

ระบบติดตามดวงอาทิตย์สำหรับวัดรังสีแสงอาทิตย์

The Sun Tracking System for Solar Radiation Measurements

พิสิษฐ์ เตชะรุ่งไพศาล ธนกร ลิ้มสุวรรณ ชاکริต โพธิ์งาม และ กุลเชษฐ์ เพียรทอง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

Pisit Techarungpaisan Thanakorn Limsuwan Chakrit Po-ngarm and Kulachate Pianthong
Faculty of Engineering, Ubon Rajathanee University

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้พัฒนาระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่ใช้ระบบหมุนแบบสองแกน มุมของแกนหมุนนี้จะเทียบได้กับมุม Zenith และมุม Azimuth ซึ่งสามารถคำนวณหามุมได้จากสมการของ Duffie และ Beckmen ระบบติดตามดวงอาทิตย์ประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ รุ่น P89V51RD2 ทำหน้าที่คำนวณหาของดวงอาทิตย์ ควบคุมองศาของมุมด้วยระบบเซนเซอร์ วัดมุมและควบคุมการหมุนด้วยมอเตอร์ขับเคลื่อน ใช้โปรแกรมภาษาซี ในการควบคุมเครื่องติดตามดวงอาทิตย์นี้สามารถเคลื่อนย้ายและสามารถติดตั้งได้ง่าย เพราะมีขนาดเล็กพร้อมระบบค้นหาทิศเหนือและแนวตั้งโดยอัตโนมัติ นอกจากนี้ได้ทำการเปรียบเทียบค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่วัดโดยเครื่องติดตามดวงอาทิตย์กับค่ารังสีแสงอาทิตย์โดยวิธีคำนวณทางคณิตศาสตร์จากข้อมูลการวัดรังสีในแนวราบ จากการเปรียบเทียบค่ารังสีระหว่างการวัดรังสีแสงอาทิตย์โดยอาศัยอุปกรณ์ติดตามดวงอาทิตย์กับการคำนวณจากข้อมูลการวัดรังสีแนวราบพบว่า มีความคลาดเคลื่อนของแสงอาทิตย์ประมาณ $\pm 5\%$ ที่มุม Zenith ตกกระทบ (Zenith angle of incidence) ในช่วง 0-70 องศา

คำสำคัญ : รังสีแสงอาทิตย์ การติดตามดวงอาทิตย์

Abstract

This research develops the sun tracking system employing double rotated axes. The solar angle is specified by Zenith and Azimuth angles which can be calculated by the algebraic equations developed by Duffie and Beckmen. This system is engineered with microcontroller P89V51RD2 working as the sun angle indicator. It is electronically controlled by an angle rotating sensor system written in C+. This system is physically movable and adjustable, even though it includes an automatic searching direction system, because of its compact size. Furthermore, this system is capable of comparing the Sola radiation data between its measured value and the mathematical value measuring for the horizontal light. From the comparison, it is

found that there was an inconsistency of approximately ± 5 percent at the Zenith (angle of incidence) angle of 0 to 70 degree.

Keywords: *solar radiation, sun tracking*

บทนำ

แหล่งพลังงานหลักของโลกผลิตจากฟอสซิล ซึ่งเป็นทรัพยากรที่มีจำนวนจำกัดและกำลังประสบปัญหาการขาดแคลนพลังงานชนิดนี้ในอนาคตอันใกล้นี้ โดยเฉพาะน้ำมันเชื้อเพลิงมีการทำนายว่าจะหมดภายใน 50 ปี ถ่านหินจะหมดภายใน 200 ปี จึงมีการศึกษาและวิจัยในการค้นหาพลังงานทดแทนกันอย่างกว้างขวาง พลังงานแสงอาทิตย์เป็นหนึ่งในพลังงานทดแทนที่มีปริมาณมหาศาลและมีศักยภาพสูง ข้อมูลการวัดรังสีแสงอาทิตย์เป็นข้อมูลที่จำเป็นในการออกแบบอุปกรณ์รับพลังงานแสงอาทิตย์เช่น ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ แผงเซลล์สุริยะ เป็นต้น จึงมีการวัดรังสีแสงอาทิตย์เพื่อจัดเก็บเป็นฐานข้อมูล ได้แก่การวัดรังสีตรง รังสีกระจาย และรังสีรวม ซึ่งเป็นการวัดแบบมาตรฐานทั่วไป ส่วนใหญ่ใช้ไพรานอมิเตอร์ติดตั้งในแนวราบ ซึ่งค่าที่วัดได้จะเป็นค่ารังสีแสงอาทิตย์ในแนวราบ (Horizontal solar radiation) และค่ารังสีตรง (Direct radiation) สามารถประมาณค่ารังสีในแนวเอียงได้จากข้อมูลการวัดค่ารังสีแสงอาทิตย์ในแนวราบ

