

แบบจำลองประสิทธิภาพแสงสว่างรวมบนระนาบในแนวตั้งในสภาพท้องฟ้าทั่วไป

Global luminous efficacy models on vertical surfaces for general sky

รุ่งรัตน์ วัตตาล (Rungrat Wattan)^{*}

สมเจตน์ ภัทรพานิชชัย (Somjet Pattharapanithchai)^{**}

เสริม จันทร์ฉาย (Serm Janjai)^{***}

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองประสิทธิภาพแสงสว่างรวมบนระนาบในแนวตั้งในสภาพท้องฟ้าทั่วไปรายชั่วโมง ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพแสงสว่างรวมบนระนาบในแนวตั้ง กับค่าโคไซน์ของมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ ปริมาณโอโซน ค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ และดัชนีเมฆ โดยข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองดังกล่าวได้จากสถานีอุบลราชธานี (15.25 °N, 104.87 °E) และนครปฐม (13.82 °N, 100.04 °E) ในปี ค.ศ. 2013-2014 จากนั้นทำการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากสถานีวัดดังกล่าวในปี ค.ศ. 2015 ผลที่ได้พบว่าค่าแสงสว่างรวมบนระนาบในแนวตั้งที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองมีความสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการวัดค่อนข้างดี โดยมีความแตกต่างในรูปของรากที่สองของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสอง เท่ากับ 13.79% สำหรับสถานีอุบลราชธานี และ 15.46% สำหรับสถานีนครปฐม

คำสำคัญ : ประสิทธิภาพแสงสว่างรวม; แบบจำลอง; ระนาบในแนวตั้ง

^{*} ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

Assistant Professor Dr., Department of Physics, Faculty of Science, Silpakorn University,
rungrat.wattan@gmail.com, 034-270761

^{**} ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

Assistant Professor Dr., Department of Physics, Faculty of Science, Silpakorn University,
pan30826@gmail.com, 034-270761

^{***} ศาสตราจารย์ ดร. ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

Professor Dr., Department of Physics, Faculty of Science, Silpakorn University, serm.janjai@gmail.com,
034-270761

Abstract

This article presents the global luminous efficacy of solar radiation incident on vertical surfaces (North, South, East and West) for general sky condition. The models relate global luminous efficacy of solar radiation on vertical surfaces with cosine of solar zenith angle, total ozone column, aerosol optical depth, precipitable water and cloud index. Data used for formulating the model was obtained from solar monitoring station located at Ubon Ratchathani (15.25°N , 104.87°E) and Nakhon Pathom (13.82°N , 100.04°E) for the period of 2013-2014. To investigate the model performance, the model was used to calculate global illuminance on vertical surfaces at the stations for the year 2015. It was found that the values of global illuminance on vertical surfaces calculated from the models and those obtained from measurements were in reasonable agreement with the root mean square difference (RMSD) of 13.79% for Ubon Ratchathani and 15.46% for Nakhon Pathom.

Keywords: global luminous efficacy; models; vertical surfaces

บทนำ

แสงสว่างเป็นสิ่งจำเป็นในการดำรงชีวิตของมนุษย์ ระบบแสงที่ดีจะทำให้การดำเนินกิจกรรมต่างๆ เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ การใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อให้แสงสว่างในประเทศไทยมีปริมาณค่อนข้างสูง ทั้งในอาคาร สำนักงาน ห้างสรรพสินค้า โรงแรม โรงงานอุตสาหกรรม และที่อยู่อาศัย และยังมีแนวโน้มการใช้เพิ่มมากขึ้นตาม การขยายตัวทางเศรษฐกิจและชุมชนของประเทศไทย วิธีการที่จะช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อให้แสงสว่างคือ การนำแสงสว่างธรรมชาติจากดวงอาทิตย์เข้ามาใช้ร่วมกับการออกแบบระบบแสงสว่างภายในอาคาร ซึ่งจะทำให้ เสียค่าใช้จ่ายในการใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อให้แสงสว่างน้อยลง

