

## กรณีศึกษาการสูญเสียโอกาสของการประหยัดพลังงานสำหรับอาคาร Case Study of the Opportunity Loss for Energy Saving in Building

ธีระชาติ พรพิบูลย์<sup>1\*</sup> เชิดพันธ์ วิฑูราภรณ์<sup>2</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

โทร 0-4422-4498 โทรสาร 0-4422-4613 \*อีเมล์ teeracha@sut.ac.th

<sup>2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

โทร 0-2218-6622 โทรสาร 0-2252-2889 อีเมล์ chirdpun@hotmail.com

Teerachart Pompibul<sup>1\*</sup>, Chirdpun Vitooraporn<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,  
Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

Tel: 0-4422-4498, Fax: 0-4422-4613, \*E-mail: teeracha@sut.ac.th

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,  
Phyathai Patumwan, Bangkok 10330, Thailand

Tel: 0-2218-6622, Fax: 0-2252-2889, E-mail: chirdpun@hotmail.com

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ปัจจัยที่เหมาะสมต่อความต้องการพลังงานของอาคารซึ่งขึ้นอยู่กับอิทธิพลของรูปแบบรังสีดวงอาทิตย์ในแง่ของการนำแสงสว่างจากธรรมชาติเข้าสู่อาคารในทิศทางต่างๆเพื่อการประหยัดพลังงาน ปัจจัยที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบด้วย คุณสมบัติโดยเฉลี่ยของกระจกในช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นได้และมองไม่เห็น รวมไปถึงมิติของกระจกในแต่ละทิศของผนังอาคาร อาคารอ้างอิงที่ใช้ในการศึกษาเป็นอาคารที่มีพื้นที่ใช้สอย 120,000 ตารางเมตร 12 ชั้น ความสูง 40 เมตร ด้วยเหตุที่รูปแบบรังสีดวงอาทิตย์มีความไม่แน่นอน ดังนั้น บทความนี้จึงได้นำเสนออิทธิพลของการผันแปรของรังสีดวงอาทิตย์ที่แตกต่างไปจากค่าที่ใช้ในการออกแบบในทอมของการสูญเสียโอกาสของการประหยัดพลังงาน (OLE) ซึ่งหมายถึงพลังงานที่เบี่ยงเบนไปจากค่าของพลังงานที่อาคารใช้น้อยที่สุดที่คาดหวังจากการออกแบบค่าอัตราส่วนรังสีดวงอาทิตย์ส่งผ่านเข้าสู่อาคาร (SPR\*) ในแต่ละรูปแบบรังสีดวงอาทิตย์จะถูกนำมาใช้เพื่อแสดงผลของการอพติไมเซชันที่พิจารณา

### Abstract

The optimal parameters for building energy demand which depend on each solar radiation pattern under various amounts and directions of daylight introduced into the building are studied. The parameters involved in this study are average solar properties of glasses, both in visible and non-visible wavelength

region, and the glass dimension on each building surface. The study is done on the reference building which has the total area of 120,000 m<sup>2</sup>, 12 stories and 40 meter high. Due to the uncertainty of solar radiation pattern, this paper presents the effects of solar radiation pattern variation which deviate from the one used in the design condition in term of the opportunity loss for energy saving (OLE). This will show the amount of energy that deviates from the optimum one which is expected from the design condition. The optimum solar penetration ratio (SPR\*) which is different for each solar radiation pattern is used to represent the overall optimization results.

### 1. บทนำ

ผลจากวิกฤติการณ์ด้านพลังงานในปัจจุบัน ทำให้การแสวงหาแนวทางการใช้พลังงานของอาคารอย่างมีประสิทธิภาพกลายเป็นสิ่งที่สนใจอย่างกว้างขวาง จากรายงานการตรวจสอบและวิเคราะห์การใช้พลังงานของอาคารสำนักงานโดยทั่วไปพบว่า อาคารส่วนใหญ่ใช้พลังงานสำหรับการทำความเย็นเมื่อเทียบกับพลังงานที่อาคารใช้ทั้งหมดประมาณ 55 - 60 เปอร์เซ็นต์ และ สำหรับการส่องสว่างประมาณ 35 - 45 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าพลังงานส่วนใหญ่ที่อาคารสำนักงานใช้คือ พลังงานสำหรับการทำความเย็นและพลังงานสำหรับการส่องสว่าง แนวทางประหยัดพลังงานแนวทางหนึ่ง

ซึ่งเป็นที่น่าสนใจในปัจจุบัน คือการนำแสงสว่างจากธรรมชาติที่เหมาะสมเข้าสู่อาคารเพื่อการส่องสว่างภายในอาคาร ซึ่งจะทำให้พลังงานที่อาคารใช้สำหรับการส่องสว่างลดลงโดยที่ความส่องสว่าง (Luminance) บนระนาบทำงานยังคงอยู่ในระดับที่เพียงพอต่อความต้องการของผู้อาศัยภายในอาคาร ซึ่งสามารถทำได้โดยอาศัยอุปกรณ์ปรับแสงสว่างภายในอาคาร

