

เปรียบเทียบการวิเคราะห์การคำนวณแสงโดยวิธี Lumen Method, Flux Transfer และ Ray Tracing

สำหรับการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 28

เอกรินทร์ แสงธรรมรัตน์¹ , โชคชัย จุฑะโกสสิทธิ์กานนท์¹ , วันฉัตร อ่ำทอง¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล 25/25 พุทธมณฑล นครปฐม 73170

*ติดต่อ: ekarins2002@hotmail.com , 081-343-2554

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีจุดประสงค์เพื่อเปรียบเทียบเทคนิคและความแม่นยำในการคำนวณแสงสว่างโดยวิธี Lumen Method, Flux Transfer และ Ray Tracing โดยได้ทำการทดสอบจริงกับอาคารหอพักที่ 11 มหาวิทยาลัยมหิดล ศาลายา และได้ทำการจำลองผลการคำนวณเพื่อหาความเป็นไปได้ในการประหยัดพลังงานในอาคารด้วยเช่นกัน ผลที่ได้จากการศึกษาและวิเคราะห์การคำนวณแสงสว่างทั้ง 3 วิธีเปรียบเทียบกับผลการวัดจริง พบว่าวิธี Ray Tracing ให้ผลการคำนวณที่แม่นยำที่สุด ตามด้วยวิธี Flux Transfer และ วิธี Lumen Method ตามลำดับ อย่างไรก็ตามวิธีการคำนวณโดยวิธี Ray Tracing มีความซับซ้อนและยุ่งยากในการคำนวณ มากที่สุดในทั้งสามวิธี และจากผลการเปรียบเทียบ พบว่าวิธีที่มีความแม่นยำในการทำนายผลความสว่างในตำแหน่งที่วัดค่าสูงสุดคือวิธีการ Ray Tracing (84%) และ Flux Transfer (69%) และ Lumen Method (57%) ตามลำดับ และเมื่อทำการจำลองหาแนวทางการประหยัดพลังงานแสงสว่างโดยการเปลี่ยนหลอดไฟโดยใช้เทคนิค Ray Tracing ในการจำลองสถานการณ์จากเดิมซึ่งใช้ หลอดตะเกียบห้องละ 4 หลอด กินไฟหลอดละ 26 วัตต์ รวมแล้ว 104 วัตต์ต่อห้องมีความสว่างเฉลี่ย 100 lux และเมื่อทำการจำลองสถานการณ์ แล้วพบว่าหากทำการเปลี่ยนหลอดไฟเป็นหลอดฟลูออเรสเซนต์ 36 วัตต์ จำนวน 2 หลอดต่อห้อง จะสามารถได้ค่าความสว่างเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 160 lux คิดเป็นค่าไฟฟ้าที่สามารถประหยัดได้ทั้งสิ้น 84,612 บาทต่อปี(คิดที่ค่าไฟฟ้า 2.7 บาท/หน่วย) โดยมีเงินลงทุนคือค่าอุปกรณ์และค่าติดตั้ง 270,144 บาท จะพบว่ามียออัตราการคืนทุน (Internal Rate of Return) เท่ากับ 24.25% มีระยะเวลาคืนทุน 3.4 ปี และมีอัตราส่วนผลตอบแทนต่อการลงทุนของโครงการเท่ากับ 2.14

คำหลัก: การคำนวณแสงสว่าง การประหยัดพลังงาน Ray Tracing, Lumen Method, Flux Transfer

Abstract

The objective of this study is to compare the reliability of 3 difference light gain calculation method(lumen method, flux transfer method, and ray tracing method) by comparing each calculation result with actual light measurement on Mahidol university dormitory no.11 in order to determine the best correlation of all calculation method. The result is shown that ray tracing method is most accuracy of all method. The experimental result is shown that the accuracy of Ray tracing method ,Flux transfer and

ETM-84

Lumen method is 84%, 69% and 57% consecutively. In the current situation, each room have 26W compact fluorescent lamp 4 set (106W per room) and the light level is 100lux, When apply ray tracing method to simulate the opportunity of lighting system energy saving by changing light bulb type to 2 set of 36W fluorescent lamp in the room and maintaining the light level. The results found that the light level increases to 160 lux. Cost saving 84,612 Baht/year (electric charge cost 2.7 Baht/unit), project investment 270,144 Baht, internal rate of return 24.25%, 3.4 year of payback period and return on investment is 2.14