ระบบติดตามแสงอาทิตย์ในงานวิจัยนิยมใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสง (อนุชา และคณะ ,2548) โดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับแสงจากแผ่นบังเงาแสงอาทิตย์ ซึ่งจะมีประสิทธิภาพดีเมื่อความเข้มแสงมีค่าสูง แต่จะหยุดทำงานเมื่อมีความเข้มของแสงลดลงเช่นมีเมฆบังและเมื่อมีแสงปรากฏขึ้นจึงเริ่มทำงานต่อ เกิดการหน่วงเวลาในการวัดรังสีแสงอาทิตย์ทำให้ได้ข้อมูลไม่ครบถ้วน สำหรับโครงการวิจัยนี้ได้นำเสนอระบบติดตามแสงอาทิตย์ ซึ่งตัววัดแสงอาทิตย์สามารถเคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ได้เอง แม้ว่าจะไม่มีแสงอาทิตย์ ทั้งนี้อาศัยหลักการคำนวณทางคณิตศาสตร์หาตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่เสนอโดย Duffie และ Beckmen (1991) ซึ่งทำให้ไม่เกิดการหน่วงเวลาในการติดตามดวงอาทิตย์ จึงได้ค่ารังสีตรงจากแสงอาทิตย์ ทันทีที่ดวงอาทิตย์พ้นจากการถูกเมฆบัง งานวิจัยนี้ยังได้แสดงผลการทดลองเพิ่มเติมจากบทความวิจัย ของธนกร และคณะ (2549) โดยแสดงการเปรียบเทียบค่ารังสีระหว่างการวัดรังสีแสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์กับการคำนวณรังสีตรงจากข้อมูลการวัดรังสีแนวราบ

ทฤษฎีและสมการที่เกี่ยวข้อง

มีการศึกษาและทำวิจัยการเปรียบเทียบค่ารังสีระหว่างการวัดรังสีแสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์กับการคำนวณจากข้อมูลการวัดรังสีแนวราบเช่น การศึกษาของ Khalil A. A., *et al.*, (2004) พบว่า ค่ารังสีตรงของแสงอาทิตย์แบบการติดตามดวงอาทิตย์ของอุปกรณ์รับพลังงานแสงอาทิตย์จะมีพลังงานสูงกว่าแบบติดตั้งบนพื้นแนวราบถึงร้อยละ 50 ซึ่ง Baltas P. *et al.*, (1986) ได้วิเคราะห์ข้อมูลรังสีแสงอาทิตย์รวมและรังสีแบบตรง มีการปรับมุม Altitude และ Azimuth วันละ 2 ครั้งพบว่า ให้ค่ารังสีแสงอาทิตย์ร้อยละ 95 ของรังสีแสงอาทิตย์ที่วัดแบบติดตามดวงอาทิตย์ตลอดเวลา การศึกษาของ จิรายุ และคณะ (2543) ที่คำนวณค่าพลังงานตกกระทบบนแผงเซลล์สุริยะที่ติดตั้งแบบเอียงและทำการปรับตามดวงอาทิตย์อย่างเป็นขั้น สรุปได้ว่า การปรับแผงเซลล์สุริยะวันละ 2 ครั้ง ได้ค่ารังสีแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการไม่ปรับแผงเซลล์สุริยะ

การหาค่ารังสีตรงแสงอาทิตย์บนผิวโลก ที่นิยมมี 2 วิธีการคือ 1) ใช้เครื่องมือวัดค่ารังสีตรงจากดวงอาทิตย์โดยตรง ด้วยวิธีการติดตามดวงอาทิตย์ วิธีนี้จะให้ค่าที่ถูกต้องที่สุดแต่เครื่องมือวัดมีราคาแพงและต้องใช้เวลาในการจัดเก็บข้อมูลตามเวลาจริง 2) ประมาณค่ารังสีตรงโดยวิธีคำนวณทางคณิตศาสตร์ โดยอาศัยข้อมูลจากการวัดรังสีแนวราบใช้เครื่องมือราคาถูกลงกว่า แต่ค่าที่ได้จะคลาดเคลื่อนไปจากค่าจริง

