บทที่ 3

การสร้างค่าระดับของตัวแปรที่ใช้สร้างดัชนี

จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าในการที่จะประเมินประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานของหลังคาอาคารนั้นขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ มากมาย แต่สามารถทำการคัดเลือกตัวแปรที่มีความสำคัญและมีอิทธิพลอย่างมากต่อการป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคารทางหลังคาเพื่อนำมาใช้เป็นดัชนีตัวบ่งชี้ถึงศักยภาพในการประหยัดพลังงานได้ดังนี้คือ

1. ลักษณะของวัสดุและโครงสร้างที่ใช้ทำหลังคา
2. คุณสมบัติในการต้านทานความร้อนของระบบหลังคาโดยรวม
3. ความหนาแน่นของมวลสารและสีผิวของวัสดุมุงหลังคา

เมื่อทราบถึงตัวแปรที่มีความสำคัญที่จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงศักยภาพในการที่จะประเมินประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานของหลังคาอาคาร จึงทำการกำหนดขอบเขตของการวิจัย โดยมีลำดับขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยดังนี้

3.1 การศึกษาชนิดของหลังคาในประเทศไทย

ในปัจจุบันรูปแบบหลังคาและการเลือกใช้วัสดุปกคลุมหลังคาของอาคารโดยทั่วไปที่นิยมใช้กันอยู่นั้น ส่วนมากมักมีแนวความคิดในการเลือกใช้มาจากการที่ได้พบเห็นจากสภาพแวดล้อมต่างๆ หรือเลือกใช้ตามลักษณะของอาคารที่จะทำการปลูกสร้าง โดยไม่ได้คำนึงถึงอัตราของความร้อนที่จะผ่านวัสดุเหล่านั้นเข้ามาภายในอาคาร ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการปกคลุมอาคารในปัจจุบันมักเป็นวัสดุที่มีมวลสารมาก และมีค่าการสะสมความร้อนสูง ในการที่จะประเมินประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานของหลังคาอาคารจากการวิจัยครั้งนี้ จึงได้เลือกนำเอาวัสดุปกคลุมหลังคาที่นิยมใช้กันอยู่อย่างแพร่หลายในปัจจุบันมาทำการพิจารณาเพื่อประเมินศักยภาพของวัสดุหลังคาแต่ละชนิดให้ได้ทราบผลออกมาว่า ในแง่ของการประหยัดพลังงานนั้น วัสดุปกคลุมหลังคาแต่ละชนิดมีความสามารถในการช่วยลดการใช้พลังงานได้หรือไม่ และนำมาใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงศักยภาพในการที่จะประเมินประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานของหลังคาอาคารต่อไป

3.1.1 ชนิดของหลังคาที่นิยมใช้กันอยู่ในประเทศไทย

จากการทำการสำรวจวัสดุปกคลุมหลังคาที่มีการใช้งานกันอยู่ในปัจจุบันนั้น สามารถสรุปลักษณะโครงสร้างและประเภทของวัสดุปกคลุมหลังคาได้ดังนี้

- หลังคาสังกะสี (ยังคงพบเห็นกันอยู่ตามชานเมืองหรือชนบท ส่วนมากเป็นผู้มีรายได้น้อย)

- หลังคาแผ่นโลหะ (บ้านพักอาศัยสมัยใหม่ Modern House)
- หลังคากระเบื้องซีแพคโมเนีย (บ้านพักอาศัยทั่วไป)
- หลังคากระเบื้องลอนคู่ (บ้านพักอาศัยผู้มีรายได้ปานกลางถึงรายได้น้อย)
- หลังคากระเบื้องดินเผา (บ้านพักอาศัยสมัยเก่าอนุรักษ์ไทย)
- หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 12 เซนติเมตร (บ้านพักอาศัยสมัยใหม่ที่ต้องการใช้พื้นที่ดาดฟ้า)
- หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 15 เซนติเมตร (บ้านพักอาศัยสมัยใหม่ที่ต้องการใช้พื้นที่ดาดฟ้า)
- หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 30 เซนติเมตร (บ้านพักอาศัยสมัยใหม่ที่ต้องการใช้พื้นที่ดาดฟ้า)
- หลังคาแผ่นแอสฟัลท์ (บ้านประหยัดพลังงาน)

โดยจากการสำรวจลักษณะโครงสร้างของหลังคาดังกล่าวข้างต้น พบว่าค่อนข้างมีความหลากหลายในด้านของการก่อสร้าง ซึ่งมีทั้งหลังคาที่ไม่มีการติดตั้งฝ้าเพดาน, หลังคาที่มีการติดตั้งฝ้าเพดาน โดยส่วนมากหลังคาที่มีการติดตั้งฝ้าเพดานมักจะใช้ฝ้าเพดาน ขนาดความหนาประมาณ 9 มิลลิเมตร จากการสอบถามเจ้าของอาคารได้รับคำตอบว่า เนื่องจากมีราคาไม่สูงมากนักสามารถช่วยป้องกันความร้อนได้ในระดับหนึ่ง อีกทั้งยังช่วยทำให้มองไม่เห็นโครงสร้างของหลังคาด้านบนที่ไม่มีความสวยงาม และช่วยทำให้สามารถติดตั้งระบบปรับอากาศได้ เมื่อต้องการทำให้เกิดความเย็นขึ้นภายในตัวอาคาร

ในการที่จะประเมินประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานของหลังคาอาคารนั้น เนื่องจากวัสดุปกคลุมหลังคาและลักษณะโครงสร้างของหลังคามีความหลากหลายดังกล่าวข้างต้น จึงต้องทำการแยกลักษณะประเภทของหลังคาเสียก่อน เสร็จแล้วนำมาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพในการต้านทานความร้อนของหลังคาแต่ละชนิด โดยคำนึงถึงลักษณะโครงสร้างของหลังคาแต่ละชนิดดังต่อไปนี้

- หลังคาที่ไม่มีการติดตั้งฝ้าเพดาน
- หลังคาที่มีการติดตั้งฝ้าเพดาน (จากการสำรวจลักษณะโครงสร้างของหลังคาทั่วไปในปัจจุบันที่ใช้กันอยู่ มักนิยมใช้ฝ้าเพดานที่มีความหนา 9 มม.)
- หลังคาที่มีการติดตั้งฉนวนกันความร้อนเพิ่มเติมเหนือฝ้าเพดาน (ซึ่งพบเห็นเป็นส่วนน้อย ยกเว้นอาคารที่ทำการก่อสร้างใหม่ๆ โดยทั่วไป ถ้ามีการติดตั้งฉนวนกันความร้อน ก็จะมีขนาดความหนาประมาณ 2-3 นิ้ว)

ทั้งนี้ในส่วนของอาคารที่มีการติดตั้งฝ้าเพดานนั้น จะต้องคำนึงถึงด้วยว่าเป็นการติดตั้งฝ้าเพดานในแนวราบหรือแนวเอียง เพราะการติดตั้งฝ้าเพดานที่แตกต่างกันก็มีผลทำให้กระบวนการ

ถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน ดังนั้นในการที่จะคำนวณหาค่าประสิทธิภาพในการต้านทานความร้อนของหลังคาที่มีการติดตั้งฝ้าเพดาน จึงต้องคำนึงถึงลักษณะของการติดตั้งฝ้าเพดานดังต่อไปนี้

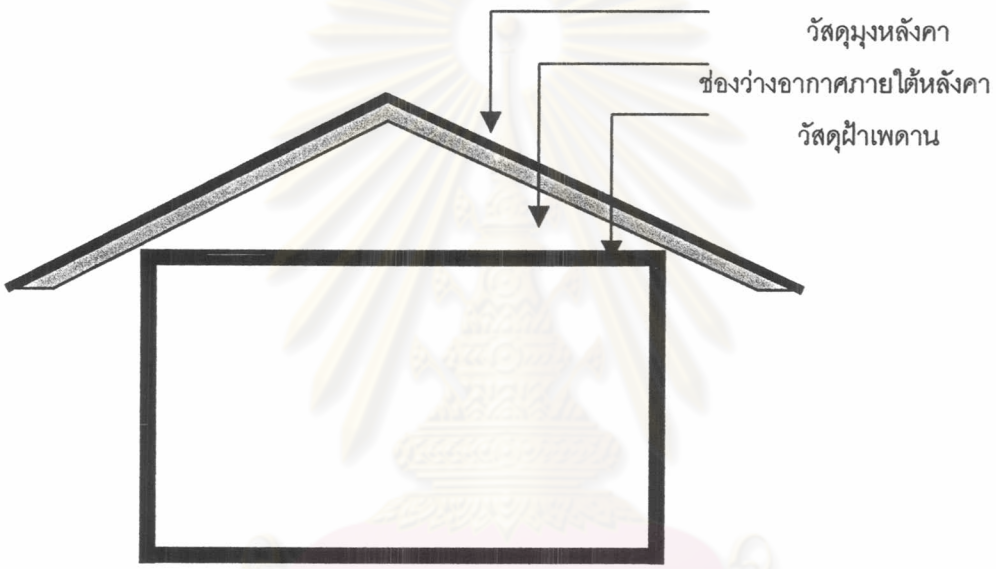
- หลังคาที่มีการติดตั้งฝ้าเพดานในแนวราบ (แนวขนานกับพื้นที่ใช้สอย)
- หลังคาที่มีการติดตั้งฝ้าเพดานในแนวเอียง (แนวเอียงตามมุมองศาของหลังคา)

อย่างไรก็ตาม ในการที่จะพิจารณาถึงความสามารถของระบบหลังคาในการสกัดกั้นความร้อนจากสภาวะอากาศภายนอกเพื่อลดภาระในการทำความเย็น โดยประเมินจากค่าความต้านทานความร้อนรวมของระบบหลังคาเพียงประการเดียวนั้นไม่เพียงพอ เนื่องจากมีบางกรณีที่มีการออกแบบให้มีการระบายอากาศภายใต้หลังคา ซึ่งทำให้มีผลถึงกระบวนการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจากช่องว่างภายใต้หลังคาลงสู่พื้นที่ใช้งานภายในอาคาร เพราะอากาศร้อนจากภายนอกที่ผ่านช่องระบายอากาศภายใต้หลังคาเข้าไปสะสมอยู่ภายใน การถ่ายเทความร้อนจึงเกิดขึ้นจากอากาศภายในช่องใต้หลังคาผ่านลงสู่อาคารโดยตรง ลักษณะดังกล่าวจึงเปรียบเสมือนชั้นของวัสดุมุงหลังคาและชั้นของวัสดุอื่นๆ ที่อยู่เหนือช่องระบายอากาศใต้หลังคาดังกล่าว ไม่ได้มีส่วนช่วยในการสกัดกั้นความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ภายใน มีเฉพาะแต่เพียงชั้นของฝ้าเพดานที่กั้นอยู่ระหว่างช่องระบายอากาศใต้หลังคาและพื้นที่ใช้งานเท่านั้นที่ทำหน้าที่สกัดกั้นความร้อนไม่ให้ถ่ายเทเข้าสู่ภายในอาคาร ดังนั้นแม้ระบบหลังคาในบางกรณีที่มีการระบายอากาศภายในช่องว่างใต้หลังคา จะมีค่าความต้านทานความร้อนสูง เพราะมีการนำวัสดุฉนวนที่มีคุณสมบัติในการต้านทานความร้อนเข้ามาผสมผสานในระบบหลังคานั้น แต่ถ้าตำแหน่งที่ทำการติดตั้งฉนวนในระบบหลังคานั้นไม่มีความเหมาะสม โดยไม่ได้คำนึงถึงความร้อนที่อาจถ่ายเทผ่านช่องว่างภายใต้หลังคา(หรือเหนือฝ้าเพดาน)เข้าสู่ภายในห้องหรือพื้นที่ใช้งาน ก็อาจทำให้การออกแบบติดตั้งวัสดุฉนวนในระบบหลังคานั้น เป็นความสูญเสียที่ไม่เกิดประโยชน์ในการช่วยสกัดกั้นความร้อนจากภายนอกแต่ประการใด ตำแหน่งของการติดตั้งวัสดุฉนวนในระบบหลังคาเพื่อช่วยลดภาระการทำความเย็นให้กับอาคารที่เหมาะสมที่สุด ในกรณีที่มีการออกแบบให้มีระบบระบายอากาศในช่องว่างใต้หลังคา ควรจะติดตั้งฉนวนกั้นระหว่างส่วนที่เป็นช่องว่างใต้หลังคากับพื้นที่ใช้งาน เพราะลักษณะการติดตั้งฉนวนดังกล่าวนี้ทำให้ความร้อนจากภายใต้ผิวหลังคาไม่สามารถถ่ายเทผ่านชั้นของฉนวนเข้าไปภายในอาคารได้ ทำให้เกิดประโยชน์จากการใช้วัสดุฉนวนอย่างเต็มประสิทธิภาพ

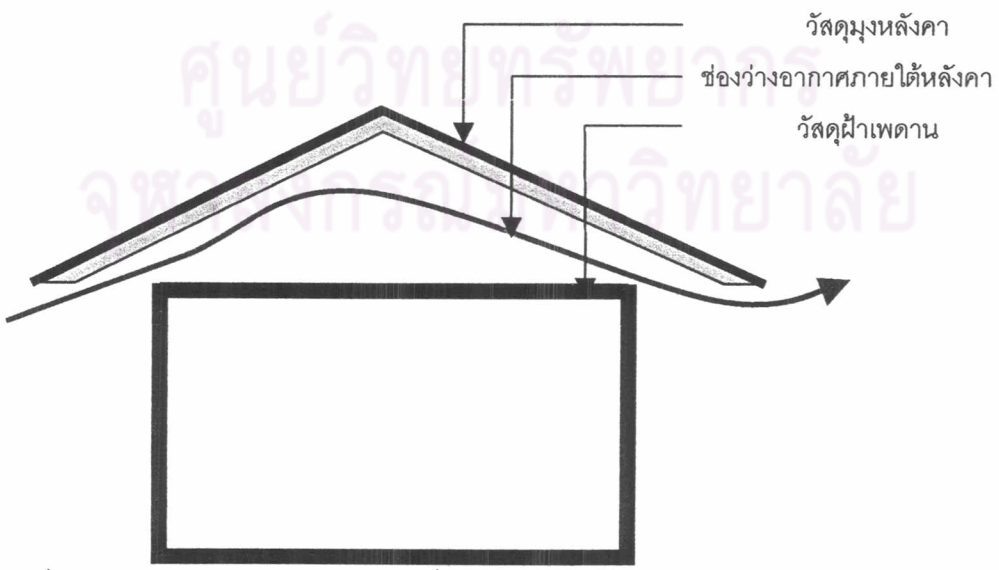
จากลักษณะของการออกแบบระบบหลังคาที่แตกต่างกัน ทำให้มีผลต่อการคำนวณภาระการทำความเย็นที่เกิดจากส่วนหลังคา ในการประเมินศักยภาพของหลังคาโดยรวม จึงต้องพิจารณาถึงตำแหน่งการติดตั้งฉนวนประกอบกับการระบายอากาศภายใต้หลังคา เพราะถ้าเป็นกรณีที่ระบบหลังคาไม่มีการระบายอากาศใต้หลังคา ก็สามารถคำนวณค่าความต้านทานความ

ร้อนของระบบหลังคาได้จาก ผลรวมของค่าความต้านทานความร้อนของชั้นวัสดุแต่ละชั้นตั้งแต่ฟิล์มอากาศที่ผิวด้านนอกของหลังคาจนถึงฟิล์มอากาศที่ผิวด้านในของหลังคา(หรือฝ้าเพดาน) แต่ในกรณีเป็นการคำนวณค่าความต้านทานความร้อนของระบบหลังคา ที่มีการระบายอากาศภายในช่องว่างใต้หลังคา จะต้องเริ่มคำนวณจากฟิล์มอากาศที่อยู่ภายในช่องว่างอากาศใต้หลังคาจนถึงฟิล์มอากาศที่ผิวด้านในของฝ้าเพดานเท่านั้น ดังนั้นในการที่จะคำนวณหาค่าประสิทธิภาพในการต้านทานความร้อนของหลังคาที่มีการติดตั้งฝ้าเพดาน นอกจากจะต้องคำนึงถึงลักษณะของการติดตั้งฝ้าเพดานในแนวต่างๆ แล้ว จะต้องคำนึงถึงอีกกรณีหนึ่งด้วย คือ

- หลังคาที่มีช่องระบายอากาศภายใต้หลังคา
- หลังคาที่ไม่มีช่องระบายอากาศภายใต้หลังคา



ภาพที่ 3.1 แสดงระบบหลังคาในกรณีที่ไม่มีการระบายอากาศภายในช่องว่างใต้หลังคา



ภาพที่ 3.2 แสดงระบบหลังคาในกรณีที่มีการระบายอากาศภายในช่องว่างใต้หลังคา

3.1.2 การคัดเลือกวัสดุมุงหลังคาตามลักษณะของพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน

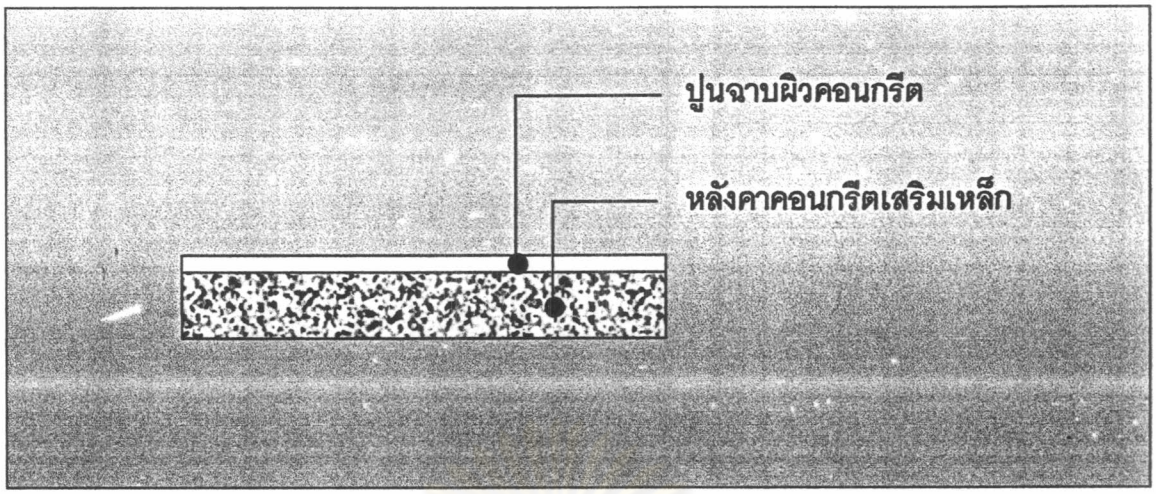
สำหรับหลังคาของอาคารที่ได้พิจารณานำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ได้ทำการคัดเลือกหลังคาที่จะนำมาใช้ในการสร้างแบบประเมินประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานของหลังคาอาคาร โดยการแบ่งตามลักษณะของโครงสร้างที่มีการใช้งานอยู่จริง ซึ่งประกอบไปด้วยวัสดุปกคลุมหลังคาอาคารที่มีลักษณะของโครงสร้างหลังคาตามรูปแบบของอาคารดังต่อไปนี้

อาคารบ้านพักอาศัยทั่วไป

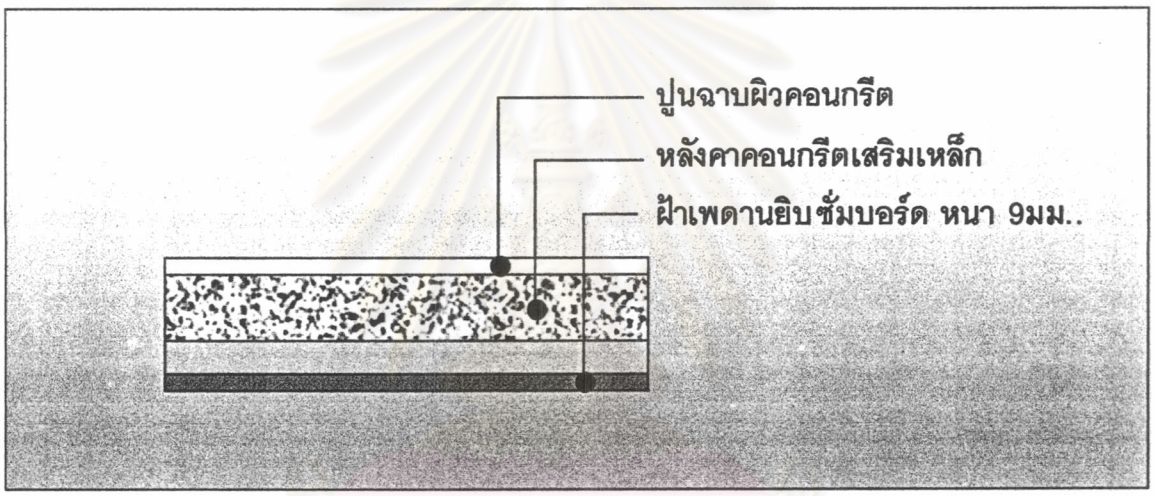
- หลังคาสังกะสี ไม่มีฝ้าเพดาน
- หลังคาแผ่นโลหะ ไม่มีฝ้าเพดาน
- กระเบื้องดินเผา ไม่มีฝ้าเพดาน
- กระเบื้องลอนคู่ หนา 6 มิลลิเมตร ไม่มีฝ้าเพดาน
- กระเบื้องซีแพคโมเนีย หนา 15 มิลลิเมตร ไม่มีฝ้าเพดาน
- หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 12 เซนติเมตร ไม่มีฝ้าเพดาน
- หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 15 เซนติเมตร ไม่มีฝ้าเพดาน
- หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 30 เซนติเมตร ไม่มีฝ้าเพดาน
- หลังคาสังกะสี + ฝ้าเพดาน หนา 9 มม.
- หลังคาแผ่นโลหะ + ฝ้าเพดาน หนา 9 มม.
- กระเบื้องดินเผา + ฝ้าเพดาน หนา 9 มม.
- กระเบื้องลอนคู่ หนา 6 มิลลิเมตร + ฝ้าเพดาน หนา 9 มม.
- กระเบื้องซีแพคโมเนีย หนา 15 มิลลิเมตร + ฝ้าเพดาน หนา 9 มม.
- กระเบื้องซีแพคโมเนีย หนา 15 มิลลิเมตร + ฝ้าเพดาน หนา 9 มม. + มีแผ่นอลูมินั่มฟอยด์
- หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 12 เซนติเมตร + ฝ้าเพดาน หนา 9 มม.
- หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 15 เซนติเมตร + ฝ้าเพดาน หนา 9 มม.
- หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 30 เซนติเมตร + ฝ้าเพดาน หนา 9 มม.

อาคารบ้านพักอาศัยเพื่อการประหยัดพลังงาน

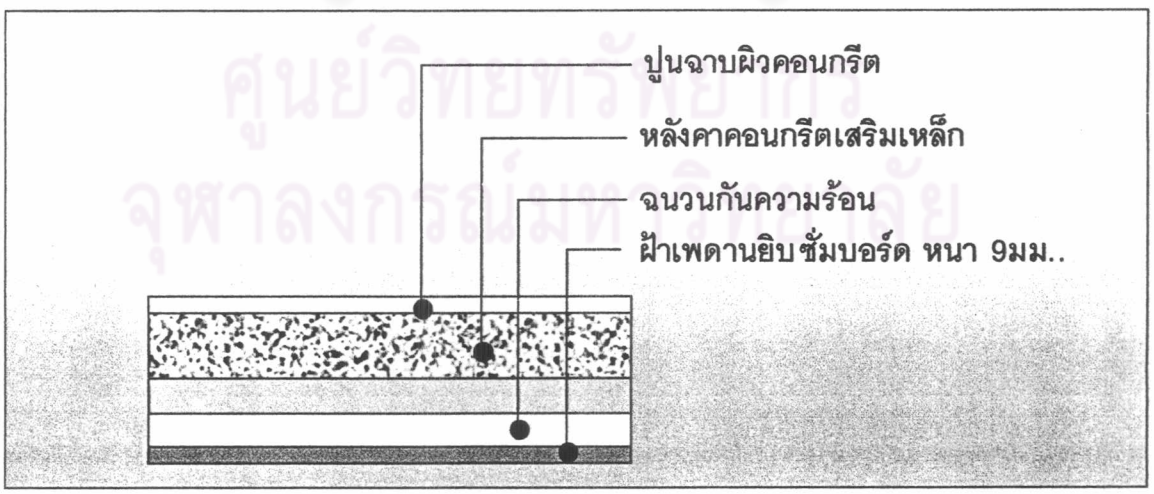
- หลังคาแอสฟัลท์ + ฝ้าเพดาน หนา 12 มม. + มีฉนวนหนา 6 นิ้ว



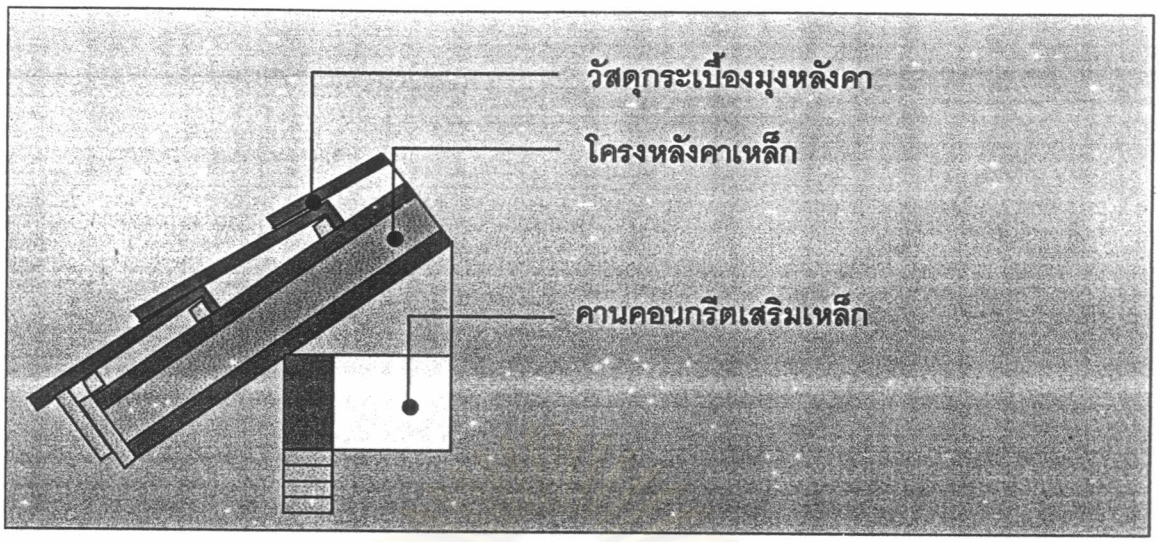
ภาพที่ 3.3 แสดงหลังคาคอนกรีตเสริมเหล็กไม่มีฝ้าเพดาน



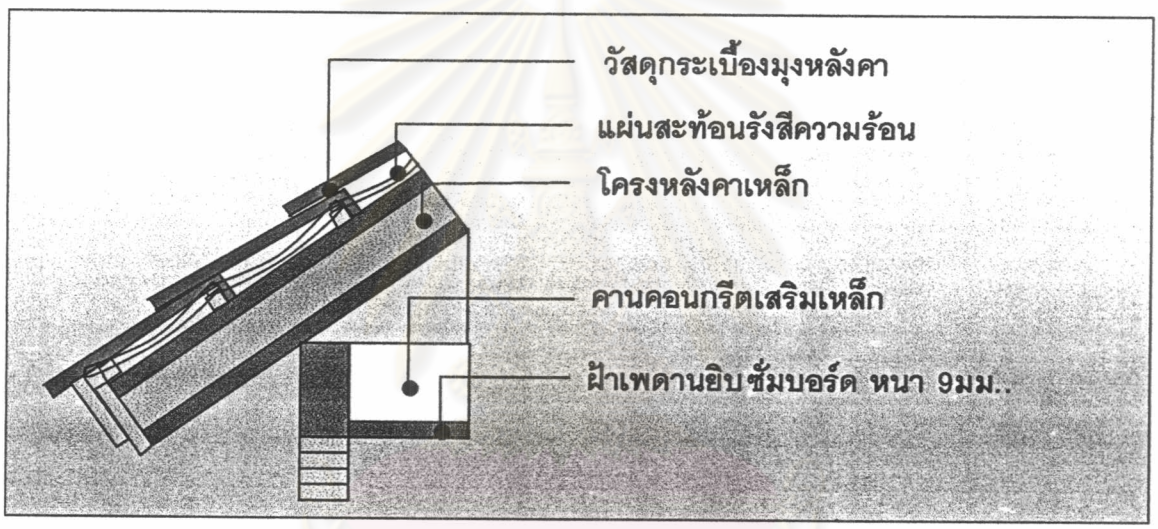
ภาพที่ 3.4 แสดงหลังคาคอนกรีตเสริมเหล็กมีการติดตั้งฝ้าเพดาน