Keywords: Lumen method, light gain calculation, flux transfer, ray tracing

1. บทนำ

การออกแบบระบบแสงสว่างที่ดีนับเป็นส่วนสำคัญต่อการประหยัดพลังงานเป็นอย่างยิ่ง โดยทั่วไปแล้วการใช้ไฟฟ้าจากระบบส่องสว่าง เช่นหลอดไฟฟ้าหรือหลอดฟลูออเรสเซนต์ จะมีค่าประมาณ 15-20% ของปริมาณการใช้ไฟฟ้ารวมของทั้งอาคาร (ที่มากระทรวงพลังงาน, 2556) อย่างไรก็ตามในการออกแบบระบบแสงสว่างในปัจจุบันนี้ โดยมากแล้วผู้ออกแบบได้คำนวณการติดตั้งระบบแสงสว่างโดยใช้วิธีการลูเมน ซึ่งเป็นการประมาณค่าความสว่างโดยคร่าวๆ ซึ่งจะทำให้ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้จริงสูงกว่าความจำเป็น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบแนวทางในการคำนวณแสงสว่าง ในรูปแบบต่างๆกัน ดังนี้คือ วิธีการทางลูเมน (Lumen Method) วิธีการฟลักซ์ทรานเฟอร์ (Flux Transfer Method) และวิธีการตามรอยแสง (Ray Tracing Method) โดยจะได้ทำการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียและข้อจำกัดของแต่ละวิธี [7], [8], [16] หลังจากนั้น จะทำการเปรียบเทียบระดับความแม่นยำของแต่ละวิธีโดยการเปรียบเทียบผลจากการวัดระดับแสงสว่างในสถานที่จริง เพื่อนำมาสรุปถึงระดับความแม่นยำ และเมื่อได้วิธีการที่แม่นยำที่สุดแล้ว ผู้วิจัยได้นำวิธีการนี้ไปทดลองใช้กับอาคารหอพัก 11 มหาวิทยาลัย มหิดล ศาลายา เพื่อหาความเป็นไปได้ในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบแสงสว่าง และ ประเมินอัตราการคืนทุนของระบบไฟฟ้าแสงสว่าง หากมีการติดตั้งระบบแสงสว่างใหม่

ในการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดวัตถุประสงค์ไว้สองข้อดังนี้คือ 1. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบรูปแบบการ

คำนวณแสงสว่าง โดยใช้วิธี Lumen Method, Flux Transfer, Ray Tracing เพื่อเลือกวิธีที่เหมาะสมที่สุดในการเลือกใช้ในแต่ละสถานการณ์ 2. เพื่อหาแนวทางในการประหยัดพลังงานแสงสว่าง โดยการจำลองสถานการณ์

ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่มีการเปรียบเทียบผลความแม่นยำของ 3 วิธีการคำนวณพร้อมกัน ในงานวิจัยนี้จึงได้นำทั้ง 3 วิธีการคำนวณมาเปรียบเทียบพร้อมกัน พร้อมทั้งคำนวณด้านการลงทุนและการประหยัดพลังงานด้วยเช่นกัน

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วิธีการทางลูเมน (Lumen Method)

เป็นวิธีการคำนวณหาปริมาณการส่องสว่างโดยวิธีการหาค่าปริมาณจำนวนเส้นแรงของแสงสว่าง [2,3,4] ด้วยการพิจารณาปริมาณแสงสว่างที่ออกจากแหล่งกำเนิดไปยังพื้นที่ใช้งาน จะสามารถคำนวณหาค่าความสว่างเฉลี่ยต่อพื้นที่ได้ดังสมการที่ (1)

$$E \cdot A = L \cdot CU \cdot LLD \cdot LDD \cdot RSDD \cdot LBO \quad (1)$$

เมื่อ

E = ปริมาณแห่งการส่องสว่าง (Lux)

L = ปริมาณจำนวนเส้นแรงของแสงสว่างทั้งหมดที่ต้องการ (Lumen)

A = พื้นที่ ที่ต้องการปริมาณแสงสว่าง (sq.m)

CU = ค่าสัมประสิทธิ์การใช้ประโยชน์

LLD = ค่าความเสื่อมสภาพของหลอดไฟฟ้า

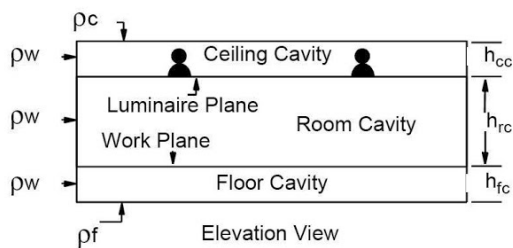
LDD = ค่าความเสื่อมสภาพจากความสกปรกของดวงโคมไฟฟ้า

RSDD = ค่าความเสื่อมสภาพจากพื้นผิวห้องสกปรก

LBO = ค่าตัวประกอบหลอดไฟฟ้าเสีย

ETM-84

วิธีการแบ่งส่วนของโพรง (Zone Cavity Ratio)



รูปที่ 1 แสดงการแบ่งสัดส่วนพื้นที่ของห้อง

$$\text{อัตราส่วนของโพรงเพดาน} = 5h_{cc} \cdot \left(\frac{W+L}{W \cdot L} \right) \quad (2)$$

$$\text{อัตราส่วนของโพรงห้อง} = 5h_{rc} \cdot \left(\frac{W+L}{W \cdot L} \right) \quad (3)$$

$$\text{อัตราส่วนของโพรงพื้น} = 5h_{fc} \cdot \left(\frac{W+L}{W \cdot L} \right) \quad (4)$$

เมื่อ

W = ความกว้างของห้อง

L = ความลึกของห้อง

ρcc = สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของเพดาน

ρw = สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของผนัง

ρf = สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้น

2.2 วิธีการฟลักซ์ทรานเฟอร์ (Flux Transfer)

