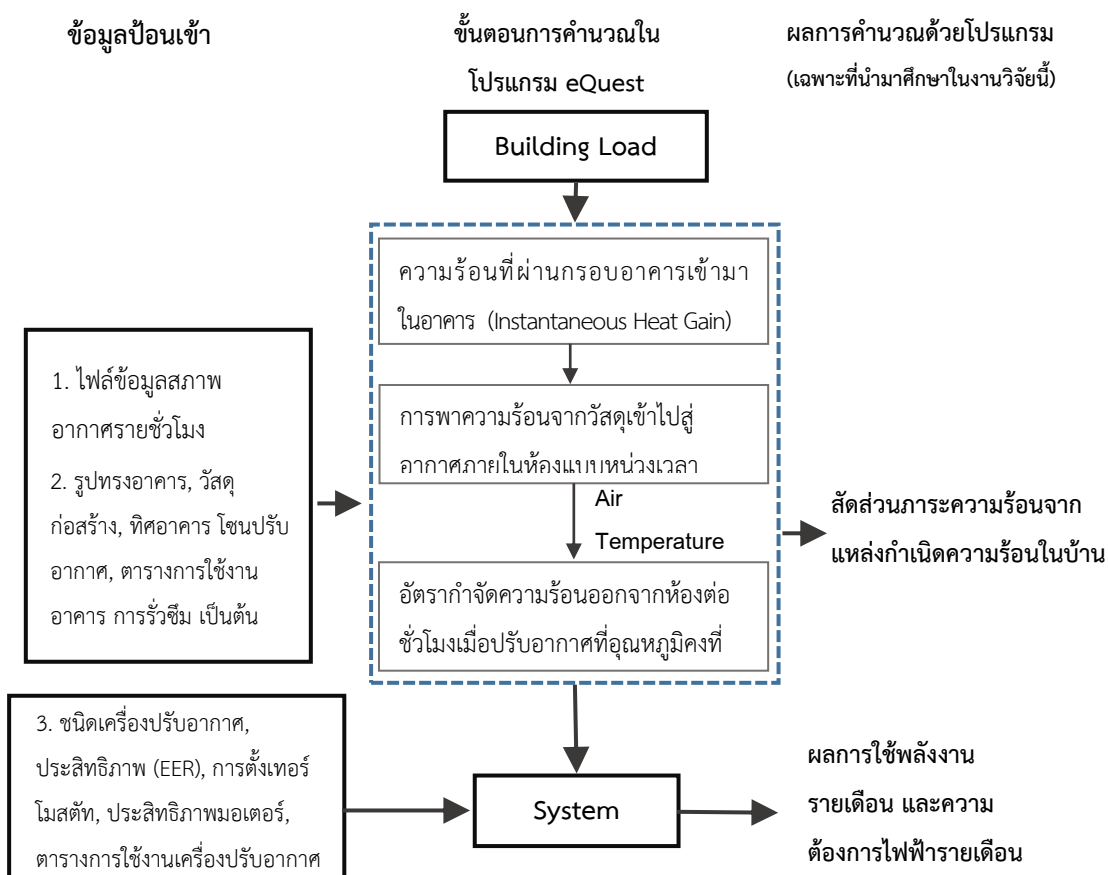
1. บทนำ

อาคารที่อยู่อาศัยใช้พลังงานคิดเป็นร้อยละ 24 ของการใช้พลังงานในพ.ศ. 2560 โดยเพิ่มขึ้นร้อยละ 22 จาก พ.ศ. 2554 (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2561) เพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการนำเข้าพลังงาน รัฐบาลได้กำหนดนโยบายการประหยัดพลังงาน 1,166 ktoe ในอาคารสร้างใหม่ระหว่างพ.ศ. 2553-2573 และลดการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายลงร้อยละ 20 ในพ.ศ. 2573 (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2558) โดยที่มีการพบว่าระบบปรับอากาศมีส่วนแบ่งการใช้พลังงานไฟฟ้าคิดเป็นร้อยละ 47-60 ของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในอาคาร การลดภาระการทำความเย็นจึงมีส่วนสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไฟฟ้าของอาคารรวมทั้งช่วยประหยัดพลังงานของชาติด้วย งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการใช้ฉนวนต่อการลดภาระการทำความเย็นของอาคารพักอาศัยซึ่งเป็นอาคารที่มีเจ้าของคือผู้พักอาศัยสามารถปรับปรุงเพิ่มฉนวนกันความร้อนที่ผนังและ/หรือที่ฝ้าเพดานของบ้านพักอาศัยของตนเองได้ ในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาอาคารพักอาศัยประเภทบ้านเดี่ยว จากการศึกษางานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าภาระการจำลองทางพลังงานของอาคารมีการวิจัยโดยใช้โปรแกรมจำลองที่ใช้อย่างแพร่หลายทั่วโลกเช่น โปรแกรม DOE2 โปรแกรม EnergyPlus และโปรแกรม eQuest เป็นต้น การศึกษาก่อนหน้า (Jareemit and Inprom, 2015) พบว่าตัวแปรที่มีการศึกษามากที่สุดในการจำลองพลังงานของอาคารได้แก่รอบอาคาร ตารางการใช้งานอาคาร และ อุปกรณ์บังคับตามลำดับ โดยที่ตัวแปรที่มีผลมากที่สุดต่อการลดการใช้พลังงานของอาคารได้แก่การปรับตั้งอุณหภูมิของเครื่องปรับอากาศ การประดิษฐ์คิดค้นวัสดุต้านทานความร้อนแบบใหม่ ๆ ในประเทศนั้นพบได้มากในการศึกษางานวิจัยก่อนหน้านี้ เช่น การวิจัยฉนวนจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ชานอ้อย (พันธุ์ดา พุฒิไพโรจน์, 2554) $0.055 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ช้างข้าวโพด (อนุภา สกกุลพาณิชย์, 2559) $0.66 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ แกนข้าวและเปลือกสับปะรด (กนกอร หันเจริญ และ สุรารัตน์ โชติทิพย์, 2556) $0.0320\text{-}0.0713 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ฉนวนความร้อนจากวัสดุทางการเกษตรสามารถใช้สารหน่วงไฟในการป้องกันการลามไฟได้ (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2560) โดยที่ฉนวนใยแก้วซึ่งมีขายอยู่ในท้องตลาดนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน $0.032 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ นอกจากนี้ยังมีการใช้วัสดุโครงสร้างที่มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนปานกลางสองชั้นดังเช่นคอนกรีตมวลเบาสองชั้นเพื่อลดการถ่ายเทความร้อนและป้องกันเสียงด้วย (อุมาพร จันธิมา และคณะ, 2560) การใช้ฉนวนนั้นไม่เพียงแต่ช่วยลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคารซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพทางพลังงานโดยตรงเท่านั้น แต่การใช้ฉนวนกันความร้อนกับอาคารยังเป็นการช่วยให้อาคารเข้ากับเกณฑ์มาตรฐานทางพลังงาน เช่น LEED TREES ได้มากขึ้น นอกจากนี้การใช้ฉนวนยังส่งเสริมการประดิษฐ์คิดค้นผลิตภัณฑ์ฉนวนใหม่ ๆ การซื้อฉนวนที่มีอยู่ในท้องตลาดมาใช้งานก็เป็นการส่งเสริมการค้าและอุตสาหกรรมในประเทศ อายุการใช้งานของฉนวนใยแก้วหุ้มด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ยาวนานถึง 10 ปี แต่อาจจะมีการเสื่อมสภาพระหว่างการใช้งาน เช่น เกิดการยุบตัวและมีความหนาแน่นลดลงเนื่องจากความร้อนและความชื้นในอากาศ จากการสำรวจราคาฉนวนใยแก้วหนา 3-6 นิ้วในปัจจุบันพบว่ามีราคาประมาณตารางเมตรละ 188-270 บาท ซึ่งอาจจูงใจผู้ซื้อได้หากฉนวนสามารถลดพลังงานได้มากจนมีความคุ้มค่าในเวลานั้นไม่เกิน 5 ปี ในงานวิจัยนี้จะคำนวณหาจำนวนปีที่คืนทุนด้วยสูตรคำนวณอย่างง่ายคือ ค่าลงทุนติดตั้งฉนวน (บาท) / ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ (บาท/ปี) ในแต่ละกรณีศึกษาของบ้านพักอาศัย ซึ่งงานวิจัยนี้พบว่ามีการศึกษาการติดตั้งฉนวนที่สามารถคืนทุนได้ภายในเวลา 5 ปีดังจะได้แสดงไว้ในผลการศึกษาต่อไป

2. วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือประเมินผลการประหยัดพลังงานไฟฟ้าในการปรับอากาศและความคุ้มค่าจากการติดตั้งฉนวนกันความร้อน โดยใช้แบบจำลองการใช้พลังงานของอาคารบ้านเดี่ยวสร้างในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ eQuest version 3.65 ขั้นตอนการวิจัยเริ่มจากการศึกษารูปแบบของบ้านพักอาศัยประเภทบ้านเดี่ยวเพื่อนำมาเป็นกรณีฐานของการจำลองทางพลังงานซึ่งได้แก่ พื้นที่อาคาร จำนวนชั้น การจัดวางห้องภายในอาคาร วัสดุก่อสร้างหลักของผนังภายในและผนังภายนอก วัสดุผนังหลังคา การใช้งานเครื่องปรับอากาศ เป็นต้น ข้อมูลของบ้านกรณีฐานนำมาจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ได้มีการศึกษารูปแบบบ้านเดี่ยว 526 หลังในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล (ณัฐฐาอัมพร อินทร์พรหม, 2558) ขั้นตอนที่สองได้แก่การป้อนข้อมูลอาคารเข้าสู่โปรแกรมจำลองพลังงานอาคาร eQuest 3.65 เพื่อให้โปรแกรมคำนวณค่าพลังงานที่อาคารใช้ในแต่ละเดือนและค่าพลังงานรวมต่อปี ข้อมูลสภาพอากาศสำหรับการคำนวณใช้ข้อมูลสภาพอากาศของกรุงเทพมหานคร ขั้นตอนสุดท้ายจะคำนวณระยะเวลาคืนทุนจาก ค่าลงทุนติดตั้งฉนวน (บาท) / ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ (บาท/ปี)

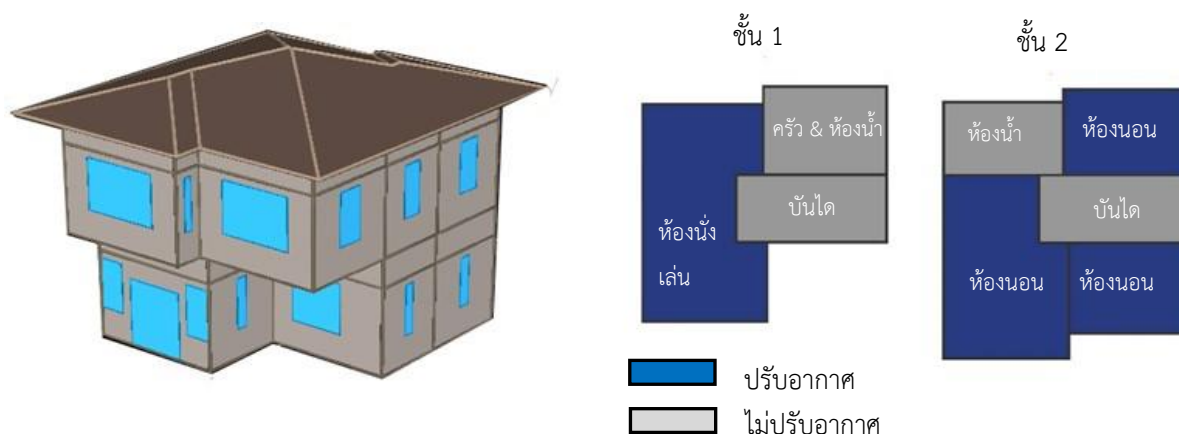
โปรแกรม eQUEST เป็นโปรแกรมจำลองพลังงานอาคารที่มาพร้อมตัวช่วยสร้างกราฟิก eQuest เป็นโปรแกรมฟรีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางสำหรับวิศวกรและนักสร้างแบบจำลองพลังงานทั่วโลก รูปที่ 1 แสดงขั้นตอนของการทำงานของโปรแกรม ข้อมูลการป้อนเข้า (Input) ถูกแบ่งออกเป็นไฟล์ข้อมูลสภาพอากาศ ภาระจากอาคาร (Building Load) ระบบการทำความร้อน-ความเย็นของอาคาร (System) และ แหล่งผลิตน้ำเย็น (Plant) ผลการคำนวณภาระจากอาคารทั้งหมดจะนำมาป้อนเข้าสู่ระบบการทำความร้อน-ความเย็นของอาคาร และจากผลจากระบบของอาคารจะถูกนำไปป้อนเข้าแหล่งกำเนิดความเย็น เช่น เครื่องทำน้ำเย็นหรือหอผึ่งน้ำเย็น ในกรณีการปรับอากาศแบบรวมศูนย์ (Central Air System) ในกรณีเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน (Split-Type) จะเว้นการคำนวณในแหล่งกำเนิดความเย็นรวมไป ผลการคำนวณสุดท้ายที่ได้จากระบบและนำพิจารณาในการศึกษาครั้งนี้ได้แก่ การสรุปการใช้พลังงานไฟฟ้ารายเดือนและความต้องการไฟฟ้าสูงสุด



รูปที่ 1 ขั้นตอนการทำงานในโปรแกรม eQuest

ที่มา : ผู้วิจัย (2561)

