

การทดสอบคุณสมบัติเครื่องวัดรังสีอาทิตย์ภาคสนามชนิดซิลิคอนเซลล์แสงอาทิตย์ ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

Characterization of KMUTT's Silicon Photovoltaic Pyranometer

กิตติ ผิวขาว ผศ.ดร. พิชัย นามประกาย และ ธวัชชัย สุวรรณคำ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ABSTRACT - This research is testing and characterization of silicon photovoltaic pyranometer model PY03 which manufacturing by Pilot Plant Development and Training Institute (PDTI) of King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT). The test results in this paper were reported and then compared to commercial pyranometer and second class pyranometer of World Meteorological Organization (WMO). The test and characterized parameters are stability, temperature response, air mass influence, direct irradiance response, diffuse irradiance response, angle of incidence function and non-linearity. The study results shown that PY03's specification is in the same class with commercial silicon photovoltaic pyranometer and most parameters satisfy the specification of WMO second class pyranometer, except for the cosine response.

KEY WORDS - pyranometer, solar radiation, silicon photovoltaic, direct irradiance response, diffuse irradiance response, air mass influence, angle of incidence function

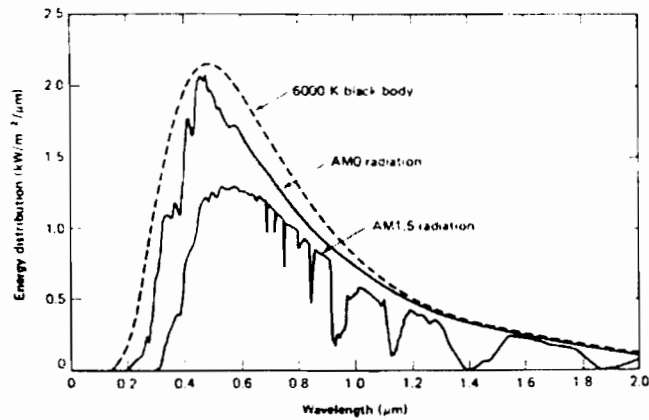
บทคัดย่อ - บทความนี้ได้แสดงวิธีการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ที่สำคัญของการวัดรังสีอาทิตย์โดยซิลิคอนเซลล์แสงอาทิตย์ไพรานอร์มิเตอร์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (มจร.) รวมทั้งได้รายงานและวิเคราะห์ผลการทดสอบเทียบกับไพรานอร์มิเตอร์ชนิดเดียวกันที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ และข้อกำหนดขององค์การอุตุนิยมวิทยาโลกสำหรับไพรานอร์มิเตอร์ระดับชั้นสอง (Second Class) โดยคุณสมบัติที่สำคัญที่ได้กล่าวถึงนี้ได้แก่ คุณสมบัติด้าน Stability ผลของอุณหภูมิแวดล้อม ผลของมวลอากาศ การตอบสนองต่อรังสีตรงและการตอบสนองต่อรังสีกระจาย ผลของมุมตกกระทบและความไม่เป็นเส้นตรงของการตอบสนอง จากผลการทดสอบโดยรวมแล้ว ไพรานอร์มิเตอร์ของ มจร. มีคุณสมบัติเทียบเท่ากับไพรานอร์มิเตอร์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ และมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับข้อกำหนดของไพรานอร์มิเตอร์ชั้นสองขององค์การอุตุนิยมวิทยาโลก

คำสำคัญ - ไพรานอร์มิเตอร์, รังสีอาทิตย์, เซลล์แสงอาทิตย์, การตอบสนองรังสีตรง, การตอบสนองรังสีกระจาย, ผลของมวลอากาศ, ผลของมุมตกกระทบ

1. บทนำ [1]

รังสีอาทิตย์เป็นพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 0.29 – 4 ไมโครเมตร รังสีอาทิตย์มักถูกแบ่งออกเป็น 3 ช่วงคลื่นคือช่วงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 0.29 – 0.4 ไมโครเมตร มีสัดส่วนพลังงานประมาณ 8% ช่วงการมองเห็น (Visible light) อยู่ในช่วงคลื่นย่าน 0.4 – 0.73 ไมโครเมตร มีสัดส่วนพลังงาน

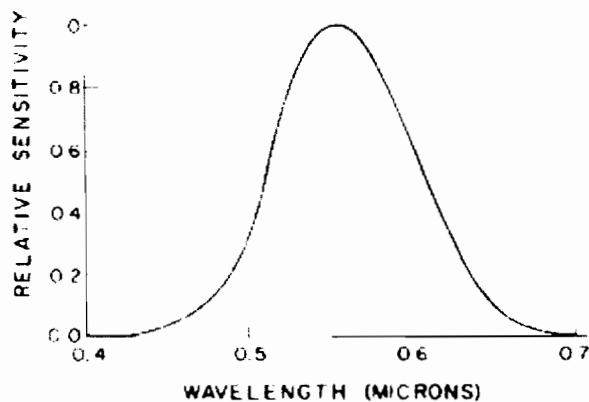
ประมาณ 43% และช่วงสุดท้ายคือช่วงใกล้อินฟราเรด (near infrared) มีความยาวคลื่นในช่วง 0.73 – 4 ไมโครเมตร มีสัดส่วนพลังงานประมาณ 48% ของพลังงานรังสีอาทิตย์ทั้งหมด รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกมีค่าประมาณ 1353 W/m^2 แต่เมื่อผ่านชั้นบรรยากาศโลกลงมาแล้วจะเหลือประมาณ 70% ทั้งนี้เพราะมีบางส่วนถูกสะท้อนหักเห และดูดกลืนโดยชั้นบรรยากาศของโลก ลักษณะสเปกตรัมของรังสีอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงลักษณะสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ที่นอกบรรยากาศโลกและที่บรรยากาศโลกมวลอากาศ 1.5[2]