การประมาณค่ารังสีบนพื้นราบ (Duffie และ Beckmen, 1991)

โดยปกติ ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ได้จากการวัดคือ ค่าของเส้นรังสีที่ตั้งฉากกับไพรานอมิเตอร์ (เครื่องมือวัดค่ารังสีแสงอาทิตย์) เรียกว่า รังสีตรง (Direct radiation, G_b) ดังภาพที่ 1 (ก) และ G_{bt} ในรูปที่ 1 (ข) โดยที่

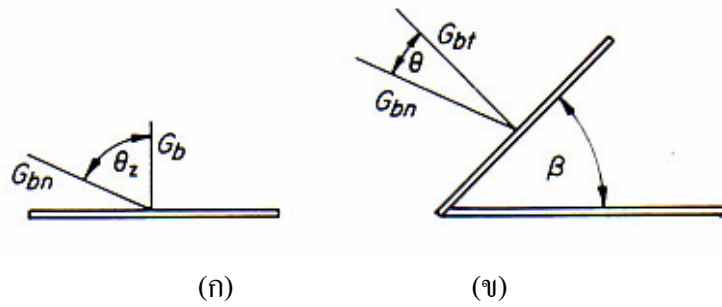
G_b คือ ค่ารังสีแสงอาทิตย์ตั้งฉากกับไพรานอมิเตอร์หรือค่ารังสีจริงที่วัดได้เมื่อไพรานอมิเตอร์อยู่แนวราบ

G_{bn} คือ ทิศทางรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนไพรานอมิเตอร์

G_{bt} คือ ค่ารังสีแสงอาทิตย์ตั้งฉากกับไพรานอมิเตอร์หรือค่ารังสีจริงที่วัดได้เมื่อไพรานอมิเตอร์มีมุมเอียง

θ_z คือ Zenith angle มุมระหว่างเส้นรังสีแสงอาทิตย์กับแนวตั้ง

θ คือ มุมระหว่างเส้นรังสีแสงอาทิตย์กับเส้นตั้งฉากไพรานอมิเตอร์ ที่มีมุมเอียง (Angle of incidence)

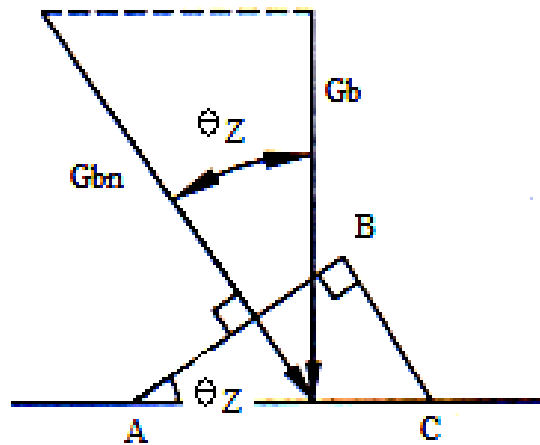


ภาพที่ 1 (ก) การวัดรังสีแสงอาทิตย์แนวราบ (ข) การวัดรังสีแสงอาทิตย์ในแนวเอียง (Duffie และ Beckmen, 1991)

จากภาพที่ 2 สามารถหาค่ารังสีของพื้นแนวราบ เมื่อทิศทางรังสีทำมุมกับแนวราบหรือเส้นรังสีตรงไม่ได้ทำมุมตั้งฉากกับแนวราบ ดังสมการที่ (1) และ (2)