เป็นวิธีการคำนวณแสงโดยใช้หลักการไล่ตามเส้นของแสงตั้งแต่แหล่งกำเนิดไปจนถึงจุดที่ตกกระทบและสะท้อนไปสู่จุดที่ได้รับความสว่าง [7,8,9] โดยการคำนวณวิธีนี้จะถูกประยุกต์ใช้กับความสว่างจากภายนอกอาคารเช่น ความสว่างจากท้องฟ้า โดยการคำนวณค่าต่างๆเหล่านี้จะขึ้นกับตัวแปรเวลา สถานที่ ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ และ สภาพของท้องฟ้า โดยมีสมการที่เกี่ยวข้องดังนี้

$$E_t = 9.87 \cdot \sin(2 \cdot \beta) - 7.53 \cdot \cos(\beta) - 1.5 \cdot \sin(\beta) \quad (5)$$

$$\beta = \frac{360}{365} \cdot (J_d - 81)$$

$$\text{solar time} = \frac{1}{60} \cdot (60 \cdot \text{Local standard time} - 4 \cdot (L_{st} - L_{oc}) + E_t) \quad (6)$$

$$\omega = 15 \cdot (t - 12) \quad (7)$$

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(\frac{360}{365} \cdot (284 + J_d)\right) \quad (8)$$

เมื่อ

Jd = Julian Date

Et = เวลาเทียบเท่า (Equation of Time)

ω = Hour Angle (degree)

t = Solar Time (hour)

δ = declination Angle (degree)

ในตำแหน่งของดวงอาทิตย์จะถูกกำหนดโดยมุมอัลติจูด (Solar Altitude Angle, α) และ มุมอะซิมูท (Solar Azimuth Angle, γ) ดังแสดงในสมการที่ (10), (11) ตามลำดับ

$$\alpha = \sin^{-1}(\sin(\phi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega)) \quad (10)$$

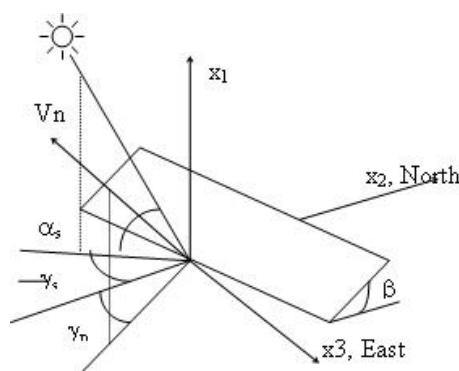
$$\gamma_s = \sin^{-1}\left(\frac{\sin(\omega) \cdot \cos(\delta)}{\cos(\alpha)}\right) \quad (11)$$

การคำนวณหามุมตกกระทบของแสงสว่างจากภายนอกกับผนังหรือ พื้นที่ได้รับแสงสามารถคำนวณหาค่ามุมตกกระทบ (θ) ได้จากสมการดังนี้

$$\text{Solar Vector}(V_s) = \begin{bmatrix} \sin(\alpha) \\ -\cos(\alpha) \cdot \sin(\gamma_s) \\ -\cos(\alpha) \cdot \cos(\gamma_s) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\text{Plane Vector}(V_p) = \begin{bmatrix} \cos(\beta) \\ -\sin(\beta) \cdot \sin(\gamma_p) \\ -\sin(\beta) \cdot \cos(\gamma_p) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\text{Incident Angle}(\theta) = \cos^{-1}[\vec{V}_s \cdot \vec{V}_p] \quad \text{Eq.(11)}$$

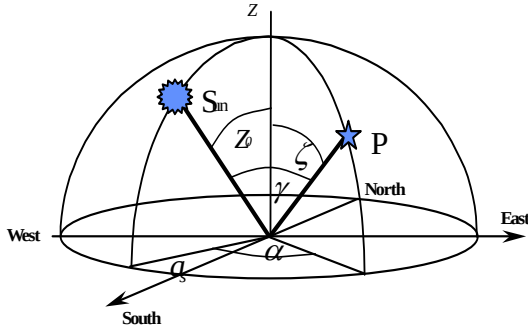


รูปที่ 2 แสดงทิศทางและมุมการรับแสงของผนังอาคาร

ในการคำนวณหาความสว่างจากภายนอกอาคาร จำเป็นต้องทราบระดับความสว่างของท้องฟ้า โดยได้

ETM-84

ทำการพิจารณาท้องฟ้าเป็น Sky dome ซึ่งได้กำหนดจุด P แทนจุดที่มีการคำนวณความสว่าง โดยที่จุด P ทำมุม ζ กับแกน Z และมีมุมตกกระทบที่ทำระหว่างดวงอาทิตย์เท่ากับ γ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดง Sky dome และมุมที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณ

การคำนวณความสว่างของผนังในแนวระดับที่ได้รับ ความสว่างจากตำแหน่งต่างๆของท้องฟ้าสามารถอธิบายได้จากสมการที่ (14)

$$dE_{kh} = L_{\zeta, \alpha} \cos \zeta d\omega = L_{\zeta, \alpha} \cos \zeta \sin \zeta d\zeta d\gamma_s \quad (14)$$

เมื่อ

E_{kh} = ความสว่างตรงจากท้องฟ้าที่กระทบผนังอาคารในแนวระดับ (kLux)

$d\omega$ = ความแตกต่างของมุมของแต่ละจุดพิกัดที่พิจารณาบน sky dome

แตกต่างดังนั้นความสว่างที่ปรากฏต่อผนังที่ตั้งฉากจะอยู่ในรูปของสมการที่ (15)

$$E_{kh} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L_{\zeta, \gamma_s} \sin \zeta \cos \zeta d\zeta d\gamma_s \quad (15)$$

เมื่อ

L_z = zenith luminance (kcd/m²)