การนำแสงสว่างจากธรรมชาติที่เหมาะสมเข้าสู่อาคารเพื่อการประหยัดพลังงานจะมีวิธีการพิจารณาที่ค่อนข้างซับซ้อนเนื่องจากปริมาณการส่องสว่างจากธรรมชาติที่เข้าสู่อาคารจะทำให้ ภาวะการส่องสว่างของอาคารลดลงเนื่องจากไฟส่องสว่างลดลง ในขณะที่ภาวะการทำความเย็นเนื่องจากความร้อนจากการส่งผ่านของรังสีดวงอาทิตย์เพิ่มขึ้น รวมไปถึงระดับความจ้าเนื่องจากแสงสว่างจากธรรมชาติภายในอาคารจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย จากสาเหตุดังกล่าวข้างต้นสามารถกล่าวได้ว่าการนำแสงสว่างจากธรรมชาติเข้าช่วยในการประหยัดพลังงาน วิศวกรผู้ออกแบบจะต้องวิเคราะห์การใช้พลังงานของระบบแสงสว่างและระบบทำความเย็นภายใต้การคำนึงถึงสุขสบายทางความร้อน(Thermal Comfort) และสุขสบายทางสายตา(Visual Comfort) ของผู้อาศัยภายในอาคารไปพร้อม ๆ กัน

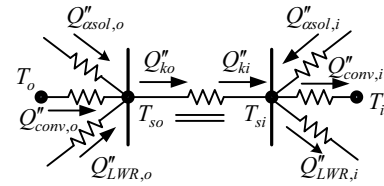
การเบี่ยงเบนของรูปแบบรังสีดวงอาทิตย์ที่เกิดขึ้นจริงกับรูปแบบรังสีดวงอาทิตย์ที่ใช้ในการออกแบบอาจมีผลทำให้ค่าพลังงานสุทธิที่อาคารใช้จริงเบี่ยงเบนไปจากค่าพลังงานสุทธิที่ได้ทำการออกแบบไว้ ดังนั้น รูปแบบรังสีดวงอาทิตย์ที่ทำให้พลังงานสุทธิที่อาคารใช้มีแนวโน้มต่ำตลอดช่วงการเบี่ยงเบนของรูปแบบรังสีดวงอาทิตย์ จึงเป็นรูปแบบรังสีดวงอาทิตย์ที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบ ซึ่งสามารถพิจารณาได้ในรูปของการสูญเสียโอกาสของการประหยัดพลังงาน

## 2. การวิเคราะห์ภาวะการทำความเย็นและภาวะการส่องสว่าง

เพื่อให้การวิเคราะห์พลังงานสุทธิสำหรับการทำความเย็นและการส่องสว่างอยู่ในรูปของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการใช้พลังงานสำหรับการทำความเย็นและการส่องสว่างของอาคาร จึงจำเป็นต้องอาศัยการพิจารณาให้ปัจจัยทั้งหมดดังกล่าวอยู่ในรูปพื้นฐาน ทำให้การวิเคราะห์ภาวะการทำความเย็นและภาวะการส่องสว่าง จำเป็นจะต้องถูกพิจารณาให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของปัจจัยพื้นฐานด้วยเช่นกัน

### 2.1 การวิเคราะห์ภาวะการทำความเย็น

การประเมินภาวะการทำความเย็นของอาคารมีด้วยกันหลายวิธี แต่ละวิธีอาศัยสมมติฐานและมีแนวคิดที่แตกต่างกัน วิธีการสมดุลความร้อน (Heat Balance Method) [1] เป็นวิธีการประเมินภาวะการทำความเย็นโดยอาศัยกฎการอนุรักษ์พลังงานทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งทำได้โดยการวิเคราะห์สมดุลทางความร้อนระหว่างสิ่งแวดล้อมภายนอกอาคารกับพื้นผิวภายนอกและพื้นผิวภายในของผนังและกระจกอาคาร วิธีดังกล่าวจะทำให้เราทราบค่าอุณหภูมิที่พื้นผิวภายนอกและภายในของผนังอาคาร ซึ่งกระบวนการถ่ายเทความร้อนระหว่างสิ่งแวดล้อมที่พื้นผิวภายนอกและพื้นผิวภายในของผนังอาคารสามารถแสดงในรูปที่ 1.



รูปที่ 1 กระบวนการถ่ายเทความร้อนผ่านผนัง

เมื่อพิจารณาสมดุลความร้อนของพื้นที่ทำความเย็นภายในอาคารก็จะทำให้เราทราบถึงภาวะการทำความเย็นของอาคารซึ่งแสดงในสมการที่ 1. ดังนั้นจากหลักการดังกล่าวจึงทำให้วิธีนี้เป็นวิธีการที่ทำให้ปัจจัยทั้งหมดของการพิจารณาอยู่ในรูปปัจจัยพื้นฐานทางการถ่ายเทความร้อน

$$\dot{Q}_{cl} = \sum_{i=1}^n A_i h_{ci,i} (T_{si} - T_i) + \dot{Q}_{al} + (\dot{Q}_{eq} + \dot{Q}_v) \quad (1)$$