โดยทั่วไปรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบถึงพื้นผิวโลกที่สายตามนุษย์สามารถตอบสนองได้จะอยู่ในช่วง ความยาวคลื่น 0.38-0.77 ไมครอน โดยจะเรียกว่าแสงสว่างธรรมชาติ (daylight) ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ แสงตรงหรือแสงที่พุ่งตรงมาจากดวงอาทิตย์ (sunlight) และแสงกระจายจากท้องฟ้าหรือแสงที่กระเจิงจาก องค์ประกอบต่างๆ ของบรรยากาศ ซึ่งมาจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้า (skylight) เมื่อรวมแสงตรงและแสงกระจาย จะเรียกว่า แสงรวม ในการนำแสงสว่างธรรมชาติมาใช้ในอาคาร จำเป็นต้องทราบข้อมูลแสงสว่าง โดยได้มีการ พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับคำนวณแสงสว่างที่เข้าไปภายในอาคารโดยอาศัยข้อมูลแสงตรงจากดวงอาทิตย์ และแสงกระจายจากท้องฟ้านอกอาคาร ข้อมูลความเข้มแสงสว่างภายในอาคารที่คำนวณได้จะช่วยให้สามารถ คำนวณ และกำหนดการใช้แสงประดิษฐ์ร่วมกับการใช้แสงสว่างธรรมชาติที่เหมาะสมเพื่อลดการใช้ไฟฟ้าสำหรับให้ แสงสว่าง แต่ข้อมูลจากการวัดความเข้มแสงสว่างมักมีจำนวนจำกัด ในการแก้ปัญหาดังกล่าว วิธีการหนึ่งคือ ใช้วิธี คำนวณแสงสว่างจากความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ (solar radiation) ซึ่งมีข้อมูลจากแหล่งต่างๆ อยู่มากกว่าข้อมูลแสง สว่าง ในการคำนวณแสงสว่างดังกล่าว จะต้องใช้แบบจำลองประสิทธิภาพแสง (luminous efficacy model) ดังนั้นในช่วงเวลา 15 ปี ที่ผ่านมานักวิจัยในประเทศต่างๆ จึงได้ทำการพัฒนาแบบจำลองประสิทธิภาพแสง

[Pleijel, 1954; Littlefair, 1988; Perez et al., 1990; Muneer and Kinghorn, 1998; Soler and Robledo, 2000; De Rosa et al., 2008a; De Rosa et al., 2008b; Cucumo et al., 2009; Mayhoub and Carter, 2011; Kong and Kim, 2013] แต่แบบจำลองดังกล่าว ส่วนใหญ่สร้างจากข้อมูลในยุโรปและอเมริกา ซึ่งภูมิอากาศและทางเดินปรากฏของดวงอาทิตย์แตกต่างจากประเทศไทย จึงไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้งานในประเทศไทย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเสนอที่จะพัฒนาแบบจำลองประสิทธิภาพแสงสว่างรวมในสภาพท้องฟ้าทั่วไปสำหรับคำนวณแสงสว่างรวมบนระนาบในแนวตั้งขึ้น

เครื่องมือวัดและข้อมูล

ผู้วิจัยได้ทำการวัดปริมาณความเข้มแสงสว่างธรรมชาติบนระนาบในแนวตั้งรายชั่วโมงจากเครื่องวัดลักซ์มิเตอร์ซึ่งผลิตโดยบริษัท EKO (model: ML-020S-O) และความเข้มรังสีรวมบนระนาบในแนวตั้งจากเครื่องไพราโนมิเตอร์ (pyranometer) ซึ่งผลิตโดยบริษัท Kipp&Zonen (model: CMP6) โดยวางบนระนาบในแนวตั้งซึ่งหันหน้าไปทางทิศเหนือ ได้ ตะวันออก และตะวันตก อุปกรณ์ดังกล่าวจะมีแผ่นโลหะสีดำวางอยู่ใต้ลักซ์มิเตอร์และไพราโนมิเตอร์แต่ละตัว เพื่อป้องกันรังสีที่สะท้อนจากพื้นดิน ทำให้รังสีกระจายที่วัดมีแหล่งกำเนิดจากท้องฟ้าเท่านั้น เครื่องมือนี้ติดตั้งไว้ที่ 2 แห่ง ได้แก่ ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี (15.25 °N, 104.87 °E) และที่คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม (13.82 °N, 100.04 °E) ดังรูปที่ 1-2