การวัดรังสีอาทิตย์สำหรับการใช้งานต่างๆ ไปมักถูกแบ่งออกเป็น 3 สาขาใหญ่ๆ ได้แก่ ด้านชีววิทยา ด้านส่องสว่าง และด้านพลังงานแสงอาทิตย์ รังสีอาทิตย์ด้านชีววิทยานี้เรียกว่า “พาร์” (Photosynthetically Active Radiation (PAR))[3] ช่วงความยาวคลื่นสำหรับงานด้านดังกล่าวค่าที่ยอมรับกันมากที่สุดในปัจจุบันคือช่วง 0.4 – 0.7 ไมโครเมตร เซนเซอร์ที่ใช้วัดเรียกควอนตัมเซนเซอร์ (Quantum Sensor) โดยใช้วัดจำนวน โฟตรอนต่อพื้นที่ต่อเวลาในช่วงความยาวคลื่นพาร์ ($\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$) สำหรับการวัดด้านส่องสว่างนั้นอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 0.4 – 0.7 ไมโครเมตรเช่นกัน[4] แต่จะอ้างอิงลักษณะการตอบสนองของดวงตามนุษย์ ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2 โดยมีลักษณะเป็นรูปประจักษ์กว่า มีการตอบสนองได้ดีที่สุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 0.55 ไมโครเมตร หน่วยที่ใช้บอกปริมาณการส่องสว่างโดยทั่วไปมีอยู่ 3 แบบคือ Lux (Lumen/m^2), Phot (Lumen/cm^2) และ Foot-

candle (Lumen/ft^2) ส่วนการวัดสำหรับงานด้านพลังงานนั้น ต้องวัดทุกช่วงความยาวคลื่นของรังสีอาทิตย์ การวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ในงานด้านนี้นั้นนิยมวัดในหน่วย วัตต์/ตารางเมตร สำหรับการวัดพลังงานรายวันแล้วจะวัดในหน่วย กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ตารางเมตร หรืออาจวัดในหน่วยเมกกะจูล/ตารางเมตร หรือ cal/cm^2 องค์การอุตุนิยมวิทยาโลก (World Meteorological Organization (WMO)) แบ่งเครื่องวัดรังสีอาทิตย์ประเภทที่ใช้วัดรังสีรวม หรือที่เรียกว่าไพรานอร์มิเตอร์ ออกเป็น 3 ระดับ[5] โดยมีคุณสมบัติต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 ปัจจุบันไพรานอร์มิเตอร์ที่ได้ตามเกณฑ์ระดับ Secondary standard และระดับชั้น 1 (First Class) เป็นเครื่องวัดที่ใช้เซนเซอร์แบบเทอร์โมไฟล์



ตารางที่ 1 การแบ่งระดับเครื่องวัดรังสีรวมโดย WMO และคุณสมบัติของ PY03

Specification	Secondary standard	1 st Class	2 nd Class	PY03
Resolution ($W m^{-2}$)	± 1	± 5	± 10	$<\pm 10$
Stability(% full scale change per year)	± 1	± 2	± 5	-1.36
Cosine response (% maximum deviation from ideal at 10 degree solar elevation on a clear day)	± 3	± 7	± 15	-30
Azimuth response (% deviation from mean at 10 degree solar elevation on a clear day)	± 3	± 5	± 10	± 2
Temperature response (% max error due to changes of ambient temperature %)	± 1	± 2	± 5	± 0.5
Non-linearity (% of full scale)	± 0.5	± 2	± 5	± 1
Spectral selectivity (% deviation from mean absorptance 0.3 to 3 μm)	± 2	± 5	± 10	± 2
Response Time (99% response)	25 s	1 min	4 min	0.5 μs

ส่วนเซนเซอร์แบบเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะอยู่ในเกณฑ์ระดับชั้นสองเท่านั้น ไพรานอร์มิเตอร์ระดับ Secondary Standard เหมาะสำหรับใช้วัดความเข้มรังสีอาทิตย์ประจำสถานีวัดรังสีอาทิตย์ที่ซึ่งข้อมูลที่ได้ต้องการความเชื่อมั่นสูง เพื่อการนำไปใช้ประโยชน์สำหรับงานต่างๆ เช่น ใช้เพื่อการออกแบบระบบพลังงานแสงอาทิตย์ในพื้นที่นั้นๆ หรือเหมาะที่จะใช้เป็นเครื่องวัดรังสีอาทิตย์อ้างอิงสำหรับการสอบเทียบไพรานอร์มิเตอร์ระดับชั้น 1 และไพรานอร์มิเตอร์ระดับชั้น 2 สำหรับการตรวจเช็คและการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ในระยะสั้นนั้น ไพรานอร์มิเตอร์ระดับชั้น 1 นับว่ามีความเหมาะสมกับงานดังกล่าว ส่วนไพรานอร์มิเตอร์ระดับชั้น 2 โดยเฉพาะอย่างยิ่งไพรานอร์มิเตอร์ชนิดเซลล์แสงอาทิตย์เหมาะสำหรับใช้เพื่อติดตามการทำงานของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ระยะยาว หรือติดตามการทำงานของระบบฯ ในลักษณะคุณภาพรวมรายเดือน หรือทั้งปี เพราะเป็นเซนเซอร์ที่สร้างได้ในราคาที่ต่ำ ทำให้สามารถจัดหาไปใช้งานได้เป็นจำนวนมาก

2. การทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของไพรานอร์มิเตอร์ชนิดเซลล์แสงอาทิตย์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (มจธ.) [1,6,7]

