



การพัฒนาระบบสอบเทียบเครื่องวัดรังสีอากาติยต์ตามมาตรฐานขององค์การมาตรฐานสากล



โดย
นายภาสกร เตชไค่น

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การพัฒนาระบบสอบเทียบเครื่องวัดรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐานขององค์การมาตรฐานสากล



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**DEVELOPMENT OF SYSTEMS FOR THE CALIBRATION OF SOLAR MEASURING
INSTRUMENTS FOLLOWING THE CALIBRATION STANDARDS OF THE
INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION**



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree

Master of Science Program in Physics

Department of Physics

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2015

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “การพัฒนาระบบสอบ
เทียบเครื่องวัดรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐานขององค์การมาตรฐานสากล” เสนอโดย นายภาสกร เดชไค้น
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ธารทัศน์วงศ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

1. รองศาสตราจารย์ ดร.เสริม จันทร์ฉาย
2. อาจารย์ ดร.สมเจตน์ ภัทรพานิชชัย

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. วิรุพห์ สายคณิต)

...../...../.....

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริชัย เทพา)

...../...../.....

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.เสริม จันทร์ฉาย)

...../...../.....

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.สมเจตน์ ภัทรพานิชชัย)

...../...../.....



56306204 : สาขาวิชาฟิสิกส์

คำสำคัญ : ไพราโนมิเตอร์ ไพร์เฮริโอมิเตอร์ การสอบเทียบ

ภาสกร เดชโค้น : การพัฒนาระบบสอบเทียบเครื่องวัดรังสีอากาติดยตามมาตรฐานของ
องค์การมาตรฐานสากล. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : รศ.ดร.เสริม จันทร์ฉาย และ
อ.ดร.สมเจตน์ ภัทรพานิชชัย. 149 หน้า.

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้พัฒนาระบบสอบเทียบเครื่องวัดรังสีอากาติดยตามมาตรฐานของ
องค์การมาตรฐานสากล 4 ระบบ ได้แก่ 1) ระบบสอบเทียบไพร์เฮริโอมิเตอร์ภาคสนามโดยใช้ไพร์เฮริ
โอมิเตอร์อ้างอิง (ISO 9059) 2) ระบบสอบเทียบไพราโนมิเตอร์โดยใช้ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงเป็น
มาตรฐานแบบใช้วิธีสลับกันบ่งรังสีตรง (ISO 9846) 3) ระบบสอบเทียบไพราโนมิเตอร์โดยใช้ไพร์เฮริโอ
มิเตอร์อ้างอิงเป็นมาตรฐานแบบต่อเนื่อง (ISO 9846) และ 4) ระบบสอบเทียบไพราโนมิเตอร์
ภาคสนามโดยใช้ไพรามิเตอร์อ้างอิงเป็นมาตรฐาน (ISO 9847) จากนั้นผู้วิจัยได้ทดสอบสมรรถนะของ
ระบบสอบเทียบทั้ง 4 ระบบ โดยใช้ระบบดังกล่าวสอบเทียบกับเครื่องวัดรังสีอากาติดย ผลที่ได้พบว่า
ระบบสอบเทียบที่ 1) 2) 3) และ 4) มีขีดความสามารถในการสอบเทียบโดยมีค่าความไม่แน่นอนของ
ผลการสอบเทียบ (uncertainty) เท่ากับ 1.58 % 1.77 % 1.34 % และ 2.10 % ตามลำดับ สุดท้าย
ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบระยะเวลาที่ต้องใช้ในการสอบเทียบไพราโนมิเตอร์ตามข้อกำหนด ISO 9847
และพบว่า ระยะเวลาดังกล่าวสามารถลดลงได้ โดยผลที่ได้ไม่แตกต่างจากผลการสอบเทียบตาม
ข้อกำหนดอย่างมีนัยสำคัญ



ภาควิชาฟิสิกส์

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ 1.

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2558

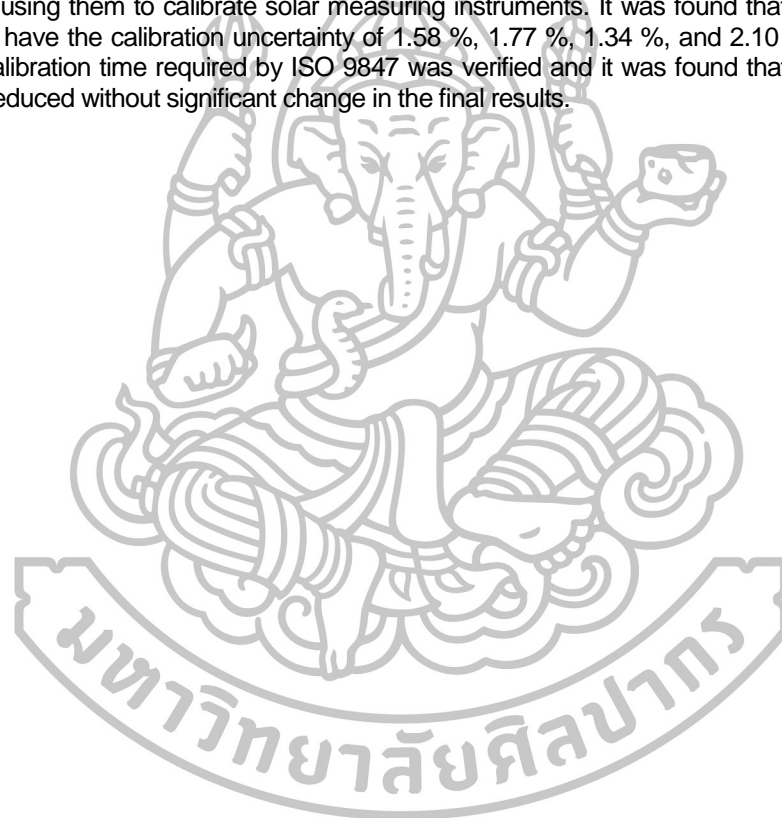
2.....

56306204 : MAJOR : PHYSICS

KEY WORD : PYRANOMETE, PYHELIOMETE, CALIBRATION

PATSAKORN DETKHON : DEVELOPMENT OF SYSTEMS FOR THE CALIBRATION OF SOLAR MEASURING INSTRUMENTS FOLLOWING THE CALIBRATION STANDARDS OF THE INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. THESIS ADVISORS: ASSOC. PROF.SERM JANJAI, Ph.D. AND DR. SOMJET PATTARAPANITCHAI, Ph.D. 149 pp.

In this work, four systems for the calibration of solar radiation measuring instruments according to the standards of the international organization for standardization were developed. These are the systems for: 1) calibration of field pyrhemometer by comparison to a reference pyrhemometer (ISO 9059) 2) calibration of a pyranometer using a reference pyrhemometer with the shade-unshade methods (ISO 9846) 3) calibration of a pyranometer using a reference pyrhemometer with continuous method (ISO 9846) and 4) calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer (ISO 9847). The performance of these systems were evaluated by using them to calibrate solar measuring instruments. It was found that the system 1), 2), 3), and 4) have the calibration uncertainty of 1.58 %, 1.77 %, 1.34 %, and 2.10 % respectively. Finally, the calibration time required by ISO 9847 was verified and it was found that this calibration time can be reduced without significant change in the final results.



Department of Physics

Graduate School, Silpakorn University

Student's signature

Academic Year 2015

Thesis Advisors' signature 1.....2.....

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

รังสีอาทิตย์ (solar radiation) ที่ตกกระทบพื้นผิวโลก ประกอบด้วย รังสีตรง (direct radiation) และรังสีกระจาย (diffuse radiation) โดยผลรวมรังสีดังกล่าวจะเรียกว่ารังสีรวม (global radiation) ข้อมูลรังสีอาทิตย์มีความสำคัญต่องานทางด้านพลังงานแสงอาทิตย์และงานด้านอื่นๆ เช่น อุตุนิยมวิทยา การอนุรักษ์พลังงานในอาคารและการเกษตร เป็นต้น ปริมาณของรังสีอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกจะมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในรอบวัน ตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์ โดยทั่วไปในช่วงเช้าจะมีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ต่ำแล้วค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดในตอนเที่ยงวัน จากนั้นจะค่อยๆ ลดลงอีกครั้งในตอนบ่ายถึงเย็น อย่างไรก็ตามในระหว่างวัน รังสีอาทิตย์อาจมีการเปลี่ยนแปลงจากการบดบังดวงอาทิตย์ของเมฆ จะเห็นได้ว่า ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกมีการเปลี่ยนแปลงแบบเป็นระบบและไม่เป็นระบบผสมกัน ทำให้การคำนวณปริมาณรังสีอาทิตย์บนพื้นผิวโลกในสภาพท้องฟ้าทั่วไปทำได้ยาก ในทางปฏิบัติ เราจะหาปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบที่พื้นผิวโลกได้ด้วยวิธีการวัด กล่าวคือ ถ้าต้องการทราบปริมาณรังสีตรงจะใช้อุปกรณ์วัดที่เรียกว่า ไพร์เฮลิโอมิเตอร์ (pyrheliometer) และปริมาณรังสีรวมจะใช้ไพราโนมิเตอร์ (pyranometer) ส่วนรังสีกระจายจะใช้ไพราโนมิเตอร์ที่มีวงแหวนหรือลูกบอลบังรังสีตรงจากดวงอาทิตย์

โดยทั่วไปแล้วเราจะติดตั้งเครื่องวัดรังสีอาทิตย์ไว้ในที่โล่งแจ้ง เพื่อวัดรังสีอาทิตย์ได้เต็มที่และสัญญาณไฟฟ้าจะถูกบันทึกด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล โดยเราจะแปลงสัญญาณไฟฟ้าที่บันทึกได้ให้เป็นค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ โดยใช้แฟคเตอร์ไปคูณหรือหารค่าสัญญาณไฟฟ้า เราเรียก แฟคเตอร์ดังกล่าวว่า สภาพการตอบสนองของเครื่องวัด (responsivity) หรือบางกรณีเรียกว่า สภาพไวรังสี (sensitivity) เนื่องจากเครื่องวัดรังสีอาทิตย์ติดตั้งอยู่กลางแจ้งทำให้สภาพการตอบสนองของเครื่องวัดมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นเราจำเป็นต้องทราบค่าสภาพการตอบสนองที่เปลี่ยนแปลงไปเพื่อนำมาใช้ในการแปลงสัญญาณไฟฟ้าจากเครื่องวัดได้ถูกต้อง การเปลี่ยนแปลงนี้สามารถหาได้โดยการสอบเทียบเครื่องวัดที่ใช้งานกับเครื่องวัดมาตรฐาน โดยองค์การมาตรฐานสากล (International Organization for Standardization, (ISO)) ได้กำหนดวิธีการสอบเทียบเครื่องวัดรังสีอาทิตย์ชนิดต่างๆ ไว้

เนื่องจากในประเทศไทยยังไม่มีระบบสอบเทียบตามมาตรฐาน ISO ดังนั้นงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงได้พัฒนาระบบสอบเทียบเครื่องวัดรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐาน ISO เพื่อใช้งานสอบเทียบเครื่องวัดรังสีอาทิตย์ในประเทศไทยต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อพัฒนาระบบสอบเทียบเครื่องวัดรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐานการของ ISO
- 2) เพื่อทดสอบสมรรถนะของระบบสอบเทียบที่พัฒนาขึ้น

1.3 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้จะจำกัดขอบเขตอยู่ที่การพัฒนาระบบสอบเทียบเครื่องวัดรังสีอัตรัดตามวิธีการของ ISO เพราะเป็นมาตรฐานที่ใช้งานอย่างกว้างขวาง



บทที่ 2

หลักวิชาการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ถึงแม้ว่าเราจะสามารถคำนวณความเข้มรังสีอาทิตย์ในสภาพท้องฟ้าทั่วไปได้โดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมและข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา แต่ในการสร้างแบบจำลองสำหรับคำนวณความเข้มรังสีอาทิตย์จากข้อมูลดังกล่าวก็จำเป็นต้องใช้ข้อมูลรังสีอาทิตย์ที่ได้จากการวัด นอกจากนี้ข้อมูลจากการวัดยังจำเป็นต้องใช้ในการศึกษาสมรรถนะของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ต่างๆ ดังนั้นการวัดรังสีอาทิตย์จึงเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการวิจัยและการประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ในบทนี้จะกล่าวถึงประเภทของการวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ และอุปกรณ์การวัด ตลอดจนการสอบเทียบอุปกรณ์การวัดรังสีอาทิตย์ ตามหัวข้อต่างๆ ดังนี้

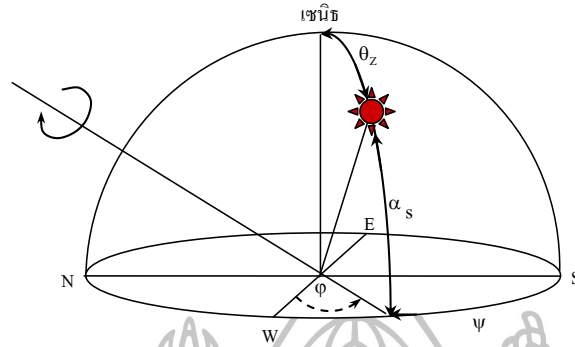
2.1 การบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์

ในการบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์ อาจบอกด้วยมุมหรือบอกด้วยส่วนโค้งของทรงกลมท้องฟ้า (celestial sphere) ที่รองรับมุมดังกล่าวก็ได้ ในงานด้านพลังงานแสงอาทิตย์มีการบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์ 2 ระบบดังนี้

1) ระบบอาซิมุท-อัลติจูด (azimuth-altitude system) ระบบนี้ใช้มุม 2 มุม แสดงตามรูปที่ 2.1 เป็นตัวบอกตำแหน่งได้แก่

ก. มุมอาซิมุท (azimuth, Ψ) เป็นมุมที่วัดจากแนวทิศใต้ไปยังเงา (projection) บนระนาบขอบฟ้าของเส้นตรงซึ่งเชื่อมระหว่างผู้สังเกตกับดวงอาทิตย์ โดยกำหนดว่าถ้าเงาดังกล่าวอยู่ด้านตะวันออก มุมอาซิมุทมีค่าเป็นบวกและทางตะวันตกมีค่าเป็นลบ ดังนั้น $-180 < \Psi < 180$ องศา

ข. มุมอัลติจูด (altitude, α_s) เป็นมุมเงย ณ ตำแหน่งผู้สังเกตของเส้นตรงซึ่งเชื่อมระหว่างดวงอาทิตย์กับผู้สังเกต จะมีค่าจาก 0 ถึง 90 องศา สำหรับมุมที่อยู่ระหว่างผู้สังเกตกับดวงอาทิตย์เรียกว่า มุมเซนนิธ (zenith angle, θ_z) ซึ่งสามารถใช้บอกตำแหน่งดวงอาทิตย์ได้เช่นกัน โดยที่ $\theta_z = 90 - \alpha_s$ การบอกตำแหน่งโดยใช้ระบบอาซิมุท-อัลติจูด มีข้อดีคือ เข้าใจได้ง่าย แต่ก็มีข้อด้อยคือค่าอาซิมุทและอัลติจูดจะเปลี่ยนแปลงไปทุกขณะตั้งแต่ดวงอาทิตย์ขึ้นจนดวงอาทิตย์ตก และเปลี่ยนแปลงไปตามวันในรอบปีด้วย



รูปที่ 2.1 การบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์โดยใช้ระบบอาซิมุท - อัลติจูด

2) ระบบศูนย์สูตร (equatorial system) ระบบนี้ใช้มุมหรือส่วนโค้งของทรงกลมท้องฟ้าตามรูปที่ 2.1 เป็นตัวบอกตำแหน่งดังนี้

ก. เดคลิเนชัน (declination, δ) เป็นส่วนโค้งของวงกลมใหญ่ (great circle) ที่ผ่านขั้วทั้งสองของทรงกลมท้องฟ้าระหว่างเส้นศูนย์สูตรท้องฟ้ากับทางเดินของดวงอาทิตย์ตามรูปที่ 2.2 มีค่าอยู่ระหว่าง $-23\frac{1}{2} < \delta < 23\frac{1}{2}$ องศา ถือว่ามีค่าคงที่ในแต่ละวันและมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามวันในรอบปี การเปลี่ยนแปลงนี้เขียนเป็นสูตรได้ดังนี้

$$\delta = (0.006918 - 0.399912\cos\Gamma + 0.070257\sin\Gamma - 0.006758\cos2\Gamma + 0.000907\sin2\Gamma - 0.002697\cos3\Gamma + 0.00148\sin3\Gamma)(180/\pi) \quad (2.1)$$

โดยที่

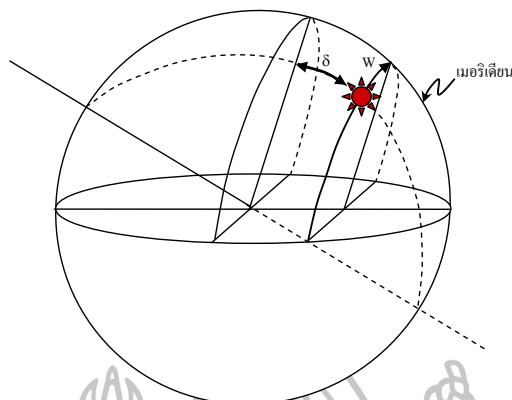
$$\Gamma = 2\pi(d_n - 1)/365 \quad (2.2)$$

เมื่อ	Γ	คือ มุมวัน (day angle) (เรเดียน)
	δ	คือ เดคลิเนชัน (องศา)
	d_n	คือ ลำดับวันในรอบปี ($d_n = 1$ สำหรับวันที่ 1 มกราคม) (-)

2.2 มุมชั่วโมง (hour angle, ω)

เป็นมุมที่ขั้วของทรงกลมท้องฟ้า (celestial pole) หรือส่วนโค้งของทรงกลมท้องฟ้าระหว่างเส้นเมริเดียน (meridian) ของผู้สังเกตกับวงกลมใหญ่ที่ลากผ่านดวงอาทิตย์และขั้วทั้งสองของทรง

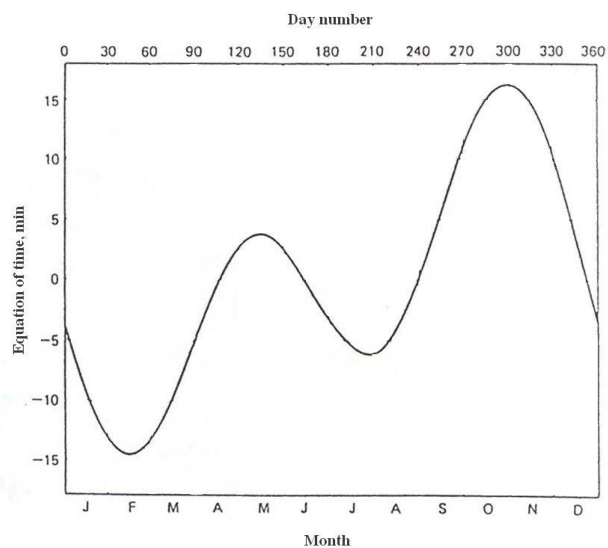
กลมท้องฟ้า มีค่าเป็นบวกเมื่อดวงอาทิตย์อยู่ทางตะวันออกของเมอริเดียน และเป็นลบเมื่ออยู่ทางตะวันตกของเมอริเดียน



รูปที่ 2.2 การบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์โดยใช้ระบบศูนย์สูตร

2.3 เวลาและตำแหน่งของดวงอาทิตย์

ตามกฎการเคลื่อนที่ของดาวเคราะห์ของเคปเลอร์ (Kepler) ดาวเคราะห์ต่างๆ รวมถึงโลกจะโคจรรอบดวงอาทิตย์เป็นวงรี โดยขณะที่โลกโคจรรอบดวงอาทิตย์ เส้นตรงที่เชื่อมระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์จะกวาดพื้นที่ได้เท่ากัน ถ้าช่วงเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่เท่ากัน ดังนั้นความเร็วในการเคลื่อนที่ของโลกรอบดวงอาทิตย์ ณ ตำแหน่งต่างๆ บนวงโคจรจึงมีค่าไม่เท่ากัน ทำให้ช่วงเวลาที่ผู้สังเกตบนพื้นโลกเห็นดวงอาทิตย์ตรงศีรษะ 2 ครั้งติดต่อกัน หรือ 1 วัน มีความยาวไม่เท่ากัน การใช้เวลาที่อาศัยดวงอาทิตย์เป็นหลักหรือเวลาดวงอาทิตย์ (solar time) จึงไม่สะดวกในการเปรียบเทียบเหตุการณ์ต่างๆ ในการแก้ปัญหาดังกล่าว จึงได้มีการกำหนดเวลาที่สม่ำเสมอขึ้น โดยการนำเวลาดวงอาทิตย์ในวันที่ 1 มกราคม ปี ค.ศ.1900 มาแบ่งเป็น 86,400 ส่วน เรียก 1 ส่วนว่า 1 วินาที เรียกเวลานี้ว่าเวลาดวงอาทิตย์เฉลี่ย (solar mean time) ซึ่งสามารถวัดได้ด้วยเครื่องมือชนิดที่คงที่ต่างๆ เช่น ลูกตุ้ม นาฬิกา หรือความถี่ของการสั่นของอะตอมของธาตุบางชนิดและกำหนดว่า เวลาดวงอาทิตย์เฉลี่ย ณ เมืองกรีนิช (Greenwich) ประเทศอังกฤษเป็นเวลาสากล (universal time) หรือเวลากรีนิช (Greenwich mean time, GMT) ในประเทศต่างๆ จะแบ่งเวลาออกเป็นเขตๆ เทียบกับเวลากรีนิช ในแต่ละเขตจะมีเส้นลองจิจูดมาตรฐาน (standard longitude, L_s) และในเขตนั้นๆ จะใช้เวลาเดียวกัน เส้นลองจิจูดนี้จะห่างจากกรีนิชเป็นจำนวนเท่าของ 15 องศา เช่น เส้นลองจิจูดมาตรฐานของประเทศไทยเท่ากับ 105 องศา (15×7) นั่นคือเวลาของประเทศไทยจะเร็วกว่าเวลากรีนิช 7 ชั่วโมง เวลาในแต่ละเขตนี้มีชื่อเรียกโดยทั่วไปว่า เวลามาตรฐานท้องถิ่น (local standard time, LST) เป็นเวลาที่อ่านได้จากนาฬิกา (clock time) และใช้ในชีวิตประจำวันนั่นเอง สำหรับประเทศที่มีขนาดใหญ่ เช่น สหรัฐอเมริกาจะแบ่งเขตการใช้เวลามาตรฐานท้องถิ่นออกเป็นหลายเขต เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพที่เป็นจริงของกลางวันและกลางคืนของท้องถิ่นนั้นๆ เวลาดวงอาทิตย์และเวลาดวงอาทิตย์เฉลี่ยมีความแตกต่างกันตามวันในรอบปี ซึ่งสามารถหาความแตกต่างได้จากสมการเวลา (equation of time) หรือแสดงได้ดังกราฟในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การแปรค่าในรอบปีของความแตกต่างระหว่างเวลาดวงอาทิตย์กับเวลาดวงอาทิตย์เฉลี่ย (E_t) (Iqbal, 1983)

สมการเวลาสามารถเขียนได้ดังนี้

$$E_t = 229.18(0.000075 + 0.001868\cos\Gamma - 0.032077\sin\Gamma - 0.014615\cos2\Gamma - 0.04089\sin2\Gamma) \quad (2.4)$$

โดยที่

$$\Gamma = 2\pi(d_n - 1)/365 \quad (2.5)$$

เมื่อ E_t คือ สมการเวลา (นาที)
 Γ คือ มุมวัน (day angle) (เรเดียน)

เวลาดวงอาทิตย์จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับตำแหน่งของดวงอาทิตย์ กล่าวคือ เมื่อ 12.00 น. ตามเวลาดวงอาทิตย์ ค่า $\omega = 0^\circ$ ถ้าเวลาดวงอาทิตย์เป็น 11.00 น. $\omega = 15^\circ$ เวลาดวงอาทิตย์นี้สามารถคำนวณหาได้จากเวลามาตรฐานท้องถิ่น และผลต่างระหว่างตำแหน่งเส้นลองจิจูดมาตรฐานและเส้นลองจิจูดของผู้สังเกต หรือเขียนเป็นรูปสมการได้ดังนี้

$$ST = LST + 4(L_s - L_{loc}) + E_t \quad (2.6)$$

เมื่อ ST คือ เวลาดวงอาทิตย์ (ชม.:นาที)
 LST คือ เวลามาตรฐานท้องถิ่น (ชม.:นาที)
 L_s คือ เส้นลองจิจูดมาตรฐาน (องศา)

L_{loc} คือ เส้นลองจิจูดของผู้สังเกต (องศา)

ค่าของ $4(L_s - L_{loc})$ มีหน่วยเป็นนาฬิกา และค่าของ L_s และ L_{loc} เป็นลบ เมื่ออยู่ทางตะวันออกของกรีนิช และเป็นบวก เมื่ออยู่ทางตะวันตกของกรีนิช
ความสัมพันธ์ระหว่างมุมชั่วโมงของดวงอาทิตย์กับเวลาดวงอาทิตย์ เขียนเป็นสูตรได้ดังนี้

$$\omega = 15 (12 - ST) \quad (2. \quad 7)$$

เมื่อ ω คือ มุมชั่วโมง (องศา)
 ST คือ เวลาดวงอาทิตย์ (ชม.)

2.4 ประเภทของการวัดรังสีอาทิตย์

โดยทั่วไปเราสามารถแบ่งการวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ตามลักษณะของงานการใช้ข้อมูลได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1) การวัดความเข้มรังสีอาทิตย์เฉพาะงาน

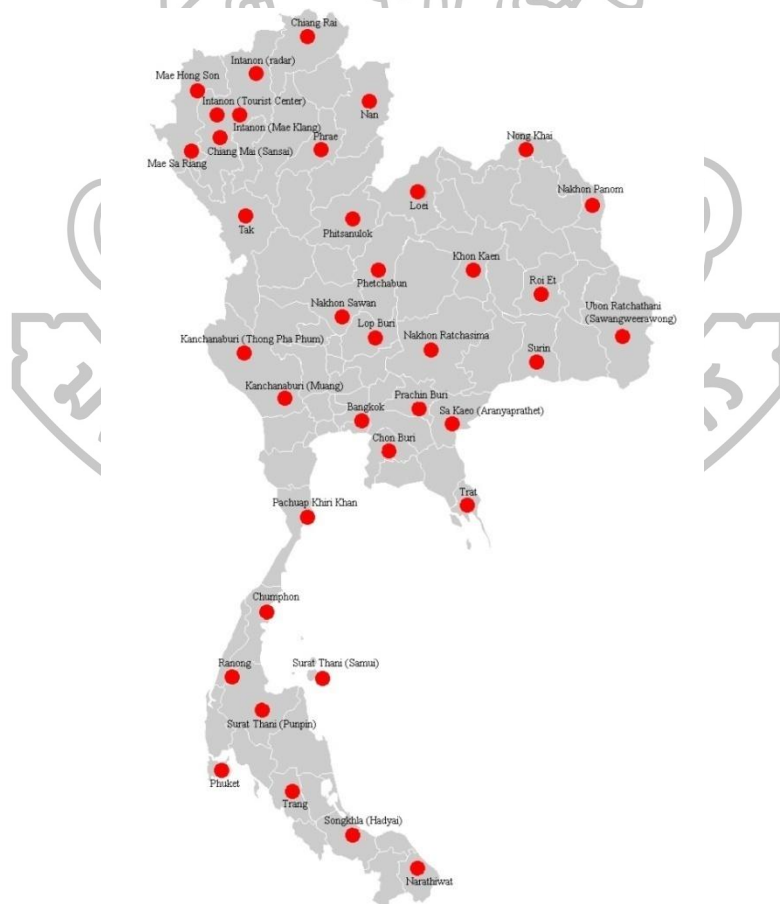
การวัดรังสีอาทิตย์ดังกล่าวจะใช้ประกอบในการศึกษาสมรรถนะของอุปกรณ์หรือระบบที่ได้รับผลกระทบจากรังสีอาทิตย์หรือใช้รังสีอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงาน เช่น โซลาร์เซลล์ (solar cell) เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ และระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ จึงจำเป็นต้องรู้ค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์ที่อุปกรณ์เหล่านั้นได้รับ โดยจะติดตั้งอุปกรณ์วัดความเข้มรังสีอาทิตย์ไว้ในบริเวณที่ตั้งของอุปกรณ์ การวัดดังกล่าวส่วนใหญ่จะทำการวัดระยะสั้น เช่น 1-30 วัน ในบางกรณีอาจทำการวัดระยะยาวเป็นปี เพื่อติดตามผลการทำงานของระบบ เช่น การวัดรังสีดวงอาทิตย์ในโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ป้อนไฟฟ้าเข้าเครือข่ายสายส่ง เป็นต้น



รูปที่ 2.4 การวัดรังสีอาทิตย์เพื่อประเมินสมรรถนะของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม

2) การวัดรังสีอาทิตย์ระยะยาว

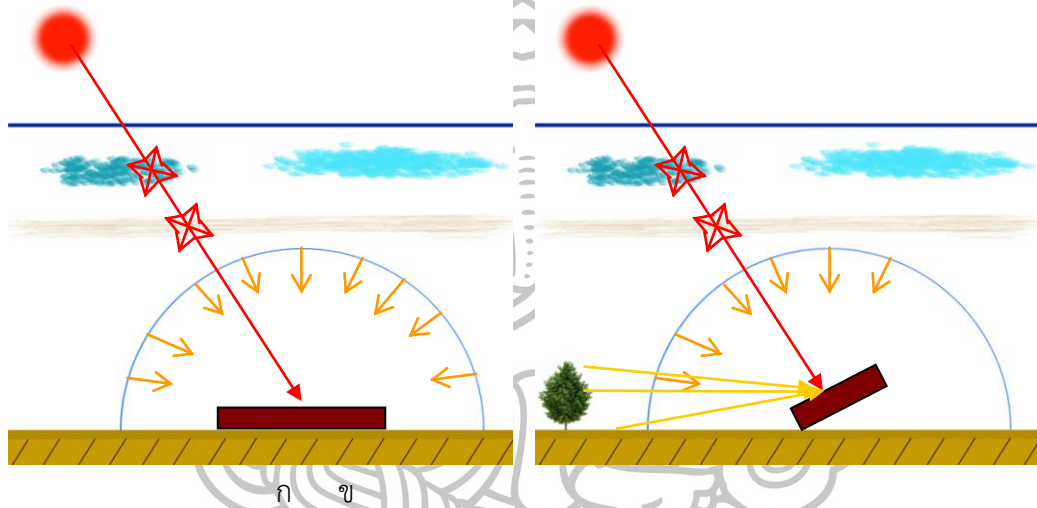
โดยทั่วไป การวัดรังสีระยะยาวจะทำการวัดที่สถานีอุตุนิยมวิทยาต่างๆ โดยพิจารณาว่ารังสีอาทิตย์เป็นตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยาตัวแปรหนึ่ง ซึ่งจะทำการวัดอย่างต่อเนื่อง เช่นเดียวกับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ นอกจากนี้มีการวัดตามสถานีอุตุนิยมวิทยาแล้ว ในบางประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกาก็ได้มีการจัดตั้งเครือข่ายสถานีวัดรังสีอาทิตย์แยกออกมาจากการวัดตามสถานีอุตุนิยมวิทยาทั่วไป โดยการวัดพื้นฐานของสถานีในเครือข่ายคือการวัดรังสีรวมแต่บางสถานีอาจทำการวัดรังสีกระจายและรังสีตรงด้วย สำหรับจำนวนและความหนาแน่นของสถานีในแต่ละประเทศจะแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นกับความพร้อมทางด้านการเงินในการจัดหาอุปกรณ์วัดและการบำรุงรักษา ตลอดจนการเห็นความสำคัญและความต้องการข้อมูลรังสีอาทิตย์ในประเทศนั้นๆ สำหรับกรณีประเทศไทย เครือข่ายสถานีวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ที่เป็นหลักในปัจจุบัน ดำเนินการโดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานโดยการสนับสนุนทางวิชาการจากห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร (เสริม จันทรฉายและคณะ, 2545, เสริม จันทรฉายและคณะ 2551) ปัจจุบันเครือข่ายดังกล่าวมีสถานีวัดทั้งหมด 39 แห่ง โดยทุกสถานีทำการวัดรังสีรวมและบางสถานีทำการวัดรังสีกระจายและรังสีตรงด้วย