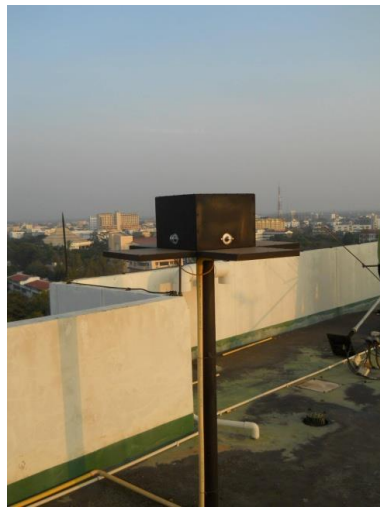


(ก) ไพราโนมิเตอร์



(ข) ลักซ์มิเตอร์

รูปที่ 1 อุปกรณ์ที่สถานีอุบลราชธานีซึ่งประกอบด้วย (ก) เครื่องวัดความเข้มรังสีรวมบนระนาบในแนวตั้ง 4 ทิศ
(ข) เครื่องวัดแสงสว่างรวมบนระนาบในแนวตั้ง 4 ทิศ



(ก) ไพราโนมิเตอร์



(ข) ลักซ์มิเตอร์

รูปที่ 2 อุปกรณ์ที่สถานีครปฐมซึ่งประกอบด้วย (ก) เครื่องวัดความเข้มรังสีรวมบนระนาบในแนวตั้ง 4 ทิศ
(ข) เครื่องวัดแสงสว่างรวมบนระนาบในแนวตั้ง 4 ทิศ

หัววัดลักซ์มิเตอร์และหัววัดไพราโนมิเตอร์จะให้สัญญาณออกมาในรูปของศักย์ไฟฟ้าและถูกบันทึกด้วยเครื่องบันทึกข้อมูลแบบดิจิตอลรุ่น DX2000 ที่ผลิตโดยบริษัท Yokogawa ประเทศญี่ปุ่น โดยบันทึกข้อมูลเป็นรายวินาที ผู้วิจัยทำการแปลงข้อมูลศักย์ไฟฟ้าที่ได้โดยการหารด้วยค่า Sensitivity ของหัววัด เพื่อให้ได้ค่าความเข้มแสงสว่างรวมและรังสีรวมจากดวงอาทิตย์บนระนาบในแนวตั้งแล้วเฉลี่ยข้อมูลเป็นรายนาทิจากนั้นทำการเฉลี่ยข้อมูลรายนาทีย่อยเป็นรายชั่วโมงเพื่อนำมาวิเคราะห์ ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยนี้เริ่มตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม ค.ศ. 2013 จนถึงเดือน ธันวาคม ค.ศ. 2015 รวมทั้งหมด 3 ปี โดยนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลอง 2 ปี (มกราคม 2013- ธันวาคม 2014) และทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง 1 ปี (มกราคม-ธันวาคม 2015) และเพื่อหลีกเลี่ยงค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าตอบสนองแบบโคไซน์ของหัววัด ผู้วิจัยจะใช้ข้อมูลรายชั่วโมงตั้งแต่วันที่ 8.30 – 16.30 น.

ในการพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณความเข้มแสงสว่างสามารถหาได้จากประสิทธิภาพแสงสว่าง (luminous efficacy, K) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของปริมาณแสงสว่างที่สายตามนุษย์สามารถตอบสนองได้ (E) ต่อรังสีดวงอาทิตย์เฉพาะขณะในช่วงความยาวคลื่นกว้าง (0.3-3.0 μm) (I) ซึ่งมีหน่วยเป็นลูเมนต่อวัตต์ (lumen/watt, lm/W) หรือเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$K = \frac{E}{I} \quad (1)$$

เมื่อ

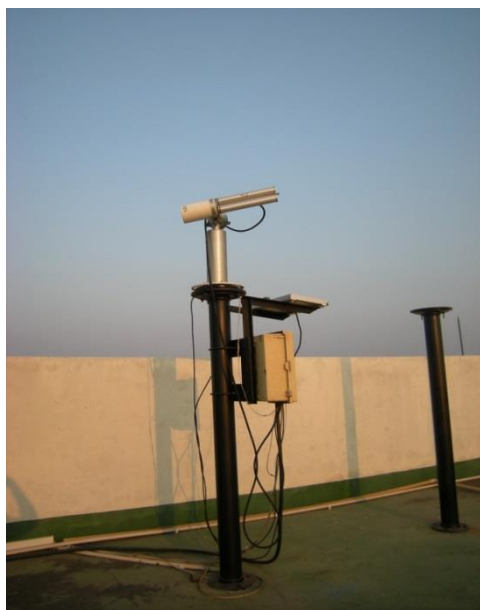
K คือ ประสิทธิภาพแสง (lm/W)

E คือ ปริมาณแสงสว่างที่สายตามนุษย์สามารถตอบสนองได้ (global illuminance) (lux)

