บทที่ 1
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้นำเสนอรายละเอียดเกี่ยวกับทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบด้วยงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้พลังงานของบ้านในประเทศไทย และการใช้พลังงานของบ้าน ICF ในต่างประเทศ

1. การใช้พลังงานของบ้านในประเทศไทย

1) จรัญพัฒน์ ภูวนันท์ และคณะ [1] ศึกษาการใช้พลังงานระหว่างบ้านที่ใช้ระบบโครงสร้างแบบผนังรับน้ำหนัก Structural Insulated Panel (SIP) กับบ้านที่มีลักษณะเดียวกันแต่ใช้ระบบโครงสร้างเสาคานคอนกรีต และผนังก่ออิฐ โดยการใช้โปรแกรม EnergyPlus จำลองการใช้พลังงานของบ้าน อาคารที่ศึกษากำหนดให้ตั้งอยู่ในกรุงเทพฯ จากการศึกษาพบว่า ในกรณีที่ใช้เครื่องปรับอากาศตามปกติ (เปิดเครื่องปรับอากาศช่วงกลางคืนเป็นส่วนใหญ่) บ้านที่ใช้ผนัง SIP จะช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าบ้านทั่วไปที่ใช้ผนังก่ออิฐฉาบปูน ประมาณ 7.13 % ต่อปี นอกจากนี้เมื่อปรับเปลี่ยนวัสดุของผนัง SIP ให้มีค่าความต้านทานความร้อนเพิ่มขึ้น กลับทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้าในการปรับอากาศเพิ่มสูงขึ้น ส่วนในกรณีที่ใช้เครื่องปรับอากาศตลอด 24 ชั่วโมง การประหยัดพลังงานไฟฟ้าของบ้านที่ใช้ผนัง SIP จะเพิ่มมากขึ้นเป็น 7.95 % ต่อปี และเมื่อปรับเปลี่ยนวัสดุของผนัง SIP ให้มีค่าความต้านทานความร้อนเพิ่มมากขึ้นช่วยลดค่าไฟฟ้าได้เพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลจะแตกต่างจากในกรณีที่ใช้เครื่องปรับอากาศตามปกติ แต่เนื่องจากราคาค่าก่อสร้างของบ้านที่ใช้ผนัง SIP มีราคาที่สูงกว่าบ้านทั่วไปมาก และ ค่าการประหยัดพลังงานที่ยังน้อยอยู่ จึงทำให้ระยะเวลาคืนทุนนานกว่า 30 ปี ทั้งในกรณีที่ใช้เครื่องปรับอากาศตามปกติ และกรณีที่ใช้เครื่องปรับอากาศตลอด 24 ชั่วโมง

2) ปรีชญา มหัทธนทวี และคณะ [2] ศึกษาประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานของบ้านบ้านโครงสร้างเหล็ก (Steel Framing) และบ้านโครงสร้างไม้ (Wood Framing) เมื่อเทียบกับบ้านทั่วไปที่ใช้ระบบโครงสร้างเสาคานคอนกรีต และผนังก่ออิฐ โดยการใช้โปรแกรม EnergyPlus จำลองการใช้พลังงาน อาคารที่ศึกษากำหนดให้ตั้งอยู่ในกรุงเทพฯ วิธีที่ใช้ในการจำลองคุณสมบัติของผนังโครงสร้างเหล็กและโครงสร้างไม้ในโปรแกรม EnergyPlus ใช้วิธี “Equivalent Wall” ซึ่งวิธีการดังกล่าวจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในบทที่ 9 ผลการศึกษาพบว่าในกรณีที่ใช้เครื่องปรับอากาศตามปกติ เมื่อเทียบกับบ้านทั่วไป บ้านโครงสร้างไม้สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ 9.9% ต่อปี ส่วนบ้านโครงสร้างเหล็ก 11.4% ต่อปี นอกจากนี้เมื่อปรับเปลี่ยนวัสดุผนังของบ้านโครงสร้างไม้และบ้านโครงสร้างเหล็กให้มีค่าความต้านทานความ

ร้อนสูงขึ้น กลับมีผลทำให้บ้านทั้งสองประเภทมีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในการปรับอากาศเพิ่มสูงขึ้น ส่วนกรณีที่ใช้เครื่องปรับอากาศตลอด 24 ชั่วโมง บ้านโครงสร้างไม้ประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ 5.6% ต่อปี ส่วนบ้านโครงสร้างเหล็ก 4.8% ต่อปี โดยการปรับเปลี่ยนวัสดุผนังของบ้านโครงสร้างไม้และบ้านโครงสร้างเหล็กให้มีค่าความต้านทานความร้อนสูงขึ้น ช่วยลดปริมาณการใช้ไฟฟ้า ส่วนในแง่ของความคุ้มค่าในการลงทุนนั้น เนื่องจากบ้านโครงสร้างไม้และบ้านโครงสร้างเหล็กมีราคาค่าก่อสร้างที่สูงกว่าบ้านทั่วไปมาก เมื่อเทียบกับค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อปี จึงมีระยะเวลาในการคืนทุนที่นานกว่า 25 ปี โดยบ้านโครงสร้างไม้จะมีระยะเวลาในการคืนทุนยาวนานกว่าบ้านโครงสร้างเหล็กทั้งในกรณีที่ปรับอากาศตามปกติและปรับอากาศตลอด 24 ชั่วโมง

