

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้กล่าวถึงรายละเอียดของงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องซึ่งใช้เป็นแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ ซึ่งแบ่งเป็นหัวข้อย่อย ดังนี้

การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังทึบ

ความคลาดเคลื่อนของ Heat flux transducer

การคำนวณค่า Cooling load และค่าสัมประสิทธิ์ Cooling load temperature difference

2.1 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังทึบ

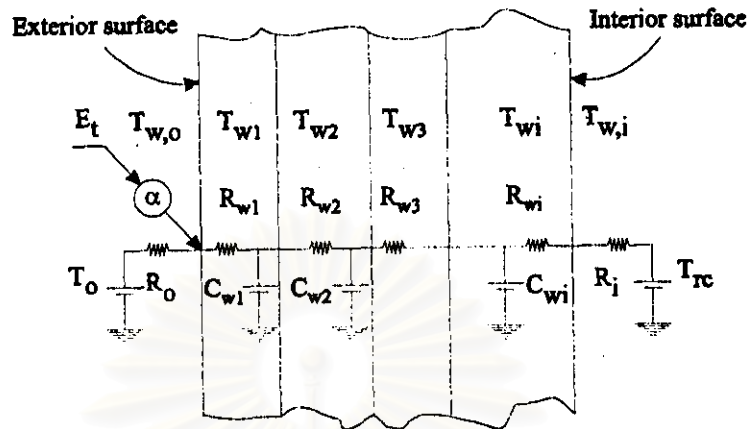
ASHRAE Task group on energy requirement

ในปี พ.ศ. 2515 ASHRAE [1] ได้ทำการเสนอวิธีการคำนวณค่าการนำความร้อนผ่านผนังทึบในหนึ่งมิติด้วยวิธี Transfer function โดยใช้ค่า Solar-air temperature ซึ่งเป็นอุณหภูมิสมมติที่เป็นตัวแทนของสภาพภูมิอากาศภายนอกที่มีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อนให้แก่ผนัง เป็นค่าเงื่อนไขขอบเขตผิวผนังด้านนอก และใช้ค่าอุณหภูมิอากาศภายในห้องที่สมมติให้มีค่าคงที่ เป็นค่าเงื่อนไขขอบเขตผิวผนังด้านใน ซึ่งการถ่ายเทความร้อนสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.1 ส่วนรายละเอียดจะถูกกล่าวเพิ่มในหัวข้อที่ 3.2 และ 3.3

$$q_{inside}(t) = A \cdot \left[\sum_{n=0} b_n (T_{e,t-n\delta}) - \sum_{n=1} d_n \left(\frac{q_{e,t-n\delta}}{A} \right) - T_{rc} \sum_{n=0} c_n \right] \quad (2.1)$$

Finite difference method อ้างอิงจาก Supaluk [2]

วิธี Finite difference เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถใช้หาผลเฉลยของปัญหาการนำความร้อนผ่านผนังทึบในหนึ่งมิติได้ การแก้ปัญหাজะเริ่มจากแบ่งผนังออกเป็นแผ่นบางๆ จนสามารถสมมติให้การกระจายอุณหภูมิในแต่ละแผ่นมีค่าสม่ำเสมอได้ หลังจากนั้นเขียนวงจรของการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเพื่อแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ภายใต้ระบบที่พิจารณาไว้ดังรูปที่ 2.1 โดยที่อุณหภูมิผิวของแผ่นบางๆแต่ละแผ่นสามารถคำนวณได้จากเมตริกซ์การนำความร้อนตามสมการที่ 2.2 ดังนี้



รูปที่ 2.1 วงจรของการถ่ายเทความร้อนเพื่อแสดงความต้านทานของตัวแปรต่างๆ ภายใต้ระบบที่พิจารณา

$$\begin{bmatrix}
 \frac{1}{R_o} + \frac{1}{R_{w1}} & -\frac{1}{R_{w1}} & 0 & 0 & 0 \\
 -\frac{1}{R_{w1}} & \frac{1}{R_{w1}} + \frac{1}{R_{w2}} + \frac{C_{w1}}{\Delta t} & -\frac{1}{R_{w2}} & 0 & 0 \\
 0 & -\frac{1}{R_{w2}} & \frac{1}{R_{w2}} + \frac{1}{R_{w3}} + \frac{C_{w2}}{\Delta t} & -\frac{1}{R_{w3}} & 0 \\
 0 & 0 & -\frac{1}{R_{w3}} & \frac{1}{R_{w3}} + \frac{1}{R_{wi}} + \frac{C_{w3}}{\Delta t} & -\frac{1}{R_{wi}} \\
 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R_{wi}} & \frac{1}{R_{wi}} + \frac{1}{R_i}
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 T_{w0}^{j+1} \\
 T_{w1}^{j+1} \\
 T_{w2}^{j+1} \\
 T_{w3}^{j+1} \\
 T_{wi}^{j+1}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 \alpha \cdot E_t + \frac{T_o}{R_o} \\
 \frac{C_{w1}}{\Delta t} \cdot T_{w1}^j \\
 \frac{C_{w2}}{\Delta t} \cdot T_{w2}^j \\
 \frac{C_{w3}}{\Delta t} \cdot T_{w3}^j \\
 \frac{T_i}{R_i}
 \end{bmatrix}
 \quad (2.2)$$

งานวิจัยของ Fracastora G., Masoero M. และ Call M.

ในปี พ.ศ. 2525 Fracastora [3] ได้เสนอการคำนวณการถ่ายเทความร้อนผ่านกรอบอาคารด้วยวิธี Surface heat transfer ซึ่งเป็นการคำนวณสมการสมดุลของพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทเข้าและออกจากกรอบอาคารที่กำลังพิจารณา อันได้แก่ ผนัง พื้น เพดาน และ กระจก โดยพิจารณาว่าการพาความร้อน การแผ่รังสีความร้อน และการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนคลื่นยาวระหว่างผนังด้านต่างๆ กับสิ่งแวดล้อมอย่างละเอียด ผลการวิจัยพบว่า วิธีดังกล่าวสามารถใช้ได้ดีกับกรอบอาคารที่เป็นกระจกชั้นเดียว เมื่อใช้ข้อมูลสภาพบรรยากาศของเมืองโทรโน ประเทศอิตาลี

งานวิจัยของ Supaluk Pukdee

ในปี พ.ศ. 2533 Supaluk Pukdee [2] ได้ทำการศึกษาในหัวข้อเรื่อง "A method for estimating the heat transfer into an air-conditioned space" โดยทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังที่ประกอบด้วยวัสดุ 1 ชนิดในหนึ่งมิติ เมื่อสภาพแวดล้อมที่ผิวผนังทั้งสองด้านแปรเปลี่ยนตามเวลา โดยทำการเก็บรวบรวมข้อมูลสภาพบรรยากาศ ได้แก่ อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศ ค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์ ค่ารังสีกระจายจากดวงอาทิตย์ ค่ารังสีตรงจากดวงอาทิตย์ และค่าความเร็วลมที่ผนังห้องทดลอง รวมทั้งการเก็บรวบรวมข้อมูลอื่นๆ ด้วย ได้แก่ ค่าอุณหภูมิผิวด้านนอกและด้านในของผนังห้องทดลอง และค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังที่ห้องทดลองที่ตรวจวัดด้วย Heat flux meter

ผู้วิจัยได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังโดยใช้วิธีการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่แตกต่างกัน 3 วิธี คือ

- 1) Surface heat transfer method จาก Fracastora [3]
- 2) Transfer function method จาก ASHRAE [1]
- 3) Finite difference method

จากการเปรียบเทียบค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านผิวผนังด้านนอกและด้านในระหว่างผลเฉลยจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของทั้งสามวิธีขึ้นต้นกับผลจากการตรวจวัดด้วย heat flux meter พบว่า ผลเฉลยจากวิธี Surface heat transfer และ วิธี Transfer function ให้กราฟของการถ่ายเทความร้อนผ่านผิวด้านในและผิวด้านนอกที่มีแนวโน้มเดียวกัน แต่ในช่วงที่ผนังเริ่มได้รับอิทธิพลของรังสีจากดวงอาทิตย์ตั้งแต่ 6:00 ถึง 17:00 น. ค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านผิวด้านนอกที่คำนวณได้จาก Surface heat transfer method จะมีค่ามากกว่าค่าผลเฉลยที่ได้จาก Transfer function method ประมาณ 30 - 40 % สาเหตุดังกล่าวเกิดเนื่องจากวิธีการที่หนึ่งไม่นำผลของการเก็บความร้อนภายในเนื้อวัสดุมาพิจารณาประกอบเหมือนกับวิธีที่สอง ส่วนในช่วงกลางคืนค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านผิวด้านนอกจากทั้งสองวิธีแรกจะมีค่าใกล้เคียงกัน