รูปที่ 2.5 ตำแหน่งของสถานีวัดในเครือข่ายสถานีวัดรังสีดวงอาทิตย์ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน

2.5 ประเภทของรังสีอาทิตย์ที่ทำการวัด

รังสีอาทิตย์ที่เดินทางผ่านบรรยากาศโลกจะ ดูดกลืนและกระเจิงโดย องค์ประกอบต่างๆ ของบรรยากาศ เช่น โมเลกุลอากาศ ฝุ่นละออง ไอน้ำและเมฆ โดยทั่วไปเราจะเรียกองค์ประกอบของรังสีอาทิตย์ในส่วนของที่ตกกระทบพื้นผิวโลกในแนวเส้นตรงที่เชื่อมต่อระหว่างจุดบนระนาบที่สนใจ จกักับดวงอาทิตย์ เรียกว่า รังสีตรง สำหรับรังสีที่ถูกกระเจิงโดยโมเลกุลอากาศและเมฆในครั้งแรกจะถูกโมเลกุลอากาศ ฝุ่นละออง และเมฆที่จุดอื่นกระเจิงต่อไปจนตกกระทบพื้นผิวโลกบนระนาบที่สนใจ เรียกอองค์ประกอบของรังสีอาทิตย์ส่วนนี้ เรียกว่า รังสีกระจาย ถ้าระนาบรับรังสีอาทิตย์ที่ทำมุมเอียงกับพื้นราบระนาบนั้นจะได้รับรังสีกระจายที่เกิดจากการกระเจิงของรังสีตรงและรังสีกระจายของพื้นผิวโลก และสิ่งแวดล้อมต่างๆ เช่น ต้นไม้ เนินดิน หรือสิ่งปลูกสร้าง เป็นต้น เรียกผลรวมของรังสีตรงและรังสีกระจายที่ตกกระทบจุดบนระนาบว่ารังสีรวม หรือเขียนในรูปสมการได้ดังนี้



รูปที่ 2.6 องค์ประกอบของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบ ก) บนพื้นราบ ข) ระนาบเอียง

กรณี พื้นราบ

$$\dot{I}_g = \dot{I}_B \cos\theta_z + \dot{I}_{d,sky} \quad (2.8)$$

กรณี พื้นเอียง

$$\dot{I}_g = \dot{I}_B \cos\theta_z + \dot{I}_{d,sky} + \dot{I}_{d,ground} \quad (2.9)$$

เมื่อ \dot{I}_g คือ ความเข้มรังสีรวมที่ขณะเวลาหนึ่ง (solar irradiance) (Wm^{-2})

\dot{I}_B คือ ความเข้มรังสีตรงบนพื้นราบตั้งฉากกับทิศทางของรังสี (Wm^{-2})

$\dot{I}_{d,sky}$ คือ รังสีกระจายจากท้องฟ้า (Wm^{-2})

$\dot{I}_{d,ground}$ คือ รังสีกระจายจากพื้นผิวโลกที่แวดล้อม (Wm^{-2})

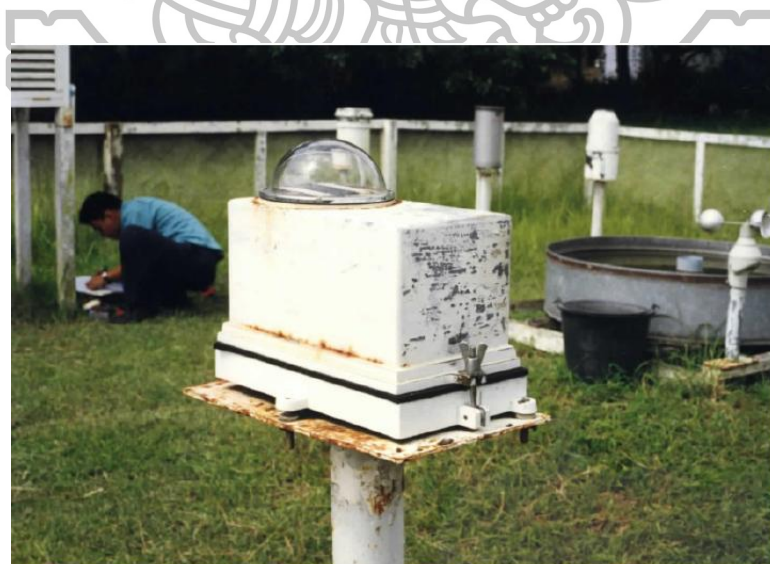
2.6 เครื่องมือสำหรับวัดรังสีอาทิตย์

2.6.1 การวัดรังสีรวม

ไพราโนมิเตอร์ (pyranometer) เป็นอุปกรณ์พื้นฐานในงานที่เกี่ยวข้องกับรังสีอาทิตย์ ในอดีตที่ผ่านมานักวิทยาศาสตร์ได้ทำการพัฒนาไพราโนมิเตอร์ขึ้นมาหลายแบบ โดยแบบหลักๆ มีดังนี้

1) ไพราโนมิเตอร์แบบโรบิตซ์ (Robitzsch pyranometer)

เครื่องวัดแบบนี้จะมีแผ่นรับรังสีเป็นโลหะ 2 แผ่น โดยแผ่นหนึ่งทาสีขาวและอีกแผ่นหนึ่งทาสีดำ เมื่อรังสีดวงอาทิตย์ตกกระทบแผ่นรับรังสี แผ่นสีดำจะดูดกลืนรังสีอาทิตย์ได้มากกว่าแผ่นสีขาว ทำให้แผ่นสีดำขยายตัวมากกว่าแผ่นสีขาว แรงที่เกิดจากการขยายตัวดังกล่าวจะไปขับเคลื่อนปากกาให้บันทึกสัญญาณลงบนกระดาษซึ่งเคลื่อนที่ด้วยระบบโซลาน สัญญาณที่บันทึกได้สามารถแปลงกลับมาเป็นความเข้มรังสีอาทิตย์ ลักษณะของไพราโนมิเตอร์แบบโรบิตซ์ แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 ข้อดีของไพราโนมิเตอร์แบบนี้คือ ทำงานได้โดยไม่ใช้ไฟฟ้า จึงสามารถติดตั้งใช้งานในสถานีซึ่งไม่มีแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ แต่ก็มีข้อด้อยคือ ผลการวัดมีความคลาดเคลื่อนสูง ทั้งนี้เพราะการทำงานของเครื่องจะขึ้นกับอุณหภูมิแวดล้อมซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตลอดวัน และการขยายตัวของแผ่นรับรังสีไม่สามารถตอบสนองการเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีอาทิตย์ ที่ขึ้นลงอย่างรวดเร็วได้ นอกจากนี้ข้อมูลที่บันทึกได้ในแต่ละวันจะเป็นกราฟช่วงสั้น ซึ่งไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงของรังสีอาทิตย์ช่วงสั้นอันเกิดจากเมฆได้ ค่าที่ได้จากการวัดจะหาได้จากการรวมพื้นที่ใต้กราฟและแปลงกลับมาเป็นค่าความเข้มรังสีรวมรายวันซึ่งจะมีความคลาดเคลื่อน 10-30 % ไพราโนมิเตอร์แบบโรบิตซ์นิยมใช้ในยุคแรกๆ ของการวัดรังสีอาทิตย์ ก่อนที่จะมีการประดิษฐ์เครื่องวัดแบบใช้หลักการทางไฟฟ้าในทศวรรษที่ 1960 ปัจจุบันไพราโนมิเตอร์แบบนี้ยังมีการใช้งานในสถานีอุตุนิยมวิทยาบางแห่งในประเทศกำลังพัฒนา



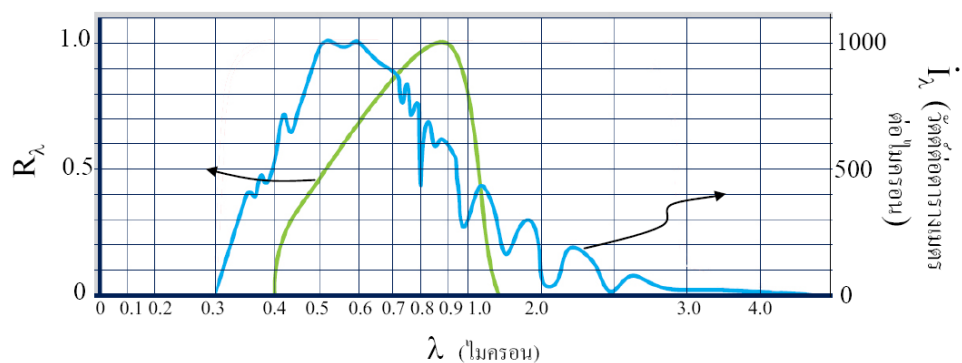
รูปที่ 2.7 ไพราโนมิเตอร์แบบโรบิตซ์

2) ไพราโนมิเตอร์แบบโฟโตโวลตาอิก (photovoltaic pyranometer)

เนื่องจากเซลล์สุริยะจะให้กระแสไฟฟ้าเมื่อมีรังสีอาทิตย์ตกกระทบ ดังนั้นจึงได้มีการนำเซลล์สุริยะมาใช้ทำไพราโนมิเตอร์ โดยเครื่องวัดจะประกอบไปด้วยตัวรับรังสีที่เป็นแผ่นเซลล์สุริยะและแผ่นกระจายด้านบน เมื่อรังสีอาทิตย์ตกกระทบแผ่นกระจายแสง รังสีอาทิตย์จะถูกกระจายผ่านลงมาตกลงบนแผ่นเซลล์สุริยะและเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น ค่ากระแสที่ได้นี้สามารถแปลงให้เป็นค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ได้ ตัวอย่างหลักการทำงานของไพราโนมิเตอร์แบบโฟโตโวลตาอิก แสดงได้ดังรูปที่ 2.8 โดยทั่วไปไพราโนมิเตอร์แบบโฟโตโวลตาอิกจะมีการตอบสนองต่อรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นต่างๆ ในช่วงประมาณ 0.4-1.1 μm แสดงตามรูปที่ 2.9 ซึ่งแคบกว่าช่วงความยาวคลื่นของสเปกตรัมรังสีรวม ทำให้ไม่สามารถวัดรังสีอาทิตย์ได้หมดช่วงความยาวคลื่นกว้าง 0.3-3.0 μm จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของการวัด นอกจากนี้การตอบสนองของเครื่องวัดต่อความยาวคลื่นของรังสีอาทิตย์แต่ละความยาวคลื่นที่ไม่เท่ากันก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดด้วย อย่างไรก็ตามเครื่องวัดนี้มีราคาค่อนข้างต่ำจึงทำให้มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย



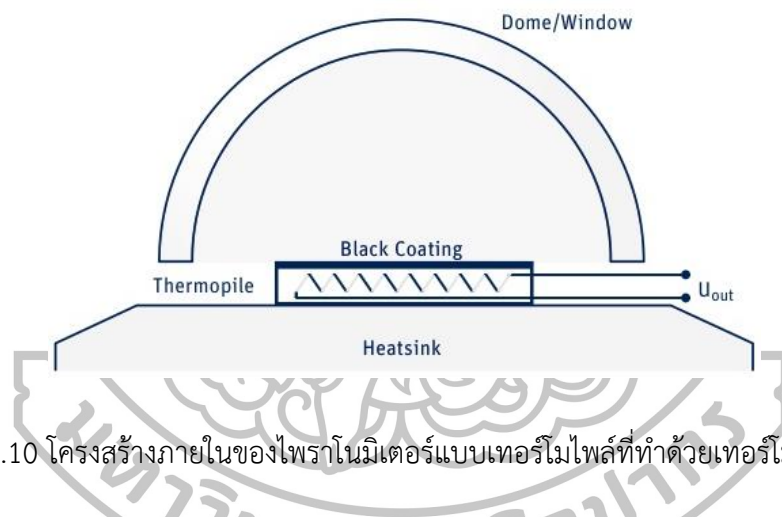
รูปที่ 2.8 ไพราโนมิเตอร์แบบโฟโตโวลตาอิก ยี่ห้อ Kipp&Zonen



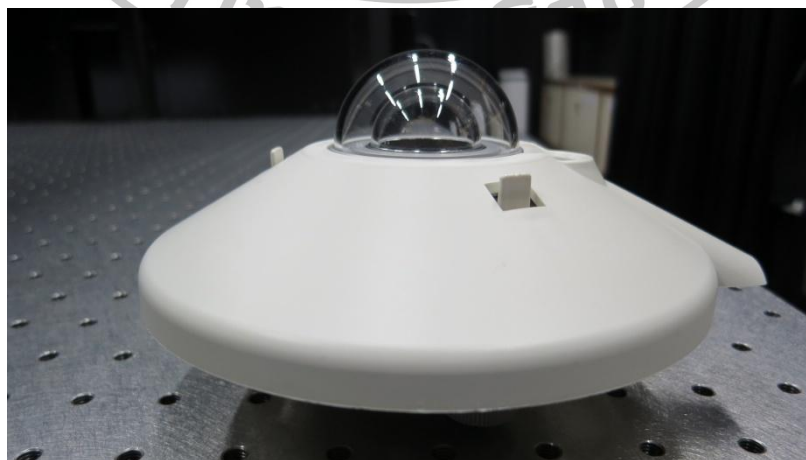
รูปที่ 2.9 กราฟของการตอบสนองต่อสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ของไพราโนมิเตอร์แบบโฟโตโวลตาอิก

3) ไพราโนมิเตอร์แบบเทอร์โมไพล์ (thermopile pyranometer)

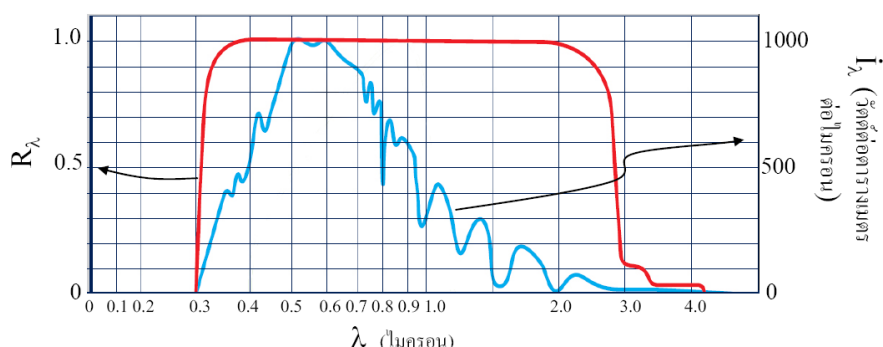
เครื่องวัดรังสีอาทิตย์แบบนี้จะมีตัวรับรังสีที่ทำด้วยเทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) จำนวนมากที่ต่อกันแบบอนุกรมซึ่งจะเรียกว่าเทอร์โมไพล์ (thermopile) โดยมีแผ่นโลหะสีดำปิดด้านบนของเทอร์โมไพล์เป็นตัวรับรังสีเพื่อไม่ให้เทอร์โมไพล์ได้รับรังสีอาทิตย์โดยตรง และมีโดมแก้วครอบด้านบนเพื่อป้องกันตัวรับรังสีจากฝนหรือความเสียหายจากสภาพแวดล้อม ไพราโนมิเตอร์แบบนี้โดยทั่วไปจะมีลักษณะโครงสร้างภายในตามรูปที่ 2.10-2.11 เมื่อรังสีอาทิตย์ตกกระทบแผ่นรับรังสีจะทำให้แผ่นดังกล่าวมีอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้เทอร์โมไพล์ที่อยู่ด้านล่างมีอุณหภูมิสูงขึ้นด้วย และเกิดศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วของเทอร์โมไพล์ ค่าของศักย์ไฟฟ้างกล่าวสามารถนำมาคำนวณให้เป็นค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ได้ ข้อดีของไพราโนมิเตอร์แบบเทอร์โมไพล์คือ สามารถตอบสนองต่อสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ส่วนใหญ่ในช่วง 0.3-3.0 μm ได้เท่ากัน แสดงตามรูปที่ 2.12 นอกจากนี้ยังมีการทำงานที่ไม่ขึ้นกับสภาพแวดล้อมมากนัก เนื่องจากโดมแก้วทำหน้าที่ป้องกันการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่บริเวณแผ่นรับรังสีไว้ และมีความละเอียดถูกต้องในการวัดค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตามเครื่องวัดแบบนี้ยังมีราคาค่อนข้างแพงปัจจุบันมีผู้ผลิตและจำหน่ายเครื่องวัดชนิดนี้อยู่หลายบริษัทด้วยกัน



รูปที่ 3.10 โครงสร้างภายในของไพราโนมิเตอร์แบบเทอร์โมไพล์ที่ทำด้วยเทอร์โมคัปเปิล



รูปที่ 2.11 ไพราโนมิเตอร์แบบเทอร์โมไพล์ยี่ห้อ Kipp&Zonen



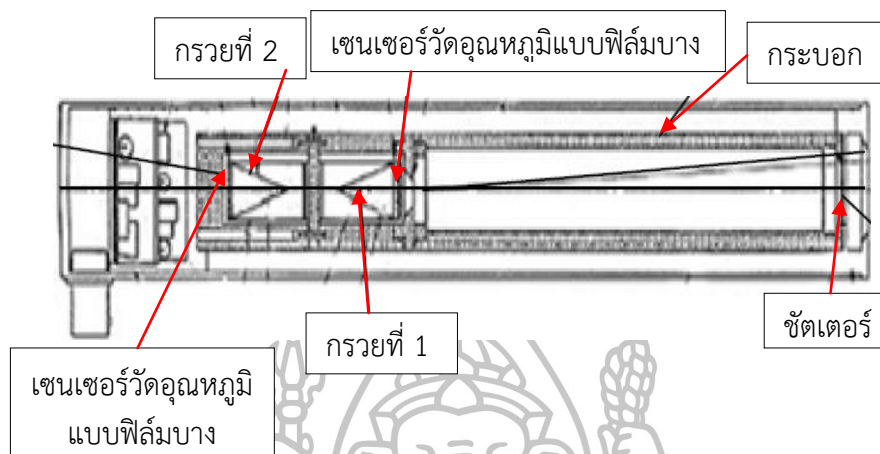
รูปที่ 2.12 กราฟการตอบสนองต่อสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ของไพราโนมิเตอร์แบบเทอร์โมไฟล์

2.6.2 การวัดรังสีตรง

เครื่องมือที่ใช้วัดรังสีตรงคือ ไพร์เฮลิโอมิเตอร์ (pyrheliometer) ข้อมูลความเข้มรังสีตรงเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับงานทางด้านพลังงานแสงอาทิตย์แบบรวมแสง เนื่องจากรังสีตรงเป็นรังสีที่มีทิศทางพุ่งตรงออกมาจากดวงอาทิตย์และการที่ตำแหน่งของดวงอาทิตย์เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ดังนั้นไพร์เฮลิโอมิเตอร์จึงต้องติดตั้งบนอุปกรณ์ติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ โดยทั่วไปไพร์เฮลิโอมิเตอร์มี 2 ประเภท ดังนี้

1) ไพร์เฮลิโอมิเตอร์แบบสัมบูรณ์ (absolute pyrheliometer)

เครื่องวัดแบบนี้จะเป็นเครื่องวัดที่สามารถใช้บอกความเข้มรังสีอาทิตย์ได้โดยตรงโดยมิต้องอ้างอิงกับเครื่องวัดอื่นๆ จึงใช้เป็นไพร์เฮลิโอมิเตอร์มาตรฐาน ในอดีตที่ผ่านมานักวิทยาศาสตร์ได้พัฒนาไพร์เฮลิโอมิเตอร์แบบสัมบูรณ์ขึ้นหลายแบบ โดยแบบที่นิยมใช้งานในปัจจุบัน คือ แบบแอคทีฟแควิตี (Active cavity pyrheliometer) ไพร์เฮลิโอมิเตอร์นี้จะมีกระบอกให้รังสีส่องผ่านเข้าไปภายใน โดยที่ปลายสุดจะมีตัวรับรังสีทรงกรวย ซึ่งมีขดลวดความต้านทานไฟฟ้าเพื่อให้ความร้อนและมีเทอร์โมคัปเปิลติดอยู่เพื่อวัดอุณหภูมิของกรวย นอกจากนี้ยังมีทรงกรวยอันที่ 2 ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับกรวยอันที่ 1 และวางอยู่ตรงด้านหลังของกรวยที่ 1 แสดงตามรูปที่ 2.13 ในการควบคุมให้รังสีส่องเข้าไปยังกรวยอันที่ 1 จะมีชัตเตอร์ (shutter) ที่ปากกระบอก ที่บรรจุกรวยทั้ง 2 อัน ซึ่งสามารถเปิดปิดให้รังสีอาทิตย์ส่องผ่านไปตกกระทบกรวยอันที่ 1 ตามช่วงเวลาที่ต้องการ ซึ่งการใช้งานจะเริ่มจากปิด ชัตเตอร์และปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไปในขดลวดความต้านทานไฟฟ้า เพื่อให้ความร้อนกับกรวยทั้ง 2 อัน ให้มีอุณหภูมิเท่ากัน จากนั้นจะเปิดชัตเตอร์ให้รังสีอาทิตย์ส่องเข้าไปตกกระทบกรวยอันที่ 1 และทำการเพิ่มกระแสไฟฟ้าที่ผ่านขดลวดต้านทานไฟฟ้าของกรวยที่ 2 จนทำให้กรวยอันที่ 2 มีอุณหภูมิเท่ากับกรวยอันที่ 1 ค่าความแตกต่างของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ให้ความร้อนกับกรวยอันที่ 2 ระหว่างที่ไม่มีรังสีตกกระทบของกรวยอันที่ 1 จะเป็นค่าพลังงานของรังสีอาทิตย์ที่กรวยอันที่ 1 ได้รับ เนื่องจากเครื่องวัดแบบนี้มีความแม่นยำสูง ปัจจุบันจึงนิยมใช้เป็นเครื่องวัดรังสีอาทิตย์มาตรฐานในประเทศต่างๆ แสดงตามรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของไพร์เฮลิโอมิเตอร์แบบแอคทีฟแควิตี



รูปที่ 2.14 ไพร์เฮลิโอมิเตอร์แบบแอคทีฟแควิตี ที่ผลิตโดยบริษัท Eppley ประเทศสหรัฐอเมริกา

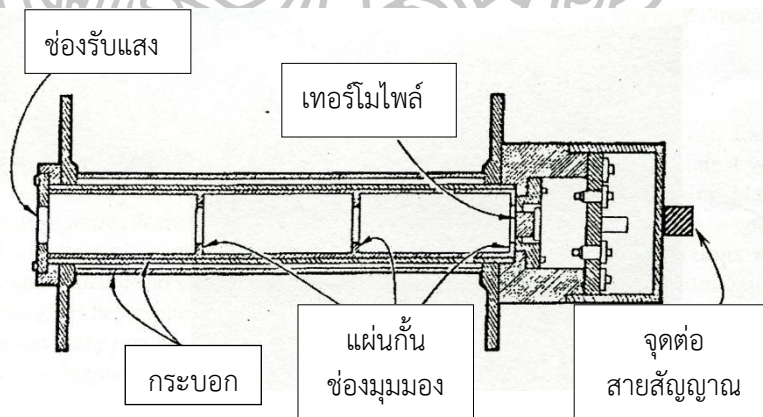
2) ไพร์เฮลิโอมิเตอร์ภาคสนาม (field pyr heliometer)

ไพร์เฮลิโอมิเตอร์แบบสมบูรณ์เป็นเครื่องวัดที่ละเอียดอ่อนและใช้งานสอบเทียบมาตรฐานเครื่องอื่นๆ เท่านั้น จึงไม่เหมาะกับการใช้งานภาคสนามเป็นเวลานานๆ การวัดรังสีตรงที่สถานีวัดรังสีอาทิตย์หรือในงานทดสอบสมรรถนะของระบบพลังงานรังสีอาทิตย์แบบรวมแสง โดยใช้ไพร์เฮลิโอมิเตอร์ภาคสนาม ซึ่งเป็นเครื่องวัดที่ถูกออกแบบให้ทนทานต่อสภาพลมฟ้าอากาศ เพราะต้องติดตั้งนอกอาคารและใช้งานต่อเนื่องกันเป็นเวลานาน เครื่องวัดแบบนี้จะมีลักษณะเป็นกระบอกลูกเพื่อให้รังสี

ตรงเท่านั้นที่ส่องผ่านเข้าไปภายในโดยที่ปลายกระบอกระบบจะมีตัวรับรังสีแบบเทอร์โมไฟล์เมื่อได้รับรังสีอาทิตย์เทอร์โมไฟล์จะให้สัญญาณไฟฟ้าออกมา โดยสัญญาณไฟฟ้าที่ได้สามารถนำมาแปลงให้เป็นค่าความเข้มรังสีตรงได้ ต้องอาศัยการสอบเทียบกับไพร์เฮริโอมิเตอร์มาตรฐาน โดยทั่วไปไพร์เฮริโอมิเตอร์ภาคสนามจะติดตั้งบนอุปกรณ์ติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์เพื่อให้เครื่องวัดชี้ไปที่ตำแหน่งดวงอาทิตย์ตลอดเวลา



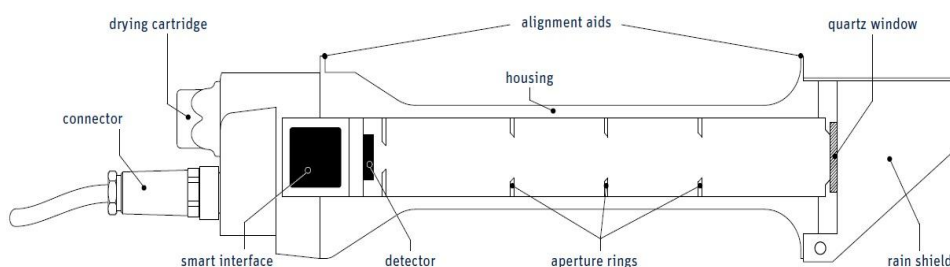
รูปที่ 2.15 ไพร์เฮริโอมิเตอร์แบบเทอร์โมไฟล์ที่ผลิตโดยบริษัท Eppley



รูปที่ 2.16 โครงสร้างไพร์เฮริโอมิเตอร์แบบเทอร์โมไฟล์ที่ผลิตโดยบริษัท Eppley



รูปที่ 2.17 ไพร่เฮริโอมิเตอร์แบบเทอร์โมไพล์ รุ่น CHP1 ที่ผลิตโดยบริษัท Kipp&Zonen



รูปที่ 2.18 ไพร่เฮริโอมิเตอร์แบบเทอร์โมไพล์ รุ่น CHP1 ที่ผลิตโดยบริษัท Kipp&Zonen

สำหรับอุปกรณ์ติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ที่ใช้งานในภาคสนามจะมี 2 แบบ ได้แก่ แบบขับเคลื่อนอัตโนมัติแกนเดียวและแบบขับเคลื่อนอัตโนมัติ 2 แกน โดยแบบแรกจะมีแกนหมุน 2 แกน โดยแกนที่ 1 จะมีทิศขนานกับแกนหมุนของท้องฟ้า และมีมอเตอร์ขับเคลื่อนให้แกนดังกล่าว หมุนด้วยอัตราเดียวกับการหมุนรอบตัวเองของโลก ส่วนแกนที่ 2 จะใช้สำหรับหมุนเปลี่ยนมุมเดคลิเนชัน ตามการเปลี่ยนแปลงมุมเดคลิเนชันของดวงอาทิตย์ ซึ่งต้องปรับด้วยมือ ทุก 1-2 วัน ต่อครั้ง แสดงตามรูปที่ 2.19 สำหรับอุปกรณ์การติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์แบบที่ 2 แสดงตามรูปที่ 2.20 จะประกอบด้วยแกนหมุน 2 แกน โดยแกนที่ 1 จะเป็นแกนที่หมุนในแนวตั้ง เพื่อหมุนเปลี่ยนมุมอาซิมุท และแกนที่ 2 จะเป็นแกนที่หมุนอยู่ในแนวนอน สำหรับหมุนเปลี่ยนมุมอัลติจูดของดวงอาทิตย์ เนื่องจากมุมอาซิมุทและมุมอัลติจูดของดวงอาทิตย์เปลี่ยนแปลงตลอดทั้งวัน ดังนั้นอุปกรณ์ติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์แบบนี้จึงต้องมีระบบคอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงานตลอดเวลา



รูปที่ 2.19 อุปกรณ์ติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์แบบขับเคลื่อนอัตโนมัติแกนเดียว



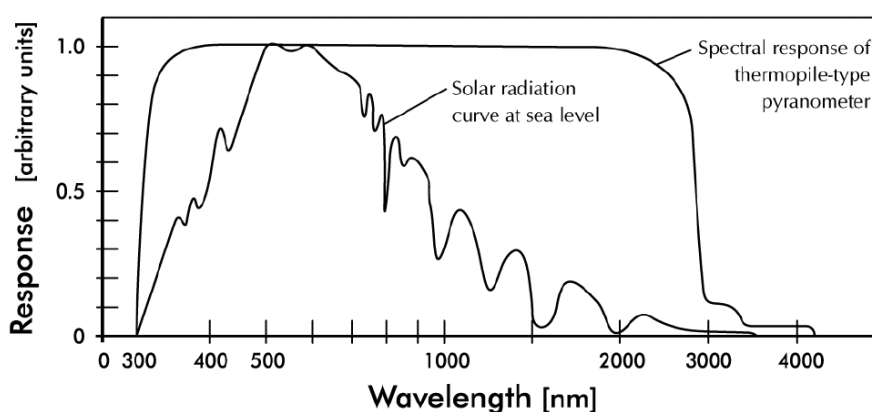
รูปที่ 2.20 อุปกรณ์ติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์แบบขับเคลื่อนอัตโนมัติ 2 แกน

2.7 คุณสมบัติของเครื่องวัดรังสีอาทิตย์

การใช้งานไพราโนมิเตอร์และรังสีตรง ผู้ใช้จำเป็นต้องรู้สมบัติของเครื่องวัดดังกล่าว โดยสมบัติที่สำคัญมีดังนี้

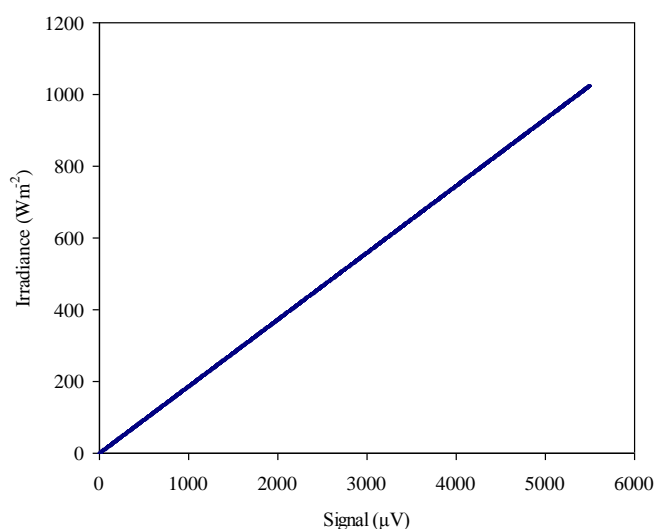
1) **สภาพไวรังสี (Sensitivity)** หรือ สภาพตอบสนอง (responsivity) การใช้ไพราโนมิเตอร์และไพร์เฮริโอมิเตอร์ภาคสนาม ส่วนใหญ่จะให้สัญญาณออกมาเป็นศักย์ไฟฟ้า ในหน่วย mV ซึ่งต้องทำการแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าให้เป็นค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ในหน่วย $W.m^{-2}$ โดยการหารด้วยค่าสภาพไวรังสีหรือสภาพตอบสนองซึ่งเป็นค่าคงที่ได้จากการสอบเทียบเครื่องวัดดังกล่าวกับเครื่องวัดมาตรฐาน โดยทั่วไปค่าสภาพไวรังสีของเครื่องวัดรังสีอาทิตย์จะมีการเปลี่ยนแปลงหลังจากการใช้งานไประยะเวลาหนึ่ง กรณีของการใช้งานตามสถานีวัดรังสีซึ่งต้องการทำการวัดอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลายาวนานหลายปี ต้องทำการสอบเทียบเครื่องวัดเพื่อหาค่าสภาพไวรังสีที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างน้อย ปีละ 1 ครั้ง เพื่อความถูกต้องของข้อมูล ซึ่งเครื่องวัดที่ดีจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงของสภาพการตอบสนองน้อย

2) **การตอบสนองต่อสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ (spectral response)** โดยทั่วไปไพราโนมิเตอร์และไพร์เฮริโอมิเตอร์จะสามารถวัดรังสีอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นหนึ่ง ซึ่งใช้เป็นเกณฑ์ในการจำแนกชนิดของเครื่องมือวัดโดยจะทำการตรวจสอบการแปรค่าสเปกตรัมของรังสี (วัดการเลือกสเปกตรัมของการตอบสนอง) โดยเครื่องวัดที่ดีจะต้องสามารถวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ครอบคลุมในช่วง $0.3-3.0 \mu m$ ซึ่งเป็นพลังงานส่วนใหญ่ของรังสีอาทิตย์ และจะต้องตอบสนองต่อรังสีอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ได้เท่ากัน แสดงตามรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 กราฟแสดงการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ที่ดี

3) **สภาพเชิงเส้น (linearity)** ในการวัดรังสีรวมและรังสีตรง เครื่องวัดจะให้สัญญาณออกมาเป็นค่าศักย์ไฟฟ้า โดยต้องนำมาแปลงให้เป็นค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ กรณีของเครื่องวัดรังสีอาทิตย์ที่ดี ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์จะต้องแปรตามศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องวัดแบบเชิงเส้น ในช่วงระหว่างความเข้มต่ำสุดถึงความเข้มสูงสุดที่เครื่องวัดสามารถวัดได้ เราจะเรียกกราฟการแปรค่าระหว่างความเข้มรังสีอาทิตย์และศักย์ไฟฟ้าว่าสภาพเชิงเส้นของเครื่องวัดดังกล่าว แสดงตามรูปที่ 2. 22 (โดยทั่วไปจะต้องมีความเป็นเชิงเส้นอย่างน้อย 100 W.m^{-2} ถึง 1000 W.m^{-2})



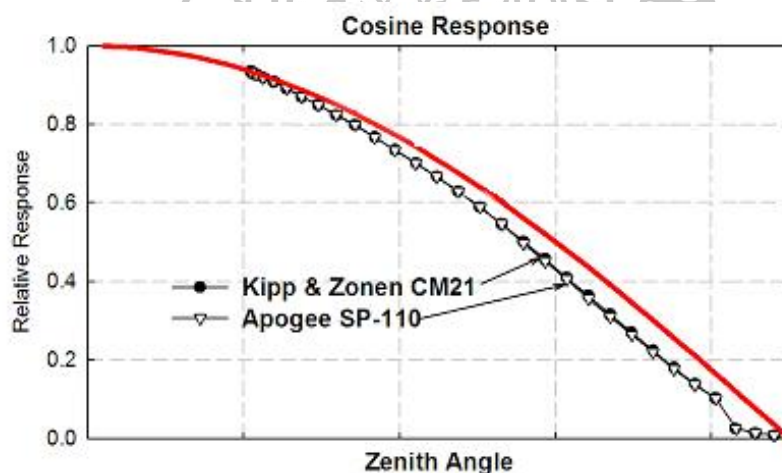
รูปที่ 2.22 สภาพเชิงเส้นของไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen (Model CMP11)

4) **การขึ้นกับอุณหภูมิ (Temperature dependence)** โดยทั่วไปเครื่องวัดรังสีอาทิตย์จะต้องใช้งานกลางแจ้งซึ่งมีอุณหภูมิอากาศแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดทั้งวัน และถ้าต้องทำการวัดตลอดทั้งปี อุณหภูมิอากาศแวดล้อมจะมีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลอีกด้วย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะมีผลต่างในด้านสมรรถนะของเครื่องวัดทำให้ค่าที่วัดได้ขึ้นกับอุณหภูมิด้วย โดยที่การขึ้นกับอุณหภูมินี้จะบอกในรูปของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิอากาศแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง ตัวอย่างเช่น ไพร์เฮริโอมิเตอร์ของบริษัท Eppley (model NIP) ผลของอุณหภูมิจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน $\pm 1 \%$ ในช่วงอุณหภูมิอากาศแวดล้อม -20 ถึง $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$

5) **เวลาของการตอบสนอง (response time)** คือช่วงเวลาที่เครื่องมือถึงจุดเสถียรที่เหมาะสมแก่การอ่านค่า เครื่องวัดรังสีอาทิตย์โดยทั่วไป เมื่อเริ่มรับรังสีอาทิตย์จะไม่ให้สัญญาณออกมาในทันที แต่สัญญาณที่ได้จะค่อยๆ เพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นดังกล่าวโดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียล (exponential) โดยจะบอกความสามารถหรือความรวดเร็วในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีอาทิตย์ในรูปของเวลาการตอบสนอง ซึ่งจะกำหนดให้เป็นเวลาที่ใช้ในการเพิ่มขึ้นของสัญญาณจากค่าที่ต่ำสุดจนถึง $1/e$ เท่าของค่าสัญญาณสูงสุด ($e \sim 2.718$) มีหน่วยเป็นวินาที หรืออาจใช้เป็นเวลาทำให้อ่านค่าที่ได้จากหัววัดเป็น 95% ของการอ่านค่าที่เสถียรอย่างแท้จริง (แต่ถ้าเป็นมาตรฐานตาม WMO ใช้ 99%) โดยเครื่องวัดรังสีอาทิตย์ที่ดีจะต้องมีเวลาการตอบสนองที่

สั้น ตัวอย่างเช่น ไพร์เฮริโอมิเตอร์ของบริษัท Eppley (model NIP) จะมีเวลาการตอบสนองเท่ากับ 1 วินาที

6) การตอบสนองต่อมุมตกกระทบ (cosine response) สมบัติด้านการตอบสนองต่อมุมตกกระทบจะใช้ในกรณีไพราโนมิเตอร์ โดยไม่ใช้กับกรณีของไพร์เฮริโอมิเตอร์ ทั้งนี้เพราะไพร์เฮริโอมิเตอร์นั้นรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบจะทำมุมตั้งฉากกับตัวรับรังสีตลอดเวลา แต่กรณีของไพราโนมิเตอร์ซึ่งส่วนใหญ่จะวัดบนพื้นราบและมุมตกกระทบของรังสีอาทิตย์บนเครื่องวัดมีการเปลี่ยนแปลงตลอดทั้งวัน เมื่อรังสีอาทิตย์ในส่วนที่เป็นรังสีตรงตกกระทบเป็นมุมใดๆ เราสามารถแปลงค่าที่วัดได้ให้มาอยู่ในระนาบตั้งฉากกับพื้นราบ โดยการหารด้วยค่าโคไซน์ (cosine) ของมุมตกกระทบ ซึ่งจะเห็นว่าการแปลงค่าดังกล่าวขึ้นกับโคไซน์ของมุมตกกระทบ แต่โดยทั่วไปเครื่องวัดจะไม่ตอบสนองแบบโคไซน์สมบูรณ์ทุกมุมโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่มุมตกกระทบมากๆ ซึ่งจะทำให้ผลการวัดที่มุมดังกล่าวมีความคลาดเคลื่อนสูงขึ้น ตัวอย่างการตอบสนองต่อค่ามุมตกกระทบของไพราโนมิเตอร์ แสดงตามรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 กราฟการตอบสนองต่อมุมตกกระทบของเครื่องวัด

7) ค่าชดเชยของเครื่องมือ (zero off-set) โดยทั่วไปจะเป็นการวัดเสถียรภาพของจุดศูนย์ซึ่งบ่งบอกถึงผลของการแผ่ความร้อน และอุณหภูมิชั่วขณะ ทำการวัดโดยนำเครื่องมือไปอยู่ภายใต้สภาพที่ไร้แสงรบกวนแล้วทำการวัดสัญญาณไฟฟ้าที่ได้ออกมา โดยที่เครื่องวัดที่ดีจะต้องมีค่าชดเชยเท่ากับ 0 แต่ทั้งนี้จะไม่รวมผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วอันเนื่องมาจากฝน

2.8 การจำแนกลำดับชั้นของเครื่องวัดรังสีอาทิตย์

มาตรฐานในการกำหนดคุณสมบัติและการจัดจำแนกเครื่องมือวัดรังสีอาทิตย์ สำหรับใช้วัดรังสีรวม (hemispherical solar radiation) และรังสีตรง (direct solar radiation) ซึ่งออกโดยองค์การมาตรฐานสากล (The International Organization for Standardization; ISO 9060: 1990) ทั้งนี้ในการกำหนดมาตรฐานของเครื่องมือวัดรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐานดังกล่าวนี้จะอาศัยผลการทดสอบเครื่องมือวัดทั้งในห้องปฏิบัติการและในสถานการณ์จริง โดยกระบวนการที่ใช้จะสอดคล้องและใกล้เคียงกับกระบวนการที่ใช้โดยองค์การอุตุนิยมวิทยาโลก (World Meteorological Organization) แต่ทั้งนี้มาตรฐานดังกล่าวจะมุ่งเน้นที่การใช้เครื่องมือวัดสำหรับการประยุกต์ใช้งานด้านพลังงานแสงอาทิตย์ อีกทั้งยังใช้สำหรับเป็นเกณฑ์ในการเลือกใช้เครื่องมือที่จะนำมาใช้ในการสอบเทียบเครื่องมือวัดด้วย เช่นกันโดยเครื่องมือวัดที่มี class ต่ำกว่าจะไม่สามารถใช้เป็นเครื่องมืออ้างอิงสำหรับ class ที่สูงกว่าได้ การจัดหมวดหมู่จะมีการแยกตามประเภทของการวัดดังนี้

1) ไพราโนมิเตอร์

องค์การมาตรฐานสากลได้จำแนกไพราโนมิเตอร์ตามสมรรถนะของเครื่องวัดรังสีอาทิตย์ออกเป็น 3 ลำดับชั้น (class) ได้แก่ ไพราโนมิเตอร์มาตรฐานทุติยภูมิ (secondary standard pyranometer) ไพราโนมิเตอร์ชั้น 1 (first class pyranometer) และไพราโนมิเตอร์ชั้น 2 (second class pyranometer) โดยไพราโนมิเตอร์จะไม่มีเครื่องมือมาตรฐานปฐมภูมิ (primary standard) ทั้งนี้เพราะการสอบเทียบไพราโนมิเตอร์จะต้องอ้างอิงซึ่งสามารถตรวจสอบย้อนกลับไปยังไพโรเฮลิโอมิเตอร์มาตรฐานปฐมภูมิ ที่ใช้เป็นมาตรฐานของโลก ไพราโนมิเตอร์แต่ละชั้นจะมีสมบัติตามตารางที่ 2.1 โดยที่การจำแนกกลุ่มของไพราโนมิเตอร์จำแนกตามค่าเฉลี่ยของแต่ละข้อไม่เกินขีดจำกัดที่ระบุไว้ในตารางที่ 2.1 ซึ่งเป็นค่าที่ได้รับการตรวจสอบมาเป็นอย่างดี



ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของไพราโนมิเตอร์

สมบัติ	เครื่องวัดทุติยภูมิ	เครื่องวัดชั้น 1	เครื่องวัดชั้น 2
1.เวลาของการตอบสนอง	<15วินาที	<30วินาที	<60วินาที
2.ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความไม่สมบูรณ์ของการตอบสนองของเครื่องวัดรังสีที่ตกกระทบในมุมต่างๆ	$\pm 10 \text{ W/m}^2$	$\pm 20 \text{ W/m}^2$	$\pm 30 \text{ W/m}^2$
3.ความเบี่ยงเบนของค่าสภาพตอบสนองต่อความยาวคลื่นต่างๆ (R_λ) จากค่าเฉลี่ย (\bar{R}_λ) ในช่วงความยาวคลื่น 0.35-1.5 ไมครอน	$\pm 3\%$	$\pm 5\%$	$\pm 10\%$
4.ความเบี่ยงเบนของค่ารังสีอาทิตย์ที่วัดได้จากค่าที่ถูกตั้งโดยอ้างอิงกับมาตรฐานโลก เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงในช่วง 50 เคลวิน	2%	4%	8%
5.ความเบี่ยงเบนของสภาพตอบสนองในช่วงที่ใช้งาน ซึ่งรังสีอาทิตย์มีค่า 100-1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร จากสภาพตอบสนองที่ความเข้มรังสีอาทิตย์ 500 วัตต์ต่อตารางเมตร	$\pm 0.5\%$	$\pm 1\%$	$\pm 3\%$
6.การเปลี่ยนแปลงของสภาพตอบสนองต่อปี	$\pm 0.8\%$	$\pm 1.5\%$	$\pm 3\%$
7.ความเบี่ยงเบนของค่าสภาพตอบสนองเมื่อเครื่องวัดเอียงทำมุมต่างๆ ในช่วง 0-90 องศาจากสภาพตอบสนอง เมื่อเครื่องวัดอยู่ในระนาบในแนวระดับ	$\pm 0.5\%$	$\pm 2\%$	$\pm 5\%$
8.การเปลี่ยนแปลงของซีตศูนย์ (zero off-set) เมื่ออุณหภูมิของอากาศแวดล้อมเปลี่ยนแปลง 5 เคลวินต่อชั่วโมง	$\pm 2 \text{ W/m}^2$	$\pm 4 \text{ W/m}^2$	$\pm 8 \text{ W/m}^2$

2) ไพร์เฮริโอมิเตอร์

เกณฑ์ในการจำแนกไพร์เฮริโอมิเตอร์จะใช้หลักการเช่นเดียวกับไพราโนมิเตอร์ แต่มีบางค่าพารามิเตอร์ จะแตกต่างกัน เช่น ไพร์เฮริโอมิเตอร์จะไม่พิจารณาในส่วนของ การตอบสนองต่อทิศทางการเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสี (directional response) แต่จะใช้เกณฑ์การพิจารณาเรื่องของการสอบเทียบย้อนกลับ (Traceability) แทน โดยเกณฑ์สำหรับการจำแนกไพร์เฮริโอมิเตอร์แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของไพร์เฮริโอมิเตอร์

สมบัติ	เครื่องวัดทุติยภูมิ	เครื่องวัดชั้น 1	เครื่องวัดชั้น 2
1.เวลาของการตอบสนอง	<15วินาที	<20วินาที	<30วินาที
2.ความเบี่ยงเบนของค่าสภาพตอบสนองต่อความยาวคลื่นต่างๆ (R_λ) จากค่าเฉลี่ย (\bar{R}_λ) ในช่วงความยาวคลื่น 0.35-1.5 ไมครอน	$\pm 0.5\%$	$\pm 1\%$	$\pm 5\%$
3.ความเบี่ยงเบนของค่ารังสีอาทิตย์ที่วัดได้จากค่าที่ถูกต้องโดยอ้างอิงกับมาตรฐานโลก เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงในช่วง 50 เคลวิน	$\pm 1\%$	$\pm 2\%$	$\pm 10\%$
4.ความเบี่ยงเบนของสภาพตอบสนองในสภาพที่ใช้งาน ซึ่งรังสีอาทิตย์มีค่า 100-1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร จากสภาพตอบสนองที่ความเข้มรังสีอาทิตย์ 500 วัตต์ต่อตารางเมตร	$\pm 0.2\%$	$\pm 0.5\%$	$\pm 2\%$
5.การเปลี่ยนแปลงของสภาพตอบสนองต่อปี	$\pm 0.5\%$	$\pm 1\%$	$\pm 2\%$
6.การเปลี่ยนแปลงของขีดศูนย์ (zero off-set) เมื่ออุณหภูมิของอากาศแวดล้อมเปลี่ยนแปลง 5 เคลวินต่อชั่วโมง	$\pm 1 \text{ W/m}^2$	$\pm 3 \text{ W/m}^2$	$\pm 6 \text{ W/m}^2$
7.การสอบเทียบ	ต้องสอบเทียบกับเครื่องวัดมาตรฐานปฐมภูมิ	ต้องสอบเทียบกับเครื่องวัดมาตรฐานทุติยภูมิหรือระดับที่สูงกว่า	ต้องสอบเทียบกับเครื่องวัดชั้น 1 หรือระดับที่สูงกว่า

2.9 สเกลของค่าความเข้มรังสีอาทิตย์

สเกลของค่าความเข้มรังสีอาทิตย์จะกำหนดจากค่ารังสีตรง ทั้งนี้เพราะเป็นรังสีที่มีทิศทางแน่นอนและสามารถวัดด้วยไพร์เฮริโอมิเตอร์แบบสัมบูรณ์ โดยหลังจากที่มีการพัฒนาไพร์เฮริโอมิเตอร์แบบสัมบูรณ์ในช่วงต้นศตวรรษที่ 20 นักวิทยาศาสตร์สามารถวัดค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ของดวงอาทิตย์ได้โดยตรง โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในช่วงนั้นได้แก่ ไพร์เฮริโอมิเตอร์แบบชดเชยพลังงานด้วยกระแสไฟฟ้าของอังสตรอม ดังนั้นในการประชุมวิชาการนานาชาติทางอุตุนิยมวิทยา (International Meteorological Conference) ที่เมืองอินส์บรุค (Innsbruck) ประเทศออสเตรียในปี ค.ศ. 1905 ที่ประชุมมีมติให้กำหนดไพร์เฮริโอมิเตอร์ของอังสตรอมเป็นเครื่องมือวัดรังสีตรงมาตรฐาน โดยใช้ค่าความเข้มรังสีตรงซึ่งวัดด้วยไพร์เฮริโอมิเตอร์ของอังสตรอมหมายเลข A70 ซึ่งเก็บรักษาไว้ที่สถาบันฟิสิกส์ (Institute of Physics) เมืองอัฟซาลา (Uppsala) ประเทศสวีเดน เป็นเครื่องมือวัดมาตรฐาน โดยค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่วัดได้จากเครื่องมือชุดอื่นจะต้องอ้างอิงกับค่าจากเครื่องวัดดังกล่าว สเกลของค่าความเข้มรังสีอาทิตย์จากเครื่องวัดนี้มีชื่อว่า AS1905

สำหรับที่ประเทศสหรัฐอเมริกา สถาบันวิจัยสมิธโซเนียน (Smithsonian) ได้ศึกษาสเกลของความเข้มรังสีอาทิตย์ใหม่โดยใช้เครื่องมือวัดแบบสัมบูรณ์หลายแบบและได้กำหนดสเกลความเข้มรังสีอาทิตย์ในปี ค.ศ. 1913 ซึ่งเรียกชื่อย่อว่า SS1913

ในปี ค.ศ. 1956 คณะกรรมการรังสีนานาชาติ (International Radiation Commission) ซึ่งมีสำนักงานอยู่ที่เมืองดาวอส (Davos) ประเทศสวิสเซอร์แลนด์ ได้ทำการตรวจสอบสเกลความเข้มรังสีอาทิตย์ AS1905 และ SS1913 พบว่าสเกลทั้งสองยังมีความคลาดเคลื่อน จึงได้กำหนดสเกลความเข้มรังสีอาทิตย์ขึ้นใหม่ซึ่งมีชื่อเรียกว่า สเกลรังสีอาทิธยานานาชาติ 1956 (international pyrheliometric scale 1956) หรือมีชื่อย่อว่า IPS 1956 โดยค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ใช้สเกล AS1905 และ SS1913 ต้องแปลงให้อยู่ในสเกล IPS1956 โดยใช้สูตรต่อไปนี้

$$\text{IPS1956} = 1.015 \times \text{AS1905} \quad (2.10)$$

$$\text{IPS1956} = 0.98 \times \text{SS1913} \quad (2.11)$$

ต่อมาในช่วงปลายทศวรรษที่ 1960 ได้มีการพัฒนาไพร์เฮริโอมิเตอร์แบบสัมบูรณ์แบบแอคตีฟแควิตี้ที่สามารถวัดรังสีอาทิตย์ได้ละเอียดถูกต้องมากกว่าเครื่องวัดในอดีต ศูนย์รังสีโลก (World Radiation Center, WRC) ซึ่งตั้งอยู่ที่เมืองดาวอส ประเทศสวิสเซอร์แลนด์ จึงได้ทำการเปรียบเทียบผลการวัดรังสีอาทิตย์โดยใช้สเกล IPS1956 กับผลการวัดของเครื่องวัดแบบแอคตีฟแควิตี้ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ โดยพบว่าผลการวัดโดยใช้สเกล IPS1956 มีค่าต่ำกว่าผลการวัดด้วยเครื่องวัดแบบแอคตีฟแควิตี้ 2.2% ดังนั้น ศูนย์รังสีโลก จึงได้ประกาศให้ใช้สเกลการวัดรังสีอาทิตย์ขึ้นใหม่ ซึ่งใช้เป็นมาตรฐานการวัดรังสีของโลก (World Radiometric Reference, WRF) โดยค่ารังสีอาทิตย์ที่วัดในสเกล IPS1956 จะต้องแปลงให้เป็นค่าสเกลมาตรฐาน (WRF) ดังสูตร

$$WRF=1.022 \times IPS1956$$

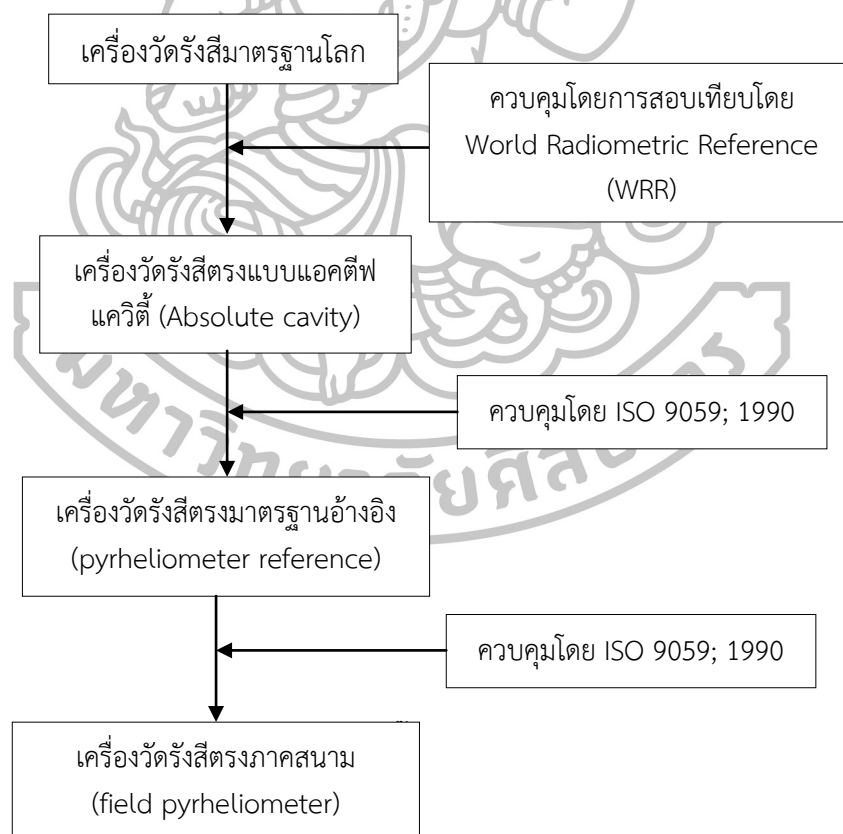
(2.12)

สเกลดังกล่าวเริ่มใช้มาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 จนถึงปัจจุบัน โดย WRC เก็บรักษาเครื่องวัดรังสีอาทิตย์มาตรฐานไว้ที่สำนักงานของ WRC เมืองดาวอส ประเทศสวิตเซอร์แลนด์

2.10 การสอบเทียบเครื่องวัดรังสีอาทิตย์

2.10.1 เครื่องวัดรังสีอาทิตย์มาตรฐานโลก

เครื่องวัดรังสีอาทิตย์มาตรฐานโลกที่เก็บรักษาไว้โดยศูนย์รังสีโลก (World Radiation Center; WRC) ณ เมืองดาวอส ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ โดยเครื่องวัดมาตรฐานของ WRC ประกอบด้วยไพร์เฮริโอมิเตอร์แบบสมบูรณ์จำนวน 6 เครื่อง แสดงตามรูปที่ 2.25 ซึ่งสร้างด้วยเทคนิคที่แตกต่างกัน และค่ารังสีมาตรฐานจะเป็นค่าเฉลี่ยของความเข้มรังสีตรงที่ได้จากไพร์เฮริโอมิเตอร์แบบสมบูรณ์ทั้ง 6 เครื่อง ในการวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ได้มาตรฐานและเป็นที่ยอมรับในระดับสากลนั้น เครื่องวัดที่ใช้ต้องได้รับการสอบเทียบกับเครื่องวัดมาตรฐาน โดยค่าแพคเตอร์ของเครื่องวัดรังสีอาทิตย์ต้องสามารถตรวจสอบย้อนกลับ (traceability) ไปยังเครื่องวัดรังสีมาตรฐานโลก



รูปที่ 2.24 แผงการสอบเทียบไพร์เฮริโอมิเตอร์



รูปที่ 2.25 เครื่องวัดรังสีมาตรฐานของศูนย์รังสีโลก (WRC) ที่เมืองดาวอส ประเทศสวิสเซอร์แลนด์

2.10.2 การสอบเทียบไพร์เฮริโอมิเตอร์มาตรฐานปฐมภูมิกับเครื่องวัดรังสีมาตรฐานโลก
 สำหรับการดำเนินการสอบเทียบนานาชาติจะจัดขึ้นในทุกๆ 5 ปี โดยที่ศูนย์รังสีโลกจะเชิญชวนให้หน่วยงานที่ทำงานด้านรังสีอวกาศวิทยในประทศต่างๆ นำเครื่องวัดรังสีอวกาศวิทยของตนไปทำการสอบเทียบที่ศูนย์รังสีโลก ไพร์เฮริโอมิเตอร์ที่นำไปสอบเทียบกับเครื่องวัดมาตรฐานของศูนย์รังสีโลก ซึ่งไพร์เฮริโอมิเตอร์แบบสมบูรณ์จะให้ค่าความเข้มรังสีอวกาศวิทยด้วยตัวเองได้ แต่ก็จำเป็นต้องตรวจสอบค่าที่วัดได้และปรับให้ตรงกับค่าของเครื่องวัดมาตรฐานของโลก โดยอาศัยการสอบเทียบกับเครื่องวัดของศูนย์รังสีโลก ซึ่งในการสอบเทียบเครื่องวัดรังสีอวกาศวิทยนั้นศูนย์รังสีโลกจะเป็นผู้กำหนดกระบวนการ จากนั้นศูนย์รังสีโลกจะออกใบรับรองการสอบเทียบให้



รูปที่ 2.26 ไพร์เฮริโอมิเตอร์แบบสมบูรณ์ของภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

2.10.3 การสอบเทียบไพร์เฮลิโอมิเตอร์อ้างอิงกับไพร์เฮลิโอมิเตอร์มาตรฐานปฐมภูมิ

ไพร์เฮลิโอมิเตอร์มาตรฐานปฐมภูมิซึ่งได้รับการสอบเทียบกับไพร์เฮลิโอมิเตอร์มาตรฐานโลกแล้ว โดยทั่วไปจะเก็บรักษาไว้ที่หน่วยงานด้วยมาตรฐานของประเทศ จากนั้นจะทำการถ่ายถอดแพคเตอร์ของการสอบเทียบไปสู่ไพร์เฮลิโอมิเตอร์อ้างอิง (reference pyr heliometer) เพื่อนำไปใช้เป็นเครื่องวัดอ้างอิงสำหรับสอบเทียบเครื่องวัดที่ใช้งานในภาคสนาม โดยเครื่องวัดอ้างอิงควรเป็นเครื่องวัดในลำดับชั้น 1

ในการสอบเทียบไพร์เฮลิโอมิเตอร์อ้างอิงกับไพร์เฮลิโอมิเตอร์มาตรฐานปฐมภูมิ เราจะ นำเครื่องวัดทั้งสองติดตั้งบนอุปกรณ์ติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ แสดงตามรูปที่ 2.27 และให้เครื่องวัดดังกล่าววัดรังสีตรงพร้อมกัน แล้วทำการบันทึกค่าศักย์ไฟฟ้าจากไพร์เฮลิโอมิเตอร์อ้างอิง ($V_{n,ref}$) และทำการอ่านค่ารังสีตรงที่ได้จากไพร์เฮลิโอมิเตอร์มาตรฐานปฐมภูมิ ($I_{n,ST}$) จากนั้นจะคำนวณค่าสภาพตอบสนอง (responsivity, $R_{n,ref}$) ของไพร์เฮลิโอมิเตอร์อ้างอิง โดยใช้สมการ

$$R_{n,ref} = \frac{V_{n,ref}}{I_{n,ST}} \quad (2.13)$$

เมื่อ $V_{n,ref}$ คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากไพร์เฮลิโอมิเตอร์ที่จะใช้เป็นเครื่องวัดอ้างอิง (mV)
 $I_{n,ST}$ คือ ความเข้มรังสีตรงที่ได้จากไพร์เฮลิโอมิเตอร์มาตรฐานปฐมภูมิ ($W \cdot m^{-2}$)
 $R_{n,ref}$ คือ ค่าสภาพการตอบสนองของไพร์เฮลิโอมิเตอร์ที่จะใช้เป็นเครื่องวัดอ้างอิง ($\mu V/W \cdot m^{-2}$)



รูปที่ 2.27 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับสอบเทียบไพร์เฮลิโอมิเตอร์อ้างอิงที่ศูนย์สอบเทียบเครื่องวัดรังสีอาทิตย์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

2.10.4 การสอบเทียบไพร์เฮริโอมิเตอร์ภาคสนามกับไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง

โดยทั่วไปไม่ นิยมใช้ไพร์เฮริโอมิเตอร์มาตรฐานปฐมภูมิที่ผ่านการสอบเทียบมาตรฐานโลกแล้วไปเป็นมาตรฐานในการสอบไพร์เฮริโอมิเตอร์ภาคสนาม ทั้งนี้เพราะอาจทำให้เครื่องวัดรังสีอาทิตย์มาตรฐานเสื่อมสภาพในทางปฏิบัติจะนำไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงที่ผ่านการสอบเทียบกับไพร์เฮริโอมิเตอร์มาตรฐานปฐมภูมิแล้วไปใช้อ้างอิงแทน โดยการสอบเทียบจะติดตั้งไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงและไพร์เฮริโอมิเตอร์ภาคสนามบนอุปกรณ์ติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ แสด ตามรูปที่ 2.28 จากนั้นจะให้เครื่องวัดรังสีอาทิตย์พร้อมกัน และบันทึกค่าศักย์ไฟฟ้าจากเครื่องวัดทั้งสอง แล้วนำไปหาค่าสภาพการตอบสนองของไพร์เฮริโอมิเตอร์ภาคสนาม จากสมการ

$$R_{n,\text{field}} = \frac{V_{n,\text{field}}}{I_{n,\text{ref}}} \quad (2.14)$$

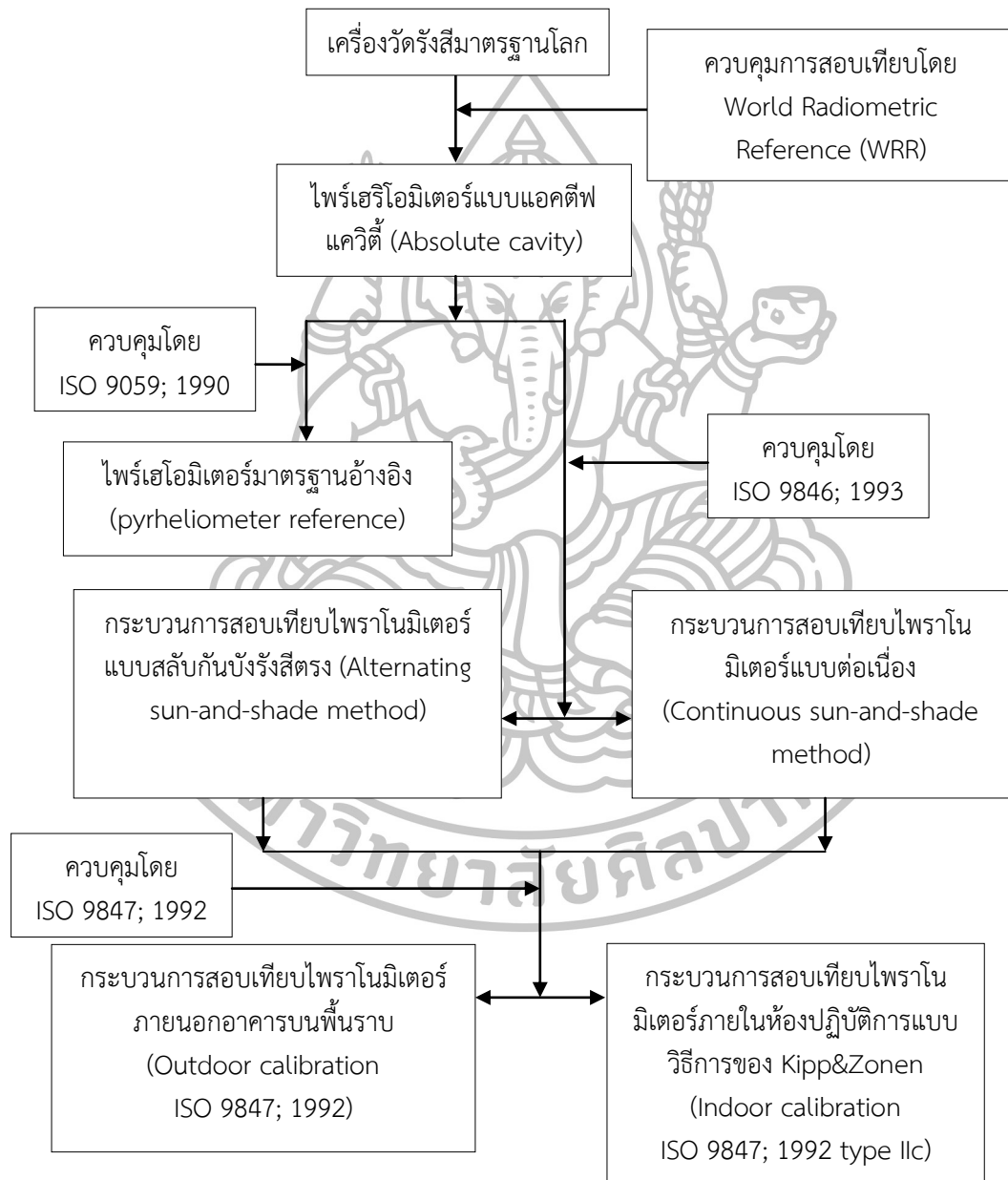
เมื่อ $V_{n,\text{field}}$ คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากไพร์เฮริโอมิเตอร์ภาคสนาม (mV)
 $I_{n,\text{ref}}$ คือ ความเข้มรังสีตรงที่ได้จากไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
 $R_{n,\text{field}}$ คือ ค่าสภาพการตอบสนองของไพร์เฮริโอมิเตอร์ภาคสนาม ($\mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)