I คือ รังสีดวงอาทิตย์เฉพาะขณะในช่วงความยาวคลื่นกว้าง (global irradiance) (W/m^2)

โดยทั่วไปประสิทธิภาพแสงสว่าง (luminous efficacy) จะมีค่าไม่คงที่ แต่จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางบรรยากาศ ได้แก่ มุมเซนธิของดวงอาทิตย์ ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละอองเมฆ และปริมาณโอโซน โดยที่มุมเซนธิของดวงอาทิตย์มีอิทธิพลที่สำคัญต่อความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกในช่วงความยาวคลื่นกว้าง ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศมีผลต่อค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เนื่องจากไอน้ำดูดกลืนสเปกตรัมรังสีดวงอาทิตย์ในช่วงอินฟราเรด ค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละอองเนื่องจากฝุ่นละอองเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลหลักต่อการลดลงของรังสีดวงอาทิตย์ในช่วงที่ตามองเห็น และปริมาณโอโซนที่มีสมบัติดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตจึงมีผลต่อค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นโลก ดังนั้นด้วยตัวแปรดังกล่าวย่อมมีความสัมพันธ์ทางสถิติกับประสิทธิภาพแสงสว่าง ผู้วิจัยจึงได้ใช้แนวคิดนี้ในการพัฒนาแบบจำลองประสิทธิภาพแสงสว่างรวมบนระนาบในแนวดิ่ง

ในการสร้างแบบจำลอง ผู้วิจัยจะทำการหาแบบจำลองในรูปของประสิทธิภาพแสงสว่างรวมบนระนาบในแนวดิ่ง จากการวิเคราะห์ผลของตัวแปรต่างๆ พบว่าตัวแปรทางบรรยากาศที่มีผลต่อประสิทธิภาพแสงสว่างรวม ได้แก่ ค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ปริมาณโอโซน ดัชนีเมฆ และมุมเซนธิของดวงอาทิตย์ โดยข้อมูลค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง และปริมาณไอน้ำในบรรยากาศได้มาจากเครื่อง Sunphotometer ที่อยู่ในเครือข่ายของ AERONET ของ NASA (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>) ซึ่งได้ทำการติดตั้งไว้ที่สถานีวัดทั้ง 2 แห่ง เช่นเดียวกับเครื่องวัดแสงสว่างบนระนาบในแนวดิ่ง ลักษณะของเครื่องมือแสดงดังรูปที่ 3



(ก)



(ข)

รูปที่ 3 เครื่อง sunphotometer ของ (ก) สถานีนครปฐม และ (ข) สถานีอุบลราชธานี

สำหรับข้อมูลปริมาณโอโซนได้มาจากดาวเทียม OMI/AURA และข้อมูลดัชนีเมฆ (n) ได้มาจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม MTSAT ที่ตำแหน่งสถานีวัดทั้ง 2 แห่ง โดยใช้วิธีการคำนวณของ Hammer และคณะ (2003) ดังสมการ

$$n = \frac{\rho_{ea} - \rho_{min}}{\rho_{max} - \rho_{min}} \quad (2)$$

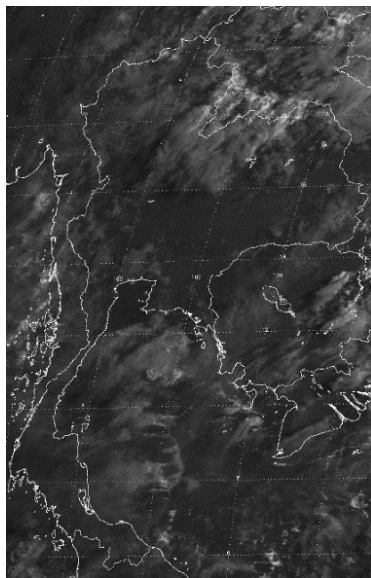
เมื่อ n คือ ค่าดัชนีเมฆ

ρ_{ea} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเนื่องจากบรรยากาศและพื้นผิวโลก

ρ_{min} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของบรรยากาศและพื้นผิวโลกในสภาพปราศจากเมฆ

ρ_{max} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของเมฆ

ในขณะที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆ $\rho_{ea} = \rho_{min}$ ค่า $n = 0$ กรณีที่ท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด $\rho_{ea} = \rho_{max}$ ค่า $n = 1$ และขณะท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน $0 < n < 1$ จะเห็นได้ว่าดัชนีเมฆจะเป็นตัวบ่งชี้ปริมาณเมฆ ผู้วิจัยจะหาดัชนีเมฆจากภาพถ่ายดาวเทียมรายชั่วโมง ตั้งแต่ ปี ค.ศ. 2013 จนถึง 2015 ตัวอย่างภาพถ่ายดาวเทียมแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ตัวอย่างภาพถ่ายดาวเทียม MTSAT บริเวณประเทศไทย