แต่เมื่อนำผลเฉลยจากการคำนวณของทั้ง 2 วิธีแรกมาเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดและวิธี Finite difference พบว่า ผลการตรวจวัดค่าการถ่ายเทความร้อนที่ผิวด้านในจะมีค่าใกล้เคียงกับผลเฉลยของสองวิธีแรก ส่วนวิธี Finite difference จะให้ค่าผลเฉลยที่มีค่าต่ำที่สุด

2.2 ความคลาดเคลื่อนของ Heat flux transducer อ้างอิงจาก Flanders [4]

Heat flux transducer (HFT) หรือ Heat flux meter เป็นอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านกรอบอาคาร ได้แก่ ผนัง พื้น และ เพดาน เป็นต้น ในกรณีที่ทำการติดตั้ง HFT อย่างถูกต้องและมีค่าตัวประกอบปรับแก้ที่สภาวะทดลองที่แม่นยำ ก็จะสามารถนำ HFT ไปใช้ในการตรวจสอบความแม่นยำของผลเฉลยจากการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การหาค่าตัวประกอบปรับเทียบที่สภาวะทดลอง (In-situ calibration) สำหรับ HFT มีความจำเป็น เพราะหาค่าปรับเทียบมาตรฐานจากผู้ผลิตไม่เหมาะสมกับการปรับใช้ในการวัดค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านกรอบอาคาร เนื่องจากสาเหตุดังต่อไปนี้

1. เนื่องจากค่าการนำความร้อนของ HFT มีค่าแตกต่างกับผนัง ดังนั้นเมื่อนำ HFT ไปติดกับผนัง จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนังส่วนที่ติดตั้ง HFT มีค่าต่างออกไปจากเดิมและต่างจากผนังโดยรอบ ซึ่งส่งผลให้ทิศทางการไหลของความร้อนเบี่ยงเบนออกจาก HFT หรือไหลเข้าสู่ HFT ทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ตรวจวัดมีค่าน้อยหรือมากกว่าที่ควร
2. การติดตั้ง HFT อาจมีผลกระทบต่อการใช้การไหลของกระแสอากาศที่ผิวของผนัง ซึ่งทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของฟิล์มอากาศแตกต่างไปจากก่อนติดตั้ง
3. วัสดุหุ้ม HFT อาจมีคุณสมบัติในการดูดซับรังสีความร้อนแตกต่างจากสภาพแวดล้อมโดยรอบ

ในปี พ.ศ. 2513 Schwerdtfeger [5] ได้คำนวณค่าอัตราส่วนของการถ่ายเทความร้อนผ่าน HFT ต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านผนัง (Q_s/Q_m) อยู่ในรูปของอัตราส่วนของค่าการนำความร้อนของ HFT และการนำความร้อนของผนัง (K_s/K_m) ตามสมการที่ 2.3

$$\frac{Q_s}{Q_m} = \frac{K_s/K_m}{1 + H \cdot (K_s/K_m - 1)} \quad (2.3)$$

เมื่อ H คือ ค่าพารามิเตอร์ของรูปร่าง มีค่าอยู่ในช่วง 0 กับ 1 ซึ่งอาจสมมติให้มีค่าเท่ากับ 0.83 สำหรับ HFT ที่บาง

ในปี พ.ศ. 2527 Flanders [6] และ [7] ได้ทำการหาค่าตัวตรวจแก้ของ HFT ที่สภาวะการตรวจวัดจริง โดยใช้สมการที่ 2.3 และชุดทดสอบซึ่งมีผนังทดสอบที่ประกอบด้วย ยิปซัมบอร์ด ซึ่งจะได้ค่าตรวจแก้จากการทดสอบตามสมการที่ 2.4

$$F_c = (\Delta T_{ave} / SO_{ave}) / R_{const} \quad (2.4)$$

- เมื่อ F_c คือ ตัวตรวจแก้จากการทดสอบ
- ΔT_{ave} คือ ค่าเฉลี่ยของผลต่างของอุณหภูมิผิวของส่วนทดสอบ
- SO_{ave} คือ ค่าเฉลี่ยของการตรวจวัดการถ่ายเทความร้อนด้วย HFT
- R_{const} คือ ค่าความต้านทานความร้อนของส่วนทดสอบ

การติด HFT บนผนังอาจมีผลกระทบต่ออัตราการไหลของอากาศ โดยเฉพาะกรณีที่ เดิมอากาศที่ไหลบนผิวผนังด้านนั้นๆ เป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) อันอาจเกิดจากผลของ Natural convection ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของมวลอากาศเนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิผิวผนังส่วนบนและผิวผนังส่วนล่าง ส่งผลให้เกิดการไหลแบบ Natural convection ในทิศขนานกับผิวผนังในทิศขึ้นหรือลง แต่หลังจากที่ติดตั้ง HFT บนผนัง พบว่า HFT จะขัดขวางและรบกวนการไหล ทำให้สภาวะการไหลเปลี่ยนไปจากเดิมที่เป็นการไหลแบบราบเรียบเป็นการไหลแบบ transition หรืออาจเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) ได้ ซึ่งทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของฟิล์มอากาศบริเวณที่ติดตั้ง HFT มีค่าแตกต่างจากค่าสัมประสิทธิ์ของฟิล์มอากาศบริเวณผนังส่วนอื่นๆ

การหาค่าตัวประกอบปรับเทียบที่สภาวะทดลองของ HFT นั้นจะกระทำโดยนำ HFT ไปติดตั้งในชุดทดสอบที่มีสภาวะใกล้เคียงกับการทดลอง โดยติดตั้ง HFT ให้ตั้งฉากกับทิศการถ่ายเทความร้อนที่กระจายอย่างสม่ำเสมอทั้งหน้าตัดของส่วนทดสอบ ติดตั้ง HFT บนแผ่นกำเนิดความร้อน (ASTM C177) และติดแผ่นวัสดุที่มีคุณสมบัติทางความร้อนและมีความหนาเช่นเดียวกับวัสดุหุ้ม HFT (guarded HFT) โดยรอบ HFT เพื่อให้การไหลของความร้อนสม่ำเสมอทั้งหน้าตัด ในกรณีที่ใช้ HFT ตรวจวัดค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังหรือเพดาน อาจต้องใช้กล่องทดสอบที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ได้แก่ calibration hot box (ASTM C976) หรือ guarded hot box (ASTM C236) ที่มีผนังกันห้องประกอบด้วย โพลีเตตระฟลูออไรด์หนา 2 นิ้ว ประคองกับแผ่นยิปซัมหนา 1/2 นิ้ว ซึ่งเหมาะสำหรับการเทียบมาตรฐานที่ค่าอุณหภูมิและค่าการถ่ายเทความร้อนที่พบในการใช้งานจริง จากการทดสอบของ Hihannesson [8] พบว่า การติด guarded แผ่นเล็กๆ รอบบริเวณที่ตรวจวัดจะช่วยให้การไหลของความร้อนมีความสม่ำเสมอทั่ว HFT แต่ในช่วงการเทียบมาตรฐาน พบว่า ค่าตัวประกอบปรับเทียบเมื่อติด guarded กับไม่ติด guarded มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

2.3 การคำนวณค่า Cooling load temperature difference

Precalculated weighting factor อ้างอิงจาก DOE 2.1E's Engineers Manual [9]