รูปที่ 2.28 การติดตั้งอุปกรณ์การสอบเทียบไพร์เฮริโอมิเตอร์ภาคสนามที่ศูนย์สอบเทียบเครื่องวัดรังสีอาทิตย์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

2.10.5 การสอบเทียบไพราโนมิเตอร์เทียบกับไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง

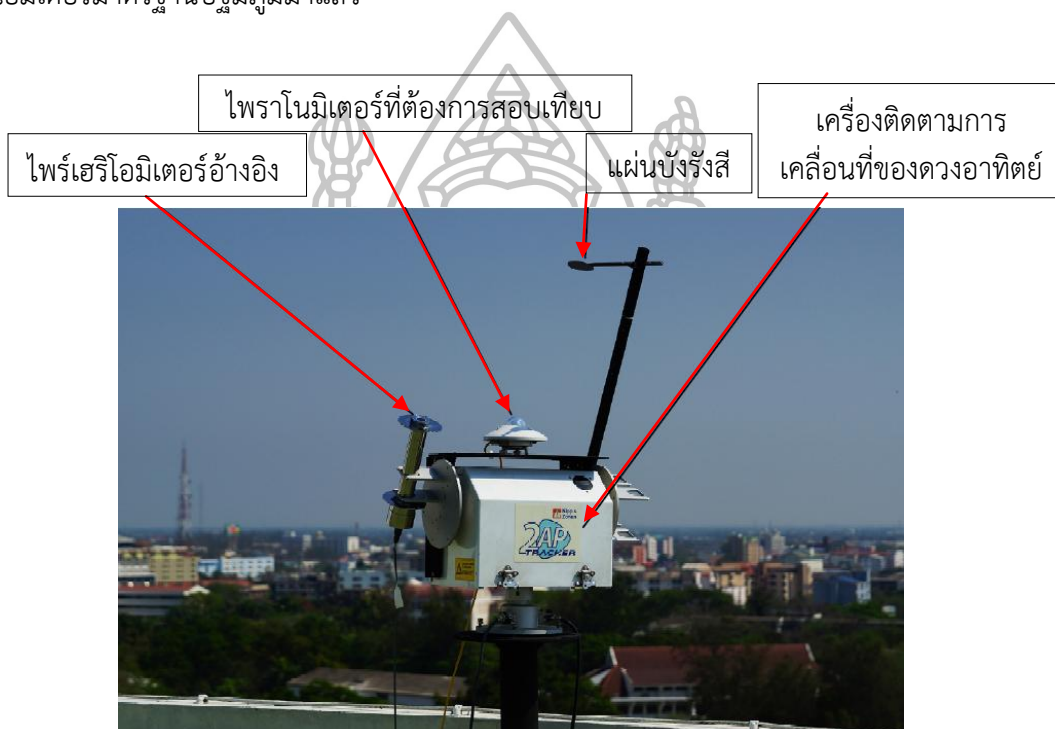
การสอบเทียบไพราโนมิเตอร์ นั้นเป็นกระบวนการถ่ายทอดค่าสภาพการตอบสนองจากไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง เนื่องจากในปัจจุบันยังไม่มีข้อกำหนดมาตรฐานของเครื่องวัด ไพราโนมิเตอร์ได้โดยตรง ดังนั้นองค์การมาตรฐานสากล (International Organization for Standardization; ISO) จึงได้กำหนดกระบวนการมาตรฐานสากล ISO 9846; 1993 ไว้สำหรับการสอบเทียบไพราโนมิเตอร์เทียบกับไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง ได้กำหนดวิธีการสอบเทียบไว้ 2 วิธีดังนี้



รูปที่ 2.29 แผนภูมิการสอบเทียบเครื่องวัดรังสีอาทิตย์

1) การสอบเทียบไพราโนมิเตอร์แบบสลับกันบังไม่บังรังสีอาทิตย์ (alternating sun-and-shade method)

การหาค่าสภาพการตอบสนองไพราโนมิเตอร์แบบสลับกันบังไม่บังรังสีตรง แบบกระบวนการมาตรฐาน ISO 9846; 1993 ได้ระบุการติดตั้งไพโรเฮริโอมิเตอร์อ้างอิงและไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบนั้นไว้บนเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์โดยที่ไพราโนมิเตอร์อยู่บนระนาบในแนวระดับ และติดตั้งแผ่นบังรังสีอาทิตย์เพื่อบังรังสีตรงที่จะตกลงมากระทบไพราโนมิเตอร์ แสดงตามรูปที่ 2.30 โดยไพโรเฮริโอมิเตอร์ที่ใช้เป็นมาตรฐานอ้างอิง ต้องผ่านการถ่ายทอดค่าแฟคเตอร์จากไพโรเฮริโอมิเตอร์มาตรฐานปฐมภูมิมาแล้ว



รูปที่ 2.30 การติดตั้งอุปกรณ์การสอบเทียบไพราโนมิเตอร์แบบสลับกันบังไม่บังรังสีตรงโดยใช้ไพโรเฮริโอมิเตอร์มาตรฐานอ้างอิง ที่ศูนย์สอบเทียบเครื่องวัดรังสีอาทิตย์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

ในการสอบเทียบดังกล่าว ไพโรเฮริโอมิเตอร์อ้างอิงและไพราโนมิเตอร์รับรังสีอาทิตย์พร้อมกัน และหมุนแผ่นบังรังสีตรงจากดวงอาทิตย์ให้บังและไม่บังไพราโนมิเตอร์สลับไปมา โดยขณะที่ไพราโนมิเตอร์ถูกบังไพราโนมิเตอร์ จะวัดเฉพาะรังสีกระจายซึ่งจะได้สัญญาณศักย์ไฟฟ้า (V_D) และขณะที่ไม่ถูกบังไพราโนมิเตอร์วัดรังสีรวมซึ่งได้ศักย์ไฟฟ้า (V_G) ผลต่างของศักย์ไฟฟ้า ($V_D - V_G$) จะเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากรังสีตรงซึ่งได้จากไพราโนมิเตอร์ดังกล่าว ในขณะเดียวกันจะทำการบันทึกศักย์ไฟฟ้าของไพโรเฮริโอมิเตอร์อ้างอิงและแปลงให้เป็นค่าความเข้มรังสีตรง (I_{ref}) โดยค่าสภาพการตอบสนองของไพโรเฮริโอมิเตอร์ดังกล่าว เนื่องจากรังสีตรงที่ได้ในระนาบตั้งฉากกับรังสีอาทิตย์ ดังนั้นต้องแปลงให้อยู่ในระนาบในแนวระดับโดยคูณโคไซน์ของมุมเซนธิซของดวงอาทิตย์ จากนั้นจะทำการคำนวณค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ (R) จากสมการ

$$R_{\text{test}} = \frac{V_G - V_D}{I_{\text{ref}} \cos \theta_Z} \quad (2.15)$$

- เมื่อ V_D คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบขณะที่ถูกบัง (mV)
 V_G คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบขณะที่ไม่ถูกบัง (mV)
 I_{ref} คือ ค่าความเข้มรังสีตรงที่ได้จากไพโรเฮริโอมิเตอร์มาตรฐานอ้างอิง (W.m^{-2})
 R_{test} คือ ค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ ($\mu\text{V/W.m}^{-2}$)
 θ_Z คือ มุมเซนธิ์ของดวงอาทิตย์ (องศา)

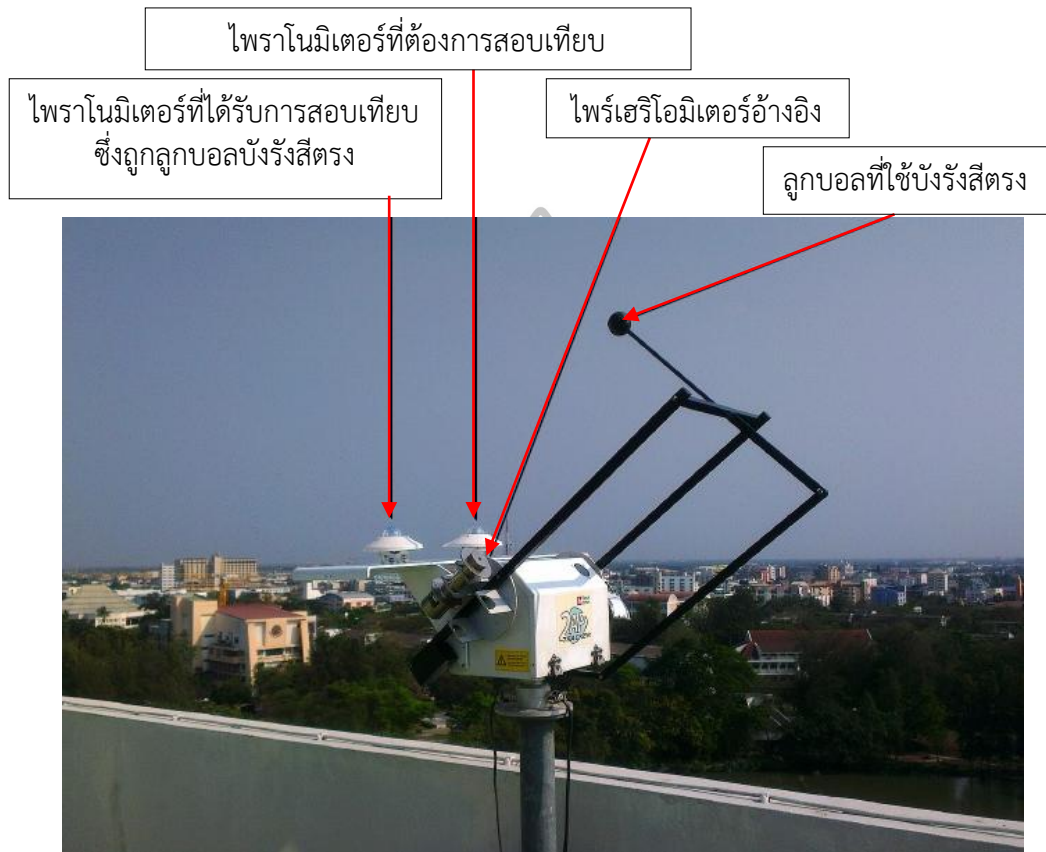
2) การสอบเทียบไพราโนมิเตอร์แบบต่อเนื่อง

สำหรับการสอบเทียบแบบนี้ จะติดตั้งไพราโนมิเตอร์ 2 เครื่องบนระนาบในแนวระดับ โดยเครื่องหนึ่งเป็นเครื่องที่ต้องการสอบเทียบ ส่วนอีกเครื่องหนึ่งจะเป็นเครื่องที่ได้รับการสอบเทียบกับไพโรเฮริโอมิเตอร์อ้างอิงตามวิธีในข้อ 1) มาแล้ว และมีแผ่นบังรังสีอาทิตย์บังรังสีตรงอยู่ตลอดเวลา นอกจากนี้จะต้องติดตั้งไพโรเฮริโอมิเตอร์อ้างอิงบนเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ แสดงตามรูปที่ 2.31 ในการสอบเทียบจะให้เครื่องวัดรังสีอาทิตย์ทั้ง 3 เครื่องวัดรังสีอาทิตย์ตลอดเวลา จากนั้นจะบันทึกค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องวัดรังสีอาทิตย์ทั้ง 3 เครื่อง แล้วจะนำค่าศักย์ไฟฟ้าจากไพโรเฮริโอมิเตอร์ไปคำนวณเป็นค่าความเข้มรังสีตรงบนระนาบตั้งฉากกับทิศทางของรังสีอาทิตย์ ($I_{n,\text{ref}}$) และแปลงให้เป็นค่าบนระนาบในแนวระดับโดยการคูณโคไซน์ของมุมเซนธิ์ของดวงอาทิตย์ ซึ่งจะได้ $I_{n,\text{ref}} \cos \theta_Z$ พร้อมทั้งใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์ที่มีแผ่นบังรังสีตรงจากดวงอาทิตย์เพื่อแปลงเป็นค่าความเข้มรังสีกระจายบนระนาบในแนวระดับ (I_d) ผลบวกของรังสีตรงกับรังสีกระจาย ($I_{n,\text{ref}} \cos \theta_Z + I_d$) จะเป็นค่ารังสีรวมบนระนาบในแนวระดับ ในขั้นตอนสุดท้ายจะหารค่าศักย์ไฟฟ้าจากไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ (V_{gh}) ด้วยค่ารังสีรวม ($I_{n,\text{ref}} \cos \theta_Z + I_d$) ผลที่ได้จะเป็นค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ จากสมการ

$$R_g = \frac{V_{gh}}{I_{n,\text{ref}} \cos \theta_Z + I_d} \quad (2.16)$$

- เมื่อ $I_{n,\text{ref}}$ คือ ค่าความเข้มรังสีตรงบนระนาบตั้งฉากกับทิศทางของรังสีที่ได้จากไพโรเฮริโอมิเตอร์อ้างอิง (W.m^{-2})
 I_d คือ ค่าความเข้มรังสีกระจายบนระนาบในแนวระดับที่ได้จากไพราโนมิเตอร์ที่มีแผ่นบังรังสีตรง (W.m^{-2})
 V_{gh} คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบวางบนระนาบในแนวระดับ (mV)

R_g คือ ค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการ
สอบเทียบ ($\mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)



รูปที่ 2.31 การติดตั้งอุปกรณ์การสอบเทียบไพราโนมิเตอร์แบบต่อเนื่องที่ศูนย์สอบเทียบเครื่องวัดรังสี
อาทิตย์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

2.10.6 การสอบเทียบไพราโนมิเตอร์ที่ใช้งานภาคสนาม

ในการใช้งานไพราโนมิเตอร์ที่ติดตั้งไว้ภาคสนามตามสถานีวิัดต่างๆ เครื่องวัดจะมีการ
เสื่อมสภาพไปตามอายุการใช้งาน โดยที่ค่าสภาพการตอบสนองจะมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจำเป็นต้อง
ทำการสอบเทียบเพื่อให้ทราบสภาพการตอบสนองอย่างน้อยปีละ 1 ครั้ง แต่เนื่องจากการนำไพราโน
มิเตอร์ภาคสนามที่ติดตั้งอยู่ตามบริเวณต่างๆ ของประเทศกลับมายังหน่วยงานสอบเทียบเพื่อสอบ
เทียบกับไพร์เฮริโอมิเตอร์มาตรฐาน จะมีความยุ่งยากและข้อมูลจะขาดหายไปในช่วงที่นำเครื่องวัดมา
สอบเทียบ ดังนั้นองค์การมาตรฐานสากล (International Organization for Standardization,
ISO) จึงได้กำหนดวิธีสอบเทียบไพราโนมิเตอร์ภาคสนามขึ้นตามมาตรฐาน ISO9847 (ISO 9847,
1992)

ตามกระบวนการมาตรฐานดังกล่าวจะนำไพราโนมิเตอร์อ้างอิง (reference pyranometer)
ที่มีลำดับเท่ากันหรือสูงกว่าไพราโนมิเตอร์ภาคสนามและผ่านการสอบเทียบกับไพร์เฮริโอมิเตอร์

มาตรฐานตามวิธีการในหัวข้อ 2.7.5 มาแล้ว โดยจะติดตั้งไพราโนมิเตอร์อ้างอิงและไพราโนมิเตอร์ภาคสนามใกล้กันและให้อยู่ในระดับเดียวกัน แล้วทำการวัดรังสีรวมพร้อมกัน แสดงตามรูปที่ 2. 32 จากนั้นบันทึกค่าศักย์ไฟฟ้าจากเครื่องวัดทั้งสอง เพื่อนำมาคำนวณค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ ตามสมการ

$$R_g = \frac{V_{g,\text{field}}}{I_{g,\text{ref}}} \quad (2.17)$$

- เมื่อ $V_{g,\text{field}}$ คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ (mV)
 $I_{n,\text{ref}}$ คือ ค่าความเข้มรังสีรวมที่ได้จากไพราโนมิเตอร์มาตรฐานอ้างอิง ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
 R_g คือ ค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ ($\mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)



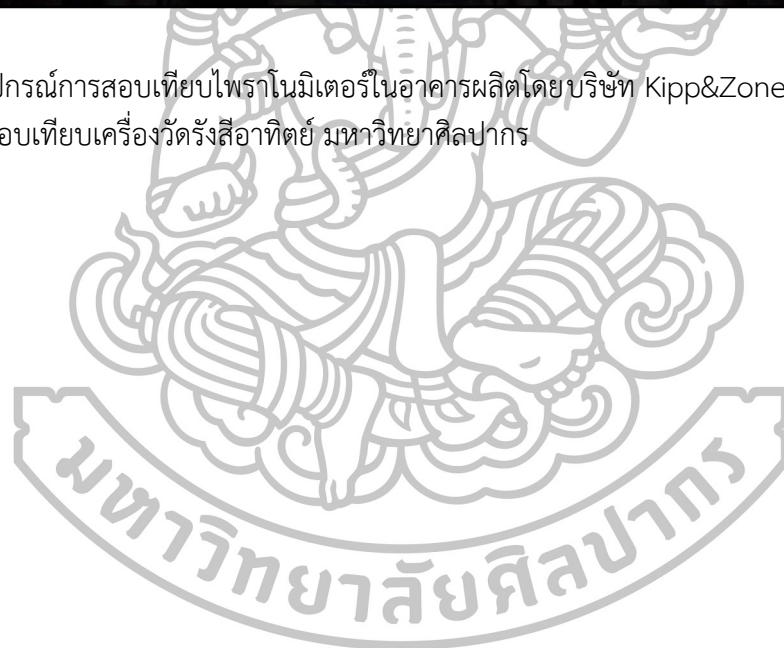
รูปที่ 2.32 การติดตั้งอุปกรณ์ในการสอบเทียบไพราโนมิเตอร์ภาคสนาม

2.10.7 การสอบเทียบไพราโนมิเตอร์ในห้องปฏิบัติการ

เนื่องจากการสอบเทียบไพราโนมิเตอร์โดยใช้รังสีอาทิตย์จริงนอกรังสีกว้าง บางครั้งสภาพอากาศไม่อำนวย เช่น ท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมมาก หรือฝนตก จึงไม่สามารถดำเนินการสอบเทียบได้ ดังนั้น บริษัทเคบีแอนด์โซเนนซ์จึงได้พัฒนาอุปกรณ์สำหรับสอบเทียบไพราโนมิเตอร์ภายในอาคาร เป็นชุดโต๊ะอุปกรณ์สอบเทียบ แสดงตามรูปที่ 2.33 โดยจะใช้แหล่งกำเนิดรังสีอาทิตย์เทียมซึ่งมีสเปกตรัมคล้ายกับรังสีอาทิตย์จริง ในการสอบเทียบไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบและไพราโนมิเตอร์อ้างอิง ผ่านการสอบเทียบตามวิธีการในหัวข้อ 2.10.5 และทำการบันทึกค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องวัดทั้งสองเครื่อง จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าสภาพการตอบสนองไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ



รูปที่ 2.33 อุปกรณ์การสอบเทียบไพราโนมิเตอร์ในอาคารผลิตโดยบริษัท Kipp&Zonen ของศูนย์
สอบเทียบเครื่องวัดรังสีอาทิตย์ มหาวิทยาลัยศิลปากร



2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากรังสีอาทิตย์ที่ส่องผ่านมายังพื้นผิวโลกนั้นเป็นปัจจัยสำคัญในการดำเนินกิจกรรมต่างๆในการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต จึงต้องมีการวัดรังสีอาทิตย์เพื่อให้ทราบปริมาณรังสีอาทิตย์ที่สามารถส่องผ่านเข้ามาได้เพื่อใช้ในการศึกษาและวิจัยด้านพลังงานแสงอาทิตย์ จึงทำให้นักวิจัยทั้งในและต่างประเทศให้ความสนใจในการศึกษาการวัดรังสีอาทิตย์เพื่อในการประยุกต์การใช้งาน และสิ่งสำคัญของการวัดที่เป็นพื้นฐาน คือเครื่องวัดรังสีอาทิตย์ที่มีความถูกต้องแม่นยำและมีคุณภาพ ดังนั้นจึงมีการพัฒนากระบวนการสอบเทียบเครื่องวัดรังสีอาทิตย์เพื่อใช้เป็นมาตรฐานสากลดังรายละเอียดต่อไปนี้

Latimer และคณะ (1964) ได้ทำการสอบเทียบไพราโนมิเตอร์ด้วยโต๊ะสอบเทียบแบบทรงกลมที่สามารถรับแสงจากแหล่งกำเนิดได้ 180 องศา ที่มีลักษณะเดียวกันกับทรงกลมของท้องฟ้า โดยใช้โต๊ะสอบเทียบทำการสอบเทียบไพราโนมิเตอร์ทั้งหมด 12 หัววัด และทำการเปรียบเทียบกระบวนการสอบเทียบไพราโนมิเตอร์เทียบกับไพโรเฮริโอมิเตอร์มาตรฐาน และเปรียบเทียบกับการสอบเทียบไพราโนมิเตอร์โดยใช้ชุดโต๊ะสอบเทียบ พบว่าการสอบเทียบทั้ง 2 ให้ผลใกล้เคียงกัน

Forgan (1995) ได้เสนอวิธีการสอบเทียบของไพราโนมิเตอร์ภาคสนาม ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายกว่าวิธีการใช้ค่ารังสีตรงและรังสีกระจาย ผลที่ได้พบว่ามีความผิดพลาดน้อยกว่าวิธีการที่ใช้ค่ารังสีตรงและรังสีกระจาย

Michalsky และคณะ (1995) ได้ทำการศึกษาสภาพการตอบสนองของมุมตกกระทบของเครื่องวัดรังสีอาทิตย์ ที่ใช้ทำการวัดรังสีรวม รังสีกระจาย และความสว่าง โดยได้ทำการพัฒนาชุดทดสอบการตอบสนองมุมตกกระทบแบบอัตโนมัติเพื่อใช้ทดสอบการตอบสนองของมุมตกกระทบของเครื่องวัดรังสี

Reda และคณะ (2003) ได้พัฒนารูปแบบการสอบเทียบเครื่องวัดรังสีอาทิตย์สำหรับใช้อ้างอิงการสอบเทียบเครื่องวัดรังสีกระจาย โดยเทียบกับไพโรเฮริโอมิเตอร์อ้างอิง วิธีการสอบเทียบดังกล่าว ความไม่แน่นอนของผลการสอบเทียบ (uncertainty) ประมาณ 3 %

Olando และคณะ (2014) ได้ทำการศึกษา สมรรถนะการสอบเทียบไพราโนมิเตอร์ภาคสนามของห้องปฏิบัติการสอบเทียบรังสีอาทิตย์ของ CENER ที่ได้รับการรับรองมาตรฐานสากล ISO 9847:1992 โดยการสอบเทียบไพราโนมิเตอร์เทียบกับไพราโนมิเตอร์มาตรฐานอ้างอิง ด้วยกระบวนการสอบเทียบไพราโนมิเตอร์ภายนอกอาคาร โดยสอบเทียบกลางแจ้งที่ได้แบ่งสภาพของท้องฟ้า เป็น 3 แบบ คือ ท้องฟ้าไม่มีเมฆ ท้องมีเมฆบางส่วน และท้องฟ้ามีเมฆ จากการสอบเทียบไพราโนมิเตอร์ ภายใต้สภาพของท้องฟ้าทั้ง 3 แบบ ได้ผลการสอบเทียบมีความแตกต่างกันเล็กน้อย

จากการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสอบเทียบเครื่องวัดรังสีอาทิตย์ พบว่ายังไม่มีการจัดตั้งระบบสอบเทียบตามมาตรฐาน ISO ในประเทศไทย ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการพัฒนาระบบสอบเทียบเครื่องวัดรังสีอาทิตย์ เพื่อใช้สอบเทียบเครื่องวัดรังสีอาทิตย์ตามรายละเอียดในบทต่อไป

บทที่ 3

วิธีการวิจัยและผล

ผู้วิจัยได้พัฒนาระบบสอบเทียบเครื่องวัดรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐาน ISO 4 ระบบตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ระบบการสอบเทียบไพร์เฮลิโอมิเตอร์กับไพร์เฮลิโอมิเตอร์อ้างอิง (reference pyrheliomete) (ISO 9059)

3.1.1 ข้อกำหนดของ ISO (ISO 9059)

3.1.1.1 เครื่องมือ ISO กำหนดให้ไพร์เฮลิโอมิเตอร์ที่ใช้เป็นมาตรฐานหรือไพร์เฮลิโอมิเตอร์อ้างอิง ต้องได้รับการสอบเทียบกับมาตรฐานโลกหรือสามารถสืบสาวขึ้นไปถึงมาตรฐานโลก (traceability) ได้ และกำหนดว่าไพร์เฮลิโอมิเตอร์อ้างอิงต้องมีมุมรับแสง (field-of-view) ไม่เกิน 10 องศา สำหรับไพร์เฮลิโอมิเตอร์ที่จะนำมาสอบเทียบต้องอยู่ในลำดับชั้นที่เท่ากันหรือต่ำกว่าลำดับชั้นของไพร์เฮลิโอมิเตอร์อ้างอิง นอกจากนี้ในการสอบเทียบต้องติดตั้งไพร์เฮลิโอมิเตอร์บนเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ (sun tracker) โดยข้อกำหนดระบุให้อุปกรณ์ดังกล่าวต้องมีความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ไม่เกิน 0.25 องศา

ในการวัดศักย์ไฟฟ้าจากไพร์เฮลิโอมิเตอร์ เครื่องวัดศักย์ไฟฟ้าต้องมี resolution อย่างน้อย 0.05 % ของค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากไพร์เฮลิโอมิเตอร์ และมีการเปลี่ยนแปลงผลการวัดเนื่องจากอุณหภูมิอยู่ในช่วง ± 0.1 %

3.1.1.2 แหล่งกำเนิดรังสี (radiation source) ต้องทำการสอบเทียบโดยใช้รังสีอาทิตย์ที่มีความเข้มรังสีตรงที่ตกกระทบตั้งฉากกับไพร์เฮลิโอมิเตอร์ไม่ต่ำกว่า 300 W.m^{-2} ถ้าเป็นไปได้ควรเกิน 700 W.m^{-2}

3.1.1.3 สภาพแวดล้อมทางอุตุนิยมวิทยา

ก) ในระหว่างการสอบเทียบความเร็วลมต้องมีค่าต่ำกว่า 3.0 m.s^{-1}

ข) สภาพท้องฟ้า (sky conditions) กรณีท้องฟ้ามีเมฆ เมฆควรอยู่ห่างจากดวงอาทิตย์มากกว่า 15 องศา และการสอบเทียบที่ดี ท้องฟ้าต้องมีเมฆน้อยกว่า 12.5 % (พื้นที่ที่มีเมฆเมื่อเทียบกับพื้นที่ท้องฟ้าทั้งหมด)

3.1.1.4 การติดตั้งเครื่องมือ ไพร์เฮลิโอมิเตอร์อ้างอิงและไพร์เฮลิโอมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบต้องติดตั้งบนเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ซึ่งอาจเป็นเครื่องเดียวกันหรือคนละเครื่องก็ได้ แต่ระยะห่างระหว่างไพร์เฮลิโอมิเตอร์ต้องไม่เกิน 20 เมตร และต้องติดตั้งไพร์เฮลิโอมิเตอร์ให้พร้อมก่อนการสอบเทียบอย่างน้อย 30 นาที

3.1.1.5 การเก็บข้อมูล ISO กำหนดให้เก็บข้อมูลเป็นชุดๆ แต่ละชุดใช้เวลา 10-20 นาที โดยในชุดหนึ่งๆ ต้องเก็บข้อมูลอย่างน้อย 10 ค่า (ได้อย่างน้อย 10 ข้อมูล)

3.1.1.6 การประมวลผลของข้อมูล

ค่าแฟคเตอร์ของการสอบเทียบ (calibratio factor) หรือค่าสภาพการตอบสนอง (resposivity) จากชุดข้อมูล j และลำดับข้อมูล i สามารถหาได้จากสมการ

$$F(i, j) = \frac{E_{SP}(i, j)}{V_{FP}(i, j)} \quad (3.1)$$

เมื่อ $F(i, j)$ คือ สภาพการตอบสนองจากชุดข้อมูล j ลำดับ i ($W.m^{-2}/mV$)
 $E_{SP}(i, j)$ คือ ค่าความเข้มรังสีตรงที่ได้จากไพร์เฮลิโอมิเตอร์อ้างอิง ($W.m^{-2}$)
 $V_{FP}(i, j)$ คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากไพร์เฮลิโอมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ (mV)

โดยต้องทำการคำนวณ $F(i, j)$ ของทุกลำดับข้อมูลในชุดข้อมูล j ตามสมการ (3.1) และหาค่าเฉลี่ยของสภาพการตอบสนองที่ได้จากทุกลำดับข้อมูลในชุดข้อมูล j ($F(j)$) จากสมการ

$$F(j) = \frac{\sum_{i=1}^n E_{SP}(i, j)}{\sum_{i=1}^n V_{FP}(i, j)} \quad (3.2)$$

จากนั้นจะใช้ค่า $F(j)$ ที่ได้มากำหนดช่วงข้อมูลที่ยอมรับได้โดยกำหนดว่าข้อมูล $F(i, j)$ ที่ยอมรับได้ต้องมีค่าอยู่ในช่วง $F(j) \pm 2\%$ หากค่า $F(i, j)$ ได้เกินจากช่วงที่ยอมรับได้ให้ตัดข้อมูลนั้นออก แล้วคำนวณ $F(j)$ ใหม่ ทำเช่นนี้กับทุกชุดข้อมูลแล้วนำค่า $F(j)$ ที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย โดยค่าเฉลี่ยนี้จะถือว่าเป็นค่าสภาพการตอบสนองที่ต้องการ อย่างไรก็ตาม บางครั้งอาจทำการหาค่าสภาพการตอบสนองในรูปของ sensitivity จึงหาได้จาก

$$S(i, j) = \frac{V_{FP}(i, j)}{E_{SP}(i, j)} \quad (3.3)$$

และมีหน่วยเป็น ($mV/W.m^{-2}$)

3.1.2 การสอบเทียบตามข้อกำหนด ISO (ISO 9059)

ผู้วิจัยได้จัดหาเครื่องมือสำหรับทดสอบระบบสอบเทียบตามมาตรฐาน ISO 9059 ดังนี้

ก) ไพร์เฮลิโอมิเตอร์มาตรฐานอ้างอิง (reference pyrhelimeter) (รูปที่ 3.1) เครื่องวัดดังกล่าวเป็นไพร์เฮลิโอมิเตอร์แบบ Absolute cavity ยี่ห้อ Eppley รุ่น AHFSs ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นไป