ความสว่างของปัจจัยภายนอก เช่นแสงสะท้อนจากพื้นหรือวัตถุที่สะท้อนแสงเข้าสู่อาคารเป็นอีกปัจจัยที่สำคัญที่ต้องนำมาคำนวณประกอบกับแสงตรงจากท้องฟ้า สมการที่ใช้ในการคำนวณดังแสดงในสมการที่ (16), (17)

$$L_g = \frac{E_g \times \rho}{\pi} \quad (16)$$

เมื่อ

E_g = ความสว่างบนพื้น ที่วัดได้ (kLux)

ρ_g = ความสัมประสิทธิภาพสะท้อนแสงบนพื้น

L_g = Ground Luminance (cd/m²)

$$L_k = \frac{E_k \cdot \rho_k}{\pi} \quad (17)$$

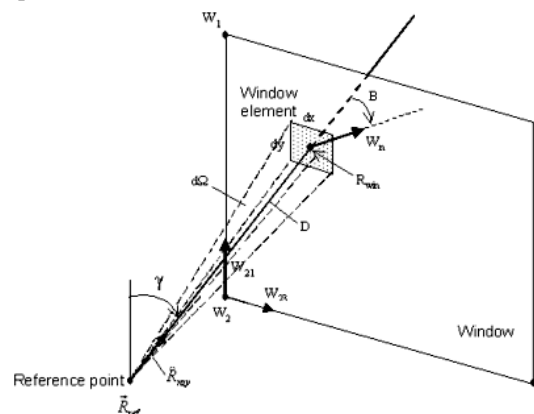
เมื่อ

E_k = ความสว่างบนพื้นผิวภายนอก (kLux)

ρ_k = ความสัมประสิทธิภาพสะท้อนแสงบนพื้นผิวภายนอก

L_k = Surface Luminance (cd/m²)

การคำนวณหาความสว่างจากภายในอาคาร ความสว่างภายในอาคารเกิดจากปัจจัยดังนี้คือ ความสว่างจากแสงตรงจากภายนอก (Direct Illuminance) และ ความสว่างจากการสะท้อนภายใน (Indirect Illuminance) โดยการคำนวณความสว่างจากแสงตรง (Direct Illuminance) จะใช้วิธีการแบ่งพื้นที่รับแสงออกเป็นช่องๆและรวมความสว่างจากพื้นที่รับแสงเข้าสู่จุดตกกระทบ(จุดที่พิจารณาความสว่าง)เข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงวิธีการแบ่งพื้นที่ของพื้นที่รับแสงเพื่อนำมาหาค่าความสว่างจากแสงตรงจากท้องฟ้า ความสว่างในแนวระนาบสามารถอธิบายได้จากสมการที่ (18) และ ความสว่างในแนวระดับสามารถอธิบายได้จากสมการที่ (19)

$$E_h = \iint TR \cdot L_{\zeta, \alpha} \cdot \sin \zeta \cdot \cos \zeta \cdot d\zeta d\theta \quad (18)$$

ETM-84

$$E_v = \iint TR \cdot L_{\zeta, \alpha} \cdot \cos \xi \cdot \cos \zeta \cdot d\zeta d\theta \quad (19)$$

เมื่อ

E_h = ความสว่างในแนวระนาบ (Lux)

E_v = ความสว่างในแนวระดับ (Lux)

TR = ความสามารถในการส่องผ่านของแสงผ่านกระจกตั้งแสดงในสมการที่ (20)

$$TR = 1.018 \cos \psi (1 + \sin^3 \psi) \quad (20)$$

Ψ = มุมตกกระทบ (rad)

ξ = มุมตกกระทบระหว่างทิศทางของแสงกับแนวตั้งฉากของพื้นที่รับแสงแนวระดับ

$$\xi = \cos^{-1}(\sin \zeta \cdot \sin \theta \cdot \sin(a_e) + \sin \zeta \cos \theta \cos(a_e)) \quad (21)$$

a_e = Azimuth angle of vertical plane

ความสว่างจากการสะท้อนแสงภายในเป็นอีกปัจจัยที่มีผลต่อความสว่างรวมของจุดที่พิจารณา ในการคำนวณหาจำเป็นต้องหา Light flux ที่ออกจากพื้นที่ตกกระทบไปยังพื้นที่ ที่แสงส่องไปถึงโดยเราสามารถนิยามอัตราส่วนการมองเห็นของแสงได้โดยวิธี Form factor ดังแสดงในสมการที่ (22)

$$F_{1-2} = \frac{1}{\pi A_1} \iint \left(\frac{\cos \theta \cos \xi}{D^2} \right) dA_1 dA_2 \quad (22)$$

เมื่อ

F_{1-2} =form factor from surface 1 to surface2,

A_1 = area of diffuse light source

A_2 = area of diffuse receiving surface

จากสมการ Form Factor ในการหาค่าการสะท้อนแสงระหว่างกันด้วยสมการ Flux Transfer จะถูกเขียนในที่ละชั้นที่ได้แตกย่อย โดยใช้หลักการฟลักซ์ของแสงที่วิ่งออกจากจุดตกกระทบจะต้องเท่ากับฟลักซ์ ของแสงที่ได้รับของจุดรับแสง [8,9], ดังแสดงในสมการที่ (23)