ในปี พ.ศ. 2510 Mitalas และ Stephenson [10] & [11] ได้เสนอวิธีการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ Transfer function สำหรับใช้ในการคำนวณค่าภาระการทำความเย็นที่ถูกเรียกว่าค่าสัมประสิทธิ์ Room transfer function (RTF) และใช้ในการคำนวณค่าอุณหภูมิอากาศภายในโซนที่ถูกเรียกว่าค่าสัมประสิทธิ์ Air-temperature weighting factor แต่เนื่องจากวิธีการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ RTF ของโซนด้วยวิธี Transfer function มีความซับซ้อน ดังนั้นเพื่อให้การคำนวณค่าภาระการทำความเย็นเป็นไปได้โดยสะดวก Mitalas และ Stephenson จึงได้เสนอชุดของค่าสัมประสิทธิ์ RTF มาตรฐานสำหรับโซนที่มีน้ำหนักกรอบโซนต่อหน่วยพื้นที่เท่ากับ 30, 70 และ 150 lb/ft² โดยที่ชุดของค่าสัมประสิทธิ์ RTF จะถูกแบ่งตามประเภทของแหล่งกำเนิดความร้อนภายในและภายนอกจำนวน 3 ประเภท ได้แก่ รังสีจากดวงอาทิตย์ หลอดไฟฟ้า และกลุ่มของแหล่งกำเนิดความร้อนอื่นๆ เช่น ผู้อยู่อาศัย อุปกรณ์ต่างๆ และค่าการนำความร้อนผ่านผนังทึบ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีชุดของค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้สำหรับคำนวณค่าอุณหภูมิอากาศภายในห้องอีกหนึ่งชุดที่ถูกเรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์ Air-temperature weighting factor ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ทั้งหมด 4 ชุดนี้จะถูกเรียกว่า ค่า Precalculated weighting factor ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 การนำค่าสัมประสิทธิ์ Precalculated weighting factor มาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ RTF ของโซนที่มีน้ำหนักกรอบโซนต่อหน่วยพื้นที่นอกเหนือจากค่าที่ระบุไว้ในตารางจำเป็นต้องทำการประมาณค่าในช่วง หรือการประมาณค่านอกช่วง

สมมติฐานที่เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้ค่าสัมประสิทธิ์ Precalculated weighting factor มีดังนี้ กำหนดให้สมการคำนวณค่าภาระการทำความเย็น และสมการคำนวณค่าอุณหภูมิอากาศภายในโซนเป็นสมการเชิงเส้น กำหนดให้คุณสมบัติทางความร้อนของโซนและกรอบโซนทุกด้านมีคุณสมบัติแบบเดียวกัน และการยอมให้ค่าสัมประสิทธิ์ Precalculated weighting factor เป็นตัวกำหนดค่าคุณสมบัติอื่นๆ ของโซน ตัวอย่างเช่น คุณสมบัติทางความร้อนและทิศทางของกรอบโซนแต่ละด้าน (ผนัง หน้าต่าง พื้น และเพดาน) ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับรังสีของกรอบโซนแต่ละด้าน ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนของฟิล์มอากาศภายใน และ ผลต่างของค่าการแผ่รังสีความร้อนคลื่นยาว จากสมมติฐานตามที่ได้กล่าวมาแล้วในขั้นต้นแสดงว่าค่าสัมประสิทธิ์ Transfer function ที่ได้จากการประมาณค่าในช่วงหรือการประมาณค่านอกช่วงของค่าสัมประสิทธิ์ Precalculated weighting factor นั้นเป็นเพียงค่าโดยประมาณเท่านั้น ตัวอย่างของโปรแกรมประมาณ

ค่าพลังงานของอาคารที่ใช้วิธี Precalculated weighting factor ในการคำนวณค่าภาระการทำความเย็นของโซน คือ โปรแกรม DOE-2 โปรแกรม TRACE 600 และ โปรแกรม E20-II เป็นต้น

เนื่องจากข้อมูลขาเข้าส่วนใหญ่ซึ่งก็คือ อุณหภูมิผิวนอกและผิวใน ถูกจัดเก็บแบบรายชั่วโมงซึ่งเป็นข้อมูลแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete) ที่มีช่วงเวลา (time step) เป็นค่าคงที่ ทำให้การประมาณค่าในช่วงและการประมาณค่านอกช่วงของค่าสัมประสิทธิ์ Precalculated weighting factor จะต้องดำเนินการภายใต้ความสัมพันธ์ของ Z-transfer function ความสัมพันธ์ระหว่างสมการ Z-transfer function กับค่าสัมประสิทธิ์ Room transfer function (v_0 , v_1 , และ w_1) ของแหล่งกำเนิดความร้อนภายในและภายนอก (ที่อ้างอิงจาก Kerrisk [9] & [12]) ได้แก่ รั้งสี่จากดวงอาทิตย์ หลอดไฟฟ้า และกลุ่มของแหล่งกำเนิดความร้อนอื่นๆ เป็นต้น ซึ่งจะถูกเขียนเป็นสมการดังนี้

$$F(z) = \frac{v_0 + v_1 \cdot z^{-1}}{1 + w_1 \cdot z^{-1}} \quad (2.5)$$

สำหรับสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Z-transfer function กับ ค่าสัมประสิทธิ์ air-temperature weighting factor (g_0 , g_1 , g_2 และ p_1) ที่เป็นค่าสัมประสิทธิ์สำหรับใช้ในการคำนวณค่าอุณหภูมิห้องรายชั่วโมงและค่า Heat extraction rate รายชั่วโมง จะถูกเขียนเป็นสมการดังนี้

$$F(z) = \frac{g_0 + g_1 \cdot z^{-1} + g_2 \cdot z^{-2}}{1 + p_1 \cdot z^{-1}} \quad (2.6)$$

เมื่อ g_0 , g_1 , g_2 และ p_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ air-temperature weighting factor ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่า normalized weightin factor คือ ค่าสัมประสิทธิ์ g_0^* , g_1^* และ g_2^* พื้นที่ของโซน (A) และค่าการนำความร้อนรวมของโซน (K_T) ที่สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$g_0 = A_f \cdot g_0^* + K_T \quad (2.7)$$

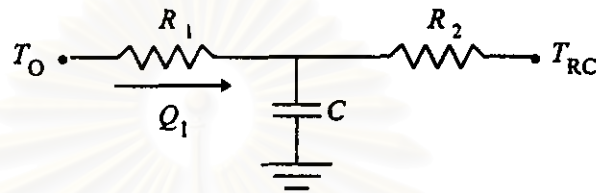
$$g_1 = A_f \cdot g_1^* + p_1 \cdot K_T \quad (2.8)$$

$$g_2 = A_f \cdot g_2^* \quad (2.9)$$

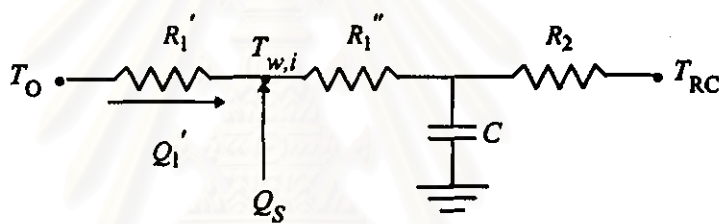
จงแสดงค่าความต้านทานความร้อนและค่าความจุความร้อนของการถ่ายเทความร้อนภายในโซน (RC circuit) ที่ใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ Precalculated weighting factor จะถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.2 โดยนิยามความหมายของตัวแปรของอุณหภูมิดังนี้ กรณีวงจร A กำหนดให้ T_{rc} คือ อุณหภูมิอากาศภายในโซน และ T_o คือ อุณหภูมิภายนอกโซน ส่วนกรณีวงจร B กำหนดให้ $T_{w,i}$ คือ อุณหภูมิผิวผนังด้านใน และนิยามความหมายของตัวแปรของค่าภาระการทำความเย็น (หรือปริมาณความร้อนที่โซนถ่ายเทให้แก่อากาศภายในโซน) ดังนี้ กรณีวงจร A กำหนดให้ค่าภาระการ

ทำความเย็น คือ $-Q_1$ ส่วนกรณีวงจร B กำหนดให้ $-Q_1'$ คือค่าภาระการทำความเย็น และ Q_S คือปริมาณความร้อนจากภายในผนัง ซึ่งสามารถเขียน Z-transfer function ของวงจรความร้อน A และ B ได้ดังสมการที่ 2.12 เมื่อค่าสัมประสิทธิ์ a_0, a_1 และ b_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของ Z-transfer function

$$F(z) = \frac{a_0 + a_1 \cdot z^{-1}}{1 + b_1 \cdot z^{-1}} \quad (2.10)$$



วงจร A (air-temperature)



วงจร B (heat gain)

รูปที่ 2.2 วงจรความร้อนสำหรับการประมาณค่าในช่วงของ Precalculated weighting factor