ตามมาตรฐาน ISO 9059 และเป็นเครื่องวัดที่ได้รับการสอบเทียบกับเครื่องวัดมาตรฐานโลกที่ World Radiation Center ประเทศสวีเดนเมื่อปี ค.ศ. 2015



รูปที่ 3.1 ไพร์เฮริโอมิเตอร์ยี่ห้อ Eppley รุ่น AHFSs ที่ใช้เป็นเครื่องวัดอ้างอิง



รูปที่ 3.2 ภาพการสอบเทียบไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงที่ World Radiation Center เมื่อปี ค.ศ. 2015

ข) เครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ (sun tracker) เป็นเครื่องยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น 2AP (รูปที่ 3.3) 2 แกน (azimuth-altitude system) มีคุณสมบัติตามข้อกำหนด ISO 9059



รูปที่ 3.3 เครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ที่ใช้ในระบบสอบเทียบ

ค) เครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) เป็นเครื่องยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DX 2000 (รูปที่ 3.4) สามารถบันทึกค่าศักย์ไฟฟ้าจากอุปกรณ์สอบเทียบได้ตามข้อกำหนดของ ISO 9059



รูปที่ 3.4 เครื่องบันทึกข้อมูลที่ใช้ในระบบสอบเทียบ

ง) เครื่องถ่ายภาพท้องฟ้า (sky view) เป็นเครื่องยี่ห้อ Prede รุ่น PSV-100W (รูปที่ 3.5) สำหรับใช้ถ่ายภาพท้องฟ้าเพื่อตรวจสอบสภาพท้องฟ้าให้เป็นไปตามเงื่อนไขการสอบเทียบ ISO 9059



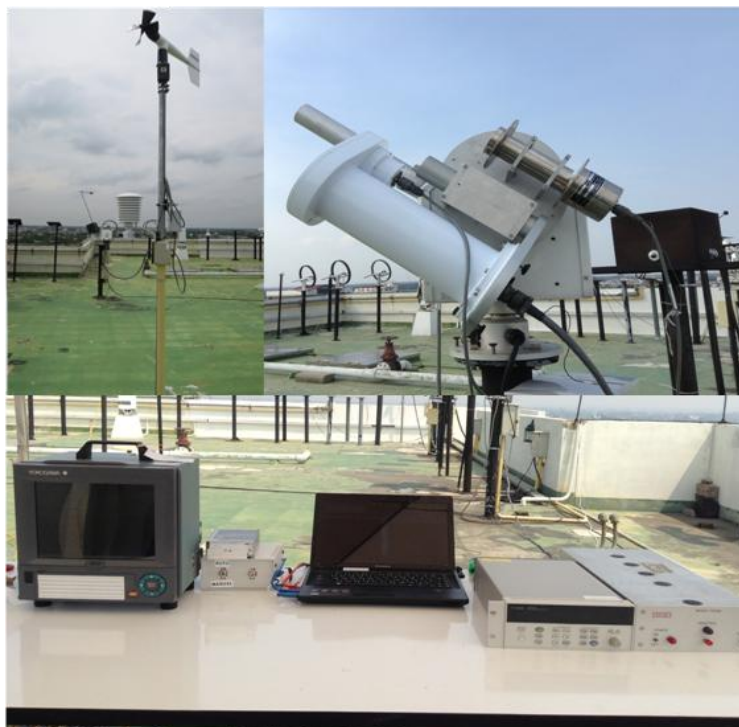
รูปที่ 3.5 เครื่องถ่ายภาพท้องฟ้า

จ) เครื่องตรวจอากาศอัตโนมัติ (automatic weather station) เป็นเครื่องยี่ห้อ Young (รูปที่ 3.6)



รูปที่ 3.6 เครื่องตรวจอากาศอัตโนมัติ

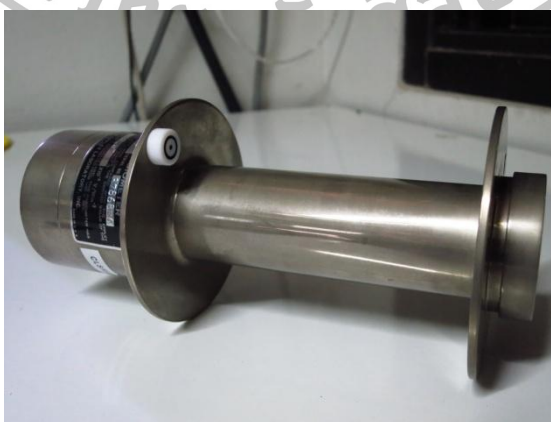
หลังจากนั้น ผู้วิจัยได้ติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดบนดาดฟ้า ชั้น 11 อาคารวิทยาศาสตร์ 1 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร (13.82° N, 100.04° E) ซึ่งเป็นบริเวณโล่งแจ้งไม่มีสิ่งกีดขวางรังสีอาทิตย์ในทิศทางเดินของดวงอาทิตย์ ลักษณะระบบสอบเทียบที่พัฒนาขึ้นแสดงไว้ในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ระบบสอบเทียบไพโรเฮริโอมิเตอร์ตามมาตรฐาน ISO 9059 ที่พัฒนาขึ้น

3.1.3 การทดสอบสมรรถนะของระบบสอบเทียบและผล

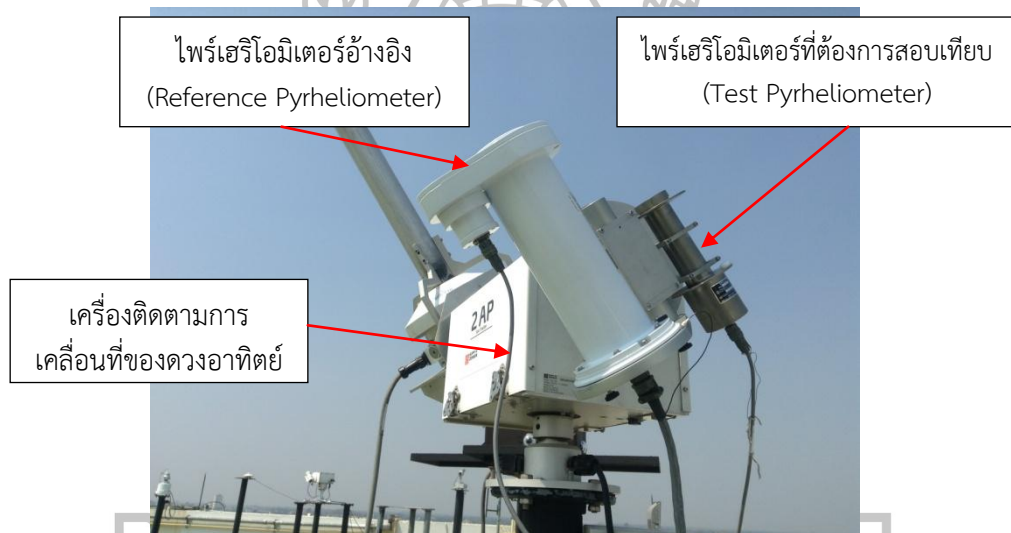
ผู้วิจัยได้ใช้ระบบสอบเทียบมาทำการสอบเทียบไพโรเฮริโอมิเตอร์ภาคสนาม 2 เครื่อง ได้แก่ ไพโรเฮริโอมิเตอร์ Eppley รุ่น sNIP serial no: 37868E6 (รูปที่ 3.8) และไพโรเฮริโอมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CHP1 serial no: 130195 (รูปที่ 3.9) โดยติดตั้งไพโรเฮริโอมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบและเครื่องวัดอ้างอิงบนเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ (รูปที่ 3.10) และต่อสายสัญญาณไฟฟ้าของเครื่องวัดทั้งสองเข้าเครื่องบันทึกข้อมูล



รูปที่ 3.8 ไพโรเฮริโอมิเตอร์ยี่ห้อ Eppley รุ่น sNIP serial no: 37868E6



รูปที่ 3.9 ไพร์เฮลิโอมิเตอร์ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CHP1 serial no: 130195

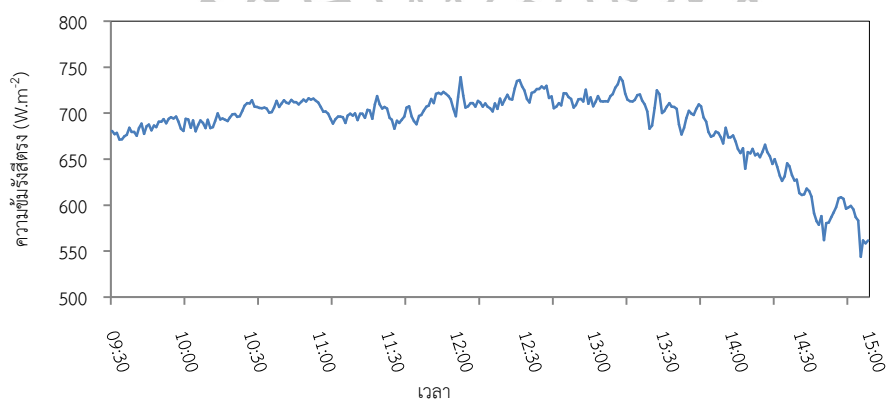


รูปที่ 3.10 ไพร์เฮลิโอมิเตอร์อ้างอิงกับไพร์เฮลิโอมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบบนเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์

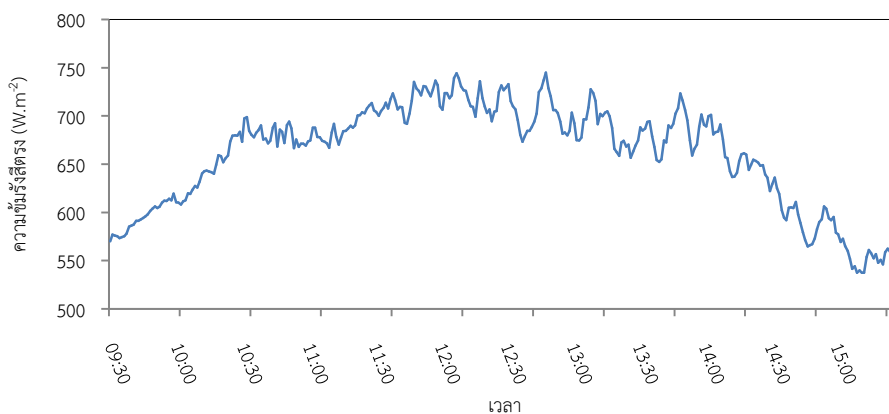
จากนั้นทำการบันทึกข้อมูลโดยเลือกสภาพแวดล้อม (เมฆและความเร็วลม) ให้เป็นไปตามข้อกำหนดของ ISO โดยรายละเอียดของวันเวลาที่ทำการทดลองและผลการทดลอง แสดงไว้ในตารางและรูป ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 รายละเอียด ไพร์เฮริโอมิเตอร์ อ้างอิง และไพร์เฮริโอมิเตอร์ที่ต้อง การสอบเทียบ รวมทั้ง ระยะเวลาที่ทำการสอบเทียบ

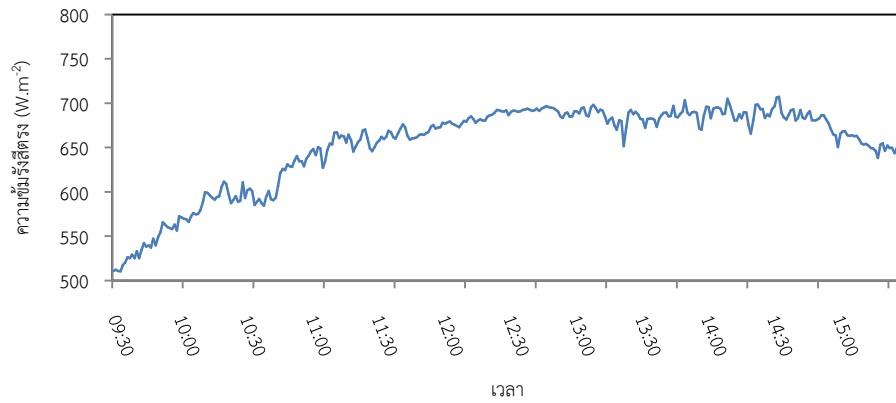
ไพร์เฮริโอมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ	ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง	เวลาทำการสอบเทียบ
ไพร์เฮริโอมิเตอร์ ยี่ห้อ Eppley รุ่น sNIP Serial no: 37868E6	ไพร์เฮริโอมิเตอร์ ยี่ห้อ Eppley รุ่น AHFSs Serial no: 36013	28 กุมภาพันธ์ 2559 2 มีนาคม 2559 4 มีนาคม 2559 5 มีนาคม 2559
ไพร์เฮริโอมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CHP1 Serial no: 130195	ไพร์เฮริโอมิเตอร์ ยี่ห้อ Eppley รุ่น AHFSs Serial no: 36013	28 กุมภาพันธ์ 2559 2 มีนาคม 2559 4 มีนาคม 2559 5 มีนาคม 2559



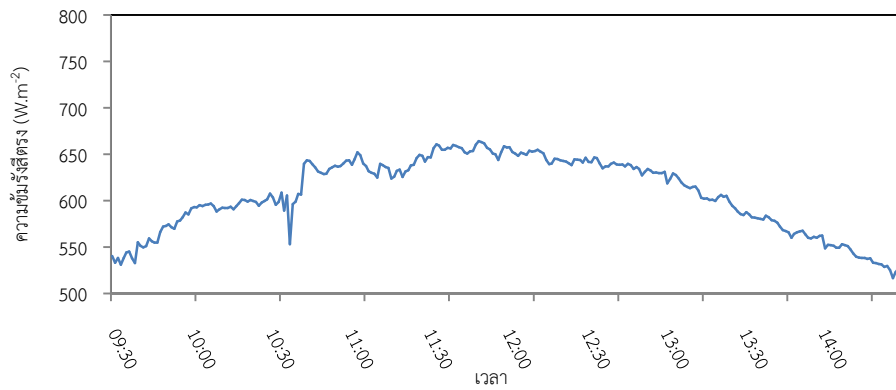
รูปที่ 3.1 1 การแปรค่าความเข้มรังสีตรงจากไพร์เฮริโอมิเตอร์ อ้างอิง จากการทดลอง วันที่ 28 กุมภาพันธ์ 2559



รูปที่ 3.12 การแปรค่าความเข้มรังสีตรงจากไพร์เฮริโอมิเตอร์ อ้างอิง จากการทดลอง วันที่ 2 มีนาคม 2559



รูปที่ 3.13 การแปรค่าความเข้มรังสีตรงจากไพร์เฮลิโอมิเตอร์อ้างอิง จากการทดลองวันที่ 4 มีนาคม 2559



รูปที่ 3.14 การแปรค่าความเข้มรังสีตรงจากไพร์เฮลิโอมิเตอร์ อ้างอิง จากการทดลองวันที่ 5 มีนาคม 2559

ผู้วิจัยได้ทำการประเมินผลการสอบเทียบตามวิธีการของ ISO 9059 ผลที่ได้แสดงไว้ในตารางต่อไป

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลการสอบเทียบและค่าสภาพการตอบสนองของ ไพร์เฮริโอมิเตอร์ ยี่ห้อ Eppley รุ่น sNIP serial no: 37868E6 วันที่ 28 กุมภาพันธ์ 2559

จำนวน	ความเข้มรังสีตรง จากไพร์เฮริโอเตอร์อ้างอิง $E_{SP}(i, j)$ ($w.m^{-2}$)	ศักย์ไฟฟ้าจากไพร์เฮริโอ มิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $V_{FP}(i, j)$ (mV)	ค่าสภาพการตอบสนอง $S(i, j)$ ($\mu V/W.m^{-2}$)
1	683.194	5.893	8.625
2	690.700	5.977	8.653
3	708.525	6.132	8.654
4	697.598	6.035	8.651
5	700.573	6.059	8.649
6	711.725	6.152	8.644
7	718.166	6.212	8.650
8	719.185	6.224	8.654
9	699.450	6.050	8.649
10	659.423	5.704	8.651
11	599.275	5.189	8.658
ค่าเฉลี่ย $S(j)$			8.649

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลการสอบเทียบและค่าสภาพการตอบสนองของไพร์เฮริโอมิเตอร์ ยี่ห้อ Eppley รุ่น sNIP serial no: 37868E6 วันที่ 2 มีนาคม 2559

จำนวน	ความเข้มรังสีตรง จากไพร์เฮริโอเตอร์อ้างอิง $E_{SP}(i, j)$ ($w.m^{-2}$)	ศักย์ไฟฟ้าจากไพร์เฮริโอ มิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $V_{FP}(i, j)$ (mV)	ค่าสภาพการตอบสนอง $S(i, j)$ ($\mu V/W.m^{-2}$)
1	586.611	5.081	8.662
2	630.877	5.464	8.660
3	682.478	5.905	8.652
4	680.018	5.881	8.649
5	711.037	6.153	8.653
6	721.343	6.232	8.640
7	708.135	6.123	8.646
8	695.472	6.013	8.645
9	684.932	5.928	8.655
10	667.269	5.772	8.650
ค่าเฉลี่ย $S(j)$			8.651

ตารางที่ 3.4 ข้อมูลการสอบเทียบและค่าสภาพการตอบสนองของไพร์เฮริโอมิเตอร์ ยี่ห้อ Eppley รุ่น sNIP serial no: 37868E6 วันที่ 4 มีนาคม 2559

จำนวน	ความเข้มรังสีตรง จากไพร์เฮริโอเตอร์อ้างอิง $E_{SP}(i, j)$ ($w.m^{-2}$)	ศักย์ไฟฟ้าจากไพร์เฮริโอ มิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $V_{FP}(i, j)$ (mV)	ค่าสภาพการตอบสนอง $S(i, j)$ ($\mu V/W.m^{-2}$)
1	528.839	4.579	8.658
2	585.029	5.057	8.644
3	602.312	5.209	8.648
4	652.404	5.634	8.635
5	663.746	5.729	8.632
6	679.175	5.865	8.635
7	692.547	5.976	8.629
8	687.310	5.936	8.636
9	685.261	5.920	8.638
10	688.681	5.946	8.634
11	656.765	5.673	8.638
ค่าเฉลี่ย $S(j)$			8.639

ตารางที่ 3.5 ข้อมูลการสอบเทียบและค่าสภาพการตอบสนองของไพร์เฮริโอมิเตอร์ ยี่ห้อ Eppley รุ่น sNIP serial no: 37868E6 วันที่ 5 มีนาคม 2559

จำนวน	ความเข้มรังสีตรง จากไพร์เฮริโอเตอร์อ้างอิง $E_{SP}(i, j)$ ($w.m^{-2}$)	ศักย์ไฟฟ้าจากไพร์เฮริโอ มิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $V_{FP}(i, j)$ (mV)	ค่าสภาพการตอบสนอง $S(i, j)$ ($\mu V/W.m^{-2}$)
1	576.592	4.970	8.619
2	598.801	5.151	8.603
3	629.792	5.416	8.600
4	635.074	5.461	8.599
5	656.981	5.657	8.610
6	649.038	5.588	8.610
7	638.505	5.490	8.599
8	612.427	5.268	8.602
9	575.475	4.952	8.604
10	544.018	4.683	8.608
ค่าเฉลี่ย $S(j)$			8.605

ตารางที่ 3.6 ค่าเฉลี่ยสภาพการตอบสนอง ของไพร์เฮริโอมิเตอร์ ยี่ห้อ Eppeley รุ่น sNIP serial no: 37868E6

วันที่	จำนวนชุดข้อมูล	ค่าสภาพการตอบสนอง $S(j)$ ($\mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
28/02/2016	11	8.649
02/03/2016	11	8.651
04/03/2016	11	8.639
05/03/2016	10	8.605
ค่าสภาพการตอบสนองเฉลี่ย		8.636

จากตาราง ค่าสภาพการตอบสนอง ของไพร์เฮริโอมิเตอร์ ยี่ห้อ Eppeley รุ่น sNIP serial no: 37868E6 ตามกระบวนการสอบเทียบมาตรฐานไพร์เฮริโอมิเตอร์ ISO 9059 พบว่า ผลการสอบเทียบไพร์เฮริโอมิเตอร์มีค่าสภาพการตอบสนอง เท่ากับ $8.636 \mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$

ตารางที่ 3. 7 ข้อมูลการสอบเทียบและค่าสภาพการตอบสนองของ ไพร์เฮริโอมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CHP1 serial no: 131095 วันที่ 28 กุมภาพันธ์ 2559

จำนวน	ความเข้มรังสีตรง จากไพร์เฮริโอเตอร์อ้างอิง $E_{SP}(i, j)$ ($\text{w}\cdot\text{m}^{-2}$)	ศักย์ไฟฟ้าจากไพร์เฮริโอ มิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $V_{FP}(i, j)$ (mV)	ค่าสภาพการตอบสนอง $S(i, j)$ ($\mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
1	688.791	5.255	7.629
2	690.700	5.284	7.629
3	708.525	5.422	7.629
4	697.598	5.334	7.629
5	700.573	5.355	7.629
6	711.725	5.445	7.629
7	718.166	5.495	7.629
8	719.185	5.503	7.629
9	699.450	5.354	7.629
10	659.423	5.049	7.629
11	599.275	4.586	7.629
ค่าเฉลี่ย $S(j)$			7.629

ตารางที่ 3. 8 ข้อมูลการสอบเทียบและค่าสภาพการตอบสนองของ ไพร์เฮริโอมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CHP1 serial no: 131095 วันที่ 2 มีนาคม 2559

จำนวน	ความเข้มรังสีตรง จากไพร์เฮริโอเตอร์อ้างอิง $E_{SP}(i, j)$ ($w.m^{-2}$)	ศักย์ไฟฟ้าจากไพร์เฮริโอ มิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $V_{FP}(i, j)$ (mV)	ค่าสภาพการตอบสนอง $S(i, j)$ ($\mu V/W.m^{-2}$)
1	586.611	4.487	7.648
2	630.877	4.827	7.652
3	682.478	5.220	7.649
4	680.018	5.201	7.648
5	711.037	5.438	7.649
6	721.343	5.516	7.646
7	708.135	5.415	7.646
8	693.221	5.297	7.641
9	684.932	5.244	7.656
10	667.269	5.106	7.652
11	597.702	4.573	7.651
ค่าเฉลี่ย $S(j)$			7.649

ตารางที่ 3.9 ข้อมูลการสอบเทียบและค่าสภาพการตอบสนองของ ไพร์เฮริโอมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CHP1 serial no: 131095 วันที่ 4 มีนาคม 2559

จำนวน	ความเข้มรังสีตรง จากไพร์เฮริโอเตอร์อ้างอิง $E_{SP}(i, j)$ ($w.m^{-2}$)	ศักย์ไฟฟ้าจากไพร์เฮริโอ มิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $V_{FP}(i, j)$ (mV)	ค่าสภาพการตอบสนอง $S(i, j)$ ($\mu V/W.m^{-2}$)
1	528.839	4.048	7.654
2	602.312	4.616	7.664
3	652.404	4.993	7.654
4	663.746	5.080	7.653
5	679.175	5.194	7.648
6	692.547	5.297	7.648
7	687.310	5.256	7.648
8	685.261	5.245	7.654
9	688.681	5.271	7.653
10	688.661	5.270	7.653
11	656.765	5.026	7.653
ค่าเฉลี่ย $S(j)$			7.653

ตารางที่ 3.10 ข้อมูลการสอบเทียบและค่าสภาพการตอบสนองของ ไพร์เฮริโอมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CHP1 serial no: 131095 วันที่ 5 มีนาคม 2559

จำนวน	ความเข้มรังสีตรง จากไพร์เฮริโอเตอร์ อ้างอิง $E_{SP}(i, j) (w.m^{-2})$	ศักย์ไฟฟ้าจากไพร์เฮริโอ มิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $V_{FP}(i, j) (mV)$	ค่าสภาพการตอบสนอง $S(i, j) (\mu V/W.m^{-2})$
1	576.592	4.415	7.658
2	598.801	4.581	7.651
3	632.167	4.836	7.650
4	635.074	4.856	7.647
5	656.981	5.026	7.650
6	649.038	4.962	7.645
7	638.505	4.880	7.643
8	612.427	4.683	7.646
9	575.475	4.404	7.653
10	544.018	4.166	7.657
ค่าเฉลี่ย $S(j)$			7.650

ตารางที่ 3.11 ค่าเฉลี่ยสภาพการตอบสนองของไพร์เฮริโอมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CHP1 serial no: 131095

วันที่	จำนวนชุดข้อมูล	ค่าสภาพการตอบสนอง $S(j) (\mu V/W.m^{-2})$
28/02/2016	11	7.629
02/03/2016	11	7.649
04/03/2016	11	7.653
05/03/2016	10	7.650
ค่าสภาพการตอบสนองเฉลี่ย		7.645

จากตาราง ค่าสภาพการตอบสนอง ของไพร์เฮริโอมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CHP1 serial no: 131095 ที่คำนวณตามกระบวนการสอบเทียบมาตรฐานไพร์เฮริโอมิเตอร์ ISO 9059 มีค่าเท่ากับ $7.645 \mu V/W.m^{-2}$

3.1.4 การหาค่าความไม่แน่นอนของระบบสอบเทียบไพร์เฮริโอมิเตอร์กับไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง

เนื่องจากค่าสภาพการตอบสนองของไพร์เฮริโอมิเตอร์ที่ได้จากระบบสอบเทียบที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นตามระบบ ISO 9059 สามารถเกิดความคลาดเคลื่อนในกระบวนการสอบเทียบ ซึ่งอาจเกิดจากอุปกรณ์ที่จัดเตรียมขึ้นและเกิดจากขั้นตอนการสอบเทียบ ปัจจัยต่างๆ เหล่านี้เป็นสาเหตุของการเกิดความไม่แน่นอนของค่าสภาพการตอบสนอง ผู้วิจัยจึงแบ่งสาเหตุความไม่แน่นอนเป็นสองส่วนหลักๆ คือ ความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของเครื่องวัดที่ต้องการสอบเทียบ และความไม่แน่นอนที่เกิดจากความเข้มรังสีตรงจากเครื่องวัดอ้างอิงหรือเขียนในรูปของสมการได้ ดังนี้

$$\left(\frac{u(S_j)}{S_j} \right)^2 = \left(\frac{u(V_{FP}(j))}{V_{FP}(j)} \right)^2 + \left(\frac{u(E_{SP}(j))}{E_{SP}(j)} \right)^2 \quad (3.4)$$

เมื่อ $u(S_j)$ คือ ค่าความไม่แน่นอนของค่าสภาพการตอบสนองของชุดข้อมูลที่ j

S_j คือ ค่าสภาพการตอบสนองของชุดข้อมูลที่ j

$u(V_{FP}(j))$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากศักย์ไฟฟ้าของไพร์เฮริโอมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบชุดที่ j

$u(E_{SP}(j))$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากความเข้มรังสีตรงของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงชุดที่ j

$V_{FP}(j)$ คือ ศักย์ไฟฟ้าของไพร์เฮริโอมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบชุดที่ j

$E_{SP}(j)$ คือ ความเข้มรังสีตรงของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงชุดที่ j

จากการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของชุดที่ j ตามสมการ (3.4) สามารถพิจารณาสาเหตุย่อยๆ ของแต่ละกรณีได้ดังนี้

กรณีค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดศักย์ไฟฟ้าของไพร์เฮริโอมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ จะพิจารณาสาเหตุที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนได้จาก 5 สาเหตุ ดังนี้

- ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของไพร์เฮริโอมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $u(\delta V_{FP,rep})$

- ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากความแม่นยำของระบบบันทึกข้อมูลของไพร์เฮริโอมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $u(\delta V_{FP,daq})$

- ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการปรับตำแหน่งที่ผิดพลาดของไพร์เฮริโอมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $u(\delta V_{FP,direction})$

- ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไพร์เฮริโอมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $u(\delta V_{FP,temp})$

- ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าชดเชย (offset) ของไพร์เฮริโอมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $u(\delta V_{FP,offset})$
 โดยสามารถเขียนสมการการหาค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ (relative uncertainty) ได้ดังนี้

$$u(V_{FP}(j))_{relative}^2 = \left(\frac{u(\delta V_{FP,rep})}{V_{FP}(j)} \right)^2 + \left(\frac{u(\delta V_{FP,daq})}{V_{FP}(j)} \right)^2 + \left(\frac{u(\delta V_{FP,direction})}{V_{FP}(j)} \right)^2 + \left(\frac{u(\delta V_{FP,temp})}{V_{FP}(j)} \right)^2 + \left(\frac{u(\delta V_{FP,offset})}{V_{FP}(j)} \right)^2 \quad (3.5)$$

เมื่อ $u(V_{FP}(j))_{relative}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ที่เกิดจากการศักร์ไฟฟ้าของไพร์เฮริโอมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ
 $u(\delta V_{FP,rep})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดซ้ำค่าศักร์ไฟฟ้าของไพร์เฮริโอมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ
 $u(\delta V_{FP,daq})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากความแม่นยำของระบบบันทึกข้อมูลของไพร์เฮริโอมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ
 $u(\delta V_{FP,direction})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการปรับตำแหน่งที่ผิดพลาดของไพร์เฮริโอมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ
 $u(\delta V_{FP,temp})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไพร์เฮริโอมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ
 $u(\delta V_{FP,offset})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าชดเชย (offset) ของไพร์เฮริโอมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ
 $V_{FP}(j)$ คือ ค่าเฉลี่ยศักร์ไฟฟ้าของไพร์เฮริโอมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบของชุดข้อมูลที่ j

กรณีค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากความเข้มรังสีตรงของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง สามารถพิจารณาได้จาก 3 สาเหตุ ดังนี้

- ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากผลการสอบเทียบของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง $u(E_{SP,calibration})$
- ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดซ้ำค่าความเข้มรังสีตรงของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง $u(\delta E_{SP,rep})$
- ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการปรับตำแหน่งที่ผิดพลาดของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง $u(\delta E_{SP,direction})$

โดยสามารถเขียนการคำนวณได้ดังสมการ

$$u(E_{SP}(j))_{relative}^2 = \left(\frac{u(E_{SP,calibration})}{E_{SP}(j)} \right)^2 + \left(\frac{u(\delta E_{SP,rep})}{E_{SP}(j)} \right)^2 + \left(\frac{u(\delta E_{SP,direction})}{E_{SP}(j)} \right)^2 \quad (3.6)$$

เมื่อ $u(E_{SP}(j))_{relative}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ที่เกิดจากการวัดความเข้มรังสีตรงด้วยไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง

$u(E_{SP,calibration})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากผลการสอบเทียบของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง

$u(\delta E_{SP,rep})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดซ้ำค่าความเข้มรังสีตรงของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง

$u(\delta E_{SP,direction})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการปรับตำแหน่งที่ผิดพลาดของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง

เมื่อกำหนดหาผลรวมของค่าความไม่แน่นอนของข้อมูลชุดที่ j ตามสมการ (3.5) และ (3.6) แล้ว ผู้วิจัยจะหาค่าเฉลี่ยความไม่แน่นอนของชุดข้อมูล (pool uncertainty) ได้ดังนี้

$$\left(\frac{u(S)_{pool}}{S} \right)^2 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left(\frac{u(S_j)}{S_j} \right)^2 \quad (3.7)$$

เนื่องจากค่าสภาพการตอบสนองสุดท้ายเป็นค่าเฉลี่ยของค่าการตอบสนองของทุกชุดข้อมูล ดังนั้นจึงมีค่าความไม่แน่นอนเกิดขึ้นได้อีก ($u(S)_{reproduce}$) ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนรวมของระบบสอบเทียบไพร์เฮริโอมิเตอร์ตาม ISO 9059 สามารถสรุปดังต่อไปนี้

$$\left(\frac{u(S)}{S} \right)^2 = \left(\frac{u(S)_{pool}}{S} \right)^2 + \left(\frac{u(S)_{reproduce}}{S} \right)^2 \quad (3.8)$$

ตามสมการ (3. 8) จะเห็นว่าค่าความไม่แน่นอนรวมของระบบสอบเทียบทั้งหมดนั้นเป็นผลรวมตามสมการ (3.7) และค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจาก reproduce uncertainty

3.1.4.1 การหาค่าความไม่แน่นอนของระบบสอบเทียบไพร์เฮริโอมิเตอร์ ที่ต้องการสอบเทียบ

1) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดซ้ำค่าศักย์ไฟฟ้าของไพร์เฮริโอมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $u(\delta V_{FP,rep})$