$$G_b = G_{bn} \times \frac{AB}{AC} \quad (1)$$

$$G_b = G_{bn} \times \cos \theta_z \quad (2)$$



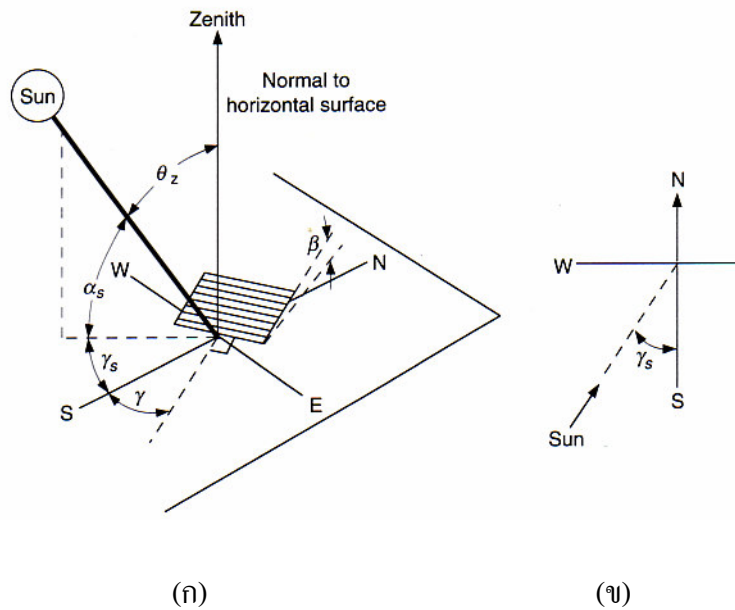
ภาพที่ 2 การคำนวณรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบในแนวราบ

สำหรับค่ารังสีของพื้นเอียงดังรูปที่ 1 (ข) ค่ารังสีจะได้เท่ากับสมการที่ (3)

$$G_{bt} = G_{bn} \times \cos \theta \quad (3)$$

สำหรับค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์เส้นรังสีจะตั้งฉากกับไพรานอมิเตอร์ตลอดเวลา ทำให้ $\theta = 0$ ดังนั้นจะได้ค่ารังสีดังสมการที่ (4)

$$G_{bt} = G_{bn} \quad (4)$$



ภาพที่ 3 (ก) แสดงมุม Zenith angle, azimuth angle, and slope (ข) มุมมองด้านบนของ Solar azimuth angle (Duffie และ Beckman, 1991)

จากรูปที่ 3 แสดงภาพการวางไพรานอมิเตอร์บนพื้นเอียงทำมุมกับผิวโลก β และเอียงจากทิศใต้ γ เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบทำมุมตั้งฉากกับไพรานอมิเตอร์ จะเกิดมุม γ_s และ γ สามารถหา $\cos \theta$ เพื่อนำไปใช้แทนค่าในสมการที่ (3) ได้ดังสมการที่ (5)

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (5)$$

γ คือ มุมที่เส้นตั้งฉากพื้นเอียงกระทำกับแนวของทิศใต้ บนระนาบของพื้นโลก ค่ามุม $\gamma = 0$ เมื่อเส้นตั้งฉากพื้นเอียงอยู่ในแนวทิศใต้ ค่ามุม γ เป็นบวกเมื่อเส้นตั้งฉากพื้นเอียง

เบี่ยงเบนจากแนวทิศใต้ไปทางทิศตะวันตก ค่ามุม γ เป็นลบเมื่อเส้นตั้งฉากพื้นผิวเบี่ยงเบนจากแนวทิศใต้ไปทางทิศตะวันออก (Surface azimuth angle)

γ_s คือ มุมระนาบของดวงอาทิตย์กระทำกับแนวของทิศใต้บนระนาบของพื้นโลก (Solar azimuth angle) พิจารณาค่าบวกลบเหมือนกับค่ามุม γ

β คือมุมเอียงที่เกิดจากการวางไพรานอมิเตอร์ที่มีมุมเอียงกับผิวโลก

การบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนพื้นราบ

จากภาพที่ 3 สามารถคำนวณหาตำแหน่งของดวงอาทิตย์ด้วยสมการคณิตศาสตร์ Duffie และ Beckmen (1991) ดังสมการที่ (6) การหามุม Altitude, α_s และสมการที่ (7) คือ การหามุม Azimuth, γ_s

$$\alpha_s = \sin^{-1}(\sin(\delta) \sin(\theta_l) + \cos(\delta) \cos(\theta_l) \cos(\omega)) \quad (6)$$

$$\gamma_s = \sin^{-1}\left(\frac{\sin(\omega) \cos(\delta)}{\cos(\delta)}\right) \quad (7)$$

α_s คือ มุมของแสงดวงอาทิตย์กระทำกับแนวราบของผิวโลก

δ (Declination) คือ มุมที่รังสีจากแสงอาทิตย์กระทำกับเส้นศูนย์สูตร มีค่าระหว่าง $\pm 23.45^\circ$ โดยเปลี่ยนแปลงตาม Julian date (j_d) โดยวันที่ 1 มกราคม $J_d = 1$ หรือวันที่ 1 กุมภาพันธ์ $J_d = 32$