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{01} \\ E_{02} \\ \vdots \\ E_{0m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \rho_1 F_{1 \rightarrow 1} & \rho_1 F_{1 \rightarrow 2} & \cdots & \rho_{m-1} F_{1 \rightarrow m-1} & \rho_m F_{1 \rightarrow m} \\ \rho_2 F_{2 \rightarrow 1} & \rho_2 F_{2 \rightarrow 2} & \cdots & \rho_{m-1} F_{2 \rightarrow m-1} & \rho_m F_{2 \rightarrow m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \rho_m F_{m \rightarrow 1} & \rho_m F_{m \rightarrow 2} & \cdots & \rho_{m-1} F_{m \rightarrow m-1} & \rho_m F_{m \rightarrow m} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_m \end{bmatrix} \quad (23)$$

เมื่อ

E_i = ความสว่าง ณ ตำแหน่งใดๆ

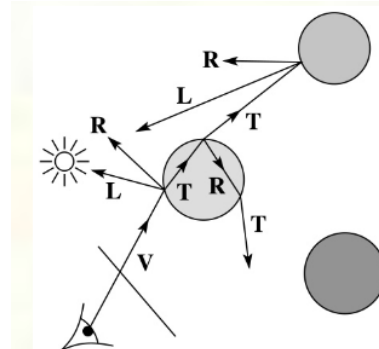
E_{0i} =ความสว่างจากแสงตรง(Direct Light Illuminance)

ρ = สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

$F_{m \rightarrow n}$ = Form Factor of Surface m to n

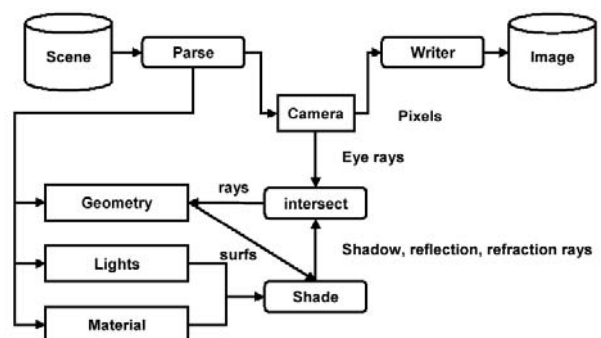
2.3 วิธีการตามรอยแสง(Ray Tracing Method)

เป็นกระบวนการทางคอมพิวเตอร์กราฟฟิกใช้หลักการของการคำนวณโดยอาศัยหลักไล่ตามรอยทางเดินของแสงที่มาจากแหล่งกำเนิดแสงมาตกกระทบที่วัตถุแล้วสะท้อนเข้าตาหรือกล้อง โดยไล่ตรวจสอบย้อนรอยแสง ไปดูค่าความสว่างของวัตถุที่จะแสดงในแต่ละจุดภาพบนอุปกรณ์แสดงผล [10,11,13,14] ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงหลักการเทคนิคการย้อนรอยแสง(Ray Tracing Technique) ใน Computer Graphic หลักการของการคำนวณการย้อนรอยแสงสามารถอธิบายเป็นกระบวนการทางสถาปัตยกรรมได้ดังในรูปที่ 6

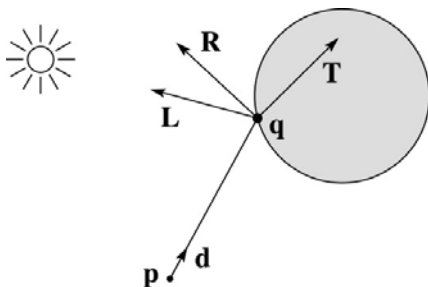
Ray Tracing Architecture



รูปที่ 6 สถาปัตยกรรมกระบวนการย้อนรอยแสง (Ray Tracing Architecture)

ETM-84

หลักการการย้อนรอยแสงของ Whitted [1] (Whitted's Ray Tracing Algorithm) ใช้หลักการการตามเส้นแสงจากตา รวมกับเส้นแสงจากต้นกำเนิดเข้าด้วยกัน และทำการวนหาเส้นแสงไปเรื่อยๆ โดยการให้แต่ละ Pixel วิ่งตามเส้นแสงพื้นฐานในทิศทาง V (ดูรูปที่ 5) ซึ่งเป็นตำแหน่งใกล้สายตาที่สุดและเป็นวัตถุแรกที่สายตาจะมองเห็น และจากนั้นในทุกจุดตัด จะต้องตามเส้นแสงถัดไป ซึ่งประกอบด้วย 1. เส้นของเงา(Shadow rays) ในทิศทาง L ไปสู่แหล่งกำเนิดแสง ดังแสดงในรูปที่ 7 2. เส้นแสงสะท้อน(Reflected ray) ในทิศทาง R และ 3. เส้นแสงส่องผ่าน (Transmitted ray) ในทิศทาง T



รูปที่ 7 แสดงการเกิดเงา (Shading) จากเส้นของแสง เส้นแสงที่มีกำเนิดจากจุด P มีทิศทางหนึ่งหน่วย d และถูกแทนด้วยตัวแปร t กำหนดให้ $I(P,d)$ เป็นความเข้มแสงที่มองเห็นได้ตลอดเส้นแสง สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (24) และ (25) [1, 5]

$$I(P, d) = I_{\text{direct}} + I_{\text{reflected}} + I_{\text{transmitted}} \quad (24)$$