จากการหาค่าสภาพการตอบสนองของไพร์เฮริโอมิเตอร์ ยี่ห้อ Eppley รุ่น sNIP serial no: 37868E6 ในชุดข้อมูลที่ j ซึ่งมีการวัดศักย์ไฟฟ้าจำนวน 20 ค่า ($n=20$) พบว่า ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) ของชุดข้อมูลดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 0.09 mV และมีค่าเฉลี่ยของศักย์ไฟฟ้าของชุดข้อมูลเท่ากับ 5.081 mV ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดซ้ำค่าศักย์ไฟฟ้าของไพร์เฮริโอมิเตอร์ของชุดข้อมูลนี้หาได้จาก

$$\begin{aligned} u(\delta V_{FP,rep}) &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{FP}(i,j) - V_{FP}(j))^2}{(n-1)}} \\ &= \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \\ &= \frac{0.09 \text{ mV}}{\sqrt{20}} \\ &= 2.50 \text{ mV} \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ที่เกิดจากการวัดซ้ำค่าศักย์ไฟฟ้าของชุดข้อมูลที่ j เท่ากับ

$$\begin{aligned} u(\delta V_{FP,rep})_{\text{relative}} &= \frac{2.50 \text{ mV}}{5.081 \text{ mV}} \times 100 \% \\ &= 0.412 \% \end{aligned}$$

2) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากความแม่นยำของระบบบันทึกข้อมูลของไพร์เฮริโอมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $u(\delta V_{FP,daq})$

เนื่องจากสัญญาณของการวัดรังสีอาทิตย์ที่ได้จากไพร์เฮริโอมิเตอร์จะอยู่ในรูปของศักย์ไฟฟ้า ซึ่งในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้เครื่องบันทึกข้อมูลแบบดิจิทัล ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DX 2000 ที่มีความละเอียด 0.0050% +12 หลัก

กรณีนี้ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของไพร์เฮริโอมิเตอร์สามารถอ่านได้ 10 mV ดังนั้นสามารถหาค่าของช่วงกึ่งกลาง (semi-range) ได้ดังนี้

$$a = \left[\frac{0.005 \times 10 \text{ mV}}{100} + 0.012 \right] = 12.5 \text{ } \mu\text{V}$$

และจะได้ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ (standard uncertainty)

$$u(\text{Daq}_{\text{accuracy}}) = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{12.5 \text{ } \mu\text{V}}{\sqrt{3}} = 7.2 \text{ } \mu\text{V}$$

ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ที่เกิดจากความละเอียดของการบันทึกข้อมูลสามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u(\text{Daq}_{\text{accuracy}})_{\text{relative}} &= \frac{7.2 \text{ } \mu\text{V}}{10 \text{ mV}} \times 100 \% \\ &= 0.072 \% \end{aligned}$$

นอกจากนี้ จากรายละเอียดของเครื่องบันทึกข้อมูลแบบดิจิทัล พบว่าสามารถวัดศักย์ไฟฟ้าได้ 20 mV และมีค่าความไม่แน่นอน $\pm 0.0070 \text{ mV}$ ที่มีระดับความเชื่อมั่น $k = 2$ ดังนั้นสามารถคำนวณความไม่แน่นอนของเครื่องบันทึกค่าศักย์ไฟฟ้าของไพร์เฮริโอมิเตอร์ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} u(\text{Daq}_{\text{calibrate}}) &= \frac{0.0070 \text{ mV}}{2} \\ &= 0.0035 \text{ mV} \end{aligned}$$

และค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์หาในกรณีนี้หาได้จาก

$$\begin{aligned} u(\text{Daq}_{\text{calibrate}})_{\text{relative}} &= \frac{3.5 \text{ } \mu\text{V}}{10 \text{ mV}} \times 100 \\ &= 0.035 \% \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์รวมที่เกิดจากระบบบันทึกข้อมูลของไพร์เฮริโอมิเตอร์สามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u(\delta V_{\text{FP,daq}})_{\text{relative}} &= \sqrt{u(\text{Daq}_{\text{accuracy}})_{\text{relative}}^2 + u(\text{Daq}_{\text{calibrate}})_{\text{relative}}^2} \\ &= \sqrt{0.072^2 + 0.035^2} \\ &= 0.08 \% \end{aligned}$$

3) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการปรับตำแหน่งที่ผิดพลาดของไพร์เฮริโอมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $u(\delta V_{FP, direction})$

ตามกระบวนการสอบเทียบ ISO 9059 นั้นจะต้องนำไพร์เฮริโอมิเตอร์ติดบนเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ดวงอาทิตย์ เพื่อให้ไพร์เฮริโอมิเตอร์ชี้ตรงตำแหน่งดวงอาทิตย์ ซึ่งจะทำให้เกิดค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการปรับตำแหน่งขึ้นในระหว่างการสอบเทียบ โดยมีวิธีการคำนวณดังต่อไปนี้

- กรณีค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากตำแหน่งของไพร์เฮริโอมิเตอร์

ในการสอบเทียบตามกระบวนการ ISO 9059 ผู้วิจัยใช้ไพร์เฮริโอมิเตอร์ ยี่ห้อ Eppler รุ่น sNIP serial no: 37868E6 โดยกำหนดให้ไพร์เฮริโอมิเตอร์มีตำแหน่งของจุดรับแสงเพียงเบนไม่เกิน 0.1 เซนติเมตร และความยาวระหว่างจุดรับแสงกับช่องที่แสงผ่านของไพร์เฮริโอมิเตอร์มีเท่ากับ 10 เซนติเมตร ดังนั้นความผิดพลาดของมุมรับแสงหาได้จาก

$$\delta\theta = \arctan\left(\frac{0.1}{10}\right) = 0.57^\circ$$

และความผิดพลาด (error) ของแนวรับแสงของไพร์เฮริโอมิเตอร์หาได้จาก

$$\begin{aligned} \% \text{ERROR} &= (1 - \cos(\delta\theta)) \times 100 \% \\ &= 0.004999 \% \end{aligned}$$

ซึ่งทำให้ได้ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ของจุดรับแสงของไพร์เฮริโอมิเตอร์ ดังนี้

$$\begin{aligned} u(\text{Tracking}_{\text{mounting}})_{\text{relative}} &= \frac{\% \text{ERROR}}{\sqrt{3}} \\ &= 0.002886 \% \end{aligned}$$

- กรณีค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการปรับตำแหน่งของเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์

ผู้วิจัยกำหนดความถูกต้องของเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ที่ 0.1 องศา ดังนั้นความผิดพลาดของตำแหน่งของเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ หาได้จาก

$$\begin{aligned} \% \text{ERROR} &= (1 - \cos(\delta\theta)) \times 100 \% \\ &= 0.00015 \% \end{aligned}$$

ทำให้ได้ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ของเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ดังนี้

$$u(\text{Tracking}_{\text{accuracy}})_{\text{relative}} = \frac{\% \text{ ERROR}}{\sqrt{3}} \\ = 0.00009 \%$$

ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ที่เกิดจากการปรับตำแหน่งที่ผิดพลาดของระบบสอบเทียบ มีค่าเท่ากับ

$$u(\delta V_{\text{FP,direction}})_{\text{relative}} = \sqrt{0.002886^2 + 0.00009^2} \\ = 0.002887 \%$$

4) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไพร์เฮริโอมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $u(\delta V_{\text{FP,temp}})$

การสอบเทียบไพร์เฮริโอมิเตอร์เป็นการสอบเทียบภายนอกอาคาร โดยที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อมนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาในระหว่างการสอบเทียบ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมินี้จะส่งผลกับศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ การสอบเทียบจึงต้องทำการวัดอุณหภูมิแวดล้อมระหว่างการสอบเทียบของแต่ละชุดข้อมูล เพื่อใช้ในการหาค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้ไพร์เฮริโอมิเตอร์ ยี่ห้อ Eppley รุ่น sNIP serial no: 37868E6 ซึ่งรายละเอียดของเครื่องมีดังนี้

- Sensitivity is $8.66 \mu\text{V/W.m}^{-2}$
- Temperature error = 0.5%
- The standard uncertainty for the temperature ranges from -20°C to $+40^{\circ}\text{C}$

ซึ่งค่าความไม่แน่นอนดังกล่าวเป็นค่าที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด ทำให้สามารถหาค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดังต่อไปนี้

$$u(\delta V_{\text{FP,temp}})_{\text{relative}} = \frac{0.5\%}{2\sqrt{3}} \\ = 0.144338 \%$$

5) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าชดเชย (offset) ของไพร์เฮริโอมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $u(\delta V_{\text{FP,offset}})$

ในที่นี้ค่า zero offset (type B) ของไพร์เฮริโอมิเตอร์ ยี่ห้อ Eppley รุ่น sNIP serial no: 37868E6 ที่กำหนดโดยบริษัทผู้ผลิตมีค่าเท่ากับ $\pm 1 \text{ W.m}^{-2}$ ดังนั้นผู้วิจัยสามารถหาของช่วงกึ่งกลางได้จาก

$$a = 1 \text{ W/m}^2 \times 8.66 \mu\text{V/W.m}^{-2} \\ = 8.66 \mu\text{V}$$

และได้ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์เท่ากับ

$$\begin{aligned} u(\delta V_{FR,offset}) &= \frac{a}{\sqrt{3}} \\ &= 4.999 \mu\text{V} \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ที่เกิดจากค่าชดเชย (offset) ของโพรมิเตอร์ สามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยของศักย์ไฟฟ้า ($4.5 \times 10^3 \mu\text{V}$) ดังนี้

$$\begin{aligned} u(\delta V_{FR,offset})_{\text{relative}} &= \frac{u(\delta V_{SP,offset})}{V_{SP}(j)} \\ &= \frac{4.999 \mu\text{V}}{4.5 \times 10^3 \mu\text{V}} \times 100 \% \\ &= 0.11 \% \end{aligned}$$

3.1.4.2 การหาค่าความไม่แน่นอนของระบบสอบเทียบโพรมิเตอร์อ้างอิง

1) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากโพรมิเตอร์อ้างอิง $u(E_{SP,calibration})$

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้โพรมิเตอร์อ้างอิง ยี่ห้อ Eppley รุ่น AHFS Serial no: 36013 ซึ่งได้รับการสอบเทียบใน IPC-XII ปี 2015 ที่ World Radiation Centre เมือง Davos ประเทศ Switzerland ซึ่งในการสอบเทียบครั้งนี้สามารถสืบสาวกับไปยังมาตรฐานโลกได้ (World Radiometric Reference; WRR) โดยมีค่าความไม่แน่นอน 0.3 % ดังนั้น ค่าไม่แน่นอนมาตรฐานมีค่า $u(WRR) = 0.30 \%$

ในการสอบเทียบครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ข้อมูลทั้งหมดจำนวน 326 ค่า ($n=326$) ทำให้ได้ค่าสภาพการตอบสนองของโพรมิเตอร์อ้างอิงเท่ากับ 0.9999802 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) เท่ากับ 0.000738 ดังนั้นความไม่แน่นอนที่เกิดจากการสอบเทียบหาได้จาก

$$\begin{aligned} u(AHF36013) &= \left(\frac{\sigma}{\sqrt{n-1}} \right) \\ &= \frac{0.000738}{\sqrt{326-1}} \\ &= 0.000041 \\ &= 0.0041 \% \end{aligned}$$

นอกจากนี้จะมีค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ของไพร์เฮริโอมิเตอร์มาตรฐานโลก (WSG) ซึ่งในที่นี้พบว่ามีค่า $u(\text{wsgr}) = 0.004585 \%$

ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ที่ได้จากการสอบเทียบกับเครื่องวัดมาตรฐานโลก สามารถคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} u(E_{\text{SP,calibration}})_{\text{relative}} &= \sqrt{u(\text{AHF36013})^2 + u(\text{WRR})^2 + u(\text{wsgr})^2} \\ &= \sqrt{0.0041^2 + 0.30^2 + 0.0046^2} \\ &= 0.300063 \% \end{aligned}$$

2) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดซ้ำค่าความเข้มรังสีตรงของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง $u(\delta E_{\text{SP,rep}})$

จากกระบวนการสอบเทียบตาม ISO 9059 ซึ่งเป็นการหาค่าสภาพการตอบสนองโดยการเปรียบเทียบศักย์ไฟฟ้าของไพร์เฮริโอมิเตอร์นี้ต้องการสอบเทียบกับค่าความเข้มรังสีตรงจากไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง ยี่ห้อ Eppler รุ่น AHFS Serial no: 36013 ในชุดข้อมูลที่ j ซึ่งมีการวัดความเข้มรังสีตรงจำนวน 20 ค่า ($n=20$) พบว่า ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) ของชุดข้อมูลดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 11.20 W.m^{-2} และมีค่าเฉลี่ยความเข้มรังสีตรงของชุดข้อมูลเท่ากับ 586.611 W.m^{-2} ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดซ้ำค่าความเข้มรังสีตรงของไพร์เฮริโอมิเตอร์ของชุดข้อมูลนี้หาได้จาก

$$\begin{aligned} u(E_{\text{SP,rep}}) &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_{\text{SP}}(i, j) - E_{\text{SP}}(j))^2}{(n-1)}} \\ &= \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \\ &= \frac{11.20}{\sqrt{20}} \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ที่เกิดจากการวัดซ้ำค่าความเข้มรังสีตรงของชุดข้อมูลที่ j เท่ากับ

$$\begin{aligned} u(\delta_{\text{SP,rep}})_{\text{relative}} &= \frac{u(E_{\text{SP,rep}})}{E_{\text{ave}}} \times 100 \% \\ &= \frac{2.13 \text{ W.m}^{-2}}{550 \text{ W.m}^{-2}} \times 100 \% \\ &= 0.387 \% \end{aligned}$$

3) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการปรับตำแหน่งที่ผิดพลาดของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง

$$u(\delta E_{SP, direction})$$

ตามกระบวนการสอบเทียบ ISO 9059 นั้นจะต้องนำไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงติดบนเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ดวงอาทิตย์ เพื่อให้ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงชี้ตรงตำแหน่งดวงอาทิตย์ ซึ่งจะทำให้เกิดค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการปรับตำแหน่งขึ้นในระหว่างการสอบเทียบ โดยมีวิธีการคำนวณดังต่อไปนี้

- กรณีค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากตำแหน่งของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง

ในการสอบเทียบตามกระบวนการ ISO 9059 ผู้วิจัยใช้ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง ยี่ห้อ Eppley รุ่น AHFs Serial no: 36013 โดยกำหนดให้ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงมีตำแหน่งของจุดรับแสงเบี่ยงเบนไม่เกิน 0.1 เซนติเมตร และความยาวระหว่างจุดรับแสงกับช่องที่แสงผ่านของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงมีเท่ากับ 20 เซนติเมตร ดังนั้นความผิดพลาดของมุมรับแสงหาได้จาก

$$\delta\theta = \arctan\left(\frac{0.1}{20}\right) = 0.286^\circ$$

และความผิดพลาด (error) ของแนวรับแสงของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงหาได้จาก

$$\begin{aligned} \% \text{ERROR} &= (1 - \cos(\delta\theta)) \times 100 \\ &= 0.00125 \% \end{aligned}$$

ซึ่งทำให้ได้ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ของจุดรับแสงของไพร์เฮริโอมิเตอร์ ดังนี้

$$\begin{aligned} u(\text{Tracking}_{\text{mounting}})_{\text{relative}} &= \frac{\% \text{ERROR}}{\sqrt{3}} \\ &= 0.002886 \% \end{aligned}$$

- กรณีค่าความไม่แน่นอนเกิดจากตำแหน่งของเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์

ผู้วิจัยกำหนดความถูกต้องของเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ที่ 0.1 องศา ดังนั้นความผิดพลาดของตำแหน่งของเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ หาได้จาก

$$\begin{aligned} \% \text{ERROR} &= (1 - \cos(\delta\theta)) \times 100 \\ &= 0.00015 \% \end{aligned}$$

ทำให้ได้ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ของเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ดังนี้

$$u(\text{Tracking}_{\text{accuracy}})_{\text{relative}} = \frac{\% \text{ ERROR}}{\sqrt{3}} \\ = 0.00009 \%$$

ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ที่เกิดจากการปรับตำแหน่งที่ผิดพลาดของระบบสอบเทียบ หาได้ดังต่อไปนี้

$$u(E_{SP, \text{direction}})_{\text{relative}} = \sqrt{0.00072^2 + 0.00009^2} \\ = 0.000726 \%$$

3.1.4.3 ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการหาค่าสภาพการตอบสนองซ้ำ (reproduce)

ในการหาค่าสภาพการตอบสนองของไพร์เฮริโอมิเตอร์ ยี่ห้อ Eppley รุ่น sNIP serial no: 37868E6 ตาม ISO 9059 ที่ได้จากค่าเฉลี่ยของการสอบเทียบชุดข้อมูลที่ j ซึ่งผู้วิจัยได้ข้อมูลค่าสภาพการตอบสนองทั้งหมดจำนวน 11 ค่า ($n=11$) ทำให้ได้ค่าสภาพการตอบสนองของไพร์เฮริโอมิเตอร์เฉลี่ยเท่ากับ $8.657 \mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) เท่ากับ $0.013 \mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ดังนั้นความไม่แน่นอนที่เกิดจากการสอบเทียบซึ่งหาได้จาก

$$u(\delta S_{FP, \text{rep}}) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{0.013 \mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}}{\sqrt{11}} = 0.004 \mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$$

ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์จากการหาค่าสภาพการตอบสนองซ้ำ หาได้ดังนี้

$$u(\delta S_{FP, \text{rep}})_{\text{relative}} = \frac{0.004 \mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}}{8.657 \mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}} \times 100 \% \\ = 0.045 \%$$

จากการคำนวณค่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการหาค่าสภาพการตอบสนองของไพร์เฮริโอมิเตอร์ ยี่ห้อ Eppley รุ่น sNIP serial no: 37868E6 ดังกล่าวมา พบว่าระบบสอบเทียบให้ผลการสอบเทียบมีค่าความไม่แน่นอนเท่ากับ 1.58 % ในส่วนของความไม่แน่นอนของค่าสภาพการตอบสนองของไพร์เฮริโอมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CHP1 serial no: 130195 มีค่าความไม่แน่นอนเท่ากับ 1.74 %

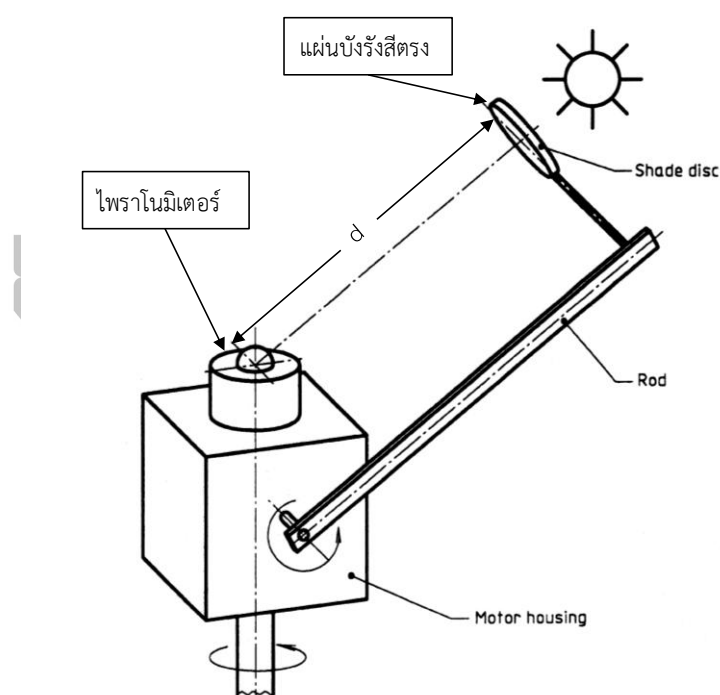
3.2 ระบบการสอบเทียบไพราโนมิเตอร์โดยใช้ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงเป็นมาตรฐานแบบสลับกัน บังรังสีตรง (alternating sun-and-shade method) (ISO 9846)

3. 2.1 ข้อกำหนดของ ISO (ISO 9846)

3.2.1.1 เครื่องมือ กำหนดให้ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง ต้องได้รับการสอบเทียบกับมาตรฐานโลกหรือสามารถสืบสาวขึ้นไปถึงมาตรฐานโลก (traceability) ได้ และกำหนดว่า ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงต้องมีมุมรับแสง (field-of-view) ไม่เกิน 10 องศา และไพราโนมิเตอร์ที่จะนำมาสอบเทียบ ต้องสามารถตอบสนองต่อสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ในช่วง 0.3-3.0 μm การสอบเทียบต้องติดตั้งไพร์เฮริโอมิเตอร์และไพราโนมิเตอร์บนเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ (sun tracker) โดยอุปกรณ์ดังกล่าวต้องมีความคลาดเคลื่อนในการติดตามดวงอาทิตย์ไม่เกิน 0.25 องศา

รัศมีของแผ่นบังรังสีตรงจากดวงอาทิตย์ (r) ต้องมีค่ามากกว่ารัศมี โดมแก้วชั้นนอกสุดของไพราโนมิเตอร์โดย r ต่ำสุดควรมีค่าเท่ากับ $d \tan(0.5^\circ)$ โดย d เป็นระยะทางระหว่างแผ่นบังรังสีกับไพราโนมิเตอร์ และค่าอัตราส่วนของ r/d ควรสอดคล้องกับค่า field-of-view ของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง

ในการวัดศักย์ไฟฟ้าจากไพร์เฮริโอมิเตอร์ เครื่องวัดต้องมี resolution อย่างน้อย $1 \mu\text{V}$ และมีการเปลี่ยนแปลงผลการวัดเนื่องจากอุณหภูมิอยู่ในช่วง $\pm 0.1 \%$



รูปที่ 3.15 แผ่นบังรังสีตรงจากดวงอาทิตย์บนเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ตาม ISO 9846

3.2.1.2 แหล่งกำเนิดรังสี (radiation source) ต้องทำการสอบเทียบโดยใช้รังสีอาทิตย์ที่มีความเข้มรังสีตรงที่ตกกระทบตั้งฉากกับไพร์เฮริโอมิเตอร์ไม่ต่ำกว่า 300 W.m^{-2} ถ้าเป็นไปได้ควรเกิน 700 W.m^{-2}

3.2.1.3 สภาพแวดล้อมทางอุตุนิยมวิทยา

- ก) ในระหว่างการสอบเทียบความเร็วลมต้องมีค่าต่ำกว่า 3.0 m.s^{-1}
- ข) สภาพท้องฟ้า (sky conditions) กรณีท้องฟ้ามีเมฆ เมฆควรอยู่ห่างจากดวงอาทิตย์มากกว่า 15 องศา การสอบเทียบที่ดีท้องฟ้าต้องมีเมฆน้อยกว่า 12.5 % (พื้นที่ที่เป็นเมฆเมื่อเทียบกับพื้นที่ท้องฟ้าทั้งหมด)
- ค) มุมดวงอาทิตย์ ในระหว่างการสอบเทียบ มุมเงย (altitude angle) ของดวงอาทิตย์ต้องไม่น้อยกว่า 45 องศา

3.2.1.4 การติดตั้งเครื่องมือ ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงและไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบต้องติดตั้งบนเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ซึ่งอาจเป็นเครื่องเดียวกันหรือคนละเครื่องก็ได้ แต่ระยะห่างระหว่างไพร์เฮริโอมิเตอร์และไพราโนมิเตอร์ต้องไม่เกิน 20 เมตร และต้องติดตั้งไพร์เฮริโอมิเตอร์และไพราโนมิเตอร์ให้พร้อมก่อนการสอบเทียบอย่างน้อย 30 นาที

3.2.1.5 การเก็บข้อมูล ISO กำหนดให้เก็บข้อมูลเป็นชุดๆ แต่ละชุดใช้เวลาไม่เกิน 36 นาที โดยในหนึ่งชุดข้อมูลต้องเก็บอย่างน้อย 21 ค่า โดยวิธีการบันทึกข้อมูลรังสีอาทิตย์จากระบบสอบเทียบแสดงดังรูปที่ 3.16 ซึ่งจะทำให้การวัดรังสีกระจาย ($E_{D,\beta}$) ที่ได้จากไพราโนมิเตอร์ที่เวลา t_0 และเวลา $2t_0 + 1$ ซึ่งเป็นขณะที่แผ่นบังรังสีตรงถูกขับเคลื่อนให้อยู่ในตำแหน่งบังรังสีตรงที่ตกกระทบเซนเซอร์ของไพราโนมิเตอร์ บันทึกข้อมูลรังสีรวม ($E_{G,\beta}$) จากไพราโนมิเตอร์ซึ่งเป็นขณะที่เอาแผ่นบังรังสีตรงออก และข้อมูลรังสีตรง (E_I) จากไพร์เฮริโอมิเตอร์ที่เวลา $2t_0$ ซึ่งจะครบ 1 ลำดับข้อมูล นอกจากนี้ทำการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิที่เวลาเริ่มต้นและสุดท้ายของการสอบเทียบ

Shade disc	set	set	set	set				
Time of reading	0	t_0	$2t_0$	$3t_0$	$4t_0$	$5t_0$	$2n \cdot t_0$	$(2n+1) \cdot t_0$
Reading of $E_{D,\beta}$		*		*		*		*
Reading of $E_{G,\beta}$			*		*		*	
Reading of E_I			*		*		*	
Reading of T	*							*

รูปที่ 3.16 แผนภาพแสดงเวลาในการเก็บข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าและอุณหภูมิ

3.2.1.6 การประมวลผลของข้อมูล

การหาค่าสภาพการตอบสนองที่ได้จากลำดับข้อมูลที่ i สามารถหาได้จากสมการ

$$R_S(i) = \frac{\{V_G(2i) - 0.5[V_D(2i-1) + V_D(2i+1)]\}}{\{V_i(2i) \cdot F_p \cos[\theta_z(2i)]\}} \quad (3.9)$$

เมื่อ $R_S(i)$ คือ สภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ ($\mu V/W.m^{-2}$)

F_p คือ สภาพการตอบสนอง ของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง ($W.m^{-2}/\mu V$)

V_D คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบที่ เวลา t_0 (mV)

V_G คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบที่เวลา $2t_0$ (mV)

V_i คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากไพร์เฮริโอมิเตอร์ อ้างอิงที่เวลา $2t_0$ (mV)

โดยต้องทำการคำนวณ $R_S(i)$ ของทุกลำดับข้อมูลในชุดข้อมูล j ตามสมการ (3.9) และหาค่าเฉลี่ยของสภาพการตอบสนองที่ได้จากทุกลำดับข้อมูลในชุดข้อมูล j ($\bar{R}_S(j)$) จากสมการ

$$\bar{R}_S(j) = \frac{\sum_{i=1}^n \{V_G(2i) - 0.5[V_D(2i-1) + V_D(2i+1)]\}}{\sum_{i=1}^n \{V_i(2i) \cdot F_p \cos[\theta_z(2i)]\}} \quad (3.10)$$

จากนั้นจะใช้ค่า $\bar{R}_S(j)$ ที่ได้มากำหนดช่วงข้อมูลที่ยอมรับได้โดยกำหนดว่าข้อมูล $R_S(i)$ ที่ยอมรับได้ต้องมีค่าอยู่ในช่วง $\bar{R}_S(j) \pm 1\%$ หากค่า $R_S(i)$ ได้เกินจากช่วงที่ยอมรับได้ให้ตัดข้อมูลนั้นออก แล้วคำนวณ $\bar{R}_S(j)$ ใหม่ ทำเช่นนี้กับทุกชุดข้อมูลแล้วนำค่า $\bar{R}_S(j)$ ที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย โดยค่าเฉลี่ยนี้จะถือว่าเป็นค่าสภาพการตอบสนองที่ต้องการ

3.2.2 การพัฒนาระบบสอบเทียบตามข้อกำหนด ISO 9846

ในการพัฒนาระบบสอบเทียบไพราโนมิเตอร์ภาคสนามโดยเปรียบเทียบกับไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงแบบสลับกันบังรังสีตรงตามมาตรฐาน ISO 9846 ผู้วิจัยได้จัดเตรียมเครื่องมือต่างๆ ดังนี้

1) ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง ยี่ห้อ Eppler รุ่น sNIP serial no: 37868E6 ซึ่งได้รับการสอบเทียบโดยใช้ไพร์เฮริโอมิเตอร์แบบ absolute cavity เป็นเครื่องวัดอ้างอิงตามวิธีการ ISO 9059 ซึ่งกล่าวไว้ในหัวข้อ 3.1



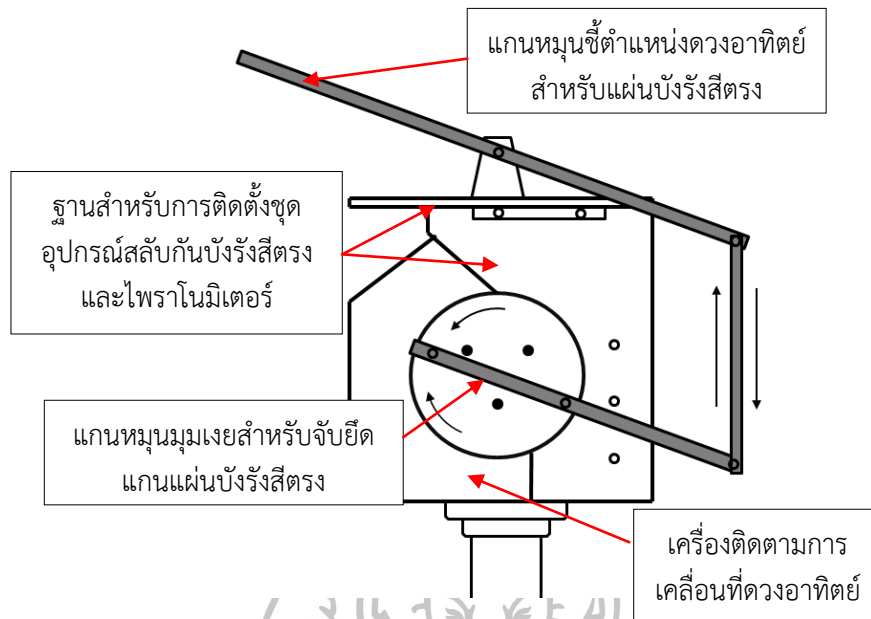
รูปที่ 3.17 ไพร่เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงที่นำมาใช้ในระบบสอบเทียบตาม ISO 9846

2) เครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น 2AP (รูปที่ 3.18) ซึ่งขับเคลื่อนอัตโนมัติแบบ 2 แกน (azimuth-altitude system) มีคุณสมบัติตามข้อกำหนด ISO 9846



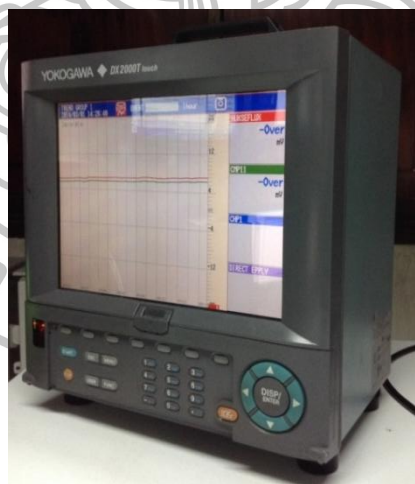
รูปที่ 3.18 เครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ที่ใช้ในระบบสอบเทียบ

3) ชุดบังรังสีตรงและอุปกรณ์ควบคุม ผู้วิจัยสร้างชุดบังรังสีตรงและอุปกรณ์ควบคุม ซึ่งชุดดังกล่าวจะมีแขนยึดจับกับเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์และมีมอเตอร์ขับเคลื่อนให้แผ่นบังรังสีตรงเคลื่อนที่เข้ามาบังรังสีตรงที่จะตกกระทบไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ โดยสามารถควบคุมด้วยมือและติดตั้งโปรแกรมให้สลับกันบังไม่บังรังสีตรงตามเวลาที่ต้องการได้



รูปที่ 3.19 ชุดอุปกรณ์บังรังสีตรง

4) เครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) เป็นเครื่องยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DX 2000 (รูปที่ 3.21) สามารถบันทึกค่าศักย์ไฟฟ้าจากอุปกรณ์สอบเทียบได้ตามข้อกำหนดของ ISO 9846