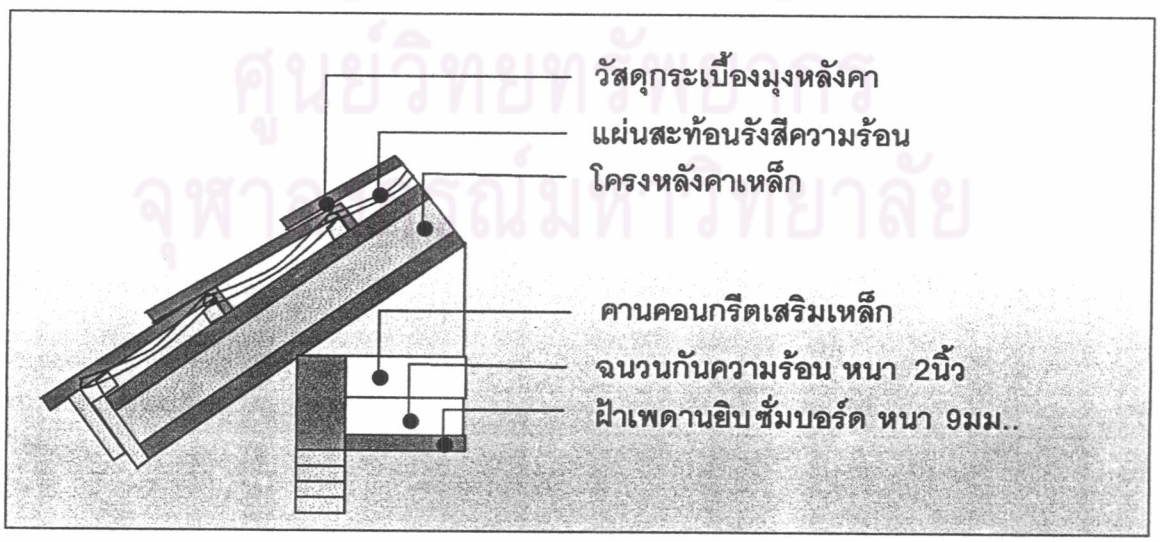
ภาพที่ 3.5 แสดงหลังคาคอนกรีตเสริมเหล็กมีการติดตั้งฝ้าเพดานและฉนวนกันความร้อน



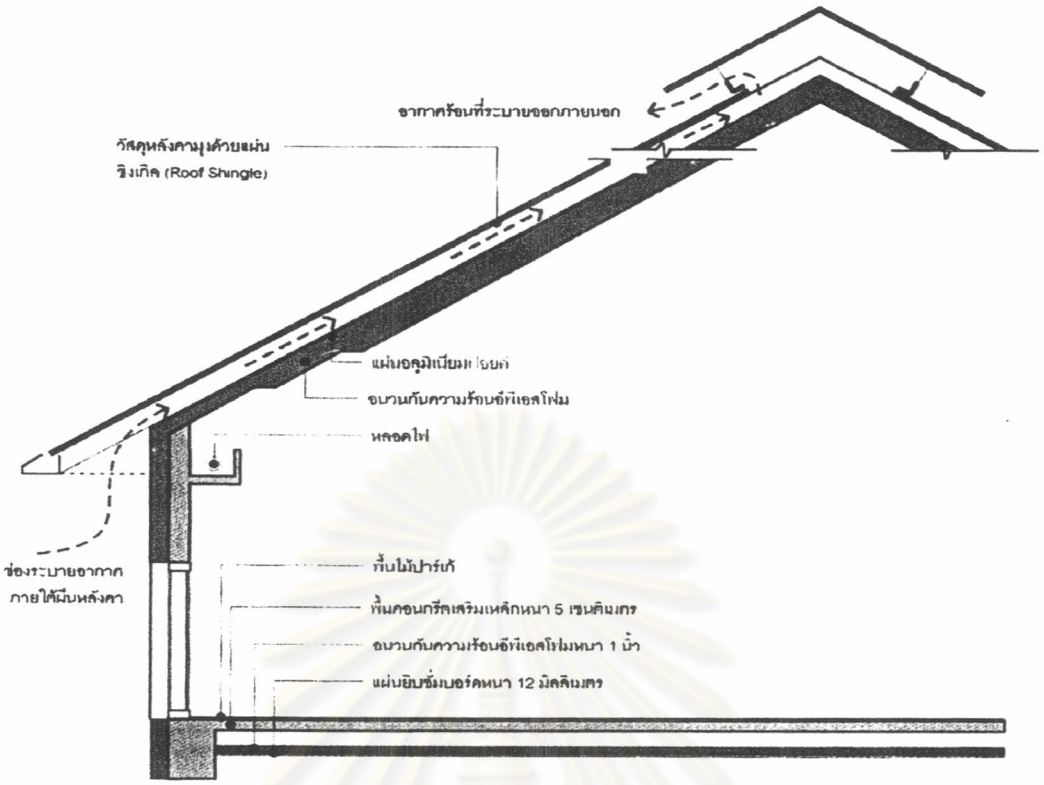
ภาพที่ 3.6 แสดงหลังคาบ้านทั่วไปที่ไม่มีการติดตั้งฝ้าเพดาน



ภาพที่ 3.7 แสดงหลังคาบ้านทั่วไปที่มีการติดตั้งฝ้าเพดาน



ภาพที่ 3.8 แสดงหลังคาบ้านทั่วไปที่มีการติดตั้งฝ้าเพดานและฉนวนกันความร้อน



ภาพที่ 3.9 แสดงหลังคาบ้านประหยัดพลังงานที่มีการติดตั้งฝ้าเพดานและฉนวนกันความร้อน
(สุนทร บุญญาธิการ, 2542)

3.2 การศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของหลังคาและการใช้พลังงาน

ในกรณีของการประเมินประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานของหลังคาอาคารในด้านของระบบปรับอากาศ เมื่อพิจารณาเฉพาะในส่วนของหลังคาอาคารพบว่า คุณสมบัติประการหนึ่งของหลังคาที่มีความเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นตัวบ่งชี้ (Indicator) ถึงศักยภาพในการประหยัดพลังงานก็คือ ความสามารถในการต้านทานความร้อนของหลังคา เพราะปริมาณความร้อนจากอากาศภายนอกที่ถ่ายเทผ่านเข้ามาภายในอาคารโดยผ่านหลังคาจะมีปริมาณมากหรือน้อยแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติในความเป็นฉนวนของหลังคาแต่ละชนิด หลังคาที่มีความสามารถในการสกัดกั้นไม่ให้ความร้อนถ่ายเทผ่านจากด้านใดด้านหนึ่งของหลังคาไปยังอีกด้านหนึ่งได้ดี ทำให้ช่วยลดปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่ภายในอาคารได้มาก เป็นผลให้ลดภาระในการทำความเย็นของระบบปรับอากาศได้มากด้วย การคำนวณภาระในการทำความเย็นที่เกิดจากหลังคาสามารถคำนวณได้จากสมการ (1)

$$q = UA(CLTD) \quad \text{.....(1)}$$

เมื่อ

q = ภาระในการทำความเย็น มีหน่วยเป็น Btu / h. ft^2. °F

u = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน มีหน่วยเป็น Btu / h. ft^2. °F

A = พื้นที่ผิวของหลังคา มีหน่วยเป็น ft^2

CLTD = ภาระความแตกต่างความร้อนเทียบเท่าหรือ Cooling Load Temperature Difference มีหน่วยเป็น °F

จากสมการเบื้องต้นแสดงว่า ภาระในการทำความเย็นที่เกิดจากหลังคาที่เป็นส่วนหลังคาภายนอกนั้น มีความสัมพันธ์แบบแปรผันโดยตรงกับสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของหลังคานั้นๆ ดังแสดงได้ด้วยสมการ (2)

$$q \propto U \quad \text{.....(2)}$$

ดังนั้น ในกรณีที่ต้องการประเมินศักยภาพของหลังคาใดๆ เปรียบเทียบกัน โดยกำหนดให้หลังคานั้นมีพื้นที่และภาระความแตกต่างความร้อนเทียบเท่ากัน จะพบว่าตัวแปรที่สามารถนำมาใช้ในการประเมินค่าของการประหยัดพลังงานในระบบปรับอากาศก็คือ ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนหรือ ค่า U ของหลังคานั้นนั่นเอง หลังคาที่มีค่า U ยิ่งน้อยก็จะทำให้เกิดภาระในการทำความเย็นน้อยลงตามไปด้วย หรืออีกนัยหนึ่ง ค่า U ก็คือ ส่วนผกผันของค่าความต้านทานความร้อน หรือค่า R ของวัสดุนั้นๆ ซึ่งแสดงได้ด้วยสมการ (3)

$$U = 1/R \quad \text{.....(3)}$$

เมื่อ

U = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน มีหน่วยเป็น Btu / h. ft^2. °F

R = ค่าความต้านทานความร้อน มีหน่วยเป็น Btu / h. ft^2. °F

หมายความว่า หลังคาที่มีค่า R ยิ่งมาก ก็จะทำให้เกิดภาระในการทำความเย็นน้อยลงด้วยนั่นเอง ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของภาระทำความเย็น และค่าความต้านทานความร้อนได้ด้วยสมการ (4)

$$q \propto 1/R \quad \text{.....(4)}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อนึ่ง อาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนของวัสดุใด ๆ สามารถพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน หรือ ค่า C ของวัสดุนั้นๆ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนภายใต้สภาวะคงที่ หมายถึง ปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านพื้นที่ผิวของวัสดุ 1 ตารางหน่วย ที่มีความหนา 1 หน่วย ใน 1 หน่วยเวลา โดยมีความแตกต่างของอุณหภูมิผิววัสดุทั้ง 2 ด้าน 1 หน่วย แต่ในทางปฏิบัติหลังคาของอาคารโดยทั่วไปเกิดจากการนำวัสดุหลายชนิดที่มีคุณสมบัติ และมีความหนาแตกต่างกันมาประกอบกัน ค่าความนำความร้อนของวัสดุ หรือ ค่า C ของหลังคาใด ๆ คือ อัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่อความหนาของวัสดุ ซึ่งแสดงได้ด้วยสมการ (5)

$$C = k / \Delta x \quad \text{.....(5)}$$

เมื่อ

C = ค่าความนำความร้อนของวัสดุ มีหน่วยเป็น Btu / h. ft^2. °F

K = สัมประสิทธิ์การนำความร้อน มีหน่วย Btu / h. ft^2. °F

X = ความหนาของวัสดุ มีหน่วยเป็น ft^2

แต่คุณสมบัติที่แสดงถึงความเป็นฉนวนของวัสดุใด ๆ พิจารณาได้จากค่าความต้านทานความร้อนหรือ ค่า R ของวัสดุนั้น ค่า R เป็นตัวบ่งบอกถึงความสามารถในการสกัดกั้นความร้อนไม่ให้เคลื่อนที่ผ่านจากอากาศด้านหนึ่งไปยังอากาศอีกด้านหนึ่ง ค่าความต้านทานความร้อนของวัสดุมีค่าเท่ากับ ส่วนกลับของค่าความนำความร้อนของวัสดุนั้น ๆ นั่นเอง ซึ่งแสดงได้ด้วยสมการ

$$R = 1/C \quad \text{หรือ} \quad R = \Delta x / k \quad \text{..... (6)}$$

เมื่อ R = ค่าความต้านทานความร้อน มีหน่วยเป็น Btu / h. ft^2. °F

C = ค่าความนำความร้อนของวัสดุ มีหน่วยเป็น Btu / h. ft^2. °F

K = สัมประสิทธิ์การนำความร้อน มีหน่วยเป็น Btu / h. ft^2. °F

X = ความหนาของวัสดุ มีหน่วยเป็น ft^2

นอกจากคุณสมบัติในความเป็นฉนวนของวัสดุต่าง ๆ ที่ใช้ประกอบกันเป็นหลังคา จะเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อภาระในการทำความเย็นของระบบปรับอากาศแล้ว ความสามารถในการต้านทานความร้อนโดยรวมของหลังคายังขึ้นอยู่กับตัวแปรที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งคือ ความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศ ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถในการส่งผ่านความร้อนระหว่างผิววัตถุใดๆ กับ

อากาศที่อยู่โดยรอบขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศที่ผิวของวัตถุนั้น ความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ (ตารางที่ 3.1)

- ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศด้านนอก จะมีค่าเท่ากับ 0.25 Btu / h. ft^2. °F (Mechanical and Electrical Equipment for Buildings,1992)
- ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศด้านใน

ในกรณีของค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศด้านในนั้น จะขึ้นอยู่กับลักษณะของโครงสร้างของหลังคาอาคารด้วย ซึ่งจะทำให้ค่าที่นำมาใช้ในการคำนวณภาระในการทำความเย็นแตกต่างกันออกไปแล้วแต่กรณี ดังต่อไปนี้ (Mechanical and Electrical Equipment for Buildings,1992)

กรณีที่ 1 หลังคาติดตั้งฝ้าเพดานแนวราบ ความร้อนไหลขึ้น (Heat Flow Up)

- ไม่มีแผ่นสะท้อนรังสีสูงด้านบน จะมีค่าเท่ากับ 0.61 Btu / h. ft^2. °F
- มีแผ่นสะท้อนรังสีสูงด้านบน จะมีค่าเท่ากับ 1.32 Btu / h. ft^2. °F

กรณีที่ 2 หลังคาติดตั้งฝ้าเพดานแนวเอียง ความร้อนไหลขึ้น (Heat Flow Up)

- ไม่มีแผ่นสะท้อนรังสีสูงด้านบน จะมีค่าเท่ากับ 0.62 Btu / h. ft^2. °F
- มีแผ่นสะท้อนรังสีสูงด้านบน จะมีค่าเท่ากับ 1.37 Btu / h. ft^2. °F

กรณีที่ 3 หลังคาติดตั้งฝ้าเพดานแนวราบ ความร้อนไหลลง (Heat Flow Down)

- ไม่มีแผ่นสะท้อนรังสีสูงด้านบน จะมีค่าเท่ากับ 0.92 Btu / h. ft^2. °F
- มีแผ่นสะท้อนรังสีสูงด้านบน จะมีค่าเท่ากับ 4.55 Btu / h. ft^2. °F

กรณีที่ 4 หลังคาติดตั้งฝ้าเพดานแนวเอียง ความร้อนไหลลง (Heat Flow Down)

- ไม่มีแผ่นสะท้อนรังสีสูงด้านบน จะมีค่าเท่ากับ 0.76 Btu / h. ft^2. °F
- มีแผ่นสะท้อนรังสีสูงด้านบน จะมีค่าเท่ากับ 2.22 Btu / h. ft^2. °F

TABLE 4.3 Surface Conductances, *h* (Btu/h-ft²-F), and Resistances, *R*, for Air[a]

Position of Surface	Direction of Heat Flow	Surface Emittance: Non-reflective ε = 0.90		Reflective ε = 0.20		Reflective ε = 0.05	
		h_i	R	h_i	R	h_i	R
Still air							
Horizontal.....	Upward	1.63	0.61	0.91	1.10	0.76	1.32
Sloping (45°)	Upward	1.60	0.62	0.88	1.14	0.73	1.37
Vertical	Horizontal	1.46	0.68	0.74	1.35	0.59	1.70
Sloping (45°)	Downward	1.32	0.76	0.60	1.67	0.45	2.22
Horizontal.....	Downward	1.08	0.92	0.37	2.70	0.22	4.55
		h_o	R	h_o	R	h_o	R
Moving air (any position)							
15-mph wind (for winter)	Any	6.00	0.17				
7.5-mph wind (for summer)	Any	4.00	0.25				

NOTE: A surface cannot take credit for both an air space resistance value and a surface resistance value. No credit for an air space value can be taken for any surface facing an air space of less than 0.5 in.

Source: Copyright © by the American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA. Reprinted by permission, from 1989 *Handbook of Fundamentals*.

[a]Conductances are for surfaces of the stated emittance facing virtual blackbody surroundings at the same temperature as ambient air. Values are based on a surface-air temperature difference of 10 F and for surface temperature of 70 F.

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าการถ่ายเทความร้อนที่ผิววัสดุ (h) และค่าความต้านทานความร้อนของอากาศที่ผิววัสดุ(R) (Mechanical and Electrical Equipment for Buildings,1992)

นอกจากนี้ยังจะต้องคำนึงถึงค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศที่อยู่ภายในช่องว่างอากาศ ซึ่งมีค่าความต้านทานความร้อนที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับขนาดความกว้างของช่องว่างอากาศ และค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะของโครงสร้างของหลังคาด้วย เช่นเดียวกับกรณีของค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศ ดังแสดงในตารางที่ 3.2

TABLE 4.4 Thermal Resistances of Plane[a] Air Spaces

SECTION A

All resistance values expressed in $ft^2 \cdot F \cdot h/Btu$

Values apply only to air spaces of uniform thickness bounded by plane, smooth, parallel surfaces with no leakage of air to or from the space. These conditions are not normally present in standard building construction. When accurate values are required, use overall *U*-factors determined for your particular construction through calibrated hot box (ASTM C976) or guarded hot box (ASTM-C-236) testing. Thermal resistance values for multiple air spaces must be based on careful estimates of mean temperature differences for each air space.

Position of Air Space	Direction of Heat Flow	Air Space Mean Temp.,[b] (F)	Air Space Temp Diff.,[b] (deg F)	0.5-in. Air Space[d] Value of $E^{b,c}$ 0.03	0.05	0.2	0.5	0.82	0.75-in. Air Space[d] Value of $E^{b,c}$ 0.03	0.05	0.2	0.5	0.82
Horiz.	Up ↑	90	10	2.13	2.03	1.51	0.99	0.73	2.34	2.22	1.61	1.04	0.75
		50	30	1.62	1.57	1.29	0.96	0.75	1.71	1.66	1.35	0.99	0.77
		50	10	2.13	2.05	1.60	1.11	0.84	2.30	2.21	1.70	1.16	0.87
		0	20	1.73	1.70	1.45	1.12	0.91	1.83	1.79	1.52	1.16	0.93
		0	10	2.10	2.04	1.70	1.27	1.00	2.23	2.16	1.78	1.31	1.02
		−50	20	1.69	1.66	1.49	1.23	1.04	1.77	1.74	1.55	1.27	1.07
		−50	10	2.04	2.00	1.75	1.40	1.16	2.16	2.11	1.84	1.46	1.20
45° Slope	Up ↗	90	10	2.44	2.31	1.65	1.06	0.76	2.96	2.78	1.88	1.15	0.81
		50	30	2.06	1.98	1.56	1.10	0.83	1.99	1.92	1.52	1.08	0.82
		50	10	2.55	2.44	1.83	1.22	0.90	2.90	2.75	2.00	1.29	0.94
		0	20	2.20	2.14	1.76	1.30	1.02	2.13	2.07	1.72	1.28	1.00
		0	10	2.63	2.54	2.03	1.44	1.10	2.72	2.62	2.08	1.47	1.12
		−50	20	2.08	2.04	1.78	1.42	1.17	2.05	2.01	1.76	1.41	1.16
		−50	10	2.62	2.56	2.17	1.66	1.33	2.53	2.47	2.10	1.62	1.30
Vertical	Horiz. →	90	10	2.47	2.34	1.67	1.06	0.77	3.50	3.24	2.08	1.22	0.84
		50	30	2.57	2.46	1.84	1.23	0.90	2.91	2.77	2.01	1.30	0.94
		50	10	2.66	2.54	1.88	1.24	0.91	3.70	3.46	2.35	1.43	1.01
		0	20	2.82	2.72	2.14	1.50	1.13	3.14	3.02	2.32	1.58	1.18
		0	10	2.93	2.82	2.20	1.53	1.15	3.77	3.59	2.64	1.73	1.26
		−50	20	2.90	2.82	2.35	1.76	1.39	2.90	2.83	2.36	1.77	1.39
		−50	10	3.20	3.10	2.54	1.87	1.46	3.72	3.60	2.87	2.04	1.56
45° Slope	Down ↘	90	10	2.48	2.34	1.67	1.06	0.77	3.53	3.27	2.10	1.22	0.84
		50	30	2.64	2.52	1.87	1.24	0.91	3.43	3.23	2.24	1.39	0.99
		50	10	2.67	2.55	1.89	1.25	0.92	3.81	3.57	2.40	1.45	1.02
		0	20	2.91	2.80	2.19	1.52	1.15	3.75	3.57	2.63	1.72	1.26
		0	10	2.94	2.83	2.21	1.53	1.15	4.12	3.91	2.81	1.80	1.30
		−50	20	3.16	3.07	2.52	1.86	1.45	3.78	3.65	2.90	2.05	1.57
		−50	10	3.26	3.16	2.58	1.89	1.47	4.35	4.18	3.22	2.21	1.66
Horiz.	Down ↓	90	10	2.48	2.34	1.67	1.06	0.77	3.55	3.29	2.10	1.22	0.85
		50	30	2.66	2.54	1.88	1.24	0.91	3.77	3.52	2.38	1.44	1.02
		50	10	2.67	2.55	1.89	1.25	0.92	3.84	3.59	2.41	1.45	1.02
		0	20	2.94	2.83	2.20	1.53	1.15	4.18	3.96	2.83	1.81	1.30
		0	10	2.96	2.85	2.22	1.53	1.16	4.25	4.02	2.87	1.82	1.31
		−50	20	3.25	3.15	2.58	1.89	1.47	4.60	4.41	3 36	2.28	1.69
		−50	10	3.28	3.18	2.60	1.90	1.47	4.71	4.51	3.42	2.30	1.71

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าความต้านทานความร้อนรวมของช่องอากาศ (Mechanical and Electrical Equipment for Buildings,1992)

Position of Air Space	Direction of Heat Flow	Air Space Mean Temp.,[b] (F)	Air Space Temp Diff.,[b] (deg F)	1.5-in. Air Space[d] Value of $E^{b,c}$ 0.03	0.05	0.2	0.5	0.82	3.5-in. Air Space[d] Value of $E^{b,c}$ 0.03	0.05	0.2	0.5	0.82
Horiz	Up ↑	90	10	2.55	2.41	1.71	1.08	0.77	2.84	2.66	1.83	1.13	0.80
		50	30	1.87	1.81	1.45	1.04	0.80	2.09	2.01	1.58	1.10	0.84
		50	10	2.50	2.40	1.81	1.21	0.89	2.80	2.66	1.95	1.28	0.93
		0	20	2.01	1.95	1.63	1.23	0.97	2.25	2.18	1.79	1.32	1.03
		0	10	2.43	2.35	1.90	1.38	1.06	2.71	2.62	2.07	1 47	1.12
		−50	20	1.94	1.91	1.68	1.36	1.13	2.19	2.14	1.86	1.47	1.20
		−50	10	2.37	2.31	1.99	1.55	1.26	2.65	2.58	2.18	1.67	1.33
45° Slope	Up ↗	90	10	2.92	2.73	1.86	1.14	0.80	3.18	2.96	1.97	1.18	0.82
		50	30	2.14	2.06	1.61	1.12	0.84	2.26	2.17	1.67	1.15	0.86
		50	10	2.88	2.74	1.99	1.29	0.94	3.12	2.95	2.10	1.34	0.96
		0	20	2.30	2.23	1.82	1.34	1.04	2.42	2.35	1.90	1.38	1.06
		0	10	2.79	2.69	2.12	1.49	1.13	2.98	2.87	2.23	1.54	1.16
		−50	20	2.22	2.17	1.88	1.49	1.21	2.34	2.29	1.97	1.54	1.25
		−50	10	2.71	2.64	2.23	1.69	1.35	2.87	2.79	2.33	1.75	1.39
Vertical	Horiz. →	90	10	3.99	3.66	2.25	1.27	0.87	3.69	3.40	2.15	1.24	0.85
		50	30	2.58	2.46	1.84	1.23	0.90	2.67	2.55	1.89	1.25	0.91
		50	10	3.79	3.55	2.39	1.45	1.02	3.63	3.40	2.32	1.42	1.01
		0	20	2.76	2.66	2.10	1.48	1.12	2.88	2.78	2.17	1.51	1.14
		0	10	3.51	3.35	2.51	1.67	1.23	3.49	3.33	2.50	1.67	1.23
		−50	20	2.64	2.58	2.18	1.66	1.33	2.82	2.75	2.30	1.73	1.37
		−50	10	3.31	3.21	2.62	1.91	1.48	3.40	3.30	2.67	1.94	1.50
45° Slope	Down ↘	90	10	5.07	4.55	2.56	1.36	0.91	4.81	4.33	2.49	1.34	0.90
		50	30	3.58	3 36	2.31	1.42	1.00	3.51	3.30	2.28	1.40	1.00
		50	10	5 10	4.66	2.85	1.60	1.09	4.74	4.36	2.73	1.57	1.08
		0	20	3.85	3.66	2.68	1.74	1.27	3.81	3.63	2.66	1.74	1.27
		0	10	4.92	4.62	3.16	1.94	1.37	4.59	4.32	3.02	1.88	1.34
		−50	20	3.62	3.50	2.80	2.01	1.54	3.77	3.64	2.90	2.05	1.57
		−50	10	4.67	4.47	3.40	2.29	1.70	4.50	4.32	3.31	2.25	1 68
Horiz.	Down ↓	90	10	6.09	5.35	2.79	1.43	0.94	10.07	8.19	3.41	1.57	1.00
		50	30	6.27	5.63	3.18	1.70	1.14	9.60	8.17	3.86	1.88	1.22
		50	10	6 61	5.90	3.27	1.73	1.15	11.15	9.27	4.09	1.93	1.24
		0	20	7.03	6.43	3.91	2.19	1.49	10.90	9.52	4.87	2.47	1.62
		0	10	7.31	6.66	4.00	2.22	1.51	11.97	10.32	5.08	2.52	1.64
		−50	20	7.73	7.20	4.77	2.85	1.99	11.64	10.49	6.02	3.25	2.18
		−50	10	8.09	7.52	4.91	2.89	2.01	12.98	11.56	6.36	3.34	2.22

(continued)

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าความต้านทานความร้อนรวมของช่องอากาศ (Mechanical and Electrical Equipment for Buildings,1992)

TABLE 4.4 **Thermal Resistance of Plane[a] Air Spaces (*Continued*)**

Section B. Reflectivity and Emittance Values of Various Surfaces and Effective Emittances of Airspaces[f]

Surface	Average Emittance ε	Effective Emittance E of Airspace: One Surface Emittance ε; the Other 0.90	Effective Emittance E of Airspace: Both Surfaces Emittances ε
Aluminum foil, bright	0.05	0.05	0.03
Aluminum foil, with condensate just visible (>0.7 gr/ft²)	0.30[g]	0.29	—
Aluminum foil, with condensate clearly visible (>2.9 gr/ft²)	0.70[g]	0.65	—
Aluminum sheet	0.12	0.12	0.06
Aluminum coated paper, polished	0.20	0.20	0.11
Steel, galvanized, bright	0.25	0.24	0.15
Aluminum paint	0.50	0.47	0.35
Building materials: wood, paper, masonry, nonmetallic paints	0.90	0.82	0.82
Regular glass	0.84	0.77	0.72

Source: Copyright © by the American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, Ga. Reprinted by permission from 1989 *Handbook of Fundamentals*.

[a] Thermal resistance values were determined from the relation $R = 1/C$, where $C = h_c + Eh_r$, h_c is the conduction–convection coefficient, Eh_r is the radiation coefficient $\cong 0.00686E[(t_m + 460)/100]^3$, and t_m is the mean temperature of the airspace. Values for h_c were determined from research data (National Bureau of Standards), such as those presented in 1954 in Housing Research Paper 32 (HRP No. 32) by the Housing and Home Finance Agency (Government Printing Office, Washington, D.C.). For interpolation from Table 4.4 to airspace thicknesses less than 0.5 in. (as in insulating window glass), assume that

$$h_c = 0.159(1 + 0.0016t_m)/l$$

where l is the thickness in inches, and h_c is assumed to represent heat transfer by conduction alone through air.

[b] Interpolation is permissible for other values of mean temperature, temperature differences, and effective emittance E. Interpolation and moderate extrapolation for airspaces greater than 3.5 in. are also permissible.

[c] Effective emittance of the space E is given by $1/E = 1/e_1 + 1/e_2 - 1$, *where* e_1 and e_2 are the emittances of the surfaces of the airspace.

[d] Credit for an airspace resistance value cannot be taken more than once and only for the boundary conditions established.

[e] Resistances of horizontal spaces with heat flow downward are substantially independent of temperature difference.

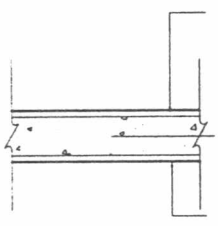
[f] These values apply in the 4- to 40-μm range of the electromagnetic spectrum.

[g] From M. R. Bassett, and H. A. Trethowen, 1984, "Effect of Condensation on Emittance of Reflective Insulation," *Journal of Thermal Insulation*, Vol. 8, October, p. 127.

