

บทที่ 3

ทฤษฎี

การศึกษาวิจัยนี้ทำการศึกษาศูนย์เสียดโอกาสของการประหยัดพลังงานของอาคาร โดยเน้นหนักไปที่การใช้พลังงานของระบบทำความเย็นและระบบไฟส่องสว่าง ซึ่งการสูญเสียโอกาสของการประหยัดพลังงานหมายถึงพลังงานที่เบี่ยงเบนไปจากพลังงานที่น้อยที่สุดภายใต้สภาวะที่ได้ออกแบบไว้เนื่องมาจากปัจจัยผันแปรต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงอิทธิพลของสิ่งแวดล้อมที่มีต่อการใช้พลังงานของอาคาร การใช้พลังงานของระบบทำความเย็นและส่องสว่าง รวมไปถึงวิธีการอพติไมเซชันภายใต้การพิจารณาพลังงานที่ใช้ที่น้อยที่สุดของระบบทำความเย็นและส่องสว่าง

3.1 อิทธิพลของสิ่งแวดล้อมต่อการทำความเย็น

สิ่งแวดล้อมเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเกิดภาระการทำความเย็นภายในอาคาร ภายใต้กลไกการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสิ่งแวดล้อมและพื้นผิวอาคารซึ่งประกอบด้วย

1. การพาความร้อนระหว่างสิ่งแวดล้อมและพื้นผิวภายนอกอาคาร
2. การแผ่รังสีดวงอาทิตย์คลื่นสั้น (Short Wave Solar Radiation) ตกกระทบบนพื้นผิวภายนอกของอาคาร
3. การแผ่รังสีคลื่นยาว(Long Wave Solar Radiation) ระหว่างพื้นผิวภายนอกของผนังอาคารและสิ่งแวดล้อม
4. การส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์ผ่านกระจกเข้าสู่ภายในอาคาร

การพาความร้อนเกิดจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวภายนอกอาคารและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ซึ่งแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$Q_{conv,o} = h_{co} (T_o - T_{so}) \quad 3.1$$

โดยที่

- $Q_{conv,o}''$ แทน ฟลักซ์การพาความร้อนรวม
 h_{co} แทน สัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวม (W/m²K)
 T_o แทน อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม
 T_{so} แทน อุณหภูมิพื้นผิวภายนอกของอาคาร

ฟลักซ์การพาความร้อนที่กล่าวถึงในสมการที่ 3.1 คือฟลักซ์การพาความร้อนจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติ(Natural Convection) และการพาความร้อนแบบบังคับ (Force Convection) ดังนั้นสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายใต้การพิจารณาการพาความร้อนแบบธรรมชาติและแบบบังคับจะแสดงได้ดังนี้

$$h_{co} = h_f + h_n \quad 3.2$$

โดยที่

- h_f แทน สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบบังคับ
 h_n แทน สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ

การแผ่รังสีดวงอาทิตย์คลื่นสั้นจากอิทธิพลของรังสีดวงอาทิตย์ตกกระทบและดูดกลืนสู่ผนังอาคารประกอบด้วย 3 ส่วนคือ รังสีตรงจากดวงอาทิตย์ (Direct Solar Radiation) รังสีกระจายจากดวงอาทิตย์ (Diffuse Solar Radiation) และรังสีสะท้อนจากพื้นโดยรอบสู่ผนังอาคาร (Reflection Solar Radiation) ดังนั้นฟลักซ์รังสีดวงอาทิตย์คลื่นสั้นดูดกลืนสู่ผนังอาคารสามารถแสดงได้ดังนี้

$$Q_{asol,o}'' = \alpha_o (I_{D,s} + I_{d,s} + I_{g,s}) \quad 3.3$$

โดยที่

- $Q_{asol,o}''$ แทน ฟลักซ์การดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์คลื่นสั้น
 α_o แทน สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ของผนังภายนอกอาคาร
 $I_{D,s}$ แทน ฟลักซ์รังสีตรงจากดวงอาทิตย์ตกกระทบพื้นผิว s ของอาคาร
 $I_{d,s}$ แทน ฟลักซ์รังสีกระจายจากดวงอาทิตย์ตกกระทบพื้นผิว s ของอาคาร
 $I_{g,s}$ แทน ฟลักซ์รังสีที่สะท้อนจากพื้นตกกระทบพื้นผิว s ของอาคาร

การพิจารณารังสีดวงอาทิตย์ตกกระทบพื้นผิวแนวระดับ สามารถพิจารณาจากสัดส่วนของรังสีกระจายจากดวงอาทิตย์กับรังสีตรงจากดวงอาทิตย์ตกกระทบตั้งฉากกับพื้นผิวแนวระดับ ซึ่งสามารถประเมินปริมาณฟลักซ์รังสีตรงและรังสีกระจายได้จากแบบจำลองของ Threlkeld and Jordan ดังนี้

$$I_h = I_{D,N} \cos z + CI_{D,N} \quad 3.4$$

โดยที่

I_h แทน ฟลักซ์รังสีดวงอาทิตย์ตกกระทบบนพื้นผิวแนวระดับ

$I_{D,N}$ แทน ฟลักซ์รังสีตรงตกกระทบตั้งฉากกับพื้นผิวแนวระดับ

z แทน มุมตรงศีรษะ (Zenith angle)

C แทน ตัวประกอบการกระจายรังสีตรงเนื่องจากอิทธิพลของท้องฟ้า (Sky diffuse factor)

ดังนั้นจากสมการที่ 3.4 ทำให้สามารถประเมินฟลักซ์รังสีตรงและรังสีกระจายของดวงอาทิตย์ตั้งฉากพื้นผิวแนวระดับได้ตามลำดับดังนี้

$$I_{D,N} = \frac{I_h}{(\cos z + C)} \quad 3.5$$

$$I_{d,h} = I_h - I_{D,N} \cos z \quad 3.6$$

โดยที่

$I_{d,h}$ แทน ฟลักซ์รังสีกระจายบนพื้นผิวแนวระดับ

ฟลักซ์รังสีตรงจากดวงอาทิตย์ตกกระทบผนังทำมุมต่างๆ กับแนวระดับจะขึ้นอยู่กับปริมาณฟลักซ์รังสีตรงตกกระทบตั้งฉากกับพื้นผิวแนวระดับและมุมตกกระทบระหว่างรังสีตรงจากดวงอาทิตย์กับผนังอาคารซึ่งแสดงได้จากสมการต่อไปนี้

$$I_{D,s} = I_{D,N} \cos \theta \quad 3.7$$

โดยที่

θ แทน มุมตกกระทบ (Incident Angle)

นอกจากรังสีดวงอาทิตย์จะตกกระทบผนังด้วยรังสีตรงแล้ว รังสีดวงอาทิตย์อีกส่วนหนึ่งตกกระทบสู่พื้นผิวอาคาร โดยผ่านกระบวนการสะท้อนจากสิ่งแวดล้อม ฟลักซ์รังสีจากดวงอาทิตย์ส่วนที่สะท้อนจากสิ่งแวดล้อมประกอบด้วย ฟลักซ์รังสีดวงอาทิตย์สะท้อนผ่านท้องฟ้า (Sky Diffuse Solar Flux) และฟลักซ์รังสีดวงอาทิตย์สะท้อนผ่านพื้นดิน (Ground Diffuse Solar Flux) ฟลักซ์รังสีดวงอาทิตย์สะท้อนผ่านท้องฟ้าตกกระทบพื้นผิวอาคารสามารถหาได้จากผลคูณระหว่างฟลักซ์รังสีกระจายบนพื้นผิวแนวระดับกับตัวประกอบรูปร่าง (Shape Factor) ระหว่างรังสีสะท้อนผ่านท้องฟ้ากับพื้นผิวอาคาร สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$I_{d,s} = I_{d,h} F_{d,s} = I_{d,h} (1 + \cos \beta) / 2 \quad 3.8$$

โดยที่

$F_{d,s}$ แทน ตัวประกอบรูปร่างระหว่างรังสีสะท้อนผ่านท้องฟ้ากับพื้นผิวอาคาร
 β แทน มุมเอียงของพื้นผิวอาคารจากแนวระดับ

ฟลักซ์รังสีดวงอาทิตย์สะท้อนผ่านพื้นดินตกกระทบพื้นผิวอาคาร สามารถพิจารณาได้จากสมการดังนี้

$$I_{g,s} = \rho_g I_h (1 - \cos \beta) / 2 \quad 3.9$$

โดยที่

$I_{g,s}$ แทน ฟลักซ์รังสีดวงอาทิตย์สะท้อนผ่านพื้นดินตกกระทบพื้นผิว s ของอาคาร
 ρ_g แทน สัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้น โดยรอบอาคาร

การถ่ายเทรังสีคลื่นยาวเกิดจากกระบวนการแผ่รังสีระหว่างสิ่งแวดล้อมและพื้นผิวอาคาร เนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวของสิ่งแวดล้อมกับพื้นผิวอาคาร พื้นผิวสิ่งแวดล้อมที่พิจารณาประกอบด้วย พื้น ท้องฟ้า และบรรยากาศ ฟลักซ์การแผ่รังสีเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและพื้นผิวอาคาร หาได้จาก

$$Q_{LWR,o}^* = \varepsilon_{so} \sigma [F_a (T_o^4 - T_{so}^4) + F_{sky} (T_{sky}^4 - T_{so}^4) + F_{gy} (T_g^4 - T_{so}^4)] \quad 3.10$$

โดยที่

$Q_{LWR,o}^*$ แทน ฟลักซ์การแผ่รังสีเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและพื้นผิวอาคาร

ϵ_{so} แทน สัมประสิทธิ์การแผ่รังสี (Emittance) ของพื้นผิวอาคารภายนอก

σ แทน ค่าคงที่ของสเตฟาน โบลทซ์มานน์ (Stefan-Boltzmann Constant)

F_a แทน ตัวประกอบรูปร่าง (Shape Factor) ระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวผนังภายนอกกับบรรยากาศ

F_{sky} แทน ตัวประกอบรูปร่างระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวผนังภายนอกกับท้องฟ้า

F_g แทน ตัวประกอบรูปร่างระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวผนังภายนอกกับพื้นดิน

T_{sky} แทน อุณหภูมิของท้องฟ้า

T_g แทน อุณหภูมิพื้นดิน

ตัวประกอบรูปร่างระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวผนังภายนอกกับท้องฟ้า พื้นดิน และบรรยากาศหาได้จากสมการต่อไปนี้อย่างลำดับ

$$F_{sky} = \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \cos \left(\frac{\beta}{2} \right) \quad 3.11$$

$$F_g = (1 - \cos \beta) / 2 \quad 3.12$$

$$F_a = 1 - F_{sky} - F_g \quad 3.13$$

กระจกอาคารจะมีคุณสมบัติในการส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ แตกต่างกันไปขึ้นกับวัตถุประสงค์ที่อาคารต้องการใช้ ตัวอย่างเช่นหากต้องการแสงสว่างเข้าสู่ภายในอาคารในปริมาณมากก็มักจะเลือกใช้กระจกที่มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านในช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นได้ค่อนข้างสูง ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านควรมีค่าน้อยในช่วงความยาวคลื่นที่มองไม่เห็น ความยาวคลื่นของรังสีดวงอาทิตย์จะอยู่ในช่วงรังสีอินฟราเรด (Infrared) บางส่วน และช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าปริมาณรังสีดวงอาทิตย์และมุมตกกระทบของรังสีดวงอาทิตย์ที่กระจกอาคารมีอิทธิพลต่อปริมาณรังสีความร้อนส่งผ่านเข้าสู่ภายในอาคาร ความจ้า (Glare) ภายในอาคาร และปริมาณการส่องสว่างจากธรรมชาติเข้าสู่อาคารด้วยปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ส่งผ่านเข้าสู่อาคารในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ สามารถหาได้โดย

$$Q_{\tau_{sol}}''(\lambda, \theta) = \int_0^{\infty} \tau(\lambda, \theta) Q_{sol}''(\lambda, \theta) d\lambda \quad 3.14$$

โดยที่

- $Q_{\tau_{sol}}''$ แทน ฟลักซ์รังสีดวงอาทิตย์ส่งผ่านกระจกเข้าสู่อาคาร
 $\tau(\lambda, \theta)$ แทน สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์
 λ แทน ความยาวคลื่นของรังสีดวงอาทิตย์
 $Q_{sol}''(\lambda, \theta)$ แทน ฟลักซ์รังสีดวงอาทิตย์ตกกระทบกระจก

อย่างไรก็ตามหากพิจารณาปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ตกกระทบบนพื้นผิวโลกตามมาตรฐาน ASME E891 พบว่า 99% ของรังสีดวงอาทิตย์จะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นมองเห็นได้และบางส่วนของช่วงความยาวคลื่นรังสีอินฟราเรด คือในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 380 – 2500 นาโนเมตร

กระจกอาคารโดยทั่วไปคุณสมบัติจะเปลี่ยนแปลงไม่มากในช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นได้ (Visible range) ประมาณ 380 – 780 นาโนเมตร และช่วงความยาวคลื่นรังสีอินฟราเรดบางส่วน 780 – 2500 นาโนเมตร ดังนั้นจึงสามารถแสดงสมการที่ 3.14 ให้อยู่ในรูปง่ายได้ดังนี้

$$Q_{\tau_{sol}}'' = \tau_v(\theta) \int_{380nm}^{780nm} Q_{sol}''(\lambda, \theta) d\lambda + \tau_n(\theta) \int_{780nm}^{2500nm} Q_{sol}''(\lambda, \theta) d\lambda \quad 3.15$$

โดยที่

- $\tau_v(\theta)$ แทน สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรวมในช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นได้ (380 – 780 นาโนเมตร)
 $\tau_n(\theta)$ แทน สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรวมในช่วงความยาวคลื่นรังสีอินฟราเรดบางส่วน (780 – 2500 นาโนเมตร)

ฟลักซ์รังสีดวงอาทิตย์ตกกระทบกระจกที่คลื่นต่างๆ สามารถประเมินได้จากแบบจำลอง Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine (SMART2) และเมื่อรวมฟลักซ์รังสีดวงอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นที่พิจารณาดังแสดงในสมการที่ 3.15 เข้าด้วยกันโดยวิธีการอินทิเกรต (Integrate) จะได้รังสีดวงอาทิตย์ส่งผ่านเข้าสู่อาคารในรูปของรังสีดวงอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นได้และรังสีดวงอาทิตย์ในช่วงอินฟราเรดบางส่วน กล่าวคือ

$$Q_{rsol}'' = \tau_v(\theta)Q_v'' + \tau_n(\theta)Q_n'' \quad 3.16$$

ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรวมของกระจกขึ้นอยู่กับ ความหนา มุมตกกระทบ และ คุณสมบัติทางวัสดุของกระจก โดยทั่วไปรายงานคุณสมบัติของพื้นผิวกระจกในทางอุตสาหกรรม จะอ้างอิงที่มุมตกกระทบของแสงตั้งฉากกับพื้นผิวกระจก ($\theta = 0$) การพิจารณาคุณสมบัติพื้นผิว กระจกเมื่อมุมตกกระทบเปลี่ยนไปจะอาศัย Fresnel Equation ดังแสดงต่อไปนี้

$$\rho_s(\theta, \lambda) = \frac{1}{2} \frac{\sin^2(\theta - \chi)}{\sin^2(\theta + \chi)} \left[1 + \frac{\cos^2(\theta + \chi)}{\cos^2(\theta - \chi)} \right] \quad 3.17$$