เมื่อ

$$I(P,d) = k_a i_a + \sum_{m \in \text{lights}} (k_d (\hat{L}_m \cdot \hat{N}) i_{m,d} + k_s (\hat{R}_m \cdot \hat{V}) \cdot \alpha \cdot i_{m,s}) \quad (25)$$

I_s, I_d = ความเข้มแสงของแหล่งกำเนิด

i_a = ความเข้มแสงของสิ่งแวดล้อม

k_s = ค่าคงที่การสะท้อนแสงตรง

k_d = ค่าคงที่การสะท้อนแสงกระเจิง

k_a = ค่าคงที่การสะท้อนแสงจากสิ่งแวดล้อม

α = Shininess Constant ของแต่ละวัสดุ

L_m = ทิศทางของจุดบนพื้นผิวสู่แหล่งกำเนิดแสง

N = เส้นตั้งฉากบนพื้นผิว

R_m = ทิศทางที่แสงสะท้อนได้อย่างสมบูรณ์แบบ

V_m = ทิศทางที่ผู้ผู้สังเกต

โดยที่ค่า R_m สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (26)

$$\hat{R}_m = 2(\hat{L}_m \cdot \hat{N})\hat{N} - \hat{L}_m \quad (26)$$

ซึ่งสามารถเขียน เป็น pseudocode ได้ดังนี้ [14]

FOR all pixels P0 DO

1. calculate viewing ray from the eye through P0
intersect ray with all objects and choose closest intersection P

2. FOR all light sources L DO

intersect shadow ray P -> L with all objects

IF no intersection between P and L THEN
shading += influence of L

3. IF P is on a reflective surface

THEN trace secondary ray; shading +=
influence of reflection

4. IF P is on a transparent surface

THEN trace secondary ray; shading +=
influence of transparency

2.4 การยืนยันผล

การยืนยันผลใช้หลักการทางสถิติในการหาค่าความเชื่อมั่นของข้อมูลโดยการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่คำนวณได้และค่าที่วัดได้จริง [15] โดยเริ่มจากการหาค่าความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ (27)

$$r_{xy} = \frac{N \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{(N \sum X^2 - (\sum X)^2)(N \sum Y^2 - (\sum Y)^2)}} \quad (27)$$

จากนั้นทำการหาค่า Correlation coefficient (R^2) เพื่อทดสอบหาความเชื่อมั่นของผลการคำนวณอีกหน

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Pornnimitra (1997) [8] ได้ทำการศึกษาปริมาณความเข้มแสงโดยใช้วิธีควบคุมปริมาณแสงในห้องโดยติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมแสงแบบ automatic on/off switch และ แบบ automatic continuous linear dimming และทำการทดลองวัดพลังงานที่ใช้โดยการเปรียบเทียบกับค่าคำนวณโดยวิธี Lumen method และ วิธี ray tracing method พบว่าอุปกรณ์ควบคุมแสงแบบ automatic continuous linear dimming ประหยัดพลังงานกว่า automatic on/off และ วิธีการคำนวณแบบ ray tracing ให้ผลได้แม่นยำกว่า lumen method มากซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ

ETM-84

Sriyanyong (2002) [9] ศึกษาเปรียบเทียบวิธีคำนวณแบบ Flux transfer และ Ray tracing โดยทำการคำนวณปริมาณแสงที่โรงพยาบาล ตาหูกองมุกด้วยโปรแกรม flux transfer และ radiance เปรียบเทียบกับผลการวัดจริงพบว่าวิธี ray tracing มีความแม่นยำสูงกว่า

Chaiwiwataorakul (1998) [7] ได้ทำการศึกษาการเปรียบเทียบการวัดความสว่างระหว่างวิธี Lumen method และ Flux transfer โดยการนำผลการวัดความสว่างจริงภายในห้องขนาด 6x4 เปรียบเทียบกับผลการคำนวณพบว่า วิธี Flux Transfer มีความแม่นยำสูงกว่าวิธี Lumen 25%

3. วิธีการและการติดตั้งการทดลอง

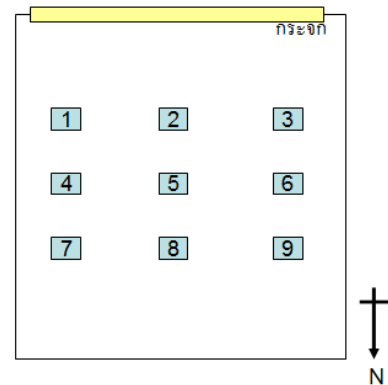
การทดลองเบื้องต้นเพื่อเปรียบเทียบการวัดข้อมูลจริงกับการคำนวณด้วยวิธี Lumen Method Flux Transfer Method และ Ray Tracing Method ในห้องเรียน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ศาลายา ขนาดกว้าง x ยาว x สูงของห้องเท่ากับ 24x10.25x5.8 เมตรตามลำดับ มีกระจกอยู่ทางทิศใต้ อยู่สูงจากพื้น 90 cm กระจกสูง 1 เมตร กว้าง 3.95 เมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้น 0.33 สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของผนัง 0.3 สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของเพดาน 0.77 ตามลำดับ ดังแสดงรูปห้องเรียนปฏิบัติการในรูปที่ 8



รูปที่ 8 แสดงห้องเรียน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหิดล ศาลายา