โดยสรุปแล้วงานวิจัยในประเทศเกี่ยวกับการประหยัดพลังงานของบ้านที่ใช้ระบบการก่อสร้างที่แตกต่างจากระบบการก่อสร้างทั่วไป (ระบบเสาคาน และผนังก่ออิฐ) อันได้แก่ ระบบผนังรับน้ำหนัก SIP ระบบโครงคร่าวไม้ และระบบโครงคร่าวเหล็ก นั้น ผลจากการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าช่วยลดปริมาณการใช้พลังงานของบ้านเมื่อเทียบกับบ้านทั่วไปได้ แต่มีระยะเวลาในการคืนทุนที่ยาวนาน

2. การใช้พลังงานของบ้าน ICF ในต่างประเทศ

ในต่างประเทศได้มีการศึกษาเปรียบเทียบการใช้พลังงานของบ้าน ICF กับบ้านที่ใช้วัสดุก่อสร้างประเภทอื่นๆ เช่น โครงสร้างไม้ (Wood Frame) และ บ้านโครงสร้างเหล็ก โดยการวัดค่าการใช้พลังงานจากบ้านที่สร้างจริง หรือใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองการใช้พลังงาน การศึกษาดังกล่าวมีรายละเอียดดังนี้

1) Chasar และคณะ [3] ศึกษาเปรียบเทียบการใช้พลังงานในการปรับอากาศและค่าการรั่วซึมของบ้านสองประเภทคือ บ้าน ICF และ บ้านโครงสร้างไม้ โดยการวัดค่าการใช้พลังงานของบ้านสองชั้นจำนวน 4 หลัง ซึ่งตั้งอยู่ที่ Dallas, Texas บ้านที่ศึกษามีแบบบ้านที่ต่างกัน 2 แบบ (แบบ E2051 และ แบบ E50) โดยแต่ละแบบมีจำนวนสองหลัง หลังแรกเป็นบ้าน ICF และหลังที่สองเป็นบ้าน Frame Construction บ้านทั้งสี่หลังมีผู้อยู่อาศัย ผนัง ICF ที่ใช้มีค่า R-22 (ประกอบด้วย อิฐก่อ, XPS หนา 2", คอนกรีต หนา 4", XPS หนา 2" และ แผ่นยิปซัม หนา 1/2") ส่วนผนัง Wood Frame มีค่า R-15 (ประกอบด้วย อิฐก่อ, structural sheathing หนา 3/16", ฉนวนใยแก้ว หนา 4" และ แผ่นยิปซัม หนา 1/2") พื้นที่ใต้หลังคา (Attic) มีฉนวนกันความร้อน R-50 ฐานรากเป็นระบบ Slab-on-ground และ ระบบโครงสร้างหลังคาแบบ Wood Frame Roof เก็บข้อมูลการใช้พลังงานในช่วงเดือนมกราคม - สิงหาคม ค.ศ. 2000

ผลการศึกษาพบว่าบ้าน ICF สามารถประหยัดพลังงานที่ใช้ในการปรับอากาศ (Cooling energy) เมื่อเทียบกับบ้านโครงสร้างไม้ โดยบ้าน ICF แบบ E2051 และ แบบ E50 ประหยัดพลังงานได้ 16.8% และ 18.9% ตามลำดับ ในส่วนของการศึกษาเปรียบเทียบค่าการรั่วซึมของอากาศของบ้านทั้งสองประเภท พบว่าสำหรับบ้าน ICF แบบ E2051 จะมีค่าการรั่วซึมของ

อากาศ (ค่า ACH_{50}) ที่ต่ำกว่าบ้านโครงสร้างไม้แบบเดียวกัน (ICF = 4.3 และ Wood Frame = 5.0) ในขณะที่บ้าน ICF แบบ E50 จะมีค่าการรั่วซึมของอากาศที่สูงกว่าบ้านโครงสร้างไม้ (ICF = 5.6 และ Wood Frame = 5.1) งานวิจัยดังกล่าวได้ให้ข้อสังเกตว่าการที่ค่าการรั่วซึมของอากาศไม่สอดคล้องกันนั้น อาจเป็นเพราะบ้าน ICF และ บ้านโครงสร้างไม้ ที่ศึกษานั้น มีส่วนที่แตกต่างกันก็เพียงผนังภายนอก แต่ฐานราก (ระบบ Slab on grade foundation) และโครงสร้างหลังคา (Wood frame roof) นั้นเป็นแบบเดียวกัน

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการใช้พลังงานของบ้านทั้งสองประเภทเพิ่มเติมโดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (DOE2.1E) จำลองการใช้พลังงานของบ้านแบบ E50 โดยข้อมูลอาคารที่ใช้ในการจำลองบ้านทั้งสองประเภทนั้นเหมือนกันหมดยกเว้นวัสดุของผนังภายนอกอาคาร (ผนัง ICF กับผนัง Frame) พบว่าบ้าน ICF สามารถประหยัดพลังงานต่อปีได้ 12.9%

2) Gadja และ Vangeem [4] ศึกษาเปรียบเทียบการใช้พลังงานของบ้านพักอาศัยที่ใช้ผนัง ICF และ ผนังโครงคร่าวไม้ โดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Visual DOE 2.6 จำลองการใช้พลังงานของอาคาร

อาคารที่ศึกษาเป็นบ้านพักอาศัยสองชั้น พื้นที่ใช้สอย 228 ตารางเมตร โครงสร้างพื้นชั้นล่างเป็น Slab on Grade ที่มีความหนาของพื้นคอนกรีต 150 mm ด้านบนบุด้วยพรม ผนังด้านนอกสุดบุด้วยแผ่นอะลูมิเนียมที่มีสีเข้มปานกลาง มีสัดส่วนของพื้นหน้าต่างต่อพื้นที่ผนังภายนอกเท่ากับ 16% ส่วนหลังคามุงด้วย Asphalt Shingle สีเข้มปานกลาง ผนังภายในเป็นผนังโครงคร่าวไม้ไม่ได้บุฉนวนกันความร้อน พื้นชั้นสองเป็นพื้นโครงคร่าวไม้บุด้วยพรม ในส่วนที่มีการปรับอากาศกำหนดให้การรั่วซึมของอากาศเท่ากับ 0.35 ACH และส่วนที่ไม่ได้ปรับอากาศเท่ากับ 2.5 ACH กำหนดให้มีผู้ใช้สอยอาคาร 4 คน