θ_l คือ มุมละติจูด เช่นประเทศไทยตั้งอยู่ที่ละติจูดที่ 15 องศา, $\theta_l = 15$ องศา

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

ω (solar hour angle) คือ ค่าองศาชั่วโมง ตำแหน่งที่ดวงอาทิตย์อยู่สูงที่สุด ณ ที่เวลา Solar noon time ค่าองศาชั่วโมงจะเป็นศูนย์ ถ้าไปทางซีกโลกตะวันออกจะเป็นค่าลบ ไปทางซีกโลกตะวันตกจะเป็นค่าบวก ดังสมการที่ (9)

$$\omega = 15^\circ(t_s - 12) \quad (9)$$

t_s คือ เวลาที่ขึ้นกับตำแหน่งดวงอาทิตย์เรียกว่าเวลาสุริยะ (Solar time) ดังสมการที่ (10)

$$t_s = \text{Watch_time} \pm 4(L_{st} - L_{lc}) + E \quad (10)$$

Watch_time คือเวลาที่อ่านจากนาฬิกาหรือเวลาที่ท้องถิ่นที่เส้นลองจิจูดมาตรฐานของประเทศ

L_{st} คือ เส้นลองจิจูดมาตรฐาน (Standard local longitude)

L_{lc} คือ เส้นลองจิจูด (Actual longitude)

E คือ สมการเวลาเป็นการปรับค่าเวลาที่เกิดจากการหมุนรอบตัวเองของโลก (Equation of time) ดังสมการที่ (11)

$$E = 9.87 \sin(2\beta) - 7.53 \cos(\beta) - 1.5 \sin(\beta) \quad (11)$$

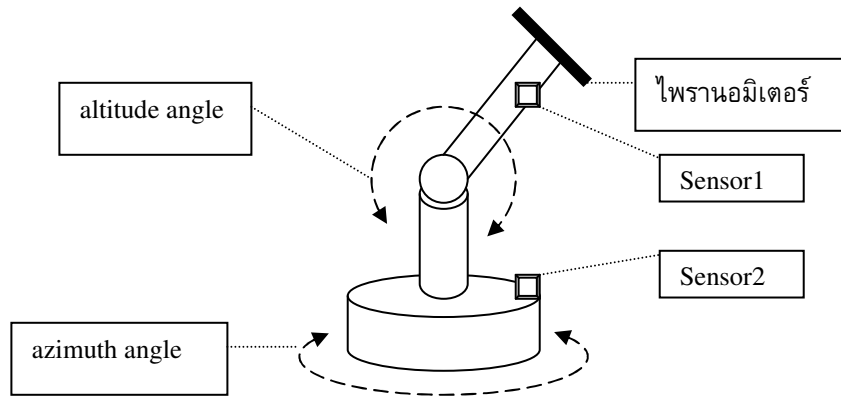
$$\beta = \frac{360^\circ(j_d - 81)}{364}$$

หลักการทํางานของระบบติดตามดวงอาทิตย์

จากสมการที่ (6) ถึง (11) สามารถนำมาเขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยภาษาซี เพื่อทำการควบคุมการหมุน ให้ได้ตำแหน่งดวงอาทิตย์ที่ถูกต้องหรือใกล้เคียง ทั้งในช่วงที่มีแสงอาทิตย์หรือไม่มีแสงอาทิตย์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้เป็นรุ่น P89V51RD2 ซึ่งเป็น CPU ตระกูล 51 ขนาด 8 บิต ทำการเปรียบเทียบมุมชี้ตำแหน่งดวงอาทิตย์ Altitude angle ระหว่างค่าที่คำนวณได้กับ Azimuth angle กับค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดมุมสองตัวดังภาพที่ 4 และถ้ามุมที่ได้ไม่ตรงกันมอเตอร์จะหมุนเพื่อปรับมุมจากเซนเซอร์ให้ตรงกับที่คำนวณไว้แล้ว และระบบจะรักษามุมจากเซนเซอร์ให้ตรงกับค่าที่คำนวณอยู่ตลอดเวลา