มจธ. ได้เล็งเห็นความจำเป็นที่ต้องสร้างเครื่องวัดรังสีอาทิตย์ภาคสนาม อันเนื่องมาจากราคาที่สูงเมื่อต้องนำเข้าจากต่างประเทศ และการสอบเทียบตลอดจนการซ่อมบำรุงรักษาที่สามารถทำได้โดยง่าย หากสร้างขึ้นใช้งานเองได้ โดยการสนับสนุนทุนวิจัยจากศูนย์อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ทำให้ มจธ. สามารถพัฒนาไพรานอร์มิเตอร์ภาคสนามรุ่น PY03 ได้เป็นผลสำเร็จ[8] จนถึงปัจจุบัน มจธ. ได้ผลิต PY03 ทั้งใช้งานเองและจำหน่ายรวมแล้วกว่า 70 เครื่อง

จากการทดสอบคุณสมบัติด้านต่างๆ แสดงให้เห็นว่า PY03 มีสมรรถนะที่ไม่เป็นรองไพรานอร์มิเตอร์ชนิดเดียวกันที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ในต่างประเทศ ดังรายละเอียดที่จะกล่าวดังต่อไปนี้

2.1 การทดสอบ Stability

เมื่อไพรานอรัมิเตอร์ถูกใช้งานไปแล้ว อัตราการตอบสนอง (Sensitivity) ของไพรานอรัมิเตอร์จะลดลงตามระยะเวลาที่ถูกใช้งาน สำหรับไพรานอรัมิเตอร์ระดับชั้น 2 ตามที่กำหนดโดย WMO นั้น ขอมให้ค่าดังกล่าวเปลี่ยนแปลงได้ไม่เกิน $\pm 5\%$ ต่อปี

การทดสอบการเปลี่ยนแปลงนี้ทำโดยนำ PY03 ที่ใช้งานมาแล้วอย่าง ต่อเนื่องเป็นเวลา 1 ปี มาทำการสอบเทียบด้วยวิธีเดิมคือการสอบเทียบ ตามมาตรฐาน ISO9847 ความถูกต้องของเครื่องมือที่ใช้ในการสอบ เทียบใช้เครื่องมือระดับเดิม โดยมีรายละเอียดของการสอบเทียบดังนี้

- Procedure
: ISO9847E-1992
- Sun Elevation Angle of Measuring
: > 20 Degree
- Voltage Recorder
: Campbell 21X Micro logger
- Reference Pyranometer
: Class / WMO Secondary Standard
: Manufacture / Kipp&Zonen
: Model / CM11

2.2 การทดสอบผลของอุณหภูมิ

กระแสลัดวงจรของซิลิคอนเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ อุณหภูมิเพิ่มขึ้น การทดสอบการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวของ PY03 ทำ โดยนำ PY03 ไปทดสอบในตู้แสงอาทิตย์เทียมที่สามารถปรับอุณหภูมิ ได้ สถานะที่ทำการทดสอบทำในช่วงอุณหภูมิภายในตู้เปลี่ยนจาก 25 องศาเซลเซียสเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึง 60 องศาเซลเซียส ในขณะที่ ความเข้มแสงคงที่ ที่ 1000 วัตต์/ตารางเมตร ทำการบันทึกสัญญาณ เอาท์พุทและอุณหภูมิภายในตู้อย่างต่อเนื่องทุกๆ 1 วินาทีตลอดช่วง ทดสอบ สุดท้ายจะนำผลที่ได้มาดูความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเอาท์พุทต่อการเพิ่มของอุณหภูมิ

2.3 การทดสอบผลของมวลอากาศ

สเปคตรัมรังสีอาทิตย์จะเปลี่ยนแปลงตลอดทั้งวัน อิทธิพลที่ทำให้ ลักษณะของสเปคตรัมของรังสีอาทิตย์เปลี่ยนไปคือ ค่ามวลอากาศ ค่า มวลอากาศจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของดวงอาทิตย์เป็นหลัก โดยประมาณ แล้วกำหนดให้ค่ามวลอากาศคำนวณได้ดังสมการที่ 1

$$\text{มวลอากาศ} = 1/\cos \theta_z \tag{1}$$

θ_z คือ มุมซันนิต

การทดสอบผลของมวลอากาศต่อการวัดรังสีอาทิตย์โดยไพรานอรั มิเตอร์ชนิดเซลล์แสงอาทิตย์นั้น อีกนัยหนึ่งก็คือการทดสอบผลของ การเปลี่ยนแปลงของสเปคตรัมรังสีอาทิตย์นั่นเอง ทั้งนี้เพราะซิลิคอน เซลล์แสงอาทิตย์ตอบสนองต่อสเปคตรัมเฉพาะในช่วง 0.4 – 1.1 ไมโครเมตรเท่านั้น และตอบสนองได้ไม่เท่ากันทุกสเปคตรัม ในขณะที่ รังสีอาทิตย์จะอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 0.29 – 4 ไมโครเมตร ซึ่ง กว้างกว่าช่วงการตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์ จากเหตุผลดังกล่าว ทำให้อัตราการตอบสนองของไพรานอรัมิเตอร์ชนิดเซลล์แสงอาทิตย์ เปลี่ยนไปตามการเปลี่ยนแปลงของสเปคตรัม

การทดสอบผลของมวลอากาศทำในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส โดยนำ PY03 ไปวัดเทียบกับไพรานอรัมิเตอร์ชนิดที่การเปลี่ยนแปลงของสเปคตรัม ไม่มีผลต่ออัตราการตอบสนองคือ ไพรานอรัมิเตอร์ชนิดเทอร์โมโพลี ทำการวัดเทียบที่มวลอากาศค่าต่างๆ ซึ่งครอบคลุมสภาพอากาศทั้งวัน ในขณะที่ทำการวัดเทียบนั้น มุมตกกระทบมีค่าเท่ากับ 0 ตลอด เพราะ ไม่ต้องการให้มีอิทธิพลของตัวแปรอื่น ซึ่งทำได้โดยปรับระนาบรับ แสงของไพรานอรัมิเตอร์ทั้งสองตั้งฉากกับแนวรังสีตรงของ ดวงอาทิตย์ ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะนำมาวิเคราะห์ดูความ สัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการตอบสนองกับมวลอากาศค่าต่างๆ

2.4 การทดสอบเพื่อหาอัตราการตอบสนองต่อรังสีตรงและ รังสีกระจาย

ซิลิคอนเซลล์แสงอาทิตย์ไพรานอรัมิเตอร์ให้ผลการตอบสนองต่อรังสี ตรงและรังสีกระจายต่างกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากลักษณะของสเปคตรัม ของรังสีตรงและรังสีกระจายต่างกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาถึง การตอบสนองต่อรังสีตรงและรังสีกระจายว่าจะให้ผลต่างกันมากน้อย เพียงใด

2.4.1 การทดสอบเพื่อหาอัตราการตอบสนองต่อรังสี กระจาย

การทดสอบทำโดยการติดตั้ง PY03 พร้อมวงแหวนบังรังสีตรงและ ไพรานอรัมิเตอร์อ้างอิง (Kipp&Zonen CM11) ที่ใช้วงแหวนบังรังสี ตรงขนาดเดียวกัน ติดตั้งอยู่ในบริเวณเดียวกัน ทำให้สามารถประมาณ ได้ว่า ไพรานอรัมิเตอร์ทั้งสองได้รับรังสีกระจายในลักษณะและ ปริมาณเดียวกัน ทำการวัดและบันทึกข้อมูลจากไพรานอรัมิเตอร์ทั้ง สอง แล้วนำข้อมูลที่ได้ออกมาหาอัตราการตอบสนองต่อรังสีกระจาย

ของ PY03 โดยเทียบระหว่างสัญญาณ ไฟฟ้าที่ได้จาก PY03 กับความเข้มรังสีกระจายที่วัดโดยไพรานอร์มิเตอร์อ้างอิงชนิดเทอร์โมไฟล์

2.4.2 การหาอัตราการตอบสนองต่อรังสีตรง

การหาค่าอัตราการตอบสนองต่อรังสีตรงจะอาศัยข้อมูลจากการทดสอบผลของมวลอากาศในข้อ 2.3 ผลของอุณหภูมิในข้อ 2.2 และอัตราการตอบสนองต่อรังสีกระจายในข้อ 2.4.1 โดยมีลำดับของการคำนวณดังต่อไปนี้

- ก. ปรับข้อมูลที่ได้ในข้อ 2.3 ทุกข้อมูลไปยังสภาวะอ้างอิงที่มวลอากาศ 1.5 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสดังนี้

$$R(AM = 1.5, T=30) = R(AMa) / ((f(AMa) * (1 - \alpha(30 - T_a))) \quad (2)$$

$f(AMa)$ คือ ฟังก์ชันผลของมวลอากาศ

α คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ

T_a คือ อุณหภูมิแวดล้อม, องศาเซลเซียส

- ข. ข้อมูลที่ได้จากการปรับไปยังสภาวะมวลอากาศ 1.5 และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จะประกอบด้วยผลของรังสีตรงและรังสีกระจายดังสมการที่ 3

$$R(AM = 1.5, T = 30) = G_{dni} * C1 + G_{diff} * C2 \quad (3)$$

R คือ สัญญาณจากไพรานอร์มิเตอร์, μV

$C1$ คือ อัตราการตอบสนองต่อรังสีตรง, $\mu V/W/m^2$

$C2$ คือ อัตราการตอบสนองต่อรังสีกระจาย, $\mu V/W/m^2$

G_{dni} คือ รังสีตรง, W/m^2

G_{diff} คือ รังสีกระจาย, W/m^2

ค่ารังสีตรงได้จากค่ารังสีรวมลบด้วยค่ารังสีกระจาย ซึ่งทั้งสองค่าทำการวัดมาแล้วในขณะที่ค่าอัตราการตอบสนองต่อรังสีกระจายทำการทดสอบมาแล้วในข้อ 2.4.1 ดังนั้นจึงสามารถคำนวณหาค่าอัตราการตอบสนองต่อรังสีตรงได้ในที่สุด

2.5 การทดสอบผลของมุมตกกระทบ

มุมตกกระทบ(AOI) นับเป็นอิทธิพลหลักอย่างหนึ่งที่มีผลต่อการวัดรังสีอาทิตย์ อันเนื่องมาจากธรรมชาติของผิวรับแสงโดยทั่วไป รวมทั้งเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยที่ไม่สามารถดูดกลืนแสงได้เท่ากันทุกมุมตกกระทบ การพิจารณาผลของมุมตกกระทบจะทำการพิจารณาค่าอัตรา

การตอบสนองต่อรังสีตรงที่มุมตกกระทบต่างๆ เทียบกับที่มุมตกกระทบ 0 องศา ซึ่งมีขั้นตอนของการทดสอบดังนี้

- ก. ติดตั้งไพรานอร์มิเตอร์อ้างอิง และ PY03 ในระนาบที่สามารถรับรังสีตรงในช่วงมุม 0 – 90 องศาของวันที่ทำการทดสอบ
- ข. ทำการวัดและบันทึกค่ารังสีตรงจากไพโรลิโอมิเตอร์ รังสีรวมจาก PY03 และไพรานอร์มิเตอร์อ้างอิง รวมทั้งค่าอุณหภูมิแวดล้อม
- ค. นำข้อมูลที่ได้ในข้อ ข. มาหาฟังก์ชัน หรือผลของมุมตกกระทบตามสมการที่ 4

$$f(AOI) = (R(AM=1.5, T=30) - C2 * G_{diff}) / (C1 * G_{dni} * \cos(AOI)) \quad (4)$$