ส่วนค่าโคไซน์ของมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ ($\cos Z_s$) จะเป็นตัวแปรทางเรขาคณิตที่บอกตำแหน่งดวงอาทิตย์ ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการของ Iqbal (1983) ดังนี้

$$\cos Z_s = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (3)$$

เมื่อ Z_s คือ มุมเซนธิของดวงอาทิตย์ (องศา)
 ω คือ มุมชั่วโมง (องศา)
 ϕ คือ ละติจูด (องศา)
 δ คือ เดคลิเนชัน (องศา)

หลังจากจัดเตรียมข้อมูลต่างๆ เรียบร้อยแล้ว ผู้วิจัยนำข้อมูลที่ได้จากสถานีวัดทั้ง 2 แห่ง ในปี ค.ศ. 2013-2014 มาสร้างแบบจำลองประสิทธิภาพแสงสว่างรวมบนระนาบในแนวดิ่ง โดยพิจารณาว่าค่าประสิทธิภาพแสงสว่างรวมบนระนาบในแนวดิ่งเป็นฟังก์ชันกับปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ โอโซน ความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง ดัชนีเมฆ และโคไซน์ของมุมเซนธิของดวงอาทิตย์ โดยใช้สมการเชิงถดถอยแบบหลายตัวแปร (multiple regression) หลังจากนั้นผู้วิจัยจะใช้ข้อมูลจากทั้ง 2 สถานี ในปี 2015 ซึ่งเป็นข้อมูลอิสระ (independent data) และมีได้นำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองมาใช้ทดสอบสมรรถนะของแบบจำลอง เพื่อเปรียบเทียบข้อมูลแสงสว่างบนระนาบในแนวดิ่งจากการคำนวณจากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัด ซึ่งจะแสดงผลในรูปของ Root mean square difference (RMSD) และ Mean bias difference (MBD) [Iqbal, 1983] ดังสมการ

$$\%RMSD = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (E_{g,model,i} - E_{g,meas,i})^2}{N}}}{\frac{\sum_{i=1}^N (E_{g,meas,i})}{N}} \times 100 \quad (4)$$

$$\%MBD = \frac{\frac{\sum_{i=1}^N (E_{g,model,i} - E_{g,meas,i})}{N}}{\frac{\sum_{i=1}^N (E_{g,meas,i})}{N}} \times 100 \quad (5)$$

เมื่อ $E_{g,model,i}$ คือ ค่าแสงสว่างรวมบนระนาบในแนวดิ่งจากการคำนวณจากแบบจำลองของข้อมูลที่ i (lux)
 $E_{g,meas,i}$ คือ ค่าแสงสว่างรวมบนระนาบในแนวดิ่งจากการวัดของข้อมูลที่ i (lux)
 N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

โดยค่า RMSD เป็นค่าที่แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าจากการคำนวณจากแบบจำลองกับค่าจากการวัดจริง เนื่องจากการยกกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าจากการคำนวณกับค่าจากการวัด ดังนั้น RMSD จึงมีค่าเป็นบวกเสมอ ในกรณีอุดมคติ ค่าจากการคำนวณเท่ากับค่าจากการวัดทั้งหมด ค่า RMSD จะมีค่าเป็นศูนย์ แบบจำลองที่ดีจะต้องได้ค่า RMSD เข้าใกล้ศูนย์

ส่วนค่า MBD นั้นเป็นค่าที่แสดงความแตกต่างในรูปความเอนเอียงเฉลี่ย ซึ่งเป็นค่าทางสถิติที่บอกความแตกต่างระหว่างกลุ่มข้อมูลที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่ได้จากการวัด MBD อาจมีค่าเป็นบวกหรือเป็นลบก็ได้ ถ้าค่าเป็นบวกแสดงว่าข้อมูลมีความเอนเอียงไปในด้านที่ค่าจากการคำนวณมากกว่าค่าจากการวัด ในทางกลับกันถ้าค่าเป็นลบแสดงว่าข้อมูลมีความเอนเอียงไปในด้านที่ค่าจากการวัดมากกว่าค่าจากการคำนวณ แบบจำลองที่ดี ค่า MBD ต้องมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งหมายความว่าค่าจากการคำนวณไม่มีความเอนเอียงไปทางด้านใดด้านหนึ่งมากนัก