โดยที่

ρ_s แทน สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่พื้นผิวกระจก

χ แทน มุมสะท้อน (Reflection Angle)

มุมสะท้อนและมุมตกกระทบของแสงของกระจกจะมีความสัมพันธ์กันในรูปของดัชนีการ สะท้อน (Reflective Index) รูปที่ 3.1 แสดงมุมตกกระทบและมุมสะท้อนของแสงที่พื้นผิวกระจก ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสะท้อนและมุมตกกระทบที่ความยาวคลื่น λ แสดงได้ดังนี้

$$n(\lambda) = \frac{\sin \theta}{\sin \chi} \quad 3.18$$

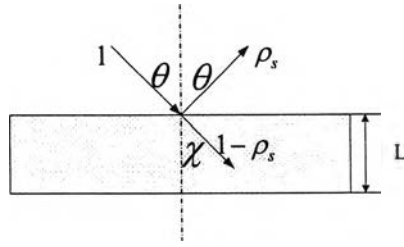
โดยที่

$n(\lambda)$ แทน ดัชนีการสะท้อน

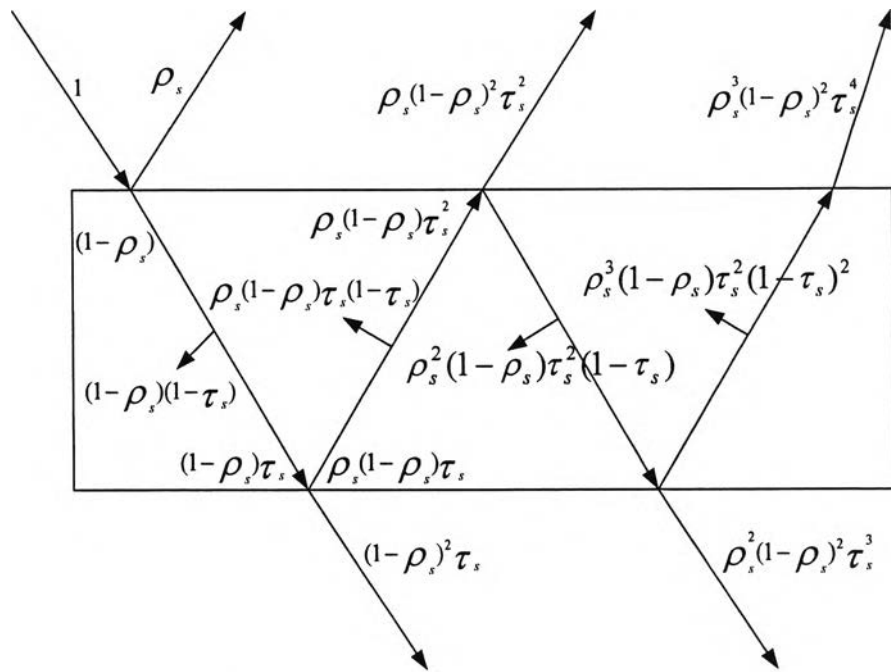
และเมื่อมุมตกกระทบเข้าใกล้ศูนย์ ดัชนีการสะท้อนจะมีความสัมพันธ์กับมุมสะท้อนดังนี้

$$n(\lambda) = \frac{1 + \sqrt{\rho_s(0, \lambda)}}{1 - \sqrt{\rho_s(0, \lambda)}} \quad 3.19$$

ความสัมพันธ์ในรูปสัดส่วนของการสะท้อน การส่งผ่าน และการดูดกลืนของกระจก แสดง ดังรูปที่ 3.2 สัมป ระสิทธิภาพสะท้อนรวมได้จากการรวมสัดส่วนการสะท้อนที่พื้นผิวด้านแสงตก กระทบและทำนองเดียวกันสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรวมจะ ได้จากการรวมสัดส่วนการส่งผ่านที่ พื้นผิวกระจกด้านตรงข้าม สัมประสิทธิ์การสะท้อนรวมและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรวมที่ความยาว คลื่น λ และมุมตกกระทบ θ ดังนี้ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 แสดงมุมตกกระทบและมุมสะท้อนของแสงที่พื้นผิวกระจก



รูปที่ 3.2 แสดงสัดส่วนการสะท้อน การส่งผ่าน และ การดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ของกระจก

$$\tau(\theta, \lambda) = \frac{\tau_s^2(\theta, \lambda) e^{\frac{-\alpha(\lambda)L}{\cos \chi}}}{1 - \rho_s^2(\theta, \lambda) e^{\frac{-2\alpha(\lambda)L}{\cos \chi}}} \quad 3.20$$

$$\rho(\theta, \lambda) = \rho_s(\theta, \lambda) \left[1 + \tau(\theta, \lambda) e^{\frac{-\alpha(\lambda)L}{\cos \chi}} \right] \quad 3.21$$

พิจารณารูปที่ 3.1 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่พื้นผิวกระจกจะเท่ากับ $1 - \rho_s$ ที่มุมตกกระทบ และความยาวคลื่นเดียวกันดังนั้น

$$\tau_s(\theta, \lambda) + \rho_s(\theta, \lambda) = 1 \quad 3.22$$

ในการหาค่า $\tau(\theta, \lambda)$ $\rho(\theta, \lambda)$ จากรายงานคุณสมบัติกระจกจากบริษัทผู้ผลิต ซึ่งประกอบด้วย $\tau(0, \lambda)$ $\rho(0, \lambda)$ และ ความหนาของกระจก (L) โดยที่คุณสมบัติกระจกที่มุมตกกระทบ (θ) เท่ากับศูนย์จึงทำให้มุมสะท้อน (χ) เท่ากับศูนย์ด้วยในทุกความยาวคลื่น ดังนั้นเมื่อแทนทั้งหมดดังกล่าวในสมการที่ 3.20 ถึง สมการที่ 3.22 จะทำให้เราได้ $\tau_s(0, \lambda)$, $\rho_s(0, \lambda)$, และ $\alpha(\lambda)$ จากนั้นแทน $\rho_s(0, \lambda)$ ลงในสมการที่ 3.19 จะได้ $n(\lambda)$ เมื่อแทน $n(\lambda)$ และมุมตกกระทบ θ ลงในสมการที่ 3.18 จะได้มุมสะท้อนที่ความยาวคลื่น λ $\chi(\lambda)$ และจะทำให้ได้ $\rho_s(\theta, \lambda)$ จากสมการที่ 3.17 และ $\tau_s(\theta, \lambda)$ จากสมการที่ 3.22 ตามลำดับ จากนั้นแก้สมการ 3.21 และสมการที่ 3.22 จะได้ $\tau(\theta, \lambda)$ และ $\rho(\theta, \lambda)$ ตามลำดับ

การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน การสะท้อน และการดูดกลืนสุทธิต่อกระจก ในช่วงความยาวคลื่นมองเห็นได้และบางส่วนของความยาวคลื่นรังสีอินฟราเรด เราสามารถหาได้โดย

$$P_v(0) = \frac{\int_{380}^{780} p(0, \lambda) E(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} E(\lambda) d\lambda} \quad 3.23$$

$$P_n(0) = \frac{\int_{780}^{2500} p(0, \lambda) E(\lambda) d\lambda}{\int_{780}^{2500} E(\lambda) d\lambda} \quad 3.24$$

$$P(0) = \frac{\int_{380}^{2500} p(0, \lambda) E(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{2500} E(\lambda) d\lambda} \quad 3.25$$

โดยที่

$P_n(0), P_v(0), P(0)$	แทน สัมประสิทธิ์การสะท้อน การส่งผ่านและการดูดกลืน สุทธิในช่วงความยาวคลื่นมองเห็นได้ มองไม่เห็น และช่วงความยาวคลื่นทั้งหมด ตามลำดับในทิศตกระทบตั้งฉาก
$p(0, \lambda)$	แทน สัมประสิทธิ์การสะท้อน การส่งผ่านและการดูดกลืน ที่ความยาวคลื่นต่างๆ ในทิศตกระทบตั้งฉาก
$E(\lambda)$	แทน รังสีดวงอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นต่างๆ ภายได้มาตรฐาน ASTM E 891

3.2 อิทธิพลของรังสีดวงอาทิตย์ต่อการส่องสว่างภายในอาคาร

เมื่อรังสีดวงอาทิตย์ผ่านชั้นบรรยากาศโลก รังสีดวงอาทิตย์จะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวคลื่น และ ทิศทางการกระจาย เนื่องมาจากการดูดกลืนและการกระจายของรังสีดวงอาทิตย์ที่ชั้นบรรยากาศ การดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ที่ชั้นบรรยากาศประกอบด้วยก๊าซที่มีคุณสมบัติในการดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ อาทิเช่น โอโซน (O_3) ดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ในช่วงคลื่นอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) รังสีดวงอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นมองเห็นได้จะถูกดูดกลืนโดยโอโซนและไอน้ำ และรังสีดวงอาทิตย์ในช่วงอินฟราเรดจะถูกดูดกลืนโดยไอน้ำ ส่วนฝุ่นละออง (Aerosol) จะดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ในทุกช่วงความยาวคลื่น การกระจายของแสงที่ชั้นบรรยากาศเกิดขึ้นจาก 2 ลักษณะคือ การกระจายของรังสีดวงอาทิตย์โดยก๊าซโมเลกุล เรียกว่า การกระจายแบบเรย์ไลซ์ (Rayleigh Scattering) หรือ การกระจายแบบโมเลกุล (Molecular Scattering) มีลักษณะการกระจายแบบคงที่ในทุกทิศทาง และการกระจายของรังสีดวงอาทิตย์เนื่องจากฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศ ในขณะที่บางส่วนของรังสีดวงอาทิตย์ผ่านชั้นบรรยากาศโลกโดยปราศจากการกระจายหรือดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ส่วนนี้เรียกว่ารังสีตรง (Direct Radiation)

ความส่องสว่าง (Illuminance) จากรังสีดวงอาทิตย์จะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นมองเห็นได้คือ ประมาณ 380 – 780 นาโนเมตร ความส่องสว่างจากรังสีดวงอาทิตย์เข้าสู่ภายในอาคารอาจเรียกว่าความส่องสว่างจากธรรมชาติ (Daylight) ความส่องสว่างจากธรรมชาติประกอบด้วย 2 ส่วนคือ

1. ความส่องสว่างจากรังสีตรง (Direct Illuminance) เนื่องจากรังสีตรงจากดวงอาทิตย์ มีอิทธิพลอย่างมากต่อการเกิดความจ้า (Glare) ภายในอาคาร เพราะว่าทิศทางของ

ความส่องสว่างจากรังสีตรงจากดวงอาทิตย์ไม่สม่ำเสมอและขึ้นอยู่กับมุมตกกระทบ และคุณสมบัติการส่งผ่านรังสีของกระจกดังนั้นความสว่างชนิดนี้จึงไม่สามารถใช้ประโยชน์ในการส่องสว่างภายในอาคารได้

2. ความส่องสว่างจากรังสีกระจาย (Diffuse Illuminance) เป็นความส่องสว่างที่มีทิศทางการกระจายสม่ำเสมอทุกทิศทาง เนื่องจากคุณสมบัติดังกล่าว ความส่องสว่างจากรังสีกระจายจึงสามารถใช้ประโยชน์ในการส่องสว่างภายในอาคารได้

การพิจารณาอิทธิพลของการส่องสว่างจากธรรมชาติที่มีอิทธิพลต่อความสะดวกสบายเชิงการมองเห็น (Visual Comfort) จะประกอบด้วย 2 ปัจจัย คือ

1. การส่องสว่างจากรังสีกระจายเพื่อสร้างความสว่างภายในอาคาร
2. ความจ้าจากแสงธรรมชาติที่เข้าสู่ภายในอาคาร ซึ่งเกิดจากอิทธิพลทั้งรังสีกระจายและรังสีตรงที่เข้าสู่อาคาร

ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ปริมาณการส่องสว่างเข้าสู่อาคาร การเกิดความจ้าภายในอาคาร รวมไปถึงการพิจารณาขีดความจ้าสูงสุดภายในอาคารเพื่อให้เกิดความสบายในการมองเห็นของผู้อาศัย

ปัจจุบันการตรวจวัดและรายงานปริมาณการส่องสว่างจากดวงอาทิตย์ยังไม่มีความแพร่หลาย ในทุกพื้นที่ของโลกเหมือนกับการตรวจวัดรังสีดวงอาทิตย์ อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลม ที่มีสถานีตรวจวัดและรายงานเป็นรายชั่วโมง เพื่อให้ทราบสภาพภูมิอากาศในแต่ละรอบวันและเป็นฐานข้อมูลสำคัญสำหรับการพยากรณ์สถานะภูมิอากาศในอนาคต รวมไปถึงใช้ประกอบการวิเคราะห์การใช้พลังงานของอาคาร อย่างไรก็ตามปริมาณการส่องสว่างขึ้นอยู่กับตำแหน่งของดวงอาทิตย์ซึ่งอาจแทนด้วยมุมตรงศีรษะ (Zenith Angle) ความจุไอน้ำในอากาศ (Water Content) และความสว่างของท้องฟ้าซึ่งแทนด้วยปัจจัยไร้มิติ (Dimensionless Parameter) 2 ตัวคือ ปัจจัยความชัด (Clearness Parameter) และ ปัจจัยความสว่าง (Brightness Parameter) ปริมาณไอน้ำในอากาศ ปัจจัยความสว่าง และปัจจัยความชัด สามารถแสดงได้จากสมการต่อไปนี้ตามลำดับ

$$W_{dl} = e^{0.077T_{dev} - 0.075}$$

3.26

$$\varepsilon_{dl} = \frac{(I_{d,h} + I_h) / I_{d,h} + \kappa z^3}{1 + \kappa z^3} \quad 3.27$$

$$\Delta = \frac{I_{d,h} m}{I_0} \quad 3.28$$

โดยที่

W_{dl} แทน ความจุไอน้ำในอากาศ

T_{dew} แทน อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew point temperature)

ε_{dl} แทน ปัจจัยความชื้น

κ แทน ค่าคงที่ เท่ากับ 1.014

m แทน มวลอากาศสัมพัทธ์ (Relative Optical Air mass)

Δ แทน ปัจจัยความสว่าง

I_0 แทน ฟลักซ์การแผ่รังสีดวงอาทิตย์เหนือโลก (Extraterrestrial irradiance)