2.6 การหาความไม่เป็นเส้นตรงของการตอบสนอง (Non - Linearity)

ISO นิยามความไม่เป็นเส้นตรงของการตอบสนองของไพรานอร์มิเตอร์ไว้ว่า คือค่าเปอร์เซ็นต์การเบี่ยงเบนของค่าอัตราการตอบสนองในช่วงความเข้มรังสีอาทิตย์ 100 – 1000 วัตต์/ตารางเมตร เทียบกับค่าอัตราการตอบสนองที่ 500 วัตต์/ตารางเมตร การวิเคราะห์หาค่าความไม่เป็นเส้นตรงของการตอบสนองทำได้โดยนำข้อมูลที่ได้ในข้อ 2.5 มาปรับข้อมูลไปยังสภาวะเดียวกันคือที่มวลอากาศ 1.5 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส มุมตกกระทบ 0 องศา ซึ่งจะทำให้ข้อมูลที่ได้จากการปรับดังกล่าวเป็นผลเนื่องจาก ความไม่เป็นเส้นตรงของการตอบสนองเป็นหลักเท่านั้น โดยทำการปรับข้อมูลตามสมการที่ 5

$$R(AM = 1.5, T=30, AOI = 0) = (R_{ms} / (f(AMa) * f(T)) - C2 * G_{diff}) / (f(AOI) + C2 * G_{diff}) \quad (5)$$

R_{ms} คือ สัญญาณจากไพรานอร์มิเตอร์ที่ได้จากการวัด (μV)

$f(AMa)$ คือ ฟังก์ชันผลของมวลอากาศ

$f(AOI)$ คือ ฟังก์ชันผลของมุมตกกระทบ

$f(T)$ คือ ฟังก์ชันผลของอุณหภูมิ = $(1 - \alpha(30 - T_a))$

$C1$ คือ อัตราการตอบสนองต่อรังสีตรง, $\mu V/W/m^2$

3. ผลการทดสอบและวิจารณ์ [1]

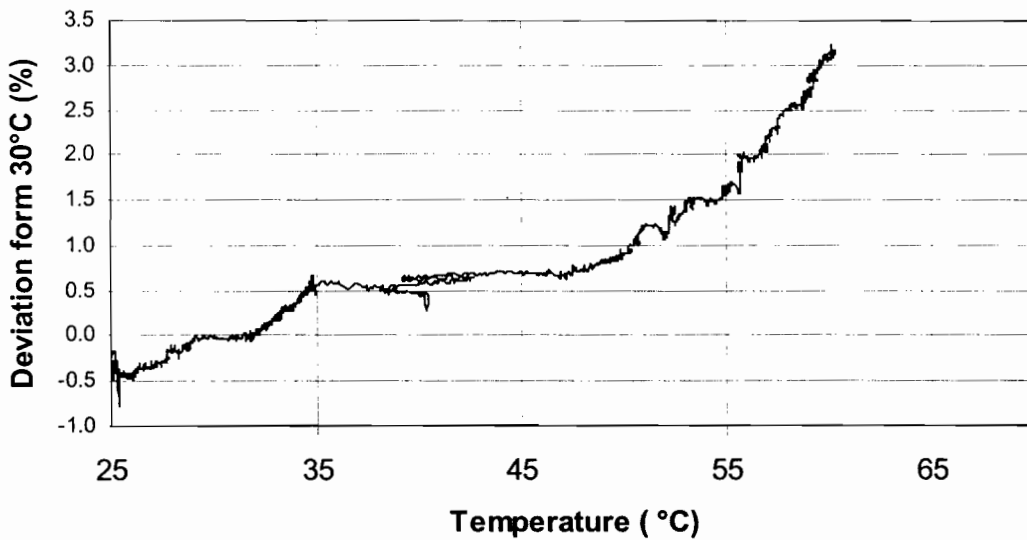
3.1 ผลการทดสอบค่า Stability

จากการทดสอบได้ผลดังนี้คือ การสอบเทียบครั้งแรกได้ค่าอัตราการตอบสนองเท่ากับ $18.46 \mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$ หลังจากใช้งานไปแล้ว 1 ปี ทำการสอบเทียบอีกครั้งได้ค่าอัตราการตอบสนองเท่ากับ $18.20 \mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$ ลดลงไปจากเดิม 1.36% ผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับไพรานอร์มิเตอร์ชนิดเดียวกันที่มีขายเชิงพาณิชย์ในปัจจุบัน ซึ่งระบุค่าการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวไว้ที่ $\pm 2\%$ ต่อปี สำหรับข้อกำหนดของ WMO นั้น กำหนดค่าดังกล่าวไว้ที่ไม่เกิน $\pm 5\%$ ต่อปี ดังนั้นจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่า PY03 ได้มาตรฐานตามข้อกำหนดของ WMO ในเรื่องนี้

3.2 ผลการทดสอบผลของอุณหภูมิแวดล้อม

รูปที่ 3 แสดงการทดสอบผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราการตอบสนอง จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่า PY03 ให้อัตราการตอบสนองเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิโดยมีค่าอัตราการตอบสนองเพิ่มขึ้นประมาณ 0.1% ต่อองศาเซลเซียส ในสภาพแวดล้อมประเทศไทย อุณหภูมิเฉลี่ยตอนกลางวันอยู่ในช่วงประมาณ 25 – 35 องศาเซลเซียส ดังนั้นผลคลาดเคลื่อนจากการวัดอันเนื่องมาจากผลของอุณหภูมิจะอยู่ในช่วงประมาณ $\pm 0.5\%$ WMO กำหนดผลคลาดเคลื่อนดังกล่าวสำหรับไพรานอร์มิเตอร์ชั้น 2 ไว้ไม่เกิน $\pm 5\%$ ดังนั้นจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่า PY03 ผ่านเกณฑ์ตามข้อกำหนดดังกล่าวของ WMO