บ้านกรณีฐานมีรูปร่างดังแสดงไว้รูปที่ 2 ซึ่งสามารถสร้างได้ในโปรแกรม eQuest รวมทั้งการกำหนดโซนปรับอากาศและไม่ปรับอากาศไว้ด้วยแล้ว ข้อมูลสมบัติทางความร้อนการติดตั้งฉนวนใยแก้วหนา 75 mm และ 150 mm ได้แก่ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) เท่ากับ $0.0377 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ค่าการต้านทานความร้อน (R) ของฉนวนใยแก้วหนา 75 mm และหนา 150 mm เท่ากับ $1.76 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ และ $3.53 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ ตามลำดับ (บริษัท ปูนซิเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน), 2559) โดยมีกรณีศึกษาของการติดตั้งฉนวนใยแก้วที่ผนังอย่างเดียว ที่เพดานอย่างเดียว และติดตั้งทั้งผนังและเพดาน ตารางที่ 1 แสดงค่าความต้านทานความร้อนรวม (R) ของวัสดุก่อสร้างผนังและหลังคาของบ้านกรณีฐานซึ่งได้มาจากคลังข้อมูลของโปรแกรม eQuest (Hirsch & Associates, 2009) การติดตั้งฉนวนที่ผนังและฝ้าเพดานจะทำให้ค่าความต้านทานความร้อนตามตารางที่ 1 นั้นสูงขึ้นอีก $1.76\text{-}3.53 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ ตารางที่ 1 ไม่รวมค่าความต้านทานอากาศภายนอกไว้เนื่องจากโปรแกรม eQuest คำนวณค่าความต้านทานอากาศภายนอกจากข้อมูลความเร็วลม ในไฟล์ข้อมูลสภาพอากาศ (Weather File)



รูปที่ 2 แบบจำลองบ้านกรณีฐานและการแบ่งโซนปรับอากาศชั้น 1 และชั้น 2

ที่มา: ณัฐฐาอัมพร อินทร์พรหม (2558)

ตารางที่ 1 ค่าความต้านทานความร้อนรวม (R) ของวัสดุก่อสร้างผนังและหลังคาของบ้านกรณีฐาน

ผนังภายนอก	$R \text{ (m}^2\cdot\text{K/W)}$	หลังคา	$R \text{ (m}^2\cdot\text{K/W)}$
ซีเมนต์ฉาบหนา 10 mm	0.01	กระเบื้องไฟเบอร์ซีเมนต์หนา 3 mm	0.01
อิฐมวลเบาหนา 100 mm	0.14	ช่องอากาศเหนือฝ้า	0.35
ซีเมนต์ฉาบหนา 10 mm	0.01	แผ่นยิปซัมหนา 12 mm	0.08
ฟิล์มอากาศภายใน	0.12	ฟิล์มอากาศภายใน	0.11
รวม	0.28	รวม	0.56

ที่มา: Hirsch & Associates (2009)

ตารางที่ 2 แสดงข้อมูลที่ป้อนเข้าโปรแกรม eQuest ของแบบจำลองบ้านกรณีฐาน ในงานวิจัยนี้ไม่พิจารณาภาระการทำความเย็นที่เกิดจากหลอดไฟฟ้า และไม่คิดภาระทางไฟฟ้าจากอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ กรณีศึกษาบ้านจริงที่มีการติดตั้งฉนวนจะใช้ข้อมูลป้อนเข้าเดียวกันกับกรณีฐานเพียงแต่เพิ่มฉนวนเข้าไปที่ผนังและเพดาน

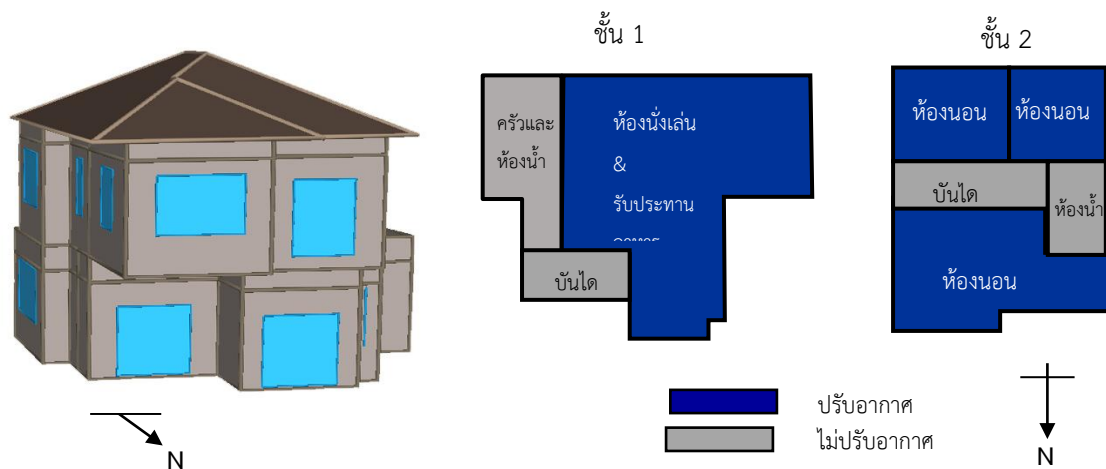
ตารางที่ 2 ข้อมูลป้อนเข้าโปรแกรม eQuest ในบ้านกรณีฐาน

ข้อมูลที่ป้อนเข้า (Input)	บ้านกรณีฐาน
พื้นที่อาคาร (m ²)	ชั้น 1: 52 m ² ชั้น 2: 69 m ²
จำนวนชั้น	2
วัสดุก่อสร้างหลักของผนังภายนอก	ผนังก่ออิฐมวลเบา 0.1m ค่า Solar Absorptivity 0.4
วัสดุก่อสร้างหลักของผนังภายใน	ผนังก่ออิฐมวลเบา 0.1m
วัสดุกระจก	กระจกใสหนา 6 mm U-value=1.11 SHGC=0.81 T _{vis} =0.88
วัสดุผนังหลังคาช่องอากาศและฝ้าเพดาน	กระเบื้องซีเมนต์ไฟเบอร์ และฝ้ายิบซัมบอร์ด
วัสดุพื้น	คอนกรีตหนา 150 mm ปูกระเบื้องเซรามิก
ร้อยละพื้นที่กระจกต่อพื้นที่ผนังในทิศเหนือ ทิศใต้	ชั้น 1 29, 33, 35, 8
ทิศตะวันตก และทิศตะวันออก (N, S, W, E)	ชั้น 2 20, 33, 7, 16
ทิศทางของอาคาร	N, S, W, E
พื้นที่ใช้งานต่อคน (m ² /person)	12
ตารางการใช้งานอาคาร	8 am-8 pm ห้องนั่งเล่น 8 pm-8 am ห้องนอน
อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของเครื่องปรับอากาศ (EER)	11.0
การตั้งค่าอุณหภูมิในห้องปรับอากาศ	25°C

ที่มา: อนุรักษ์พร อินทร์พรหม (2558)