ตัวแปรที่ศึกษาที่มีผลต่อการใช้พลังงาน ประกอบด้วย ที่ตั้งของอาคาร และชนิดของผนังภายนอก ที่ตั้งของอาคารมี 5 แห่ง มีลักษณะภูมิอากาศที่แตกต่างกัน (Hot dry, Hot humid, Moderate และ Cold) ผนังที่ศึกษามี 3 แบบ คือ ผนัง ICF (ประกอบด้วย แผ่นอะลูมิเนียม, EPS หนา 2", คอนกรีต หนา 6", EPS หนา 2" และ แผ่นยิปซัม หนา 1/2") ผนังโครงคร่าวไม้ (Wood frame wall) และ ผนังที่มีค่า U-factor ตามที่ IECC (International Energy Conservation Code) กำหนดไว้ ซึ่งแตกต่างกันไปในแต่ละท้องที่ พลังงานที่ใช้ของบ้านแต่ละแห่งได้มาจากการจำลองบ้านโดยหันหน้าบ้านไปทางด้านทิศเหนือ ใต้ ตะวันออก และตะวันตก แล้วจึงนำค่าการใช้พลังงานของบ้านที่มีทิศที่ต่างกันทั้งสี่ทิศนั้นมาหาค่าเฉลี่ย

ผลการศึกษาพบว่าบ้าน ICF สามารถประหยัดพลังงานได้ 5-9% เมื่อเทียบกับบ้านโครงสร้างไม้ และสามารถประหยัดพลังงานได้ 8-9% เมื่อเทียบกับบ้านที่ใช้ผนังที่มีค่า U-factor ตามที่ IECC กำหนดไว้ นอกจากบ้าน ICF จะช่วยในเรื่องของการประหยัดพลังงานแล้ว ยังมีผลต่อขนาดของระบบปรับอากาศ (HVAC) ที่ใช้ โดยบ้าน ICF นั้น ขนาดของ HVAC ที่ใช้จะต่ำกว่าบ้านโครงคร่าวไม้ประมาณ 14-21%

3) Petrie และคณะ [5] ศึกษาเปรียบเทียบการใช้พลังงานของบ้านสองประเภทคือ บ้าน ICF และบ้านผนังโครงคร่าวไม้ และการรั่วซึมของอากาศของบ้านทั้งสองแบบ โดยการวัดจากบ้านที่สร้างจริง ตลอดจนศึกษาการใช้พลังงานโดยเปรียบเทียบค่าที่วัดจริงกับค่าที่ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ และเปรียบเทียบการใช้พลังงานของบ้านทั้งสองประเภทที่ตั้งในสภาพภูมิอากาศที่แตกต่างกัน

อาคารที่ศึกษาเป็นบ้านพักอาศัยสองชั้นจำนวนสองหลัง สร้างอยู่ในบริเวณเดียวกันที่เมือง Knoxville รัฐ Tennessee บ้านทั้งสองมีแบบแปลน และรูปแบบอาคารที่เหมือนกัน ต่างกันตรงที่บ้านหลังแรกใช้ผนัง ICF ที่มีค่า R = 2.6 m^2K/W ส่วนบ้านหลังที่สองใช้ผนังโครงคร่าวไม้ที่มีค่า R = 1.9 m^2K/W มีพื้นที่ใช้สอยทั้งหมด 102 ตารางเมตร ตั้งค่าอุณหภูมิในการปรับอากาศในช่วงฤดูร้อนและฤดูหนาวเท่ากันคือ 22 $^{\circ}C$ ทั้ง บ้านดังกล่าวไม่มีผู้อยู่อาศัย การเก็บข้อมูลทำในช่วงเดือนกรกฎาคม ค.ศ. 2000 – เดือนพฤษภาคม ค.ศ. 2001

ผลการศึกษาพบว่าบ้าน ICF ใช้พลังงานน้อยกว่าบ้านผนังโครงคร่าวไม้ 7.5% ในส่วนของการศึกษาการรั่วซึมของอากาศ โดยใช้ Blower Door วัดค่าทั้งหมดสามครั้ง ในเดือนมิถุนายน ค.ศ. 2000 เดือนมีนาคม และ เดือนพฤษภาคม ค.ศ. 2001 พบว่า ในช่วงฤดูหนาวจะมีปริมาณการรั่วซึมของอากาศที่สูงที่สุด เนื่องจากการหดตัวของไม้โดยเฉพาะที่บริเวณโครงหลังคา Truss ของบ้านทั้งสองหลัง และมีอัตราการรั่วซึมของอากาศต่ำสุดในช่วงฤดูร้อน เนื่องจากไม้มีการขยายตัวมากที่สุด โดยบ้าน ICF มีอัตราการรั่วซึมที่ต่ำกว่าบ้านโครงคร่าวไม้โดยเฉลี่ย 95 CFM_{50} สาเหตุเนื่องมาจากบ้านโครงคร่าวไม้นั้นจะมีจุดที่รั่วซึมของอากาศที่บริเวณรอยต่อระหว่างฐานรากกับผนังด้านนอก ส่วนบ้าน ICF นั้น ผนังจะต่อเนื่องจากฐานรากจนถึงโครงหลังคา จึงทำให้มีการรั่วซึมของอากาศน้อยกว่า