Temperature response of KMUTT's Pyranometer
Serial No 060301 8 Sep 2003



รูปที่ 3 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุต (%) ของ PY03 เทียบกับที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส [1]

3.3 ผลของมวลอากาศ

จากการทดสอบได้ผลของมวลอากาศดังแสดงในรูปที่ 4 โดยพบว่ามวลอากาศค่ามากขึ้นจะทำให้อัตราการตอบสนองมีค่ามากขึ้นไปด้วย ลักษณะของความสัมพันธ์เป็นแบบลือกการที่ม ในช่วงมวลอากาศ 1 – 2.5 มีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากผลของมวลอากาศที่เปลี่ยนแปลงประมาณ $\pm 2\%$ เทียบกับที่มวลอากาศ 1.5 ซึ่งกว่า 95% ของพลังงานแสงอาทิตย์ที่กรุงเทพมหานครจะอยู่ในช่วงมวลอากาศนี้ ดังนั้นจึงถือ

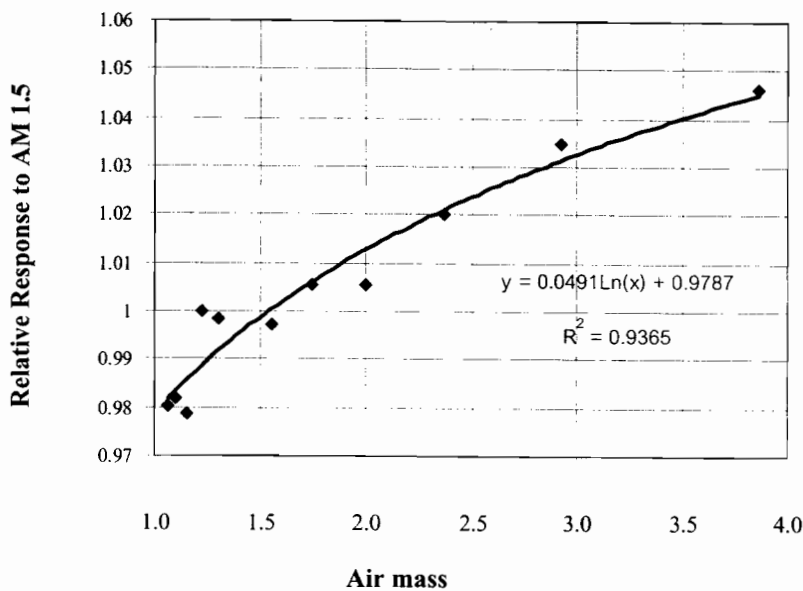
ได้ว่าความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากผลของมวลอากาศ หรืออีกนัยหนึ่งคือผลของสเปคตรัมของ PY03 มีค่าประมาณ $\pm 2\%$ ตามข้อกำหนดของ WMO แล้วยอมให้มีค่าได้ไม่เกิน $\pm 10\%$ สำหรับไพรานอร์มิเตอร์ระดับชั้น 2 ดังนั้นจึงถือได้ว่าไพรานอร์มิเตอร์ที่ทำการทดสอบนี้ผ่านข้อกำหนดตามเกณฑ์ของ WMO ส่วนไพรานอร์มิเตอร์ชนิดเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขายเชิงพาณิชย์ชนิดซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว (Single Crystal) มีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากผลของมวลอากาศในระดับเดียวกันกับผลการทดสอบนี้ แต่แบบที่เป็นชนิดอะมอร์ฟัส

ซิลิคอนจะมีค่าคลาดเคลื่อนมากกว่านี้ โดยมีค่าในช่วงลบ 5 – 10% ทั้งนี้เพราะมีการตอบสนองสเปกตรัมที่แคบกว่าแบบผลึกเดี่ยว คือตอบสนองเฉพาะช่วงคลื่น 0.3 – 0.9 ไมโครเมตรเท่านั้น

3.4 ผลการตอบสนองต่อรังสีตรงและรังสีกระจาย

จากการทดสอบได้ค่าอัตราการตอบสนองต่อรังสีตรงและรังสีกระจายแตกต่างกันโดยอัตราการตอบสนองต่อรังสีตรงของ PY03 มีค่ามาก

กว่าอัตราการตอบสนองต่อรังสีกระจายประมาณ 4.45% ดังนั้นในการพิจารณาเลือกค่าอัตราการตอบสนอง จำเป็นต้องคำนึงถึงลักษณะสภาพแวดล้อมที่จะนำไปใช้งานหรือช่วงเวลาดังกล่าวว่า สัดส่วนระหว่างรังสีตรงและรังสีกระจายมีลักษณะเป็นอย่างไร ซึ่งจะทำให้สามารถเลือกอัตราการตอบสนองที่เหมาะสม ทำให้สามารถวัดค่าได้ดี และไม่ผิดพลาดจนเกินไป