เมื่อสังเกตรูปแบบสมการที่ 2.10 ซึ่งเป็นตัวแทนของวงจรการถ่ายเทความร้อนภายในโซน พบว่ามีจำนวนพจน์เท่ากับสมการแสดงความสัมพันธ์ของ RTF ตามสมการที่ 2.5 แต่จะพบว่าจำนวนพจน์จะน้อยกว่าจำนวนพจน์ของสมการแสดงความสัมพันธ์ของ Air-temperature weighting factor ตามสมการที่ 2.6 สังเกตได้จากสมการดังกล่าวมีพจน์ g_2 เกินมา ค่าสัมประสิทธิ์ Precalculated weighting factor จะถูกคำนวณภายใต้เงื่อนไขที่ว่า ค่าการนำความร้อนของโซน (K_2) มีค่าเท่ากับศูนย์ หรือกำหนดให้ค่าความต้านทานความร้อนของโซนมีค่าเป็นอนันต์ ($R_2 = \infty$) ส่วนการประมาณค่าในช่วงของค่าสัมประสิทธิ์ RTF และค่าสัมประสิทธิ์ Air-temperature weighting factor สำหรับโซนที่มีน้ำหนักโซนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (W) แตกต่างจาก ค่า 30, 70 และ 150 lb/ft^2 จะกระทำได้ตามขั้นตอนดังนี้

การประมาณค่าในช่วงของค่าสัมประสิทธิ์ Air-temperature weighting factor สามารถคำนวณได้จากขั้นตอนดังนี้

- 1) กำหนดค่า W เพื่อใช้ในการคำนวณค่า $R_1 C$ เมื่อ $C = W \cdot C_p$

$$2) \beta = (R_1 \cdot C)^{-1}$$

$$3) p_1 = w_1 = -e^{-\beta}$$

$$4) C = \frac{R_1 \cdot C}{R_1}$$

$$5) g_0^* = \frac{1 + p_1}{C}$$

$$6) g_2 = \frac{0.009}{1 + p_1}$$

$$7) g_1^* = -g_0^* - g_2^*$$

ส่วนการประมาณค่าในช่วงของค่าสัมประสิทธิ์ RTF สามารถคำนวณได้จากขั้นตอนดังนี้

$$8) R_1' \cdot C = \frac{R_1 \cdot C}{1 + (R_1' \cdot R_1'')^{-1}}$$

$$9) v_0 = 1 - (1 + w_1) \cdot (R_1' \cdot C)$$

$$10) v_1 = 1 + w_1 - v_0$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์ Precalculated weighting factor ของโปรแกรม DOE 2.1E

		Construction		
		Light	Medium	Heavy
Floor weight (lb/ft²)		30	70	150
Solar				
	V ₀	0.224	0.197	0.187
	V ₁	-0.044	-0.067	-0.097
	V ₂	-0.820	-0.870	-0.910
Conduction/ People/ Miscellaneous				
	V ₀	0.703	0.681	0.676
	V ₁	-0.523	-0.551	-0.586
	W ₂	-0.820	-0.870	-0.910
Lighting				
Suspended Fluorescent	V ₀	0.530	0.530	0.530
	V ₁	-0.350	-0.400	-0.440
	W ₂	-0.820	-0.870	-0.910
Recessed fluorescent not vent	V ₀	0.590	0.590	0.590
	V ₁	-0.410	-0.460	-0.500
	W ₂	-0.820	-0.870	-0.910
Recessed fluorescent vented to return air	V ₀	0.870	0.870	0.870
	V ₁	-0.690	-0.740	-0.780
	W ₂	-0.820	-0.870	-0.910
Recessed fluorescent vented to supply and return air	V ₀	0.530	0.530	0.530
	V ₁	-0.350	-0.400	-0.440
	W ₂	-0.820	-0.870	-0.910
Incandescent	V ₀	0.500	0.500	0.500
	V ₁	-0.320	-0.370	-0.410
	W ₂	-0.820	-0.870	-0.910
Air temperature				
	G ₀ *	1.680	1.180	1.850
	G ₁ *	-1.730	-1.890	-1.950
	G ₂ *	0.050	0.080	0.100
	P ₁	-0.820	-0.870	-0.930

งานวิจัยของ J. Kerrisk, N.M. Schnurr, J.E. Moore และ B.D. Hunn (อ้างอิงจาก Kerrisk [9] และ [12]) (สัญลักษณ์ต่างๆถูกคงไว้ตามเอกสารอ้างอิง)

เนื่องจาก ในปี พ.ศ. 2524 Kerrisk และคณะผู้วิจัยเสนอวิธีการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ สำหรับใช้ในการคำนวณค่าภาระการทำความเย็นของโซนเพื่อใช้กับโปรแกรม DOE-2 วิธีดังกล่าว ถูกเรียกว่า วิธี Custom weighting factor สาเหตุที่คณะผู้วิจัยต้องเสนอวิธีการคำนวณดังกล่าวเนื่อง จากตรวจพบว่า วิธีการประมาณค่าในช่วงและการประมาณค่านอกช่วงของค่าสัมประสิทธิ์ Room transfer function และค่าสัมประสิทธิ์ Air-temperature weighting factor มาตรฐานที่ถูกเรียกว่า วิธี Precalculated weighting factor (Mitalas และ Stephenson [10] & [11]) ซึ่งเป็นวิธีที่โปรแกรม DOE-2 ใช้อยู่เดิมในช่วงเวลาดังกล่าวนั้นใช้ได้เฉพาะห้องที่มีน้ำหนักของโซนอยู่ 3 ระดับ คือ น้ำหนักเบา น้ำหนักปานกลาง และ น้ำหนักมาก เป็นต้น ซึ่งก่อให้เกิดข้อจำกัดในการใช้งานตามที่ได้กล่าวถึง ในหัวข้อที่ผ่านมา ผลจากการตรวจสอบผลเฉลยของโปรแกรม DOE-2 กับผลการตรวจวัดในห้อง ทดลองที่เปิดรับรังสีดวงอาทิตย์โดยตรง (Direct-gain passive solar test cell) บ่งชี้ว่า วิธี Precalculated weighting factor ที่ใช้อยู่เดิมนั้นไม่สามารถใช้ในการอธิบายหรือทำนายผลจากการ ตรวจวัดของห้องทดลองได้ (อ้างอิงจาก Hunn [13] และ Schnurr [14]) ลักษณะของห้องทดลองที่ แตกต่างกับลักษณะของอาคารทั่วไป คือ กรอบห้องทดลองมีมวลมาก และอุณหภูมิอากาศภายใน ห้องทดลองแกว่งมากกว่า 20°C เป็นต้น

วิธี Custom weighting factor เป็นวิธีที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ Room transfer function ของโซนโดยใช้ข้อมูลของอาคารเป็นข้อมูลขาเข้าโดยตรง ซึ่งวิธีนี้มีที่มาเดียวกับวิธีที่ Mitalas และ Stephenson ใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ Precalculated weighting factor แต่ได้มีการพัฒนาให้ เหมาะสมต่อการใช้งานมากขึ้น (ศึกษาขั้นตอนการคำนวณอย่างละเอียดได้จาก Kerrisk [9] และ [12]) วิธีการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ Room transfer function จะถูกแบ่งตามที่มาของแหล่งกำเนิด ความร้อนภายในโซนและภายนอกโซนรวมทั้งหมด 5 แบบ ได้แก่ การนำความร้อนผ่านผนังที่บ การแผ่รังสีความร้อนผ่านกระจก ความร้อนจากหลอดไฟฟ้า (lighting) ความร้อนจากโคมไฟตั้ง โต๊ะ (task lighting) และความร้อนจากผู้อยู่อาศัยและอุปกรณ์อื่นๆ เป็นต้น ชนิดของแหล่งกำเนิด ความร้อนจะถูกแบ่งตามปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศในรูปของการพาความร้อน และปริมาณ ความร้อนที่ถ่ายเทสู่ผนังและเฟอร์นิเจอร์ในรูปของการแผ่รังสีความร้อน เป็นต้น ด้วยสาเหตุดัง กล่าวทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ Room transfer function ของแหล่งกำเนิดความร้อนแต่ละแห่งของโซน เดียวกันมีความแตกต่างกัน ตัวอย่างของโปรแกรมประมาณค่าพลังงานในอาคารที่ใช้วิธี Custom weighting factor ในการคำนวณค่าได้แก่ โปรแกรม DOE-2 เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้จะขอก้าวเฉพาะวิธีการคำนวณค่าภาระการทำความเย็นของการนำความร้อนผ่านผนังที่บเท่านั้น ส่วนวิธีการคำนวณค่าภาระการทำความเย็นของแหล่งกำเนิดความร้อนแบบอื่นสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก Kerrisk [9], Kimura [15], Matilas [16] และ Ball [17] & [18] วิธีการคำนวณค่าภาระการทำความเย็นจะเริ่มจากการแปลงสมการปริมาณพลังงานความร้อนทั้งหมดที่ถ่ายเทเข้าหรือออกจากผิวด้านในของผนังทุกด้านที่ปรากฏในโซน ที่เป็นสมการบนโดเมนเวลาให้อยู่ในรูปของสมการบนโดเมน z ด้วย Z-transform โดยสมการการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดจะมีดังต่อไปนี้