### 2.2 การวิเคราะห์ภาวะการส่องสว่าง

ภาวะการส่องสว่างหมายถึงปริมาณแสงสว่าง(Luminous Flux) ที่ระบบไฟส่องสว่างต้องใช้ในการให้ความส่องสว่างอย่างเพียงพอต่อความต้องการบนระนาบทำงาน ดังนั้นระบบไฟส่องสว่างจะต้องให้ความส่องสว่างบนระนาบทำงานเท่ากับผลต่างระหว่างความส่องสว่างที่ต้องการกับความส่องสว่างจากแสงสว่างจากธรรมชาติเฉพาะส่วนรังสีกระจาย (Diffuse Daylight Luminance) บนระนาบทำงาน หากประเมินภาวะการส่องสว่างโดยวิธีลูเมน(Lumen Method) จะทำให้เราได้ภาวะการส่องสว่างดังแสดงในสมการที่ 2.

$$L_{art} = \frac{(E_{conf} - E_{d,day}) A_w}{CU} \quad (2)$$

ความส่องสว่างจากแสงธรรมชาติสามารถวิเคราะห์ได้โดยหลายวิธี เช่น วิธีการวิเคราะห์แสงสว่างจากธรรมชาติของลูเมน(Daylight Lumen Method) วิธีตัวประกอบแสงธรรมชาติ (Daylight Factor Method) และวิธีการถ่ายโอนฟลักซ์ (Flux Transfer Method) [2] อย่างไรก็ตามวิธีการถ่ายโอนฟลักซ์จะเป็นวิธีการที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์ความส่องสว่างจากแสงธรรมชาติบนระนาบทำงาน เนื่องจากจะทำให้ความส่องสว่างจากแสงธรรมชาติอยู่ในรูปความสัมพันธ์ของปัจจัยพื้นฐานของการส่องสว่างซึ่งจะส่งผลให้ภาวะการส่องสว่างจะถูกจัดอยู่ในรูปความสัมพันธ์ของปัจจัยพื้นฐานของการส่องสว่าง

### 3. การวิเคราะห์ความจ้าของแสงธรรมชาติ

เพื่อให้ความจ้าเนื่องจากแสงธรรมชาติเข้าสู่อาคารอยู่ในระดับที่ยอมรับได้สามารถพิจารณาได้จากดัชนีความจ้าของแสงธรรมชาติ (Daylight Glare Index) [3] ทำการศึกษาอิทธิพลของความจ้าที่มีต่อสุขสบายทางสายตาของผู้อาศัยภายในอาคาร พบว่าค่าดัชนีความจ้า (Glare Index) ที่ยอมรับ ณ. ตำแหน่งขอบเขตของโซนแสงธรรมชาติปานกลาง (Intermediate Daylight Zone) คือที่ระยะห่างจากกระจกประมาณ 3.5 เท่าของความสูงประสิทธิผล (Effective Window Height) ของกระจกมีค่าอยู่ระหว่าง 23 ถึง 26 สมการที่ 3. แสดงดัชนีความจ้าจากการศึกษาวิจัยนี้

$$DGI = 10 \log \left[ 0.478 \frac{L_s^{1.6} \Omega^{0.8}}{L_a + (0.07 \omega^{0.5} L_w)} \right] \quad (3)$$

โดยที่

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

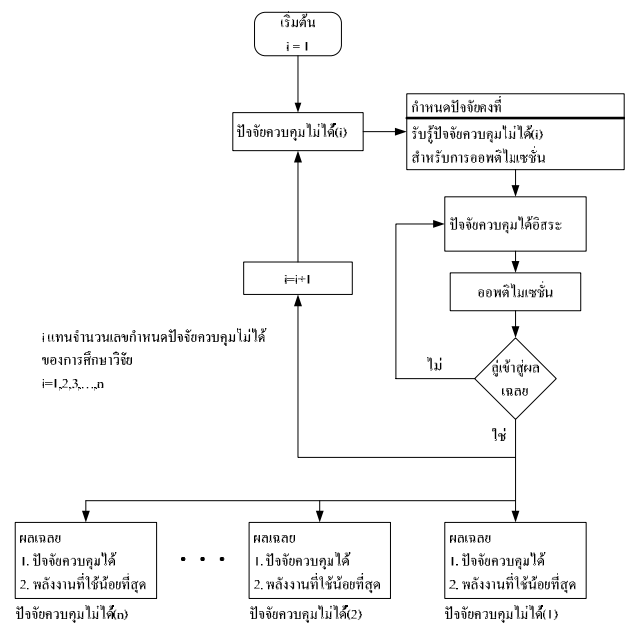
$$L_a = \frac{E_a}{\pi}$$

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

#### 4. การออปติไมเซชัน (Optimization Method)

##### 4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้พลังงานของอาคาร

หากวิเคราะห์ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการใช้พลังงานของอาคารสามารถจำแนกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ 1.ปัจจัยควบคุมได้ คือปัจจัยที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ภายใต้กระบวนการออกแบบ 2. ปัจจัยควบคุมไม่ได้ คือ ปัจจัยที่มีการเปลี่ยนแปลงภายใต้ความไม่แน่นอนต่างๆ และ 3. ปัจจัยคงที่ คือ ปัจจัยที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นกับข้อกำหนดในการออกแบบ หากพิจารณาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการใช้พลังงานของอาคารทั้ง 3 กลุ่ม สามารถกล่าวได้ว่าการออปติไมเซชันจะเป็นการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของการออปติไมเซชัน (Optimized Parameters) ทั้งหมดในรูปปัจจัยควบคุมได้ ภายใต้ปัจจัยควบคุมไม่ได้ต่างๆ สำหรับปัจจัยคงที่ปัจจัยหนึ่ง รูปที่ 2. แสดงภาพรวมของการออปติไมเซชัน