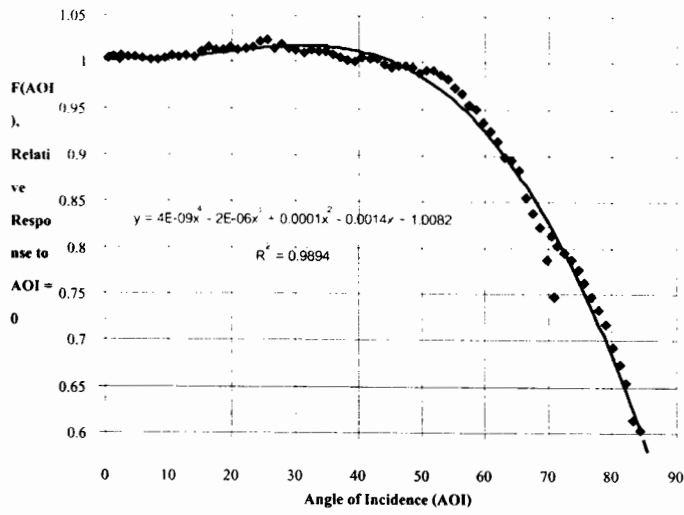
รูปที่ 4 แสดงผลของมวลอากาศต่ออัตราการตอบสนองของ PY03[1]

3.5 ผลการทดสอบผลของมุมตกกระทบ

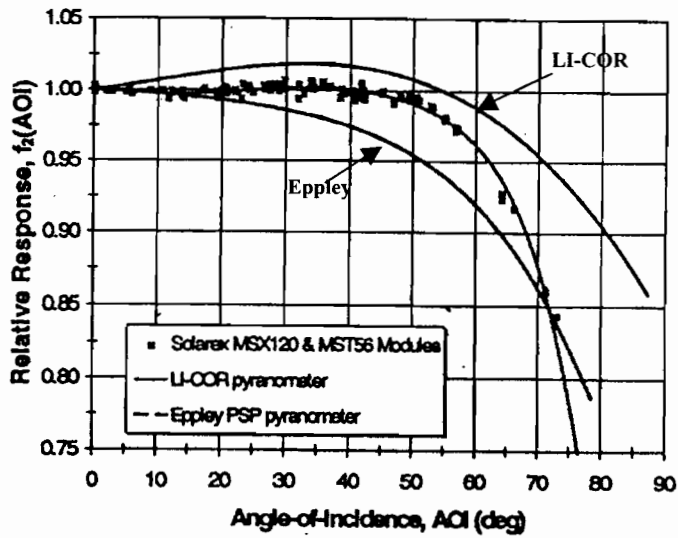
ผลการทดสอบผลของมุมตกกระทบแสดงดังรูปที่ 5 โดยพบว่า PY03 ให้ผลการตอบสนองต่อรังสีตรงค่อนข้างคงที่ที่มุม 0 – 50 องศา หลังจากนั้นจะให้การตอบสนองต่อรังสีตรงลดลง โดยที่มุมตกกระทบที่ 60 องศา การตอบสนองต่อรังสีตรงลดลงไปประมาณ 5% หลังจากนั้นจะลดลงในอัตราที่ค่อนข้างมาก และเมื่อพิจารณาเทียบกับข้อกำหนดของ WMO แล้วพบว่าไม่ได้ตามเกณฑ์ของไพรานอร์มิเตอร์ระดับชั้น 2 แต่เมื่อเทียบกับเซนเซอร์ชนิดเดียวกันที่มีขายเชิงพาณิชย์แล้ว ดังแสดงในรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่า PY03 มีผลของมุมตกกระทบใกล้เคียงกับไพรานอร์มิเตอร์ของ Solarex และมีผลที่ดีกว่าเซนเซอร์ของ Eppley รุ่น PSP เมื่อเปรียบเทียบกับของ Licor แล้ว ช่วงมุมตกกระทบ 0 – 50 องศา PY03 มีการตอบสนองที่ดีกว่า แต่ที่มุมตกกระทบสูงกว่า 60 องศา ไพรานอร์มิเตอร์ของ Licor จะตอบสนองได้ดีกว่า เมื่อพิจารณาการใช้งานที่สภาวะแวดล้อมกรุงเทพมหานครแล้วพบว่า ประมาณ 90% ของ

พลังงานรังสีตรงจะอยู่ในช่วงมุมตกกระทบ 0 – 60 องศา (เซนเซอร์อยู่ในแนวระดับ) ดังนั้นที่มุมตกกระทบสูงๆ อิทธิพลเนื่องจากความคลาดเคลื่อนดังกล่าวจะน้อย ถึงแม้ว่าผลคลาดเคลื่อนในส่วนที่เนื่องจกมุมตกกระทบจะมากก็ตาม ทั้งนี้เพราะในช่วงดังกล่าวปริมาณรังสีตรงต่อปริมาณรังสีรวมมีค่าน้อย

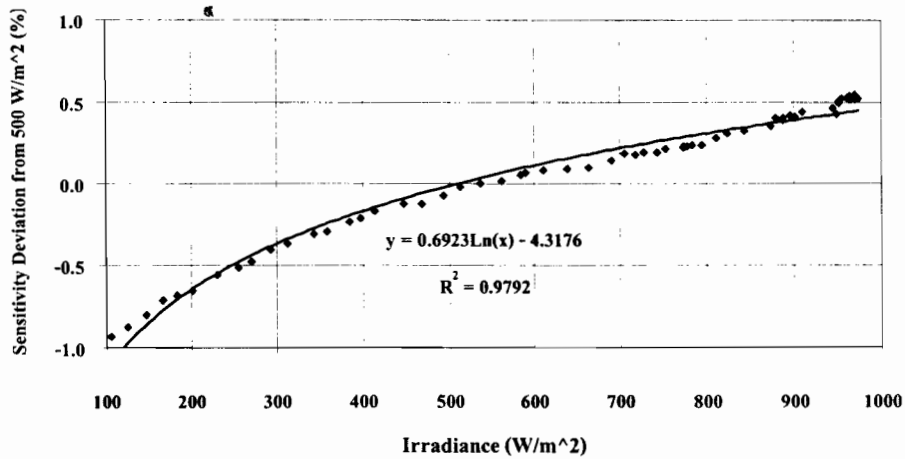
แนวทางการปรับปรุงให้มีคุณสมบัติดีขึ้น และได้ตามมาตรฐานของไพรานอร์มิเตอร์ชั้น 2 ของ WMO อาจทำได้โดยการปรับเปลี่ยนลักษณะของตัวกระจายแสงซึ่งมีลักษณะแบบแบนราบให้มีลักษณะนูนขึ้น เพื่อให้สามารถรับแสงได้มากขึ้นที่มุมตกกระทบค่าสูงๆ ดังเช่นไพรานอร์มิเตอร์ที่มีขายเชิงพาณิชย์ในปัจจุบัน