การใช้พลังงานของบ้านทั้งสองประเภทที่ได้จากการวัดจริงและจากการจำลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (DOE2) ให้ผลที่ใกล้เคียงกัน สำหรับบ้าน ICF ค่าพลังงานที่คำนวณได้กับค่าที่ได้จากการวัดจริงจะแตกต่างไม่เกิน 0.9% ส่วนบ้านโครงสร้างไม้จะแตกต่างไม่เกิน 4.1% สาเหตุที่ทำให้ผลที่ได้จากโปรแกรมใกล้เคียงกับการวัดจริงนั้นเนื่องจากไฟล์ข้อมูลของสภาพอากาศ “Knoxville TMY2” ที่ใช้ในการจำลองนั้น ได้มีการแก้ไขข้อมูลโดยแทนค่าด้วยข้อมูลสภาพอากาศที่ได้จากการวัดจริงในช่วงที่เก็บข้อมูลของบ้านทั้งสองหลัง และค่าความต้านทานความร้อนขององค์ประกอบอาคาร เช่น ฝ้าเพดานใต้หลังคา พื้น และผนัง ได้มีการคำนวณโดยคำนึงถึงผลอันเนื่องมาจากโครงคร่าวที่อยู่บริเวณนั้น โดยใช้วิธีการที่เรียกว่า “Whole-wall R-value”

การใช้พลังงานบ้านทั้งสองประเภท ที่ตั้งอยู่ในสภาพภูมิอากาศที่แตกต่างกัน จำนวน 6 เมือง (Phoenix, Minneapolis, Dallas, Boulder, Knoxville, และ Miami) โดยใช้โปรแกรม DOE2 จำลองการใช้พลังงานของบ้าน พบว่า บ้าน ICF จะใช้พลังงานต่ำกว่าบ้านโครงสร้างไม้ 5.5 – 8.5% โดยประหยัดพลังงานได้มากที่สุดสำหรับบ้านที่ตั้งในเมือง Phoenix (8.5%) และน้อยที่สุดคือ Miami (5.5%) โดยพบว่าผลของมวลอุณหภาพ (Thermal mass) ของผนัง ICF

นั้นให้ผลดีทั้งในเรื่องของการประหยัดพลังงานในการทำความเย็น (Cooling) และ การทำความร้อนให้กับอาคาร (Heating)

นอกจากนี้ได้มีการศึกษาว่าผลของมวลอุณหภาพของผนัง ICF จะช่วยในเรื่องการลดความแตกต่างของอุณหภูมิภายในบ้านในช่วงที่ไม่ได้มีการปรับอากาศได้มากน้อยเพียงไร เมื่อเทียบกับบ้านโครงสร้างไม้ โดยการนำข้อมูลอุณหภูมิอากาศภายในบ้านและอุณหภูมิของห้องใต้หลังคาของบ้านทั้งสองประเภทมาพล็อตกราฟ พบว่าบ้าน ICF มีช่วงการขึ้นลงของอุณหภูมิภายในบ้านที่แคบกว่าบ้านโครงสร้างไม้

4) NAHB [6] ศึกษาบ้าน ICF ตัวอย่าง จำนวน 4 หลัง ซึ่งมีรูปแบบบ้านที่แตกต่างกันที่ตั้งอยู่ในเมือง Virginia Beach, Virginia; Austin, Texas; Sioux City, Iowa และ Chestertown, Maryland โดยศึกษาเกี่ยวกับค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง ค่าการรั่วซึมของอากาศ พลังงานที่ใช้ ความเห็นของผู้ใช้อาคารในเรื่องการป้องกันเสียงของบ้าน ICF สภาวะสบายภายในบ้าน ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับไฟฟ้า และ ความพึงพอใจโดยรวมที่มีต่อบ้าน ICF

บ้านสามหลังที่ศึกษาใช้ผนัง ICF ระบบบล็อก (Block system) มีเพียงหลังเดียวที่ใช้ผนัง ICF ระบบแผ่นยาว (Plank system) โฟมที่ใช้เป็นโฟม EPS

การศึกษาในเรื่องของการรั่วซึมของอากาศใช้เครื่องมือ Blower Door พบว่าค่าการรั่วซึมของบ้านที่ศึกษาในช่วงฤดูหนาว มีค่า 0.15 – 0.55 ACH ในส่วนของการใช้เครื่องมือ Thermograph พบว่าผนัง ICF มีจุดที่เป็น Cold Spot น้อยกว่าผนังโครงคร่าว นอกจากนี้จากการสอบถามความคิดเห็นของผู้ใช้อาคาร จะพึงพอใจในผนัง ICF ในแง่ที่ช่วยลดเสียงจากภายนอกเข้าสู่อาคาร

5) Kosny และคณะ [7] ศึกษาค่าความต้านทานความร้อนของผนัง ICF โดยการใช้เครื่องมือทดสอบและการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ และ ศึกษาข้อดีของผนัง ICF ในด้านมวลอุณหภาพ (Thermal mass) และ การลดการรั่วซึมของอากาศ ที่มีต่อปริมาณการใช้พลังงานของบ้าน เมื่อเปรียบเทียบกับบ้านแบบเดียวกันที่ใช้ผนังโครงคร่าวไม้