Perez (1990) ได้สร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างการส่องสว่างและฟลักซ์รังสีดวงอาทิตย์โดยทำการตรวจวัดรังสีดวงอาทิตย์และปัจจัยที่มีผลต่อการส่องสว่างข้างต้น ในทุกสภาวะอากาศ แบบจำลองที่ได้มีดังต่อไปนี้

$$E_h = I_h [a_i + b_i W + c_i \cos(z) + d_i \ln(\Delta)] \quad 3.29$$

$$E_{d,h} = I_{d,h} [a_i + b_i W + c_i \cos(z) + d_i \ln(\Delta)] \quad 3.30$$

$$E_{D,h} = I_{D,N} [a_i + b_i W + c_i \cos(z) + d_i \ln(\Delta)] \quad 3.31$$

โดยที่

E_h แทน ความส่องสว่างจากรังสีดวงอาทิตย์รวมบนพื้นผิวแนวระดับ

$E_{d,h}$ แทน ความส่องสว่างจากรังสีกระจายบนพื้นผิวแนวระดับ

$E_{D,h}$ แทน ความส่องสว่างจากรังสีตรงบนพื้นผิวแนวระดับ

a_i, b_i, c_i, d_i แทน สัมประสิทธิ์คงที่ของรังสีดวงอาทิตย์รวม (สมการที่ 3.29) รังสีกระจาย (สมการที่ 3.30) และ รังสีตรง (สมการที่ 3.31) ซึ่งขึ้นกับปัจจัยความชื้น

การส่องสว่างจากรังสีดวงอาทิตย์กระทบพื้นผิวอาคารพิจารณาได้เป็น 3 องค์ประกอบคือ การส่องสว่างจากรังสีตรงจากดวงอาทิตย์ การส่องสว่างจากรังสีกระจายจากดวงอาทิตย์ และการส่องสว่างจากการสะท้อนจากพื้นสู่นั่งอาคาร ซึ่งสามารถแสดงได้จากสมการต่อไปนี้ตามลำดับ

$$E_{D,s} = E_{D,h} \cos(\theta) \quad 3.32$$

$$E_{d,s} = E_{d,h} \left\{ \frac{(1 - F_1)[1 + \cos(\beta)]}{2} + F_1 \frac{a}{b} + F_2 \sin \beta \right\} \quad 3.33$$

$$E_{g,s} = E_h F_g \quad 3.34$$

โดยที่

$E_{D,s}$ แทน ความส่องสว่างจากรังสีตรงกระทบพื้นผิว s ของอาคาร

$E_{d,s}$ แทน ความส่องสว่างจากรังสีกระจายกระทบพื้นผิว s ของอาคาร

F_1, F_2 แทน ค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ ϵ_{dl} , Δ และ z

$E_{g,s}$ แทน ความส่องสว่างของรังสีดวงอาทิตย์สะท้อนจากพื้นดินสู่พื้นผิว s ของอาคาร

เทอม a และ b คือ $a = \max(0, \cos \theta)$ และ $b = \max(0.087, \cos z)$

ระดับความจ้า (Glare) ภายในอาคารจากแสงธรรมชาติพิจารณาได้จากค่าดัชนีความจ้า (Glare Index) ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในอาคาร ดัชนีความจ้าจากแสงธรรมชาติ ณ ตำแหน่งหนึ่งๆ ภายในอาคารนั้นเกิดจากอิทธิพลที่สำคัญ 3 ประการคือ

1. การส่องสว่างจากภายนอกที่ส่งผ่านกระจกหน้าต่างเข้าสู่ภายในอาคาร
2. การส่องสว่างจากการสะท้อนของแสงจากผนังภายในอาคารมายังตำแหน่งที่พิจารณา
3. การส่องสว่างจากกระจกส่งผ่านมายังตำแหน่งที่พิจารณา

ดัชนีความจ้าจากอิทธิพลของการส่องสว่างทั้งหมดข้างต้นที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งที่พิจารณาหาได้จากสมการ

$$DGI = 10 \log \left[0.478 \frac{L_s^{1.6} \Omega^{0.8}}{L_o + (0.07 \omega^{0.5} L_w)} \right] \quad 3.35$$

โดยที่

DGI แทน ดัชนีความจ้า

Ω แทน มุมตัน (Solid Angle)

ω แทน ตัวแปรไร้มิติแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมิติกระจกกับตำแหน่งที่

พิจารณา

โดยที่

$$\omega = \frac{ab \cos(\arctan(X_G)) \cos(\arctan(Y_G))}{d^2}$$

a และ b แทน ความกว้างและ ความสูงของกระจก d แทน ระยะตั้งฉากจากกระจกถึง ตำแหน่งที่พิจารณา มิติต่างๆ ดังกล่าวแสดงในรูปที่ 3.3 X_G และ Y_G เป็นปัจจัยไร้มิติที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมิติของกระจกและระยะทางจากกระจกถึงผู้สังเกตคือ $X_G = a/2d$ และ $Y_G = b/2d$ ปัจจัย L_s , L_o และ L_w ได้จากสมการต่อไปนี้ตามลำดับ

$$L_s = \frac{E_s}{2(\pi - 1)} \quad 3.36$$

$$L_o = \frac{E_o}{\pi} \quad 3.37$$

$$L_w = \frac{E_w}{2\phi\pi} \quad 3.38$$

โดยที่

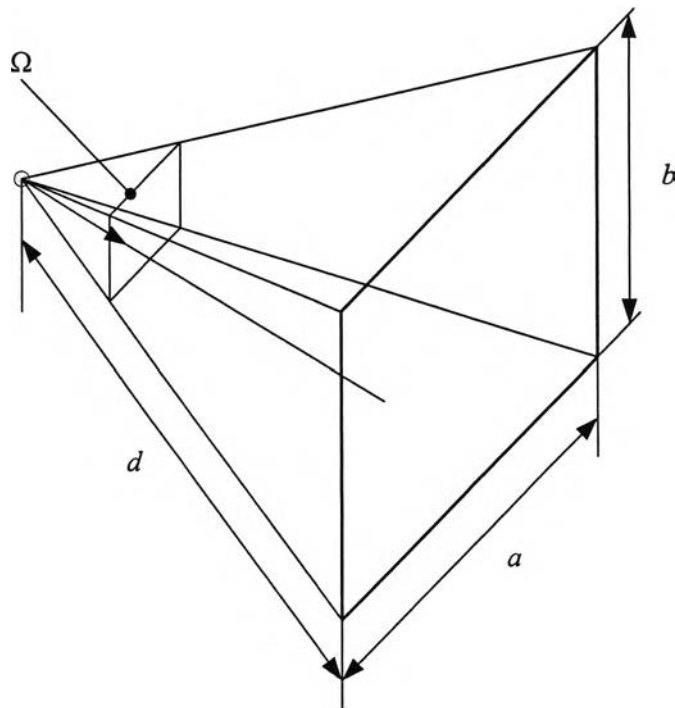
E_s แทน ความส่องสว่างจากภายนอกที่ส่งผ่านกระจกเข้าสู่ภายในอาคาร

$E_{d,s}$ แทน ความส่องสว่างทั้งหมด ณ ตำแหน่งที่พิจารณา

E_w แทน ความส่องสว่างจากภายนอก ณ ตำแหน่งที่พิจารณา

ϕ แทน ตัวประกอบรูปร่าง(Shape Factor) ระหว่างการส่องสว่างของหน้าต่างกับ ตำแหน่งที่พิจารณา

ในปี ค.ศ. 2004 Ali Nazzal ทำการศึกษาวิจัยอิทธิพลของความจ้าที่มีต่อความไม่สบายเชิงสายตา (Discomfort Glare) ต่อผู้อาศัยภายในอาคาร โดยทำการวิจัยกับคนที่มีอายุ และ เพศ ต่างๆ กันจำนวนมาก ระดับความจ้าที่วิเคราะห์อ้างอิงจากแบบจำลองดัชนีความจ้าข้างต้น การศึกษาวิจัยพบว่าเมื่อพิจารณาดัชนีความจ้าที่ขอบเขตของโซนแสงธรรมชาติปานกลาง(Intermediate Daylight Zone) ดัชนีความจ้าระหว่าง 23 ถึง 26 อยู่ในช่วงยอมรับได้และเมื่อพิจารณาจากผลการวิจัยพบว่าเมื่อดัชนีความจ้าประมาณ 24 ถึง 26 จะเริ่มทำให้เกิดความไม่สบายกับผู้อาศัยจำนวนหนึ่ง ขอบเขตโซนแสงธรรมชาติปานกลางภายในอาคารหาได้จาก 3.5(EWH) เมื่อ EWH แทน ความสูงประสิทธิผลของกระจก (Effective Window Height) โดยที่ $EWH = a_w b_w \tau_v(0) / c_w$ เมื่อ a_w b_w และ c_w แทน ความกว้างกระจก ความสูงกระจก และ ความกว้างของผนัง ตามลำดับ



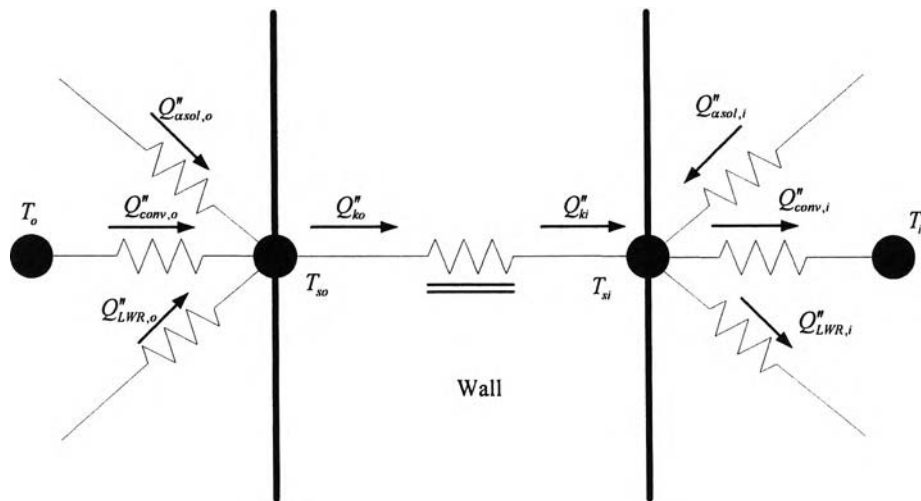
รูปที่ 3.3 มิติต่างๆ ของการพิจารณาดัชนีความจ้า

3.3 การวิเคราะห์ภาระการทำความเย็นโดยวิธีสมดุลความร้อน (Heat Balance Method)

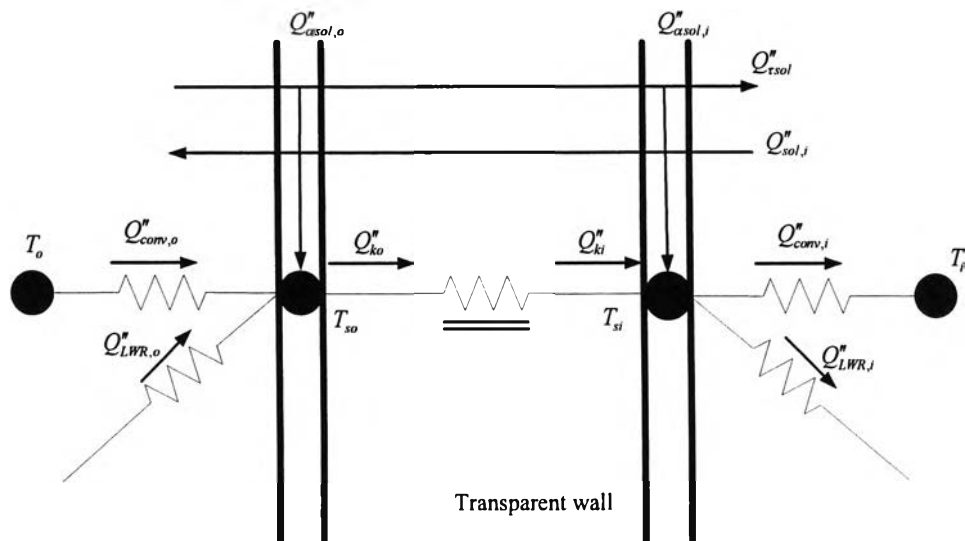
วิธีการคำนวณภาระการทำความเย็นของอาคารมีด้วยกันหลายแต่ละวิธีมีสมมุติฐานและมีวิธีการที่แตกต่างกัน วิธีการสมดุลความร้อนเป็นวิธีการประเมินภาระการทำความเย็นของอาคาร โดยอาศัยกฎการอนุรักษ์พลังงานทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamics) กฎการอนุรักษ์พลังงานของกระบวนการถ่ายเทความร้อนระหว่างสิ่งแวดล้อมภายนอกอาคาร ผังอาคาร และพื้นที่ทำความเย็นภายในอาคาร ด้วยหลักการดังกล่าวจึงทำให้วิธีการนี้เป็นวิธีเดียวที่มีปัจจัยทั้งหมดในการวิเคราะห์อยู่ในรูปปัจจัยพื้นฐาน ซึ่งจะส่งผลให้ทราบถึงอิทธิพลของปัจจัยแต่ละตัวที่ส่งผลต่อภาระการทำความเย็นของอาคาร วิธีการนี้มีสมมุติฐานสำคัญดังนี้คือ

1. อุณหภูมิภายในสม่ำเสมอ (Uniform Internal Temperature) ตลอดพื้นที่ควบคุม
2. อุณหภูมิพื้นผิวสม่ำเสมอ (Uniform Surface Temperature) ซึ่งหมายถึง อุณหภูมิผนัง หน้าต่าง เพดาน มีความสม่ำเสมอ
3. รังสีคลื่นยาวจากสิ่งแวดล้อมและรังสีคลื่นสั้นจากดวงอาทิตย์ตกกระทบพื้นผิวอย่างสม่ำเสมอ (Uniform Long and Short Wave Irradiation)
4. ผังอาคารเป็นพื้นผิวกระจาย (Diffuse Surface)
5. การนำความร้อนผ่านพื้นผิวเป็นแบบ 1 มิติ ขึ้นกับเวลา (One Dimensional Transient Heat Conduction)

วิธีการนี้จะพิจารณาสมดุลความร้อนที่ผนังภายนอก สมดุลทางความร้อนที่ผนังภายใน และการสมดุลทางความร้อนที่พื้นที่ทำความเย็น โดยกลไกการถ่ายเทความร้อนที่ผนังทึบและกระจกจะแสดงในรูปที่ 3.4 และ รูปที่ 3.5 ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 กระบวนการถ่ายเทความร้อนผ่านผนัง



รูปที่ 3.5 กระบวนการถ่ายเทความร้อนผ่านกระจก

เมื่อรังสีดวงอาทิตย์ส่งผ่านกระจกเข้าสู่ภายในอาคารและตกกระทบบดกกลืนที่พื้นผิวของผนังภายในอาคาร เพื่อให้การพิจารณาอยู่ในรูปง่ายสามารถสมมติให้ รังสีตรงจากดวงอาทิตย์ที่ส่งผ่านกระจกทั้งหมดถูกดูดกลืนที่พื้นและรังสีกระจายที่ถูกส่งผ่านเข้าสู่อาคารทั้งหมดกระจายอย่างสม่ำเสมอในทุกพื้นผิวของผนังภายใน ดังนั้นฟลักซ์ความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์ส่งผ่านเข้าสู่อาคารตกกระทบบนผนังภายในอาคาร ภายใต้อสมมุติฐานข้างต้นสามารถแสดงได้ดังนี้