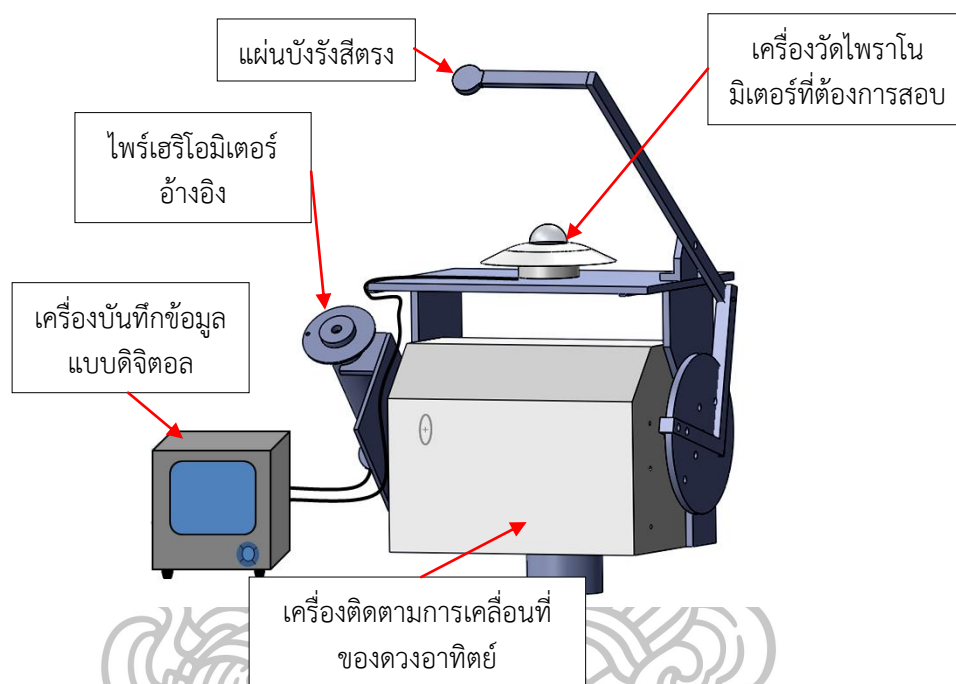


รูปที่ 3.20 เครื่องบันทึกข้อมูลที่ใช้ในระบบสอบเทียบ

5) เครื่องถ่ายภาพท้องฟ้า (sky view) เป็นเครื่องที่ผลิตโดยบริษัท Prede รุ่น PSV-100W (รูปที่ 3.5) (ใช้ร่วมกับระบบสอบเทียบ ISO 9059 ในหัวข้อที่ 3.1.2)

6) เครื่องตรวจอากาศอัตโนมัติ (ใช้ร่วมกับระบบสอบเทียบ ISO 9059 ในหัวข้อที่ 3.1.2)

หลังจากจัดเตรียมเครื่องมือต่างๆ ข้างต้นได้แล้ว ผู้วิจัยติดตั้งไพโรเฮริโอมิเตอร์อ้างอิง ไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ และชุดบังรังสีตรงเข้ากับเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ (รูปที่ 3.22) และติดตั้งระบบดังกล่าวที่ตาดฟ้า ชั้น 11 อาคารวิทยาศาสตร์ 1 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร (13.82° N, 100.04° E)



รูปที่ 3.22 ระบบสอบเทียบไพราโนมิเตอร์แบบสลับกันบังรังสีตรงตาม ISO 9846

3.2.3 การทดสอบสมรรถนะของระบบและผลการทดสอบ

ในการทดสอบสมรรถนะของระบบที่พัฒนาขึ้นมานั้น ผู้วิจัยนำระบบดังกล่าวไปสอบเทียบไพราโนมิเตอร์ 2 เครื่อง ได้แก่ ไพราโนมิเตอร์ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 141122 (รูปที่ 3.23) และไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP22 serial no: 130520 (รูปที่ 3.24)



รูปที่ 3.23 ไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 141122

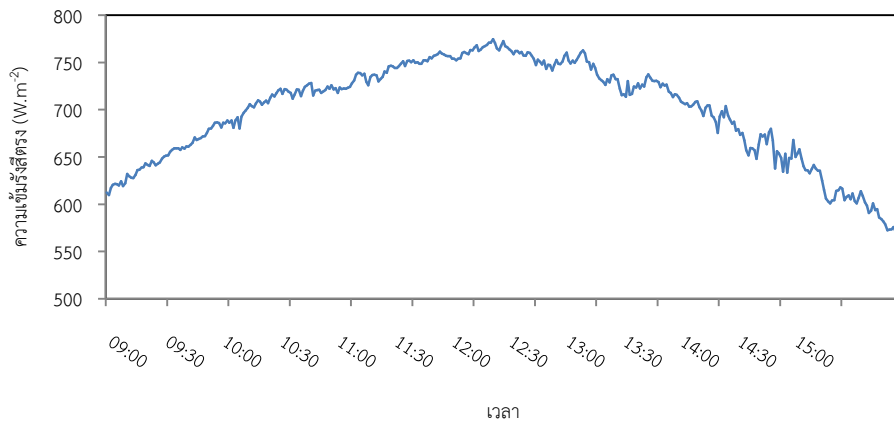


รูปที่ 3.24 ไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP22 serial no: 130520

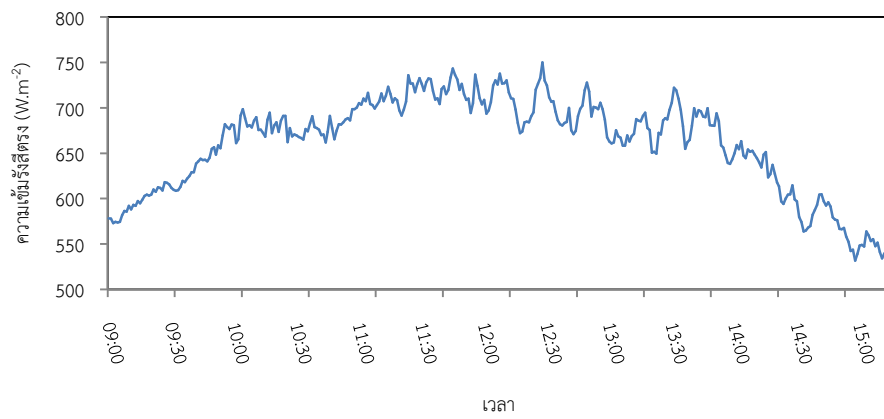
ในการสอบเทียบ ผู้วิจัยจะติดตั้งไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบบนเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ตามแบบสอบเทียบใน (รูปที่ 3.22) และต่อสายสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากไพราโนมิเตอร์และไพร์เฮริโอมิเตอร์เข้าเครื่องบันทึกข้อมูล แล้วทำการเก็บข้อมูลโดยเลือกสภาพท้องฟ้าที่เป็นไปตามข้อกำหนดของ ISO 9846 โดยรายละเอียดของวันที่ทำการสอบเทียบแสดงในตารางที่ 3.12

ตารางที่ 3.12 ข้อมูลของเครื่องวัดรังสีอาทิตย์สำหรับกระบวนการสอบเทียบแบบสลับกันบังรังสีตรง และช่วงระยะเวลาที่ทำการสอบเทียบ

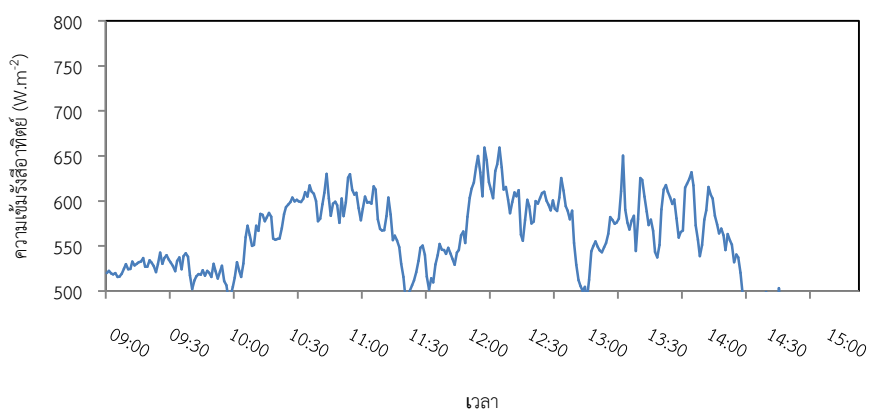
ไพราโนมิเตอร์ ที่ต้องการสอบเทียบ	ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง	ช่วงระยะเวลา สอบเทียบ
Company: Kipp&Zonen Model: CMP11 Serial no: 141122	Company: Eppley Model: sNIP Serial no: 37868E6	1-2 มีนาคม 2559
Company: Kipp&Zonen Model: CMP22 Serial no: 130520	Company: Eppley Model: sNIP Serial no: 37868E6	3-4 มีนาคม 2559



รูปที่ 3.25 การแปลค่าความเข้มรังสีตรงจากไพร์เฮริโอมิเตอร์มาตรฐาน รุ่น sNIP serial no: 37868E6 บริษัท Eppler วันที่ 1 มีนาคม 2559



รูปที่ 3.26 การแปลค่าความเข้มรังสีตรงจากไพร์เฮริโอมิเตอร์มาตรฐาน รุ่น sNIP serial no: 37868E6 บริษัท Eppler วันที่ 2 มีนาคม 2559



รูปที่ 3.27 การแปลค่าความเข้มรังสีตรงจากไพร์เฮริโอมิเตอร์มาตรฐาน รุ่น sNIP serial no: 37868E6 บริษัท Eppler วันที่ 3 มีนาคม 2559

จากข้อมูลที่ได้ ผู้วิจัยจะประเมินผลข้อมูลตามวิธีที่ ISO 9846 กำหนด โดยผลการสอบเทียบไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP22 Serial no: 130520 และรุ่น CMP11 Serial no: 141122 แสดงดังตารางที่ 3.13 และ 3.14 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.13 ค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP22 serial no: 130520 วันที่ 3-4 มีนาคม 2559

จำนวนชุดข้อมูล	ค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP22 Serial no: 130520 ($\mu\text{V/W.m}^{-2}$)	
	03/03/2016	04/03/2016
1	8.87	8.88
2	8.88	8.89
3	8.87	8.89
4	8.86	8.87
5	8.84	8.88
6	8.85	8.87
7	8.85	8.88
8	8.83	8.87
9	8.82	8.87
10	8.85	8.88
11	8.92	8.86
ค่าเฉลี่ย	8.87	

ตารางที่ 3.14 ค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 141122 วันที่ 1-2 มีนาคม 2559

จำนวนชุดข้อมูล	ค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 Serial no: 141122 ($\mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	
	01/03/2016	02/03/2016
1	8.55	8.51
2	8.54	8.52
3	8.53	8.52
4	8.53	8.52
5	8.53	8.52
6	8.53	8.53
7	8.53	8.52
8	8.52	8.51
9	8.52	8.51
10	8.51	8.50
11	8.53	8.50
12	8.51	-
13	8.50	-
ค่าเฉลี่ย	8.52	



3.2.4 การหาค่าความไม่แน่นอนของระบบสอบเทียบไพราโนมิเตอร์โดยใช้ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงแบบสลับกันบังรังสีตรง ISO 9846

ความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นในระบบสอบเทียบไพราโนมิเตอร์โดยใช้ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงแบบสลับกันบังรังสีตรงตาม ISO 9846 จะเกิดจากส่วนที่มาจาก การวัดและเครื่องมือที่ใช้ในระบบสอบเทียบ โดยสามารถแยกค่าความไม่แน่นอน ได้ดังนี้

$$\left(\frac{u(R_s(j))}{R_s(j)} \right)^2 = \left(\frac{u(V_{FP}(j))}{V_{FP}(j)} \right)^2 + \left(\frac{u(E_{SP}(j))}{E_{SP}(j)} \right)^2 \quad (3.11)$$

- เมื่อ $u(R_s(j))$ คือ ค่าความไม่แน่นอนของค่าสภาพการตอบสนองของชุดข้อมูลที่ j
 $R_s(j)$ คือ ค่าค่าสภาพการตอบสนองของชุดข้อมูลที่ j
 $u(V_{FP}(j))$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากศักย์ไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบชุดที่ j
 $u(E_{SP}(j))$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากความเข้มรังสีตรงของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงชุดที่ j
 $V_{FP}(j)$ คือ ศักย์ไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบชุดที่ j
 $E_{SP}(j)$ คือ ความเข้มรังสีตรงของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงชุดที่ j

จากสมการ (3.11) ค่าความไม่แน่นอนของชุดข้อมูลที่ j สามารถแยกพิจารณาได้ 2 กรณี ดังนี้

กรณีค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากศักย์ไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบ เนื่องจาก ระบบสอบเทียบไพราโนมิเตอร์ตาม ISO 9846 ระบบนี้เป็นแบบสลับกันบังรังสีตรง โดยที่ไพราโนมิเตอร์จะต้องทำการวัดทั้งรังสีรวมและรังสีกระจาย ค่าความไม่แน่นอนจากไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบสามารถหาได้ดังนี้

$$u(\overline{V_{FP}(j)}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\begin{array}{l} (V_G(i, j) + \delta V_{G,i,offset} + \delta V_{G,i,temp} + \delta V_{G,i,daq}) \\ + 0.5 \left[\begin{array}{l} (V_D(i-1, j) + \delta V_{D,i-1,offset} + \delta V_{D,i-1,temp} + \delta V_{D,i-1,daq}) \\ - (V_D(i+1, j) + \delta V_{D,i+1,offset} + \delta V_{D,i+1,temp} + \delta V_{D,i+1,daq}) \end{array} \right] \end{array} \right) \quad (3.12)$$

- เมื่อ $u(\overline{V_{FP}(j)})$ คือ ค่าเฉลี่ยความไม่แน่นอนของชุดข้อมูลที่ j
 $V_G(i, j)$ คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์ขณะที่วัดรังสีรวม
 $V_D(i-1, j)$ คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์ขณะที่วัดรังสีกระจาย
 $V_D(i+1, j)$ คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์ขณะที่วัดรังสีกระจาย
 $\delta V_{G,i,offset}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าชดเชยขณะที่วัดรังสีรวม

$\delta V_{G,i,temp}$	คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะที่วัดรังสีรวม
$\delta V_{G,i,daq}$	คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากความแม่นยำของระบบบันทึกข้อมูลขณะที่วัดรังสีรวม
$\delta V_{D,i-1,offset}$	คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าชดเชยขณะที่วัดรังสีกระจายที่ตำแหน่ง i-1
$\delta V_{D,i-1,temp}$	คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะที่วัดรังสีกระจายที่ตำแหน่ง i-1
$\delta V_{D,i-1,daq}$	คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากความแม่นยำของระบบบันทึกข้อมูลขณะที่วัดรังสีกระจายที่ตำแหน่ง i-1
$\delta V_{D,i+1,offset}$	คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าชดเชยขณะที่วัดรังสีกระจายที่ตำแหน่ง i+1
$\delta V_{D,i+1,temp}$	คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะที่วัดรังสีกระจายที่ตำแหน่ง i+1
$\delta V_{D,i+1,daq}$	คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากความแม่นยำของระบบบันทึกข้อมูลขณะที่วัดรังสีกระจายที่ตำแหน่ง i+1

เนื่องจากไพราโนมิเตอร์ที่ทำการสอบเทียบตาม ISO 9846 นั้นทำการวัดรังสีกระจายและรังสีรวมได้ในเครื่องวัดเดียวกัน ดังนั้น

$$\left. \begin{aligned} \delta V_{G,i,offset} &= \delta V_{D,i-1,offset} = \delta V_{D,i+1,offset} \\ \delta V_{G,i,temp} &= \delta V_{D,i-1,temp} = \delta V_{D,i+1,temp} \\ \delta V_{G,i,daq} &= \delta V_{D,i-1,daq} = \delta V_{D,i+1,daq} \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$

ซึ่งทำให้ได้

$$u(\overline{V_{FP}(j)})^2 = u(\delta V_{FP,rep})^2 + 1.5u(\delta V_{G,daq})^2 + 1.5u(\delta V_{G,temp})^2 + 1.5u(\delta V_{G,offset})^2 \quad (3.14)$$

ดังนั้น กรณีค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดศักย์ไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ จะพิจารณาจาก 4 สาเหตุ ดังนี้

- ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $u(\delta V_{FP,rep})$
- ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากความแม่นยำของระบบบันทึกข้อมูลของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $u(\delta V_{FP,daq})$

- ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $u(\delta V_{FP,temp})$
 - ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าชดเชย (offset) ของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $u(\delta V_{FP,offset})$
- โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$u(\overline{V_{FP}(j)})^2_{relative} = \left(\frac{u(\delta V_{FP,rep})}{V_{FP}} \right)^2 + \left(\frac{u(\delta V_{FP,daq})}{V_{FP}} \right)^2 + \left(\frac{u(\delta V_{FP,temp})}{V_{FP}} \right)^2 + \left(\frac{u(\delta V_{FP,offset})}{V_{FP}} \right)^2 \quad (3.15)$$

กรณีการหาค่าความไม่แน่นอนเกิดจากการวัดศักย์ของไพรีโอมิเตอร์อ้างอิง จากสมการ (3.11) จะพิจารณาสาเหตุที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนได้จาก 5 สาเหตุ ดังนี้

- ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของไพรีโอมิเตอร์อ้างอิง $u(\delta V_{SP,rep})$
 - ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากความแม่นยำของระบบบันทึกข้อมูลของไพรีโอมิเตอร์อ้างอิง $u(\delta V_{SP,daq})$
 - ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการปรับตำแหน่งที่ผลิตผลของไพรีโอมิเตอร์อ้างอิง $u(\delta V_{SP,direction})$
 - ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไพรีโอมิเตอร์อ้างอิง $u(\delta V_{SP,temp})$
 - ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าชดเชย (offset) ของไพรีโอมิเตอร์อ้างอิง $u(\delta V_{SP,offset})$
- โดยสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$u(E_{SP})^2_{relative} = \left(\frac{u(\delta V_{SP,rep})}{V_{SP}} \right)^2 + \left(\frac{u(\delta V_{SP,daq})}{V_{SP}} \right)^2 + \left(\frac{u(\delta V_{SP,temp})}{V_{SP}} \right)^2 + \left(\frac{u(\delta V_{SP,direction})}{V_{SP}} \right)^2 + \left(\frac{u(\delta V_{SP,offset})}{V_{SP}} \right)^2 + \left(\frac{u(\delta R_{SP})}{R_{SP}} \right)^2 \quad (3.16)$$

- เมื่อ $u(E_{SP})_{relative}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ที่เกิดจากความเข้มรังสีตรงของไพรีโอมิเตอร์อ้างอิง
- $u(\delta V_{SP,rep})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของไพรีโอมิเตอร์อ้างอิง

- $u(\delta V_{SP,daq})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากความแม่นยำของระบบบันทึกข้อมูลของไพร์เฮรีโอมิเตอร์อ้างอิง
- $u(\delta V_{SP,temp})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไพร์เฮรีโอมิเตอร์อ้างอิง
- $u(\delta V_{SP,direction})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการปรับตำแหน่งที่ผิดพลาดของไพร์เฮรีโอมิเตอร์อ้างอิง
- $u(\delta V_{SP,offset})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าชดเชย (offset) ของไพร์เฮรีโอมิเตอร์อ้างอิง
- $u(\delta R_{SP})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าสภาพการตอบสนองของไพร์เฮรีโอมิเตอร์อ้างอิง

เมื่อคำนวณหาผลรวมของค่าความไม่แน่นอนของข้อมูลชุดที่ j ตามสมการ (3.15) และ (3.16) แล้ว ผู้วิจัยจะหาค่าเฉลี่ยความไม่แน่นอนของชุดข้อมูล (pool uncertainty) ได้ดังนี้

$$\left(\frac{u(R)_{pool}}{R}\right)^2 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left(\frac{u(R_s(j))}{R_s(j)}\right)^2 \quad (3.17)$$

เนื่องจากค่าสภาพการตอบสนองสุดท้ายเป็นค่าเฉลี่ยของค่าการตอบสนองของทุกชุดข้อมูล ดังนั้นจึงมีค่าความไม่แน่นอนเกิดขึ้นได้อีก ($u(R)_{reproduce}$) ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนรวมของระบบสอบเทียบไพราโนมิเตอร์ตาม ISO 9846 สามารถสรุป ดังต่อไปนี้

$$\left(\frac{u(R)}{R}\right)^2 = \left(\frac{u(R)_{pool}}{R}\right)^2 + \left(\frac{u(R)_{reproduce}}{R}\right)^2 \quad (3.18)$$

ตามสมการ (3.18) จะเห็นว่าค่าความไม่แน่นอนรวมของระบบสอบเทียบทั้งหมดนั้นเป็นผลรวมตามสมการ (3.17) และค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจาก reproduce uncertainty

3.2.4.1 การหาค่าความไม่แน่นอนของระบบสอบเทียบของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

1) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $u(\delta V_{FP,rep})$

จากการหาค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP22 serial no: 130520 ในชุดข้อมูลที่ j ซึ่งมีการวัดศักย์ไฟฟ้าจำนวน 21 ค่า ($n=21$) พบว่า ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) ของชุดข้อมูลดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 1.66 mV และมีค่าเฉลี่ยของศักย์ไฟฟ้าของชุดข้อมูล

เท่ากับ 3.49 mV ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดซ้ำค่าศักย์ไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์ ของชุดข้อมูลนี้หาได้จาก

$$\begin{aligned} u(\delta V_{FP,rep}) &= \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{FP}(i,j) - V_{FP}(j))^2}{(n-1)}}}{\sqrt{n}} \\ &= \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \\ &= \frac{1.66 \text{ mV}}{\sqrt{21}} \\ &= 0.36 \text{ mV} \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ที่เกิดจากการวัดซ้ำค่าศักย์ไฟฟ้าของชุดข้อมูลที่ j เท่ากับ

$$\begin{aligned} u(\delta V_{FP,rep})_{\text{relative}} &= \frac{0.36 \text{ mV}}{3.49 \text{ mV}} \times 100 \% \\ &= 0.103 \% \end{aligned}$$

2) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากความแม่นยำของระบบบันทึกข้อมูลของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $u(\delta V_{FP,daq})$

เนื่องจากสัญญาณของการวัดรังสีอาทิตย์ที่ได้จากไพราโนมิเตอร์จะอยู่ในรูปของศักย์ไฟฟ้า ซึ่งในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้เครื่องบันทึกข้อมูลแบบดิจิทัล ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DX 2000 ที่มีความละเอียด 0.0050% +12 หลัก

กรณีนี้ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของไพราโนมิเตอร์สามารถอ่านได้ 10 mV ดังนั้นสามารถหาค่าของช่วงกึ่งกลาง (semi-range) ได้ดังนี้

$$a = \left[\frac{0.005 \times 10 \text{ mV}}{100} + 0.012 \right] = 12.5 \mu\text{V}$$

และจะได้ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ (standard uncertainty)

$$u(\text{Daq}_{\text{accuracy}}) = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{12.5 \mu\text{V}}{\sqrt{3}} = 7.2 \mu\text{V}$$

ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ที่เกิดจากความละเอียดของการบันทึกข้อมูลสามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u(\text{Daq}_{\text{accuracy}})_{\text{relative}} &= \frac{7.2 \mu\text{V}}{10 \text{ mV}} \times 100 \% \\ &= 0.072 \% \end{aligned}$$

นอกจากนี้ จากรายละเอียดของเครื่องบันทึกข้อมูลแบบดิจิทัล พบว่าสามารถวัดศักย์ไฟฟ้าได้ 20 mV และมีค่าความไม่แน่นอน $\pm 0.0070 \text{ mV}$ ที่มีระดับความเชื่อมั่น $k = 2$ ดังนั้นสามารถคำนวณความไม่แน่นอนของเครื่องบันทึกค่าศักย์ไฟฟ้าของไพโรเฮริโอมิเตอร์ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} u(\text{Daq}_{\text{calibrate}}) &= \frac{0.0070 \text{ mV}}{2} \\ &= 0.0035 \text{ mV} \end{aligned}$$

และค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ในกรณีนี้หาได้จาก

$$\begin{aligned} u(\text{Daq}_{\text{calibrate}})_{\text{relative}} &= \frac{3.5 \mu\text{V}}{10 \text{ mV}} \times 100 \\ &= 0.035 \% \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์รวมที่เกิดจากระบบบันทึกข้อมูลของไพราโนมิเตอร์สามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u(\delta V_{\text{FP,daq}})_{\text{relative}} &= \sqrt{u(\text{Daq}_{\text{accuracy}})_{\text{relative}}^2 + u(\text{Daq}_{\text{calibrate}})_{\text{relative}}^2} \\ &= \sqrt{0.072^2 + 0.035^2} \\ &= 0.08 \% \end{aligned}$$

3) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $u(\delta V_{\text{FP,temp}})$

การสอบเทียบไพราโนมิเตอร์เป็นการสอบเทียบภายนอกอาคาร โดยที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อมนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาในระหว่างการสอบเทียบ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมินี้จะส่งผลกับศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ การสอบเทียบจึงต้องทำการวัดอุณหภูมิแวดล้อมระหว่างการสอบเทียบของแต่ละชุดข้อมูล เพื่อใช้ในการหาค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้ไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP22 serial no: 130520 ซึ่งรายละเอียดของเครื่องมีดังนี้

- Sensitivity is $8.71 \mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$

- Temperature error = 0.5%
- The standard uncertainty for the temperature ranges from -20°C to $+40^{\circ}\text{C}$ ซึ่งค่าความไม่แน่นอนดังกล่าวเป็นค่าที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด ทำให้สามารถหาค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดังต่อไปนี้

$$u(\delta V_{\text{FP,temp}})_{\text{relative}} = \frac{0.5\%}{2\sqrt{3}}$$

$$= 0.144338\%$$

- 4) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าชดเชย (offset) ของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $u(\delta V_{\text{FP,offset}})$
- ในที่นี้ค่า zero offset (type B) ของไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP22 serial no: 130520 ที่กำหนดโดยบริษัทผู้ผลิตมี ค่าเท่ากับ $\pm 1 \text{ W.m}^{-2}$ ดังนั้นผู้วิจัยสามารถหาของช่วงกึ่งกลางได้จาก

$$a = 1 \text{ W/m}^2 \times 8.71 \mu\text{V/W.m}^{-2}$$

$$= 8.71 \mu\text{V}$$

และได้ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์เท่ากับ

$$u(\delta V_{\text{FR,offset}}) = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

$$= 5.028 \mu\text{V}$$

ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ที่เกิดจากค่าชดเชย (offset) ของไพราโนมิเตอร์สามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยของศักย์ไฟฟ้า ($4.5 \times 10^3 \mu\text{V}$) ดังนี้

$$uu(\delta V_{\text{FP,offset}})_{\text{relative}} = \frac{u(\delta V_{\text{FP,offset}})}{V_{\text{FP}}(j)}$$

$$= \frac{5.028 \mu\text{V}}{4.5 \times 10^3 \mu\text{V}} \times 100\%$$

$$= 0.11\%$$

3.2.4.2 การหาค่าความไม่แน่นอนของระบบสอบเทียบไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง

1) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดซ้ำค่าศักย์ไฟฟ้าของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง

$$u(\delta V_{SP,rep})$$

จากกระบวนการสอบเทียบตาม ISO 9059 ซึ่งเป็นการหาค่าสภาพการตอบสนองโดยการเปรียบเทียบศักย์ไฟฟ้าของไพร์เฮริโอมิเตอร์นี้ต้องการสอบเทียบกับค่าความเข้มรังสีตรงจากไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง ยี่ห้อ Eppley รุ่น sNIP serial no: 37868E6 ในชุดข้อมูลที่ j ซึ่งมีการวัดความเข้มรังสีตรงจำนวน 21 ค่า ($n=21$) พบว่า ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) ของชุดข้อมูลดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 0.054 mV และมีค่าเฉลี่ยความเข้มรังสีตรงของชุดข้อมูลเท่ากับ 4.551 mV ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดซ้ำค่าความเข้มรังสีตรงของไพร์เฮริโอมิเตอร์ของชุดข้อมูลนี้หาได้จาก

$$\begin{aligned} u(\delta V_{SP,rep}) &= \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (V_{SP}(i,j) - V_{SP}(j))^2}}{\sqrt{n}} \\ &= \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \\ &= \frac{0.054 \text{ mV}}{\sqrt{21}} \\ &= 0.012 \text{ mV} \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ที่เกิดจากการวัดซ้ำค่าศักย์ไฟฟ้าของชุดข้อมูลที่ j เท่ากับ

$$\begin{aligned} u(\delta V_{SP,rep})_{\text{relative}} &= \frac{0.012 \text{ mV}}{4.551 \text{ mV}} \times 100 \% \\ &= 0.26 \% \end{aligned}$$

2) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากความแม่นยำของระบบบันทึกข้อมูลของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง $u(\delta V_{SP,daq})$

เนื่องจากสัญญาณของการวัดรังสีอาทิตย์ที่ได้จากไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงจะอยู่ในรูปของศักย์ไฟฟ้า ซึ่งในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้เครื่องบันทึกข้อมูลแบบดิจิทัล ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DX 2000 ที่มีความละเอียด 0.0050% +12 หลัก

กรณีนี้ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของไพร์เฮริโอมิเตอร์สามารถอ่านได้ 10 mV ดังนั้นสามารถหาค่าของช่วงกึ่งกลาง (semi-range) ได้ดังนี้

$$a = \left[\frac{0.005 \times 10 \text{ mV}}{100} + 0.012 \right] = 12.5 \text{ } \mu\text{V}$$

และจะได้ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ (standard uncertainty)

$$u(\text{Daq}_{\text{accuracy}}) = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{12.5 \text{ } \mu\text{V}}{\sqrt{3}} = 7.2 \text{ } \mu\text{V}$$

ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ที่เกิดจากความละเอียดของการบันทึกข้อมูลสามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u(\text{Daq}_{\text{accuracy}})_{\text{relative}} &= \frac{7.2 \text{ } \mu\text{V}}{10 \text{ mV}} \times 100 \% \\ &= 0.072 \% \end{aligned}$$

นอกจากนี้ จากรายละเอียดของเครื่องบันทึกข้อมูลแบบดิจิทัล พบว่าสามารถวัดศักย์ไฟฟ้าได้ 20 mV และมีค่าความไม่แน่นอน $\pm 0.0070 \text{ mV}$ ที่มีระดับความเชื่อมั่น $k = 2$ ดังนั้นสามารถคำนวณความไม่แน่นอนของเครื่องบันทึกค่าศักย์ไฟฟ้าของไพร์เฮริโอมิเตอร์ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} u(\text{Daq}_{\text{calibrate}}) &= \frac{0.0070 \text{ mV}}{2} \\ &= 0.0035 \text{ mV} \end{aligned}$$

และค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ในกรณีหาได้จาก

$$\begin{aligned} u(\text{Daq}_{\text{calibrate}})_{\text{relative}} &= \frac{3.5 \text{ } \mu\text{V}}{10 \text{ mV}} \times 100 \\ &= 0.035 \% \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์รวมที่เกิดจากระบบบันทึกข้อมูลของไพร์เฮริโอมิเตอร์สามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u(\delta V_{\text{SP,daq}})_{\text{relative}} &= \sqrt{u(\text{Daq}_{\text{accuracy}})_{\text{relative}}^2 + u(\text{Daq}_{\text{calibrate}})_{\text{relative}}^2} \\ &= \sqrt{0.072^2 + 0.035^2} \\ &= 0.08 \% \end{aligned}$$

3) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการปรับตำแหน่งที่ผิดพลาดของโพสิทีวมิเตอร์อ้างอิง
 $u(\delta V_{SP, direction})$

ตามกระบวนการสอบเทียบ ISO 9846 นั้นจะต้องนำโพสิทีวมิเตอร์ติดบนเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ เพื่อให้โพสิทีวมิเตอร์ชี้ตรงตำแหน่งดวงอาทิตย์ ซึ่งจะทำให้เกิดค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการปรับตำแหน่งขึ้นในระหว่างการสอบเทียบ โดยมีวิธีการคำนวณดังต่อไปนี้

- กรณีค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากตำแหน่งของโพสิทีวมิเตอร์

ในการสอบเทียบตามกระบวนการ ISO 9846 ผู้วิจัยใช้โพสิทีวมิเตอร์ ยี่ห้อ Eppley รุ่น sNIP serial no: 37868E6 โดยกำหนดให้โพสิทีวมิเตอร์มีตำแหน่งของจุดรับแสงเบี่ยงเบนไม่เกิน 0.1 เซนติเมตร และความยาวระหว่างจุดรับแสงกับช่องที่แสงผ่านของโพสิทีวมิเตอร์มีเท่ากับ 10 เซนติเมตร ดังนั้นความผิดพลาดของมุมรับแสงหาได้จาก

$$\delta\theta = \arctan\left(\frac{0.1}{10}\right) = 0.57^\circ$$

และความผิดพลาด (error) ของแนวรับแสงของโพสิทีวมิเตอร์หาได้จาก

$$\begin{aligned} \% \text{ERROR} &= (1 - \cos(\delta\theta)) \times 100 \% \\ &= 0.004999 \% \end{aligned}$$