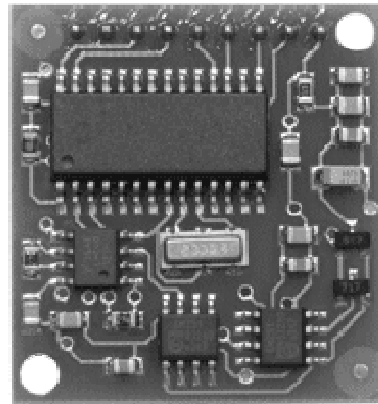
สำหรับเซนเซอร์วัดมุมได้แก่ 1) เซนเซอร์วัด Azimuth angle ใช้โมดูล CMPS03 วัดมุมได้ 360 องศาอย่างแม่นยำ เป็นเข็มทิศอิเล็กทรอนิกส์ จึงสามารถค้นหาทิศเหนือได้โดยอัตโนมัติ ช่วยทำให้การติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ง่ายขึ้น ในกรณีที่มีการเคลื่อนย้ายระบบไปติดตั้งที่ต่างๆ 2) เซนเซอร์วัด Altitude angle ใช้โมดูลวัดระดับความเอียง MXD2125 วัดมุม 0 ถึง 180 องศา ที่ตำแหน่ง 90 องศาจะตั้งฉากกับพื้นโลกโดยอัตโนมัติ โดยไม่ต้องใช้ลูกน้ำปรับความเอียง (ดังภาพที่ 4) และ (ภาพที่ 5) แสดงภาพเซนเซอร์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (ภาพที่ 5 (ก)) Sensor 1 ใช้วัด Altitude angle ใช้โมดูลวัดระดับความเอียง (ภาพที่ 5 (ข)) Sensor 2 ใช้วัด Azimuth angle ใช้โมดูลวัดมุมในแนวราบ



ภาพที่ 4 แผนภาพระบบติดตามดวงอาทิตย์



(ก)



(ข)

ภาพที่ 5 (ก) เซนเซอร์วัด Altitude angle (Sensor 1) (ข) เซนเซอร์วัด Azimuth angle (Sensor 2)

การใช้งานและการเปรียบเทียบค่ารังสีแสงอาทิตย์

ทำการติดตั้งไพโรนอมิเตอร์บนแนวราบ (ภาพที่ 6 (ก)) และติดตั้งระบบวัดรังสีแสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์ (ภาพที่ 6 (ข)) ในบริเวณเดียวกันบนอาคาร EN 5 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จ.อุบลราชธานี ตั้งที่เส้นรุ้ง 14 องศาเหนือ เส้นแวง 105 องศาตะวันออก บันทึกข้อมูลทุกห้านาทีซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของทุกหนึ่งวินาทีช่วงห้า นาทีนั้นๆ ตั้งแต่เวลา 6.00 น. ถึง 18.00 น. ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ ถึงมีนาคม พ.ศ. 2550



(ก)



(ข)

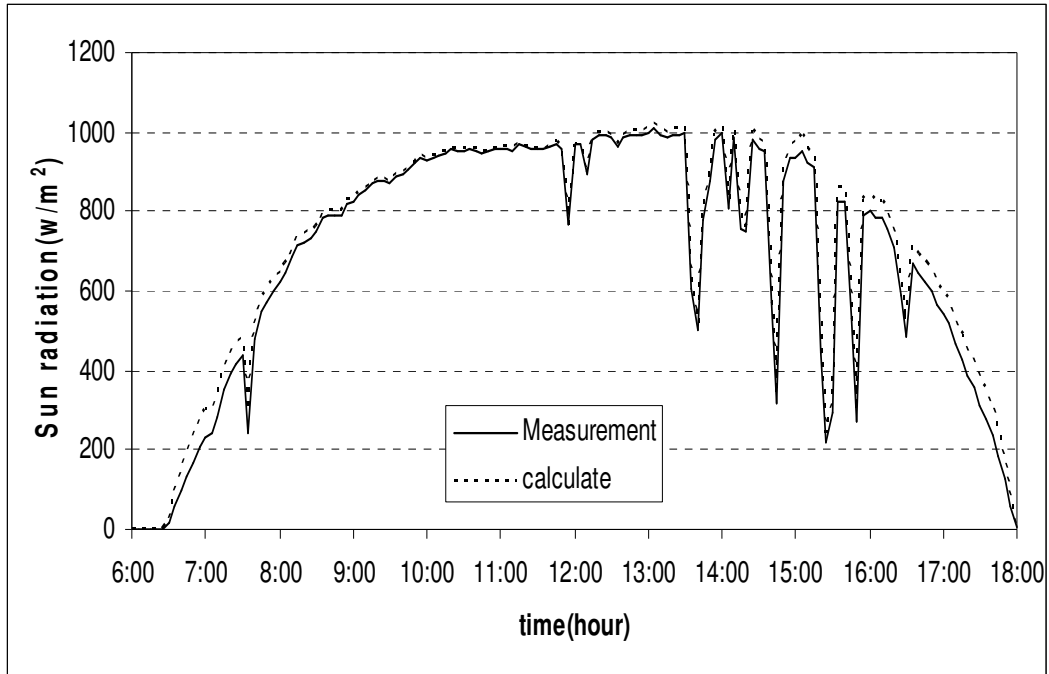
ภาพที่ 6 (ก) ไพรานอมิเตอร์บนแนวราบ (ข) อุปกรณ์วัดรังสีแสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์
การเปรียบเทียบการวัดค่ารังสีแสงอาทิตย์กับการประมาณค่า