สมการการนำความร้อนผ่านกรอบโซน คือ

$$Q_{Di}(z) = K_{Di}(z) \cdot T_i(z) - K_{Di}' \cdot T_i' \quad (2.11)$$

สำหรับผนังที่มีการพิจารณาการหน่วงของความร้อน (delay wall) กำหนดให้

$$K_{Di}(z) = A_i \cdot \sum_{j=0}^{\infty} Z_i(j) \cdot z^{-j} \quad (2.12)$$

และ

$$K_{Di}'(z) = A_i \cdot \sum_{j=0}^{\infty} Y_i(j) \cdot z^{-j} \quad (2.13)$$

- เมื่อ $T_i(z)$ คือ ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของผนังด้านที่ i บนโดเมน z
 T_i' คือ ค่าอุณหภูมิผิวด้านนอกของผนังด้านที่ i บนโดเมน z
 $Z_i(j)$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ Room transfer function บนโดเมน z
 $Y_i(j)$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ Room transfer function บนโดเมน z
 j คือ Summation index
 A_i คือ พื้นที่ผิวผนังด้านที่ i

สำหรับผนังที่ไม่มีการพิจารณาการหน่วงของความร้อน (quick wall) กำหนดให้

$$K_{Di}(z) = U_i \cdot A_i = \frac{1}{R_i} \quad (2.14)$$

- เมื่อ U_i คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านที่ i
 R_i คือ สัมประสิทธิ์ความต้านทานความร้อนรวมของผนังด้านที่ i

สมการการพาความร้อนระหว่างผิวผนังด้านในกับอากาศภายในโซน คือ

$$Q_{Ci}(z) = K_{Ci}(z) \cdot [T_a(z) - T_i(z)] \quad (2.15)$$

และ

$$K_{Ci}(z) = h_{Ci} \cdot A_i \quad (2.16)$$

เมื่อ h_{Ci} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนด้านในของผนังด้านที่ i

$T_a(z)$ คือ ค่าอุณหภูมิอากาศภายในโซนบนโดเมน z

$T_i(z)$ คือ ค่าอุณหภูมิผิวผนังด้านที่ i บนโดเมน z

สมการการแผ่รังสีความร้อนระหว่างผิวผนังภายในโซนจากผนังด้านที่ i ไปยังผนังด้านที่ m

คือ

$$Q_{Rim}(z) = K_{Rim} \cdot [T_i(z) - T_m(z)] \quad (2.17)$$

และ

$$K_{Rim}(z) = 4 \cdot \varepsilon_i \cdot \sigma \cdot T_R^3 \cdot F_{im} \cdot A_i = G_{im} \quad (2.18)$$

เมื่อ T_i, T_m คือ อุณหภูมิผิวผนังด้านที่ i และ m บนโดเมน z ตามลำดับ

ε_i คือ สัมประสิทธิ์การเปล่งรังสีของผิวผนังด้านที่ i

σ คือ ค่าคงที่ของ Stefan - Boltzmann

T_R คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์อ้างอิง (Absolute reference temperature)

F_{im} คือ ค่าสัดส่วนของการแผ่รังสีความร้อนจากผนังชั้นที่ i ที่ตกกระทบบนผนังชั้นที่ m หรือเรียกย่อๆ ว่าค่า view factor

G_{im} คือ ค่าการอาบรังสี (irradiation) จากผนังชั้นที่ i ที่ตกกระทบบนผนังชั้นที่ m

สมการคำนวณค่าปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่โซนเนื่องจาก Infiltration คือ

$$Q_V(z) = K_V(z) \cdot [T_a(z) - T_o(z)] \quad (2.19)$$

และ

$$K_V(z) = \rho_a \cdot C_{Pa} \cdot V_{in} \quad (2.20)$$

เมื่อ $T_a(z)$ คือ ค่าอุณหภูมิอากาศภายในโซนบนโดเมน z

$T_o(z)$ คือ ค่าอุณหภูมิอากาศภายนอกโซนบนโดเมน z

ρ_a คือ ค่าความหนาแน่นของอากาศภายในโซน

C_{Pa} คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ

V_{in} คือ อัตราการไหลของอากาศภายนอกเข้าสู่โซน

จากสมการที่ 2.11 ถึง 2.20 ตามที่ได้กล่าวถึงในขั้นต้น ทำให้สามารถเขียนสมการสมดุลพลังงานที่ผิวด้านในของผนังด้านที่ i ได้ดังสมการ (พิจารณาการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวของกรอบโซนกับอากาศภายในโซนเท่านั้น ไม่ได้รวมการถ่ายเทความร้อนเนื่องจาก Infiltration เข้าไปด้วย)

$$Q_{Di}(z) = Q_{Ci}(z) - \sum_{m=1}^N Q_{Rim}(z) + Q_{Si}(z) \quad (2.21)$$

เมื่อ N คือ จำนวนผนังทั้งหมดที่ปรากฏภายในโซน

$Q_{Si}(z)$ คือ ปริมาณความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนภายในโซนที่ปรากฏบนผิวในของผนังด้านที่ i

นำสมการการถ่ายเทความร้อนจากสมการที่ 2.11, 2.15 และ 2.17 แทนค่าลงในสมการที่ 2.21 จะได้สมการดังนี้

$$\begin{aligned} K_{Di}(z) \cdot T_i(z) - K_{Di}' \cdot T_i'(z) \\ = K_{Ci}(z) \cdot [T_a(z) - T_i(z)] - \sum_{m=1}^N K_{Rim} \cdot [T_i(z) - T_m(z)] + Q_{Si}(z) \end{aligned} \quad (2.22)$$

หลังจากนั้นกระจายพจน์ต่างๆ ของสมการที่ 2.22 ให้อยู่ในรูปแบบที่ง่ายต่อการรวมพจน์ ดังนี้

$$\begin{aligned} A_i \cdot \left[z(0) + h_{Ci} + \sum_{m=1}^N G_{im} \right] \cdot T_i(k \cdot \Delta) - A_i \cdot \sum_{m=1}^N G_{im} \cdot T_m(k \cdot \Delta) \\ = -A_i \cdot \sum_{j=1}^{\infty} Z_i(j) \cdot T_i[(k-j) \cdot \Delta] + h_{Ci} \cdot T_a(k \cdot \Delta) + Q_{Si}(k \cdot \Delta) \\ + A_i \cdot \sum_{j=0}^{\infty} Y_i(j) \cdot T_i'[(k-j) \cdot \Delta] \end{aligned} \quad (2.23)$$

เมื่อ $k \cdot \Delta$ คือ เวลา, ชั่วโมง

k คือ จำนวนนับ มีค่าเท่ากับ 1, 2, 3, ...

Δ คือ ช่วงเวลา (time step), ชั่วโมง

ในกรณีที่ต้องการสมการ Transfer function ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผิวในกับค่าการแผ่รังสีและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศภายในโซนเท่านั้น ทำให้สามารถสมมติให้พจน์ของอุณหภูมิผิวผนังภายนอกที่เป็นพจน์สุดท้ายมีค่าเท่ากับศูนย์ตลอดการคำนวณได้

$$A_i \cdot \sum_{j=0}^{\infty} Y_i(j) \cdot T_i' [(k-j) \cdot \Delta] = 0 \quad (2.24)$$

ก่อนเริ่มการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ Room transfer function ด้วยวิธี Custom weighting factor ของการถ่ายเทความร้อน จะกำหนดให้ค่าอุณหภูมิที่สภาวะเริ่มต้นมีค่าเท่ากับศูนย์ และกำหนดให้ค่าการระการทำความเย็นที่สภาวะเริ่มต้นเป็น pulse ขนาดหนึ่งหน่วย ดังนี้

$$T_a(k \cdot \Delta) = 0 \quad \text{for } k \geq 0$$

$$\sum_{i=1}^N Q_{Si}(0) = 1 \quad \text{และ} \quad Q_{Si}(k \cdot \Delta) = 0 \quad \text{for } k > 0$$