รูปที่ 2 ภาพรวมของการออปติไมเซชัน

##### 4.2 ฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective Function)

ฟังก์ชันจุดประสงค์ของพลังงานที่ใช้สำหรับการทำความเย็นและการส่องสว่าง จะอยู่ในรูปฟังก์ชันของปัจจัยควบคุมได้(X) ภายใต้ปัจจัยควบคุมไม่ได้ (Y) ต่างๆ สำหรับปัจจัยคงที่ (Z) ค่าหนึ่ง กล่าวคือ

$$W(X, Y, Z) = \int_{t_i}^{t_f} \frac{\dot{Q}_{cl}(X, Y, Z)}{COP} + \frac{L_{art}(X, Y, Z)}{\varepsilon} dt \quad (4)$$

##### 4.3 ฟังก์ชันเงื่อนไข (Constraint Function)

ฟังก์ชันเงื่อนไขเกิดจากการพิจารณาขีดจำกัดของคุณสมบัติทางวัสดุของปัจจัยควบคุมได้ต่างๆและการพิจารณาความจำของแสงธรรมชาติที่มีอิทธิพลต่อความสบายทางสายตาของผู้อาศัยภายในอาคาร ดังนั้นฟังก์ชันเงื่อนไขสำหรับความจำของแสงธรรมชาติและขีดจำกัดทางวัสดุของปัจจัยควบคุมได้แสดงในสมการที่ 5 ตามลำดับดังนี้

$$g_1(X) = \frac{DGI(X)}{DGI_{max}} - 1 \leq 0 \quad (5.1)$$

ขีดจำกัดของปัจจัยควบคุมได้  $x_i$  ในช่วงขีดจำกัดระหว่าง  $x_i^l \leq x_i \leq x_i^u$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  ซึ่งจะได้

$$g_{i+1}(X) = \frac{x_i}{x_i^u} - 1 \leq 0 \quad (5.2)$$

$$g_{i+n+1}(X) = \frac{x_i^l}{x_i} - 1 \leq 0 \quad (5.3)$$

##### 4.4 วิธีการพินัลตีฟังก์ชัน (Penalty Function)

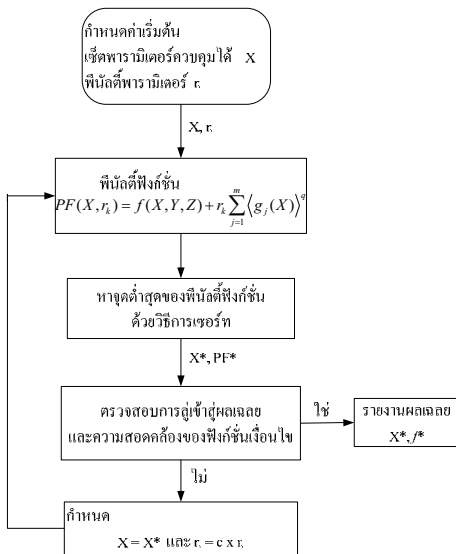
ภาระการทำความเย็นซึ่งได้จากวิธีการสมดุลความร้อนและการส่องสว่างที่ได้จากการวิเคราะห์ผลต่างระหว่างปริมาณการส่องสว่างจากแสงธรรมชาติบนระนาบทำงานโดยวิธีการถ่ายโอนฟลักซ์กับปริมาณการส่องสว่างที่ต้องการบนระนาบทำงาน จากความซับซ้อนของวิธีการทั้งสองจึงส่งผลให้ฟังก์ชันจุดประสงค์อยู่ในรูปสมการไม่เชิงเส้น (Nonlinear Equation) รวมไปถึงฟังก์ชันเงื่อนไขทั้งหมดซึ่งแสดงในสมการที่ 5 อยู่ในรูปฟังก์ชันเงื่อนไขแบบไม่เท่ากัน (Inequality Constraint) จากปัญหาดังกล่าว วิธีการไดเรกต์เซอร์ช (Direct Search) จึงเป็นการออปติไมเซชันที่เหมาะสม และเนื่องจากฟังก์ชันเงื่อนไขอยู่ในรูปไม่เท่ากันและในทางปฏิบัติจะมีจำนวนมาก ดังนั้นเพื่อลดความยากของปัญหาดังกล่าวจึงต้องเปลี่ยนปัญหานี้ให้อยู่ในรูปแบบของการออปติไมเซชันแบบไม่มีเงื่อนไข (Non-constraint Optimization) ซึ่งสามารถทำได้โดยวิธีการใช้พินัลตีฟังก์ชัน (Penalty Function Method) รูปแบบของพินัลตีฟังก์ชันภายใต้เซตของปัจจัยควบคุมไม่ได้ Y และปัจจัยคงที่ Z สามารถแสดงได้ดังนี้

$$PF(X, r_k) = W(X, Y, Z) + r_k \sum_{j=1}^m \langle g_j(X) \rangle^q \quad (6)$$