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

เมื่อผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลตัวแปรทางบรรยากาศเรียบร้อยแล้ว ผู้วิจัยได้นำข้อมูลประสิทธิภาพแสงสว่างรวมบนระนาบในแนวตั้งมาหาความสัมพันธ์กับตัวแปรทางบรรยากาศในสภาพท้องฟ้าทั่วไปของ 2 สถานีในประเทศไทย พบว่าประสิทธิภาพแสงสว่างรวมบนระนาบในแนวตั้งมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับปริมาณฝุ่นละออง โอโซน ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ โคไซน์ของมุมเซนิธของดวงอาทิตย์ และดัชนีเมฆ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเสนอแบบจำลองเอมไพริคัล (empirical model) ในรูปสมการได้ ดังนี้

$$K_g = \frac{E_g}{I_g} = a_0 + a_1 AOD + a_2 w + a_3 \cos Z_s + a_4 O_z + a_5 n \quad (6)$$

เมื่อ

K_g คือ ประสิทธิภาพแสงสว่างรวม (lm/W)

AOD คือ ค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละอองที่มีความยาวคลื่น 500 nm (-)

w คือ ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ (cm)

$\cos Z_s$ คือ มุมเซนิธของดวงอาทิตย์ (องศา)

O_z คือ ปริมาณโอโซน (DU)

n คือ ค่าดัชนีเมฆ (-)

a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 และ a_5 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองที่ได้จากการ regression (-) แสดงดังตารางที่ 1

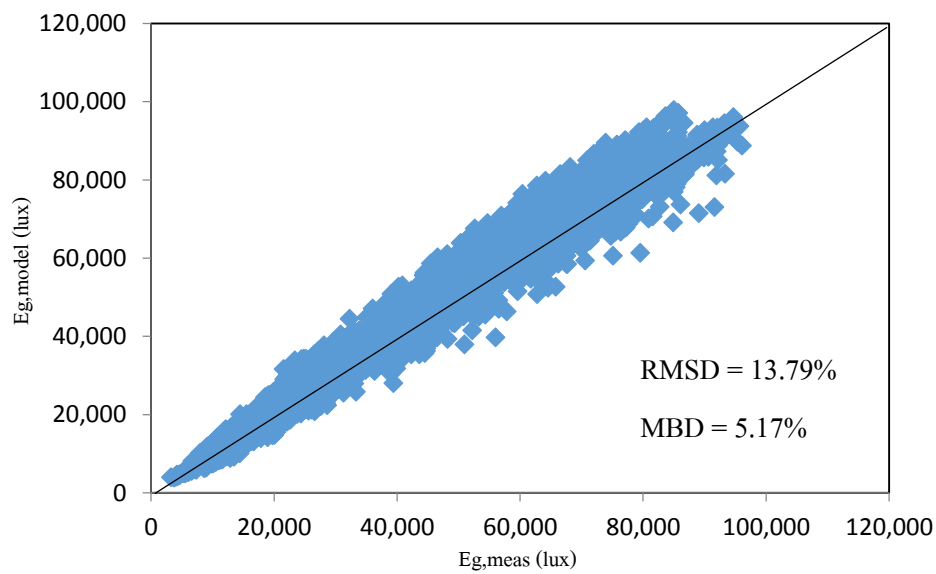
ตารางที่ 1 แสดงสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองประสิทธิภาพแสงสว่างรวมบนระนาบในแนวดิ่งในสภาพท้องฟ้าทั่วไป

สัมประสิทธิ์ / ทิศ	ทิศเหนือ	ทิศใต้	ทิศตะวันออก	ทิศตะวันตก
a_0	281.4383	43.2170	155.3741	163.6079
a_1	-0.9730	-7.4677	-1.1703	-4.4099
a_2	-5.3834	5.5161	-1.3118	1.83262
a_3	5.0582	7.51558	30.9302	32.9765
a_4	-0.3755	0.2984	-0.1433	-0.1782
a_5	-37.4950	-19.9257	10.1634	-34.3460