3. การเปรียบเทียบผลการจำลองบ้านกรณีฐานกับข้อมูลพลังงานไฟฟ้าจากบ้านจริง

ผลการจำลองค่าพลังงานรวมและค่าพลังงานที่ใช้ปรับอากาศของอาคารกรณีฐานจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลการใช้ไฟฟ้ารายเดือน 12 เดือน ที่เก็บรวบรวมได้จากบ้านจริงในเขตชานเมืองในพ.ศ. 2558 ข้อมูลค่าพลังงานการใช้ไฟฟ้าของบ้านนั้นได้มาจากใบเสร็จค่าไฟฟ้าของบ้านจริงซึ่งรวมค่าพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องปรับอากาศ ไฟฟ้าแสงสว่าง และอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ ภายในบ้านแล้ว ดังนั้นจึงทำการจำลองบ้านจริงในโปรแกรม eQuest โดยป้อนข้อมูลรอบอาคาร อุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ให้ตรงตามบ้านจริง รูปร่างของบ้านจริงในงานวิจัยนี้แสดงไว้ดังรูปที่ 2 บ้านหลังนี้หันหน้าไปทางทิศเหนือมีการแบ่งโซนปรับอากาศและไม่ปรับอากาศของบ้านตาม รูปที่ 3 ข้อมูลของบ้านจริงที่ป้อนเข้าโปรแกรม eQuest แสดงไว้ในตารางที่ 3



รูปที่ 3 รูปภาพแบบจำลองบ้านจริงและการแบ่งโซนปรับอากาศชั้น 1 และชั้น 2 สร้างในโปรแกรม eQuest

ที่มา: ผู้วิจัย (2561)

ตารางที่ 3 ข้อมูลป้อนเข้าโปรแกรม eQuest ในแบบจำลองพลังงานบ้านจริง

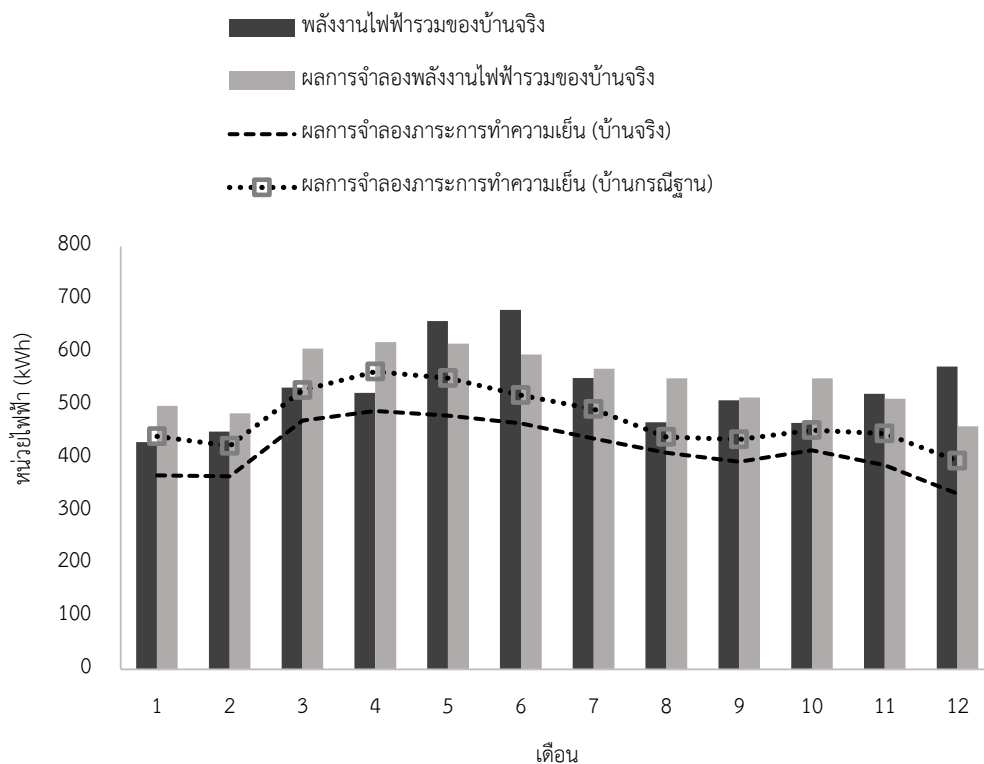
ข้อมูลป้อนเข้า (Input)	แบบจำลองบ้านจริง
พื้นที่อาคาร (m ²)	ชั้น 1: 53.7 m ² ชั้น 2: 55.68 m ²
จำนวนชั้น	2
วัสดุโครงสร้างหลักของผนังภายนอกและภายใน	ผนังก่อคอนกรีตมวลเบาหนา 0.1 m Solar Absorptivity=0.4
วัสดุกระจก	กระจกใสหนา 6 mm U-value=1.11 SHGC=0.81 T _{vis} =0.88
วัสดุผนังหลังคาช่องอากาศและฝ้าเพดาน	กระเบื้องหลังคาคอนกรีตสีเทาอ่อนและฝ้ายิปซัมบอร์ด
วัสดุพื้น	คอนกรีตหนา 150 mm ปูกระเบื้องเซรามิก
ร้อยละพื้นที่กระจกต่อพื้นที่ผนังในทิศเหนือ ทิศใต้ ทิศตะวันออก และทิศตะวันตก (N, S, W, E)	ชั้น 1 7.0, 17.0, 30.0, 5.3 ชั้น 2 24.0, 18.6, 8.0, 15.0
ทิศทางของอาคาร	N
พื้นที่ใช้งานต่อคน (m ² /person)	12
ตารางการใช้งานอาคาร	10 am-5 pm ห้องนั่งเล่นและ 8 pm-6 am ห้องนอน
ค่ากำลังไฟฟ้าแสงสว่าง (W/m ²)	2.8
ค่ากำลังไฟฟ้าเครื่องใช้ไฟฟ้าอื่น ๆ (W/m ²)	107
อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของเครื่องปรับอากาศ (EER)	11
การตั้งค่าอุณหภูมิในห้องปรับอากาศ	25°C

ที่มา: ผู้วิจัย (2561)

ค่ากำลังไฟฟ้าแสงสว่างเฉลี่ยตามตารางที่ 3 ได้มาจากการติดตั้งหลอดประหยัดไฟขนาด 11 W จำนวน 40 หลอด ทั่วบ้านเฉลี่ยกับพื้นที่บ้านและคิดการใช้งานประมาณ 70% จะได้ว่า $(11 \text{ W ต่อหลอด} \times 40 \text{ หลอด} \times 0.7)/109 \text{ m}^2 = 2.8 \text{ W/m}^2$ ค่ากำลังไฟฟ้าเครื่องใช้ไฟฟ้าตามตารางที่ 3 มาจากค่ากำลังไฟฟ้ารวมของอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้านเท่ากับ 19.44

kW มีการเปิดใช้งานเฉลี่ยทุกอุปกรณ์ประมาณ 60% จะได้ว่า ค่ากำลังไฟฟ้าเครื่องใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยต่อพื้นที่ $(19.44 \text{ kW} \times 0.6)/109 \text{ m}^2 = 107.0 \text{ W/m}^2$