โดยที่  $j$  แทนจำนวนฟังก์ชันเงื่อนไขทั้งหมด  $r_k$  แทนพินัลตีพารามิเตอร์ (Penalty Parameter) ซึ่งต้องเป็นจำนวนจริงมากกว่าศูนย์ เลขยกกำลัง  $q$  เป็นค่าคงที่มากกว่าศูนย์ และฟังก์ชัน  $\langle g_j(X) \rangle$  มีความหมายดังนี้

$$\langle g_j(X) \rangle = \max(g_j(X), 0) \quad (7)$$

โดยที่  $\langle g_j(X) \rangle = g_j(X)$  จะเกิดขึ้นในกรณีไม่สอดคล้องกับฟังก์ชันเงื่อนไข  $j$  และในกรณีที่มีความสอดคล้องกับฟังก์ชันเงื่อนไข  $j$  จะทำให้  $\langle g_j(X) \rangle = 0$  ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าในกรณีที่ฟังก์ชันเงื่อนไขทั้งหมดมีความสอดคล้องกันจะทำให้รูปแบบของพินัลตีฟังก์ชันมีความเสมือนกับฟังก์ชันจุดประสงค์ รูปที่ 3 แสดงแผนภูมิการออปติไมเซชันด้วยวิธีการพินัลตีฟังก์ชัน



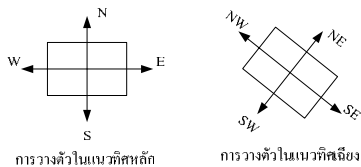
โดยที่ C แทนค่าคงที่มากกว่า 1

รูปที่ 3 แผนภูมิการอพติไมเซชันด้วยวิธีการพินัลดีฟิงก์ชัน

## 5. กรณีศึกษา

### 5.1 การกำหนดเงื่อนไขของกรณีศึกษา

บทความนี้จะแสดงกรณีศึกษาสำหรับอาคารอ้างอิงขนาดใหญ่ด้านเท่ากับ มีพื้นที่ใช้สอย 120,000 ตารางเมตร มีความกว้าง 100 เมตร และความยาว 100 เมตร วางตัวในทิศหลัก (Normal Orientation) และทิศเฉียง (Oblique Orientation) ดังแสดงในรูปที่ 4 ผังอาคารมีโครงสร้างเป็นชนิดก่ออิฐ ฉาบปูน



รูปที่ 4 การวางตัวของอาคาร

**ระบบไฟส่องสว่าง** ไฟส่องสว่างเป็นหลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent) ชนิดแขวน สัมประสิทธิ์การใช้ประโยชน์ (Coefficient of Utilization) ของโคมไฟเท่ากับ 88% ประสิทธิภาพหลอดไฟเท่ากับ 70 ลูเมนต่อวัตต์ ผังและเพดานสีสว่าง พื้นสีเข้ม ความสูงจากพื้นถึงระนาบทำงานเท่ากับ 0.75 เมตร

**ระบบทำความเย็น** เครื่องทำความเย็นแต่ละตัวมีขนาด 200 ตัน สมรรถนะเครื่องทำความเย็นเท่ากับ 0.6 kW/Ton

**สภาวะควบคุมภายใน** ความส่องสว่างบนระนาบควบคุม 500 ลักซ์ ระดับความจำสูงสุดที่ตำแหน่งขอบเขตของโซนแสงธรรมชาติปานกลางเท่ากับ 26 อุณหภูมิภายใน 24.5 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 55 %RH อัตราการระบายอากาศ 10 cfm/คน และความหนาแน่นของผู้อาศัยเท่ากับ 10 m<sup>2</sup>/คน

ปัจจัยควบคุมได้ของกรณีศึกษานี้ประกอบด้วย ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและสัมประสิทธิ์การสะท้อนในช่วงความยาวคลื่น

ที่มองเห็นได้ (Visible Band) ค่าเฉลี่ยของการส่งผ่านและการดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่นที่มองไม่เห็น (Non-visible Band) และมีค่าความกว้างและยาวของกระจกในแต่ละทิศทางของอาคาร ดังนั้นเซตของปัจจัยควบคุมได้จะสามารถแสดงได้ดังนี้

อาคารวางตัวในทิศหลัก

$$X = \{I_g(S), I_g(W), I_g(N), I_g(E), h_g(S), h_g(W), h_g(N), h_g(E), \tau_v, \rho_v, \tau_n, \alpha_n\} \quad (8.1)$$

อาคารวางตัวในทิศเฉียง

$$X = \{I_g(SW), I_g(NW), I_g(NE), I_g(SE), h_g(SW), h_g(NW), h_g(NE), h_g(SE), \tau_v, \rho_v, \tau_n, \alpha_n\} \quad (8.2)$$