สำหรับผนังทั่วไปยกเว้นพื้น

$$Q_{\alpha sol,i}'' = \alpha_i \left(\frac{\sum_{g=1}^m Q_{rsol,d}''}{\sum_{j=1}^n A_j} \right) \quad 3.39$$

สำหรับพื้น

$$Q_{\alpha sol,i}'' = \alpha_i \left(\frac{\sum_{g=1}^m Q_{rsol,D}'' + \frac{\sum_{g=1}^m Q_{rsol,d}''}{\sum_{j=1}^n A_j}}{\sum_{j=1}^n A_j} \right) \quad 3.40$$

โดยที่

$Q_{\alpha sol,i}''$ แทน ฟลักซ์รังสีดวงอาทิตย์ตกกระทบและดูดกลืนที่พื้นผิวภายในอาคาร

$Q_{rsol,d}''$ แทน ฟลักซ์รังสีดวงอาทิตย์ส่งผ่านเข้าสู่อาคารส่วนรังสีกระจาย

$Q_{rsol,D}''$ แทน ฟลักซ์รังสีดวงอาทิตย์ส่งผ่านเข้าสู่อาคารส่วนรังสีตรง

α_i แทน สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีของผนังภายใน

A_g และ A แทน พื้นที่กระจกและพื้นที่ผนัง ตามลำดับ

m และ n แทน จำนวนกระจกและจำนวนผนัง ตามลำดับ

ความแตกต่างของอุณหภูมิพื้นผิวภายในอาคาร จะเป็นสาเหตุให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างพื้นผิวภายในอาคารอันเนื่องมาจากการแผ่รังสีถ่ายโอนระหว่างพื้นผิว ปรัชญาการณื่อดังกล่าวจัดได้ว่าเป็นการถ่ายเทรังสีความร้อนคลื่นยาว ฟลักซ์รังสีความร้อนคลื่นยาวทั้งหมดที่ถ่ายเทออกจากพื้นผิว j คือ

$$J_j = \varepsilon_j \sigma T_{si,j}^4 + \rho_{s,j} G_j$$

โดยที่

G แทน ฟลักซ์รังสีคลื่นยาวทั้งหมดที่ตกกระทบพื้นผิว j

J แทน ฟลักซ์รังสีคลื่นยาวทั้งหมดที่ออกจากพื้นผิว j

$\rho_{s,j}$ แทน สัมประสิทธิ์การสะท้อนของการแผ่รังสีถ่ายโอนระหว่างพื้นผิว

รังสีคลื่นยาวที่ตกกระทบพื้นผิวภายใน j เนื่องมาจากการแผ่รังสีความร้อนจากพื้นผิวอื่นๆ ตกกระทบยังพื้นผิว j ดังนั้นหากเราพิจารณาพื้นผิวทั้งหมด n พื้นผิว จะได้

$$G_j = \frac{1}{A_j} \sum_{i=1}^n A_i F_{ij} J_i$$

$$\text{ดังนั้น} \quad J_j = \varepsilon_j \sigma T_{si,j}^4 + \frac{\rho_{s,j}}{A_j} \sum_{i=1}^n A_i F_{ij} J_i$$

$$-\frac{\varepsilon_j A_j}{\rho_s} \sigma T_{si,j}^4 = \sum_{i=1}^n A_i F_{ij} J_i - J_j \frac{A_j}{\rho_s}$$

ถ้าเรากระจายสมการข้างต้น สามารถจัดอยู่ในรูปเมตริกซ์ (Matrix) ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} A_1 F_{11} - A_1 / \rho_1 & A_2 F_{21} & \dots & A_n F_{n1} \\ A_1 F_{12} & A_2 F_{22} - A_2 / \rho_2 & \dots & A_n F_{n2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_1 F_{1n} & A_2 F_{2n} & \dots & A_n F_{nn} - A_n / \rho_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \vdots \\ J_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(\varepsilon_1 A_1 / \rho_{s1}) \sigma T_{si,1}^4 \\ -(\varepsilon_2 A_2 / \rho_{s2}) \sigma T_{si,2}^4 \\ \vdots \\ -(\varepsilon_n A_n / \rho_{sn}) \sigma T_{si,n}^4 \end{bmatrix}$$

ดังนั้นเราสามารถแก้สมการของการแผ่รังสีสำหรับพื้นผิวอาคารภายในจำนวน n สมการ จากเมตริกซ์ข้างต้น ซึ่งจะทำให้เราสามารถหาฟลักซ์การแผ่รังสีที่ผนังภายใน i ได้รับจากสมการ ดังนี้

$$Q_{LWR,i}'' = \frac{\sum_{j=1}^n A_j F_{ji} J_j}{A_j} \quad 3.41$$

การพิจารณาสมดุลทางความร้อนจากรูปที่ 3.4 และ รูปที่ 3.5 สำหรับพื้นผิวผนังภายนอก และพื้นผิวผนังภายใน และการนำความร้อนของผนังและกระจก สามารถแสดงได้จากสมการ ต่อไปนี้ตามลำดับ

$$Q_{\alpha sol,o}'' + Q_{LWR,o}'' + Q_{conv,o}'' - Q_{ko}'' = 0 \quad 3.42$$

$$-Q_{LWR,i}'' + Q_{sw,i}'' + Q_{\alpha sol,i}'' - Q_{conv,i}'' + Q_{ki}'' = 0 \quad 3.43$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} \quad 3.44$$

โดยที่

- $Q''_{sw,t}$ แทน ฟลักซ์รังสีความร้อนจากอุปกรณ์เครื่องใช้ตกกระทบผนังอาคาร
 T แทน อุณหภูมิที่ตำแหน่งใดๆ ในแนวมิติความลึกผนังอาคาร
 t แทน เวลา
 k แทน สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของวัสดุ
 ρ แทน ความหนาแน่นของผนัง
 c_p แทน ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat)
 x_i แทน มิติความลึกผนังอาคาร

การพิจารณาอิทธิพลการกักเก็บความร้อน(Thermal Storage Effect) สำหรับกระบวนการนำความร้อน 1 มิติ ของผนังอาคารในสมการที่ 3.44 อยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ไม่เชิงเส้น(Nonlinear Differential Equation) การประยุกต์วิธีการ Z-Transform เป็นวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาดังกล่าว ผลลัพธ์ของวิธีการนี้จะทำให้ได้ตัวประกอบตอบสนอง(Response factor) หรือสัมประสิทธิ์ฟังก์ชันถ่ายโอนการนำความร้อน (Conduction Transfer Function Coefficient , CTF) ผลจากวิธีดังกล่าวจะทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์การนำความร้อนที่พื้นผิวภายนอกและภายในกับอุณหภูมิที่พื้นผิวภายนอกและภายในรวมไปถึงค่าฟลักซ์การนำความร้อนในช่วงเวลาอดีตจนถึงเวลาที่พิจารณา ซึ่งแสดงอยู่ในรูปสมการดังนี้

$$Q''_{ki,t} = -Z_0 T_{si,t} - \sum_{n=1}^{N_z} Z_n T_{si,t-n\delta} + Y_0 T_{so,t} + \sum_{n=1}^{N_y} Y_n T_{so,t-n\delta} + \sum_{n=1}^{N_q} \Phi_n Q''_{ki,t-n\delta} \quad 3.45$$

$$Q''_{lw,t} = -Y_0 T_{si,t} - \sum_{n=1}^{N_y} Y_n T_{si,t-n\delta} + X_0 T_{so,t} + \sum_{n=1}^{N_z} X_n T_{so,t-n\delta} + \sum_{n=1}^{N_q} \Phi_n Q''_{lw,t-n\delta} \quad 3.46$$



โดยที่

X_n แทน สัมประสิทธิ์ฟังก์ชันถ่ายโอนการนำความร้อนของผนังภายนอก $n = 0, 1, 2, \dots, N_x$

Y_n แทน สัมประสิทธิ์ฟังก์ชันถ่ายโอนการนำความร้อนระหว่างผนังภายนอกและภายใน, $n = 0, 1, 2, \dots, N_y$

Z_n แทน สัมประสิทธิ์ฟังก์ชันถ่ายโอนการนำความร้อนของผนังภายใน, $n = 0, 1, 2, \dots, N_z$

Φ_n แทน สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนฟลักซ์ (Flux Coefficient), $n = 1, 2, \dots, N_q$

δ แทน คาบเวลาที่พิจารณา

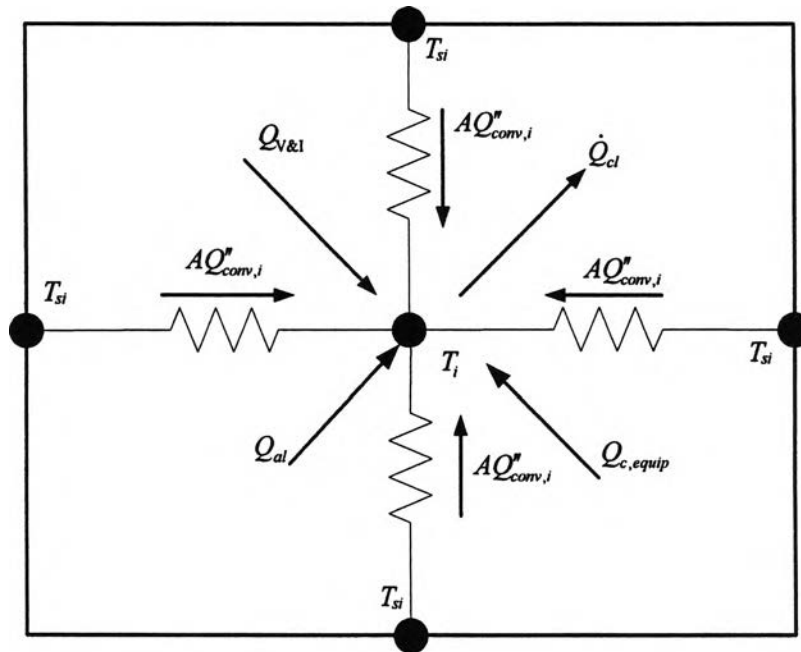
เมื่อเราจัดรูปความสัมพันธ์ของสมการที่ 3.42 และ สมการที่ 3.46 เข้าด้วยกันจะทำให้
อุณหภูมิพื้นผิวภายนอกอยู่ในรูปต่อไปนี้

$$T_{so,t} = \frac{\sum_{n=1}^{N_y} Y_n T_{si,t-n\delta} - \sum_{n=1}^{N_x} X_n T_{so,t-n\delta} - \sum_{n=1}^{N_q} \Phi_n Q_{ko,t-n\delta} + Q_{asol,o} + Q_{LWR,o} + Y_o T_{si,t} + h_o T_{o,t}}{X_o + h_o} \quad 3.47$$

ทำนองเดียวกันหากจัดรูปสมการที่ 3.43 และ สมการที่ 3.45 เข้าด้วยกันจะทำให้ได้
อุณหภูมิพื้นผิวภายในอยู่ในรูปต่อไปนี้

$$T_{si,t} = \frac{\sum_{n=1}^{N_y} Y_n T_{so,t-n\delta} - \sum_{n=1}^{N_z} Z_n T_{si,t-n\delta} + \sum_{n=1}^{N_q} \Phi_n Q_{ki,t-n\delta} + Y_o T_{so,t} - Q_{LWR,i} + Q_{sw,i} + Q_{asol,i} + h_{ci} T_{i,t}}{Z_o + h_{ci}} \quad 3.48$$

อุณหภูมิพื้นผิวภายนอกและภายในดังแสดงในสมการที่ 3.47 และ สมการที่ 3.48 สามารถ
วิเคราะห์ได้โดยวิธีการจำลองแบบลำดับขั้น (Sequential Simulation)



รูปที่ 3.6 กระบวนการถ่ายเทความร้อนภายในพื้นที่ทำความเย็น

ภาระการทำความเย็นของอาคารเกิดจากการพาความร้อนของพื้นผิวภายใน การพาความร้อนของเครื่องมือเครื่องใช้ภายในอาคาร รวมไปถึงการนำอากาศภายนอกเข้าสู่ภายในอาคารเพื่อการระบายอากาศและการรั่วไหลของอากาศจากภายนอกเข้าสู่ภายในอาคาร กระบวนการถ่ายเทความร้อนภายในอาคารแสดงในรูปที่ 3.6

พิจารณาสมดุลทางความร้อนจากรูปที่ 3.6 จะนำไปสู่กระบวนการถ่ายเทความร้อนภายในอาคารในรูปของภาระการทำความเย็นและปัจจัยทางความร้อนต่างๆ ดังนี้

$$\dot{Q}_{cl} = \sum_{i=1}^n A_i h_{ci,i} (T_{si} - T_i) + \dot{Q}_{al} + \dot{Q}_{c,equip} + \dot{Q}_{V\&I} \quad 3.49$$

โดยที่

- \dot{Q}_{cl} แทน ภาระการทำความเย็น
- \dot{Q}_{al} แทน ความร้อนจากไฟส่องสว่าง
- $\dot{Q}_{c,equip}$ แทน อัตราการพาความร้อนของเครื่องมือเครื่องใช้ภายในอาคาร
- $\dot{Q}_{V\&I}$ แทน อัตราความร้อนจากการระบายและรั่วไหลของอากาศ
- T_i แทน อุณหภูมิภายในพื้นที่ทำความเย็น
- i แทน จำนวนเลขระบุผนัง

ความร้อนจากไฟส่องสว่างคือความร้อนจากการสูญเสียพลังงานความร้อนจากหลอดไฟส่องสว่างซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของหลอดไฟ

$$Q_{al} = \dot{W}_{al} \quad 3.50$$

โดยที่

\dot{W}_{al} แทน กำลังงานทั้งหมดที่ระบบส่องสว่างใช้

ความร้อนจากการพาความร้อนจากเครื่องมือเครื่องใช้ ความร้อนในส่วนนี้เกิดจากระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศภายในพื้นที่ทำความเย็นกับอุปกรณ์เครื่องใช้ภายในพื้นที่ทำความเย็น ซึ่งจะขึ้นกับชนิดของอุปกรณ์

$$\dot{Q}_{c, equip} = F_c \dot{W}_{equip} \quad 3.51$$

ดังนั้นฟลักซ์รังสีความร้อนจากเครื่องมือเครื่องใช้ตกกระทบบนพื้นผิวภายในอาคารจะเท่ากับ

$$Q_{sw,i}^* = (1 - F_c) A_i \dot{W}_{equip}$$

โดยที่

\dot{W}_{equip} แทน พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในเครื่องมือเครื่องใช้

F_c แทน ตัวประกอบสัดส่วนการพาความร้อนของอุปกรณ์เครื่องใช้

ความร้อนจากการระบายและปรับอากาศ มีวัตถุประสงค์เพื่อรักษาคุณภาพของอากาศภายในให้เป็นไปตามมาตรฐาน ซึ่งจะนำไปสู่ความสบายของผู้อาศัย ความร้อนจากการระบายและปรับอากาศแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ตามความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายในพื้นที่ปรับอากาศกับสิ่งแวดล้อม และความแตกต่างระหว่างความชื้นจำเพาะภายในพื้นที่ปรับอากาศและสิ่งแวดล้อมดังนี้

$$\dot{Q}_{v\&l} = \rho_a \dot{V} c_p (T_o - T_i) + \rho_a \dot{V} h_{fg} (\omega_o - \omega_i) \quad 3.52$$