ก่อนเริ่มการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ Air-temperature weighting factor ด้วยวิธี Custom weighting factor ของค่าอุณหภูมิอากาศ จะกำหนดให้ค่าอุณหภูมิที่สภาวะเริ่มต้นเป็น pulse ขนาดหนึ่งหน่วย และ กำหนดให้ค่าการระการทำความเย็นที่สภาวะเริ่มต้นมีค่าเท่ากับศูนย์

$$T_a(0) = 1 \quad \text{และ} \quad T_a(k \cdot \Delta) = 0 \quad \text{for } k > 0$$

$$Q_{Si}(k \cdot \Delta) = 0 \quad \text{for } k \geq 0$$

สมการคำนวณค่าการระการทำความเย็นสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.25 โดยใช้วิธี recursion relationship ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย Cumali [19] ซึ่งจะนำผลของค่าการระการทำความเย็นในอดีตมาพิจารณาประกอบด้วย สำหรับค่าการระการทำความเย็นชั่วโมงแรกของผนังด้านที่ i คำนวณได้จากสมการ

$$Q_i(0) = A_i \cdot h_{Ci} \cdot \left[T_a(0) - \sum_{m=1}^N D_{im} \cdot B_m(0) \right] + \frac{T_a(0)}{R_{inf}} \quad (2.25)$$

สำหรับค่าการระการทำความเย็นชั่วโมงต่อๆ มา ของผนังด้านที่ i คำนวณได้จากสมการ

$$Q_i(k \cdot \Delta) = A_i \cdot h_{Ci} \cdot \sum_{m=1}^N D_{im} \cdot \left[A_m \cdot Z_m(z) \cdot \sum_{n=1}^N D_{mn} \cdot B_n(0) \right]$$

$$- A_i \cdot h_{Ci} \cdot \sum_{m=1}^N D_{im} \cdot \left[\frac{1}{h_{cm}} \cdot \sum_{j=1}^{k-1} Z_m(j) \cdot Q_m[(k-j) \cdot \Delta] \right] \quad (2.26)$$

เมื่อ $B_i(0) = A_i \cdot h_{Ci} \cdot T_a(0) + Q_{Si}(0)$

$$R_{inf} = \frac{1}{\rho_a \cdot C_{Pa} \cdot V_{in}}$$

$$C_{ii} = A_i \cdot \left[Z_i(0) + h_{Ci} + \sum_{m=1}^N G_{im} \right] \quad \text{พจน์ที่ } i,i \text{ ของเมตริกซ์ } \tilde{C}$$

$$C_{im} = -A_i \cdot G_{im} = -A_m \cdot G_{mi} \quad \text{พจน์ที่ } i,m \text{ ของเมตริกซ์ } \tilde{C}$$

$$D_{im} \text{ คือ พจน์ที่ } i,m \text{ ของเมตริกซ์ } \tilde{D} \quad \text{เมื่อ } \tilde{D} = \tilde{C}^{-1}$$

ส่วนวิธีการนำสมการที่ 2.26 ไปใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ Room transfer function ของโซนด้วยวิธี Custom weighting factor สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก Kerrisk [9] & [12] และ Jury [19]

Heat balance method อ้างอิงจากงานวิจัยของ E.F. Sowell และ G.N. Walton [20]

(สัญลักษณ์ต่างๆถูกวงไว้ตามเอกสารอ้างอิง)

วิธี Heat balance เป็นวิธีคำนวณค่าภาระการทำความเย็นที่นิยมแพร่หลายอีกวิธีหนึ่ง เนื่องจากจากวิธีดังกล่าวให้ผลเฉลยแม่นยำมากกว่าผลเฉลยที่คำนวณด้วยวิธี Transfer function เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ Room transfer function และค่าสัมประสิทธิ์ Air-temperature weighting factor จะถูกคำนวณล่วงหน้าภายใต้สมมติฐานหลายข้อตามที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา เช่น กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเป็นค่าคงที่ เป็นต้น ซึ่งจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ทั้ง 2 ชุดนี้เป็นค่าคงที่ตามไปด้วย ซึ่งถ้านำค่าเหล่านี้ไปใช้ในการคำนวณค่าภาระการทำความเย็นของโซนและค่าอุณหภูมิของอากาศภายในโซน จะได้ผลเฉลยที่คลาดเคลื่อนเล็กน้อยซึ่งแตกต่างจากวิธี Heat balance ที่จะทำการคำนวณค่าปริมาณความร้อนที่กรอบโซนและเฟอร์นิเจอร์ถ่ายเทให้กับอากาศภายในโซนในรูปแบบของการพาความร้อน ที่ถูกเรียกว่าค่าภาระการทำความเย็นของโซนนั่นเอง ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยตรงจากค่าอุณหภูมิผิวด้านในของกรอบโซนและค่าอุณหภูมิอากาศภายในโซน ที่ได้จากการหาผลเฉลยของระบบสมการการถ่ายเทความร้อนภายในโซนของแต่ละชั่วโมง ตัวอย่างของโปรแกรมประมาณค่าพลังงานของอาคารที่ใช้วิธี Heat balance ในการคำนวณค่าภาระการทำความเย็น ได้แก่ โปรแกรม NBSLD ที่ถูกพัฒนาโดย U.S. National Bureau of Standards [21] และ

โปรแกรม BLAST ที่ถูกพัฒนาโดย U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory [22]

การหาผลเฉลยของอุณหภูมิผิวและอุณหภูมิอากาศจำนวน $n+1$ ตัวแปร จะเริ่มจากแก้ระบบสมการที่ประกอบด้วยสมการจำนวน $n+1$ สมการ ได้แก่ สมการสมดุลพลังงานของกรอบโซนทุกด้านจำนวน n สมการ และ สมการสมดุลพลังงานของอากาศภายในโซนจำนวน 1 สมการ โดยที่สมการทั้งหมดจะอยู่ภายใต้สมมติฐานดังนี้ สมมติให้อุณหภูมิผิวของกรอบโซนทุกด้านและอุณหภูมิอากาศภายในโซนที่เวลา t ใดๆ มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอเท่ากับ $T_{i,t}$ และ $T_{a,t}$ ตามลำดับ ซึ่งสามารถเขียนสมการสมดุลพลังงานของกรอบด้านที่ i ได้ดังนี้

$$q_{i,t} = h_i \cdot (T_{a,t} - T_{i,t}) + \sum_{k=1}^n g_{i,k} \cdot (T_{k,t} - T_{i,t}) + R_i \quad (2.27)$$

- เมื่อ h_i คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนด้านในของกรอบด้านที่ i
- $g_{i,k}$ คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีคลื่นยาวระหว่างกรอบด้านที่ i กับกรอบด้านที่ k
- $T_{a,t}$ คือ อุณหภูมิอากาศภายในโซนที่เวลา t
- $T_{i,t}$ คือ อุณหภูมิผิวในของกรอบด้านที่ i ที่เวลา t
- $T_{k,t}$ คือ อุณหภูมิผิวในของกรอบด้านที่ k ที่เวลา t
- R_i คือ ค่าการแผ่รังสีความร้อนทุกชนิดที่ถูกดูดซับโดยผนังด้านที่ i ซึ่งได้แก่ การแผ่รังสีความร้อนจากหลอดไฟฟ้า ผู้อยู่อาศัยและอุปกรณ์อื่นๆ และ รังสีจากดวงอาทิตย์ผ่านกระจก เป็นต้น
- n คือ จำนวนกรอบทั้งหมดที่ปรากฏในโซน

จากสมการที่ 2.27 พบว่าพจน์ $q_{i,t}$ มีค่าเท่ากับค่าการนำความร้อนผ่านผนังที่ด้านที่ i ที่เวลา t ใดๆ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$q_{i,t} = \sum_{j=0}^n X_j \cdot T_{i,t-j} - \sum_{j=0}^n Y_j \cdot T_{oi,t-j} + CR_i \cdot q_{i,t-1} \quad (2.28)$$

$$= X_0 \cdot T_{i,t} + \sum_{j=1}^n X_j \cdot T_{i,t-j} - \sum_{j=0}^n Y_j \cdot T_{oi,t-j} + CR_i \cdot q_{i,t-1} \quad (2.28ก)$$

- เมื่อ X_j, Y_j คือ ค่าสัมประสิทธิ์ Conduction transfer function

- $T_{i,t-j}$ คือ อุณหภูมิผิวในของกรอบด้านที่ i ที่เวลา $t-j$
- $T_{oi,t-j}$ คือ อุณหภูมิผิวนอกของกรอบด้านที่ i ที่เวลา $t-j$
- CR_i คือ ค่าอัตราส่วนร่วม (common ratio) ของพจน์การนำความร้อนในอดีตของผนังด้านที่ i