การประมาณค่ารังสีของพลังงานแสงอาทิตย์โดยวิธีคำนวณทางคณิตศาสตร์ จากสมการที่ (2) สามารถหาตัวแปร G_{bn} ได้จากสมการที่ (4) จะได้สมการการประมาณค่ารังสีแนวราบโดยอาศัยข้อมูลการวัดแบบติดตามดวงอาทิตย์ (Sun Tracking) ดังสมการที่ (12) และตัวแปร G_{bt} คือค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่เกิดจากการวัดแบบติดตามดวงอาทิตย์

$$G_b = G_{bt} \times \cos \theta_z \quad (12)$$

จากสมการที่ (12) จะได้สมการการประมาณค่ารังสีแบบติดตามดวงอาทิตย์โดยอาศัยข้อมูลการวัดแนวราบดังสมการที่ (13) และตัวแปร G_b คือค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่เกิดจากการวัดในแนวราบ

$$G_{bt} (Calculate) = \frac{G_b}{\cos \theta_z} \quad (13)$$



ภาพที่ 7 เปรียบเทียบค่ารังสีแสงอาทิตย์ระหว่างการวัดแบบติดตามดวงอาทิตย์กับการประมาณค่า

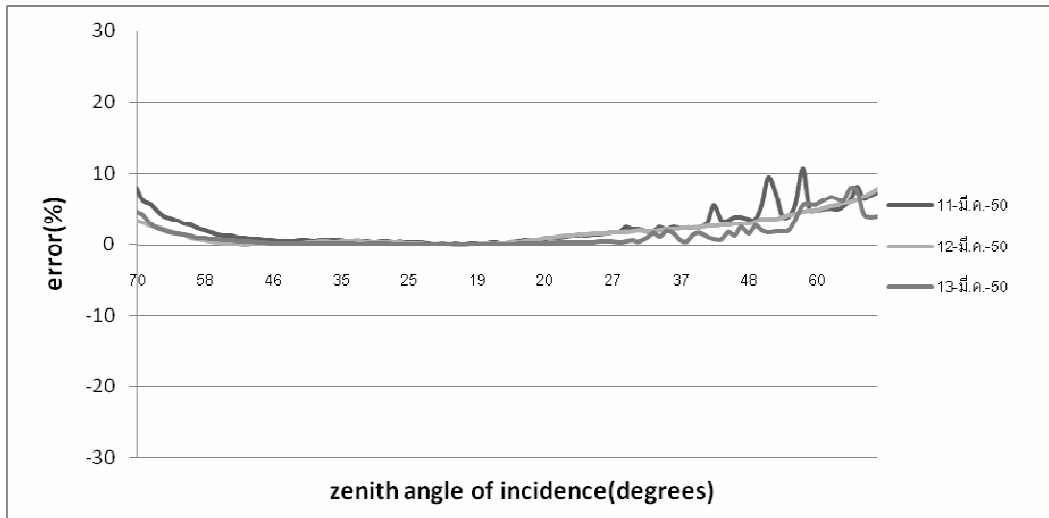
ภาพที่ 7 แสดงผลการเปรียบเทียบค่ารังสีแสงอาทิตย์ระหว่างการวัดแบบติดตามดวงอาทิตย์กับการประมาณค่า ทำการทดลองในวันที่ 11 มี.ค. 2550

ค่าความคลาดเคลื่อน(error) คำนวณได้จากค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่วัดจากไพรานอมิเตอร์แบบติดตามดวงอาทิตย์และการประมาณค่าที่คำนวณจากสมการที่ (13) ดังสมการที่ (14)

$$error = \frac{G_{bt} (Calculate) - G_{bt} (Measurements)}{G_{bt} (Calculate)} \times 100\% \quad (14)$$