ผู้วิจัยได้ทำการวัดแสงที่ความสว่างที่ 30% , 50% และ 70 % ของความลึกของห้อง ในสองสถานการณ์ คือ กลางวัน และ กลางคืน เก็บข้อมูลโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแสง (Lux Meter) โดยเก็บข้อมูลทุกๆ 15

นาที่ ต่อเนื่องเป็นเวลา 3 วันต่อ 1 สถานการณ์ อุปกรณ์วัดแสงสว่างได้ถูกติดตั้งในตำแหน่งดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 แสดงรูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์วัดแสงสว่างในห้องทดลอง

3. ผลการทดลอง

การเปรียบเทียบระดับความเชื่อมั่นของการทดลองวัดค่าความสว่างจริง กับการคำนวณโดยวิธี Lumen Method, Flux Transfer และ Ray Tracing แยกตามจุดที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดแสงสว่าง สามารถแสดงได้ดังในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงผลการเปรียบเทียบความแม่นยำของวิธีการคำนวณในรูปแบบต่างๆ

ตำแหน่ง Lux Meter	ค่า R^2 Lumen Method	ค่า R^2 Flux Transfer Method	ค่า R^2 Ray Tracing Method
ตำแหน่ง 1	0.61	0.85	0.95
ตำแหน่ง 2	0.59	0.67	0.83
ตำแหน่ง 3	0.43	0.48	0.89
ตำแหน่ง 4	0.62	0.81	0.92
ตำแหน่ง 5	0.62	0.67	0.74
ตำแหน่ง 6	0.51	0.76	0.77
ตำแหน่ง 7	0.71	0.79	0.89
ตำแหน่ง 8	0.60	0.68	0.79
ตำแหน่ง 9	0.51	0.57	0.77

จากผลการเปรียบเทียบ พบว่าวิธีที่มีความแม่นยำในการทำนายผลความสว่างในตำแหน่งที่วัดค่าสูงสุด คือวิธีการ Ray Tracing (84%) และ Flux Transfer

ETM-84

(69%) และ Lumen Method (57%) ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า วิธี Ray Tracing ให้ผลที่มีความแม่นยำสูงที่สุด

จากนั้นผู้วิจัยได้ใช้วิธีการ Ray Tracing (โดยใช้โปรแกรม Desktop Radiance V.1) เป็นเครื่องมือสำหรับการทดสอบหาศักยภาพในการประหยัด

พลังงานจากระบบแสงสว่าง ของอาคารหอพักที่ 11 ในมหาวิทยาลัยมหิดลวิทยาเขตศาลายา โดยได้ทำการจำลองรูปและตำแหน่งต่างๆ ภายในห้องพัก รวมถึงตำแหน่งของกระจกหน้าต่างและตำแหน่งที่ตั้งของหลอดไฟภายในห้องที่มีอยู่จริง โดยทำการปรับเปลี่ยนหลอดไฟในส่วนที่มีการใช้งานบ่อย และที่สามารถปรับเปลี่ยนได้โดยมีระยะเวลาคืนทุนไม่เกิน 5 ปี และสามารถคงความสว่างได้ไม่น้อยกว่าเดิม ในปัจจุบันหอพัก 11 ในแต่ละห้องมีหลอดตะเกียบห้องละ 4 หลอด กินไฟหลอดละ 26 วัตต์ รวมแล้ว 104 วัตต์ ต่อห้องมีความสว่างเฉลี่ย 100 lux และเมื่อทำการจำลองสถานการณ์โดยใช้ Ray Tracing แล้วพบว่า หากทำการเปลี่ยนหลอดไปเป็นหลอด 36 วัตต์จำนวน 2 หลอดต่อห้อง จะสามารถได้ค่าความสว่างเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 160 lux

ในอาคารหอพัก 11 มี 14 ชั้น ชั้นละ 24 ห้อง รวมห้องพักทั้งสิ้น 336 ห้อง ดังนั้นหากทำการรวมจำนวนหลอดไฟในห้องพัก ณ ปัจจุบันทั้งหมด 1,344 หลอด (หลอดละ 26 วัตต์) และ เมื่อทำการเปลี่ยนหลอดไฟฟ้าในห้องให้เป็นหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 36 วัตต์พร้อมรางและ อิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์ จะสามารถลดจำนวนหลอดไฟฟ้างได้ห้องละ 2 หลอด ลดจำนวนกำลังไฟฟ้าได้ 32 วัตต์ ต่อห้อง คิดเป็นค่าไฟฟ้าที่สามารถประหยัดได้ทั้งสิ้น 84,612 บาทต่อปี (คิดที่ค่าไฟฟ้า 2.7 บาท/หน่วย) โดยมีเงินลงทุนคือค่าอุปกรณ์และค่าติดตั้ง 270,144 บาท (คิดราคาอุปกรณ์บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ยี่ห้อซิลวาเนีย 335 บาท และค่าติดตั้งต่อหลอดคิดเป็นเงิน 20% ของค่าอุปกรณ์) จะพบว่ามีอัตราการคืนทุน (Internal Rate of Return) เท่ากับ 24.25% มีระยะเวลาคืนทุน 3.4 ปี และ มี

อัตราส่วนผลตอบแทนต่อการลงทุนของโครงการเท่ากับ 2.14

ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์แล้วพบว่า โครงการนี้มีความสมควรต่อการลงทุนในการเปลี่ยนระบบแสงสว่างภายในอาคาร