แทนค่าสมการที่ 2.28 ลงในสมการที่ 2.27 แล้วจัดรูปสมการใหม่จะได้สมการสมดุลพลังงานของกรอบด้านที่ i ดังสมการที่ 2.29 ในกรณีที่มีกรอบโซนจำนวน n กรอบ จะหมายความว่า มีสมการที่ 2.29 จำนวน n สมการ ด้วยเช่นกัน

$$\begin{aligned} \left(X_o + h_i + \sum_{k=1}^n g_{i,k} \right) \cdot T_{i,t} - \sum_{k=1}^n g_{i,k} \cdot T_{k,t} - h_i \cdot T_{a,t} \\ = -\sum_{j=1}^n X_j \cdot T_{i,t-j} + \sum_{j=0}^n Y_j \cdot T_{oi,t-j} - CR \cdot q_{i,t-1} + R_i \end{aligned} \quad (2.29)$$

สำหรับสมการสุดท้ายที่เป็นสมการสมดุลพลังงานของอากาศภายในโซน ซึ่งประกอบด้วย การพาความร้อนระหว่างกรอบทุกด้านกับอากาศ ปริมาณความร้อนเนื่องจากการรั่วของอากาศ (infiltration) การพาความร้อนระหว่างวัตถุภายในโซนกับอากาศ และ ปริมาณความร้อนที่เครื่องปรับอากาศเพิ่มหรือนำออกจากโซน แล้วสมมติให้ผลรวมของปริมาณความร้อนทั้งหมดมีค่าเท่ากับ ศูนย์ ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\sum_{j=1}^n S_j \cdot h_j \cdot (T_{j,t} - T_{a,t}) + \dot{m}_i \cdot C_p \cdot (T_{oa,t} - T_{a,t}) + QI_t + QS_t = 0 \quad (2.30)$$

งานวิจัยของ E.F. Sowell และ D.C. Chiles (ASHRAE research project RP-359)

ในปี พ.ศ. 2527 E.F. Sowell และ D.C. Chiles [23],[24],[25] ได้ปรับปรุงวิธีการจัดกลุ่มของค่าสัมประสิทธิ์ Cooling load temperature difference / Cooling load factor (CLTD/CLF) สำหรับใช้ในการคำนวณค่าภาระทำความเย็นจากแหล่งกำเนิดความร้อนที่แตกต่างกัน 5 ประเภทภายในบริเวณที่ทำการคำนวณ ได้แก่ รังสีจากดวงอาทิตย์ หลอดไฟฟ้า ผู้อยู่อาศัย เครื่องใช้ไฟฟ้า การนำความร้อนผ่านผนังทึบ และใช้ในการคำนวณค่าอุณหภูมิอากาศภายในโซน การจัดกลุ่มของค่าสัมประสิทธิ์ CLTD/CLF จากวิธีที่เสนอมะเพิ่มจำนวนตัวแปรที่นำมาประกอบการพิจารณา อีกทั้งค่าภาระทำความเย็นสูงสุดที่คำนวณจากสัมประสิทธิ์ชุดดังกล่าวจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าภาระความร้อนที่คำนวณจากวิธี Transfer function จึงให้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้มีความถูกต้องมากกว่าค่า

สัมประสิทธิ์ CLTD/CLF ตามวิธีของ Rudoy [26] ที่ได้ตีพิมพ์ใน ASHRAE Handbook of Fundamental ประจำปี ค.ศ. 1977 และ ค.ศ. 1981

คณะผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรมย่อยที่ใช้คำนวณค่า Custom weighting factor ของ Kerrisk [12] ที่เป็นส่วนหนึ่งของโปรแกรม DOE 2.1B ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ Room transfer function (RTF) ของแหล่งกำเนิดความร้อนแบบต่างๆ ภายในโซนแต่ละโซน ซึ่งได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์ v_0, v_1, v_2, w_1 และ w_2 โดยคณะผู้วิจัยได้กำหนดโซนตัวอย่างจำนวน 864 แบบต่อแหล่งกำเนิดความร้อนแต่ละชนิด ซึ่งแต่ละโซนเป็นผลจากการผสมผสานตัวแปรที่นำมาประกอบการพิจารณาจำนวน 7 ตัวแปรเข้าด้วยกัน ตัวแปรเหล่านั้นได้แก่ ขนาดของโซน 2 แบบ อัตราส่วนกระจก 3 แบบ ชนิดของวัสดุปกคลุมพื้น 2 แบบ น้ำหนักพื้น 3 แบบ ชนิดของฝ้าเพดาน 2 แบบ ชนิดของผนัง 4 แบบ และชนิดของอุปกรณ์บังแดดภายในโซน 3 แบบ แล้วนำค่าสัมประสิทธิ์ RTF ของโซนเหล่านั้นมาคำนวณค่าการทำความเย็นรายชั่วโมง (Q_t) ตามสมการที่ 2.31 โดยที่ความถูกต้องของสมการที่ 2.31 ได้ถูกตรวจสอบโดยผู้วิจัยหลายคนด้วยกัน ยกตัวอย่างเช่น Mitalas [27], Hunn [28], Schnurr [29] และ Barakat [30] เป็นต้น

$$Q_t = v_0 \cdot q_t + v_1 \cdot q_{t-1} + v_2 \cdot q_{t-2} - w_1 \cdot Q_{t-1} - w_2 \cdot Q_{t-2} \quad (2.31)$$

เมื่อ v_i และ w_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์ Room transfer function

q_{t-i} คือ ปริมาณความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนภายใน, *Btu/hr*

t คือ เวลา, *hr*

เพื่อให้การคำนวณค่าแอมพลิจูด (amplitude) และค่าการหน่วงของเวลา (time delay) ของค่าการทำความเย็นจากสมการที่ 2.31 สามารถทำได้สะดวก จึงสมมติให้กราฟของปริมาณความร้อนแต่ละแบบมีลักษณะเป็นกราฟรูปไซน์ที่มีค่าแอมพลิจูดเท่ากับหนึ่งหน่วยตามสมการที่ 2.32 ซึ่งจะได้กราฟของผลเฉลยจากสมการที่ 2.31 เป็นกราฟรูปไซน์ด้วยเช่นกัน เนื่องจากความสัมพันธ์ของค่าการทำความเย็นและปริมาณความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนตามสมการที่ 2.31 เป็นความสัมพันธ์แบบสมการเชิงเส้น

$$q_t = q_{max} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot t}{12}\right) \quad (2.32)$$

เมื่อ q_{max} คือ ปริมาณความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนภายในที่มีขนาดเท่ากับ 1 หน่วย

ต่อมา จัดกลุ่มของโซนที่มีค่าภาระการทำความเย็นใกล้เคียงกัน โดยใช้กราฟระหว่างค่าแอมพลิจูดไร้มิติที่อยู่ในแนวแกน y และค่าการหน่วงของเวลาที่อยู่ในแนวแกน x เป็นเกณฑ์ โดยที่ค่าแอมพลิจูดไร้มิติ (a) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.33 ดังนี้

$$\frac{Q}{q_{\max}} = r = a \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot t}{12} - \phi\right) \quad (2.33)$$

- เมื่อ a คือ ค่าแอมพลิจูดไร้มิติ (dimensionless amplitude)
 ϕ คือ ค่าความต่างเฟส (phase lag)
 r คือ ค่าภาระการทำความเย็นไร้มิติ (dimensionless cooling load)

ผลของการแบ่งกลุ่มของโซนที่ให้ค่าภาระการทำความเย็นใกล้เคียงกันจะมีดังต่อไปนี้

- กลุ่มของภาระจากแสงอาทิตย์มีทั้งหมด 14 กลุ่ม ซึ่งได้ค่าสัมประสิทธิ์ CLTD/CLF ทั้งหมด 14 ชุด
- กลุ่มของภาระจากหลอดไฟฟ้ามีทั้งหมด 5 กลุ่ม ซึ่งได้ค่าสัมประสิทธิ์ CLTD/CLF ทั้งหมด 5 ชุด
- กลุ่มของภาระจากผู้อยู่อาศัยและเครื่องใช้ไฟฟ้ามีทั้งหมด 5 กลุ่ม ซึ่งได้ค่าสัมประสิทธิ์ CLTD/CLF ทั้งหมด 5 ชุด
- กลุ่มของภาระจากการนำความร้อนผ่านผนังที่บมมีทั้งหมด 5 กลุ่ม ซึ่งได้ค่าสัมประสิทธิ์ CLTD/CLF ทั้งหมด 5 ชุด