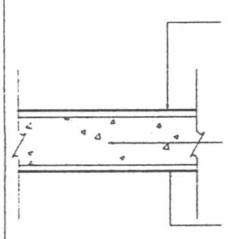
ตารางที่ 3.3 แสดงค่าการต้านทานความร้อนรวมของช่องว่างอากาศ (Mechanical and Electrical Equipment for Buildings,1992)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

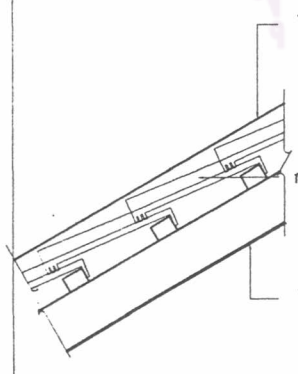
หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 12ซม.ไม่มีฝ้าเพดาน

ส่วนประกอบของหลังคา	ความหนา (นิ้ว)	ค่า Rต่อนิ้ว	ค่า R ที่ความหนา	หน่วย	ที่มาค่า R
	= 4.80 "	0.100	= 0.250 = 0.480 = 0.920 ค่า R รวม = 1.650 ค่า U = 0.606	ft^2 . h. F/Btu ft^2 . h. F/Btu ft^2 . h. F/Btu ft^2 . h. F/Btu Btu/h.ft.F	Air film outside MEEB Concrete-Sand&Grav.Not dried Air film inside-flowdow MEEB

หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 15ซม.ไม่มีฝ้าเพดาน

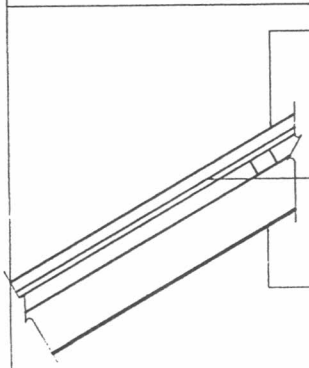
ส่วนประกอบของหลังคา	ความหนา (นิ้ว)	ค่า Rต่อนิ้ว	ค่า R ที่ความหนา	หน่วย	ที่มาค่า R
	= 6.00 "	0.100	= 0.250 = 0.600 = 0.920 ค่า R รวม = 1.770 ค่า U = 0.565	ft^2 . h. F/Btu ft^2 . h. F/Btu ft^2 . h. F/Btu ft^2 . h. F/Btu Btu/h.ft.F	Air film outside MEEB Concrete-Sand&Grav.Not dried Air film inside-flowdow MEEB

กระเบื้องซีแพคโมเนีย หนา 15 มม.ไม่มีฝ้าเพดาน

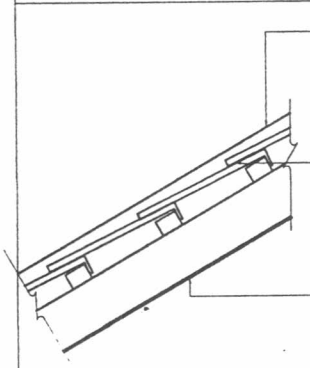
ส่วนประกอบของหลังคา	ความหนา (นิ้ว)	ค่า Rต่อนิ้ว	ค่า R ที่ความหนา	หน่วย	ที่มาค่า R
	= 0.60 "	0.100	= 0.250 = 0.060 = 0.760 ค่า R รวม = 1.070 ค่า U = 0.935	ft^2 . h. F/Btu ft^2 . h. F/Btu ft^2 . h. F/Btu ft^2 . h. F/Btu Btu/h.ft.F	Air film outside MEEB Concrete-Sand&Grav.Not dried Air film inside-flowdow MEEB

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

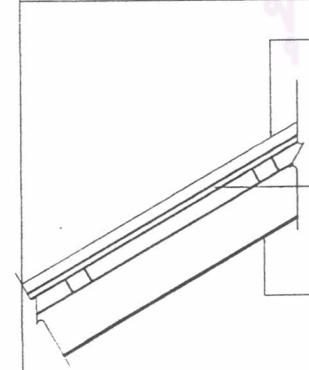
หลังคากระเบื้องลอนคู่ หนา 5 มม.ไม่มีฝ้าเพดาน

ส่วนประกอบของหลังคา	ความหนา (นิ้ว)	ค่า Rต่อนิ้ว	ค่า R ที่ความหนา	หน่วย	ที่มาค่า R
	= 0.02 *	0.250	= 0.250	ft^2 . h. F/Btu	Air film outside MEEB
			= 0.050	ft^2 . h. F/Btu	Asbestos Cement sheet MEEB
			= 0.760	ft^2 . h. F/Btu	Air film inside-flowdow MEEB
		ค่า R รวม	= 1.060	ft^2 . h. F/Btu	
		ค่า U	= 0.943	Btu/h.ft.F	

หลังคากระเบื้องดินเผา หนา 8 มมไม่มีฝ้าเพดาน

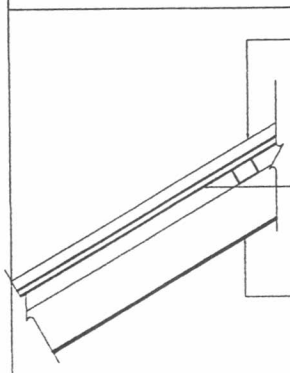
ส่วนประกอบของหลังคา	ความหนา (นิ้ว)	ค่า Rต่อนิ้ว	ค่า R ที่ความหนา	หน่วย	ที่มาค่า R
	= 0.32 *	0.100	= 0.250	ft^2 . h. F/Btu	Air film outside MEEB
			= 0.032	ft^2 . h. F/Btu	Asbestos Cement sheet MEEB
			= 0.760	ft^2 . h. F/Btu	Air film inside-flowdow MEEB
		ค่า R รวม	= 1.042	ft^2 . h. F/Btu	
		ค่า U	= 0.960	Btu/h.ft.F	

หลังคาแผ่นโลหะ หนา 0.1 มม. ไม่มีฝ้าเพดาน

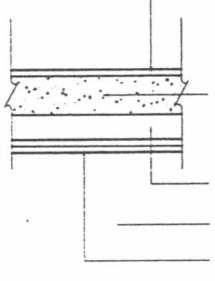
ส่วนประกอบของหลังคา	ความหนา (นิ้ว)	ค่า Rต่อนิ้ว	ค่า R ที่ความหนา	หน่วย	ที่มาค่า R
	= 0.04 *	0.008	= 0.250	ft^2 . h. F/Btu	Air film outside MEEB
			= 0.000	ft^2 . h. F/Btu	Alluminum commercial sheet Ashrae data chap38.4
			= 0.760	ft^2.h. F/Btu	Air film inside-flowdow MEEB
		ค่า R รวม	= 1.010	ft^2.h. F/Btu	
		ค่า U	= 0.990	Btu/h.ft^2. F	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

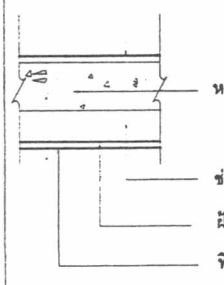
หลังคากะสี หนา 0.5 มม. ไม่มีฝ้าเพดาน

ส่วนประกอบของหลังคา	ความหนา (นิ้ว)	ค่า Rต่อนิ้ว	ค่า R ที่ความหนา	หน่วย	ที่มาค่า R
	= 0.02 *	0.016	= 0.250 = 0.000 = 0.760 ค่า R รวม = 1.010 ค่า U = 0.990	ft^2 . h. F/Btu ft^2 . h. F/Btu ft^2.h. F/Btu ft^2.h. F/Btu Btu/h.ft^2. F	Air film outside MEEB Zync hot rolled-Ashrae data chap38.4 Air film inside-flowdow MEEB

หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 12 ซม.ฝ้าเพดานยิปซั่มบอรด์หนา 9 มม.

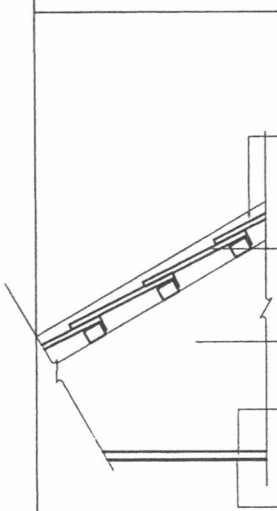
ส่วนประกอบของหลังคา	ความหนา (นิ้ว)	ค่า Rต่อนิ้ว	ค่า R ที่ความหนา	หน่วย	ที่มาค่า R
	= 4.80 * = 0.36	0.100	= 0.250 = 0.480 = 1.000 = 0.320 = 0.920 ค่า R รวม = 2.970 ค่า U = 0.337	ft^2 . h. F/Btu ft^2 . h. F/Btu ft^2 . h. F/Btu ft^2 . h. F/Btu ft^2.h. F/Btu ft^2.h. F/Btu Btu/h.ft^2. F	Air film outside MEEB Concrete-Sand&Grav.Not dried Air space-Horizontal flowdow MEEB Gypsum 0.5 in. MEEB Air film inside-flowdow MEEB

หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 15 ซม.ฝ้าเพดานยิปซั่มบอรด์หนา 9 มม.

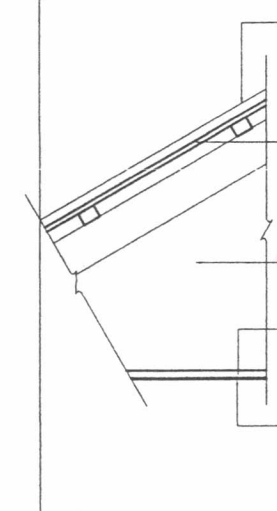
ส่วนประกอบของหลังคา	ความหนา (นิ้ว)	ค่า Rต่อนิ้ว	ค่า R ที่ความหนา	หน่วย	ที่มาค่า R
	= 6.00 * = 0.36	0.100	= 0.250 = 0.600 = 1.000 = 0.320 = 0.920 ค่า R รวม = 3.090 ค่า U = 0.324	ft^2 . h. F/Btu ft^2 . h. F/Btu ft^2 . h. F/Btu ft^2 . h. F/Btu ft^2.h. F/Btu ft^2.h. F/Btu Btu/h.ft^2. F	Air film outside MEEB Concrete-Sand&Grav.Not dried Air space-Horizontal flowdow MEEB Gypsum 0.5 in. MEEB Air film inside-flowdow MEEB

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หลังคากระเบื้องดินเผา หนา 8 มม. ฝ้าเพดานยิปซั่มบอรด์หนา 9 มม.

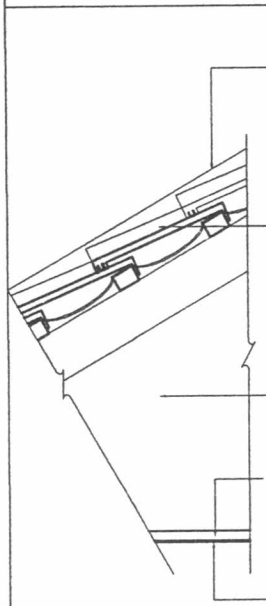
ส่วนประกอบของหลังคา	ความหนา (นิ้ว)	ค่า Rต่อนิ้ว	ค่า R ที่ความหนา	หน่วย	ที่มาค่า R
					
ฟิล์มอากาศด้านนอก			= 0.250	ft². h. F/Btu	Air film outside MEEB
กระเบื้องดินเผา หนา 8 มม.	= 0.32 *	0.100	= 0.032	ft². h F/Btu	Asbestos Cement sheet MEEB
ช่องว่างอากาศในหลังคา			= 1.000	ft². h. F/Btu	Air space-Horizontal flowdow MEEB
ฝ้าเพดานยิบซั่มบอร์ด หนา 9 มม.	= 0.36		= 0.320	ft². h. F/Btu	Gypsum 0.5 in. MEEB
ฟิล์มอากาศด้านใน			= 0.920	ft².h. F/Btu	Air film inside-flowdow MEEB
		ค่า R รวม	= 2.522	ft².h. F/Btu	
		ค่า U	= 0.397	Btu/h.ft . F	

หลังคาแผ่นโลหะ หนา 0.1 มม. ฝ้าเพดานยิปซั่มบอรด์หนา 9 มม.

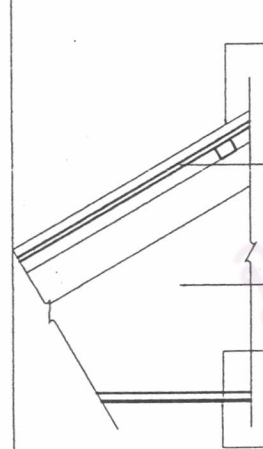
ส่วนประกอบของหลังคา	ความหนา (นิ้ว)	ค่า Rต่อนิ้ว	ค่า R ที่ความหนา	หน่วย	ที่มาค่า R
					
ฟิล์มอากาศด้านนอก			= 0.250	ft². h. F/Btu	Air film outside MEEB
แผ่นโลหะ หนา 0.1 มม.	= 0.04 *	0.008	= 0.000	ft². h. F/Btu	Zync hot rolled-Ashrae data chap38.4
ช่องว่างอากาศในหลังคา			= 1.000	ft². h. F/Btu	Air space-Horizontal flowdow MEEB
ฝ้าเพดานยิบซั่มบอร์ด หนา 9 มม.	= 0.36		= 0.320	ft². h. F/Btu	Gypsum 0.5 in. MEEB
ฟิล์มอากาศด้านใน			= 0.920	ft².h. F/Btu	Air film inside-flowdow MEEB
		ค่า R รวม	= 2.490	ft².h. F/Btu	
		ค่า U	= 0.402	Btu/h.ft². F	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หลังคากระเบื้องซีแพคโมเนีย หนา 15 มม.ฝ้าเพดานยิปซั่มบอรด์หนา 9 มม.

ส่วนประกอบของหลังคา	ความหนา (นิ้ว)	ค่า Rต่อนิ้ว	ค่า R ที่ความหนา	หน่วย	ที่มาค่า R
 ฟิล์มอากาศด้านนอก			= 0.250	ft^2. h. F/Btu	Air film outside MEEB
กระเบื้องซีแพคโมเนีย หนา 15 มม.	= 0.60 *	0.100	= 0.060	ft^2. h. F/Btu	Concrete-Sand&Grav.Not dried
ช่องว่างอากาศในหลังคา			= 1.000	ft^2. h. F/Btu	Air space-Horizontal flowdow MEEB
ฝ้าเพดานยิบซั่มบอร์ด หนา 9 มม.	= 0.36		= 0.320	ft^2. h. F/Btu	Gypsum 0.5 in. MEEB
ฟิล์มอากาศด้านใน			= 0.920	ft^2.h. F/Btu	Air film inside-flowdow MEEB
		ค่า R รวม	= 2.550	ft^2.h. F/Btu	
		ค่า U	= 0.392	Btu/h.ft^2. F	

หลังคากระเบื้องลอนคู่ หนา 5 มม. ฝ้าเพดานยิปซั่มบอรด์หนา 9 มม.

ส่วนประกอบของหลังคา	ความหนา (นิ้ว)	ค่า Rต่อนิ้ว	ค่า R ที่ความหนา	หน่วย	ที่มาค่า R
 ฟิล์มอากาศด้านนอก			= 0.250	ft^2. h. F/Btu	Air film outside MEEB
แผ่นลอนคู่ หนา 0.5 มม.	= 0.02 *	0.250	= 0.050	ft^2. h. F/Btu	Asbestos Cement sheet MEEB
ช่องว่างอากาศในหลังคา			= 1.000	ft^2. h. F/Btu	Air space-Horizontal flowdow MEEB
ฝ้าเพดานยิบซั่มบอร์ด หนา 9 มม.	= 0.36		= 0.320	ft^2. h. F/Btu	Gypsum 0.5 in. MEEB
ฟิล์มอากาศด้านใน			= 0.920	ft^2.h. F/Btu	Air film inside-flowdow MEEB
		ค่า R รวม	= 2.540	ft^2.h. F/Btu	
		ค่า U	= 0.394	Btu/h.ft^2. F	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หลังคาแผ่นสังกะสี หนา 0.5 มม. ฝ้าเพดานยิปซั่มบอร์ดหนา 9 มม.

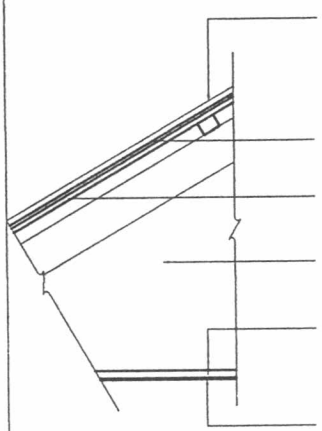
ส่วนประกอบของหลังคา	ความหนา (นิ้ว)	ค่า Rต่อนิ้ว	ค่า R ที่ความหนา	หน่วย	ที่มาค่า R
ฟิล์มอากาศด้านนอก			= 0.250	ft². h. F/Btu	Air film outside MEEB
แผ่นสังกะสี หนา 0.5 มม.	= 0.02 *	0.016	= 0.000	ft². h. F/Btu	Zync hot rolled-Ashrae data chap38.4
ช่องว่างอากาศในหลังคา			= 1.000	ft². h. F/Btu	Air space-Horizontal flowdow MEEB
ฝ้าเพดานยิบซั่มบอร์ด หนา 9 มม.	= 0.36		= 0.320	ft². h. F/Btu	Gypsum 0.5 in. MEEB
ฟิล์มอากาศด้านใน			= 0.920	ft². h. F/Btu	Air film inside-flowdow MEEB
		ค่า R รวม	= 2.490	ft². h. F/Btu	
		ค่า U	= 0.402	Btu/h.ft². F	

หลังคากระเบื้องซีแพคโมเนีย หนา 15 มม.+ฝ้าเพดานยิปซั่มบอร์ดหนา 9 มม.+ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว

ส่วนประกอบของหลังคา	ความหนา (นิ้ว)	ค่า Rต่อนิ้ว	ค่า R ที่ความหนา	หน่วย	ที่มาค่า R
ฟิล์มอากาศด้านนอก			= 0.250	ft². h. F/Btu	Air film outside MEEB
กระเบื้องซีแพคโมเนีย หนา 15 มม.	= 0.60 *	0.100	= 0.060	ft². h. F/Btu	Concrete-Sand&Grav.Not dried
ช่องว่างอากาศในหลังคา			= 1.000	ft². h. F/Btu	Air space-Horizontal flowdow MEEE
ฉนวนไฟม หนา 2 นิ้ว	= 2.00 *	4.000	= 8.000	ft². h. F/Btu	Glass fiber-MEEB
ฝ้าเพดานยิบซั่มบอร์ด หนา 9 มม.	= 0.36		= 0.320	ft². h. F/Btu	Gypsum 0.5 in. MEEB
ฟิล์มอากาศด้านใน			= 0.920	ft². h. F/Btu	Air film inside-flowdow MEEB
		ค่า R รวม	= 10.55	ft². h. F/Btu	
		ค่า U	= 0.095	Btu/h.ft². F	

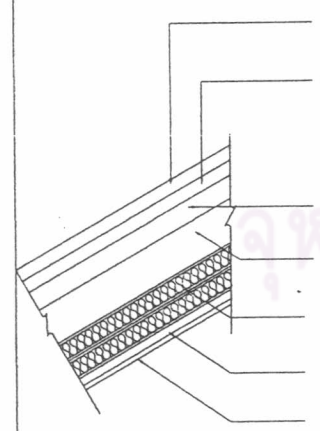
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หลังคาแผ่นโลหะ หนา 0.1 มม. ฝ้าเพดานยิปซั่มบอร์ดหนา 9 มม.+ฉนวน PU โฟม หนา 2 นิ้ว



ส่วนประกอบของหลังคา	ความหนา (นิ้ว)	ค่า Rต่อนิ้ว	ค่า R ที่ความหนา	หน่วย	ที่มาค่า R
ฟิล์มอากาศด้านนอก			= 0.250	ft². h. F/Btu	Air film outside MEEB
แผ่นโลหะ หนา 0.1 มม.	= 0.04 *	0.008	= 0.000	ft². h. F/Btu	Zync hot rolled-Ashrae data chap38.4
ฉนวน PU โฟม หนา 2 นิ้ว	= 2.00 *	6.000	= 12.000	ft². h. F/Btu	
ช่องว่างอากาศในหลังคา			= 1.000	ft². h. F/Btu	Air space-Horizontal flowdow MEEB
ฝ้าเพดานยิบซั่มบอร์ด หนา 9 มม.	= 0.36		= 0.320	ft². h. F/Btu	Gypsum 0.5 in. MEEB
ฟิล์มอากาศด้านใน			= 0.920	ft².h. F/Btu	Air film inside-flowdow MEEB
		ค่า R รวม	= 14.490	ft².h. F/Btu	
		ค่า U	= 0.069	Btu/h.ft². F	

หลังคาแผ่นแอสฟัลท์ หนา 5 มม.+ฝ้าเพดานยิปซั่มบอร์ดหนา 9 มม.+ฉนวนโฟม 6นิ้ว



ส่วนประกอบของหลังคา	ความหนา (นิ้ว)	ค่า Rต่อนิ้ว	ค่า R ที่ความหนา	หน่วย	ที่มาค่า R
ฟิล์มอากาศด้านนอก			= 0.250	ft². h. F/Btu	Air film outside MEEB
แผ่นแอสฟัลท์ หนา 5 มม.	= 0.20		= 0.440	ft². h. F/Btu	
แผ่นไม้อัด หนา 10 มม.	= 0.400	0.470	= 0.188	ft². h. F/Btu	
ช่องว่างอากาศในหลังคา			= 1.000	ft². h. F/Btu	
ฉนวนโฟม หนา 6 นิ้ว	= 6.00 *	4.000	= 24.000	ft². h. F/Btu	Polystyrene form-MEEB
ฝ้าเพดานยิบซั่มบอร์ด หนา 12 มม.	= 0.48		= 0.450	ft². h. F/Btu	Gypsum 0.5 in. MEEB
ฟิล์มอากาศด้านใน			= 0.760	ft².h. F/Btu	Air film inside-flowdow MEEB
		ค่า R รวม	= 27.088	ft².h. F/Btu	
		ค่า U	= 0.037	Btu/h.ft². F	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 การหาค่าน้ำหนักของตัวแปรในอาคารที่ติดตั้งระบบปรับอากาศ

ส่วนที่ 1 การประเมินประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานของหลังคาอาคารในด้านของการต้านทานความร้อนรวมของหลังคาแต่ละชนิด

ในกรณีของการประเมินประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานของหลังคาอาคาร จะใช้วิธีการรวบรวมหลังคาประเภทต่างๆ ที่ใช้ในการก่อสร้างในปัจจุบัน นำมาคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อนรวมของหลังคาแต่ละชนิดเพื่อนำมาเปรียบเทียบกัน โดยกำหนดให้หลังคานั้นมีพื้นที่และภาระความแตกต่างความร้อนเทียบเท่ากัน ซึ่งทำให้ทราบว่าตัวแปรที่สามารถนำมาใช้ในการประเมินประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานในระบบปรับอากาศก็คือ ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนหรือ ค่า U-VALUE ของหลังคานั้นนั่นเอง โดยที่หลังคาที่มีค่า U-VALUE ยิ่งน้อย ก็จะทำให้เกิดภาระในการทำความเย็นน้อยลงตามไปด้วย หรืออีกนัยหนึ่ง ค่า U-VALUE ก็คือ ส่วนผกผันของค่าความต้านทานความร้อน หรือค่า R ของวัสดุนั้นๆนั่นเอง ในการพิจารณาประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานของหลังคาอาคารในด้านของความต้านทานความร้อน ซึ่งจะแสดงผลออกมาเป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของวัสดุหลังคาแต่ละชนิด สามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของวัสดุหลังคาแต่ละชนิด

ในการที่จะหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (ค่า U-VALUE) ของวัสดุหลังคาแต่ละชนิดได้นั้น สิ่งแรกที่จะต้องคำนึงถึงก็คือ ต้องทราบถึงลักษณะโครงสร้างของหลังคาชนิดนั้นๆ เสียก่อน จึงจะสามารถนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้ โดยในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้กำหนดลักษณะโครงสร้างของหลังคาที่จะใช้ในการคำนวณมาจากการสำรวจรูปแบบของหลังคาที่มีการใช้งานกันอยู่ในปัจจุบันมาใช้ในการคำนวณ ซึ่งในขั้นตอนนี้จะทำการคำนวณแยกตามลักษณะโครงสร้างของหลังคาที่มีความแตกต่างกัน ดังที่ได้กล่าวมาในข้อ 3.1.1 เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนมาทำการเปรียบเทียบกัน ไม่ว่าจะเป็นหลังคาวัสดุชนิดเดียวกันแต่มีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกัน หรือวัสดุมุงหลังคาที่ต่างชนิดกันก็ตาม เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อนของวัสดุปกคลุมหลังคาที่แตกต่างกัน โดยมีรายละเอียดในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อน U-VALUE (ตารางภาคผนวก ก.) และตัวอย่างภาพประกอบแสดงการคำนวณดังต่อไปนี้

โดยจากการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (ค่า U-VALUE) ของวัสดุหลังคาแต่ละชนิดทั้งที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบัน และที่ทดลองนำวัสดุฉนวนกันความร้อนใส่เข้าไป สามารถสรุปค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (ค่า U-VALUE) ของวัสดุหลังคาแต่ละชนิด ที่คำนวณได้ดังต่อไปนี้

ลำดับ	ชนิดของหลังคา	ค่า R (ft^2. h. ^oF/Btu)	ค่า U-VALUE (Btu/h . ft^2 . ^oF)
1	หลังคาแผ่นแอสฟัลท์ มีฝ้าเพดานหนา 12 มม.+ฉนวนหนา 6 นิ้ว	25.620	0.039
2	หลังคากระเบื้องซีแพคโมเนีย มีฝ้าเพดาน+ฉนวนหนา2นิ้ว	21.370	0.047
3	หลังคาแผ่นโลหะ มีฝ้าเพดานหนา 9 มม.+ฉนวนหนา2นิ้ว	14.990	0.067
4	หลังคากระเบื้องซีแพคโมเนีย มีฝ้าเพดาน + แผ่นอลูมินั่มฟอยด์	13.370	0.075
5	หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 30 ซม มีฝ้าเพดาน+ฉนวนหนา2นิ้ว	11.690	0.086
6	หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 15 ซมมีฝ้าเพดาน+ฉนวนหนา2นิ้ว	11.090	0.090
7	หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 12 ซม มีฝ้าเพดาน+ฉนวนหนา2นิ้ว	10.970	0.091
8	หลังคากระเบื้องลอนคู่มีฝ้าเพดานหนา 9 มม.+ฉนวนหนา2นิ้ว	10.540	0.095
9	หลังคากระเบื้องดินเผามีฝ้าเพดานหนา 9 มม.+ฉนวนหนา2นิ้ว	10.522	0.095
10	หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 30 ซม มีฝ้าเพดานหนา 9 มม.	3.690	0.271
11	หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 15 ซม มีฝ้าเพดานหนา 9 มม.	3.090	0.324
12	หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 12 ซม มีฝ้าเพดานหนา 9 มม.	2.970	0.337
13	หลังคากระเบื้องซีแพคโมเนีย มีฝ้าเพดานหนา 9 มม.	2.550	0.392
14	หลังคากระเบื้องลอนคู่ มีฝ้าเพดาน หนา 9 มม.	2.540	0.394
15	หลังคากระเบื้องดินเผา มีฝ้าเพดานหนา 9 มม.	2.522	0.397
16	หลังคาแผ่นโลหะ มีฝ้าเพดานหนา 9 มม.	2.490	0.402
17	หลังคาสังกะสี มีฝ้าเพดานหนา 9 มม.	2.490	0.402
18	หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 30 ซม ไม่มีฝ้าเพดาน	2.370	0.422
19	หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 15 ซมไม่มีฝ้าเพดาน	1.770	0.565
20	หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 12 ซม ไม่มีฝ้าเพดาน	1.650	0.606
21	หลังคากระเบื้องซีแพคโมเนีย ไม่มีฝ้าเพดาน	1.070	0.935
22	หลังคากระเบื้องลอนคู่ ไม่มีฝ้าเพดาน	1.060	0.943
23	หลังคากระเบื้องดินเผาไม่มีฝ้าเพดาน	1.042	0.960
24	หลังคาแผ่นโลหะไม่มีฝ้าเพดาน	1.010	0.990
25	หลังคาสังกะสี ไม่มีฝ้าเพดาน	1.010	0.990

ตาราง 3.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U-VALUE) ของวัสดุหลังคาแต่ละชนิด

ขั้นตอนที่ 2 การวิเคราะห์และประเมินผลในด้านสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของหลังคาแต่ละชนิดที่ได้จากการคำนวณ

จากการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของหลังคาแต่ละชนิด พบว่าลักษณะของวัสดุปกคลุมหลังคาที่ไม่มีการติดตั้งฝ้าเพดาน จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด รองลงมาได้แก่ลักษณะของวัสดุปกคลุมหลังคาที่มีการติดตั้งฝ้าเพดาน ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับลักษณะของวัสดุปกคลุมหลังคาของอาคารที่ออกแบบตามแนวความคิดของการประหยัดพลังงาน โดยผู้เชี่ยวชาญด้านการใช้พลังงาน พบว่าหลังคาของอาคารบ้านประหยัดพลังงานมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของหลังคาที่ต่ำมาก ทั้งนี้สาเหตุเนื่องมาจากมีการติดตั้งระบบกันความร้อนที่สมบูรณ์แบบที่โครงสร้างของหลังคานั่นเอง โดยจากการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างหลังคาของอาคารบ้านประหยัดพลังงาน มีสิ่งที่แตกต่างจากหลังคาของอาคารทั่วไป คือ มีการติดตั้งระบบฉนวนกันความร้อนเพิ่มเติมที่บริเวณเหนือฝ้าเพดาน ซึ่งก็สามารถช่วยในการป้องกันความร้อนไม่ให้เข้าสู่ภายในอาคารได้เป็นอย่างมาก และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับลักษณะหลังคาของอาคารทั่วไป ก็จะพบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกันมากเช่นกัน ด้วยเหตุนี้สามารถสรุปได้ว่าอาคารที่มีการติดตั้งระบบปรับอากาศ หากจะกล่าวถึงวัสดุปกคลุมหลังคาในด้านของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนนั้น วัสดุปกคลุมหลังคาไม่ว่าจะเป็นชนิดใดก็ตาม หากมีการติดตั้งระบบฉนวนเพิ่มเติมเพื่อป้องกันความร้อนไม่ให้เข้ามาภายในอาคารได้อย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้ควรจะติดตั้งฉนวนกั้นระหว่างส่วนที่เป็นช่องว่างใต้หลังคากับพื้นที่ใช้งาน เพราะลักษณะการติดตั้งฉนวนดังกล่าวนี้ทำให้ความร้อนจากภายใต้ผิวหลังคาไม่สามารถถ่ายเทผ่านชั้นของฉนวนเข้าไปภายในอาคารได้ ทำให้เกิดประโยชน์จากการใช้วัสดุฉนวนได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ ซึ่งก็จะสามารถช่วยลดภาระในการทำความเย็นให้กับเครื่องปรับอากาศได้ ทั้งยังช่วยลดปริมาณการใช้พลังงานภายในอาคารลงอีกด้วย

ในส่วนของระบบหลังคาที่ออกแบบให้มีการระบายอากาศภายใต้หลังคานั้น จะพบว่ามีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าหลังคาที่ไม่มีการระบายอากาศภายใต้หลังคา โดยเปรียบเทียบกันในขณะที่มีความแตกต่างความร้อนของอุณหภูมิที่เทียบเท่ากัน สาเหตุเนื่องมาจากอากาศร้อนจากภายนอกที่ผ่านช่องระบายอากาศภายใต้หลังคาเข้าไปสะสมอยู่ภายใน การถ่ายเทความร้อนจึงเกิดขึ้นจากอากาศภายในช่องใต้หลังคาผ่านลงสู่อาคารโดยตรง ลักษณะดังกล่าวจึงเปรียบเสมือนชั้นของวัสดุมุงหลังคาและชั้นของวัสดุอื่นๆ ที่อยู่เหนือช่องระบายอากาศใต้หลังคาดังกล่าวไม่ได้มีส่วนช่วยในการสกัดกั้นความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ภายใน มีเฉพาะแต่เพียงชั้นของฝ้าเพดานที่กั้นอยู่ระหว่างช่องระบายอากาศใต้หลังคาและพื้นที่ใช้งานเท่านั้นที่ทำหน้าที่สกัดกั้นความร้อนไม่ให้ถ่ายเทเข้าสู่ภายในอาคาร ดังนั้นจึงทำให้หลังคาที่มีการระบายอากาศภายใต้หลังคานั้นมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าหลังคาที่ไม่มีการระบายอากาศภายใต้หลังคา แต่ถ้า

ศึกษาถึงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของหลังคาอาคารบ้านประหยัดพลังงาน ซึ่งออกแบบให้มีการระบายอากาศภายใต้หลังคา แต่มีศักยภาพในการต้านทานความร้อนสูงกว่าหลังคาอาคารที่ไม่มีการระบายอากาศภายใต้หลังคา ทั้งนี้จากการศึกษาแนวความคิดในการออกแบบหลังคาของอาคารบ้านประหยัดพลังงานพบว่า(สุนทร บุญญาธิการ, 2542) แม้อุณหภูมิผิวหลังคาจะค่อนข้างสูงในเวลากลางวัน แต่มีระบบระบายอากาศที่อยู่ใต้หลังคา เพื่อช่วยระบายความร้อนออกไป ทำให้อิทธิพลของความร้อนจากหลังคามีผลต่ออุณหภูมิภายในบ้านน้อยมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อความร้อนดังกล่าวซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากการระบายออกไม่หมดจะต้องผ่านชั้นของฉนวนที่อยู่ภายใต้ช่องว่างอากาศก่อนเข้าถึงภายในตัวบ้านการระบายอากาศดังกล่าวจะแปรผันตามปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นกล่าวคือ ถ้าความร้อนที่เกิดขึ้นมีมากการระบายอากาศก็จะเกิดขึ้นมากด้วย ปรากฏการณ์ดังกล่าวค่อนข้างจะเป็นอิสระต่ออิทธิพลของความเร็วลมภายนอก อย่างไรก็ตามในวันที่ไม่ค่อยมีลม อุณหภูมิภายใต้หลังคาจะร้อนกว่าวันที่มีลมบ้างเล็กน้อย แต่การมีปริมาณฉนวนอย่างเพียงพอและการระบายอากาศด้านบนผนวกกับการใช้วัสดุต่างๆ อย่างถูกวิธี จะทำให้ความร้อนเข้าสู่อาคารได้ค่อนข้างน้อย ส่วนในเวลากลางคืนเนื่องจากหลังคาดังกล่าวมีมวลสารน้อย จึงใช้เวลาเพียงประมาณครึ่งชั่วโมงหลังจากพระอาทิตย์ตกดิน เพื่อทำให้อุณหภูมิภายในช่องว่างอากาศใต้หลังคาใกล้เคียงกับอากาศภายนอก จากนั้นอุณหภูมิผิวหลังคาก็จะเย็นลงจนต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศ เนื่องจากไม่มีความร้อนสะสม จึงทำให้ผิวหลังคาในเวลากลางคืนเย็นลงตลอดเวลา หลังคาจึงทำหน้าที่เป็นเสมือนเครื่องป้องกันความร้อน หนาวให้กับตัวบ้าน โดยไม่เกิดความร้อนหรือเย็นจนเกินไปตลอดเวลา

อย่างไรก็ตาม ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของหลังคาแต่ละชนิดนั้น ยังมีอีกสิ่งหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงและนำมาใช้ในการคำนวณ เพราะจะทำให้มีผลต่อกระบวนการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงไป คือ ระบบหลังคาที่มีการติดตั้งฝ้าเพดานที่แตกต่างกัน โดยในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้แยกวิธีการในการคำนวณออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ระบบหลังคาที่มีการติดตั้งฝ้าเพดานในแนวราบ และระบบหลังคาที่มีการติดตั้งฝ้าเพดานในแนวเอียง ซึ่งผลจากการคำนวณค่าความต้านทานความร้อนรวมของหลังคา พบว่าระบบหลังคาที่มีการติดตั้งฝ้าเพดานในแนวเอียงจะมีค่าความต้านทานความร้อนรวมต่ำกว่าระบบหลังคาที่มีการติดตั้งฝ้าเพดานในแนวราบ ทั้งนี้จากการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่าสาเหตุเนื่องมาจากระบบหลังคาที่มีการติดตั้งฝ้าเพดานในแนวเอียงจะมีค่าความต้านทานความร้อนในช่องว่างอากาศใต้หลังคาเท่ากับ 0.90 ft^2. $^{\circ}F.h/Btu$(MEEB, 1992) และค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศภายในท่ากับ 0.76 ft^2. $^{\circ}F.h/Btu$(MEEB, 1992) ต่ำกว่าระบบหลังคาที่มีการติดตั้งฝ้าเพดานในแนวราบที่มีค่าความต้านทานความร้อนในช่องว่างอากาศใต้หลังคาเท่ากับ 1.00 ft^2. $^{\circ}F.h/Btu$(MEEB, 1992) และค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศภายในเท่ากับ 0.92 ft^2. $^{\circ}F.h/Btu$(MEEB, 1992) ดังนั้นจึงส่งผล

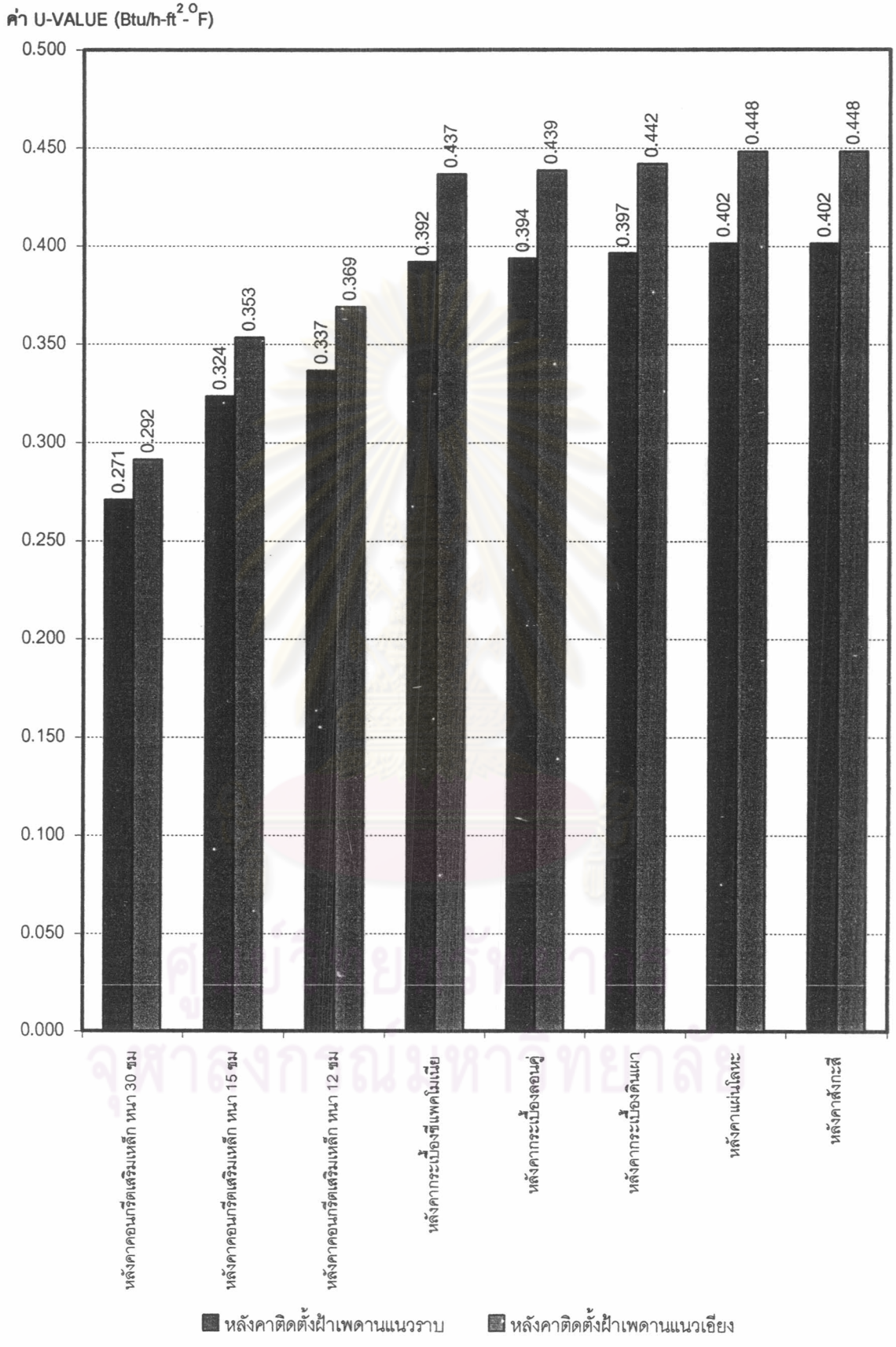
ทำให้ระบบหลังคาที่มีการติดตั้งฝ้าเพดานในแนวเอียงมีค่าความต้านทานความร้อนรวมต่ำกว่าระบบหลังคาที่มีการติดตั้งฝ้าเพดานในแนวราบนั่นเอง อนึ่งผลจากการคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อนรวมของระบบหลังคาที่มีการติดตั้งฝ้าเพดานทั้งในแนวราบและแนวเอียง ยังสามารถสรุปได้ว่ามีค่าความต้านทานความร้อนรวมที่ไม่แตกต่างกันมากนัก หลังคาที่มีการติดตั้งฝ้าเพดานในแนวเอียงถ้าหากมีการติดตั้งฉนวนกันความร้อนไม่ให้ผ่านเข้ามาภายในอาคารที่ดี ก็จะทำให้อาคารมีพื้นที่ใช้งานในห้องใต้หลังคาได้เพิ่มขึ้น ซึ่งถ้ามองในแง่ของประโยชน์ใช้สอยพบว่าเหมาะสำหรับอาคารที่มีพื้นที่ในการใช้งานน้อย แต่ต้องการใช้ประโยชน์จากพื้นที่ของอาคารที่มีอยู่ได้อย่างเต็มที่

ขั้นตอนที่ 3 สรุปประสิทธิภาพของหลังคาแต่ละชนิดในด้านการต้านทานความร้อนรวมที่ได้จากการคำนวณ

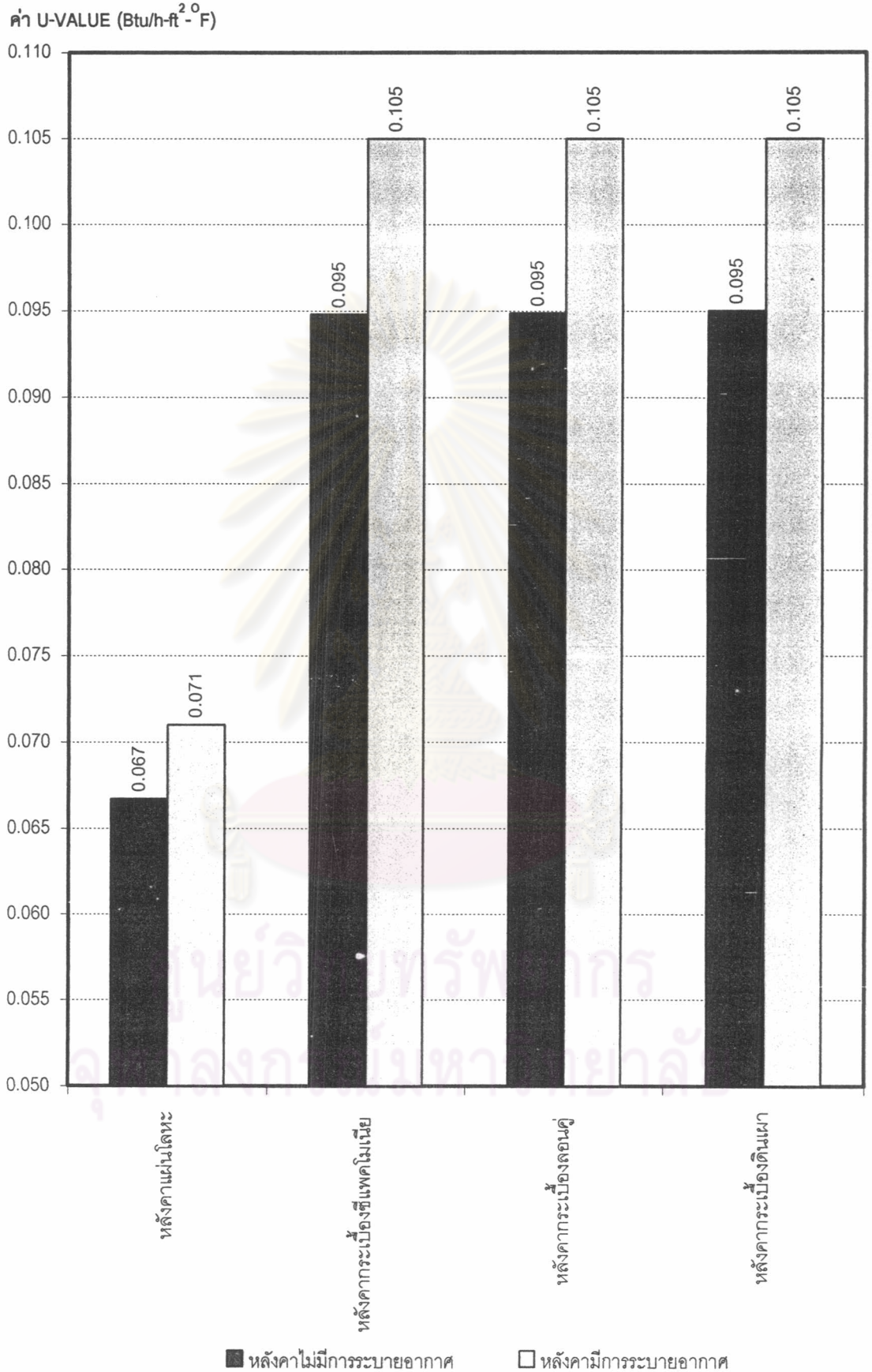
จากการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างและชนิดของวัสดุปกคลุมหลังคาแต่ละประเภทที่มีการใช้กันอยู่ในปัจจุบันในขั้นตอนที่ 2 สามารถสรุปคุณสมบัติของวัสดุปกคลุมหลังคาที่แสดงผลออกมาเป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (ค่า U-VALUE) โดยแบ่งตามลักษณะของโครงสร้างและองค์ประกอบของหลังคาแต่ละชนิดดังต่อไปนี้

- หลังคาที่ไม่มีการติดตั้งฝ้าเพดาน
- หลังคาที่มีการติดตั้งฝ้าเพดาน (กำหนดความหนา 9 มิลลิเมตร)
- หลังคาที่มีการติดตั้งฝ้าเพดานและติดตั้งระบบฉนวนกันความร้อน
- หลังคาที่มีการติดตั้งฝ้าเพดานในแนวราบและแนวเอียง
- หลังคาที่มีระบบการระบายอากาศภายใต้หลังคาและหลังคาที่ไม่มีระบบการระบายอากาศภายใต้หลังคา

โดยจากตารางผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (ค่า U-VALUE) ของวัสดุปกคลุมหลังคาแต่ละชนิดแบ่งตามลักษณะของโครงสร้างหลังคาดังกล่าวข้างต้น พบว่าคุณสมบัติของวัสดุปกคลุมหลังคาแต่ละชนิดที่มีความแตกต่างกันน้อยที่สุด คือ หลังคาที่มีการติดตั้งฝ้าเพดานในแนวราบและแนวเอียง (แผนภูมิที่ 3.1) สาเหตุเนื่องมาจากผลจากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ได้ออกมามีค่าใกล้เคียงกันมากจนเกือบที่จะไม่มีความแตกต่างกันเลย ทั้งนี้ในการติดตั้งฝ้าเพดานแนวราบหรือแนวเอียง อาจจะมีประโยชน์ในด้านอื่นๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น



แผนภูมิ 3.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U-VALUE) ของหลังคาที่ติดตั้งฝ้าเพดานแนวราบกับหลังคาที่ติดตั้งฝ้าเพดานแนวเอียง



แผนภูมิที่ 3.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

อีกส่วนหนึ่งคือ หลังคาที่มีระบบการระบายอากาศภายใต้หลังคาและหลังคาที่ไม่มีระบบการระบายอากาศภายใต้หลังคา จากผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (ค่า U-VALUE) พบว่ามีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยในกรณีที่มีการติดตั้งฝ้าเพดาน แต่เมื่อมีการติดตั้งระบบฉนวนกันความร้อนที่ดีและถูกต้อง ก็จะพบว่าค่าที่ได้มาจากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกันมาก (แผนภูมิที่ 3.2) เช่นเดียวกับในกรณีของหลังคาที่มีการตั้งฝ้าเพดานแนวราบหรือแนวเอียง โดยในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะไม่นำมาคิดคำนวณเปรียบเทียบในส่วนของปริมาณความร้อนที่เข้ามาภายในอาคาร

สรุปผลจากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (ค่า U-VALUE) ของวัสดุปกคลุมหลังคาแต่ละชนิดแบ่งตามลักษณะโครงสร้างของหลังคาดังกล่าวข้างต้น พบว่าคุณสมบัติของวัสดุปกคลุมหลังคาแต่ละชนิดที่มีความแตกต่างกันมากที่สุดและสามารถนำเอามาใช้เป็นเครื่องมือในการเปรียบเทียบกัน เพื่อเป็นตัวบ่งชี้ถึงศักยภาพในการที่จะประเมินประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานของหลังคาอาคารได้ดีที่สุดก็คือ

- หลังคาที่ไม่มีการติดตั้งฝ้าเพดาน
- หลังคาที่มีการติดตั้งฝ้าเพดาน (กำหนดความหนา 9 มิลลิเมตร)
- หลังคาที่มีการติดตั้งฝ้าเพดานและติดตั้งระบบฉนวนกันความร้อนหนา 2 นิ้ว

เนื่องจากลักษณะของโครงสร้างหลังคาดังกล่าวข้างต้น มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกันมาก อีกทั้งยังเป็นลักษณะของวัสดุปกคลุมหลังคาอาคารที่มีการใช้กันอยู่อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน จึงเป็นสาเหตุของการคัดเลือกนำมาใช้ในการคำนวณค่าปริมาณความร้อนที่จะผ่านลักษณะของวัสดุปกคลุมหลังคาอาคารดังกล่าวข้างต้นเข้ามาภายในอาคารเพื่อที่จะสามารถเปรียบเทียบและแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานของวัสดุปกคลุมหลังคาอาคารแต่ละชนิดที่ทำการคัดเลือกมาต่อไป

จากตารางที่ 3.4 สรุปผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การต้านทานความร้อน (ค่า U-VALUE) ของหลังคาแต่ละชนิด โดยแยกตามลักษณะของหลังคาได้ดังนี้

- หลังคาที่ไม่มีการติดตั้งฝ้าเพดาน พบว่า หลังคาสังกะสีและหลังคาแผ่นโลหะ จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากที่สุด คือ 0.990 Btu / h. ft^2. °F สำหรับหลังคาที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุด คือ หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 30 เซนติเมตร ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 0.422 Btu / h. ft^2. °F ทั้งนี้เนื่องจากหลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 30 เซนติเมตร เป็นหลังคาที่มีมวลสารมากจึงสามารถสะสมความร้อนไว้ได้มาก แต่ในทางกลับกัน ถ้าในเวลากลางคืนความร้อนที่สะสมอยู่ภายในก็จะคายความร้อนออกมาทำให้ภายในอาคารร้อนกว่าหลังคาชนิดอื่น

- หลังคาที่มีการติดตั้งฝ้าเพดานยิปซั่มบอร์ด หนา 9 มิลลิเมตรแนวราบพบว่า พบว่า หลังคาสังกะสีและหลังคาแผ่นโลหะ จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากที่สุด คือ 0.402 Btu / h. ft^2. °F สำหรับหลังคาที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุด คือ หลังคากระเบื้องซีแพคโมเนีย ชนิดมีแผ่นอลูมินั่มฟอยด์ผิวมัน 2 ด้าน ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 0.075 Btu / h. ft^2. °F

ดังนั้นสรุปได้ว่าหลังคาที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากที่สุด คือ หลังคาสังกะสีและหลังคาแผ่นโลหะ ทั้งนี้เนื่องจากเป็นหลังคาที่มีมวลสารน้อย จึงไม่สามารถกักเก็บความร้อนไว้ในตัววัสดุได้ดี ส่วนหลังคาที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุด คือ หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 30 เซนติเมตร ซึ่งเป็นหลังคาที่มีมวลสารมากจึงทำให้สามารถเก็บสะสมความร้อนไว้ได้มาก แต่ในทางกลับกัน ในเวลากลางคืน เมื่อมีการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิกับท้องฟ้าความร้อนที่สะสมอยู่ภายในของหลังคาคอนกรีตเสริมเหล็กก็จะคายออกมาทำให้ภายในอาคารร้อนกว่าอุณหภูมิภายนอก ซึ่งถ้าเป็นหลังคาที่มีมวลสารน้อยดังเช่นหลังคาแผ่นโลหะ จะสามารถคายความร้อนได้เร็วและปรับสภาพอากาศได้ดีกว่าหลังคาที่มีมวลสารมาก ทั้งนี้เมื่อนำเอาหลังคาชนิดต่างๆ มาทำการทดลองใส่ฉนวนกันความร้อนสามารถสรุปได้ดังนี้

- หลังคาที่มีการติดตั้งฝ้าเพดานยิปซั่มบอร์ดหนา 9 มิลลิเมตรแนวราบและมีการติดตั้งฉนวนกันความร้อนหนา 2 นิ้วเพิ่มเติม พบว่า หลังคาที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุด คือ หลังคาแผ่นโลหะ ที่ติดตั้งฉนวน PU โฟมหนา 2 นิ้ว มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 0.067 Btu / h. ft^2. °F และหลังที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากที่สุด คือ หลังคากระเบื้องดินเผา มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทค่าความร้อนเท่ากับ 0.095 Btu / h. ft^2. °F

เมื่อนำหลังคาดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นมาเปรียบเทียบกับหลังคาของบ้านประหยัดพลังงานที่ออกแบบโดยผู้เชี่ยวชาญด้านการใช้พลังงานพบว่า หลังคาของบ้านประหยัดพลังงาน มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 0.039 Btu / h. ft^2. °F เนื่องจากการมีการติดตั้งฉนวนกันความร้อน หนา 6 นิ้ว และติดตั้งฝ้าเพดานยิปซั่มบอร์ดหนา 12 มิลลิเมตร จึงทำให้มีค่าการต้านทานความร้อนมาก ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพของหลังคาที่ได้จากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน พบว่า หลังคาที่มีค่าการต้านทานความร้อนมากจะเป็นหลังคาที่ดีที่สุด นั่นคือ หากมีการติดตั้งฉนวนกันความร้อนที่หลังคาจะสามารถช่วยปิดกั้นความร้อนไม่ให้เข้ามาภายในอาคารได้ แต่ถ้าเป็นวัสดุที่มีมวลสารมากในเวลากลางคืนจะมีปัญหา เนื่องจากความร้อนจะคายออกมาจากวัสดุทำให้อุณหภูมิอากาศภายในอาคารร้อนกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอกอาคารได้ ดังเช่น หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 30 ซม.ด้วยเหตุที่เป็นวัสดุที่มีมวลสารมากยังทำให้เป็นสาเหตุในการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างอีกด้วย

จากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (ค่า U-VALUE) ของหลังคาแต่ละชนิดที่คัดเลือกมาเป็นตัวอย่างแล้ว ขั้นต่อมาคือคัดเลือกเอาฉพาะหลังคาที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบันมาสร้างตารางเปรียบเทียบเพื่อจัดเรียงลำดับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้จากน้อยไปหามาก เพื่อแสดงให้เห็นประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานของหลังคาอาคารแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน โดยจากการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทค่าความร้อนของหลังคาที่มีการใช้กันอยู่ในปัจจุบันนำมาสร้างเป็นตารางได้ดังนี้

ลำดับ	ชนิดของหลังคา	ค่า U-VALUE
1	หลังคาแผ่นแอสฟัลท์ มีฝ้าเพดานหนา 12 มม.+ฉนวนโฟมหนา 6 นิ้ว	0.039
2	หลังคาแผ่นโลหะ มีฝ้าเพดานหนา 9 มม.+ฉนวน PU โฟมหนา 2นิ้ว	0.067
3	หลังคากระเบื้องซีแพคโมเนีย มีฝ้าเพดาน + แผ่นอลูมินั่มฟอยด์	0.075
4	หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 30 ซม มีฝ้าเพดาน หนา 9 มม.	0.271
5	หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 15 ซม มีฝ้าเพดาน หนา 9 มม.	0.324
6	หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 12 ซม มีฝ้าเพดาน หนา 9 มม.	0.337
7	หลังคากระเบื้องซีแพคโมเนีย มีฝ้าเพดาน หนา 9 มม.	0.392
8	หลังคากระเบื้องลอนคู่ มีฝ้าเพดานหนา 9 มม.	0.394
9	หลังคากระเบื้องดินเผา มีฝ้าเพดานหนา 9 มม.	0.397
10	หลังคาแผ่นโลหะ มีฝ้าเพดานหนา 9 มม.	0.402
11	หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 30 ซม ไม่มีฝ้าเพดาน	0.422
12	หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 15 ซมไม่มีฝ้าเพดาน	0.565
13	หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 12 ซม ไม่มีฝ้าเพดาน	0.606
14	หลังคากระเบื้องซีแพคโมเนีย ไม่มีฝ้าเพดาน	0.935
15	หลังคากระเบื้องลอนคู่ ไม่มีฝ้าเพดาน	0.943
16	หลังคากระเบื้องดินเผา ไม่มีฝ้าเพดาน	0.960
17	หลังคาแผ่นโลหะ ไม่มีฝ้าเพดาน	0.990
18	หลังคาสังกะสี ไม่มีฝ้าเพดาน	0.990

ตารางที่ 3.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U-VALUE) ของวัสดุหลังคาแต่ละชนิด

ส่วนที่ 2 การประเมินประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานของหลังคาอาคารในเรื่องของภาระการทำความเย็นของหลังคาแต่ละชนิด

ในกรณีของการประเมินประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานของหลังคาอาคารจะใช้วิธีการคัดเลือกหลังคาประเภทต่างๆที่ใช้ในการก่อสร้างในปัจจุบันนำมาคำนวณภาระการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศเปรียบเทียบกันระหว่างหลังคาแต่ละชนิด ซึ่งจะทำให้ทราบว่าตัวแปรที่สามารถนำมาใช้ในการประเมินค่าของการประหยัดพลังงานในระบบปรับอากาศคือ ภาระการทำความเย็น(ค่า Q) ที่ผ่านหลังคาแต่ละชนิดเข้ามาภายในอาคารนั่นเอง โดยวัสดุปกคลุมหลังคาที่มีค่าภาระการทำความเย็น (ค่า Q) ที่ผ่านเข้ามาภายในอาคารน้อยก็จะทำให้เกิดภาระการทำความเย็นน้อยลงไปด้วย ในการพิจารณาสร้างแบบประเมินประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานของหลังคาอาคารในส่วนของภาระการทำความเย็นในระบบปรับอากาศของวัสดุปกคลุมหลังคาสามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การกำหนดและคัดเลือกวัสดุมุงหลังคาที่นิยมใช้กันอยู่มาทำการศึกษา

ในการที่จะคำนวณค่าภาระการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศนั้น ในขั้นตอนแรกจะทำการคัดเลือกวัสดุปกคลุมหลังคาและลักษณะโครงสร้างของหลังคาที่มีการใช้งานอยู่จริงในปัจจุบัน นำมาใช้ในการคำนวณเพื่อให้ทราบผลจากการคำนวณค่าภาระการทำความเย็นที่ถูกต้องและใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด โดยในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ จึงกำหนดขอบเขตของวัสดุปกคลุมหลังคาและลักษณะโครงสร้างของหลังคาที่นำมาใช้ในการศึกษาดังต่อไปนี้

ลำดับ	ชนิดของหลังคา	ค่า R (ft^2. h. ^oF/Btu)	ค่า U-VALUE (Btu/h . ft^2 . ^oF)
1	หลังคาแผ่นแอสฟัลท์ มีฝ้าเพดานหนา 12 มม.+ฉนวนหนา 6 นิ้ว	25.620	0.039
2	หลังคากระเบื้องซีแพคโมเนีย มีฝ้าเพดานหนา 9 มม.+ฉนวนหนา2นิ้ว	21.370	0.047
3	หลังคาแผ่นโลหะ มีฝ้าเพดานหนา 9 มม.+ฉนวนหนา2นิ้ว	14.990	0.067
4	หลังคากระเบื้องซีแพคโมเนีย มีฝ้าเพดาน + แผ่นอลูมินั่มฟอยด์	13.370	0.075
5	หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 30 ซม มีฝ้าเพดาน+ฉนวนหนา2นิ้ว	11.690	0.086
6	หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 15 ซมมีฝ้าเพดาน+ฉนวนหนา2นิ้ว	11.090	0.090
7	หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 12 ซม มีฝ้าเพดาน+ฉนวนหนา2นิ้ว	10.970	0.091
8	หลังคากระเบื้องลอนคู่มีฝ้าเพดานหนา 12 มม.+ฉนวนหนา2นิ้ว	10.540	0.095
9	หลังคากระเบื้องดินเผามีฝ้าเพดานหนา 12 มม.+ฉนวนหนา2นิ้ว	10.522	0.095

10	หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 30 ซม มีฝ้าเพดานหนา 9 มิลลิเมตร	3.690	0.271
11	หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 15 ซม มีฝ้าเพดานหนา 9 มิลลิเมตร	3.090	0.324
12	หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 12 ซม มีฝ้าเพดานหนา 9 มิลลิเมตร	2.970	0.337
13	หลังคากระเบื้องซีแพคโมเนีย มีฝ้าเพดานหนา 9 มิลลิเมตร	2.550	0.392
14	หลังคากระเบื้องลอนคู่ มีฝ้าเพดาน หนา 9 มิลลิเมตร	2.540	0.394
15	หลังคากระเบื้องดินเผา มีฝ้าเพดานหนา 9 มิลลิเมตร	2.522	0.397
16	หลังคาแผ่นโลหะ มีฝ้าเพดานหนา 9 มิลลิเมตร	2.490	0.402
17	หลังคาสังกะสี มีฝ้าเพดานหนา 9 มิลลิเมตร	2.490	0.402
18	หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 30 ซม ไม่มีฝ้าเพดาน	2.370	0.422
19	หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 15 ซมไม่มีฝ้าเพดาน	1.770	0.565
20	หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 12 ซม ไม่มีฝ้าเพดาน	1.650	0.606
21	หลังคากระเบื้องซีแพคโมเนีย ไม่มีฝ้าเพดาน	1.070	0.935
22	หลังคากระเบื้องลอนคู่ ไม่มีฝ้าเพดาน	1.060	0.943
23	หลังคากระเบื้องดินเผาไม่มีฝ้าเพดาน	1.042	0.960
24	หลังคาแผ่นโลหะไม่มีฝ้าเพดาน	1.010	0.990
25	หลังคาสังกะสี ไม่มีฝ้าเพดาน	1.010	0.990

ตารางที่ 3.6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U-VALUE) ของวัสดุหลังคาแต่ละชนิด

ขั้นตอนที่ 2 การคำนวณหาค่าภาระการทำความเย็น

ในขั้นตอนนี้ก็จะทำการคำนวณหาค่าภาระการทำความเย็นที่เกิดจากหลังคาแต่ละชนิด โดยมีวิธีการคำนวณดังนี้

จากสมการที่ 1 คือ

$$Q = U*A*CLTD$$

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า CLTD เป็นสมการที่แสดงถึงความแตกต่างในเรื่องของทิศทางที่ตั้ง, มวลสารและสีของหลังคาแต่ละชนิด ดังนั้นจึงต้องมีการปรับค่า CLTD ตามตำแหน่งที่ตั้งและเดือนที่ต้องคำนวณหาค่าภาระการทำความเย็น รวมถึงอุณหภูมิอากาศภายในและภายนอกอาคารตามสภาพอากาศจริงของเดือนนั้นๆ ซึ่งมีสูตรในการปรับค่า CLTD ดังนี้

$$CLTD_c = (CLTD + LM)K + (78 - t_r) + (T_o - 85)f$$

โดยที่ $CLTD_c$ คือ ค่า CLTD ที่ปรับแก้แล้ว, °F

CLTD คือ ค่าภาระความแตกต่างความร้อนเทียบเท่าจากตารางที่ 3.8 หรือ 3.2 °F

LM คือ ที่ตั้งและเดือน โดยในการศึกษาครั้งนี้กำหนดให้ใช้ที่ตั้งสำหรับละติจูด 16 องศาเหนือและเดือนที่ใช้ในการคำนวณหาค่าภาระการทำความเย็น คือเดือนพฤษภาคม ปี 2543 เนื่องจากเป็นช่วงฤดูร้อนและมีการใช้พลังงานไปกับระบบปรับอากาศมากที่สุด

K คือ สีผิวของวัสดุ โดยกำหนดให้ วัสดุสีเข้มมีค่าเท่ากับ 1.0
วัสดุสีอ่อนมีค่าเท่ากับ 0.5

T_r คือ อุณหภูมิอากาศภายในห้อง

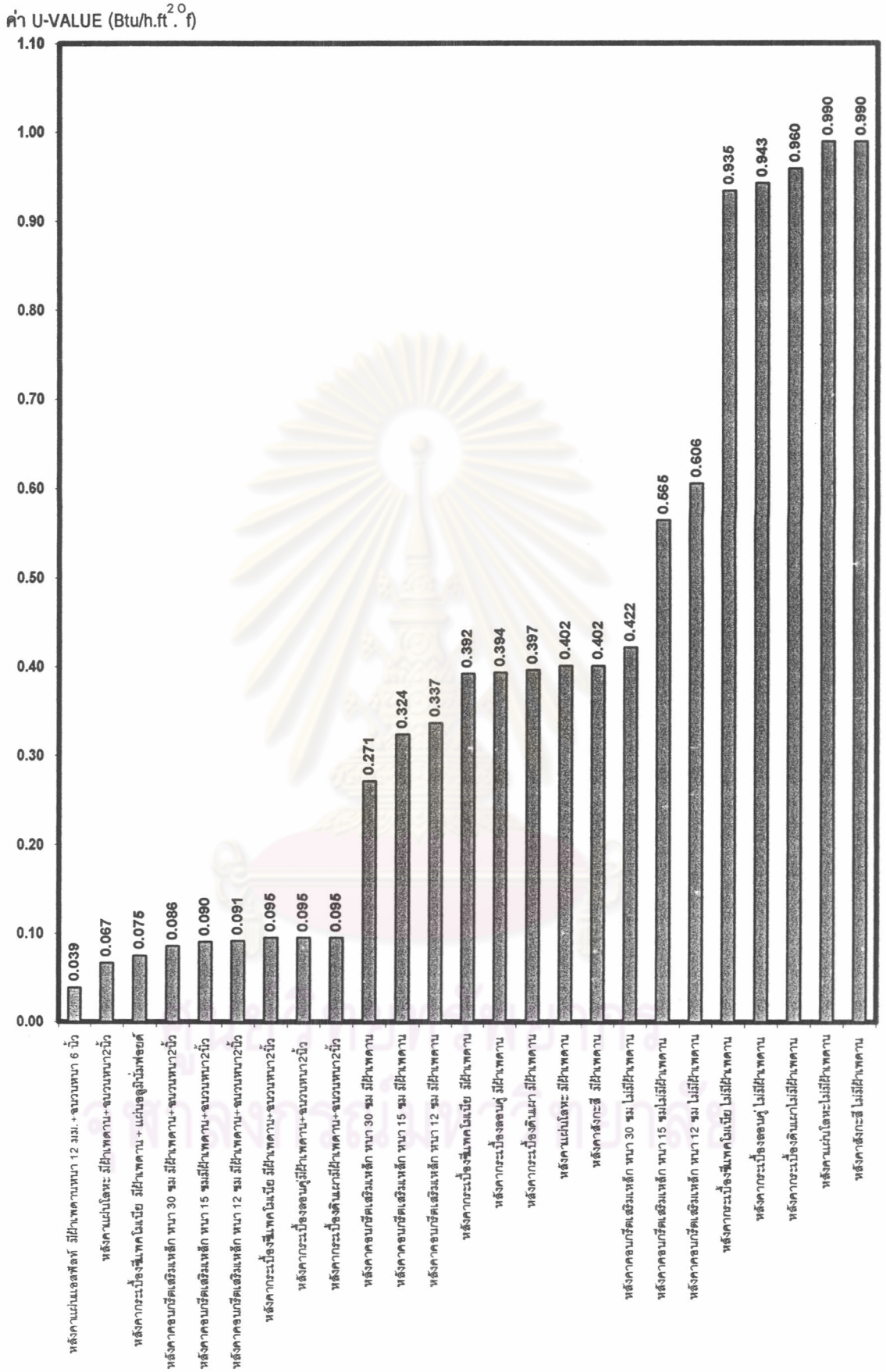
T_0 คือ อุณหภูมิอากาศภายนอก

f คือ การระบายอากาศภายใต้หลังคา โดยกำหนดให้ ไม่มีการระบายอากาศมีค่าเท่ากับ 1.0 และมีพัดลมระบายอากาศ มีค่าเท่ากับ 0.75

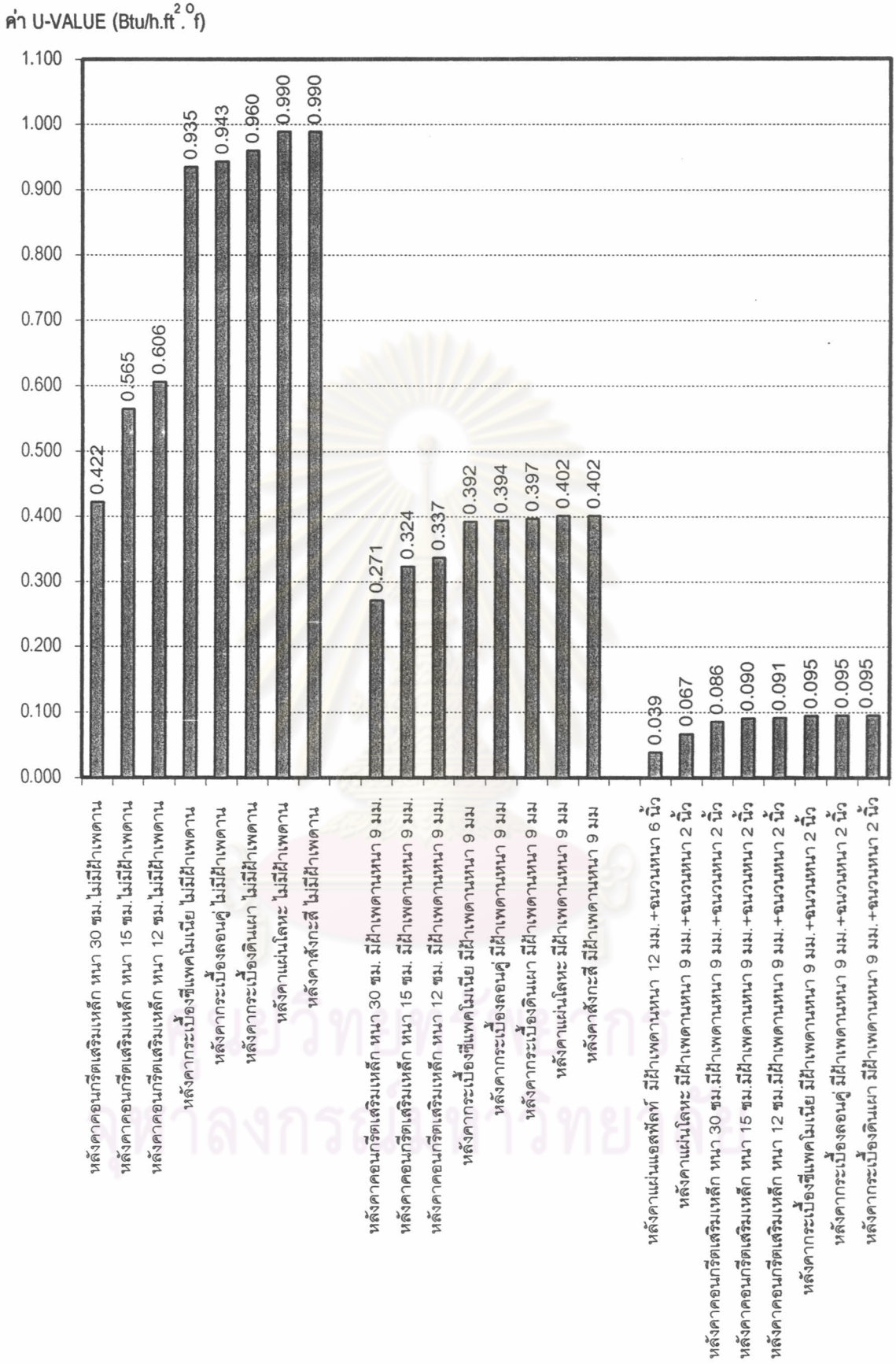
Table 32 CLTD Correction For Latitude and Month Applied to Walls and Roofs, North Latitudes

Lat.	Month	N	NNE NNW	NE NW	ENE WNW	E W	ESE WSW	SE SW	SSE SSW	S	HOR
0	Dec	−3	−5	−5	−5	−2	0	3	6	9	−1
	Jan/Nov	−3	−5	−4	−4	−1	0	2	4	7	−1
	Feb/Oct	−3	−2	−2	−2	−1	−1	0	−1	0	0
	Mar/Sept	−3	0	1	−1	−1	−3	−3	−5	−8	0
	Apr/Aug	5	4	3	0	−2	−5	−6	−8	−8	−2
	May/Jul	10	7	5	0	−3	−7	−8	−9	−8	−4
	Jun	12	9	5	0	−3	−7	−9	−10	−8	−5
8	Dec	−4	−6	−6	−6	−3	0	4	8	12	−5
	Jan/Nov	−3	−5	−6	−5	−2	0	3	6	10	−4
	Feb/Oct	−3	−4	−3	−3	−1	−1	1	2	4	−1
	Mar/Sept	−3	−2	−1	−1	−1	−2	−2	−3	−4	0
	Apr/Aug	2	2	2	0	−1	−4	−5	−7	−7	−1
	May/Jul	7	5	4	0	−2	−5	−7	−9	−7	−2
	Jun	9	6	4	0	−2	−6	−8	−9	−7	−2
16	Dec	−4	−6	−8	−8	−4	−1	4	9	13	−9
	Jan/Nov	−4	−6	−7	−7	−4	−1	4	8	12	−7
	Feb/Oct	−3	−5	−5	−4	−2	0	2	5	7	−4
	Mar/Sept	−3	−3	−2	−2	−1	−1	0	0	0	−1
	Apr/Aug	−1	0	−1	−1	−1	−3	−3	−5	−6	0
	May/Jul	4	3	3	0	−1	−4	−5	−7	−7	0
	Jun	6	4	4	1	−1	−4	−6	−8	0	−7
24	Dec	−5	−7	−9	−10	−7	−3	3	9	13	−13
	Jan/Nov	−4	−6	−8	−9	−6	−3	9	3	13	−11
	Feb/Oct	−4	−5	−6	−6	−3	−1	3	7	10	−7
	Mar/Sept	−3	−4	−3	−3	−1	−1	1	2	4	−3
	Apr/Aug	−2	−1	0	−1	−1	−2	−1	−2	−3	0
	May/Jul	1	2	2	0	0	−3	−3	−5	−6	1
	Jun	3	3	3	1	0	−3	−4	−6	−6	1
32	Dec	−5	−7	−10	−11	−8	−5	2	9	12	−17
	Jan/Nov	−5	−7	−9	−11	−8	−15	−4	2	9	12
	Feb/Oct	−4	−6	−7	−8	−4	−2	4	8	11	−10
	Mar/Sept	−3	−4	−4	−4	−2	−1	3	5	7	−5
	Apr/Aug	−2	−2	−1	−2	0	−1	0	1	1	−1
	May/Jul	1	1	1	0	0	−1	−1	−3	−3	1
	Jun	1	2	2	1	0	−2	−2	−4	−4	2
40	Dec	−6	−8	−10	−13	−10	−7	0	7	10	−21
	Jan/Nov	−5	−7	−10	−12	−9	−6	1	8	11	−19
	Feb/Oct	−5	−7	−8	−9	−6	−3	3	8	12	−14
	Mar/Sept	−4	−5	−5	−6	−3	−1	4	7	10	−8
	Apr/Aug	−2	−3	−2	−2	0	0	2	3	4	−3
	May/Jul	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	Jun	1	1	1	0	1	0	0	−1	−1	2
48	Dec	−6	−8	−11	−14	−13	−10	−3	2	6	−25
	Jan/Nov	−6	−8	−11	−13	−11	−8	−1	5	8	−24
	Feb/Oct	−5	−7	−10	−11	−8	−5	1	8	11	−18
	Mar/Sept	−4	−6	−6	−7	−4	−1	4	8	11	−11
	Apr/Aug	−3	−3	−3	−3	−1	0	4	6	7	−5
	May/Jul	0	−1	0	0	1	1	3	3	4	0
	Jun	1	1	2	1	2	1	2	2	3	2

ตารางที่ 3.7 แสดงการปรับค่าละติจูดและเดือน



แผนภูมิที่ 3.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน(U-VALUE) ของหลังคาแต่ละชนิด เรียงลำดับจากน้อยไปหามาก



แผนภูมิที่ 3.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน(U-VALUE) ของหลังคาไม่มีฝ้าเพดาน กับหลังคามีการติดตั้งฝ้าเพดานหนา 9 มม.และหลังคามีการติดตั้งฝ้าเพดานหนา 9 มม.+ฉนวนหนา 2 นิ้ว

จากสมการดังกล่าวข้างต้นนำมาคำนวณหาค่าภาระการทำความเย็น โดยมีวิธีการคำนวณคือ นำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (ค่า U) ที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 1 มาเป็นตัวแทนค่า U ในสมการของการหาค่าภาระการทำความเย็น ทั้งนี้ได้ทำการทดลองใส่ฉนวนกันความร้อนให้กับวัสดุหลังคาแต่ละชนิดที่ทำการคัดเลือกมาด้วย เพื่อที่จะนำเอาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของวัสดุหลังคาที่แตกต่างกัน (แผนภูมิที่ 3.3) มาทำการเปรียบเทียบกันในด้านของประสิทธิภาพในการช่วยลดภาระการทำความเย็น ซึ่งจากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (ค่า U-VALUE) พบว่าวัสดุหลังคาที่มีลักษณะโครงสร้างที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแตกต่างกันมาก สามารถแบ่งออกได้ดังนี้

- หลังคาที่ไม่มีการติดฝ้าเพดาน
- หลังคาที่มีการติดฝ้าเพดานยิปซั่มบอร์ด หนา 9 มม.

หลังจากนั้นคัดเลือกเอาค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อน (ค่า U-VALUE) ค่าต่ำสุดและสูงสุดที่ได้จากการคำนวณของหลังคาที่มีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกันทั้งสองลักษณะมาทำการคำนวณหาค่าภาระการทำความเย็นเปรียบเทียบกัน เพื่อแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการประหยัดพลังงานของวัสดุหลังคาแต่ละชนิด จากแผนภูมิที่ 3.4 สามารถสรุปค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (ค่า U-VALUE) ที่จะนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าภาระการทำความเย็นให้กับเครื่องปรับอากาศได้ดังนี้

- หลังคาทีไม่มีการติดตั้งฝ้าเพดาน ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่ำที่สุด คือหลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 30 ซม. มีค่าเท่ากับ 0.422 Btu / h. ft^2. °F
- หลังคาทีไม่มีการติดตั้งฝ้าเพดาน ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด คือหลังคาสังกะสี มีค่าเท่ากับ 0.990 Btu / h. ft^2. °F
- หลังคาทีมีการติดตั้งฝ้าเพดานยิปซั่มบอร์ด หนา 9 มม. ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่ำที่สุด คือ หลังคาแอสฟัลท์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.039 Btu / h. ft^2. °F
- หลังคาทีมีการติดตั้งฝ้าเพดานยิปซั่มบอร์ด หนา 9 มม. ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด คือ หลังคาสังกะสี ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.402 Btu / h. ft^2. °F

โดยในการคำนวณค่าภาระการทำความเย็นจะนำเอาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทั้ง 4 ค่านี้ ไปใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบกันต่อไป

ขั้นตอนที่ 3 การจัดกลุ่มของหลังคาที่ใช้ในการศึกษา

ก่อนที่จะทำการคำนวณค่าภาระการทำความเย็นได้นั้น เมื่อทำการคัดเลือกหลังคาที่จะนำมาทำการคำนวณได้แล้ว ในการที่พิจารณาเพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานของหลังคาอาคารในด้านของภาระการทำความเย็น จากสมการที่ (1) ค่าภาระความแตกต่างความ

ร้อนเทียบเท่า (CLTD) เป็นสมการที่แสดงถึงความแตกต่างในเรื่องลักษณะประเภทมวลสารของหลังคา รวมทั้งทิศทางที่ตั้งและสีของหลังคาอีกด้วย ดังนั้นจึงใช้สมการที่ (1) ในการที่จะคำนวณค่าภาระการทำความเย็นของหลังคาแต่ละประเภท ดังนั้นจึงต้องทำการคำนวณหาค่ามวลสารของหลังคาแต่ละชนิดเสียก่อน โดยมีวิธีการคำนวณค่ามวลสารของหลังคาที่คัดเลือกมาดังนี้

ตารางแสดงค่ามวลของหลังคาแต่ละชนิด

ลำดับที่	ชนิดของหลังคา	มวลของหลังคา lb / ft^2
1	หลังคาสังกะสี ไม่มีฉนวน	2.1927
2	หลังคาแผ่นโลหะ ไม่มีฝ้าเพดาน	2.1927
3	กระเบื้องดินเผา ไม่มีฝ้าเพดาน	11.2275
4	หลังคาสังกะสี + ฝ้าเพดาน หนา 9 มม.	4.3581
5	กระเบื้องซีแพคโมเนีย หนา 15 มิลลิเมตร ไม่มีฝ้าเพดาน	11.8474
6	กระเบื้องลอนคู่ หนา 6 มิลลิเมตร ไม่มีฝ้าเพดาน	7.5390
7	หลังคาแผ่นโลหะ + ฝ้าเพดาน หนา 9 มม.	4.3581
8	กระเบื้องดินเผา + ฝ้าเพดาน หนา 9 มม.	16.3075
9	หลังคาแผ่นโลหะ ชนิดมีฉนวนหนา 2 นิ้ว	4.6862
10	กระเบื้องดินเผา ชนิดมีฉนวนหนา 2 นิ้ว	16.6356
11	กระเบื้องซีแพคโมเนีย หนา 15 มิลลิเมตร + ฝ้าเพดาน หนา 9 มม.	14.0128
12	กระเบื้องลอนคู่ หนา 6 มิลลิเมตร + ฝ้าเพดาน หนา 9 มม.	9.7044
13	กระเบื้องซีแพคโมเนีย หนา 15 มิลลิเมตร ชนิดมีฉนวนหนา 2 นิ้ว	12.1755
14	กระเบื้องลอนคู่ หนา 6 มิลลิเมตร ชนิดมีฉนวนหนา 2 นิ้ว	10.0325
15	หลังคาแอสฟัลท์ ชนิดมีฉนวนหนา 6 นิ้ว	7.0020
16	หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 12 เซนติเมตร ไม่มีฝ้าเพดาน	59.0169
17	หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 12 มิลลิเมตร + ฝ้าเพดาน หนา 9 มม.	61.1817
18	หลังคาคสล. หนา 12 ซม. มีฝ้าเพดาน หนา 12 มม.มีฉนวนหนา 2 นิ้ว	61.5098
19	หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 15 เซนติเมตร ไม่มีฝ้าเพดาน	73.7705
20	หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 15 มิลลิเมตร + ฝ้าเพดาน หนา 9 มม.	75.9359
21	หลังคาคสล. หนา 15 ซม. มีฝ้าเพดาน หนา 9 มม. มีฉนวนหนา 2 นิ้ว	76.2639
22	หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 30 เซนติเมตร ไม่มีฝ้าเพดาน	147.5410
23	หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 30 มิลลิเมตร + ฝ้าเพดาน หนา 9 มม.	149.7064
24	หลังคาคสล. หนา 30 ซม. มีฝ้าเพดาน หนา 9 มม.มีฉนวนหนา 2 นิ้ว	150.0349

ตารางที่ 3.7 แสดงค่ามวลของหลังคาแต่ละชนิด

จากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทค่าความร้อน(ค่า U-VALUE) และค่ามวลสารที่คำนวณได้ไปทำการเปรียบเทียบกับตารางค่าภาระความแตกต่างความร้อนเทียบเท่า (CLTD) เพื่อกำหนดวัสดุปกคลุมหลังคาแต่ละชนิดว่าจัดอยู่ในกลุ่มใดของตาราง CLTD (ASHRAE, 1989)

Table 29 Cooling Load Temperature Differences (CLTD) for Calculating Cooling Load from Flat Roofs