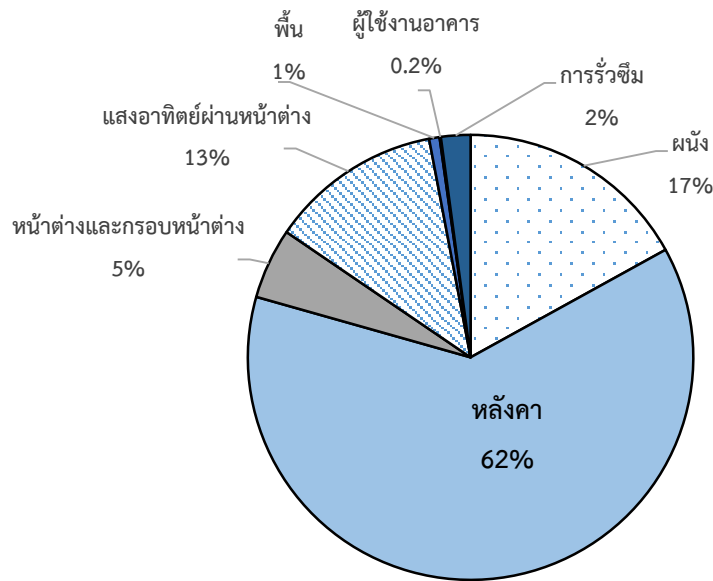
ผลการสอบเทียบค่าพลังงานไฟฟ้ารายเดือนของอาคารกรณีฐานโดยเปรียบเทียบกับค่าพลังงานไฟฟ้าของอาคารบ้านจริงตามรูปที่ 4 พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยมีความแตกต่างมากที่สุด 22.5% ในเดือนที่ 10 คือตุลาคม และมีค่าต่างกันน้อยที่สุดในเดือนที่ 7 คือเดือนกรกฎาคม คิดเป็น 1.9% ค่าเฉลี่ยความแตกต่างระหว่างค่าไฟฟ้าการจำลองบ้านจริงกับข้อมูลค่าพลังงานไฟฟ้าบ้านจริงเท่ากับ 12.5% ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าเกิดจาก บ้านกรณีฐานมีอัตราส่วนพื้นที่กระจกในทิศใต้มากกว่าบ้านจริงอยู่ถึง 50% โดยที่การวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณาผลของการบังแดดด้วยอุปกรณ์บังแดดซึ่งหากมีการติดตั้งอุปกรณ์บังแดดก็จะส่งผลให้ห้องได้รับรังสีตรงจากดวงอาทิตย์ลดลงอีกซึ่งจะส่งผลให้ค่าพลังงานไฟฟ้าในการทำ ความเย็นลดลงอีก อย่างไรก็ตามผลการจำลองพลังงานในการปรับอากาศ (Space Cooling) ของบ้านจริงเทียบกับการ จำลองกรณีฐานพบว่ามีความใกล้เคียงกันและมีการเพิ่มขึ้น-ลดลงในแต่ละเดือนไปในทิศทางเดียวกัน โดยมีความแตกต่าง ของผลการจำลองทั้งสองเฉลี่ยทุกเดือนเท่ากับ 10.2% ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ ดังนั้นบ้านกรณีฐานสามารถแสดงภาวะการ ทำ ความเย็นของบ้านและเป็นตัวแทนของบ้านทั่วไปได้ นอกจากนี้ผลการจำลองบ้านจริงได้แสดงว่าค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ใน การปรับอากาศนั้นมีค่าสูงถึง 71-78% ของค่าพลังงานไฟฟ้ารวมของบ้าน



รูปที่ 4 ผลการจำลองหน่วยพลังงานไฟฟ้าของบ้านกรณีฐานเทียบกับข้อมูลจากบ้านจริง
ที่มา: ผู้วิจัย (2561)

นอกจากนี้ผลการจำลองบ้านกรณีฐานแสดงว่าภาระการทำความเย็นสูงสุดของเครื่องปรับอากาศภายในบ้านนั้นมาจากการนำความร้อนผ่านหลังคาบ้านมากที่สุด คิดเป็น 62% รองลงมาคือ การนำความร้อนผ่านผนังบ้าน 17% ดังแสดงในรูปที่ 5 ดังนั้นการติดตั้งฉนวนที่ฝ้าเพดานของบ้านและหรือที่ผนังของบ้าน จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการ ป้องกันความร้อนและการประหยัดพลังงานในการปรับอากาศของบ้านที่อยู่อาศัย ภาระการทำความเย็นของ เครื่องปรับอากาศและช่วงเวลาที่เกิดภาระการทำความเย็นสูงสุดในแต่ละเดือนแสดงไว้ในตารางที่ 4 วันที่มีการใช้พลังงาน ในการปรับอากาศสูงสุดได้แก่วันที่ 4 เดือนเมษายน ภาระสูงสุดของทุกเดือนเกิดที่เวลา 21.00 น. ซึ่งเป็นช่วงที่เปิดการใช้ งานเครื่องปรับอากาศในห้องนอน ผลการจำลองบ้านกรณีฐานแสดงว่าการสะสมความร้อนในชั้นสองของบ้านจากการนำ

ความร้อนผ่านหลังคานั้นมีค่าสูงและส่งผลต่อความต้องการไฟฟ้าในการทำความเย็นและการป้องกันความร้อนที่ผ่านเข้ามา
สะสมในบ้านนั้นมีความจำเป็น



รูปที่ 5 ภาระการทำความเย็นจากองค์ประกอบต่าง ๆ ของอาคารกรณีฐานในวันที่มีความต้องการไฟฟ้าสูงสุด
ที่มา: ผู้วิจัย (2561)

ตารางที่ 4 ภาระการทำความเย็นของอาคารกรณีฐานรายเดือน

เดือน	พลังงานรวมที่ต้องใช้ในการทำความเย็น (kWh)	วันเวลาที่เกิดการระสูงสุด	อุณหภูมิอากาศภายนอก	ภาระการทำความเย็นสูงสุด
		วันที่ เวลา	กระเปาะแห้ง (°C) กระเปาะเปียก (°C)	kW
มค.	2244.5	18 21.00	29.4 25.6	11.7
กพ.	2218.9	15 21.00	28.9 24.4	11.3
มีค.	3190.4	20 21.00	31.1 25.0	14.1
เมย.	3440.7	4 21.00	32.8 27.2	15.0
พค.	3310.1	13 21.00	32.2 26.7	14.4
มิย.	3341.1	1 21.00	30.6 27.8	14.2
กค.	2907.1	9 21.00	30.6 26.7	13.0
สค.	2581.8	21 21.00	28.3 26.7	13.4
กย.	2615.4	17 21.00	30.0 24.4	12.2
ตค.	3065.3	21 21.00	31.7 26.1	13.0
พย.	2333.4	3 21.00	30.0 25.6	11.7
ธค.	1782.9	3 21.00	31.1 24.4	12.5