สมการภูมิอากาศที่ใช้พิจารณาได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติของข้อมูลสภาวะอากาศ สถานีตรวจวัดสภาวะอากาศ กรุงเทพมหานครตั้งแต่ปี พ.ศ. 2532 ถึง 2546 โดยพิจารณาอยู่ในรูปค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์รายชั่วโมง และรูปแบบของรังสีดวงอาทิตย์จะถูกพิจารณาอยู่ในรูปความน่าจะเป็นของรูปแบบรังสีดวงอาทิตย์ประกอบด้วย 99%, 80%, และ 50% ของความน่าจะเป็นของรูปแบบรังสีดวงอาทิตย์ ดังนั้นเซตของปัจจัยควบคุมไม่ได้สามารถแสดงได้ดังนี้

$$Y = \{99\%SP, 80\%SP, 50\%SP\} \quad (9)$$

### 5.2 ผลจากการศึกษา

จากผลการอพติไมเซชันทุกกรณีพบว่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของกระจกอาคารในช่วงความยาวคลื่นมองไม่เห็นมีค่าเข้าใกล้ศูนย์เนื่องจากรังสีดวงอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นนี้ไม่มีคุณสมบัติในการมองเห็นและผลรวมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและสัมประสิทธิ์การสะท้อนในช่วงความยาวคลื่นมองเห็นได้มีค่าเข้าใกล้หนึ่งโดยพบว่าในช่วงความยาวคลื่นมองเห็นได้สัมประสิทธิ์การส่งผ่านมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.2 ถึง 0.3 (0.2 ≤ τ<sub>v</sub><sup>\*</sup> ≤ 0.3) และสัมประสิทธิ์การสะท้อนอยู่ในช่วงประมาณ 0.45 ถึง 0.6 (0.45 ≤ ρ<sub>v</sub><sup>\*</sup> ≤ 0.6) จากการพิจารณาข้างต้นอาจกล่าวได้ว่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนความร้อนของกระจกควรมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ นอกจากนี้ยังพบว่าความยาวของกระจกในแนวระดับของอาคารจะมีค่าสูงกว่าความยาวกระจกในแนวความสูงของอาคารในทุกกรณี ทั้งนี้เพื่อลดอิทธิพลของความจ้าจากแสงธรรมชาติภายในอาคารแม้ว่ากระจกที่มีความยาวในแนวตั้งมากจะทำให้พื้นที่การส่องสว่างจากแสงธรรมชาติลึกเข้าสู่ภายในอาคารมากก็ตาม

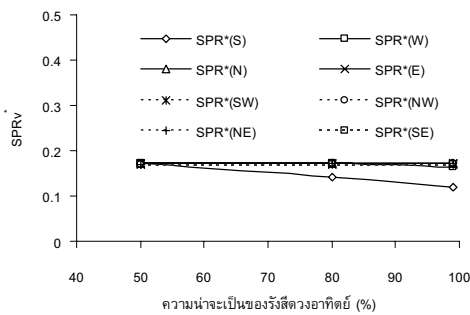
จากผลการศึกษาข้างต้นสามารถกล่าวได้ว่าปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นได้ส่งผ่านเข้าสู่อาคารจะเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการใช้พลังงานสำหรับการทำความเย็นและการส่องสว่าง

อัตราส่วนรังสีดวงอาทิตย์ส่งผ่านเข้าสู่อาคาร (Solar Penetration Ratio, SPR) คืออัตราส่วนพื้นที่กระจกประสิทธิผล (Glass Effective area, zA<sub>g</sub>) ต่อพื้นที่กระจก (A<sub>g</sub>) อาจกล่าวได้ว่าอัตราส่วนรังสีดวงอาทิตย์ส่งผ่านเข้าสู่อาคารเป็นตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless) ที่บ่งบอกถึงสัดส่วนระหว่างรังสีดวงอาทิตย์ส่งผ่านเข้าสู่อาคารกับรังสีดวงอาทิตย์ตกกระทบกระจกอาคาร สมการที่ 10 แสดงอัตราส่วนรังสีดวงอาทิตย์

ส่งผ่านเข้าสู่อาคารในช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นได้สำหรับกระจกในทิศทางต่างๆ ของอาคาร ( $SPR_v$ ) คือ

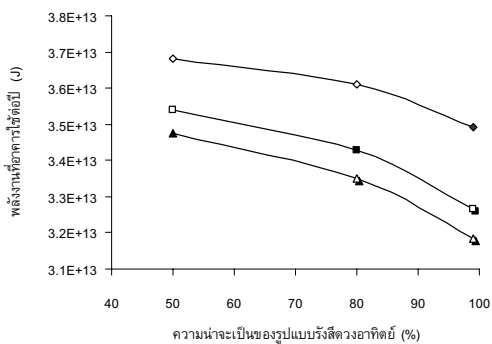
$$SPR_v(DIR) = \frac{\tau_v A_g(DIR)}{A_g(DIR)} \quad (11)$$