โดยที่

ρ_a แทน ความหนาแน่นของอากาศ

V แทน อัตราการไหลเชิงปริมาตรของการนำอากาศภายนอกเข้าสู่พื้นที่ทำความเย็น

h_{fg} แทน เอนทาลปี (Enthalpy) ในการควบแน่นของไอน้ำที่อุณหภูมิภายในพื้นที่ปรับอากาศ

ω_o, ω_i แทน ความชื้นจำเพาะของอากาศภายนอกและภายใน ตามลำดับ

3.4 ปริมาณการส่องสว่างจากสิ่งแวดล้อม

รังสีดวงอาทิตย์ที่มีคุณสมบัติในการส่องสว่างจะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นได้ (Visible Wave Length) คือมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงประมาณ 380 – 780 นาโนเมตร เมื่อรังสีดวงอาทิตย์เข้าสู่พื้นที่ให้ความส่องสว่าง รังสีดวงอาทิตย์ความยาวคลื่นมองเห็นได้จะนำพาความร้อนในช่วงคลื่นดังกล่าวและการส่องสว่างจากธรรมชาติ (Daylight Illuminance) เข้าสู่พื้นที่ควบคุมด้วยในคราวเดียวกัน

ความสว่างจากสิ่งแวดล้อมประกอบด้วย ความสว่างจากรังสีตรง (Direct Sun Light) และความสว่างจากรังสีกระจาย (Diffuse Sky Light) อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติจะไม่พิจารณาความสว่างจากรังสีตรงมาใช้ประโยชน์สำหรับการส่องสว่างภายในอาคารเพราะรังสีตรงไม่มีคุณสมบัติในการกระจายแสงส่งผลให้ปริมาณการส่องสว่างภายในอาคารไม่มีความสม่ำเสมอซึ่งมีผลต่อความสบายทางสายตา (Visual Comfort) ของผู้อาศัยภายในอาคาร ดังนั้นจึงมีเฉพาะแสงสว่างจากรังสีกระจายเท่านั้นที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการให้ความส่องสว่างภายในอาคาร

การพิจารณาปริมาณการส่องสว่างจากสิ่งแวดล้อมที่ตกลงบนระนาบทำงาน (Working Plane) สามารถทำได้โดยการพิจารณาให้กระจกเปรียบเสมือนแหล่งกำเนิดแสงตามธรรมชาติ ดังนั้นปริมาณความสว่างจากสิ่งแวดล้อมบนระนาบทำงานสามารถวิเคราะห์ตามกลไกของการส่องสว่างออกเป็น 2 กลไกด้วยกันคือ

1. ความส่องสว่างจากรังสีกระจายส่องสว่างโดยตรงลงบนระนาบทำงาน
2. ความส่องสว่างจากการสะท้อนจากพื้นผิวภายในต่างๆ ตกกระทบบนระนาบทำงาน

การส่องสว่างโดยตรงจากหน้าต่างลงบนระนาบทำงานหาได้จาก

$$E_{dg} = \frac{\tau_v(0)F_{gw}A_gE_{d,s}}{A_w} \quad 3.53$$

โดยที่

E_{dg} แทน ความส่องสว่างจากกระจกตกลงบนระนาบทำงาน

F_{gw} แทน ตัวประกอบรูปร่างระหว่างความส่องสว่างจากกระจกกับระนาบทำงาน

A_w แทน พื้นที่ระนาบทำงาน

A_g แทน พื้นที่กระจก

การวิเคราะห์ปริมาณการส่องสว่างจากสิ่งแวดล้อมอยู่ภายใต้สมมติฐานดังนี้คือพื้นผิวกรอบอาคารและพื้นผิวใดๆที่พิจารณามีคุณสมบัติเสมือนพื้นผิวกระจาย (Diffuse Surface) ดังนั้นปริมาณการส่องสว่างตกกระทบพื้นผิวดังกล่าวจะสะท้อนอย่างสม่ำเสมอในทุกทิศทาง

ความส่องสว่างที่สะท้อนจากผนังภายในต่างๆ ตกกระทบบนระนาบทำงาน พิจารณาได้จากการสะท้อนของความส่องสว่างจากธรรมชาติที่ผนังนั้นและตกลงบนระนาบทำงานโดยที่ความส่องสว่างทั้งหมดที่ออกจากผนัง j ใดๆคือ

$$J_j = \rho_{v,j}G_j \quad 3.54$$

โดยที่

G_j แทน ความส่องสว่างที่ตกกระทบผนัง

ปริมาณแสงสว่าง (Luminous) จากผนัง j ตกกระทบผนัง i จะเท่ากับ $\phi_j = J_j F_{ji} A_j$ ดังนั้นปริมาณแสงสว่างทั้งหมดจากผนัง j ตกกระทบสู่ผนัง i รวมกับปริมาณแสงสว่างจากกระจกตกกระทบบนผนัง i คือ

$$G_i A_i = \sum_{j=1}^n J_j F_{ji} A_j + \tau_v(0) E_{d,s} A_g F_{gi}$$

จากกฎการสลับเปลี่ยน(Law of Reciprocity) $F_{ij}A_i = F_{ji}A_j$ ดังนั้น

$$G_i A_i = \sum_{j=1}^n J_j A_i F_{ij} + \tau_v(0) E_{d,s} A_g F_{gi} \quad 3.55$$

แทนสมการที่ 3.54 ในสมการที่ 3.55 จะได้

$$J_i = \rho_{v,i} G_i = \rho_{v,i} \sum_{j=1}^n J_j F_{ij} + \rho_{v,i} \tau_v(0) F_{gi} E_{d,s} \frac{A_g}{A_i}$$

$$J_i - \rho_{v,i} \sum_{j=1}^n J_j F_{ij} = \rho_{v,i} \tau_v(0) F_{gi} E_{d,s} \frac{A_g}{A_i} \quad 3.56$$

โดยที่

n แทน จำนวนผนังทั้งหมด

$\rho_{v,i}$ แทน สัมประสิทธิ์การสะท้อนของผนังภายใน

เมื่อกระจายสมการข้างต้นสามารถจัดรูปได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} 1 - \rho_{v,1} F_{11} & 1 - \rho_{v,1} F_{12} & \cdots & 1 - \rho_{v,1} F_{1n} \\ 1 - \rho_{v,2} F_{21} & 1 - \rho_{v,2} F_{22} & \cdots & 1 - \rho_{v,2} F_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 - \rho_{v,n} F_{n1} & 1 - \rho_{v,n} F_{n2} & \cdots & 1 - \rho_{v,n} F_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \vdots \\ J_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{v,1} \tau_v(0) E_{d,s} \frac{F_{g1} A_g}{A_1} \\ \rho_{v,2} \tau_v(0) E_{d,s} \frac{F_{g2} A_g}{A_2} \\ \vdots \\ \rho_{v,n} \tau_v(0) E_{d,s} \frac{F_{gn} A_g}{A_n} \end{bmatrix}$$

ดังนั้นความส่องสว่างจากการสะท้อนของแต่ละผนังตกลงบนระนาบทำงาน (Working Plane) จะเท่ากับ

$$E_{dr} = \sum_{i=1}^n J_i F_{iw} \quad 3.57$$

โดยที่

E_{dr} แทน ความส่องสว่างจากการสะท้อนจากพื้นผิวภายในอาคารสู่ระนาบทำงาน

ความส่องสว่างจากแสงธรรมชาติทั้งหมดที่ตกกระทบบนระนาบทำงานคือ

$$E_{day} = E_{dg} + E_{dr} \quad 3.58$$

โดยที่

E_{day} แทน ความส่องสว่างสุทธิบนระนาบทำงาน

3.5 ประสิทธิภาพเครื่องทำความเย็น

Jeffrey Gordon และ Kim Choon Ng (1994) ได้เสนอแบบจำลองการประเมินประสิทธิภาพการทำความเย็นของเครื่องทำความเย็น แบบจำลองนี้ได้มาจากการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ ดังนี้

$$\frac{1}{COP} = -1 + \frac{T_{cond}^{in}}{T_{evap}^{out}} + \frac{A_1 T_{cond}^{in} - A_0 - A_2 (T_{cond}^{in} / T_{evap}^{out})}{Q_{evap}} \quad 3.59$$

โดยที่

A_0, A_1, A_2 แทน ค่าคงที่ของอิทธิพลของการย้อนกลับไม่ได้ของเครื่องทำความเย็น

COP แทน ค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะ ของเครื่องทำความเย็น

T_{cond}^{in} แทน อุณหภูมิสมบูรณ์ของของไหลหล่อเย็น (Coolant fluid) ที่เข้าสู่คอนเดนเซอร์ (Condenser)

T_{evap}^{out} แทน อุณหภูมิสมบูรณ์ของของไหลถูกทำความเย็นที่ออกจากอีวาโปเรเตอร์ (Evaporator)

เนื่องจากค่าคงที่ $A_0, A_1,$ และ A_2 บ่งถึงอิทธิพลการย้อนกลับไม่ได้ของเครื่องทำความเย็น ดังนั้นเทอม $A_1 T_{cond}^{in} - A_0 - A_2 (T_{cond}^{in} / T_{evap}^{out})$ ของสมการที่ 3.59 จึงบ่งถึงอิทธิพลการย้อนกลับไม่ได้ทั้งหมดของเครื่องทำความเย็นซึ่งจะคงที่สำหรับเครื่องทำความเย็นเครื่องหนึ่งๆ ที่ทำงานที่อุณหภูมิของของไหลหล่อเย็นและอุณหภูมิของของไหลที่ถูกทำความเย็นคงที่ค่าหนึ่ง อาจกล่าวได้ว่าที่อุณหภูมิของของไหลหล่อเย็นและอุณหภูมิของของไหลที่ถูกทำความเย็นคงที่สำหรับเครื่องทำความเย็นเครื่องหนึ่ง อิทธิพลการย้อนกลับไม่ได้จะคงที่ ดังนั้น

$$IRR = A_1 T_{cond}^{in} - A_0 - A_2 \left(\frac{T_{cond}^{in}}{T_{evap}^{out}} \right) \quad 3.60$$

โดยที่

IRR แทน ปัจจัยการย้อนกลับไม่ได้ของเครื่องทำความเย็น (Chiller Irreversibility Factor)

ปัจจัยการย้อนกลับไม่ได้ของเครื่องทำความเย็นจะขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิของของไหลหล่อเย็นที่เข้าสู่คอนเดนเซอร์ อุณหภูมิของของไหลทำความเย็นที่ออกจากอีวาโปเรเตอร์ และ การย้อนกลับไม่ได้ของเครื่องทำความเย็นที่พิจารณา ดังนั้นแทนสมการที่ 3.60 ใน สมการที่ 3.59 จะได้

$$\frac{1}{COP} = \frac{T_{cond}^{in} - T_{evap}^{out}}{T_{evap}^{out}} + \frac{IRR}{Q_{evap}} \quad 3.61$$

หากจัดรูปสมการ 3.61 โดยการคูณ Q_{evap} ทั้งสองด้านและจัดรูปจะได้

$$W_{cl} = \frac{Q_{evap}}{COP} = Q_{evap} \left[\frac{T_{cond}^{in}}{T_{evap}^{out}} - 1 \right] + IRR$$

$$W_{cl} = Q_{evap} \left[\frac{T_{cond}^{in}}{T_{evap}^{out}} - 1 \right] + IRR \quad 3.62$$

สมการที่ 3.62 แสดงถึงความสัมพันธ์ของกำลังงาน (\dot{W}_{cl}) และอัตราการถ่ายเทความร้อนที่อีวาโปเรเตอร์ (Q_{evap}) จะมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงภายใต้การทำงานที่สัดส่วนอุณหภูมิของของไหลหล่อเย็น (T_{cond}^{in}) และอุณหภูมิของของไหลที่ถูกทำความเย็น (T_{evap}^{out}) คงที่

ปัจจัยการย้อนกลับไม่ได้ (IRR) ของเครื่องทำความเย็น ในทางปฏิบัติจะหาได้จากสมการที่ 3.62 โดยอาศัยแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่าง Q_{evap} กับ \dot{W}_{cl} ที่อุณหภูมิ T_{cond}^{in} และ T_{evap}^{out} ที่ใช้ในการทำความเย็น ซึ่งจะได้จากข้อมูลของเครื่องทำความเย็นนั้นๆ จากบริษัทผู้ผลิต

การพิจารณาการทำความเย็นของอาคารอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ฮีวา โปรเตอร์จะเท่ากับ
ภาระการทำความเย็นที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่พิจารณาดังนั้น

$$W_{cl} = Q_{cl} \left[\frac{T_{cond}^{in}}{T_{evap}^{out}} - 1 \right] + IRR \quad 3.63$$

3.6 ประสิทธิภาพการส่องสว่างของระบบไฟส่องสว่าง

การพิจารณาความส่องสว่างจากไฟแสงสว่างบนระนาบทำงานจะประกอบด้วยปัจจัย 2
ประการคือ

1. ความส่องสว่างจากระบบไฟส่องสว่างตกลงบนระนาบทำงานโดยตรง
2. ความส่องสว่างจากการสะท้อนจากพื้นผิวอาคารภายในของแสงที่เกิดจากไฟ
ส่องสว่าง

เนื่องจากการออกแบบไฟส่องสว่างจะพิจารณาให้ความส่องสว่างคงที่สม่ำเสมอบน
ระนาบทำงาน เช่น การจัดให้โคมไฟฟ้าวางตัวอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นความส่องสว่างจากระบบไฟ
ส่องสว่างบนระนาบทำงานสามารถหาได้โดยพิจารณาจากความส่องสว่างเฉลี่ย วิธีการที่มีความ
แม่นยำในการวิเคราะห์ความส่องสว่างเฉลี่ยจากระบบไฟส่องสว่างคือวิธีการลูเมน (Lumen
Method) ความส่องสว่างเฉลี่ยบนระนาบทำงานหาได้จากสมการ

$$E_{av} = \frac{CU \sum \phi_m}{A_w} \quad 3.64$$

โดยที่

- E_{av} แทน ปริมาณการส่องสว่างบนระนาบทำงาน
 CU แทน สัมประสิทธิ์การใช้ประโยชน์ (Coefficient of Utilization)
 ϕ_m แทน ปริมาณแสงสว่างที่ออกจากหลอดไฟ