รูปที่ 5 แสดงผลการทดสอบผลของมุมตกกระทบของ PY03[1]



รูปที่ 6 แสดง $f_r(AOI)$ ของเซนเซอร์เชิงพาณิชย์ในปัจจุบัน[6]



รูปที่ 7 แสดงความไม่เป็นเส้นตรงของการตอบสนอง[1]

3.6 ผลการทดสอบความไม่เป็นเส้นตรงของการตอบสนอง

ผลการทดสอบความไม่เป็นเส้นตรงของการตอบสนองแสดงดังรูปที่ 7 โดยพบว่ามีความไม่ตรงในช่วงไม่เกิน $\pm 1\%$ PY03 จะตอบสนองได้มากขึ้นที่ความเข้มแสงอาทิตย์มากขึ้น จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่า PY03 ได้ตามเกณฑ์ที่กำหนดโดย WMO สำหรับไพรานอร์มิเตอร์ระดับชั้น 2 ซึ่งกำหนดไว้ที่ไม่เกิน $\pm 5\%$ และมีค่าเท่ากับไพรานอร์มิเตอร์ที่มีขายเชิงพาณิชย์ในปัจจุบัน

4. สรุป

บทความนี้ได้อธิบายการทดสอบคุณสมบัติไพรานอร์มิเตอร์ชนิดซิลิคอนโซล่าเซลล์ และได้รายงานผลการทดสอบพร้อมทั้งทำการวิเคราะห์ผลดังกล่าวอีกด้วย จากการทดสอบพบว่า PY03 มีค่าการเปลี่ยนแปลงของอัตรา การตอบสนองประมาณ -1.36% ต่อปี ผลของอุณหภูมิแวดล้อมต่อการวัดรังสีอาทิตย์มีค่าประมาณ 0.1% ต่อองศาเซลเซียส ผลของมวลอากาศทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน ประมาณ $\pm 2\%$ PY03 มีอัตราการตอบสนองต่อรังสีตรงสูงกว่าการตอบสนองต่อรังสีกระจายประมาณ 4.45% และมีผลคลาดเคลื่อนเนื่องจากมุมตกกระทบประมาณ $\pm 2\%$ ช่วงมุมตกกระทบ $0-50$ องศา และ -15% ในช่วงมุมตกกระทบ $50-70$ องศา นอกจากนี้ผลการทดสอบ PY03 ด้านความไม่เป็นเส้นตรงของการตอบสนองได้ค่าประมาณ $\pm 1\%$ ในช่วงความเข้มรังสีอาทิตย์ 100 ถึง 1000 วัตต์/ตารางเมตร เมื่อพิจารณาผลการทดสอบโดยรวมแล้ว PY03 มีคุณสมบัติเทียบเท่ากับไพรานอร์มิเตอร์ชนิดเดียวกันที่มีขายเชิงพาณิชย์ในปัจจุบัน และมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับคุณสมบัติของไพรานอร์มิเตอร์ชั้น 2 ขององค์การอุตุนิยมวิทยาโลก

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รศ.ดร. เสริม จันทร์ฉาย จากมหาวิทยาลัยศิลปากร และ คุณพิพัฒน์ ชัยวิวัฒน์กุล จาก Asian Institute of Technology ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือเพื่อการทดสอบคุณสมบัติของไพรานอร์มิเตอร์นี้

เอกสารอ้างอิง

[1] กิตติ ศิวขาว, 2546, " การสอบเทียบและการปรับปรุงความไวของเครื่องวัดรังสีอาทิตย์ภาคสนามของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี", วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 145 หน้า

- [2] Green A. Martin, 1992, Solar Cells Operating Principles Technology and System Application, First Edition, Prentice-Hall, Inc., pp9-11
- [3] J. Ross and M. Sulev, January 2000, "Source of errors in measurement of PAR", Journal of Agricultural and Forest Meteorology, Volume 100, Issues 2-3, pp103-125
- [4] Coulson, Kinsell L., 1975, "Solar and Terrestrial Radiation", First Edition, Academic Press, Inc., New York, USA, 322 pages
- [5] URL: <http://www.pmodwrs.ch/pmod.php?topic=wrc>
- [6] David L. King and Darly R. Myers, 1997, "Silicon Photodiode Pyranometers: Operation Characteristics, Historical Experiences and New Calibration Procedures, 26th PVSC, Anaheim, CA, pp1285 – 1288
- [7] David L. King, Jay A. Kratochvil and William E. Boyson, 1997, "Measuring Solar Spectral and Angle of Incidence Effects on Photovoltaic Modules and Solar Irradiance Sensors", 26th PVSC, Anaheim, CA, pp1113 – 1116
- [8] ธวัชชัย สุวรรณคำ, 2537, รายงานความก้าวหน้าโครงการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประกอบระบบโซล่าเซลล์เชิงพาณิชย์ระยะที่ 2, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เสนอต่อสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ สาขาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์, 22 หน้า