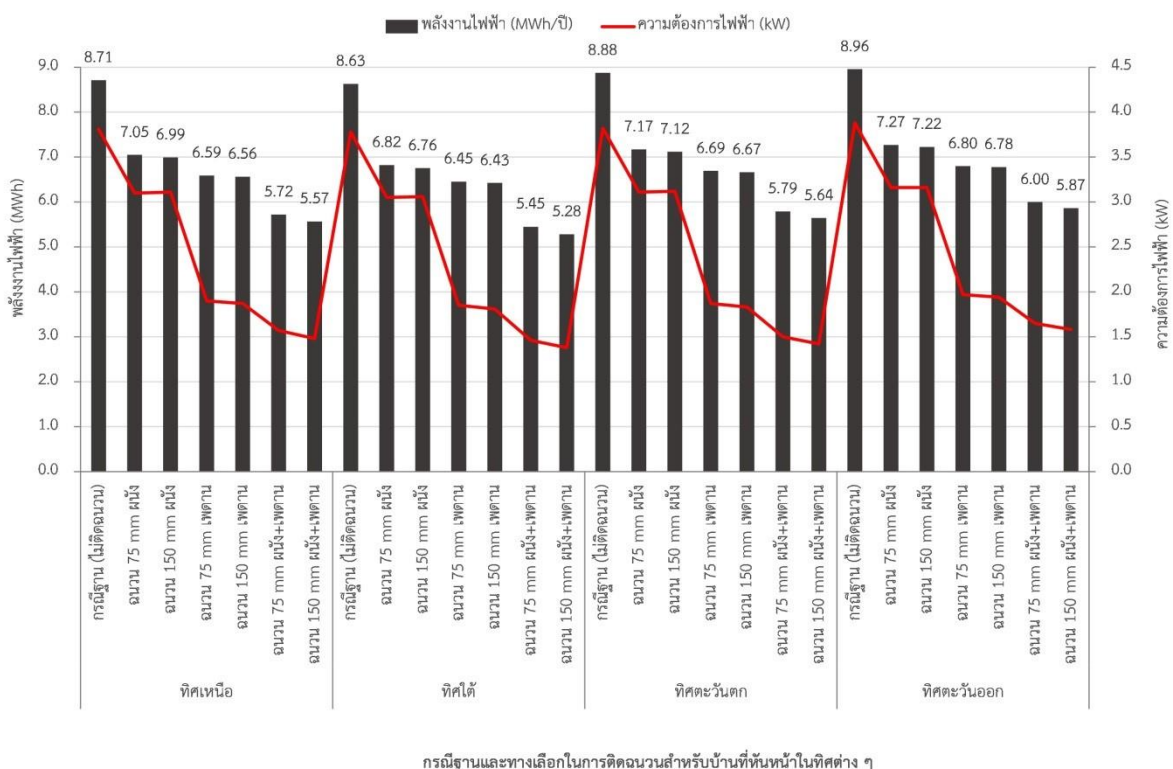
ที่มา: ผู้วิจัย (2561)

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการจำลองค่าพลังงานไฟฟ้า

รูปที่ 6 แสดงผลการจำลองค่าพลังงานไฟฟ้าต่อปี (Annual Electric Consumption) และค่าความต้องการไฟฟ้าสูงสุดของปี (Annual Electric Demand) เฉพาะส่วนที่ใช้ในการปรับอากาศของบ้านเดี่ยวกรณีฐานและบ้านเดี่ยวที่ติด

ฉนวนที่ผนัง เพดาน และที่ติดตั้งฉนวนทั้งที่ผนังและเพดาน โดยแบ่งออกตามทิศของบ้านได้แก่ ทิศเหนือ ได้ ตะวันตก ตะวันออก ตามลำดับ ผลการศึกษาแสดงว่าการติดตั้งฉนวนนั้นลดพลังงานไฟฟ้าลงได้ทุกกรณี 1.66-3.35 MWh/ปี คิดเป็น 19.08-38.8% เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ติดตั้งฉนวน การติดตั้งฉนวนที่ผนังภายนอกนั้นให้ผลประหยัดพลังงานระหว่าง 18.86-21.72% เมื่อเทียบกรณีฐานซึ่งไม่ติดตั้งฉนวน การติดตั้งฉนวนที่ฝ้าเพดานอย่างเดียวให้ผลการประหยัดค่าพลังงานไฟฟ้ามากกว่าการติดตั้งฉนวนที่ผนังภายนอกอย่างเดียว และการติดตั้งฉนวนที่ผนังและที่เพดานบ้านให้ผลมากกว่าการติดตั้งฉนวนที่เพดานอย่างเดียวประมาณ 10-11% การติดตั้งฉนวนหนา 150 mm ให้ผลการประหยัดพลังงานไฟฟ้าเพื่อการปรับอากาศมากกว่าการติดตั้งฉนวนหนา 75 mm ประมาณ 2% จึงไม่ได้ส่งผลมากนักต่อการลดค่าพลังงานไฟฟ้า บ้านที่หันไปทางทิศใต้มีการผลประหยัดพลังงานไฟฟ้าสูงที่สุด คือ 20.95-38.8% เนื่องจากบ้านกรณีฐานที่หันไปทางทิศใต้มีผนังของห้องปรับอากาศโดนแดดมากที่สุดจึงมีการใช้พลังงานไฟฟ้าและความต้องการไฟฟ้าสูงที่สุด เมื่อติดตั้งฉนวนจึงเกิดการประหยัดพลังงานลงมากที่สุด การติดตั้งฉนวนนั้นไม่เพียงแต่ลดค่าพลังงานไฟฟ้าลงเท่านั้นแต่ยังลดค่าความต้องการไฟฟ้าสูงสุดด้วยถึง 18.3-63.5% ส่งผลดีต่อการลดค่าความต้องการไฟฟ้าสูงสุดในภาพรวมของประเทศ



รูปที่ 6 ผลการจำลองค่าพลังงานการใช้ไฟฟ้าและความต้องการไฟฟ้าเมื่อติดตั้งฉนวนที่กรอบอาคาร
ที่มา: ผู้วิจัย (2561)

5.2. การวิเคราะห์ความคุ้มค่า

ความคุ้มค่าของการติดตั้งฉนวนพิจารณาจากระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) ฉนวนมีอายุการใช้งานประมาณ 10 ปี แต่อาจเสื่อมสภาพลงเนื่องจากความร้อนและความชื้น งานวิจัยนี้จึงกำหนดให้เกณฑ์ระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ 5 ปี ระยะเวลาคืนทุนคำนวณจาก

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \text{เงินลงทุนเฉพาะค่าวัสดุ (บาท)} / \text{ผลประหยัดค่าพลังงานไฟฟ้า (บาทต่อปี)}$$