ค่าสัมประสิทธิ์การใช้ประโยชน์ (CU) ขึ้นอยู่กับอิทธิพลของโคมไฟฟ้า ลักษณะรูปร่างของพื้นที่ที่ควบคุม รวมถึงคุณสมบัติการสะท้อนของกรอบอาคารและลักษณะรูปร่างของห้องจะถูกบ่งชี้ด้วยสัดส่วนห้อง (Room Ratio) ดังนี้

$$RCR = \frac{5\Delta H(L+W)}{LW}$$

โดยที่

RCR แทน สัดส่วนห้อง

ΔH แทน ความสูงพื้นที่ส่องสว่างลบด้วยความสูงของระนาบทำงาน

W แทน ความกว้างของพื้นที่ส่องสว่าง

L แทน ความยาวของพื้นที่ส่องสว่าง

กำลังงานที่ระบบไฟส่องสว่างใช้จะขึ้นกับชนิดของหลอดไฟนั้นๆ ซึ่งจะแสดงอยู่ในรูปของสัดส่วนระหว่างปริมาณแสงสว่างและกำลังไฟฟ้าที่ไฟส่องสว่างต้องการเรียกว่า ประสิทธิภาพการส่องสว่าง (Luminous Efficacy) ดังนั้นกำลังงานที่ระบบไฟส่องสว่างใช้ทั้งหมดแสดงอยู่ในรูปสมการดังนี้

$$\dot{W}_{al} = \sum_{k=1}^M \frac{\phi_m}{\epsilon_e} \quad 3.65$$

โดยที่

\dot{W}_{al} แทนกำลังงานที่ระบบไฟส่องสว่างใช้

ϕ_m แทน ปริมาณแสงสว่างของหลอดไฟ

ϵ_e แทน ประสิทธิภาพการส่องสว่างของหลอดไฟ

M แทน จำนวนหลอดไฟส่องสว่างทั้งหมด

3.7 การสูญเสียโอกาสสำหรับการประหยัดพลังงาน (Opportunity Loss for Energy Saving)

พลังงานส่วนใหญ่ที่อาคารใช้ไปเนื่องมาจากการทำความเย็นและการส่องสว่างภายในอาคาร ทำให้โดยทั่วไปการพิจารณาโยบายการประหยัดพลังงานสำหรับอาคารทั่วไปจะพิจารณา

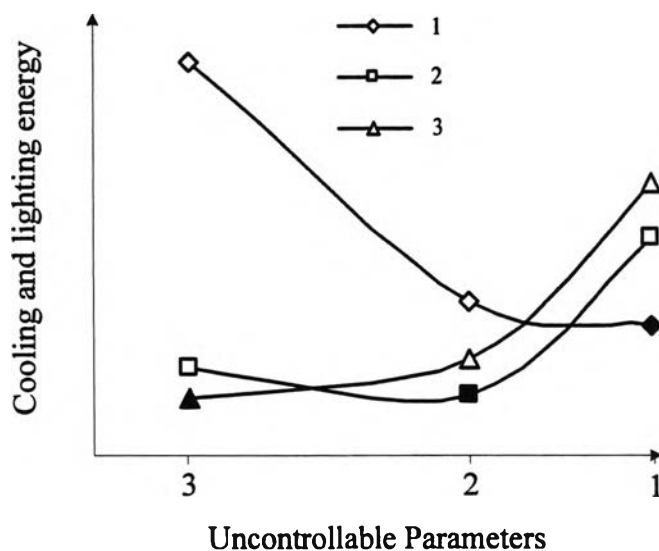
ถึงแนวทางการลดพลังงานที่เป็นปัจจัยหลักทั้งสองดังกล่าว ลำดับการกำหนดนโยบายการประหยัดพลังงานจะเริ่มจากการพิจารณาปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ (Controllable Parameters) ที่มีผลต่อความต้องการพลังงานของอาคาร จากนั้นจึงพิจารณาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยควบคุมได้ทั้งหมดที่ทำให้พลังงานที่อาคารสูญเสียน้อยที่สุด ภายใต้ปัจจัยคงที่ ปัจจัยควบคุมไม่ได้ ตลอดจนเงื่อนไขความสบายเชิงความร้อนและความสบายทางสายตา

ปัจจัยคงที่ (Fixed Parameters) หมายถึงปัจจัยใดๆ ที่มีอิทธิพลต่อความต้องการพลังงานของอาคารและเป็นปัจจัยที่ผู้ออกแบบเมื่อกำหนดแล้วจะมีค่าคงที่เปลี่ยนแปลงไม่ได้ โดยขึ้นกับคุณลักษณะเฉพาะของแต่ละอาคารเช่น ตำแหน่ง ทิศการวางตัว รูปร่างอาคาร เป็นต้น ปัจจัยควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Parameters) ประกอบด้วยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความต้องการพลังงานของอาคารและมีการเปลี่ยนแปลงโดยที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่น สภาวะสิ่งแวดล้อม ประกอบด้วยรังสีดวงอาทิตย์ อุณหภูมิ และความชื้นภายนอก เป็นต้น

ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าพลังงานที่อาคารใช้ไปจะเป็นฟังก์ชันของปัจจัยทั้งสามกลุ่ม ในปัจจุบันการวิเคราะห์เพื่อหาจุดการทำงานที่เหมาะสมของระบบต่างๆ ในอาคารหรือการใช้การอพติไมเซชันเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆ นั้นมักจะแบ่งปัจจัยดังกล่าวข้างต้นให้ออกเป็น 2 กลุ่มคือปัจจัยคงที่และปัจจัยแปรเปลี่ยนอิสระ ดังนั้นสมการจุดประสงค์ (Objective Function) ของการอพติไมเซชันจะอยู่ในรูปปัจจัยควบคุมได้เป็นตัวแปรเปลี่ยนอิสระภายใต้ขอบเขตที่เป็นไปได้ ดังนั้นการอพติไมเซชันที่เกิดขึ้นจะได้ผลเฉลยของปัจจัยควบคุมได้ ที่ทำให้การใช้พลังงานของอาคารน้อยที่สุดภายใต้สภาวะคงที่ของปัจจัยคงที่และปัจจัยควบคุมไม่ได้ ปัจจัยควบคุมไม่ได้ที่ผู้ออกแบบใช้ในการพิจารณาส่วนใหญ่จะเป็นข้อมูลที่ปัจจัยควบคุมไม่ได้นั้นเกิดขึ้นในอดีต และรวมไปถึงแบบจำลองต่างๆ สำหรับการจำลองการเกิดปัจจัยควบคุมไม่ได้นั้นๆ ดังนั้นปัจจัยควบคุมได้ที่ได้จากการอพติไมเซชันนั้นจะทำให้เกิดการใช้พลังงานต่ำสุดเมื่อปัจจัยควบคุมไม่ได้เปลี่ยนไป อาจกล่าวได้ว่าเมื่อไรก็ตามที่ปัจจัยควบคุมไม่ได้เบี่ยงเบนไปจากปัจจัยควบคุมไม่ได้ที่กำหนดไว้ในการอพติไมเซชันจะทำให้เกิดการสูญเสียโอกาสของการประหยัดพลังงานขึ้นเนื่องจากเนื่องจากปัจจัยควบคุมได้จากการอพติไมเซชันนั้นไม่สามารถยืนยันได้ว่าจะทำให้พลังงานที่อาคารใช้ไปยังคงมีค่าต่ำภายใต้ปัจจัยควบคุมไม่ได้ที่เปลี่ยนไปนั้น

จากสาเหตุข้างต้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าการสูญเสียโอกาสของการประหยัดพลังงานคือพลังงานที่เบี่ยงเบนไปจากค่าของพลังงานที่อาคารใช้ไปน้อยที่สุดเมื่อปัจจัยควบคุมไม่ได้เปลี่ยนไป

รูปที่ 3.6 แสดงถึงแนวคิดดังกล่าวข้างต้น โดยแสดงให้เห็นการเบี่ยงเบนของค่าการใช้พลังงานส่องสว่างและทำความเย็นเมื่อปัจจัยควบคุมไม่ได้เกิดการเปลี่ยนแปลง แทนด้วยสถานะ 1, 2 และ 3



จุดสีดำ แทน การใช้พลังงานต่ำสุด ณ ปัจจัยควบคุมไม่ได้ 1 2 และ 3

รูปที่ 3.7 แสดงการเบี่ยงเบนของการใช้พลังงานส่องสว่างและทำความเย็นเมื่อปัจจัยควบคุมไม่ได้แทนด้วยสถานะ 1 2 และ 3 เปลี่ยนไป

3.8 การออปติไมเซชัน (Optimization Method)

พลังงานของอาคาร โดยทั่วไปส่วนใหญ่จะสูญเสียไปกับการทำความเย็นและการส่องสว่างภายในอาคาร ดังนั้นการพิจารณาแนวทางประหยัดพลังงานของอาคารมักจะมีคามพยายามให้อาคารสูญเสียพลังงานจากการทำความเย็นและการส่องสว่างน้อยที่สุดเป็นหลัก ปัจจุบันวิศวกรพลังงานส่วนใหญ่จะพิจารณาการประหยัดพลังงานของระบบส่องสว่างและระบบทำความเย็นแยกออกจากกัน รวมไปถึงมีความพยายามทำให้ปัจจัยควบคุมได้ต่างๆ มีคุณสมบัติที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานซึ่งถูกกำหนดโดยหน่วยงานควบคุมการใช้พลังงานของอาคาร อย่างไรก็ตามการพิจารณาดังกล่าวยังไม่เพียงพอที่จะทำให้อาคารมีประหยัดพลังงานได้สูงสุด เนื่องจากปัจจัยควบคุมได้หลายตัวมีอิทธิพลทั้งความต้องการพลังงานส่องสว่างและความต้องการพลังงานจากการทำความเย็นของอาคาร อาทิเช่น ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน การสะท้อน และการดูดกลืนของกระจก พื้นที่กระจกในทิศทางต่างๆของอาคาร เป็นต้น ดังนั้นการพิจารณาแนวทางการประหยัดพลังงานของอาคาร

จะต้องพิจารณาพลังงานสุทธิของพลังงานสูญเสียจากระบบทำความเย็นและระส่องสว่างไปพร้อมกันโดยวิธีการอพติไมเซชัน

จากการพิจารณาพลังงานสูญเสียจากระบบส่องสว่างและระบบทำความเย็นจากหัวข้อข้างต้น อีกทั้งค่าของปัจจัยควบคุมได้ต่างๆ ที่พิจารณาจะขึ้นกับขีดจำกัดของคุณสมบัติทางวัสดุของปัจจัยควบคุมได้นั้นๆ รวมไปถึงจะต้องพิจารณาความสัมพันธ์ทางฟิสิกส์ของคุณสมบัติของปัจจัยควบคุมได้แต่ละตัวอีกด้วย อีกประการหนึ่งความจำเป็นของแสงจากธรรมชาติมีอิทธิพลต่อความสบายทางสายตาของผู้อาศัยภายในอาคารอีกด้วย ดังนั้นระดับความจำเป็นของแสงจากธรรมชาติภายในอาคารจึงควรเป็นข้อกำหนดสำคัญในการพิจารณาด้วย สามารถแสดงฟังก์ชันจุดประสงค์และฟังก์ชันเงื่อนไขได้ดังต่อไปนี้

$$\text{ฟังก์ชันจุดประสงค์} \quad W_{cl}(X, Y, Z) + W_{al}(X, Y, Z) \quad 3.63$$

$$\text{ฟังก์ชันเงื่อนไข} \quad DGI(X, Y, Z) - DGI_{\max} \leq 0 \quad \text{ดังนั้น}$$

$$g_1(X) = \frac{DGI}{DGI_{\max}} - 1 \leq 0 \quad 3.64$$

ขีดจำกัดของปัจจัยควบคุมได้ $x'_i \leq x_i \leq x''_i$, $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ซึ่งจะได้

$$\begin{aligned} g_{i+1}(X) &= \frac{x_i}{x''_i} - 1 \leq 0 \\ g_{i+n+1}(X) &= \frac{x'_i}{x_i} - 1 \leq 0 \end{aligned} \quad 3.65$$

โดยที่

DGI_{\max} แทน ดัชนีความจ้าสูงสุด

X Y และ Z แทน เซตปัจจัยควบคุมได้, ควบคุมไม่ได้ และคงที่ตามลำดับ
ซึ่งจะอยู่ในรูป

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n]^T \quad Y = [y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_m]^T$$

$$Z = [z_1, z_2, \dots, z_k, \dots, z_o]^T$$

x แทน ปัจจัยควบคุมได้

y แทน ปังจ้ยควบคุมไม่ได้

z แทน ปังจ้ยคงที่

i, j, k แทน จำนวนเลขบ่งปังจ้ยควบคุมได้ ควบคุมไม่ได้ และคงที่ แต่ละ
ตัว ตามลำดับ

n แทน จำนวนปังจ้ยควบคุมได้ทั้งหมด

m แทน จำนวนปังจ้ยควบคุมไม่ได้ทั้งหมด

k แทน จำนวนปังจ้ยคงที่ทั้งหมด

x'_i และ x''_i แทน ค่าต่ำสุดและสูงสุดของปังจ้ยควบคุมได้ลำดับที่ i
ตามลำดับ

y'_j และ y''_j แทน ค่าต่ำสุดและสูงสุดของปังจ้ยควบคุมไม่ได้ลำดับที่ j
ตามลำดับ

z'_k และ z''_k แทน ค่าต่ำสุดและสูงสุดของปังจ้ยคงที่ลำดับที่ k
ตามลำดับ

เมื่อแทนสมการที่ 3.60 และ สมการที่ 3.62 ลงในสมการที่ 3.63 จะได้

$$Q_{cl}(X, Y, Z) \left[\frac{T_{cond}^{in}}{T_{evap}^{out}} - 1 \right] + \sum_{k=1}^M \frac{\phi_m(X, Y, Z)}{\varepsilon_e} + IRR \quad 3.66$$

เนื่องจากปังจ้ยการย้อนกลับไม่ได้ของเครื่องทำความเย็นมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับปังจ้ยควบคุม
ได้ ดังนั้นจึงไม่มีผลต่อผลเฉลยของการออฟติไมเซชัน หากพิจารณาสมการที่ 3.60 เทอม
 $\left[\frac{T_{cond}^{in}}{T_{evap}^{out}} - 1 \right]$ เป็นความลาดชัน (Slope) ของเส้นแนวโน้มระหว่างกำลังงานการทำความเย็นกับ
ภาระการทำความเย็น ซึ่งหมายถึงส่วนกลับของสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของเครื่องทำความเย็น
ย้อนกลับได้ ($1/COP_{rev} = \left[\frac{T_{cond}^{in}}{T_{evap}^{out}} - 1 \right]$) ของเครื่องทำความเย็น เพื่อให้สมการจุดประสงค์อยู่
ในรูปง่ายสามารถแสดงได้ดังนี้

$$Q_{cl}(X, Y, Z) \left[\frac{1}{COP_{rev}} \right] + \sum_{k=1}^M \frac{\phi_m(X, Y, Z)}{\varepsilon_e} \quad 3.67$$

พิจารณาสมการที่ 3.67 การวิเคราะห์ปริมาณแสงสว่างจากไฟฟ้าส่องสว่าง และการ
วิเคราะห์ภาระการทำความเย็น สมการจุดประสงค์สำหรับการออฟติไมเซชันที่พิจารณาอยู่ในรูปไม่
เชิงเส้น รวมไปถึงมีฟังก์ชันเงื่อนไข (Constraint Function) และขีดจำกัดของปังจ้ยควบคุมได้อยู่ใน