Roof No	Description of Construction	Weight, lb/ft²	U-value, Btu/h·ft²·°F	Solar Time 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	Hour of Maximum CLTD	Minimum CLTD	Mean CLTD
Without Suspended Ceiling																														
1	Steel sheet with 1-in. (or 2-in.) insulation	7 (8)	0.213 (0.124)	1	−2	−3	−3	−5	−3	6	19	34	49	61	71	78	79	77	70	59	45	30	18	12	8	5	3	14	−5	79
2	1-in. wood with 1-in. insulation	8	0.170	6	3	0	−1	−3	−3	−2	4	14	27	39	52	62	70	74	74	70	62	51	38	28	20	14	9	16	−3	74
3	4-in. lightweight concrete	18	0.213	9	5	2	0	−2	−3	−3	1	9	20	32	44	55	64	70	73	71	66	57	45	34	25	18	13	16	−3	73
4	2-in. heavyweight concrete with 1-in. (or 2-in.) insulation	29 (0.122)	0.206	12	8	5	3	0	−1	−1	3	11	20	30	41	51	59	65	66	66	62	54	45	36	29	22	17	16	−1	69
5	1-in. wood with 2-in. insulation	9	0.109	3	0	−3	−4	−5	−7	−6	−3	5	16	27	39	49	57	63	64	62	57	48	37	26	18	11	7	16	−7	64
6	6-in. lightweight concrete	24	0.158	22	17	13	9	6	3	1	1	3	7	15	23	33	43	51	58	62	64	62	57	50	42	35	28	18	1	64
7	2.5-in. wood with 1-in. ins.	13	0.130	29	24	20	16	13	10	7	6	6	9	13	20	27	34	42	48	53	55	56	54	49	44	39	34	19	6	58
8	8-in. lightweight concrete	31	0.126	35	30	26	22	18	14	11	9	7	7	9	13	19	25	33	39	46	50	53	54	53	49	45	40	20	7	54
9	4-in. heavyweight concrete with 1-in. (or 2-in.) insulation	52 (52)	0.200 (0.120)	25	22	18	15	12	9	8	8	10	14	20	26	33	40	46	50	53	53	52	48	43	38	34	30	18	8	53
10	2.5-in. wood with 2-in. ins.	13	0.093	30	26	23	19	16	13	10	9	8	9	13	17	23	29	36	41	46	49	51	50	47	43	39	35	19	8	51
11	Roof terrace system	75	0.106	34	31	28	25	22	19	16	14	13	13	15	18	22	26	31	36	40	44	45	46	45	43	40	37	20	13	46
12	6-in. heavyweight concrete with 1-in. (or 2-in.) insulation	75 (75)	0.192 (0.117)	31	28	25	22	20	17	15	14	14	16	18	22	26	31	36	40	43	45	45	44	42	40	37	34	19	14	45
13	4-in. wood with 1-in. (or 2-in) insulation	17 (18)	0.106 (0.078)	38	36	33	30	28	25	22	20	18	17	16	17	18	21	24	28	32	36	39	41	43	43	42	40	22	16	43
With Suspended Ceiling																														
1	Steel Sheet with 1-in. (or 2-in.) insulation	9 (10)	0.134 (0.092)	2	0	−2	−3	−4	−4	−1	9	23	37	50	62	71	77	78	74	67	56	42	28	18	12	8	5	15	−4	78
2	1-in. wood with 1-in. ins.	10	0.115	20	15	11	8	5	3	2	3	7	13	21	30	40	48	55	60	62	61	58	51	44	37	30	25	17	2	62
3	4-in. lightweight concrete	20	0.134	19	14	10	7	4	2	0	0	4	10	19	29	39	48	56	62	65	64	61	54	46	38	30	24	17	0	65
4	2-in. heavyweight concrete with 1-in. insulation	30	0.131	28	25	23	20	17	15	13	13	14	16	20	25	30	35	39	43	46	47	46	44	41	38	35	32	18	13	47
5	1-in. wood with 2-in. ins.	10	0.083	25	20	16	13	10	7	5	5	7	12	18	25	33	41	48	53	57	57	56	52	46	40	34	29	18	5	57
6	6-in. lightweight concrete	26	0.109	32	28	23	19	16	13	10	8	7	8	11	16	22	29	36	42	48	52	54	54	51	47	42	37	20	7	54
7	2.5-in. wood with 1-in. insulation	15	0.096	34	31	29	26	23	21	18	16	15	15	16	18	21	25	30	34	38	41	43	44	44	42	40	37	21	15	44
8	8-in. lightweight concrete	33	0.093	39	36	33	29	26	23	20	18	15	14	14	15	17	20	25	29	34	38	42	45	46	45	44	42	21	14	46
9	4-in. heavyweight concrete with 1-in. (or 2-in.) ins.	53 (54)	0.128 (0.090)	30	29	27	26	24	22	21	20	20	21	22	24	27	29	32	34	36	38	38	38	37	36	34	33	19	20	38
10	2.5-in. wood with 2-in. ins.	15	0.072	35	33	30	28	26	24	22	20	18	18	18	20	22	25	28	32	35	38	40	41	41	40	39	37	21	18	41
11	Roof terrace system	77	0.082	30	29	28	27	26	25	24	23	22	22	22	23	23	25	26	28	29	31	32	33	33	33	33	32	22	22	33
12	6-in. heavyweight concrete with 1-in. (or 2-in) insulation	77 (77)	0.125 (0.088)	29	28	27	26	25	24	23	22	21	21	22	23	25	26	28	30	32	33	34	34	34	33	32	31	20	21	34
13	4-in. wood with 1-in (or 2-in.) insulation	19 (20)	0.082 (0.064)	35	34	33	32	31	29	27	26	24	23	22	21	22	22	24	25	27	30	32	34	35	36	37	36	23	21	37

(1) *Direct Application of Table Without Adjustments:*

Values were calculated using the following conditions:

- Dark flat surface roof ("dark" for solar radiation absorption)
- Indoor temperature of 78 °F
- Outdoor maximum temperature of 95 °F with outdoor mean temperature of 85 °F and an outdoor daily range of 21 °F
- Solar radiation typical of 40 deg North latitude on July 21
- Outside surface resistance, $R_o = 0.333$ ft²·°F·h/Btu
- Without and with suspended ceiling, but no attic fans or return air ducts in suspended ceiling space
- Inside surface resistance, $R_i = 0.685$ ft²·°F·h/Btu

(2) *Adjustments to Table Values:*

The following equation makes adjustments for deviations of design and solar conditions from those listed in (1) above.

$$CLTD_{corr} = [(CLTD + LM)\,K + (78 - t_R) + (t_o - 85)]\,f$$

where CLTD is from this table

(a) LM is latitude-month correction from Table 32 for a horizontal surface,

(b) K is a color adjustment factor applied after first making month-latitude adjustments. Credit should not be taken for a light-colored roof except where permanence of light color is established by experience, as in rural areas or where there is little smoke.
$K = 1.0$ if dark colored or light in an industrial area
$K = 0.5$ if permanently light-colored (rural area)

(c) $(78 - t_R)$ is indoor design temperature correction

(d) $(t_o - 85)$ is outdoor design temperature correction, where t_o is the average outside temperature on design day

(e) f is a factor for attic fan and or ducts above ceiling applied after all adjustments have been made
$f = 1.0$ no attic or ducts
$f = 0.75$ positive ventilation

Values in Table 29 were calculated without and with suspended ceiling, but no allowances for positive ventilation or return ducts through the space. If ing is insulated and fan is used between ceiling and roof, CLTD may be red 25% ($f = 0.75$). Analyze use of the suspended ceiling space for a return air ple or with return air ducts separately.

(3) *Roof Constructions Not Listed in Table:*

The U-Values listed are only guides. The actual value of U as obtained tables such as Table 4, Chapter 22 or as calculated for the actual roof cons tion should be used.

An actual roof construction not in this table would be thermally similar roof in the table, if it has similar mass, lb/ft², and similar heat capa Btu/ft²·°F. In this case, use the CLTD from this table as corrected by Not above.

Example: A flat roof without suspended ceiling has mass = 18.0 lb/ft², U = Btu/h·ft²·°F, and heat capacity = 9.5 Btu/ft²·°F.

Use $CLTD_{uncorr}$ from Roof No. 13, to obtain $CLTD_{corr}$ and use the U value to calculate $q/A = U\,(CLTD_{corr}) = 0.20\,(CLTD_{corr})$.

(4) *Additional Insulation:*

For each R-7 increase in R-value from insulation added to the roof struc use a CLTD for a roof whose weight and heat capacity are approximately same, but whose CLTD has a maximum value 2 h later. If this is not poss because a roof with longest time lag has already been selected, use an effe CLTD in cooling load calculation equal to 20 °F.

ตารางที่ 3.8 แสดงค่าภาระความแตกต่างความร้อนเทียบเท่า CLTD (ASHRAE, 1989)

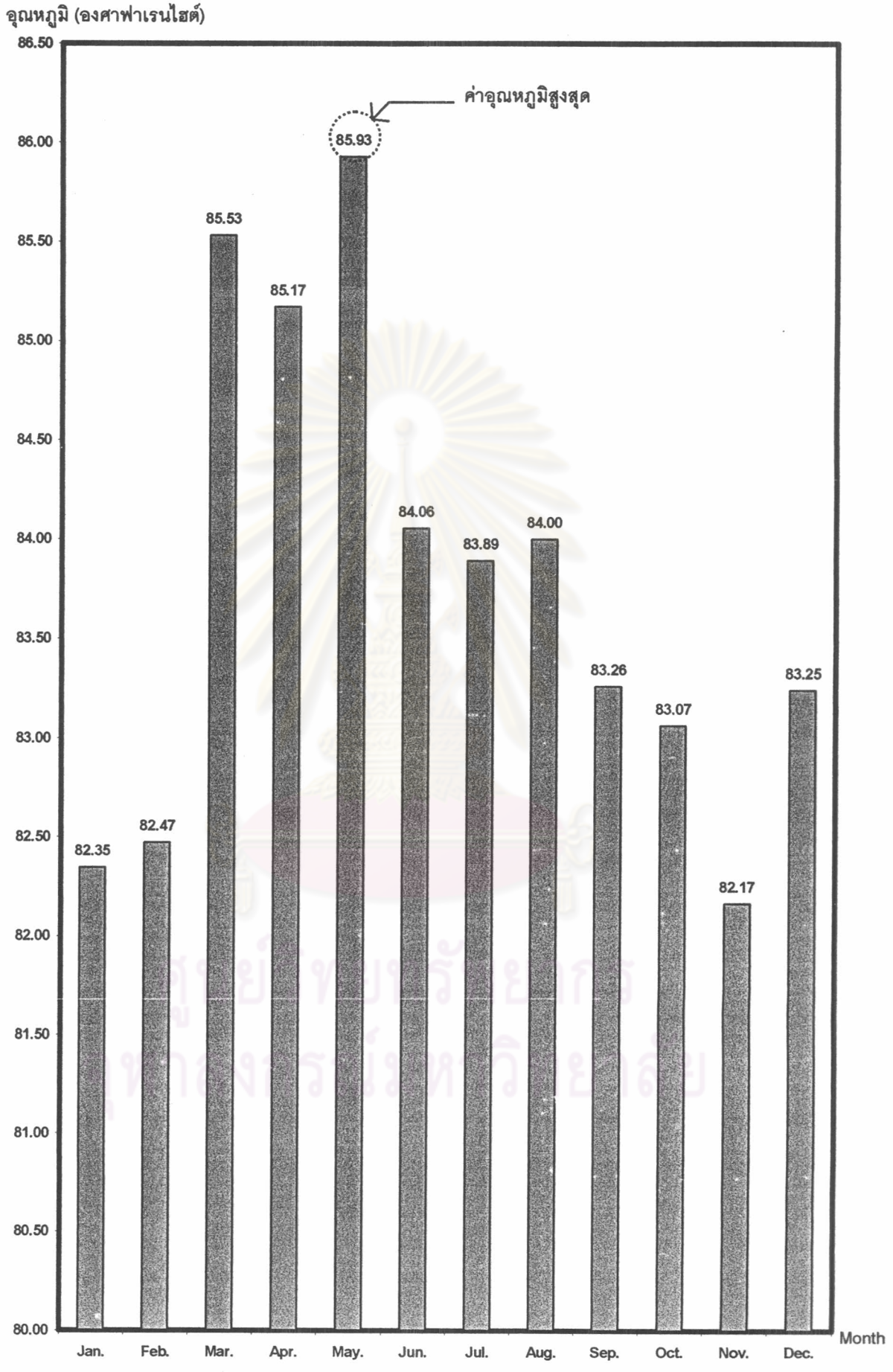
จากตารางที่ 3.8 แสดงค่าภาระความแตกต่างความร้อนเทียบเท่า (CLTD) สามารจัดกลุ่มประเภทของวัสดุปกคลุมหลังคาที่นำมาทำการศึกษาได้ดังนี้

- หลังคาแผ่นโลหะ, หลังคาแผ่นสังกะสี จัดอยู่ในกลุ่มหลังคาหมายเลข 1 ของตารางความร้อนเทียบเท่า (CLTD) ซึ่งในที่นี้กำหนดให้เรียกว่า หลังคา TYPE A
- หลังคากระเบื้องซีแพคโมเนีย, หลังคากระเบื้องลอนคู่ และกระเบื้องดินเผา จัดอยู่ในกลุ่มหลังคาหมายเลข 5 ของตารางความร้อนเทียบเท่า (CLTD) ซึ่งในนี้กำหนดให้เรียกว่า หลังคา TYPE B
- หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 12 เซนติเมตร จัดอยู่ในกลุ่มหลังคาหมายเลข 9 ของตารางความร้อนเทียบเท่า (CLTD) ซึ่งในที่นี้กำหนดให้เรียกว่า หลังคา TYPE C
- หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 15 เซนติเมตร จัดอยู่ในกลุ่มหลังคาหมายเลข 11 ของตารางความร้อนเทียบเท่า (CLTD) ซึ่งในที่นี้กำหนดให้เรียกว่า หลังคา TYPE D

ขั้นตอนที่ 4 การกำหนดสภาพภูมิอากาศที่จะนำมาใช้ในการคำนวณ

ในการที่จะคำนวณหาค่าภาระการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศได้นั้น จะต้องนำเอาสภาพภูมิอากาศภายนอกที่เป็นจริงมาใช้ในการคำนวณ เพื่อให้ได้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงมากที่สุด ซึ่งในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้เลือกเอาสภาพภูมิอากาศประจำปี 2543 จากกรมอุตุนิยมวิทยามาใช้ในการคำนวณ เนื่องจากมีข้อมูลสภาพภูมิอากาศที่ครบถ้วนตลอดทั้งปี จากนั้นจึงนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยอุณหภูมิทั้งปี เพื่อให้ทราบว่ามีอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่เดือนใด เพื่อนำมาเป็นตัวแทนในการคำนวณหาค่าภาระการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศสูงสุด จากแผนภูมิที่ 3.5 พบว่าอุณหภูมิสภาพภูมิอากาศประจำปี 2543 จากการนำมาหาค่าเฉลี่ยทั้งปี สามารถสรุปได้ว่าเดือนพฤษภาคมเป็นเดือนที่มีอุณหภูมิความร้อนสูงสุดคือ มีอุณหภูมิความร้อนเท่ากับ 85.93 องศาฟาเรนไฮต์ เมื่อเทียบกับเดือนอื่นๆ จึงเลือกเอาอุณหภูมิสภาพภูมิอากาศของเดือนนี้มาใช้เป็นตัวแทน ในการคำนวณหาค่าภาระการทำความเย็นของหลังคาแต่ละชนิดต่อไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



แผนภูมิที่ 3.5 แสดงอุณหภูมิสภาพภูมิอากาศ ประจำปี 2543 จากกรมอุตุนิยมวิทยา

ขั้นตอนที่ 5 การวิเคราะห์และประเมินผลในด้านภาระการทำความเย็นของวัสดุหลังคาแต่ละชนิด

จากสมการที่ 1 นำเอาค่าต่างๆที่ได้จากการคำนวณและกำหนดไว้ในขั้นตอนที่ 2-4 มาทำการคำนวณหาค่าภาระความแตกต่างความร้อนเทียบเท่า (CLTD) ของวัสดุแต่ละชนิดทั้งปี โดยแบ่งวิธีการคำนวณออกเป็นลักษณะต่างๆ ดังนี้

- หลังคาที่ไม่มีการติดฝ้าเพดาน
- หลังคาที่มีการติดตั้งฝ้าเพดานยิปซั่มบอร์ด หนา 9 มม.และเพิ่มฉนวนกันความร้อนหนา 2 นิ้ว

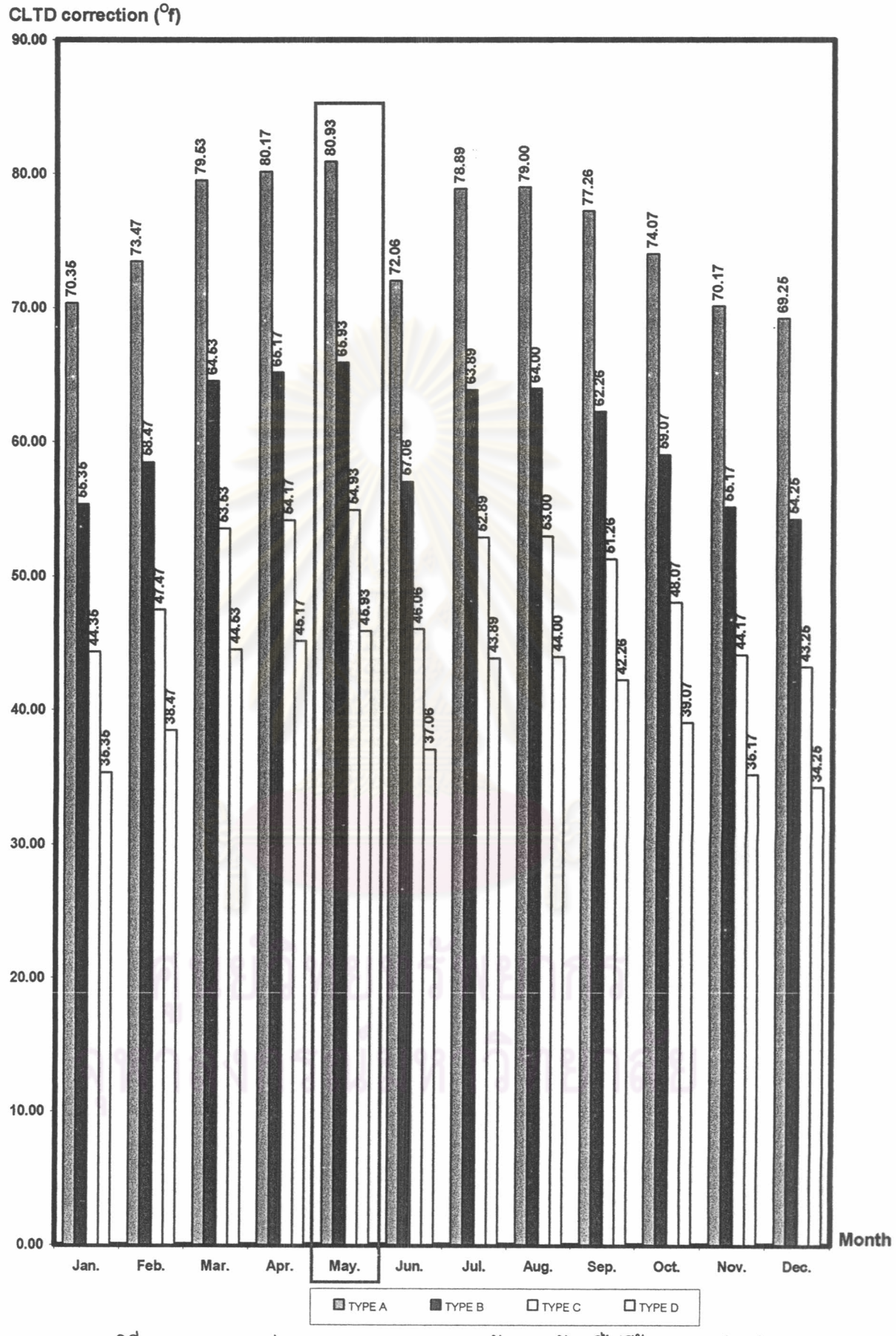
จากการคำนวณค่าภาระในการทำความเย็น (ค่า Q) ของวัสดุหลังคาแต่ละชนิด ความแตกต่างความร้อนเทียบเท่า (CLTD) สูงสุดอยู่ในช่วงเดือนพฤษภาคม ซึ่งจากแผนภูมิที่ 3.6,3.7 สามารถสรุปหาค่าภาระความแตกต่างความร้อนเทียบเท่าสูงสุด (CLTD PEAK) ของวัสดุหลังคาแต่ละชนิด โดยแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะโครงสร้างของหลังคาได้ดังนี้

- **หลังคาที่ไม่มีการติดตั้งฝ้าเพดาน**

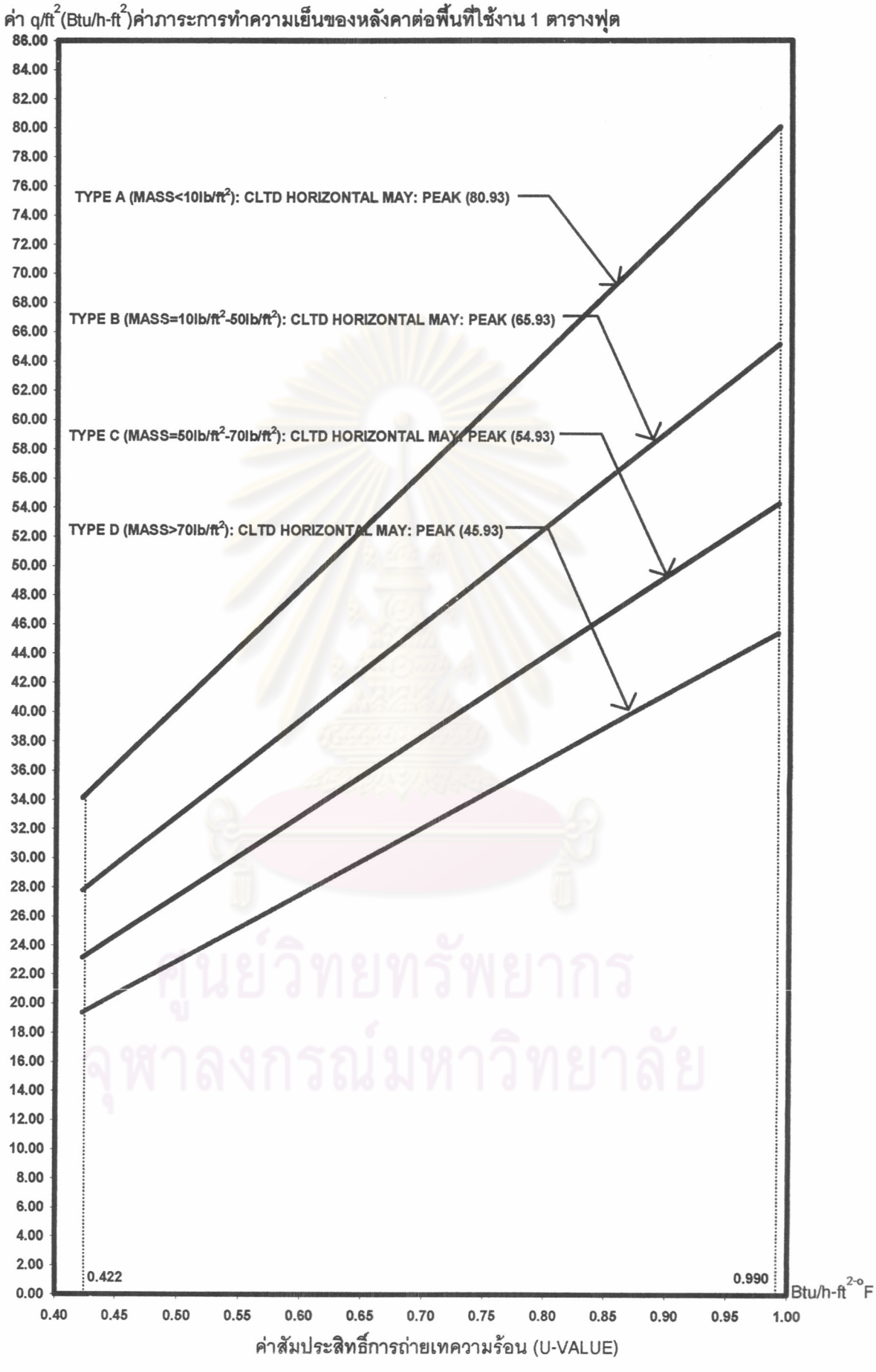
- หลังคา TYPE A ประกอบด้วยหลังคาสังกะสี, แผ่นโลหะมีค่าภาระความแตกต่างความร้อนเทียบเท่าสูงสุด (CLTD PEAK) เท่ากับ 80.91 Btu / h.
- หลังคา TYPE B ประกอบด้วยหลังคากระเบื้องซีแพคโมเนีย, หลังคากระเบื้องลอนคู่และกระเบื้องดินเผา มีค่าภาระความแตกต่างความร้อนเทียบเท่าสูงสุด (CLTD PEAK) เท่ากับ 65.90 Btu / h
- หลังคา TYPE C ประกอบด้วยหลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 12 เซนติเมตร มีค่าภาระความแตกต่างความร้อนเทียบเท่าสูงสุด (CLTD PEAK) เท่ากับ 54.90 Btu/h-ft^2
- หลังคา TYPE D ประกอบด้วยหลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 15 เซนติเมตร มีค่าภาระความแตกต่างความร้อนเทียบเท่าสูงสุด (CLTD PEAK) เท่ากับ 45.9 Btu/h-ft^2

- **หลังคามีฝ้าเพดานยิบซั่มบอร์ดหนา 9 มม.และเพิ่มฉนวนกันความร้อนหนา 2 นิ้ว**

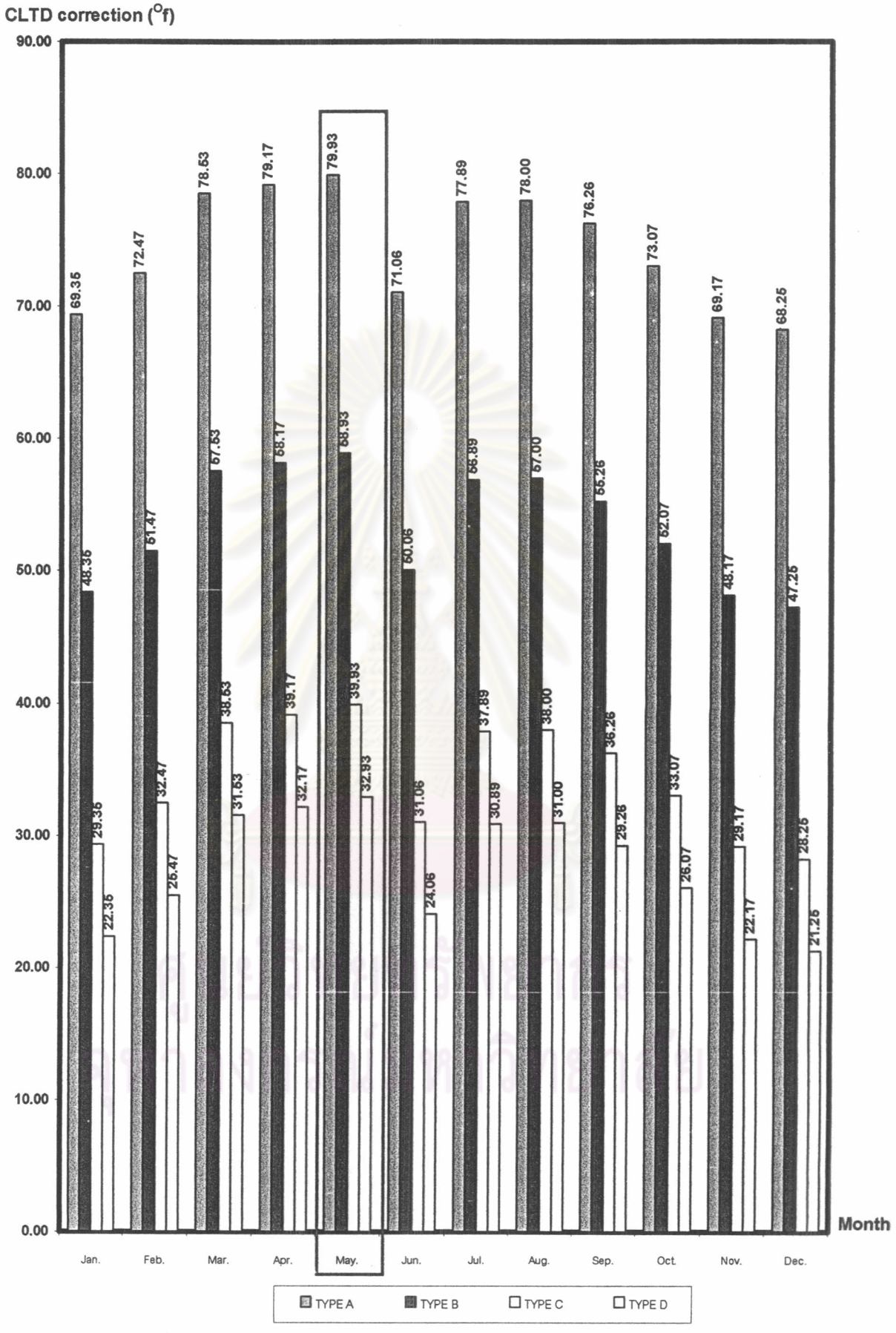
- หลังคา TYPE A ประกอบด้วยหลังคาสังกะสี, แผ่นโลหะมีค่าภาระความแตกต่างความร้อนเทียบเท่าสูงสุด (CLTD PEAK) เท่ากับ 79.90 Btu/h-ft^2
- หลังคา TYPE B ประกอบด้วยหลังคากระเบื้องซีแพคโมเนีย, หลังคากระเบื้องลอนคู่และกระเบื้องดินเผา มีค่าภาระความแตกต่างความร้อนเทียบเท่าสูงสุด (CLTD PEAK) เท่ากับ 58.90 Btu/h-ft^2
- หลังคา TYPE C ประกอบด้วยหลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 12 เซนติเมตร มีค่าภาระความแตกต่างความร้อนเทียบเท่าสูงสุด (CLTD PEAK) เท่ากับ 39.90 Btu/h-ft^2