งานวิจัยของ E.F. Sowell (ASHRAE research project RP-472)

ในปี พ.ศ. 2531 Sowell [31], [32] และ [33] ได้เสนอโครงการวิจัยที่ต่อเนื่องจาก ASHRAE research project RP-138 (อ้างอิงจาก Rudoy [26]) และ research project RP-359 (อ้างอิงจาก Sowell [23], [24] และ [25]) โดยผู้วิจัยได้เสนอแนวทางการคัดเลือกโซนมาตรฐาน และค่าสัมประสิทธิ์ RTF ของโซนมาตรฐานที่มีความแม่นยำมากขึ้น โดยที่โซนมาตรฐานเหล่านี้สามารถใช้เป็นตัวแทนที่ดีของโซนในสภาวะการใช้งานแบบต่างๆ ได้ โครงการนี้ได้เพิ่มเติมและปรับปรุง research project RP-359 ทั้งหมด 2 ส่วน คือ การเพิ่มจำนวนตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าภาระการทำความเย็นของแหล่งกำเนิดความร้อนจากเดิมจำนวน 7 ตัวแปร ให้เป็นจำนวน 14 ตัวแปร ซึ่งทำให้โซนมาตรฐานที่เกิดจากการผสมผสานตัวแปรที่นำมาประกอบการพิจารณาเพิ่มจากเดิมจากจำนวน 4,320 โซน เป็นจำนวน 1.2 ล้านโซน แต่เมื่อตัดทอนโซนที่มีลักษณะทางความร้อนคล้ายกันออกจะเหลือจำนวนโซนมาตรฐานที่มีความสำคัญเพียง 200,640 โซน และ การใช้โปรแกรม DOE 2.1C ช่วยในการ

คำนวณค่าภาระการทำความเย็นของโซนมาตรฐานเหล่านั้น โดยกำหนดให้เพิ่มข้อมูลสภาพบรรยากาศของโปรแกรม DOE 2.1C เป็นเพิ่มข้อมูลของวันออกแบบ

ชนิดของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการคำนวณค่าภาระการทำความเย็นมีทั้งหมด 14 ตัวแปร จะถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ RTF ของโซน

No.	Parameter	Meaning	Levels (in normal order)
1	ZG	Zone geometry	100 ft x 20 ft, 15 ft x 15 ft, 100 ft x 100 ft
2	RH	Zone height	8 ft, 10 ft, 20 ft
3	NW	No. exterior walls	1, 2, 3, 4, 0
4	IS	Interior shade	100, 50, 0 %
5	FN	Furniture	With, Without
6	EC	Exterior wall construction	1, 2, 3, 4 (ตารางที่ 2.3)
7	PT	Partition type	5/8 in. gypsum board-air space, 5/8 in. gypsum board, 8 in. concrete block
8	ZL	Zone location	Single-story, top floor, bottom floor, mid-floor
9	MF	Mid-floor type	8 in. concrete, 2.5 in. concrete, 1 in. wood
10	ST	Slab type	Mid-floor type, 4 in. slab on 12 in. soil
11	CT	Ceiling type	3/4 in. acoustic tile and air space, w/o ceiling
12	RT	Roof type	1, 2, 3, 4 (ตารางที่ 2.4)
13	FC	Floor covering	Carpet with rubber pad, vinyl tilt
14	GL	Glass percent	10, 50, 90

ตารางที่ 2.3 ชนิดของ Exterior wall construction

Type	Description
1	Outside surface resistance, 1 in. stucco, 1 in. insulation, $\frac{3}{4}$ in. plaster or gypsum, inside surface resistance (A0,A1,B1,E1,E0)
2	Outside surface resistance; 1 in. stucco, 8 in. HW concrete, $\frac{3}{4}$ in. plaster or gypsum, inside surface resistance (A0,A1,C10,E1,E0)
3	Outside surface resistance, steel sliding, 3 in. insulation, steel sliding, inside surface (A0,A3,B12,A3,E0)
4	Outside surface resistance, 4 in. face brick, 2 in. insulation, 12 in. HW concrete, $\frac{3}{4}$ in. plaster or gypsum, inside film resistance (A0,A2,B3,C11,E1,E0)

ตารางที่ 2.4 ชนิดของ Roof construction

Type	Description
1	Outside surface resistance, $\frac{1}{2}$ in. slag or stone, $\frac{3}{4}$ in. felt membrane, 1 in. insulation, steel sliding, inside film resistance (A0,E2,E3,B4,A3,E0)
2	Outside surface resistance, $\frac{1}{2}$ in. slag or stone, $\frac{3}{8}$ in. felt membrane, 6 in. LW concrete, inside surface resistance (A0,E2,E3,C15,E0)
3	Outside surface resistance, $\frac{1}{2}$ in. slag or stone, $\frac{3}{8}$ in. felt membrane, 2 in. insulation, steel sliding, ceiling air space, acoustic tile, inside surface resistance (A0,E2,E3,B6,A3,E4,E5,E0)
4	Outside surface resistance, $\frac{1}{2}$ in. slag or stone, $\frac{3}{8}$ in. felt membrane, 8 in. LW concrete, ceiling air space, acoustic tile, inside surface resistance (A0,E2,E3,C16,E4,E5,E0)

งานวิจัยของ J.D. Spitler และ F.C. McQuiston (ASHRAE research project RP-626)

ในปี พ.ศ. 2536 J.D. Spitler และ F.C. McQuiston [34], [35] & [36] ได้เสนอตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์ CLTD/SCL/CLF มาตรฐานชุดใหม่ สำหรับใช้ในการคำนวณค่าภาระการทำความเย็นของแหล่งกำเนิดความร้อนภายในและภายนอกโซนแบบต่างๆ โดยค่าภาระการทำความเย็นที่ใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ CLTD มาตรฐานนั้น จะถูกคำนวณด้วยค่าสัมประสิทธิ์ Room transfer function ที่ได้จากผลงานวิจัยของ Sowell [31], [32] และ [33] (RP-472) ตามที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ผ่านมา โดยแบ่งกลุ่มของผนังและเพดานตามผลงานวิจัยของ Harris และ McQuiston [37] (RP-472) รวมทั้งได้ปรับปรุงวิธีการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ให้มีความเหมาะสมมากขึ้นด้วย

ต่อมา Falconer และ Sowell [38] (RP-626) ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการคำนวณค่าภาระการทำความเย็นจำนวน 2 โปรแกรม คือ โปรแกรม TFMTAB สำหรับใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ Room transfer function (Sowell [31], [32] และ [33]) ของโซนมาตรฐาน โดยให้ผู้ใช้โปรแกรมกำหนดว่าโซนที่กำลังพิจารณานั้นมี level ใกล้เคียงกับ level มาตรฐานแบบใด (ตารางที่ 2.2) โดยที่ผู้ใช้โปรแกรมจำเป็นต้องระบุ level ของตัวแปรทุกตัวที่มีอิทธิพลต่อการคำนวณค่าภาระการทำความเย็นจนครบ 14 ตัวแปร แล้วโปรแกรมจึงดึงค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้คำนวณไว้แล้วที่เก็บไว้ในแฟ้มข้อมูลมาให้ผู้ใช้โปรแกรม ส่วนโปรแกรม CLDTAB เป็นโปรแกรมสำหรับใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ CLTD/SCL/CLF ของโซนมาตรฐาน ซึ่งมีลักษณะการใช้งานเช่นเดียวกับโปรแกรม TFMTAB ที่ให้ผู้ใช้โปรแกรมระบุว่าโซนที่กำลังพิจารณาอยู่นั้นมีลักษณะใกล้เคียงกับโซนมาตรฐานแบบใด แล้วโปรแกรมจึงจะดึงค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้คำนวณไว้แล้วจากแฟ้มข้อมูลมาให้ผู้ใช้โปรแกรมเช่นเดียวกัน

ในส่วนของการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ CLTD/SCL/CLF ด้วยโปรแกรม CLDTAB โปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถปรับแก้ค่าของเดือนและค่าของละติจูด ทำให้ผู้ใช้โปรแกรมสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของเดือนได้ครบทั้ง 12 เดือน และคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ที่ละติจูดอื่นๆ นอกเหนือจากที่ได้กำหนดในตารางของ ASHRAE ได้ เป็นต้น