รูปไม่เท่ากัน (Inequality Function) ดังแสดงในสมการที่ 3.64 และ สมการที่ 3.65 ตามลำดับ จากปัญหาทั้งหมดดังกล่าวพบว่าเป็นการยากที่จะทำการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ (Calculus Method) อย่างไรก็ตามการแก้ปัญหานี้สามารถทำได้โดยการยุบรวมฟังก์ชันเงื่อนไขทั้งหมดเข้ากับฟังก์ชันจุดประสงค์ให้อยู่ในรูปฟังก์ชันพินัลตีฟังก์ชัน (Penalty Function) และอาศัยวิธีการเซอิร์ท (Search Method) ทำการหาบ่งชี้คำตอบได้ทั้งหมดที่ทำให้การสูญเสียพลังงานการทำงานความเย็นและการส่องสว่างน้อยที่สุด ฟังก์ชันพินัลตีฟังก์ชันจะอยู่ในรูปสมการดังนี้

$$PF(X, r_k) = f(X) + r_k \sum_{j=1}^m \langle g_j(X) \rangle^q \quad 3.68$$

$$\begin{aligned} \langle g_j(X) \rangle &= g_j(X) \quad \text{เมื่อ } g_j(X) > 0 \quad \text{ไม่สอดคล้องกับฟังก์ชันเงื่อนไข} \\ \langle g_j(X) \rangle &= 0 \quad \text{เมื่อ } g_j(X) \leq 0 \quad \text{สอดคล้องกับฟังก์ชันเงื่อนไข} \end{aligned}$$

โดยที่

$PF(X, r_k)$ แทน ฟังก์ชันพินัลตีฟังก์ชัน

$f(X)$ แทน ฟังก์ชันจุดประสงค์

$g(X)$ แทน ฟังก์ชันเงื่อนไข

q แทน ค่าคงที่มากกว่าศูนย์

r_k แทน ฟังก์ชันพินัลตีฟังก์ชัน

m แทน จำนวนฟังก์ชันบังคับ

ฟังก์ชันพินัลตีจะถูกหาค่าต่ำสุดด้วยวิธีการเซอิร์ทโดยเริ่มต้นจากฟังก์ชันพินัลตีฟังก์ชันค่าต่ำน้อยมาก เมื่อได้จุดต่ำสุดของฟังก์ชันพินัลตีแล้ว ทำการตรวจสอบความสอดคล้องของฟังก์ชันเงื่อนไขหากพบว่ายังมีความไม่สอดคล้องของฟังก์ชันเงื่อนไขให้ทำการเพิ่มค่าของฟังก์ชันพินัลตีฟังก์ชัน และใช้วิธีการเซอิร์ทหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันพินัลตีต่อไปจนกว่าฟังก์ชันเงื่อนไขทั้งหมดจะมีความสอดคล้อง จากนั้นทำการตรวจสอบการลู่เข้าสู่ผลเฉลยสุดท้ายของค่าที่ได้ หากพบว่าผลที่ได้ยังคงไม่ลู่เข้าสู่ผลเฉลยสุดท้ายจะทำการเพิ่มค่าฟังก์ชันพินัลตีฟังก์ชันและทำการเซอิร์ทต่อไปจนกว่าจะได้ผลที่ลู่เข้าใกล้ผลเฉลยสุดท้ายแล้ว ผลเฉลยของฟังก์ชันพินัลตีฟังก์ชันดังกล่าวจะเป็นผลเฉลยของฟังก์ชันจุดประสงค์ที่พิจารณาด้วยเนื่องจากเทอม $\langle g_j(X) \rangle = 0$ ทำให้รูปแบบของฟังก์ชันพินัลตีฟังก์ชันเสมือนฟังก์ชันจุดประสงค์

การทดสอบการเข้าสู่ของผลเฉลยภายใต้ฟังก์ชันเงื่อนไขทั้งหมด m และปัจจัยควบคุมได้ทั้งหมดจำนวน n ทำได้โดยการพิจารณาต่อไปนี้

$$1. f(X_i^+) \geq f(X^*) \text{ และ } g_j(X_i^+) \leq 0 \text{ โดย } X_i^+ = X^* + \Delta X_i$$

$$2. f(X_i^-) \geq f(X^*) \text{ และ } g_j(X_i^-) \leq 0 \text{ โดย } X_i^- = X^* - \Delta X_i$$

เมื่อ $\Delta X_i = [0 \ \dots \ 0 \ \Delta x_i \ 0 \ \dots \ 0]^T$

3.9 การวิเคราะห์แนวทางการอพติไมเซชันกับการใช้พลังงานของอาคาร

การประยุกต์แนวทางการอพติไมเซชันที่กล่าวถึงข้างต้น เพื่อให้สอดคล้องกับปัญหาของการศึกษาวิจัย เริ่มต้นจากการพิจารณาสมการจุดประสงค์ สมการพินัลตี และสมการเงื่อนไขต่างๆ ให้อยู่ในรูปปัจจัยควบคุมได้ ปัจจัยควบคุมไม่ได้ และ ปัจจัยคงที่ของการใช้พลังงานของอาคารในส่วนของพลังงานที่ใช้ในการทำความเย็นและการส่องสว่าง

การจัดรูปสมการพังก์ชันรังสีดวงอาทิตย์ในส่วนรังสีตรงและรังสีกระจายตกกระทบบดิ่งฉากกับพื้นผิวแนวระดับ ในรูปพังก์ชันรังสีดวงอาทิตย์ในแนวระดับ พิจารณาจากความสัมพันธ์ของสมการที่ 3.5 และ สมการที่ 3.6 ดังนี้

$$I_{d,h} = Z_{h \rightarrow d} I_h \quad 3.69$$

$$I_{D,N} = Z_{h \rightarrow D} I_h \quad 3.70$$

เมื่อ

$Z_{h \rightarrow d}$ แทน สัมประสิทธิ์ของปัจจัยคงที่ของรังสีกระจายแนวระดับ

$$Z_{h \rightarrow d} = 1 - \frac{\cos z}{\cos z + C}$$

$Z_{h \rightarrow D}$ แทน สัมประสิทธิ์ของปัจจัยคงที่ของรังสีตรงในแนวระดับ

$$Z_{h \rightarrow D} = \frac{1}{\cos z + C}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างรังสีดวงอาทิตย์และความส่องสว่างจากธรรมชาติในทิศตั้งฉากกับพื้นผิวแนวระดับ พิจารณาได้จากสมการที่ 3.29 สำหรับความส่องสว่างจากธรรมชาติ สมการที่ 3.30 และสมการที่ 3.69 สำหรับความส่องสว่างจากธรรมชาติส่วนรังสีกระจาย และความส่องสว่างจากธรรมชาติจากรังสีตรง สมการที่ 3.31 และ สมการที่ 3.70 ตามลำดับ ดังนี้

$$E_h = I_h F_h^{YZ} \quad 3.71$$

$$E_{d,h} = I_h^2 Z_{h \rightarrow d} F_{d,h}^{YZ} \quad 3.72$$

$$E_{D,h} = I_h^2 Z_{h \rightarrow D} F_{h,D}^{YZ} \quad 3.73$$

เมื่อ

$$F_h^{YZ} = [a_i + b_i W + c_i \cos z + d_i \ln(\Delta)]$$

$$F_{d,h}^{YZ} = [a_i + b_i W + c_i \cos z + d_i \ln(\Delta)]$$

$$F_{D,h}^{YZ} = [a_i + b_i W + c_i \cos z + d_i \ln(\Delta)]$$

รังสีดวงอาทิตย์ตกกระทบพื้นผิวภายนอกของอาคาร สามารถจัดอยู่ในรูปความสัมพันธ์กับ รังสีดวงอาทิตย์แนวระดับได้ จากสมการที่ 3.8 สมการที่ 3.9 และสมการที่ 3.69 ในส่วนรังสีกระจาย และสมการที่ 3.7 และสมการที่ 3.70 ในส่วนรังสีตรง ดังนี้

$$I_{d,s} = I_h Z_{h \rightarrow d} Z_d \quad 3.74$$

$$I_{D,N} = I_h Z_{h \rightarrow D} Z_D \quad 3.75$$

$$\text{เมื่อ} \quad Z_d = \frac{(1 + \cos \beta) + \rho_g (1 - \cos \beta)}{2}$$

$$Z_D = \cos \theta$$

ความส่องสว่างจากธรรมชาติตกกระทบพื้นผิวอาคาร จากสมการที่ 3.32 และ สมการที่ 3.73 สำหรับรังสีตรง สมการที่ 3.33 สมการที่ 3.34 และ สมการที่ 3.72 สำหรับรังสีกระจาย ดังนี้

$$E_{D,s} = I_h^2 Z_{h \rightarrow D} F_{D,h}^{YZ} Z_{D,s} \quad 3.76$$

$$E_{d,s} = I_h (I_h Z_{h \rightarrow d} F_{d,h}^{YZ} Z_{d,s} + F_g) \quad 3.77$$

เมื่อ

$$Z_{D,s} = \cos \theta$$

$$Z_{d,s} = \frac{(1 - F_1)(1 + \cos \beta)}{2} + F_1 \frac{\max(0, \cos \theta)}{\max(0.087, \cos \theta)} + F_2 \sin \beta$$

แทนสมการที่ 3.74 และ สมการที่ 3.75 ลงในสมการที่ 3.3 จะได้

$$Q_{\text{sol},o}^* = \alpha_o I_h (Z_{h \rightarrow D} Z_D + Z_{h \rightarrow d} Z_d) \quad 3.78$$

อ้างอิงจากแบบจำลองในการใช้ประเมินพลังงานของ BLAST และ DOE กำหนดให้ อุณหภูมิของท้องฟ้า และ พื้นดินมีค่าใกล้เคียงกันดังนั้นสำหรับการศึกษาวิจัยนี้จึงสมมุติฐานให้ $T_o = T_{\text{sky}} = T_g$ ดังนั้นเมื่อพิจารณาตามสมมติฐานดังกล่าวจากสมการที่ 3.10 จะได้

$$Q_{LWR,o}^* = \varepsilon_{so} \sigma (F_a + F_{\text{sky}} + F_g) (T_o^4 - T_{so}^4) \quad 3.79$$

ดังนั้นแทนสมการที่ 3.78 และ สมการที่ 3.79 ในสมการที่ 3.47 จะได้

$$T_{so,t} = \frac{\alpha_o I_h (Z_{h \rightarrow D} Z_D + Z_{h \rightarrow d} Z_d) + \varepsilon_{so} \sigma (F_a + F_{\text{sky}} + F_g) (T_o^4 - T_{so}^4) + Y_o T_{si,t} + h_o T_{o,t} + H_o}{X_o + h_o} \quad 3.80$$

เมื่อ

$$H_o = \sum_{n=1}^{N_y} Y_n T_{si,t-n\delta} - \sum_{n=1}^{N_x} X_n T_{so,t-n\delta} - \sum \Phi_n Q_{ko,t-n\delta}^*$$

พลักรังสีดวงอาทิตย์ส่งผ่านคูกลืนที่พื้นผิวภายในอาคาร แทนสมการที่ 3.74 และสมการที่ 3.75 ในสมการที่ 3.40 จะได้

$$Q_{\text{sol},j}^* = \alpha_i \left(\sum_{g=1}^m \tau(\theta) I_h Z_{h \rightarrow D} Z_D + \frac{\sum_{g=1}^m \tau(0) I_h Z_{h \rightarrow d} Z_d}{\sum_{j=1}^n A_j} \right) \quad 3.81$$

พลั๊กซ์การแผ่รังสีความร้อนเนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของพื้นผิวภายใน จากสมการ 3.41 จัดรูปจะได้

$$Q_{LWR,i}^* = \sum_{j=1}^n \frac{A_j}{A_i} F_{ji} \varepsilon_j T_{si,j}^{(j)4} + \sum_{j=1}^n \frac{\rho_j}{A_i A_j} \sum_{k=1}^n A_k F_{kj} J_k \quad 3.82$$

โดยที่

$T_{si,j}^{(j)}$ แทน อุณหภูมิพื้นผิวภายในของผนัง j

ดังนั้นแทนสมการที่ 3.81 และสมการที่ 3.82 ในสมการที่ 3.48 จะได้

$$T_{si,i} = \alpha_i \left(\sum_{g=1}^m \tau(\theta) I_h Z_{h \rightarrow D} Z_D + \frac{\sum_{g=1}^m \tau(0) I_h Z_{h \rightarrow d} Z_d}{\sum_{j=1}^n A_j} \right) \quad 3.83$$

$$\frac{- \sum_{j=1}^n \frac{A_j}{A_i} F_{ji} \varepsilon_j T_{si,j}^{(j)4} + \sum_{j=1}^n \frac{\rho_j}{A_i A_j} \sum_{k=1}^n A_k F_{kj} J_k Y_o T_{so,i} + h_{ci} T_{i,i} + Q_{sw,i}^* + H_i}{Z_o + h_{ci}}$$

เมื่อ

$$H_i = \sum_{n=1}^{N_y} Y_n T_{so,i-n\delta} - \sum_{n=1}^{N_z} Z_n T_{si,i-n\delta} + \sum_{n=1}^{N_q} \Phi_n Q_{ki,i-n\delta}^*$$

รังสีกระจายจากธรรมชาติส่องสว่างจากกระจกจำนวน m บานของอาคารลงบนระนาบทำงาน แทนสมการที่ 3.77 ลงในสมการที่ 3.53 จะได้

$$E_{dg} = \sum_{g=1}^m \frac{\tau_v(0) F_{gw} (L_g \times H_g) I_h (I_h Z_{h \rightarrow d} F_{d,h}^{YZ} Z_{d,s} + F_g)}{A_w} \quad 3.84$$

แทนสมการที่ 3.56 และ สมการที่ 3.77 ลงในสมการที่ 3.57 และจัดรูปใหม่จะได้

$$E_{dr} = \sum_{i=1}^n \left[\rho_v \tau_v(0) F_{g_i} I_h \left(I_h Z_{h \rightarrow d} F_{d,h}^{YZ} Z_{d,s} + F_g \right) \frac{A_g}{A_i} + \rho_v \sum_{j=1}^n J_j F_{ij} \right] \quad 3.85$$

ดังนั้นความส่องสว่างบนระนาบทำงานจะเท่ากับ

$$E_{day} = E_{dg} + E_{dr}$$

$$E_{day} = \sum_{g=1}^m \left\{ \frac{\tau_v(0) F_{g^w} (L_g \times H_g) I_h \left(I_h Z_{h \rightarrow d} F_{d,h}^{YZ} Z_{d,s} + F_g \right)}{A_w} + \sum_{i=1}^n \left[\rho_v(0) \tau_v(0) F_{g_i} I_h \left(I_h Z_{h \rightarrow d} F_{d,h}^{YZ} Z_{d,s} + F_g \right) \frac{(L_g \times H_g)}{A_i} + \rho_v(0) \sum_{j=1}^n J_j F_{ij} \right] \right\} \quad 3.86$$