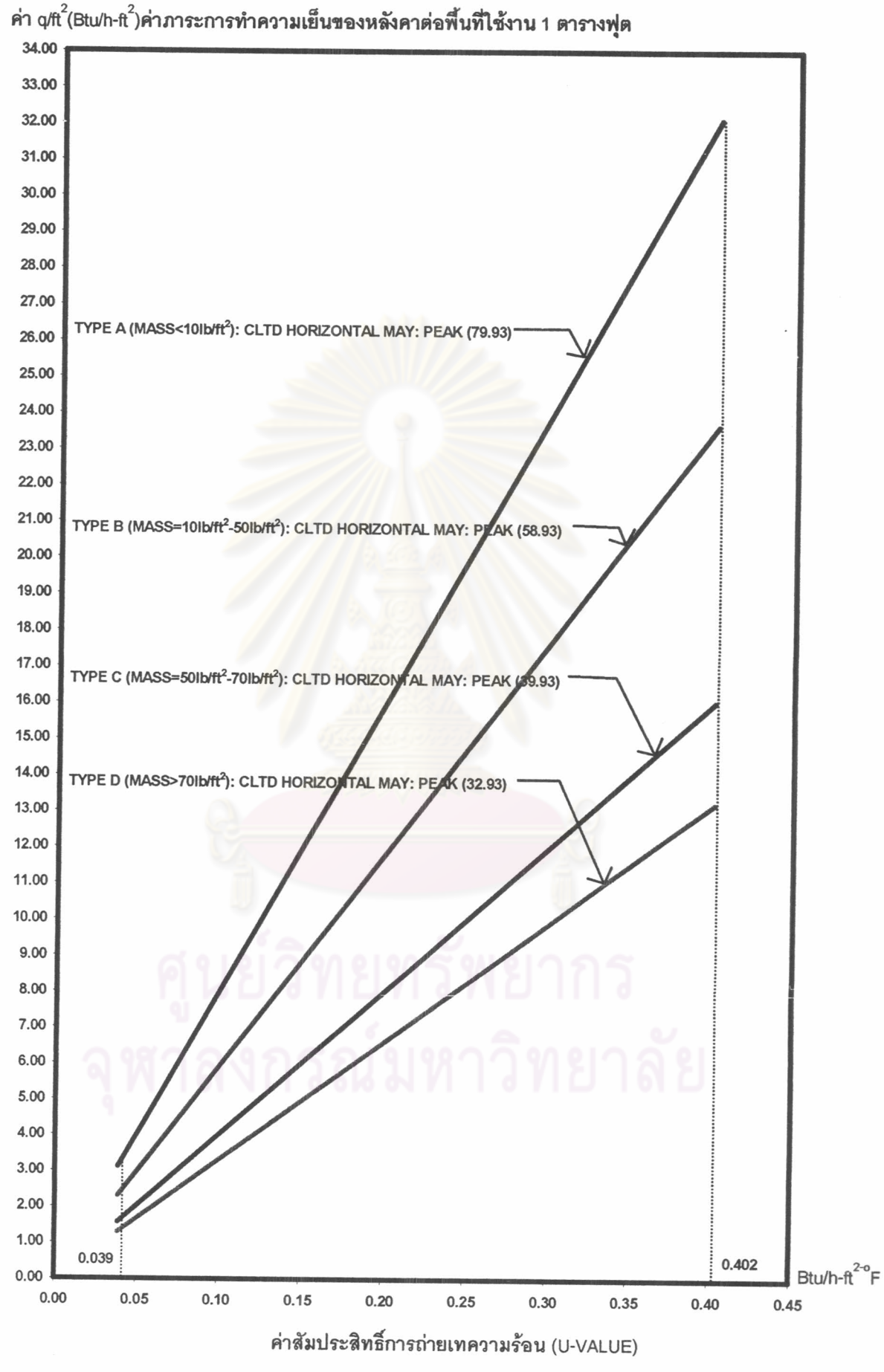
แผนภูมิที่ 3.6 แสดงการหาค่า CLTD correction สูงสุดของวัสดุมุงหลังคาที่ไม่มีฝ้าเพดานแต่ละประเภท จากสภาพภูมิอากาศประจำปี 2543



แผนภูมิที่ 3.7 แสดงค่าภาระการทำความเย็นต่อพื้นที่ใช้งาน 1 ตารางฟุตของวัสดุหลังคาที่ไม่มีฝ้าเพดานแต่ละกลุ่ม



แผนภูมิที่ 3.8 แสดงการหาค่า CLTD correction สูงสุดของวัสดุมุงหลังคาที่มีฝ้าเพดานแต่ละประเภท จากสภาพภูมิอากาศประจำปี 2543



แผนภูมิที่ 3.9 แสดงค่าภาระการทำความเย็นต่อพื้นที่ใช้งาน 1 ตารางฟุตของวัสดุหลังคาที่มีฝ้าเพดานแต่ละกลุ่ม

- หลังคา TYPE D ประกอบด้วยหลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 15 เซนติเมตร มีค่าภาระความแตกต่างความร้อนเทียบเท่าสูงสุด (CLTD PEAK) เท่ากับ 32.9 Btu/h-ft^2

จากนั้นนำเอาค่าภาระความแตกต่างความร้อนเทียบเท่าสูงสุด (CLTD PEAK) ของวัสดุหลังคาแต่ละชนิดมาเป็นตัวคูณกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (ค่า U-VALUE) ที่ได้กำหนดไว้ในขั้นตอนที่ 2 โดยในที่นี้ได้กำหนดพื้นที่ในการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศเท่ากับ 1 ตารางฟุต ซึ่งจากแผนภูมิที่ 3.8,3.9 สามารถสรุปค่าภาระการทำความเย็นต่อพื้นที่ใช้งานเครื่องปรับอากาศ 1 ตารางฟุต แยกตามลักษณะโครงสร้างของหลังคาได้ดังนี้

- **หลังคาที่ไม่มีการติดตั้งฝ้าเพดาน**

- หลังคา TYPE A ประกอบด้วยหลังคาสังกะสี, แผ่นโลหะมีค่าภาระการทำความเย็นเท่ากับ 34.14 – 80.09 Btu / h. ft^2. $^\circ$F
- หลังคา TYPE B ประกอบด้วยหลังคากระเบื้องซีแพคโมเนีย, หลังคากระเบื้องลอนคู่และกระเบื้องดินเผา มีค่าภาระภาระการทำความเย็น 27.81 – 65.24 Btu / h. ft^2. $^\circ$F
- หลังคา TYPE C ประกอบด้วยหลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 12 เซนติเมตร มีค่าภาระภาระการทำความเย็น 23.17 – 54.35 Btu / h. ft^2. $^\circ$F
- หลังคา TYPE D ประกอบด้วยหลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 15 เซนติเมตร มีค่าภาระภาระการทำความเย็น 19.37 – 45.44 Btu / h. ft^2. $^\circ$F

- **หลังคามีฝ้าเพดานยิบซั่มบอร์ดหนา 9 มม.และเพิ่มฉนวนกันความร้อนหนา 2 นิ้ว**

- หลังคา TYPE A ประกอบด้วยหลังคาสังกะสี, แผ่นโลหะมีค่าภาระการทำความเย็นเท่ากับ 3.12 – 32.12 Btu / h. ft^2. $^\circ$F
- หลังคา TYPE B ประกอบด้วยหลังคากระเบื้องซีแพคโมเนีย, หลังคากระเบื้องลอนคู่และกระเบื้องดินเผา มีค่าภาระภาระการทำความเย็น 2.30 – 23.68 Btu / h. ft^2. $^\circ$F
- หลังคา TYPE C ประกอบด้วยหลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 12 เซนติเมตร มีค่าภาระภาระการทำความเย็น 1.56 – 16.04 Btu / h. ft^2. $^\circ$F
- หลังคา TYPE D ประกอบด้วยหลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก หนา 15 เซนติเมตร มีค่าภาระภาระการทำความเย็น 1.28 – 13.23 Btu / h. ft^2. $^\circ$F

ขั้นตอนที่ 6 การกำหนดขอบเขตพื้นที่ของหลังคา

ในการที่จะสร้างแบบประเมินประสิทธิภาพหลังคาของอาคารในการประหยัดพลังงานนั้น นอกจากผู้ใช้แบบประเมินจะทราบถึงระดับค่าภาระการทำความเย็นของวัสดุหลังคาแต่ละชนิดแล้ว ผู้ใช้แบบประเมินยังสามารถที่จะทราบอัตราการใช้พลังงานในกรณีที่อาคารนั้นใช้ระบบปรับอากาศด้วย ทั้งนี้ เมื่อจะพิจารณาถึงอัตราการใช้พลังงานเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกันระหว่างวัสดุปกคลุมหลังคาแต่ละชนิด จะต้องนำพื้นที่ของหลังคาอาคารมาใช้ในการคิดคำนวณด้วย โดยการพิจารณาการใช้พลังงานเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนในส่วนของหลังคาอาคารจะเปรียบเทียบเป็นหน่วยบีทียูต่อตารางเมตร (Btu / m^2)

จาก สมการที่ (1) กำหนดให้

A = พื้นที่ของหลังคาในทิศทางนั้นๆ / พื้นที่ใช้สอยเฉพาะส่วนที่มีการปรับอากาศทั้งหมดของอาคาร

โดยในการหาขอบเขตพื้นที่ของหลังคา (A) เพื่อนำมาหาช่วงขอบเขตของค่าพลังงานต่ำสุดและสูงสุด ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการสำรวจจากบ้านตัวอย่างที่มีลักษณะของโครงสร้างหลังคา, พื้นที่หลังคาอาคารและพื้นที่ใช้สอยในส่วนที่ปรับอากาศที่แตกต่างกัน มาเป็นฐานในการหาค่าเฉลี่ยที่เหมาะสมในการเปรียบเทียบระดับคะแนนในกรณีการใช้ระบบปรับอากาศ ซึ่งได้นำการคัดเลือกกลุ่มบ้านตัวอย่างมาทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยทั้งหมด 15 หลัง สามารถแสดงผลการคำนวณออกมาได้ดังตารางที่ 3.9

ลำดับที่	แบบบ้าน	พื้นที่หลังคาอาคาร (ตรม.)	พื้นที่ใช้สอยของอาคาร (ตรม.)	อัตราส่วนพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้สอย
1	บ้านกรมโยธา แบบประหยัด 2	82.40	53.10	1.55
2	บ้านเดี่ยวเรือนเล็ก	92.40	54.00	1.71
3	บ้านลอยชายชั้นครึ่ง	81.00	80.00	1.01
4	บ้านกรมโยธา แบบประหยัด 3	72.00	65.61	1.10
5	บ้านเรนโบว์	120.00	102.25	1.17
6	บ้านเดี่ยวเบิกบาน	160.00	146.00	1.10
7	บ้านไทยอนุรักษ์ไทยภาคกลาง	260.00	105.30	2.47
8	บ้านไทยอนุรักษ์ไทยภาคเหนือ	258.00	132.50	1.95
9	บ้านไทยอนุรักษ์ไทยภาคใต้	210.00	141.00	1.49

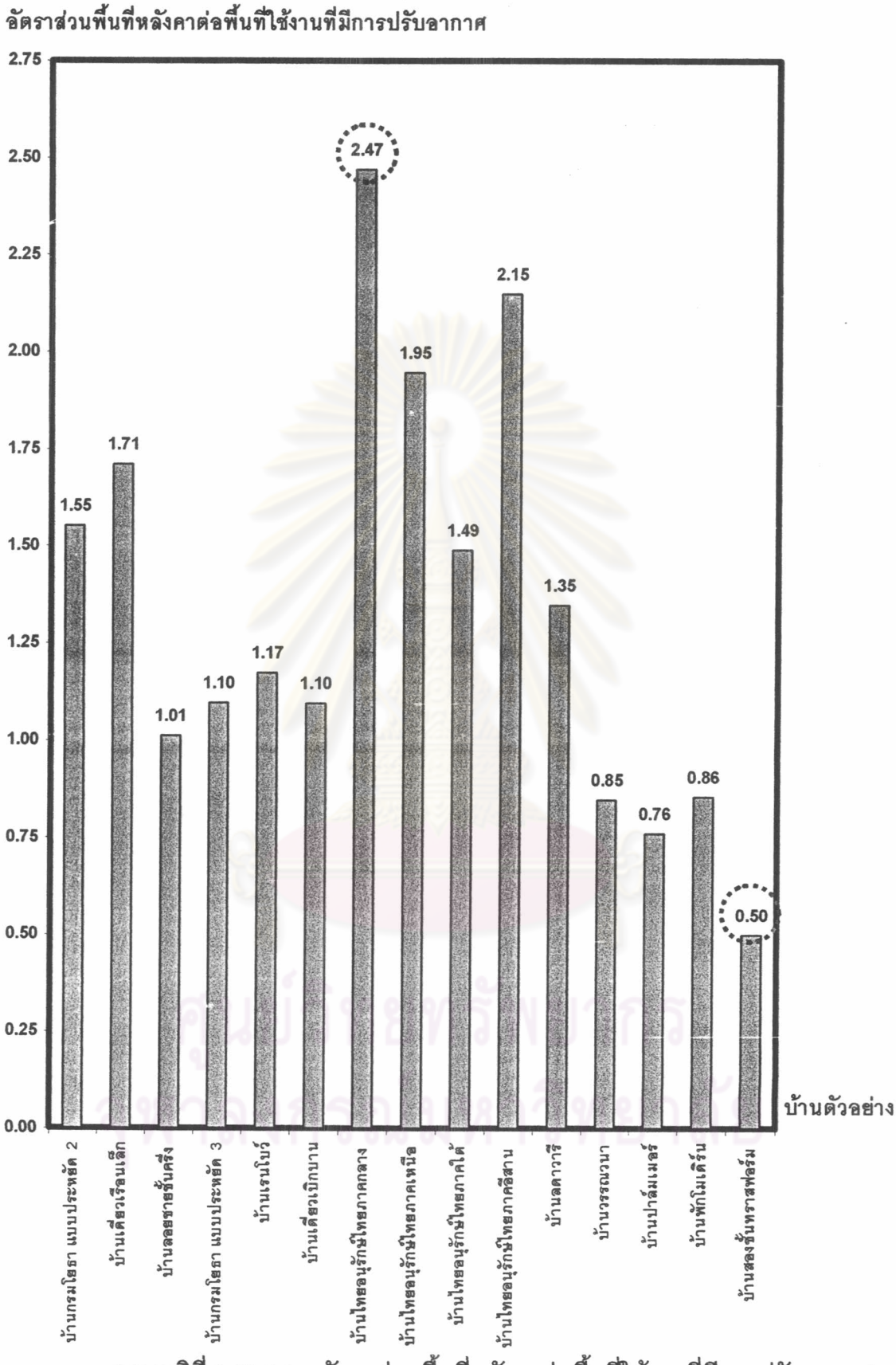
10	บ้านไทยอนุรักษ์ไทยภาคอีสาน	210.00	110.00	1.91
11	บ้านลดาวารี	260.00	193.00	1.35
12	บ้านวรรณวนา	222.00	261.55	0.85
13	บ้านปาล์มเมอร์	190.00	249.50	0.76
14	บ้านพักโมเดิร์น	218.70	255.25	0.86
15	บ้านสองชั้นทราสฟอร์ม	125.00	250.00	0.50
ค่าสูงสุด		**260.00**	**261.55**	**2.47**
ค่าต่ำสุด		72.00	53.10	0.50

ตารางที่ 3.9 แสดงผลการคำนวณอัตราส่วนพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้สอย(ตรม.)ของบ้านตัวอย่างที่คัดเลือกมาเป็นกรณีศึกษา

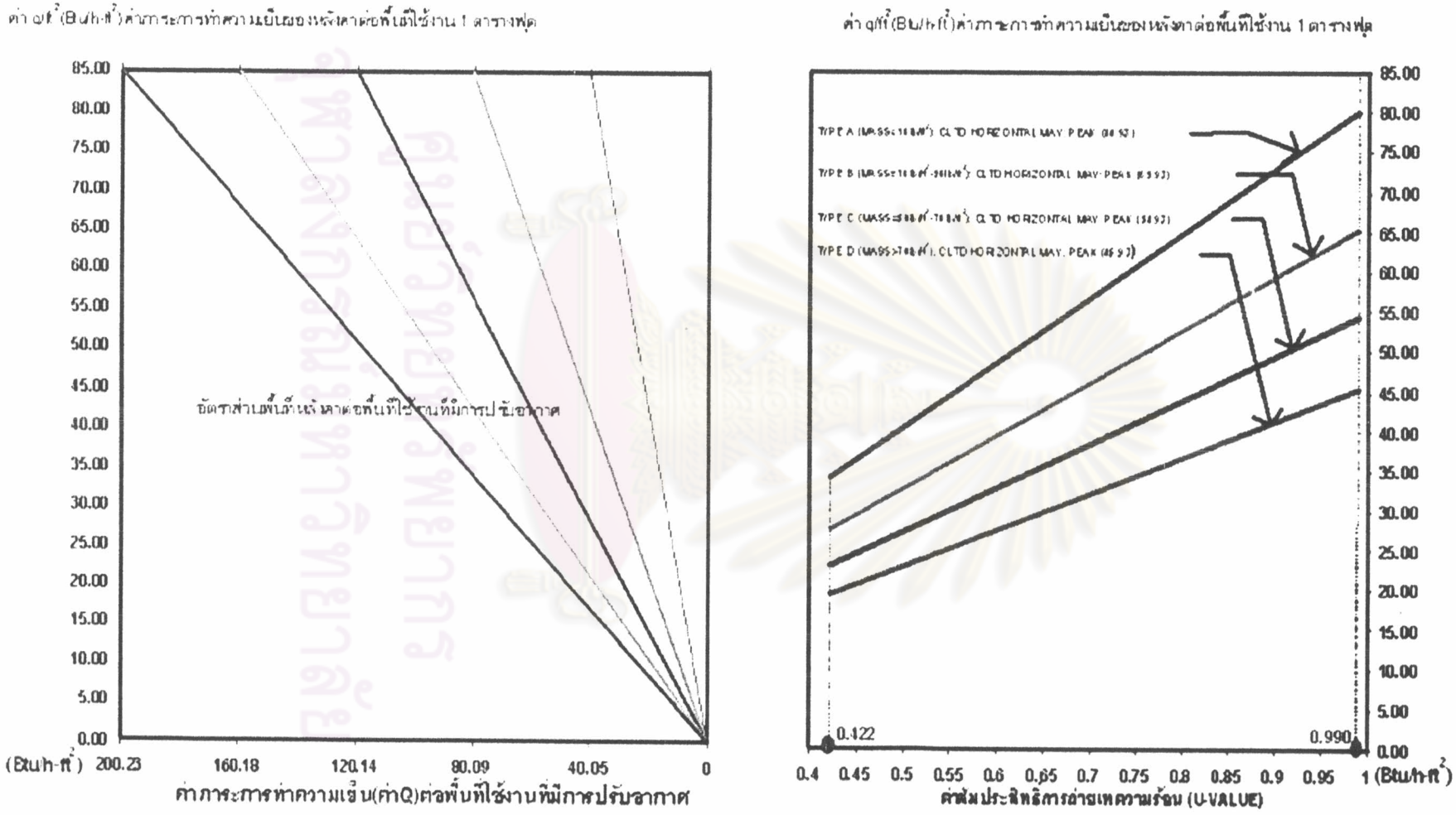
ซึ่งจากผลการคำนวณอัตราส่วนพื้นที่ของหลังคาอาคารในแต่ละด้านต่อพื้นที่ใช้สอยของอาคารพบว่า ค่าสัดส่วนของพื้นที่อยู่ในช่วงระหว่าง 0.50 – 2.47 แสดงว่า บ้านพักอาศัยส่วนใหญ่มีอัตราส่วนพื้นที่หลังคาของอาคารในแต่ละด้านต่อพื้นที่ใช้สอยของอาคารอยู่ในช่วงนี้ ซึ่งก่อนจะนำมาเป็นขอบเขตสัดส่วนพื้นที่หลังคาอาคารในการสร้างแบบประเมินประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานของหลังคาอาคารในกรณีที่มีการปรับอากาศ ได้ปรับค่าของช่วงสัดส่วนให้เหมาะสมยิ่งขึ้น คืออยู่ในช่วงระหว่าง 0.50 – 2.50 จากนั้นนำเอาสัดส่วนที่ได้นี้มาสร้างเป็นแผนภูมิสัดส่วนพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้งานของเครื่องปรับอากาศเพื่อเป็นตัวคูณกับค่าภาระการทำความเย็นที่คำนวณมาได้ข้างต้นเพื่อหาค่าระดับคะแนนของหลังคาแต่ละชนิดต่อไป (แผนภูมิที่ 3.10)

จากแผนภูมิที่ 3.11,3.12 หลังจากคำนวณได้สัดส่วนของพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้งานที่ติดตั้งระบบปรับอากาศของอาคารที่มีช่วงของค่าต่ำสุดและสูงสุดแล้ว จึงนำเอาค่าอัตราส่วนของพื้นที่ใช้สอยอาคารไปเป็นตัวคูณกับค่าภาระการทำความเย็น (ค่า Q) ต่อพื้นที่ 1 ตารางเมตรที่คำนวณไว้แล้วข้างต้น โดยเอาค่าอัตราส่วนของพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยอาคารค่าต่ำสุดคูณกับค่าภาระการทำความเย็นค่าต่ำสุด, และเอาค่าอัตราส่วนของพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยอาคารค่าสูงสุดคูณกับค่าภาระการทำความเย็นสูงสุด ซึ่งผลจากการคำนวณจะได้ช่วงค่าภาระการทำความเย็น (ค่า Q) ของวัสดุปกคลุมหลังคาแต่ละประเภทและแต่ละกรณีที่ทำการศึกษา

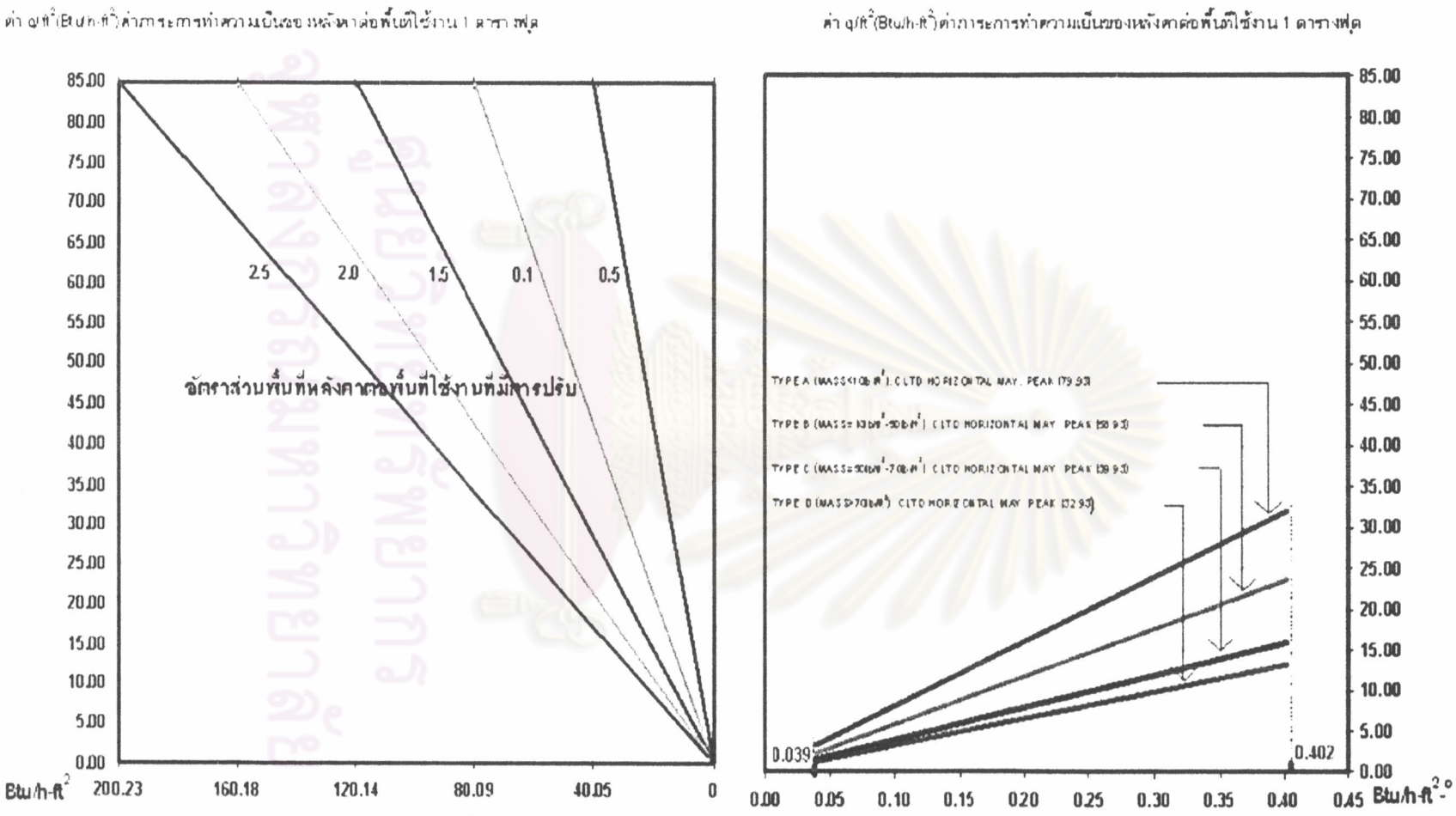
จากนั้นนำเอาค่าภาระการทำความเย็น (ค่า Q) ที่คำนวณได้มาทำการสรุปผลของช่วงค่าภาระการทำความเย็นต่ำสุดและสูงสุด เพื่อนำมาเป็นเกณฑ์ในการกำหนดช่วงระดับคะแนนในการประเมินประสิทธิภาพของหลังคาอาคารแต่ละชนิดต่อไป



แผนภูมิที่ 3.10 แสดงอัตราส่วนพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้งานที่มีการปรับอากาศของบ้านตัวอย่างที่ทำการคัดเลือกมาเป็นกรณีศึกษา



แผนภูมิที่ 3.11 แสดงการต่อแผนภูมิค่าภาระการทำความเย็นต่อพื้นที่ใช้งาน 1 ตารางฟุตคูณกับอัตราส่วนพื้นที่ใช้งานที่มีการปรับอากาศของวัสดุหลังคาที่ไม่มีฉนวนตามแต่ละกลุ่ม



แผนภูมิที่ แสดงการต่อแผนภูมิค่าภาระการทำความเย็นต่อพื้นที่ใช้งาน 1 ตารางฟุตคูณกับอัตราส่วนพื้นที่ใช้งานที่มีการปรับชากลของมัลคุนหลังคาที่มีฝ้าเพดานแต่ละกลุ่ม

ขั้นตอนที่ 7 สรุปผลการคำนวณค่าภาระการทำความเย็น

จากแผนภูมิที่ 3.11 และ 3.12 เมื่อคำนวณค่าภาระการทำความเย็น (ค่า Q) ได้ผลออกมาเป็นค่าต่ำสุดและสูงสุดแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือ การสรุปผลค่าภาระการทำความเย็นต่ำสุดและสูงสุดของในแต่ละกรณีศึกษา ซึ่งจากผลการคำนวณหาค่าภาระการทำความเย็นของวัสดุหลังคาเมื่อนำมาคูณกับอัตราส่วนพื้นที่หลังคาสามารถสรุปค่าการทำความเย็นได้ดังนี้

- **หลังคาที่ไม่มีการติดตั้งฝ้าเพดานทุกชนิดที่คัดเลือกมาทำการศึกษา**
  - มีค่าภาระการทำความเย็นต่อพื้นที่ใช้งานที่ติดตั้งระบบปรับอากาศ ต่ำสุด เท่ากับ 9.69 Btu / h. ft^2
  - มีค่าภาระการทำความเย็นต่อพื้นที่ใช้งานที่ติดตั้งระบบปรับอากาศ สูงสุด เท่ากับ 200.23 Btu / h. ft^2

- **หลังคามีฝ้าเพดานยิบซั่มบอร์ดหนา 9 มม.และฉนวนกันความร้อนหนา 2 นิ้ว**
  - มีค่าภาระการทำความเย็นต่อพื้นที่ใช้งานที่ติดตั้งระบบปรับอากาศ ต่ำสุด เท่ากับ 0.65 Btu / h. ft^2
  - มีค่าภาระการทำความเย็นต่อพื้นที่ใช้งานที่ติดตั้งระบบปรับอากาศ สูงสุด เท่ากับ 80.25 Btu / h. ft^2

จากข้อความดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า วัสดุหลังคาที่มีค่าภาระการทำความเย็นต่อพื้นที่ใช้งานที่ติดตั้งระบบปรับอากาศต่ำที่สุด มีค่าเท่ากับ 0.65 Btu / h. ft^2 ส่วนวัสดุหลังคาที่มีค่าภาระการทำความเย็นต่อพื้นที่ใช้งานที่ติดตั้งระบบปรับอากาศสูงที่สุด มีค่าเท่ากับ 200.23 Btu / h. ft^2

ขั้นตอนที่ 8 การกำหนดช่วงคะแนนของหลังคาในส่วนของภาระการทำความเย็น

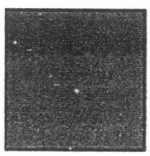
ในการที่จะกำหนดช่วงคะแนนของหลังคาในส่วนของภาระการทำความเย็นเพื่อที่จะนำไปสร้างแบบประเมินประสิทธิภาพหลังคาของอาคารในการประหยัดพลังงานนั้น จะต้องนำพื้นที่หลังคาของอาคารมาใช้ในการคิดคำนวณด้วย โดยในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการกำหนดรูปแบบของหลังคาที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบันมาทำการพิจารณาเพื่อหาขอบเขตของพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยที่มีการปรับอากาศให้มีความเหมาะสมและครอบคลุมลักษณะของหลังคาที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบันให้ได้มากที่สุดโดยจะพิจารณาการใช้พลังงานในส่วนของหลังคาอาคารที่แสดงผลออกมาเป็นค่าภาระการทำความเย็น จะเปรียบเทียบเป็นหน่วย บีทียูต่อตารางเมตร (Btu / m^2)