$G_{bt} (Measurements)$ คือ ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่วัดจากไพรานอมิเตอร์แบบติดตามดวงอาทิตย์

$G_{bt} (Calculate)$ คือ ประมาณค่าโดยการคำนวณจากสมการที่ 13



ภาพที่ 8 ความคลาดเคลื่อนของรังสีแสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์เปรียบเทียบกับการประมาณค่า

ภาพที่ 8 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของรังสีแสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์เปรียบเทียบกับการประมาณค่าในวันที่ 11 มี.ค. 2550 ถึงวันที่ 13 มี.ค. 2550 จากกราฟพบว่ามีความคลาดเคลื่อนค่ารังสีแสงอาทิตย์ของการวัดที่ Zenith angle of incidence ในช่วง 70 องศา มีความคลาดเคลื่อนบางจุดที่สูงกว่าร้อยละ ± 5 แต่ค่าเฉลี่ยโดยรวมมีความคลาดเคลื่อนต่ำกว่าร้อยละ ± 5 สำหรับการวัดในช่วงที่นอกเหนือจากช่วง 70 องศา จะมีความคลาดเคลื่อนค่ารังสีแสงอาทิตย์มากกว่าร้อยละ ± 5 เพราะในช่วงมุมเกิน 70 องศาเป็นช่วงใกล้รุ่งหรือพลบค่ำ ซึ่งช่วงนี้แสงอาทิตย์เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศที่เป็นระยะทางยาว จึงเกิดรังสีแสงอาทิตย์กระจายในชั้นบรรยากาศมาก การวัดรังสีตรงในช่วงนี้จึงคลาดเคลื่อนสูง จึงไม่มีการนำมาใช้เป็นข้อมูลในการวัดครั้งนี้

สรุป

การเปรียบเทียบค่ารังสีระหว่างการวัดรังสีแบบติดตามดวงอาทิตย์กับการประมาณค่ารังสีโดยการคำนวณจากข้อมูลการวัดรังสีแนวราบ ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงมีนาคม พ.ศ. 2550 ให้ผลไปในแนวทางเดียวกันนี้กับการทดลองในวันที่ 11 มี.ค. 2550 ถึง วันที่ 13 มี.ค. 2550 ซึ่งพบว่ามีความคลาดเคลื่อนต่ำกว่าร้อยละ ± 5 ของ Zenith angle of incidence ในช่วงที่ต่ำกว่า 70

องศา จึงสรุปได้ว่าการหาค่ารังสีตรงแบบวัดด้วยระบบติดตามดวงอาทิตย์นี้ ให้ผลการวัดที่ยอมรับได้สำหรับ การใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบอุปกรณ์รับพลังงานแสงอาทิตย์ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผศ.ดร.อำไพศักดิ์ ทีบุญมา ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้คำปรึกษาอันเป็นประโยชน์ในการศึกษานี้

เอกสารอ้างอิง

- จิรายุ วัฒนา. 2543. การคำนวณค่าพลังงานตกกระทบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งแบบอิเลเวเตอร์และทำการปรับตามดวงอาทิตย์อย่างเป็นขั้น. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ชนกร ลิ้มสุวรรณ, พิสิษฐ์ เตชะรุ่งไพศาล, กุลเชษฐ เพียรทอง และอำไพศักดิ์ ทีบุญมา. 2549. อุปกรณ์ติดตามดวงอาทิตย์สำหรับวัดพลังงานแสงอาทิตย์. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 2 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา 27-29 กรกฎาคม 2549.
- อนุชา ดีผาง, สິงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์ และเจริญพร เลิศสถิตชนกร. 2548. ระบบติดตามดวงอาทิตย์ด้วยอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งดวงอาทิตย์เชิงดิจิทัล. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 1 โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ ซิตี้ จอมเทียน เมืองพัทยา 13 พฤษภาคม 2548.
- Baltas P., Tortoreli M., and Russell P.E. 1989. Evaluation of Power Output for Fixed and Step TRACKING Photovoltaic Arrays. **Solar Energy** 37 (2): 147-163
- Duffie, J. A. and W. A. Beckmen. 1991. **Solar Engineering of Thermal Process**. New York: John Wiley and Sons.
- Khalil A.A., and M.El-singaby. 2004. **Position Control of Sun Tracking System**. IEEE.