การศึกษาค่าความต้านทานความร้อน (R-Value) ทำโดยใช้เครื่องมือ “Guarded Hot Box” ตามวิธีการทดสอบ “ASTM C236, Standard Test Method for “Steady-State Thermal Transmission Properties of Building Assemblies by Means of Guarded Hot Box” ผนัง ICF ที่ใช้ทดสอบมีขนาดแบบโฟม EPS หนา 0.23 เมตร ภายในแบบโฟมมีคอนกรีตในแนวตั้งและแนวดิ่ง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 15.75 เซนติเมตร ผนังภายนอกเป็นปูนฉาบ (Stucco) หนา 13 มม. ผนังภายในบุด้วยแผ่นยิปซัม หนา 13 มม. ผลการทดสอบพบว่าผนัง ICF มีค่าความต้านทานความร้อน 2.04 m^2K/W

ในส่วนของการหาค่าความต้านทานความร้อนของผนังโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Heating 7.2 ได้ค่า R เท่ากับ 2.11 m^2K/W ซึ่งสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ 3%

การศึกษาค่าความต้านทานความร้อนของผนังโดยรวม (Whole wall R-Value) ซึ่งหมายถึงค่าความต้านทานความร้อนของผนังที่คำนึงถึงผลของรอยต่อของผนังกับส่วนอื่นๆ เช่น

รอยต่อระหว่างผนังกับผนังบริเวณมุมอาคาร รอยต่อระหว่างผนังกับหลังคา และรอยต่อระหว่างผนังกับพื้น อาคารที่ศึกษาเป็นบ้านชั้นเดียว โดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองรอยต่อของผนังในบริเวณที่กล่าวมาข้างต้น เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U-value) ของผนังบริเวณรอยต่อ และขนาดพื้นที่ที่ส่งผลกระทบ จากนั้นจึงคำนวณค่าความต้านทานของผนังโดยรวม โดยการหาค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U-value) ที่มีการถ่วงน้ำหนักตามขนาดของพื้นที่ของผนังส่วนที่ไม่ได้รับผลกระทบจากรอยต่อ (Clear-Wall) และผนังบริเวณที่เป็นรอยต่อ แล้วจึงแปลงเป็นค่า R ผลการศึกษาพบว่า ค่าความต้านทานความร้อนโดยรวมของผนัง ICF เท่ากับ 1.96 m^2K/W ซึ่งต่ำกว่า Clear Wall 9.5%

การศึกษาการใช้พลังงานของบ้านที่ใช้ผนัง ICF โดยการจำลองการใช้พลังงานในโปรแกรม DOE 2.1E บ้านที่ศึกษาเป็นบ้านชั้นเดียว มีพื้นที่ใช้สอย 143 ตารางเมตร ส่วนที่เป็นผนังทึบ หน้าต่างกระจก และประตู มีขนาดพื้นที่ 106 14.3 และ 2.6 ตารางเมตร ตามลำดับ ศึกษาการใช้พลังงานของบ้านที่ตั้งอยู่ในเมืองที่มีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 6 แห่ง (Atlanta, Denver, Miami, Minneapolis, Phoenix และ Washington D.C.) ตั้งค่าอุณหภูมิในการปรับอากาศ ช่วงฤดูหนาว 21 $^{\circ}C$ และ ช่วงฤดูร้อน 26 $^{\circ}C$ กำหนดให้ค่าเฉลี่ยของพื้นที่การรั่วซึมของอากาศ (Leakage Area) เท่ากับ 0.0005 ต่อพื้นที่ห้องหนึ่งตารางเมตร (ค่าเฉลี่ยของปริมาณการรั่วซึมของอากาศตลอดทั้งปีที่โปรแกรมคำนวณได้สำหรับบ้านทั้ง 6 แห่ง มีค่าไม่ต่ำกว่า 0.35 ACH)

เนื่องจากการใส่ข้อมูลของผนังในโปรแกรม DOE2 จะต้องระบุคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชั้นที่ประกอบกันขึ้นเป็นผนัง แต่เนื่องจากผนัง ICF ที่ศึกษานั้น ไม่ได้มีชั้นของวัสดุที่สม่ำเสมอกันตลอด ซึ่งผนังในลักษณะนี้จะก่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนในสามมิติ ในการศึกษานี้ได้ใช้วิธีการที่เรียกว่า “Thermally Equivalent Wall” เพื่อหาคุณสมบัติของวัสดุของผนังแต่ละชั้น ที่ทำให้ผนังดังกล่าวคุณสมบัติในเชิงความร้อนในลักษณะ Steady-State และ Dynamic เช่นเดียวกับผนังจริง

ผลการศึกษาการใช้พลังงานของบ้าน ICF ทั้ง 6 แห่ง ตลอดทั้งปี มีค่าดังนี้ Atlanta 8,162 kWh Denver 12,518 kWh Miami 10,120 kWh Minneapolis 21,321 kWh Phoenix 10,107 kWh และ Washington D.C. 11,746 kWh ตามลำดับ

นอกจากนี้ได้มีการศึกษาการใช้พลังงานของบ้านแบบเดียวกัน แต่ใช้ผนังโครงคร่าวไม้ (Wood-frame wall) ทั้ง 6 แห่ง พบว่าพลังงานที่ใช้ของบ้านโครงคร่าวไม้นั้นจะสูงกว่าบ้านผนัง ICF โดยค่าความต้านทานความร้อนของผนังโครงคร่าวไม้นั้นจะต้องมีค่าที่สูงขึ้นจึงจะทำให้ค่าการใช้พลังงานของบ้านเท่ากับบ้าน ICF โดยมีค่า Effective R-value ของผนัง ICF ทั้ง 6 แห่ง มีค่าดังนี้ Atlanta 3.7 m^2K/W Denver 3.5 m^2K/W Miami 3.7 m^2K/W Minneapolis 2.6 m^2K/W Phoenix 4.9 m^2K/W และ Washington D.C. 3.4 m^2K/W ตามลำดับ