ค่าวัสดุได้แก่วัสดุฉนวน วัสดุปิดผิวและโครงคร่าว โดยที่ยังไม่ได้รวมค่าแรง ราคาวัสดุแสดงไว้ในตารางที่ 6 ในการปรับปรุงติดตั้งฉนวนบ้านกรณีฐานซึ่งมีฝ้าอยู่แล้วสามารถปูฉนวนทับบนฝ้าเพดานได้ทันที โดยไม่ต้องลงทุนค่าโครงคร่าวอีก ส่วนการปรับปรุงผนังบ้านนั้นจะต้องใช้โครงโลหะและวัสดุปิดผิวซึ่งต้องลงทุนเพิ่มเติมซึ่งมีราคาคิดเป็นจำนวนเงิน 300 บาทต่อตารางเมตร (สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2556) ซึ่งจะส่งผลให้การลงทุนติดตั้งฉนวนที่ผนังมีค่าสูงขึ้นและส่งผลต่อระยะเวลาคืนทุน

ตารางที่ 6 ราคาคำนวณโยกย้าย วัสดุปิดผิวและโครงคร่าว

วัสดุ	ราคา (บาทต่อตารางเมตร)
ฉนวนใยแก้วหนา 75 mm	187.5 ¹
ฉนวนใยแก้วหนา 150 mm	270.8 ¹
แผ่นยิบซัมปิดผิวและโครงคร่าวอลูมิเนียม	300 ²

ที่มา: บริษัท ปูนซิเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) (2559)¹

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (2556)²

ผลประหยัดค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/ปี) คำนวณจาก[พลังงานไฟฟ้าของบ้านกรณีฐาน – พลังงานไฟฟ้าของบ้านที่ติดตั้งฉนวนแล้ว (kWh/ปี)] x ค่าไฟฟ้า (บาท/kWh) อัตราค่าพลังงานไฟฟ้าของบ้านที่อยู่อาศัยซึ่งใช้ไฟฟ้าเกิน 400 หน่วยต่อเดือนเท่ากับ 3.936 บาท/kWh ผลการคำนวณเงินลงทุน ค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ และระยะเวลาคืนทุนแสดงไว้ในตารางที่ 7 ตารางที่ 7 แสดงว่าการปูฉนวนบนฝ้าเพดานในโครงสร้างเดิมของบ้านที่หันไปในทิศทางใด ๆ สามารถคืนทุนได้ภายในเวลาน้อยกว่า 5 ปี โดยสามารถคืนทุนได้เร็วที่สุด 0.9 ปี เมื่อปูฉนวนหนา 75 mm ที่ฝ้าเพดานของบ้านที่หันไปทางทิศใต้ สำหรับการติดตั้งฉนวนที่ผนังบ้านซึ่งหันไปทางทิศใต้สามารถคืนทุนได้ใน 5 ปี ในกรณีอื่น ๆ นั้นระยะเวลาคืนทุนนานกว่า 5 ปี

ตารางที่ 7 ผลการคำนวณเงินลงทุน ผลประหยัดทางพลังงานไฟฟ้าและระยะเวลาคืนทุน

กรณีฐาน/กรณีศึกษา	ทิศ	พื้นที่ ฉนวน (ตร.ม.)	ราคาวัสดุ (บาท/ตร.ม.)	เงินลงทุน (บาท)	ค่าไฟฟ้า (บาท/ปี)	ประหยัด ค่าไฟฟ้า (บาท/ปี)	เวลา คืนทุน (ปี)
กรณีฐาน (Base Case)		-	-	-	34,295.63	-	-
ฉนวนหนา 75 mm ผนังภายนอก	เหนือ	182.78	487	89,105.25	27,751.08	6,544.55	13.62
ฉนวนหนา 150 mm ผนังภายนอก		182.78	570	104,336.92	27,514.91	6,780.72	15.39
ฉนวนหนา 75 mm ฝ้าเพดาน		68.00	487	12,750.00	25,937.72	8,357.91	1.53
ฉนวนหนา 150 mm ฝ้าเพดาน		68.00	570	18,416.67	25,836.95	8,458.68	2.18
ฉนวนหนา 75 mm ผนัง + ฝ้า		250.78	487	122,255.25	22,521.18	11,774.45	10.38
ฉนวนหนา 150 mm ผนัง + ฝ้า		250.78	570	143,153.58	21,915.42	12,380.22	11.56
กรณีฐาน (Base Case)		-	-	-	33,966.97	-	-
ฉนวนหนา 75 mm ผนังภายนอก	ใต้	182.78	487	89,105.25	16,197.08	17,769.89	5.00
ฉนวนหนา 150 mm ผนังภายนอก		182.78	570	104,336.92	15,744.96	18,222.01	5.73
ฉนวนหนา 75 mm ฝ้าเพดาน		68.00	487	12,750.00	19,750.52	14,216.45	0.90
ฉนวนหนา 150 mm ฝ้าเพดาน		68.00	570	18,416.67	19,741.88	14,225.09	1.29
ฉนวนหนา 75 mm ผนัง + ฝ้า		250.78	487	122,255.25	16,098.34	17,868.63	6.84
ฉนวนหนา 150 mm ผนัง + ฝ้า		250.78	570	143,153.58	15,581.75	18,385.22	7.79
กรณีฐาน (Base Case)	ตะวันออก	-	-	-	35,264.31	-	-
ฉนวนหนา 75 mm ผนังภายนอก	ออก	182.78	487	89,105.25	28,613.09	6,651.22	13.40

ฉนวนหนา 150 mm ผนังภายนอก	182.78	570	104,336.92	28,430.45	6,833.86	15.27
---------------------------	--------	-----	------------	-----------	----------	-------

ตารางที่ 7 ผลการคำนวณเงินลงทุน ผลประหยัดทางพลังงานไฟฟ้าและระยะเวลาคืนทุน (ต่อ)

กรณีฐาน/กรณีศึกษา	ทิศ	พื้นที่ ฉนวน (ตร.ม.)	ราคาวัสดุ (บาท/ตร.ม.)	เงินลงทุน (บาท)	ค่าไฟฟ้า (บาท/ปี)	ประหยัด ค่าไฟฟ้า (บาท/ปี)	เวลา คืนทุน (ปี)
ฉนวนหนา 75 mm ฝ้าเพดาน		68.00	487	12,750.00	26,767.84	8,496.47	1.50
ฉนวนหนา 150 mm ฝ้าเพดาน	ตะวันตก	68.00	570	18,416.67	26,671.41	8,592.90	2.14
ฉนวนหนา 75 mm ผนัง + ฝ้า	ตก	250.78	487	122,255.25	23,628.01	11,636.29	10.51
ฉนวนหนา 150 mm ผนัง + ฝ้า		250.78	570	143,153.58	23,085.23	12,179.08	11.75
กรณีฐาน (Base Case)		-	-	-	34,932.89	-	-
ฉนวนหนา 75 mm ผนังภายนอก		182.78	487	89,105.25	28,237.19	6,695.70	13.31
ฉนวนหนา 150 mm ผนังภายนอก		182.78	570	104,336.92	28,025.43	6,907.46	15.10
ฉนวนหนา 75 mm ฝ้าเพดาน	ตะวันตก	68.00	487	12,750.00	26,347.07	8,585.81	1.49
ฉนวนหนา 150 mm ฝ้าเพดาน	ตก	68.00	570	18,416.67	26,235.29	8,697.60	2.12
ฉนวนหนา 75 mm ผนัง + ฝ้า		250.78	487	122,255.25	22,788.05	12,144.84	10.07
ฉนวนหนา 150 mm ผนัง + ฝ้า		250.78	570	143,153.58	22,214.95	12,717.93	11.26