จาก สมการที่ (1) กำหนดให้

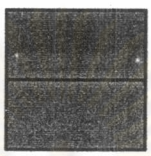
$$A = \frac{a \text{ (พื้นที่ของหลังคา)}}{b \text{ (พื้นที่ใช้สอยภายในอาคาร)}}$$

โดยในการคำนวณอัตราส่วนอ้างอิง เพื่อหาอัตราส่วนพื้นที่ของหลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารที่มีการปรับอากาศโดยมีวิธีการคำนวณดังต่อไปนี้ คือ

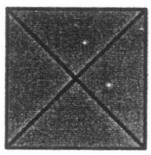
1. ทำการคัดเลือกรูปทรงของหลังคาบ้านพักอาศัยทั่วไปมาทำการศึกษา



ก. หลังคาแบน



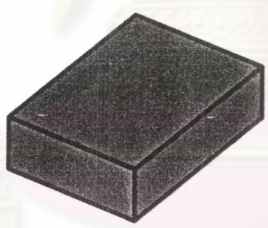
ข. หลังคาทรงจั่ว



ค. หลังคาทรงปั้นหยา

2. ทำการคำนวณอัตราส่วนพื้นที่ของหลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยภายในอาคาร โดยกำหนดให้ทุกรูปทรงหลังคา คือ $\frac{\text{พื้นที่ของหลังคาเท่ากับ 1 ตารางหน่วย (a)}}{\text{พื้นที่ใช้สอยภายในอาคารเท่ากับ 1 ตารางหน่วย (b)}}$

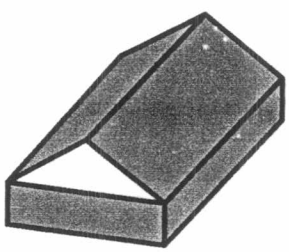
ก. หลังคาแบน



- เปรียบเทียบอัตราส่วน $A = \frac{a}{b}$ ของหลังคาแบน

ดังนั้นอัตราส่วนพื้นที่ของหลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารเท่ากับ $\frac{1}{1} = 1$ ตารางหน่วย

ข. หลังคาทรงจั่ว



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- เปรียบเทียบอัตราส่วน $A = \frac{a}{b}$ ของหลังคาทรงจั่ว มุมเอียง 15 องศา

ดังนั้นอัตราส่วนพื้นที่ของหลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารเท่ากับ $\frac{0.52*2}{1} = \frac{1.04}{1}$

$= 1.04$ ตารางหน่วย

- เปรียบเทียบอัตราส่วน $A = \frac{a}{b}$ ของหลังคาทรงจั่ว มุมเอียง 30 องศา

ดังนั้นอัตราส่วนพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารเท่ากับ $\frac{0.58*2}{1} = \frac{1.16}{1}$

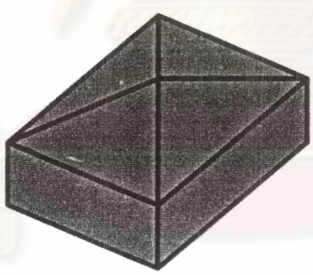
$= 1.16$ ตารางหน่วย

- เปรียบเทียบอัตราส่วน $A = \frac{a}{b}$ ของหลังคาทรงจั่ว มุมเอียง 60 องศา

ดังนั้นอัตราส่วนพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารเท่ากับ $\frac{1*2}{1} = \frac{2}{1}$

$= 2$ ตารางหน่วย

ค. หลังคาทรงปั้นหยา



- เปรียบเทียบอัตราส่วน $A = \frac{a}{b}$ ของหลังคาทรงปั้นหยา มุมเอียง 15 องศา

ดังนั้นอัตราส่วนพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารเท่ากับ $\frac{0.26*4}{1} = \frac{1.04}{1}$

$= 1.04$ ตารางหน่วย

- เปรียบเทียบอัตราส่วน $A = \frac{a}{b}$ ของหลังคาทรงปั้นหยา มุมเอียง 30 องศา

ดังนั้นอัตราส่วนพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารเท่ากับ $\frac{0.29*4}{1} = \frac{1.16}{1}$

$= 1.16$ ตารางหน่วย

- เปรียบเทียบอัตราส่วน $A = \frac{a}{b}$ ของหลังคาทรงปั้นหยา มุมเอียง 60 องศา

ดังนั้นอัตราส่วนพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารเท่ากับ $\frac{0.50*4}{1} = \frac{2}{1}$

$= 2$ ตารางหน่วย

ในการคำนวณหาพื้นที่ของอาคารบ้านพักอาศัย ได้กำหนดให้บ้านพักอาศัยมีความสูงมากที่สุดไม่เกิน 3 ชั้น ซึ่งมีพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยที่ปรับอากาศในแต่ละชั้นแตกต่างกันดังต่อไปนี้

- หลังคาแบน มุมเอียง 0 องศา

ก. พื้นที่หลังคาเท่ากับ 1 ตารางหน่วยต่อพื้นที่ใช้สอยที่ปรับอากาศเท่ากับ $\frac{1}{1}$ ตารางหน่วย

ดังนั้นอัตราส่วนพื้นที่ของหลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารเท่ากับ 1.00

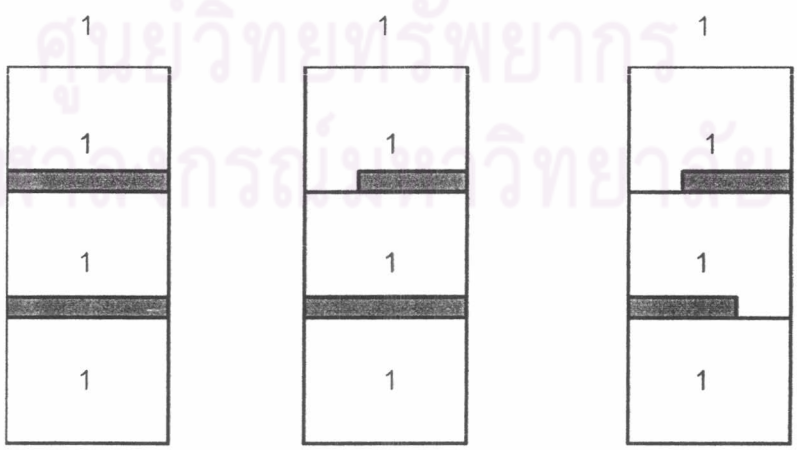
ข. พื้นที่หลังคาเท่ากับ 1 ตารางหน่วยต่อพื้นที่ใช้สอยที่ปรับอากาศเท่ากับ $\frac{1}{2}$ ตารางหน่วย

ดังนั้นอัตราส่วนพื้นที่ของหลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารเท่ากับ 0.50

ค. พื้นที่หลังคาเท่ากับ 1 ตารางหน่วยต่อพื้นที่ใช้สอยที่ปรับอากาศเท่ากับ $\frac{1}{3}$ ตารางหน่วย

ดังนั้นอัตราส่วนพื้นที่ของหลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารเท่ากับ 0.33

ดังภาพประกอบด้านล่าง



พื้นที่ใช้สอยภายในอาคารที่มีการปรับอากาศ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- หลังคามุมเอียง 15 องศา

ก. พื้นที่หลังคาเท่ากับ 1.04 ตารางหน่วยต่อพื้นที่ใช้สอยที่ปรับอากาศเท่ากับ $\frac{1.04}{1}$ ตารางหน่วย

ดังนั้นอัตราส่วนพื้นที่ของหลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารเท่ากับ 1.04

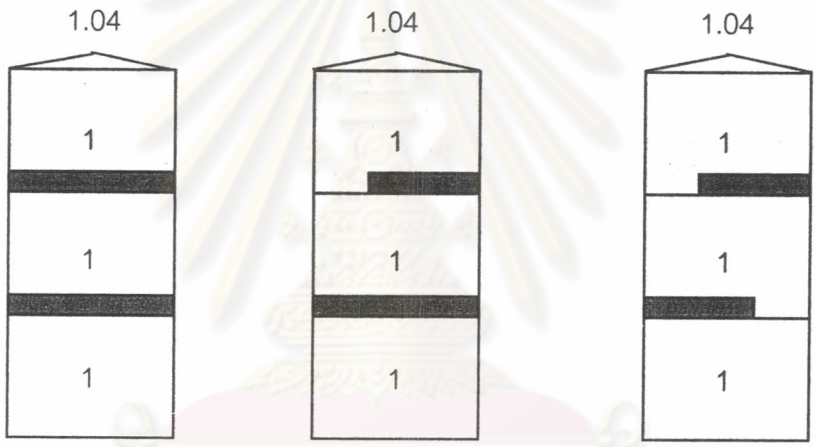
ข. พื้นที่หลังคาเท่ากับ 1.04 ตารางหน่วยต่อพื้นที่ใช้สอยที่ปรับอากาศเท่ากับ $\frac{1.04}{2}$ ตารางหน่วย

ดังนั้นอัตราส่วนพื้นที่ของหลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารเท่ากับ 0.52

ค. พื้นที่หลังคาเท่ากับ 1.04 ตารางหน่วยต่อพื้นที่ใช้สอยที่ปรับอากาศเท่ากับ $\frac{1.04}{3}$ ตารางหน่วย

ดังนั้นอัตราส่วนพื้นที่ของหลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารเท่ากับ 0.35

ดังภาพประกอบด้านล่าง



- หลังคามุมเอียง 30 องศา

ก. พื้นที่หลังคาเท่ากับ 1.16 ตารางหน่วยต่อพื้นที่ใช้สอยที่ปรับอากาศเท่ากับ $\frac{1.16}{1}$ ตารางหน่วย

ดังนั้นอัตราส่วนพื้นที่ของหลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารเท่ากับ 1.16

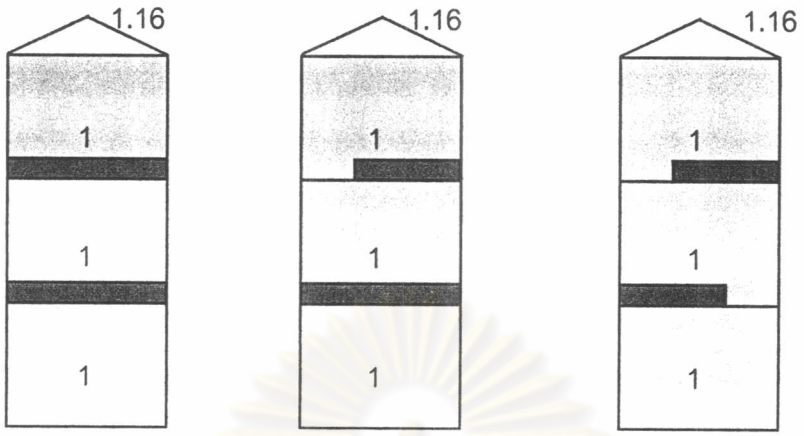
ข. พื้นที่หลังคาเท่ากับ 1.16 ตารางหน่วยต่อพื้นที่ใช้สอยที่ปรับอากาศเท่ากับ $\frac{1.16}{2}$ ตารางหน่วย

ดังนั้นอัตราส่วนพื้นที่ของหลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารเท่ากับ 0.58

ค. พื้นที่หลังคาเท่ากับ 1.16 ตารางหน่วยต่อพื้นที่ใช้สอยที่ปรับอากาศเท่ากับ $\frac{1.16}{3}$ ตารางหน่วย

ดังนั้นอัตราส่วนพื้นที่ของหลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารเท่ากับ 0.39

ดังภาพประกอบด้านล่าง



พื้นที่ใช้สอยภายในอาคารที่มีการปรับอากาศ

- หลังคามุมเอียง 60 องศา

ก. พื้นที่หลังคาเท่ากับ 2 ตารางหน่วยต่อพื้นที่ใช้สอยที่ปรับอากาศเท่ากับ $\frac{2 \text{ ตารางหน่วย}}{1}$

ดังนั้นอัตราส่วนพื้นที่ของหลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารเท่ากับ 2.00

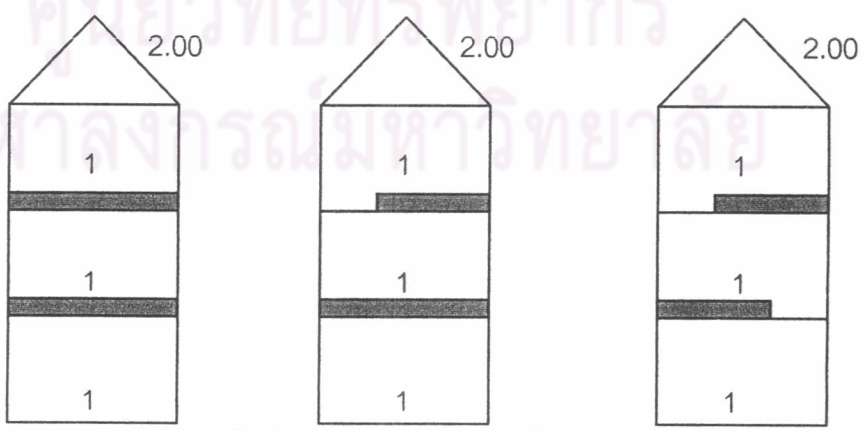
ข. พื้นที่หลังคาเท่ากับ 2 ตารางหน่วยต่อพื้นที่ใช้สอยที่ปรับอากาศเท่ากับ $\frac{2 \text{ ตารางหน่วย}}{2}$

ดังนั้นอัตราส่วนพื้นที่ของหลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารเท่ากับ 1.00

ค. พื้นที่หลังคาเท่ากับ 2 ตารางหน่วยต่อพื้นที่ใช้สอยที่ปรับอากาศเท่ากับ $\frac{2 \text{ ตารางหน่วย}}{3}$

ดังนั้นอัตราส่วนพื้นที่ของหลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารเท่ากับ 0.66

ดังภาพประกอบด้านล่าง



พื้นที่ใช้สอยภายในอาคารที่มีการปรับอากาศ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากการคำนวณหาค่าอัตราส่วนพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารต่ำที่สุดและสูงที่สุดสรุปได้ว่า เมื่อนำค่าพื้นที่หลังคามาหารด้วยพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารพบว่า อัตราส่วนพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารที่น้อยที่สุด คือ พื้นที่หลังคาที่น้อยที่สุดหารด้วยพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารที่มากที่สุด และอัตราส่วนพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารที่มากที่สุด คือ พื้นที่หลังคาที่มากที่สุดหารด้วยพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารที่น้อยที่สุด โดยสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

$$\text{อัตราส่วนพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารที่น้อยที่สุด} = \frac{\text{พื้นที่หลังคาที่น้อยที่สุด}}{\text{พื้นที่ใช้สอยภายในอาคารที่มากที่สุด}}$$

$$\text{จากการคำนวณจะได้} = \frac{1}{3}$$

เพราะฉะนั้นอัตราส่วนพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารที่น้อยที่สุด จะเท่ากับ 0.33

$$\text{อัตราส่วนพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารที่มากที่สุด} = \frac{\text{พื้นที่หลังคาที่มากที่สุด}}{\text{พื้นที่ใช้สอยภายในอาคารที่น้อยที่สุด}}$$

$$\text{จากการคำนวณจะได้} = \frac{2}{1}$$

เพราะฉะนั้นอัตราส่วนพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารที่มากที่สุด จะเท่ากับ 2.00

ซึ่งจากการคำนวณดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นเพื่อหาค่าอัตราส่วนพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้งานที่มีการปรับอากาศ สามารถสรุปได้ว่า อัตราส่วนพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้งานที่มีการปรับอากาศที่ต่ำที่สุดและสูงที่สุด จะมีค่าเท่ากับ 0.33 และ 2.00 ตามลำดับ

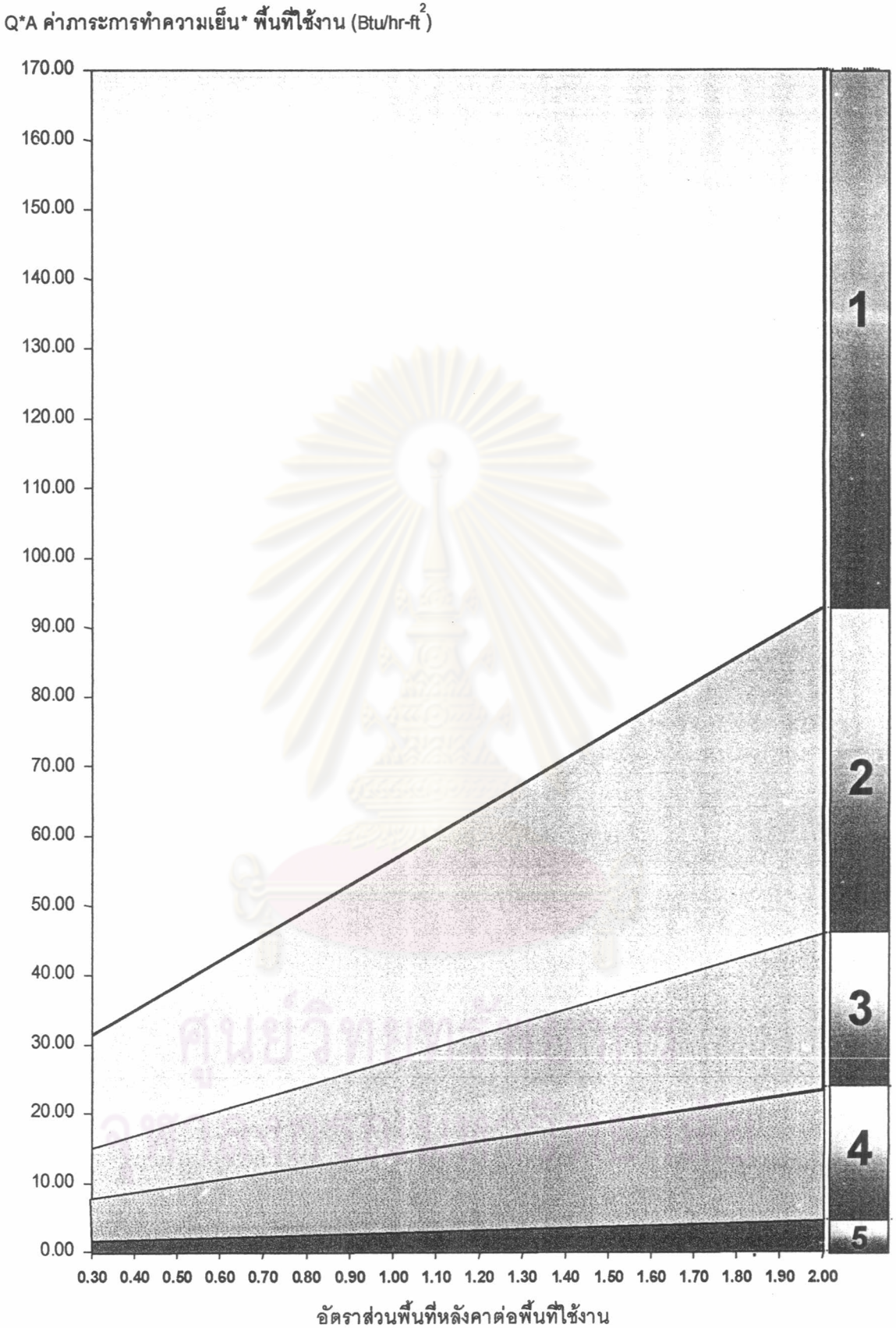
เมื่อได้ค่าอัตราส่วนพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยที่มีการปรับอากาศต่ำที่สุดและสูงที่สุดแล้ว ขั้นตอนต่อมานำค่าภาระการทำความเย็นของหลังคาที่ต่ำที่สุดมาคูณกับอัตราส่วนพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยที่ต่ำที่สุดและนำค่าภาระการทำความเย็นของหลังคาที่สูงที่สุดมาคูณกับอัตราส่วนพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยที่สูงที่สุด เพื่อหาขอบเขตค่าภาระการทำความเย็น(ค่า Q)ของพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยที่ต่ำที่สุดและสูงที่สุด จากนั้นนำค่าภาระการทำความเย็นของหลังคากระเบื้องซีแพคโมเนียที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบันมาเป็นตัวคูณกับอัตราส่วนพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยที่มีการ

ปรับอากาศต่ำที่สุดและสูงที่สุด เพื่อเป็นตัวแทนในการหาค่ากลางของช่วงระดับคะแนน ทั้งนี้ในการกำหนดค่าภาระการทำความเย็นของหลังคาที่นำมาใช้ในการหาขอบเขตของช่วงระดับคะแนนมีวิธีการคัดเลือกดังต่อไปนี้

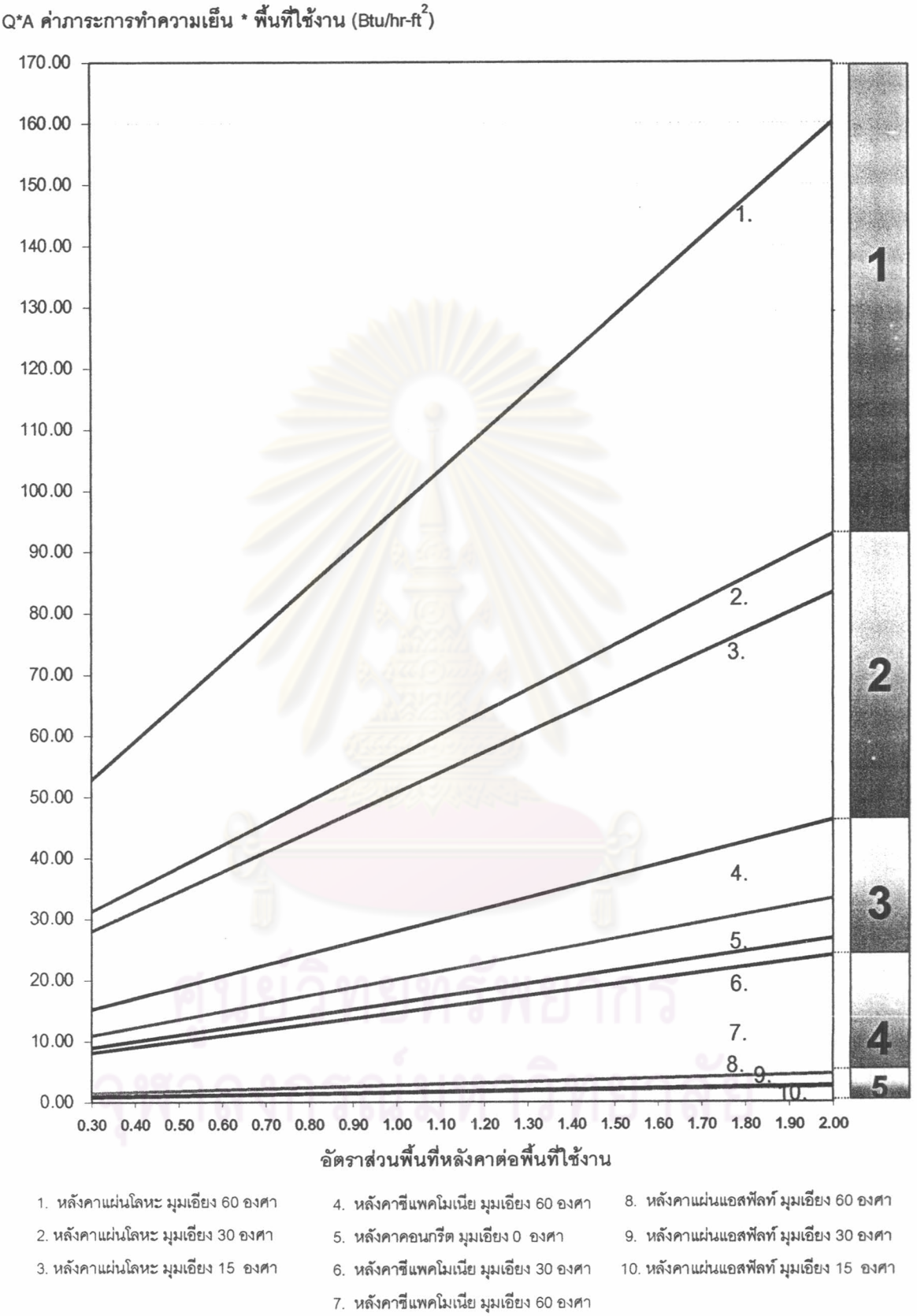
- ค่าภาระการทำความเย็นของหลังคาที่ต่ำที่สุด คือ หลังคาแผ่นแอสฟัลท์ ซึ่งจะนำไปเป็นค่าที่ใช้คูณกับอัตราส่วนพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยที่ต่ำที่สุดและสูงที่สุด
- ค่าภาระการทำความเย็นของหลังคาที่เป็นค่ากลาง คือ หลังคากระเบื้องซีแพคโมเนีย ซึ่งจะนำไปเป็นค่าที่ใช้คูณกับอัตราส่วนพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยที่ต่ำที่สุดและสูงที่สุด
- ค่าภาระการทำความเย็นของหลังคาที่สูงที่สุด คือ หลังคาแผ่นโลหะ ซึ่งจะนำไปเป็นค่าที่ใช้คูณกับอัตราส่วนพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยที่ต่ำที่สุดและสูงที่สุด

เมื่อได้ค่าภาระการทำความเย็นของหลังคาแต่ละชนิดแล้ว จากนั้นก็ทำการคำนวณโดยนำค่าภาระการทำความเย็นของหลังคาแต่ละชนิดมาคูณกับอัตราส่วนพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้สอย ซึ่งในการคำนวณจะนำค่าภาระการทำความเย็นของหลังคาแต่ละชนิดมาคูณกับอัตราส่วนพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยของรูปทรงหลังคาแต่ละแบบเพื่อให้ได้อัตราค่าภาระการทำความเย็นของหลังคาหลายๆ ค่า เพื่อที่จะสามารถนำมาเป็นตัวแบ่งช่วงของระดับคะแนนได้อย่างเหมาะสม หลังจากนั้นนำไปสร้างเป็นแผนภูมิในการหาค่าระดับคะแนนในส่วนของการประเมินประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานของหลังคาอาคารในเรื่องของภาระการทำความเย็นของหลังคาแต่ละชนิด ซึ่งผลที่ได้จากการคำนวณสามารถสรุปได้ดังแผนภูมิที่ 3.13 และนำมาแบ่งช่วงของคะแนนในแผนภูมิที่ 3.14 สามารถสรุปค่าระดับคะแนนจากค่าภาระการทำความเย็นของวัสดุหลังคาต่ออัตราส่วนพื้นที่ใช้งานที่มีการติดตั้งระบบปรับอากาศ ซึ่งทำให้สามารถกำหนดช่วงคะแนนได้ดังนี้

- หลังคาที่มีค่าภาระการทำความเย็น (ค่า Q) ต่อพื้นที่ใช้งานที่มีการปรับอากาศมากกว่าหรือเท่ากับ 93 Btu / h. ft^2 ได้คะแนนเท่ากับ 1
- หลังคาที่มีค่าภาระการทำความเย็น (ค่า Q) ต่อพื้นที่ใช้งานที่มีการปรับอากาศอยู่ระหว่าง 46.01 - 93 Btu / h. ft^2 ได้คะแนนเท่ากับ 2
- หลังคาที่มีค่าภาระการทำความเย็น (ค่า Q) ต่อพื้นที่ใช้งานที่มีการปรับอากาศอยู่ระหว่าง 24.01 - 46 Btu / h. ft^2 ได้คะแนนเท่ากับ 3
- หลังคาที่มีค่าภาระการทำความเย็น (ค่า Q) ต่อพื้นที่ใช้งานที่มีการปรับอากาศอยู่ระหว่าง 5.01 - 24 Btu / h. ft^2 ได้คะแนนเท่ากับ 4
- หลังคาที่มีค่าภาระการทำความเย็น (ค่า Q) ต่อพื้นที่ใช้งานที่มีการปรับอากาศน้อยกว่าหรือเท่ากับ 5 Btu / h. ft^2 ได้คะแนนเท่ากับ 5



แผนภูมิที่ 3.14 แสดงสรุปค่าระดับคะแนนค่าภาระการทำความเย็น(ค่าQ)ของหลังคาต่อพื้นที่ใช้สอยที่มีการปรับอากาศ



1. หลังคาแผ่นโลหะ มุมเอียง 60 องศา
2. หลังคาแผ่นโลหะ มุมเอียง 30 องศา
3. หลังคาแผ่นโลหะ มุมเอียง 15 องศา
4. หลังคาซีแพคโมเนีย มุมเอียง 60 องศา
5. หลังคาคอนกรีต มุมเอียง 0 องศา
6. หลังคาซีแพคโมเนีย มุมเอียง 30 องศา
7. หลังคาซีแพคโมเนีย มุมเอียง 60 องศา
8. หลังคาแผ่นแอสฟัลท์ มุมเอียง 60 องศา
9. หลังคาแผ่นแอสฟัลท์ มุมเอียง 30 องศา
10. หลังคาแผ่นแอสฟัลท์ มุมเอียง 15 องศา

แผนภูมิที่ 3.13 แสดงการแบ่งช่วงคะแนนค่าภาระการทำความเย็น(ค่าQ) ต่อพื้นที่ใช้งานที่มีการปรับอากาศ