การจำลองการใช้พลังงานของบ้านผนัง ICF กับบ้านผนังโครงคร่าวไม้ ที่มีการปรับค่าการรั่วซึมของอากาศ โดยกำหนดให้ค่าเฉลี่ยของพื้นที่การรั่วซึมของอากาศ (Leakage Area) ของบ้าน ICF และ บ้านโครงคร่าวไม้ เท่ากับ 0.0004 และ 0.0005 ต่อพื้นที่ห้องหนึ่งตารางเมตร

ตามลำดับ (สำหรับค่า 0.0005 ที่ใช้กับบ้าน ICF เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากวัดการรั่วซึมอากาศของบ้านจำนวน 7 หลัง) พบว่าบ้าน ICF จะใช้พลังงานน้อยกว่าบ้านผนังโครงคร่าวไม้ที่ตั้งอยู่ที่ Miami 4% และ ที่ Washington D.C. 6.5% โดยผนังโครงคร่าวไม้จะต้องมีค่าความต้านทานความร้อนของผนังเพิ่มขึ้นเป็น 4.8 – 7.8 m^2K/W จึงจะสามารถใช้พลังงานเท่ากับบ้าน ICF

6) Doebber [8] ศึกษาการใช้พลังงานของบ้านที่ใช้ระบบผนังคอนกรีตสองแบบ คือ Multi-functional Precast Panel (MPP) และ ผนัง ICF เปรียบเทียบกับผนังโครงคร่าวไม้ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ EnergyPlus จำลองการใช้พลังงานของอาคาร ตลอดจนศึกษาตัวแปรอื่นๆ ที่มีผลต่อการใช้พลังงาน เช่น ค่าการรั่วซึมของอากาศ ความต้านทานความร้อนของผนัง และ มวลอุณหภาพ ในที่นี้จะนำเสนอเพียงผลการศึกษาในส่วนที่เกี่ยวกับผนัง ICF และผนังโครงคร่าวไม้เท่านั้น

บ้านที่ศึกษาเป็นบ้านชั้นเดียว ขนาดพื้นที่ใช้สอย 211 ตารางเมตร (เป็นส่วนที่ปรับอากาศ) และชั้นใต้ดิน พื้นที่ 211 ตารางเมตร (ไม่ปรับอากาศ) กำหนดให้การรั่วซึมของอากาศของบ้านที่ศึกษาแต่ละประเภทมีค่าเท่ากัน (Normalized leakage areas (ELA_N) = 1.21) จำลองบ้านที่ตั้งในพื้นที่ที่มีภูมิอากาศที่แตกต่างกัน 6 แห่ง ได้แก่ Minneapolis, Denver, Washington, Atlanta, Phoenix และ Miami ในการจำลองคุณสมบัติของผนังในโปรแกรม EnergyPlus นั้น ใช้วิธี “Thermally Equivalent Wall”

ผลการศึกษาพบว่า ผนัง ICF แบบ Flat System ซึ่งประกอบด้วยชั้นของวัสดุเรียงจากภายนอกไปภายในได้แก่ โฟม EPS คอนกรีต โฟม EPS และ แผ่นยิปซัม ซึ่งมีความหนา 2.5, 4, 2.5 และ 0.5 นิ้ว ตามลำดับ มีค่า Clear-wall R-value และ Whole-wall R-value เท่ากับ 3.57 m^2K/W และ 2.92 m^2K/W ตามลำดับ (แตกต่างกัน 18.2%) เมื่อเทียบกับบ้านโครงคร่าวไม้ บ้าน ICF ประหยัดพลังงานได้แตกต่างกันไปในแต่ละเมืองดังนี้ ที่ Minneapolis 11.7%, Denver 16.8 %, Washington 14.2%, Atlanta 14.8%, Phoenix 12.8% และ Miami 3.1%

เมื่อปรับค่าการรั่วซึมของอากาศ โดยกำหนดให้บ้าน ICF มีการรั่วซึมที่น้อยลง คือมีค่า Normalized leakage areas (ELA_N) เท่ากับ 0.76 ในขณะที่บ้านโครงคร่าวไม้ใช้ค่าเดิม พบว่าบ้าน ICF สามารถประหยัดพลังงานได้เพิ่มขึ้นจากเดิมมาก โดยประหยัดพลังงานในส่วนของ Heat Pump ได้ดังนี้ Minneapolis 29%, Denver 31%, Washington 30%, Atlanta 27% , Phoenix 9% และ Miami 11%

7) Gajda [9] ศึกษาการใช้พลังงานของบ้านที่ใช้ผนังภายนอกที่แตกต่างกัน 7 ประเภท ได้แก่ ผนังโครงคร่าวไม้ ผนังโครงคร่าวเหล็ก ผนังคอนกรีตบล็อก (autoclaved aerated concrete (AAC) block walls) concrete masonry unit (CMU) และ ผนัง ICF (ประกอบด้วยแผ่นอะลูมิเนียมหรือแผ่นไวนิล, EPS หนา 2”, คอนกรีต หนา 6”, EPS หนา 2” และ แผ่นยิปซัม หนา 1/2”) โดยการจำลองการใช้พลังงานของบ้านที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ที่มีสภาพภูมิอากาศที่แตกต่างกัน 25 แห่ง ในประเทศสหรัฐอเมริกา บ้านที่จำลองเป็นบ้านเดี่ยวสองชั้น จำนวน 4 ห้องนอน มีพื้นที่ใช้สอย 2,450 ตารางฟุต หลังคาของบ้านทุกหลังกำหนดให้เป็นแผ่น OSB หรือ Plywood บุ