ที่มา: ผู้วิจัย (2561)

6. การอภิปรายผล สรุป และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการประหยัดพลังงานและระยะเวลาคืนทุนจากแบบจำลองทางพลังงานที่สร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ eQuest 3.65 แบบจำลองของบ้านกรณีฐานซึ่งเป็นตัวแทนของบ้านสองชั้นซึ่งมีการใช้งานเครื่องปรับอากาศในห้องนั่งเล่นในเวลากลางวันและห้องนอนในเวลากลางคืนนั้นแสดงว่าสัดส่วนของภาระการทำความเย็นสูงสุด (Peak Cooling Load) มาจากการนำความร้อนที่ผ่านเข้ามาทางหลังคาบ้านมากที่สุด ห้องนอนซึ่งไม่ได้รับแดดโดยตรงจากดวงอาทิตย์ในเวลากลางวันแต่ความร้อนที่มาจากหลังคานั้นสะสมสูงจนถึงเวลาที่มีใช้งานเครื่องปรับอากาศในช่วงกลางคืน ในการติดตั้งฉนวนหนา 150 mm นั้นให้ผลการประหยัดพลังงานไฟฟ้าเพื่อการปรับอากาศมากกว่าการติดตั้งฉนวนหนา 75 mm เพียง 2% จึงแนะนำให้ติดตั้งฉนวนหนา 75 mm นอกจากนี้ฉนวนที่บางกว่าทำให้สูญเสียพื้นที่ภายในอาคารน้อยกว่า ตำแหน่งในการติดตั้งที่ให้ผลประหยัดสูงและการคืนทุนเร็วที่สุดคือการติดตั้งที่ฝ้าเพดานห้องนอนชั้นสองเนื่องจากไม่ต้องลงทุนทางโครงสร้างเพิ่มเติมส่งผลให้การติดตั้งฉนวนดังกล่าวที่หลังคามีระยะเวลาคืนทุนเร็วกว่า 5 ปี บ้านที่หันไปทางทิศใต้มีผลการประหยัดพลังงานไฟฟ้าสูงที่สุด 38.8% เนื่องจากบ้านกรณีฐานที่หันไปทางทิศใต้มีผนังของห้องปรับอากาศโดนแดดมากที่สุดจึงมีการใช้พลังงานไฟฟ้าและความต้องการไฟฟ้าสูงที่สุด เมื่อติดตั้งฉนวนจึงเกิดการประหยัดพลังงานลงมากที่สุด การติดตั้งฉนวนนั้นไม่เพียงแต่ลดค่าพลังงานไฟฟ้าลงเท่านั้นแต่ยังลดค่าความต้องการไฟฟ้าสูงสุดลงด้วยถึง 18.3-63.5% แต่ยังส่งผลดีต่อการลดค่าความต้องการไฟฟ้าสูงสุดในภาพรวมของประเทศอีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ นายกฤษณ์ ศรีพนม นางสาวณิชาร กัลลเกลา นางสาวกัลยลักษณ์ มุกตรนธอนันต์และนายรณกฤต กอบกุลไชย ที่ช่วยประเมินค่าพลังงานอาคารกรณีฐานในงานวิจัยนี้มา ณ ที่นี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

- กนกอร หันเจริญ และสุรารัตน์ โชติกประคัลภ์. (2556). การศึกษาสภาพนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนที่ผลิตจากเส้นใยของแกนและขี้สับปะรด. **Proceedings of 51st Kasetsart University Annual Conference: Science, Natural Resources and Environment** (pp. 7 หน้า). กรุงเทพมหานคร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ณัฐธำมพร อินทร์พรหม. (2558). การวิเคราะห์ความไวของอิทธิพลตัวแปรองค์ประกอบกรอบอาคารที่มีผลต่อปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศในบ้านจัดสรรประเภทบ้านเดี่ยว. (วิทยานิพนธ์สถาปัตยกรรมศาสตร-มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์).
- บริษัท ปูนซิเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน). (2559). ฉนวนกันความร้อน เอสซีจี รุ่น STAY COOL. เข้าถึงได้จาก: <http://www.scgbuildingmaterials.com>.
- พันธุ์ดา พุฒิปาโรจน์. (2554). การติดตั้งแผ่นฉนวนกันความร้อนจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป. **วารสารหน้าจั่ว**. 25(2011), 389-401.
- สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. (2556). รายการประมาณราคา งานปรับปรุงพื้นที่. กรุงเทพมหานคร: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. (2560). พลังวิทย์ คิดเพื่อคนไทย ตอน ฉนวนความร้อนทนไฟจากฟางข้าวผสมกับเยื่อสา. เข้าถึงได้จาก: <http://nstdachannel.tv/20171129-palangvit>.
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. (2558). **Policy and Planning**. เข้าถึงได้จาก: <http://www.eppo.go.th>.
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. (2561). กำลังผลิต การผลิต ค่าพลังไฟฟ้าสูงสุด การใช้ การนำเข้า การส่งออก และเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า. เข้าถึงได้จาก: <http://www.eppo.go.th>.
- อนุภา สกุลพาณิชย์. (2559). การพัฒนาฉนวนกันความร้อนสู่อาคารจากขี้ข้าวโพดและน้ำยางธรรมชาติ. **วารสาร Veridian E-Journal, Silpakorn University**. 9 (1), 1688-1702.
- อุมาพร จันธิมา, สิริมาส เสงี่ยม, สันต์ จันทร์สมศักดิ์ และสุทัศน์ เยี่ยมวัฒนา. (2560). การออกแบบผนังและเปลือกอาคารเพื่อประหยัดพลังงานสำหรับอาคารอเนกประสงค์ มหาวิทยาลัยนเรศวร. **วารสาร เจ-ดี: การออกแบบสภาพแวดล้อม**. 4(2), 69-82.
- Jareemit, D. and Inprom, N. (2015). Review Article: Significant Parameters in Building Energy Simulation. **Journal of Architectural Research and Studies**. 12(1), 1-14.
- Hirsch, J.J. and Associates. (2009). **DOE 2.2 Building Energy Use and Cost Analysis Program: Volume 4 Library and Reports**. California: Lawrence Berkeley National Laboratory.