พิจารณาความส่องสว่างจากระบบไฟส่องสว่างจะเท่ากับผลต่างระหว่างความส่องสว่างที่ควบคุมกับความส่องสว่างจากธรรมชาติบนระนาบทำงานกล่าวคือ

$$E_{art} = E_{comf} - E_{day} \quad 3.87$$

โดยที่

E_{comf} แทน ความสว่างที่ควบคุมบนระนาบทำงาน

แทนสมการที่ 3.64 ในสมการที่ 3.87 จะได้

$$E_{comf} - E_{day} = \frac{CU \sum_{k=1}^M \phi_{m,k}}{A_w} \quad 3.88$$

กำลังงานที่ระบบแสงสว่างที่ต้องใช้ในเวลา t จะประเมินได้ภายใต้สมมติฐานว่าระบบแสงสว่างจะไม่มี การสูญเสียพลังงานไฟฟ้าในระบบ ดังนั้น

$$\dot{W}_{al(t)} = \frac{A_w (E_{comf} - E_{day(t)})}{\varepsilon CU} \rightarrow \dot{W}_{al(t)} = Q_{al(t)} \quad 3.89$$

ภาระการทำความเย็นของอาคาร ณ เวลา t ใดๆ จะเท่ากับ

$$Q_{cl(t)} = \sum_{i=1}^n A_i h_{ci,j} (T_{si(t)}^i - T_i) + \frac{A_w (E_{comf} - E_{day(t)})}{\varepsilon CU} + \rho_a \dot{V} c_p (T_{o(t)} - T_i) + \rho \dot{V} h_{fg} (\omega_{o(t)} - \omega_i) \quad 3.90$$

จากสมการที่ 3.90 แทนลงในสมการที่ 3.63 และรวมเข้ากับสมการที่ 3.89 จากนั้นอินทิเกรตตั้งแต่เวลาเริ่มต้นที่พิจารณา (t_i) จนถึงเวลาสิ้นสุดการพิจารณา (t_o) จะทำให้เราได้สมการจุดประสงค์ในรูปปัจจัยควบคุมได้ ปัจจัยควบคุมไม่ได้ และปัจจัยคงที่ ดังแสดงต่อไปนี้

$$W = \int_{t_i}^{t_o} \left\{ \left[\sum_{i=1}^n A_i h_{ci,j} (T_{si(t)}^i - T_i) + \rho_a \dot{V} c_p (T_{o(t)} - T_i) + \rho \dot{V} h_{fg} (\omega_{o(t)} - \omega_i) \right] \left(\frac{T_{cond}^{in}}{T_{evap}^{out}} - 1 \right) + \frac{A_w (E_{comf} - E_{day(t)})}{\varepsilon CU} \left(\frac{T_{cond}^{in}}{T_{evap}^{out}} \right) + IRR \right\} dt$$

3.91

โดยที่

$$E_{day(t)} = \sum_{g=1}^m \left\{ \frac{\tau_v(0) F_{gw} (L_g \times H_g) I_{h(t)} (I_{h(t)} Z_{h \rightarrow d(t)} F_{d,h(t)}^{YZ} Z_{d,s(t)} + F_g)}{A_w} + \sum_{i=1}^n \left[\rho_v(0) \tau_v(0) F_{gi} I_{h(t)} (I_{h(t)} Z_{h \rightarrow d(t)} F_{d,h(t)}^{YZ} Z_{d,s(t)} + F_g) \frac{(L_g \times H_g)}{A_i} + \rho_v(0) \left(\sum_{j=1}^n J_j F_{ij} \right)_{(t)} \right] \right\}$$

$$T_{si,t} = \alpha_i \left(\frac{\sum_{g=1}^m \tau(\theta) I_{h(t)} Z_{h \rightarrow D} Z_D + \frac{\sum_{g=1}^m \tau(0) I_{h(t)} Z_{h \rightarrow d} Z_d}{\sum_{j=1}^n A_j}}{\frac{-\sum_{j=1}^n \frac{A_j}{A_i} F_{ji} \varepsilon_j T_{si,t}^{(j)4} + \sum_{j=1}^n \frac{\rho_j}{A_i A_j} \sum_{k=1}^n A_k F_{kj} J_k Y_o T_{so,t} + h_{ci} T_i + Q_{sw,j}^* + H_i}{Z_o + h_{ci}}} \right)$$

$$T_{so,l} = \frac{\alpha_o I_{h(t)} (Z_{h \rightarrow D} Z_D + Z_{h \rightarrow d} Z_d) + \varepsilon_{so} \sigma (F_a + F_{sky} + F_g) (T_{o(t)}^4 - T_{so}^4) + Y_o T_{si,l} + h_o T_{o(t)} + H_o}{X_o + h_o}$$

พิจารณาสมการเงื่อนไขของความจ้ำภายในอาคาร โดยเริ่มต้นจากการพิจารณา ω และ Ω ในรูปของความยาวแนวระดับ ความยาวแนวตั้งของกระจกอาคาร และระยะห่างระหว่างกระจกถึงตำแหน่งที่พิจารณา จะได้ตามลำดับดังนี้

$$\omega = \frac{L_g H_g \cos \left[\arctan \left(\frac{L_g}{2d} \right) \right] \times \cos \left[\arctan \left(\frac{H_g}{2d} \right) \right]}{d^2} \quad 3.92$$

$$\Omega = 2 \left\{ L_g (4d^2 + L_g^2)^{-1/2} \arctan \left[H_g (4d^2 + L_g^2)^{-1/2} \right] + H_g (4d^2 + H_g^2)^{-1/2} \arctan \left[L_g (4d^2 + H_g^2)^{-1/2} \right] \right\} \quad 3.93$$

โดยที่

d แทน ระยะจากกระจกถึงตำแหน่งที่พิจารณา

ความส่องสว่างจากกระจกได้จากความส่องสว่างส่งผ่านกระจกเนื่องจากรังสีตรงและรังสีกระจายดังนี้

$$E_s = \tau_v(0) E_{d,s} + \tau_v(\theta) E_{D,s} \quad 3.94$$

แทนสมการที่ 3.76 และ 3.77 ลงในสมการที่ 3.94 จะได้

$$E_s = \tau_v(0) I_h (I_h Z_{h \rightarrow d} F_{d,h}^{YZ} Z_{d,s} + F_g) + \tau_v(\theta) I_h^2 Z_{h \rightarrow D} F_{D,h}^{YZ} Z_{D,s}$$

ดังนั้น

$$L_s = \frac{E_s}{2(\pi - 1)}$$

$$L_s = \frac{\tau_v(0) I_h (I_h Z_{h \rightarrow d} F_{d,h}^{YZ} Z_{d,s} + F_g) + \tau_v(\theta) I_h^2 Z_{h \rightarrow D} F_{D,h}^{YZ} Z_{D,s}}{2(\pi - 1)} \quad 3.95$$

ความส่องสว่างจากการสะท้อนของผนังภายในอาคาร จะได้ว่า

$$E_a = E_{dr}$$

ดังนั้น

$$E_a = \sum_{i=1}^n \left[\rho_v \tau_v(0) F_{gi} I_h (I_h Z_{h \rightarrow d} F_{d,h}^{YZ} Z_{d,s} + F_g) \frac{A_g}{A_i} + \rho_v \sum_{j=1}^n J_j F_{ij} \right]$$

$$L_a = \frac{E_a}{\pi}$$

$$L_a = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\rho_v \tau_v(0) F_{gi} I_h (I_h Z_{h \rightarrow d} F_{d,h}^{YZ} Z_{d,s} + F_g) \frac{A_g}{A_i} + \rho_v \sum_{j=1}^n J_j F_{ij} \right]}{\pi} \quad 3.96$$

ความส่องสว่างจากกระจก ณ ตำแหน่งที่พิจารณา

$$E_w = \tau_v(0) E_{d,s} F_{gp}$$

$$E_w = \tau_v(0) I_h (I_h Z_{h \rightarrow d} F_{d,h}^{YZ} Z_{d,s} + F_g) F_{gp}$$

$$L_w = \frac{\tau_v(0) I_h (I_h Z_{h \rightarrow d} F_{d,h}^{YZ} Z_{d,s} + F_g) F_{gp}}{2\phi\pi} \quad 3.97$$

เมื่อ

$$F_{gp} = \frac{2}{\pi XY} \left\{ \ln \left[\frac{(1+X^2)(1+Y^2)}{1+X^2+Y^2} \right]^{1/2} + X\sqrt{1+Y^2} \arctan \frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} \right. \\ \left. + Y\sqrt{1+X^2} \arctan \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} - X \arctan X - Y \arctan Y \right\}$$

โดยที่

$$X = \frac{L_g}{d}$$

$$Y = \frac{H_g}{d}$$

แทนสมการที่ 3.95 สมการที่ 3.96 และ สมการที่ 3.97 ลงในสมการที่ 3.35 จะได้สมการเงื่อนไขของความจ้ำภายในอยู่ในรูปปัจจัยควบคุมได้ ปัจจัยควบคุมไม่ได้ และ ปัจจัยคงที่ ณ เวลา t ใดๆ ในช่วงของเวลาเริ่มต้น t_i และ เวลาสุดท้าย t_f ดังนี้

$$g_1(X) = \frac{DGI_{(t)}}{DGI_{\max}} - 1 \leq 0$$

$$\frac{10 \log \left[\frac{0.478 L_s^{1.6} \Omega^{0.8}}{L_a + (0.07 \omega^{0.5} L_w)} \right]_{t=t_i}^{t=t_f}}{DGI_{\max}} - 1 \leq 0 \quad 3.98$$

เมื่อ

$$L_s(t) = \frac{\tau_v(0) I_{h(t)} (I_{h(t)} Z_{h \rightarrow d} F_{d,h(t)}^{YZ} Z_{d,s} + F_g) + \tau_v(\theta) I_{h(t)}^2 Z_{h \rightarrow D} F_{D,h}^{YZ} Z_{D,s}}{2(\pi - 1)}$$

$$L_a(t) = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\rho_v \tau_v(0) F_{gi} I_{h(t)} (I_{h(t)} Z_{h \rightarrow d} F_{d,h(t)}^{YZ} Z_{d,s} + F_g) \frac{A_g}{A_i} + \left(\rho_v \sum_{j=1}^n J_j F_{ij} \right)_{(t)} \right]}{\pi}$$

$$L_w(t) = \frac{\tau_v(0) I_{h(t)} (I_{h(t)} Z_{h \rightarrow d} F_{d,h(t)}^{YZ} Z_{d,s} + F_g) F_{gp}}{2\phi\pi}$$

$$\omega = \frac{L_g H_g \cos \left[\arctan \left(\frac{L_g}{2d} \right) \right] \times \cos \left[\arctan \left(\frac{H_g}{2d} \right) \right]}{d^2}$$

$$\Omega = 2 \left\{ L_g (4d^2 + L_g^2)^{-1/2} \arctan \left[H_g (4d^2 + L_g^2)^{-1/2} \right] + H_g (4d^2 + H_g^2)^{-1/2} \arctan \left[L_g (4d^2 + H_g^2)^{-1/2} \right] \right\}$$

ส่วนขีดจำกัดของปัจจัยควบคุมได้ต่างๆ จะพิจารณาจากค่าสูงสุด และต่ำสุดที่ยอมรับได้ ขอบปัจจัยควบคุมได้แต่ละตัว ซึ่งจะแสดงดังสมการที่ 3.65

ดังนั้นรูปแบบของฟังก์ชันพินัลตี้ สมการที่ 3.68 จะถูกแทนด้วยสมการจุดประสงค์จากสมการที่ 3.91 แทนด้วย $f(X)$ สมการเงื่อนไขจากสมการที่ 3.98 แทนด้วย $g_1(X)$ และสมการควบคุมค่าของปัจจัยควบคุมได้ สมการที่ 3.65 แทนด้วย $g_{i+1}(X)$ เมื่อ i แทน จำนวนเลขบ่งปัจจัยควบคุมได้แต่ละตัวซึ่งจะแสดงในภาพรวมทั้งหมดดังต่อไปนี้

$$PF(X, r_k) = f(X) + r_k \sum_{j=1}^m \langle g_j(X) \rangle^q$$

$$f(X) = \int_{t_1}^{t_f} \left\{ \left[\sum_{i=1}^n A_i h_{ci,i} (T_{si(t)}^i - T_i) + \rho_a \dot{V} c_p (T_{o(t)} - T_i) + \rho \dot{V} h_{fg} (\omega_{o(t)} - \omega_i) \right] \left(\frac{T_{cond}^i}{T_{evap}} - 1 \right) + \frac{A_w (E_{conf} - E_{day(t)})}{\varepsilon CU} \left(\frac{T_{cond}^i}{T_{evap}} \right) + IRR \right\} dt$$

$$g_1(X) = \frac{10 \log \left[\frac{0.478 L_s^{1.6} \Omega^{0.8}}{L_a(t) + (0.07 \omega^{0.5} L_w(t))} \right]_{t=t_1}^{t=t_f}}{DGI_{max}} - 1 \leq 0$$

$$g_{i+1}(X) = \frac{x_i}{x_i^u} - 1 \leq 0$$

$$g_{i+n+1}(X) = \frac{x_i^l}{x_i} - 1 \leq 0$$

S.S. RAO แนะนำเลขยกกำลัง q ที่เหมาะสมในพินัลตี้ฟังก์ชันมีค่าเท่ากับ 2 ($q = 2$) และค่าเริ่มต้นของพินัลตี้พารามิเตอร์ r_k มีค่าน้อยมาก ในการศึกษาวิจัยนี้ได้พิจารณาค่า r_k เริ่มต้น น้อยมากคือ $r_k = 0.0001$ ซึ่งจะทำให้การอพติไมเซชันของฟังก์ชันพินัลตี้อันดับเริ่มต้น (Initial Iteration) ซึ่งจะทำให้อิทธิพลของการไม่สอดคล้องต่อฟังก์ชันเงื่อนไขน้อยมากต่อฟังก์ชันพินัลตี้ และในทางกลับกันจะทำให้เทอมของฟังก์ชันจุดประสงค์มีอิทธิพลต่อฟังก์ชันพินัลตี้มาก ในการอพติไมเซชันของฟังก์ชันพินัลตี้อันดับต่อไปค่า r_k จะเพิ่มขึ้น 10 เท่าของ r_k ค่าเดิม $r_k = 10 \times r_{k(old)}$ ในกรอบของปัญหาของการศึกษาวิจัยนี้ผู้วิจัยพบว่าการกำหนดค่า q และ r_k ดังกล่าวมีความเหมาะสม

ในการศึกษาวิจัยนี้อ้างอิงการใช้ไฟฟ้าของอุปกรณ์เครื่องใช้และการใช้ไฟส่องสว่างในช่วงเวลาทำงานคือ 8.00 ถึง 17.00 น. สัดส่วนของพลังงานที่ใช้รายชั่วโมงต่อพลังงานที่ใช้สูงสุด

สำหรับระบบแสงสว่างและอุปกรณ์เครื่องใช้ (Hourly Diversity Profile) จาก David E. Claridge, Jeff S. Haberl, Bass Abushakra, Atch Sreshthaputra รายละเอียดของการกำหนดค่าต่าง ๆ ในกรณีศึกษาของการศึกษาวิจัยนี้จะแสดงอย่างชัดเจนในบทที่ 4.