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการคำนวณเปรียบเทียบรูปแบบการคำนวณแสงพบว่าวิธีที่ให้ผลได้แม่นยำที่สุดคือวิธี Ray Tracing Method แต่อย่างไรก็ดีในแต่ละดีทุกวิธีล้วนมีจุดเด่นและจุดด้อยในตัวของมันเองดังสรุปได้ในตารางที่ 2 ดังนี้

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบจุดเด่นและจุดด้อยของวิธีการคำนวณแสงในแต่ละวิธี

วิธีการคำนวณ	จุดเด่น	จุดด้อย
Lumen Method	การคำนวณง่าย รวดเร็ว สามารถประยุกต์ใช้สำหรับการประเมินเพื่อหาจำนวนหลอดไฟฟ้าในอาคารได้	ค่าความสว่างที่คำนวณได้จะมีแค่ค่าเดียวเหมือนกันทั้งห้อง ไม่สามารถระบุตำแหน่งได้ และผนังทุกผนังในห้องต้องไม่บดบังกันเอง
Flux Transfer Method	มีความแม่นยำสูงกว่าวิธี Lumen และสามารถระบุค่าความสว่างในแต่ละตำแหน่งได้	การคำนวณซับซ้อน ต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณ และจำเป็นต้องมีโมเดลห้องฟ้าที่มีความถูกต้องสูง
Ray Tracing Method	มีความแม่นยำสูงที่สุด สามารถทำการคำนวณแสงได้ทั้ง	เป็นกระบวนการ Computer Graphic ซึ่งไม่สามารถคำนวณ

ETM-84

	จากหลอดไฟฟ้า และ แสง จากภายนอกทั้งแสงตรง และแสงสะท้อน	ได้ ด้วย มี ือ จำเป็นต้อง ใช้ โปรแกรมช่วย เท่านั้น ต้อง มี การ เรียนรู้วิธีการ ใช้ และการติดตั้ง ค่าในโปรแกรม มากพอสมควร ถึง สามารถ เริ่มต้นคำนวณ ได้
--	---	---

นอกจากนั้น หากทำการพิจารณาผลการวิเคราะห์ทาง เศรษฐศาสตร์เพื่อใช้ในการตัดสินใจลงทุนแล้วพบว่า

1. เกณฑ์ด้านระยะเวลา 3.4 ปี ซึ่งน้อยกว่า ระยะเวลาอายุของอุปกรณ์ที่ประเมินไว้ 5 ปี
2. เกณฑ์อัตราผลตอบแทนจากการลงทุน 24.25% ซึ่งมากกว่าอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ 7%
3. อัตราผลตอบแทนต่อต้นทุน ของโครงการ 2.14 ซึ่งมีค่ามากกว่า 1

ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์แล้วพบว่า โครงการนี้สมควรแก่การลงทุนในการเปลี่ยนหลอด ไฟฟ้า

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Whitted T.(1980). An improved illumination model for shaded display, Proceedings of the 6th annual conference on computer graphics and interactive techniques.
- [2] ศิธี บรรจงจิตร (2541). วิศวกรรมแสงสว่าง, สำนักพิมพ์ซีเอ็ดยูเคชั่น
- [3] ไชยะ แซ่มซ้อย (2544). พื้นฐานวิศวกรรมแสงสว่าง, สำนักพิมพ์เอ็มแอนดี้ดี
- [4] ชาญศักดิ์ อภัยนิพัฒน์ (2545). เทคนิคการออกแบบระบบแสงสว่าง, สำนักพิมพ์ ส.ท.ส.
- [5] Andrew S. Glassner (1989), An Overview of Ray Tracing in An Introduction to Ray Tracing, Andrew Glassner, ed., Academic Press Limited,

[6] P. Sathiraporn (1997), A case study of light integration assisted by radiance program., AIT Thesis.

[7] Chaiwiwatworakul P.(1998), Development of a method for calculation of daylight through windows, AIT Thesis

[8] Charman, A.J. (1989), Heat Transfer, New York, Wiley

[9] W.F.Stoecker (1989). Design of thermal system, 3rd edition, McGraw Hill.

[10] Radiance Main Site: Desktop radiance for windows open source (2012).,

URL: <http://radsite.lbl.gov/radiance/HOME.html>, access on 06/06/2014.

[11] ACM SIGGRAPH (2014). Resources of Ray Tracing Education , URL:

<http://www.siggraph.org/education/materials/HyperGraph/raytrace/rtrace0.htm>,access on 06/06/2014.

[12] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน (2014). ข้อมูลการใช้พลังงานภาคครัวเรือน, URL: <http://www.dede.go.th/> เข้าล่าสุด 06/06/2557.

[13] Ray Tracing (Graphics) , URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/Ray_tracing_\(graphics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Ray_tracing_(graphics)) ,access on 06/06/2014.

[14] Ray Tracing Lecture Note, University of Texas at Austin , Computer Graphics , URL: http://www.cs.utexas.edu/~fussell/courses/cs384g/lectures/lecture09-Ray_tracing.pdf ,access on 05/06/2014.

[15] Jay L. Devore (2004), Probability and Statistics for engineering and the sciences, Thomson Brooks/Cole

[16] Sriyayong P. (2002), A study of daylight from overhead aperture using radiance program and direct light flux calculation, AIT Thesis