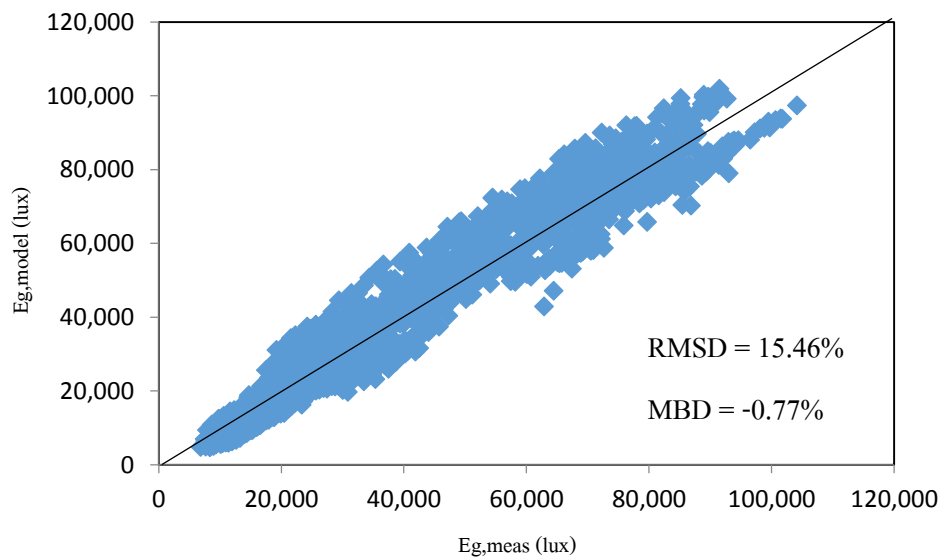
หลังจากผู้วิจัยได้ทำการสร้างแบบจำลองเรียบร้อยแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลอง โดยใช้ข้อมูลทั้ง 2 สถานี ที่ทำการวัดในปี 2015 ซึ่งเป็นข้อมูลอิสระ และมีได้นำมาใช้ในการสร้างแบบจำลอง โดยผู้วิจัยจะนำแบบจำลองดังกล่าวมาทำการคำนวณค่าแสงสว่างรวมบนระนาบในแนวดิ่งและเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัด ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 5-6 พบว่าค่าแสงสว่างรวมบนระนาบในแนวดิ่งที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองที่สร้างขึ้น ($E_{g,model}$) จะแตกต่างจากค่าแสงสว่างรวมบนระนาบในแนวดิ่งที่ได้จากการวัด ($E_{g,meas}$) ในรูป MBD และ RMSD โดยสถานีอุบลราชธานีมีความแตกต่างในรูป RMSD ในแต่ละทิศทางอยู่ในช่วง 9.02% ถึง 17.80% สำหรับ MBD จะมีค่าอยู่ระหว่าง 1.53% ถึง 11.25% เมื่อรวมทุกทิศทางจะมีค่า RMSD เท่ากับ 13.79% และ MBD มีค่าเท่ากับ 5.17% และสถานีนครปฐมมีความแตกต่างในรูป RMSD อยู่ในช่วง 11.59% ถึง 17.16% สำหรับ MBD จะมีค่าอยู่ระหว่าง -7.44% ถึง 5.32% เมื่อรวมทุกทิศทางจะมีค่า RMSD เท่ากับ 15.46% และ MBD มีค่าเท่ากับ -0.77% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองประสิทธิภาพแสงสว่างรวมบนระนาบในแนวดิ่งที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ สามารถนำไปคำนวณแสงสว่างรวมบนระนาบในแนวดิ่งได้ โดยค่าแสงสว่างบนระนาบในแนวดิ่งที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองมีความสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการวัดค่อนข้างดี

ตารางที่ 2 แสดง RMSD และ MBD ของแบบจำลองประสิทธิภาพแสงสว่างรวมบนระนาบในแนวดิ่งทั้ง 4 ทิศในสภาพท้องฟ้าทั่วไป

สถานีวัด	ทิศเหนือ		ทิศใต้		ทิศตะวันออก		ทิศตะวันตก		รวมทุกทิศทาง	
	RMSD (%)	MBD (%)	RMSD (%)	MBD (%)	RMSD (%)	MBD (%)	RMSD (%)	MBD (%)	RMSD (%)	MBD (%)
อุบลราชธานี	13.95	9.04	9.02	2.07	17.80	11.25	14.09	1.53	13.79	5.17
นครปฐม	15.10	-6.53	11.59	4.76	16.18	-7.44	17.16	5.32	15.46	-0.77



รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบค่าแสงสว่างรวมบนระนาบในแนวตั้งทุกทิศทางที่ได้จากการวัด ($E_{g,meas}$) และจากการคำนวณจากแบบจำลอง ($E_{g,model}$) ของสถานีอุบลราชธานี



รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบค่าแสงสว่างรวมบนระนาบในแนวตั้งทุกทิศทางที่ได้จากการวัด ($E_{g,meas}$) และจากการคำนวณจากแบบจำลอง ($E_{g,model}$) ของสถานีนครปฐม

สรุปผล

จากความสำคัญของแสงสว่างธรรมชาติ ผู้วิจัยได้นำข้อมูลแสงสว่างรวมและข้อมูลความเข้มรังสีรวม จากดวงอาทิตย์บนระนาบในแนวตั้งรายชั่วโมงที่หันหน้าไปทางทิศเหนือ ได้ ตะวันออก และตะวันตก ที่ติดตั้งที่ ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี และที่มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม โดยนำข้อมูลจากสถานีดังกล่าวในปี ค.ศ. 2013-2014 มาวิเคราะห์หาแบบจำลองประสิทธิภาพแสงสว่างรวม สำหรับคำนวณแสงสว่างรวมบนระนาบในแนวตั้ง ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวแสดงความสัมพันธ์กับองค์ประกอบทางบรรยากาศ ได้แก่ โคไซน์ของมุม zenith ของดวงอาทิตย์ ปริมาณความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง โอโซน ปริมาณ ไอน้ำในบรรยากาศ และดัชนีเมฆ จากนั้นได้ทำการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้ โดยใช้ข้อมูลทั้ง 2 สถานี ที่ทำการวัดในปี ค.ศ. 2015 ผลการทดสอบพบว่า ค่าแสงสว่างรวมบนระนาบในแนวตั้งที่คำนวณจาก แบบจำลองมีความแตกต่างจากค่าที่ได้จากการวัดในรูปของ RMSD เท่ากับ 13.79% สำหรับสถานีอุบลราชธานี และ 15.46% สำหรับสถานีนครปฐม

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี ที่อนุญาตให้ใช้ สถานที่ในการติดตั้งเครื่องมือและบันทึกข้อมูล ตลอดจนช่วยเหลือเครื่องมือให้ผู้วิจัยด้วยดีตลอดมา นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะ วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากรที่ให้การสนับสนุนด้านอุปกรณ์วัดต่างๆ

เอกสารอ้างอิง

ภาษาต่างประเทศ

- Cucumo, M., De Rosa, A., Ferraro, V., Kaliakatsos, D., & Marinelli, V. (2009). Experimental data of global and diffuse luminous efficacy on vertical surfaces at Arcavacata di Rende and comparisons with calculation models, *Energy Conversion and Management* 50. 166-173.
- De Rosa, A., Ferraro, V., Kaliakatsos, D., & Marinelli, V. (2008a). Calculating diffuse illuminance on vertical surfaces in different sky conditions, *Energy* 33. 1703-1710.
- De Rosa, A., Ferraro, V., Kaliakatsos, D., & Marinelli, V. (2008b). Simplified correlations of global, direct and diffuse luminous efficacy on Horizontal and vertical surfaces, *Energy and Buildings* 40. 1991-2001.
- Hammer, A. Heinemann, P. Hoyer, D. Kuhlmann, R. Lorenz, E. Muller, R., & Beyer, H.G. (2003). Solar energy assessment using remote sensing technology, *Remote Sensing of Environment* 86. 423-432.
- Iqbal, M. (1983). *An Introduction to Solar Radiation*, Academic, New York.
- Kong, H.J., & Kim, J.T. (2013). Modeling luminous efficacy of daylight for Yongin, South Korea, *Energy and Buildings* 62. 550-558.
- Littlefair, P.J. (1988). Measurement of the luminous efficacy of daylight, *Lighting Research & Technology* 20. 177-188.
- Mayhoub, M.S., & Carter, D.J. (2011). Methods to estimate global and diffused luminous efficacies based on satellite data, *Solar Energy* 85. 2940-2952.
- Muneer, T., & Kinghorn, D. (1998). Luminous efficacy model: evaluation against UK data, *Journal of the IES* 27(1). 163-170.
- Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., & Stewart, R. (1990). Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance, *Solar Energy* 44(5). 271-289.
- Pleijel, G. (1954). *The computation of natural radiation in architecture and town planning*. Statens namd for byggnadsforskning. Stockholm, Sweden.
- Soler, A., & Robledo, L. (2000). Global luminous efficacies on vertical surfaces for all sky types, *Renewable Energy* 19. 61-64.