ทับด้วยวัสดุมุงหลังคาแอสฟัลต์ ฉนวนกันความร้อนที่ฝ้าใต้หลังคามีค่าความต้านทานความร้อนตามที่มาตรฐาน ของแต่ละท้องถิ่นกำหนดไว้ ผนังภายในเป็นผนังโครงคร่าวที่ไม่มีฉนวน พื้นภายในเป็นพื้นโครงคร่าวที่บุด้วยพรมไม่มีฉนวน พื้น slab-on-grade เป็นพื้นคอนกรีตหนา 6 นิ้ว หล่อบนดิน ด้านบนเป็นพรม กำหนดให้บ้านที่จำลองทุกหลังมีค่าการรั่วซึมของอากาศ 0.35 ACH สำหรับบริเวณที่อยู่อาศัย และ 2.5 ACH สำหรับโรงจอดรถที่ไม่ได้มีการปรับอากาศ มีผู้อยู่อาศัยทั้งหมด 4 คน การจำลองการใช้พลังงานใช้โปรแกรม Visual DOE 2.6 พลังงานที่ใช้ของบ้านแต่ละแห่งได้มาจากการจำลองบ้านโดยหันหน้าบ้านไปทางด้านทิศเหนือ ใต้ ตะวันออก และตะวันตก แล้วจึงนำค่าการใช้พลังงานของบ้านที่มีทิศที่ต่างกันทั้งสี่ทิศนั้นมาหาค่าเฉลี่ย

ผลการศึกษาพบว่าบ้านที่มีผนังที่มีมวลมาก (Mass wall) โดยส่วนใหญ่จะช่วยประหยัดพลังงานได้มากกว่าผนังที่มีค่าความต้านทานความร้อนตามที่กำหนดไว้ตามมาตรฐานของแต่ละท้องถิ่น ถึงแม้ว่าผนังที่มีมวลมากดังกล่าวจะมีฉนวนกันความร้อนที่น้อยกว่าก็ตาม ซึ่งชี้ให้เห็นถึงผลของมวลอุณหภาพของผนังที่มีต่อการประหยัดพลังงาน เมื่อปรับค่าการรั่วซึมของบ้านโดยกำหนดให้บ้านที่ผนังมีมวลมากและบ้านที่ใช้ผนังโครงคร่าว มีค่าการรั่วซึมของอากาศ 0.15 และ 0.78 ACH ตามลำดับ พบว่าสำหรับบ้านที่ตั้งอยู่ที่เมือง Chicago บ้านที่ผนังมีมวลมากใช้พลังงานน้อยลง 4% ส่วนบ้านผนังโครงคร่าวใช้พลังงานเพิ่มขึ้น 9 % นอกจากนี้ทิศทางการวางอาคารที่เหมาะสม ช่วยลดการใช้พลังงานของบ้านที่ใช้ผนัง ICF ได้โดยเฉลี่ย 20%

8) Kosny และคณะ [10] ศึกษาเปรียบเทียบวิธีต่างๆ ที่ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านทานความร้อนของผนังแต่ละประเภท เช่น ผนังโครงคร่าวไม้ ผนังโครงคร่าวเหล็ก ผนัง Masonry Unit และ ผนัง ICF

ในส่วนของผนัง ICF ได้เปรียบเทียบค่าความต้านทานความร้อนของผนัง ICF ที่ใช้อุปกรณ์ยึดระหว่างแผ่น (Connectors) ที่ต่างกันสองแบบ คือ อุปกรณ์ยึดระหว่างแผ่นที่เป็นเหล็กกับพลาสติก โดยผนัง ICF ที่ศึกษาประกอบด้วยโฟม EPS หนา 1.8" ประกบสองด้าน ส่วนตรงกลางเป็นคอนกรีต ผลการจำลองผนังโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่า ผนัง ICF ที่ใช้วัสดุยึดระหว่างแผ่นเป็นเหล็ก มีค่า R = 11.3 ส่วนพลาสติก มีค่า R = 14.4 $hft^{2o}F/Btu$ โดยการใช้วัสดุพลาสติกช่วยเพิ่มค่า R ได้ 27.4 %

นอกจากนี้ได้ศึกษาถึงผนังมวลอุณหภาพ (Massive wall) 4 แบบ ที่มีการเรียงลำดับชั้นของวัสดุที่มีมวลสารมาก (คอนกรีต) และวัสดุที่เป็นฉนวน ที่แตกต่างกัน ว่าแบบใดจะช่วยประหยัดพลังงานได้ดีที่สุด แบบที่ 1 ฉนวนอยู่ตรงกลาง และมีคอนกรีตประกบอยู่ทั้งสองด้าน แบบที่ 2 คอนกรีตอยู่ตรงกลาง และมีฉนวนประกบอยู่ทั้งสองด้าน แบบที่ 3 ฉนวนอยู่ที่ด้านนอกและคอนกรีตอยู่ที่ด้านในของผนัง และแบบที่ 4 คอนกรีตอยู่ที่ด้านนอกและฉนวนอยู่ที่ด้านในของผนัง ผนังทั้งสี่แบบนี้มีค่าความต้านทานความร้อนและมวลอุณหภาพที่เท่ากัน

ผลการจำลองการใช้พลังงานของบ้านชั้นเดียว ที่ตั้งอยู่ที่เมือง Atlanta ที่ใช้ผนังทั้ง 4 แบบ เมื่อเทียบกับผนังโครงคร่าวไม้ ที่มีค่า R ที่เท่ากัน พบว่า ผนังแบบที่ 3 ซึ่งมีส่วนที่เป็นมวลสารมากอยู่ติดกับทางด้านในของอาคาร จะช่วยประหยัดพลังงานได้มากได้ที่สุด รองลงมาคือ