ผลการอพติไมเซชันพบว่า  $SPR_v^*$  สำหรับอาคารวางตัวในทิศหลักและอาคารวางตัวในทิศเฉียงจะมีค่า  $SPR_v^*$  ใกล้เคียงกัน ยกเว้นกระจกในทิศตะวันตกของอาคารวางตัวในทิศหลัก  $SPR_v^*$  จะมีแนวโน้มลดลงเมื่อความน่าจะเป็นของรูปแบบรังสีดวงอาทิตย์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากอิทธิพลของรังสีดวงอาทิตย์มีอิทธิพลต่อภาระการทำความเย็นค่อนข้างสูงในช่วงบ่าย รูปที่ 5 แสดง  $SPR_v^*$  สำหรับอาคารอ้างอิงวางตัวในทิศหลักและทิศเฉียงภายใต้ความน่าจะเป็นของรูปแบบรังสีดวงอาทิตย์



เส้นประ แทน อาคารวางตัวในทิศเฉียง  
 เส้นทึบ แทน อาคารวางตัวในทิศหลัก

รูปที่ 5 แสดง  $SPR_v^*$  สำหรับอาคารอ้างอิงวางตัวในทิศหลักและทิศเฉียงภายใต้ความน่าจะเป็นของรูปแบบรังสีดวงอาทิตย์



จุดที่ปรากฏเงา แทน สภาวะความจ้ภายในอาคาร  
 เกินเขตความสบายทางสายตา  
 จุดสีดำ แทน จุดที่อาคารใช้พลังงานต่ำสุด  
 ภายใต้กระบวนการอพติไมเซชัน  
 รูปที่ 6 แนวโน้มของพลังงานที่อาคารใช้  
 สำหรับอาคารวางตัวในทิศหลักภายใต้การผันแปร  
 ของรูปแบบรังสีดวงอาทิตย์ที่ค่าความน่าจะเป็นต่างๆ

ภายใต้กรอบของกรณีศึกษาพบว่าเมื่อรังสีดวงอาทิตย์ผันแปรไปสู่รูปแบบรังสีดวงอาทิตย์ที่ค่าความน่าจะเป็นสูงขึ้น การสูญเสียโอกาสของการประหยัดพลังงานจะลดลง ในขณะที่รูปแบบรังสีดวงอาทิตย์ผัน

แปรไปสู่รูปแบบรังสีดวงอาทิตย์ที่ค่าความน่าจะเป็นต่ำลง การสูญเสียโอกาสของการประหยัดพลังงานจะสูงขึ้น สำหรับการพิจารณาพลังงานที่อาคารใช้ต่ำสุด ซึ่งการสูญเสียโอกาสของการประหยัดพลังงานสำหรับอาคารวางตัวในทิศหลักสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 6

### 6. สรุปผล

ภายใต้กรอบของกรณีศึกษาพบว่า การสูญเสียโอกาสของการประหยัดพลังงาน ณ จุดที่อาคารใช้พลังงานต่ำสุดที่ค่าความน่าจะเป็นของรูปแบบรังสีดวงอาทิตย์ที่ 50% มีแนวโน้มต่ำกว่าที่ 80% และขณะที่ ณ ค่าความน่าจะเป็นของรูปแบบรังสีดวงอาทิตย์ที่ 99% การสูญเสียโอกาสของการประหยัดพลังงานจะมีค่าสูงมากตลอดช่วงการผันแปรของรูปแบบรังสีดวงอาทิตย์ อย่างไรก็ตามพบที่ค่าความจ้ การออกแบบที่ค่าความน่าจะเป็น 50% เกินขอบเขตความสบายทางสายตา และอิทธิพลของความจ้จะลดลงเมื่อเลือกใช้ค่าความน่าจะเป็นของรูปแบบรังสีดวงอาทิตย์สูงขึ้นสำหรับการออกแบบ ดังนั้นเมื่อคำนึงถึงทั้งด้านประหยัดพลังงานและความสบายเชิงสายตาแล้วการออกแบบที่ค่าความน่าจะเป็นของรูปแบบรังสีดวงอาทิตย์ที่ 80% น่าจะเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบ

หากพิจารณาโดยรวมแล้วปัจจัยควบคุมได้ที่เหมาะสมจะต้องทำให้พลังงานสุทธิที่อาคารใช้อยู่ในระดับต่ำตลอดช่วงการผันแปรของปัจจัยควบคุมไม่ได้ ซึ่งหมายถึงการสูญเสียโอกาสของการประหยัดพลังงานจะเป็นปัจจัยสำคัญในการพิจารณาการออกแบบอาคารเพื่อการประหยัดพลังงานภายใต้ปัจจัยควบคุมไม่ได้ต่างๆ

### 7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้ความอนุเคราะห์คอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูงเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัย

### รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	คำอธิบาย
$T_o$	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม, °C
$T_i$	อุณหภูมิภายใน, °C
$T_{so}$	อุณหภูมิพื้นผิวผนังภายนอก, °C
$T_{si}$	อุณหภูมิพื้นผิวภายใน, °C
$Q_{asol}''$	ฟลักซ์รังสีดวงอาทิตย์ดูดกลืนที่พื้นผิวอาคาร, W/m <sup>2</sup>
$Q_{conv}''$	ฟลักซ์การพาความร้อน, W/m <sup>2</sup>
$Q_{LWR,o}''$	ฟลักซ์การแผ่รังสีเนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวอาคารกับสิ่งแวดล้อม, W/m <sup>2</sup>
$Q_{LWR,i}''$	ฟลักซ์การแผ่รังสีเนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวภายในอาคารกับอุณหภูมิภายใน, W/m <sup>2</sup>
$Q_{ko}''$	ฟลักซ์การนำความร้อนที่พื้นผิวภายนอกอาคาร, W/m <sup>2</sup>

$Q_{ki}''$	ฟลักซ์การนำความร้อนที่พื้นผิวภายในอาคาร, W/ m <sup>2</sup>	$X$ $Y$	เขตของปัจจัยควบคุมได้ เขตของปัจจัยควบคุมไม่ได้
$\dot{Q}_{cl}$	ภาระการทำความเย็นของอาคาร, W	$Z$	เขตของปัจจัยคงที่
$A_i$	พื้นที่ของพื้นผิวภายในอาคาร, m <sup>2</sup>	$x_i$	ปัจจัยควบคุมได้
$h_{ci}$	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่พื้นผิวภายในอาคาร, W/ m <sup>2</sup> K	$x_i', x_i''$	ค่าขอบเขตสูงสุดและต่ำสุดของปัจจัยควบคุมได้
$\dot{Q}_{al}$	ความร้อนจากไฟส่องสว่าง, W	$g(X)$	ฟังก์ชันเงื่อนไข
$\dot{Q}_{eq}$	ความร้อนจากเครื่องมือเครื่องใช้, W	$PF$	พื้นที่ฟังก์ชัน
$\dot{Q}_V$	อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการระบายอากาศ, W	$r_k$	พื้นที่พีอาร์มิเตอร์
$L_{art}$	ภาระการส่องสว่าง, lumen	$DIR$	ทิศของผนังอาคาร
$E_{comf}$	ความส่องสว่างที่ต้องการบนระนาบทำงาน, lux	$\%SP$	ความน่าจะเป็นของรูปแบบรังสีดวงอาทิตย์
$E_{d,day}$	ความส่องสว่างจากรังสีกระจายบนระนาบทำงาน, lux	$SPR$	อัตราส่วนรังสีดวงอาทิตย์
$A_w$	พื้นที่ให้ความส่องสว่าง, m <sup>2</sup>	$OLE$	ส่งผ่านเข้าสู่อาคาร การสูญเสียโอกาสของ การประหยัดพลังงาน
$CU$	สัมประสิทธิ์การใช้ประโยชน์ของโคมไฟส่องสว่าง		
$DGI$	ดัชนีความจ้า		
$\Omega$	มุมตัน, St		
$\omega$	ตัวแปรไร้มิติแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมิติกระจกกับตำแหน่งที่พิจารณา		
$\phi$	ตัวประกอบรูปร่างระหว่างหน้าต่างกับตำแหน่งที่พิจารณา		
$W$	พลังงานที่ใช้สำหรับการทำความเย็นและการส่องสว่าง, J/Year		
$COP$	สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของเครื่องทำความเย็น		
$A_g$	พื้นที่กระจก, m <sup>2</sup>		
$h_g$	ความยาวกระจกในแนวความสูงของอาคาร, m		
$l_g$	ความยาวกระจกในแนวระดับของอาคาร, m		
$\tau_v$	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์ช่วงความยาวคลื่นมองเห็นได้		
$\rho_v$	สัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีดวงอาทิตย์ช่วงความยาวคลื่นมองเห็นได้		
$\tau_n$	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์ช่วงความยาวคลื่นมองเห็นไม่ได้		
$\alpha_n$	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ช่วงความยาวคลื่นมองเห็นไม่ได้		
$\varepsilon$	ประสิทธิภาพการส่องสว่างของหลอดไฟส่องสว่าง, lm/W		
$t, t_f, t_i$	เวลา, เวลาสุดท้าย, เวลาเริ่มต้น, วินาที		

**เอกสารอ้างอิง**

- [1] ASHRAE, ASHRAE Handbooks Fundamentals (SI), Atlanta, USA, American Society of Heating, Refrigeration and Air conditioning Engineers, 2001.
- [2] IES, IES Lighting Handbooks, 8<sup>th</sup> edition, IES of North America, 1993.
- [3] Nazzal, Ali A., 2005. A New Daylight Glare Evaluation method Introduction of the Monitoring Protocol and Calculation Method. Energy and Building Journal, pp. 257-265.
- [4] เชิดพันธ์ วิฑูราภรณ์., 2545. ปัจจัยเสี่ยงในการลงทุนเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ. การประชุมเครื่องข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, หน้า 587- 591.
- [5] เทพฤทธิ์ ทองซูป, 2547. การใช้ทฤษฎีความน่าจะเป็นในการคำนวณภาระการทำความเย็น. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.