ผนังแบบที่ 1 (ฉนวนอยู่ตรงกลาง) และ ผนังแบบที่ 2 (คอนกรีตอยู่ตรงกลาง) ส่วนผนังแบบที่ 4 ที่มีฉนวนกันความร้อนอยู่ติดกับทางด้านในของอาคาร จะประหยัดพลังงานได้น้อยที่สุด

ในส่วนของการศึกษาการใช้พลังงานของบ้าน ICF ในต่างประเทศ สามารถสรุปได้ว่ามีวิธีการศึกษาสองวิธี คือ การวัดค่าการใช้พลังงานจากบ้านที่ก่อสร้างจริง และ การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองการใช้พลังงานของอาคาร ได้แก่ DOE-2 และ EnergyPlus โดยบ้าน ICF สามารถประหยัดพลังงานได้มากกว่าเมื่อเทียบกับบ้านผนังโครงคร่าวไม้ และมีปริมาณการรั่วซึมอากาศที่น้อยกว่าบ้านโครงสร้างไม้ ผนัง ICF จะมีค่า “Whole Wall R-value” ที่ต่ำกว่า Clear Wall R-value ประมาณ 18.2% เนื่องจากผนัง ICF โดยทั่วไปจะเป็นผนังที่มีมวลสารมาก และมีชั้นของวัสดุที่เป็นฉนวน ซึ่งการเรียงลำดับชั้นของมวลสารกับฉนวนที่ผนังของอาคาร มีผลต่อการใช้พลังงานของอาคาร นอกจากนี้อุปกรณ์ที่ใช้ในการยึดระหว่างแผ่นที่ใช้วัสดุต่างกันจะมีผลต่อค่าความต้านทานความร้อนของผนัง ICF แต่เนื่องจากการจำลองให้เห็นผลของตัวยึดดังกล่าวนั้น จำเป็นที่จะต้องใช้โปรแกรมการจำลองผนังแบบ Three-Dimensional Heat Transfer ด้วย ข้อจำกัดในเรื่องของโปรแกรมที่มีอยู่ ดังนั้นผลของวัสดุที่นำมาใช้ยึดผนังจึงไม่ได้นำมาคำนึงถึงในงานวิจัยนี้

อย่างไรก็ตามงานวิจัยต่างประเทศส่วนใหญ่บ้านพักอาศัยจะปรับอากาศตลอดทั้งวัน แต่อาจมีการตั้งค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกันบ้างระหว่างช่วงที่มีคนอยู่บ้านกับช่วงที่ไม่มีคนอยู่ แต่บ้านพักอาศัยในประเทศไทยจะใช้เครื่องปรับอากาศส่วนใหญ่ในช่วงเวลานอน ดังนั้นจึงอาจมีผลในแง่ของพลังงานที่ใช้ที่อาจแตกต่างกันไป ประกอบกับสภาพภูมิอากาศที่แตกต่างกัน จึงควรที่จะศึกษาเพิ่มเติมว่าการใช้งานที่แตกต่างกันจะมีผลต่อการใช้พลังงานของบ้านพักอาศัยอย่างไรบ้าง

เอกสารอ้างอิง

[1] จรัญพัฒน์ ภูวนันท์ และคณะ, **การศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ระบบการก่อสร้าง Structural Sandwich Panels เพื่อใช้กับบ้านประหยัดพลังงานในประเทศไทย** (นครปฐม: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2550).

[2] ปรีชญา มหัทธนทวี, จรัญพัฒน์ ภูวนันท์ และ ดรุณี มงคลสวัสดิ์, "ประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานของบ้านโครงสร้างเหล็ก (Steel Framing) และบ้านโครงสร้างไม้ (Wood Framing) ที่ได้พัฒนาขึ้นใช้ในประเทศไทย," **รายงานการวิจัย** (คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2550).

[3] Dave Chasar and others, "Measured and Simulated Cooling Performance Comparison; Insulated Concrete Form Versus Frame Construction," Proceedings of ACEEE 2002 Summer Study, American Council for an Energy Efficient Economy (Washington, DC, August 2002).

[4] John Gajda and Martha VanGeem, "Energy Use in Residential Housing: A Comparison of Insulating Concrete Form and Wood Frame Walls," **Report** (Portland Cement Association, 2000).

[5] Thomas W. Petrie and others, "How Insulating Concrete Form vs. Conventional Construction of Exterior Walls Affects Whole Building Energy Consumption: Results from a Field Study and Simulation of Side-by Side Houses," **Report** (Oak Ridge National Laboratory, 2003).

[6] NAHB Research Center, "Insulating Concrete Forms for Residential Construction: Demonstration Homes," **Report** (NAHB Research Center, 1997).

[7] Jan Kosny, Jeffrey E. Christian, and Andre O. Desjarlais, "Performance Check between Whole Building Thermal Performance Criteria and Exterior Wall Measured Clear Wall R-Value, Thermal Bridging, Thermal Mass, and Airtightness," **ASHRAE Transactions**, 104,2, (1998): 1379-1389.

[8] Ian R. Doebber, "Investigation of Concrete Wall Systems for Reducing Heating and Cooling Requirements in Single Family Residences" (Master's Thesis, Mechanical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004).

[9] John Gajda, "Energy Use of Single-Family Houses With Various Exterior Walls" **Report** (Portland Cement Association, 2001).

[10] Jan Kosny, "Advances in Residential Wall Technologies-Simple Ways of Decreasing the Whole Building Energy Consumption," **ASHRAE Transactions** 107,1 (2001): 421-432.