ซึ่งทำให้ได้ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ของจุดรับแสงของโพสิทีวมิเตอร์ ดังนี้

$$\begin{aligned} u(\text{Tracking}_{\text{mounting}})_{\text{relative}} &= \frac{\% \text{ERROR}}{\sqrt{3}} \\ &= 0.002886 \% \end{aligned}$$

- กรณีค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการปรับตำแหน่งของเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์

ผู้วิจัยกำหนดความถูกต้องของเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ที่ 0.1 องศา ดังนั้นความผิดพลาดของตำแหน่งของเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ หาได้จาก

$$\begin{aligned} \% \text{ERROR} &= (1 - \cos(\delta\theta)) \times 100 \% \\ &= 0.00015 \% \end{aligned}$$

ทำให้ได้ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ของเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ดังนี้

$$u(\text{Tracking}_{\text{accuracy}})_{\text{relative}} = \frac{\% \text{ ERROR}}{\sqrt{3}} \\ = 0.00009 \%$$

ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ที่เกิดจากการปรับตำแหน่งที่ผิดพลาดของระบบสอบเทียบมีค่าเท่ากับ

$$u(\delta V_{\text{SP,direction}})_{\text{relative}} = \sqrt{0.002886^2 + 0.00009^2} \\ = 0.002887 \%$$

4) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง

$u(\delta V_{\text{SP,temp}})$

การสอบเทียบไพร์เฮริโอมิเตอร์เป็นการสอบเทียบภายนอกอาคาร โดยที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อมนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาในระหว่างการสอบเทียบ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมินี้จะส่งผลกับศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ การสอบเทียบจึงต้องทำการวัดอุณหภูมิแวดล้อมระหว่างการสอบเทียบของแต่ละชุดข้อมูล เพื่อใช้ในการหาค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้ไพร์เฮริโอมิเตอร์ ยี่ห้อ Eppley รุ่น sNIP serial no: 37868E6 ซึ่งรายละเอียดของเครื่องมีดังนี้

- Sensitivity is $8.66 \mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$

- Temperature error = 0.5%

- The standard uncertainty for the temperature ranges from -20°C to $+40^{\circ}\text{C}$

ซึ่งค่าความไม่แน่นอนดังกล่าวเป็นค่าที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด ทำให้สามารถหาค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดังต่อไปนี้

$$u(\delta V_{\text{FP,temp}})_{\text{relative}} = \frac{0.5 \ \%}{2\sqrt{3}} \\ = 0.144338 \ \%$$

5) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าชดเชย (offset) ของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง $u(\delta V_{\text{SP,offset}})$

ในที่นี้ค่า zero offset (type B) ของไพร์เฮริโอมิเตอร์ ยี่ห้อ Eppley รุ่น sNIP serial no: 37868E6 ที่กำหนดโดยบริษัทผู้ผลิตมีค่าเท่ากับ $\pm 1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ดังนั้นผู้วิจัยสามารถหาของช่วงกึ่งกลางได้จาก

$$\begin{aligned}
 a &= 1 \text{ W/m}^2 \times 8.66 \text{ } \mu\text{V/W.m}^{-2} \\
 &= 8.66 \text{ } \mu\text{V}
 \end{aligned}$$

และได้ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์เท่ากับ

$$\begin{aligned}
 u(\delta V_{\text{SR,offset}}) &= \frac{a}{\sqrt{3}} \\
 &= 4.999 \text{ } \mu\text{V}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ที่เกิดจากค่าชดเชย (offset) ของไพราโนมิเตอร์ สามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยของศักย์ไฟฟ้า ($4.5 \times 10^3 \text{ } \mu\text{V}$) ดังนี้

$$\begin{aligned}
 u(\delta V_{\text{SR,offset}})_{\text{relative}} &= \frac{u(\delta V_{\text{SP,offset}})}{V_{\text{SP}}(j)} \\
 &= \frac{4.999 \text{ } \mu\text{V}}{4.5 \times 10^3 \text{ } \mu\text{V}} \times 100 \% \\
 &= 0.11 \%
 \end{aligned}$$

6) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าสภาพการตอบสนองของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง

$u(\delta R_{\text{SP}})$

ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง ยี่ห้อ Eppley รุ่น sNIP serial no: 37868E6 ซึ่งได้รับการสอบเทียบโดยใช้ไพร์เฮริโอมิเตอร์แบบ absolute cavity เป็นเครื่องวัดอ้างอิงตามวิธีการ ISO 9059 ซึ่งกล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3

- The sensitivity of sNIP, $R_{\text{SP}} = 8.66 \text{ } \mu\text{V/W.m}^{-2}$
- The expanded uncertainty ($k=2$) = 1.16 %

ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนของ standard uncertainty ที่เกิดจาก sensitivity ของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง หาได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 u(S_{\text{SP,calibration}})_{\text{relative}} &= \frac{1.16\%}{2} \\
 &= 0.58 \%
 \end{aligned}$$

3.2.4.3 ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการหาค่าสภาพการตอบสนองซ้ำ

(reproduce)

ในการหาค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP22 serial no: 130520 ที่ได้จากค่าเฉลี่ยของการสอบเทียบชุดข้อมูลที่ j ซึ่งผู้วิจัยได้ข้อมูลค่าสภาพการตอบสนองทั้งหมดจำนวน 11 ค่า ($n=11$) ทำให้ได้ค่าค่าสภาพการตอบสนองของไพโรฮีโรมิเตอร์เฉลี่ยเท่ากับ $8.86 \mu\text{V/W.m}^{-2}$ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) เท่ากับ $0.027 \mu\text{V/W.m}^{-2}$ ดังนั้นความไม่แน่นอนที่เกิดจากการสอบเทียบซึ่งหาได้จาก

$$u(\delta S_{FP,rep}) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{0.027 \mu\text{V/W.m}^{-2}}{\sqrt{11}} = 0.008 \mu\text{V/W.m}^{-2}$$

ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์จากการหาค่าสภาพการตอบสนอง ซึ่งหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u(\delta S_{FP,rep})_{\text{relative}} &= \frac{0.008 \mu\text{V/W.m}^{-2}}{8.86 \mu\text{V/W.m}^{-2}} \times 100 \% \\ &= 0.090 \% \end{aligned}$$

จากการคำนวณค่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการหาค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP22 serial no: 130520 ดังที่กล่าวมา พบว่าระบบสอบเทียบให้ผลการสอบเทียบที่มีค่าความไม่แน่นอนเท่ากับ 1.77 % และไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 141122 มีค่าความไม่แน่นอนเท่ากับ 1.75 %



3.3 ระบบสอบเทียบไพราโนมิเตอร์โดยเปรียบเทียบกับไพเรโอมิเตอร์อ้างอิงแบบต่อเนื่อง (continuous sun-and-shade method)

3.1 ข้อกำหนดของ ISO (ISO 9846)

3.3.1.1 เครื่องมือ กำหนดให้ใช้ไพเรโอมิเตอร์อ้างอิงตามรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.1 และใช้ไพราโนมิเตอร์อ้างอิงที่ผ่านการสอบเทียบจากกระบวนการสอบเทียบตามหัวข้อที่ 3.2 นอกจากนี้ยังต้องใช้เครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ที่มีรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.2.2 และใช้แผ่นบังรังสีตรงตามละเอียดในหัวข้อที่ 3.2.1.1

ในการวัดศักย์ไฟฟ้าจากไพเรโอมิเตอร์และไพราโนมิเตอร์ ต้องใช้เครื่องวัดที่มีลักษณะคุณสมบัติตามที่ระบุไว้ในหัวข้อที่ 3.1.1.1

3.3.1.2 แหล่งกำเนิดรังสี (radiation source) ต้องทำการสอบเทียบโดยใช้รังสีอาทิตย์ที่มีความเข้มรังสีตรงที่ตกกระทบตั้งฉากกับไพเรโอมิเตอร์ไม่ต่ำกว่า 300 W.m^{-2} ถ้าเป็นไปได้ควรเกิน 700 W.m^{-2}

3.3.1.3 สภาพแวดล้อมทางอุตุนิยมวิทยา

ก) ในระหว่างการสอบเทียบความเร็วลมต้องมีค่าต่ำกว่า 3.0 m.s^{-1}

ข) สภาพท้องฟ้า (sky conditions) ทัศนียภาพท้องฟ้ามีเมฆ เมฆควรอยู่ห่างจากดวงอาทิตย์มากกว่า 15 องศา การสอบเทียบที่ดีท้องฟ้าต้องมีเมฆน้อยกว่า 12.5 % (พื้นที่ที่เป็นเมฆเมื่อเทียบกับพื้นที่ท้องฟ้าทั้งหมด)

ค) มุมดวงอาทิตย์ ในระหว่างการสอบเทียบ มุมเงย (altitude angle) ของดวงอาทิตย์ต้องไม่น้อยกว่า 45 องศา

3.3.1.4 การติดตั้งเครื่องมือ ไพเรโอมิเตอร์อ้างอิงและไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบต้องติดตั้งบนเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ซึ่งอาจเป็นเครื่องเดียวกันหรือคนละเครื่องก็ได้ แต่ระยะห่างระหว่างไพเรโอมิเตอร์และไพราโนมิเตอร์ต้องไม่เกิน 20 เมตร และต้องติดตั้งไพเรโอมิเตอร์และไพราโนมิเตอร์ให้พร้อมก่อนการสอบเทียบอย่างน้อย 30 นาที

3.3.1.5 การเก็บข้อมูล ISO กำหนดให้เก็บข้อมูลเป็นชุดๆ อย่างน้อย 10-20 ชุด โดยทำวัดข้อมูลทุกๆ 1 วินาที

3.3.1.6 การประมวลผลของข้อมูล

ทำการหาค่าสภาพการตอบสนอง sensitivity ที่ได้จากลำดับข้อมูลที่ i ได้จากสมการ

$$R_s = \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1/i \neq j}^k V_G(i)}{\sum_{i=1/i \neq j}^k [V_1(i) \cdot F_p \cos \eta(i) + V_D(i) \cdot F_D]} \quad (3.19)$$

เมื่อ R_s คือ สภาพการตอบสนอง ของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ ($\mu\text{V/W.m}^{-2}$)

- F_p คือ สภาพการตอบสนอง ของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง ($\mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
 F_D คือ สภาพการตอบสนอง ของไพราโนมิเตอร์อ้างอิง ($\mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
 V_D คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากไพราโนมิเตอร์ อ้างอิง (mV)
 V_G คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ (mV)
 V_I คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากไพร์เฮริโอมิเตอร์ อ้างอิง (mV)

จากนั้นจะใช้ค่า $R_s(j)$ ที่ได้มากำหนดช่วงข้อมูลที่ยอมรับได้โดยกำหนดว่าข้อมูล R_s ที่ยอมรับได้ต้องมีค่าอยู่ในช่วง $R_s(j) \pm 1\%$ เมื่อตัดลำดับข้อมูลหลังจากนั้นเราจะทำการคำนวณ $R_s(j)$ ใหม่ โดยใช้ข้อมูล $R(j)$ ที่ยอมรับได้เท่านั้น ทำเช่นนี้กับทุกชุดข้อมูลและหาค่า $R_s(j)$ ที่ได้จากทุกชุดข้อมูลแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย โดยค่าเฉลี่ยที่ได้นี้จะถือว่าเป็นค่าสภาพตอบสนองที่ต้องการ

3.3.2 การพัฒนาระบบสอบเทียบตามมาตรฐาน ISO 9846 แบบต่อเนื่อง

ผู้วิจัยได้จัดหาเครื่องมือต่างๆ ที่จะนำมาใช้ประกอบกันเป็นระบบสอบเทียบดังนี้

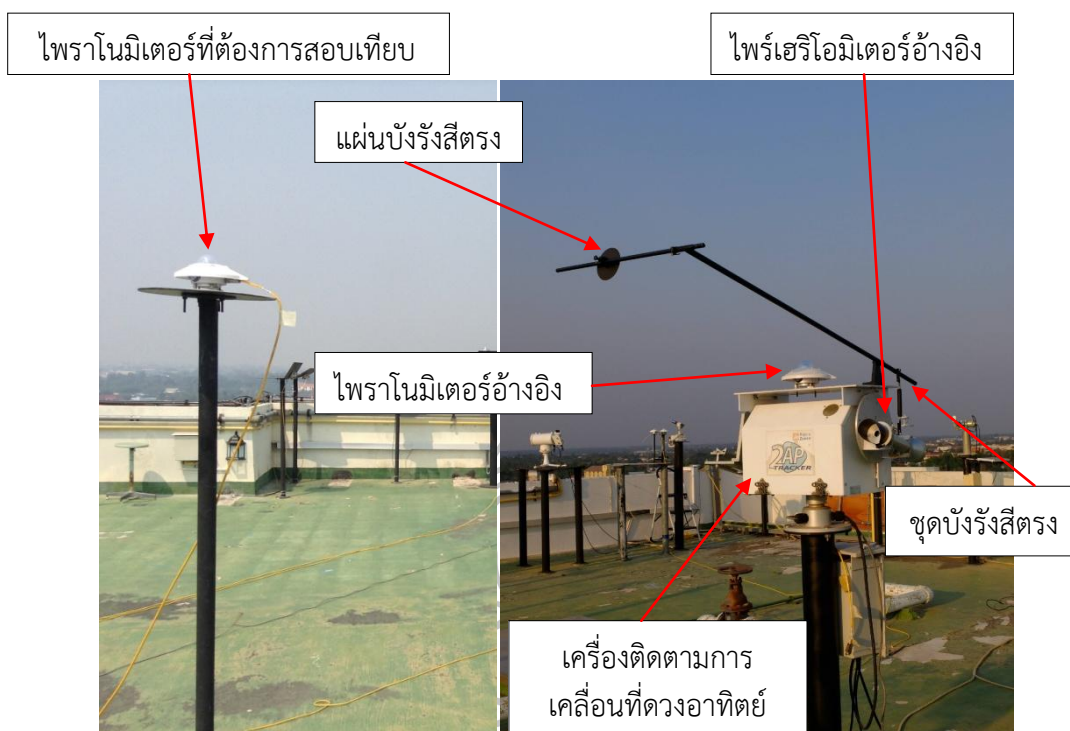
- 1) ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงเป็นเครื่อง ยี่ห้อ Eppley รุ่น sNIP serial no: 37868E6 ที่ผ่านการสอบเทียบตาม ISO 9059
- 2) ไพราโนมิเตอร์อ้างอิง ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP22 serial no: 130520 เป็นเครื่องมือที่ได้รับการสอบเทียบตาม ISO 9847 แล้ว (รูปที่ 3.28)



รูปที่ 3.28 ไพราโนมิเตอร์อ้างอิง ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP22 serial no: 130520

- 3) ชุดบั๊กรังสีตรงอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นมีรายละเอียดตามหัวข้อที่ 3.2.2
- 4) เครื่องติดตามดวงอาทิตย์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น 2AP
- 5) เครื่องบันทึกข้อมูล ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DX 2000

จากนั้นผู้วิจัยจะติดตั้งไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงและไพราโนมิเตอร์อ้างอิงพร้อมชุดบั๊กรังสีตรงบนเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ บนดาดฟ้าชั้น 11 อาคารวิทยาศาสตร์ 1 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร (รูปที่ 3.29)



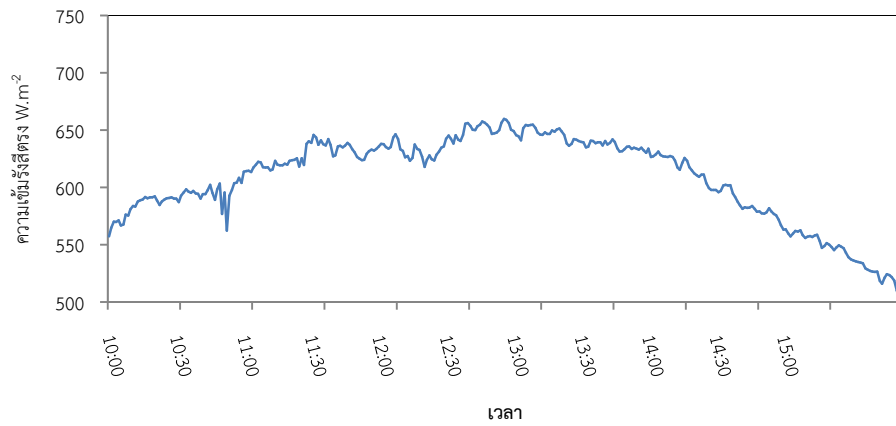
รูปที่ 3.29 ระบบสอบเทียบไพราโนมิเตอร์แบบต่อเนื่องตาม ISO 9846

3.3.3 การทดสอบสมรรถนะระบบสอบเทียบและผล

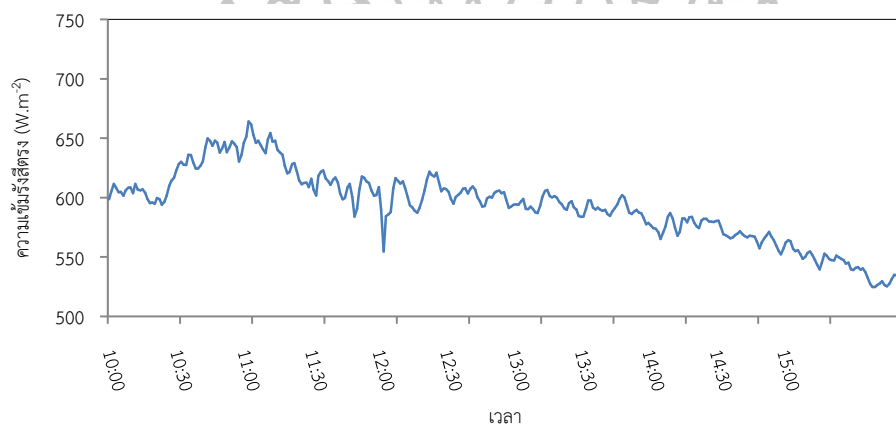
ผู้วิจัยได้ใช้ระบบที่พัฒนานั้น ทำการสอบเทียบไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 130014 และ รุ่น CMP11 serial no: 127522 ระยะเวลาของการสอบเทียบ แสดงไว้ในตารางที่ 3.15 และผลการสอบเทียบแสดงไว้ในรูปต่อไปนี้

ตารางที่ 3.15 ข้อมูลของเครื่องวัดรังสีอาทิตย์สำหรับกระบวนการสอบเทียบแบบต่อเนื่องและช่วง ระยะเวลาที่ทำการสอบเทียบ

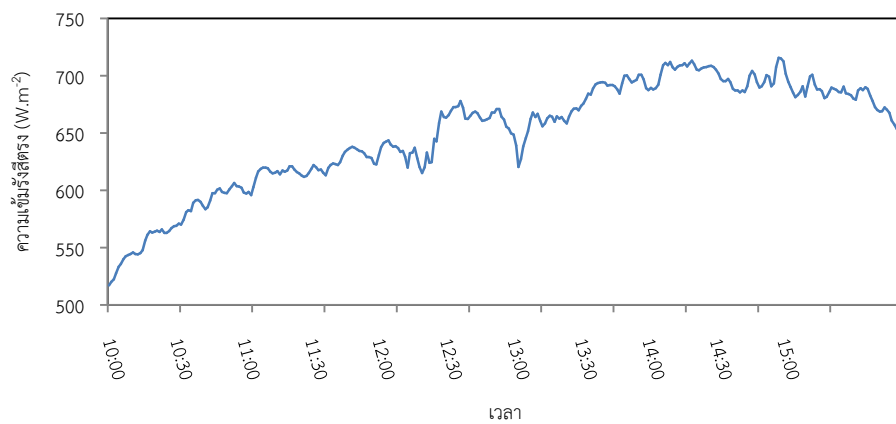
ไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ	ไพราโนมิเตอร์อ้างอิง	ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง	ช่วงระยะเวลาสอบเทียบ
Company:Kipp&Zonen Model: CMP11 Serial no: 130014	Company:Kipp&Zonen Model: CMP22 Serial no: 130520	Company: Eppley Model: sNIP Serial no: 37868E6	1-3 มีนาคม 2559
Company:Kipp&Zonen Model: CMP11 Serial no: 127522	Company:Kipp&Zonen Model: CMP22 Serial no: 130520	Company: Eppley Model: sNIP Serial no: 37868E6	1-3 มีนาคม 2559



รูปที่ 3.30 การแปรค่าความเข้มรังสีตรงจากไพร์เฮลิโอมิเตอร์ อ้างอิง ยี่ห้อ Eppler รุ่น sNIP serial no: 37868E6 จากการสอบเทียบวันที่ 5 มีนาคม 2559



รูปที่ 3.31 การแปรค่าความเข้มรังสีตรงจากไพร์เฮลิโอมิเตอร์ อ้างอิง ยี่ห้อ Eppler รุ่น sNIP serial no: 37868E6 จากการสอบเทียบวันที่ 6 มีนาคม 2559



รูปที่ 3.32 การแปรค่าความเข้มรังสีตรงจากไพร์เฮลิโอมิเตอร์ อ้างอิง ยี่ห้อ Eppler รุ่น sNIP serial no: 37868E6 จากการสอบเทียบวันที่ 7 มีนาคม 2559

หลังการนั้นผู้วิจัยได้ประเมินผลข้อมูลที่ได้ตามวิธี ISO 9846 ตามตารางที่ 3.16-3.22

ตารางที่ 3.16 ข้อมูลการสอบเทียบและค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 Serial no: 130014 จากการสอบเทียบวันที่ 5 มีนาคม 2559

จำนวนชุดข้อมูล	ศักย์ไฟฟ้าจากไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $V_G(i)$	ผลรวมศักย์ไฟฟ้าไพโรเฮริโอมิเตอร์อ้างอิงกับไพราโนมิเตอร์อ้างอิง $(V_i(i)+V_D(i))$	ค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ ($\mu V/W.m^{-2}$)
1	9.405	0.694	13.544
2	10.375	-0.766	13.549
3	11.236	0.830	13.542
4	11.828	-0.872	13.564
5	12.103	0.892	13.562
6	12.218	0.902	13.546
7	11.960	0.886	13.504
8	11.412	0.842	13.549
9	10.602	0.784	13.526
10	9.563	0.707	13.524
11	8.410	0.622	13.515
	ค่าเฉลี่ย		13.538

ตารางที่ 3.1 7 ข้อมูลการสอบเทียบและค่าสภาพการตอบสนองของ ไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 Serial no: 130014 จากการสอบเทียบวันที่ 6 มีนาคม 2559

จำนวนชุดข้อมูล	ศักย์ไฟฟ้าจากไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $V_G(i)$	ผลรวมศักย์ไฟฟ้าไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงกับไพราโนมิเตอร์อ้างอิง ($V_A(i)+V_B(i)$)	ค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ ($\mu V/W.m^{-2}$)
1	9.748	0.719	13.554
2	10.766	0.795	13.539
3	11.505	0.851	13.523
4	11.896	0.880	13.525
5	12.101	0.896	13.499
6	12.076	0.894	13.509
7	11.864	0.879	13.499
8	11.419	0.845	13.509
9	10.630	0.788	13.496
10	9.695	0.720	13.474
11	8.525	0.634	13.446
	ค่าเฉลี่ย		13.507



ตารางที่ 3.18 ข้อมูลการสอบเทียบและค่าสภาพการตอบสนองของ ไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 Serial no: 130014 จากการสอบเทียบวันที่ 7 มีนาคม 2559

จำนวนชุดข้อมูล	ศักย์ไฟฟ้าจากไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $V_G(i)$	ผลรวมศักย์ไฟฟ้าไพโรเฮริโอมิเตอร์อ้างอิงกับไพราโนมิเตอร์อ้างอิง $(V_A(i)+V_D(i))$	ค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ ($\mu V/W.m^{-2}$)
1	9.185	0.682	13.471
2	10.286	0.765	13.444
3	11.111	0.827	13.435
4	11.705	0.871	13.446
5	11.900	0.885	13.447
6	12.276	0.912	13.460
7	12.282	0.909	13.508
8	11.765	0.871	13.512
9	11.122	0.824	13.505
10	10.156	0.752	13.511
11	9.086	0.673	13.499
	ค่าเฉลี่ย		13.476

จากตารางจะได้ค่าสภาพการตอบสนองเฉลี่ยของ ไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 130014 เท่ากับ $13.507 \mu V/W.m^{-2}$

ตารางที่ 3.19 ข้อมูลการสอบเทียบและค่าค่าสภาพการตอบสนองของ ไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 Serial no: 127522 จากการสอบเทียบวันที่ 5 มีนาคม 2559

จำนวนชุด ข้อมูล	ศักย์ไฟฟ้าจาก ไพราโนมิเตอร์ที่ ต้องการสอบเทียบ $V_G(i)$	ผลรวมศักย์ไฟฟ้า ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง กับไพราโนมิเตอร์อ้างอิง $(V_V(i)+V_D(i))$	ค่าสภาพการตอบสนองของ ไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการ สอบเทียบ ($\mu V/W.m^{-2}$)
1	6.473	0.694	9.321
2	7.145	0.766	9.331
3	7.738	0.830	9.325
4	8.132	0.872	9.325
5	8.323	0.892	9.327
6	8.393	0.902	9.305
7	8.208	0.886	9.268
8	7.809	0.842	9.271
9	7.247	0.784	9.246
10	6.523	0.707	9.225
11	5.727	0.622	9.203
	ค่าเฉลี่ย		9.286



ตารางที่ 3.2 0 ข้อมูลการสอบเทียบและค่าสภาพการตอบสนองของ ไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 Serial no: 127522 จากการสอบเทียบวันที่ 6 มีนาคม 2559

จำนวนชุดข้อมูล	ศักย์ไฟฟ้าจากไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $V_G(i)$	ผลรวมศักย์ไฟฟ้าไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงกับไพราโนมิเตอร์อ้างอิง $(V_I(i)+V_D(i))$	ค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ ($\mu V/W.m^{-2}$)
1	6.710	0.719	9.330
2	7.419	0.795	9.330
3	7.920	0.851	9.308
4	8.180	0.880	9.300
5	8.320	0.896	9.281
6	8.287	0.894	9.270
7	8.130	0.879	9.250
8	7.808	0.845	9.236
9	7.258	0.788	9.215
10	6.611	0.720	9.188
11	5.800	0.634	9.148
	ค่าเฉลี่ย		9.260



ตารางที่ 3.2 1 ข้อมูลการสอบเทียบและค่าสภาพการตอบสนองของ ไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 Serial no: 127522 จากการสอบเทียบวันที่ 7 มีนาคม 2559

จำนวนชุด ข้อมูล	ศักย์ไฟฟ้าจาก ไพราโนมิเตอร์ที่ ต้องการสอบเทียบ $V_G(i)$	ผลรวมศักย์ไฟฟ้า ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง กับไพราโนมิเตอร์ อ้างอิง ($V_A(i)+V_D(i)$)	ค่าสภาพการตอบสนองของ ไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการ สอบเทียบ ($\mu V/W.m^{-2}$)
1	6.316	0.682	9.264
2	7.085	0.765	9.260
3	7.646	0.827	9.246
4	8.053	0.871	9.250
5	8.184	0.885	9.248
6	8.427	0.912	9.240
7	8.414	0.909	9.253
8	8.053	0.871	9.249
9	7.605	0.824	9.235
10	6.934	0.752	9.225
11	6.200	0.673	9.211
ค่าเฉลี่ย			9.244

จากตารางจะได้ค่าเฉลี่ยค่าสภาพการตอบสนองของ ไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 127522 เท่ากับ $9.23 \mu V/W.m^{-2}$

3.3.4 การหาค่าความไม่แน่นอนของระบบสอบเทียบไพราโนมิเตอร์โดยใช้ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงแบบต่อเนื่อง ISO 9847

ความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นในระบบสอบเทียบไพราโนมิเตอร์โดยใช้ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงแบบสลับกันบังรั้งสี่ตรงตาม ISO 9846 จะเกิดจากส่วนที่มาจาก การวัดและเครื่องมือที่ใช้ในระบบสอบเทียบ โดยสามารถแยกค่าความไม่แน่นอน ได้ตามขั้นตอนในหัวข้อที่ 3.2.4.1 สมการที่ (3.11) ดังนี้

กรณีค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดศักย์ไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ จะพิจารณาสาเหตุที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนได้จาก 4 สาเหตุ ดังนี้

- ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

$u(\delta V_{\text{globalrep}})$

- ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากความแม่นยำของระบบบันทึกข้อมูลของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $u(\delta V_{\text{globaldaq}})$

- ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $u(\delta V_{\text{globaltemp}})$

- ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าชดเชย (offset) ของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $u(\delta V_{\text{globaloffset}})$

โดยสามารถเขียนสมการการหาค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ (relative uncertainty) ได้ดังนี้

$$u(V_{\text{global}})_{\text{relative}}^2 = \left(\frac{u(\delta V_{\text{globalrep}})}{V_{\text{global}}} \right)^2 + \left(\frac{u(\delta V_{\text{globaldaq}})}{V_{\text{global}}} \right)^2 + \left(\frac{u(\delta V_{\text{globaltemp}})}{V_{\text{global}}} \right)^2 + \left(\frac{u(\delta V_{\text{globaloffset}})}{V_{\text{global}}} \right)^2 \quad (3.20)$$

เมื่อ $u(V_{\text{global}})_{\text{relative}}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ที่เกิดจากการวัดศักย์ไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

$u(\delta V_{\text{globalrep}})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

$u(\delta V_{\text{globaldaq}})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากความแม่นยำของระบบบันทึกข้อมูลของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

$u(\delta V_{\text{globaltemp}})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

$u(\delta V_{\text{globaloffset}})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าชดเชย (offset) ของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

V_{global} คือ ค่าเฉลี่ยศักย์ไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบของชุดข้อมูล
ที่ j

สำหรับค่าความไม่แน่นอนเกิดจากเครื่องวัดอ้างอิงตาม ISO 9846 นั้นแบ่งการพิจารณา 2 กรณี ดังนี้
กรณีการหาค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดซ้ำค่าศักย์ของไพร์เฮริโอมิเตอร์จะพิจารณา
สาเหตุที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนได้จาก 5 สาเหตุ ดังนี้

- ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดซ้ำค่าศักย์ไฟฟ้าของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง

$u(\delta R_{direct,calibration})$

- ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากความแม่นยำของระบบบันทึกข้อมูลของไพร์เฮริโอมิเตอร์

อ้างอิง $u(\delta V_{direct,daq})$

- ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการปรับตำแหน่งที่ผิดพลาดของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง

$u(\delta V_{direct,direction})$

- ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง

$u(\delta V_{direct,temp})$

- ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าชดเชย (offset) ของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง

$u(\delta V_{direct,offset})$

โดยสามารถเขียนได้ดังสมการการหาค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ (relative uncertainty) ได้ดังนี้

$$u(E_{direct})^2_{relative} = \left(\frac{u(\delta V_{direct,daq})}{V_{SP}(j)} \right)^2 + \left(\frac{u(\delta V_{direct,offset})}{V_{SP}(j)} \right)^2 + \left(\frac{u(\delta V_{direct,direction})}{V_{SP}(j)} \right)^2 + \left(\frac{u(\delta V_{direct,temp})}{V_{SP}(j)} \right)^2 + \left(\frac{u(\delta R_{direct,calibration})}{R_{direct}} \right)^2 \quad (3.21)$$

$$u(E_{direct})^2 = u(E_{direct})^2_{relative} \cdot E_{direct}^2 \quad (3.22)$$

เมื่อ $u(\delta R_{direct,calibration})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดซ้ำค่าศักย์ไฟฟ้าของ
ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง

$u(\delta V_{direct,daq})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากความแม่นยำของระบบบันทึกข้อมูลของ
ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง

$u(\delta V_{direct,direction})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการปรับตำแหน่งที่ผิดพลาด
ของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง

$u(\delta V_{direct,temp})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของ
ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง

$u(\delta V_{direct,offset})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าชดเชย (offset) ของ
ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง

V_{direct} คือ ค่าเฉลี่ยศักย์ไฟฟ้าของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงของชุดข้อมูลที่ j

E_{direct} คือ ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสีตรงของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงของชุดข้อมูลที่ j

กรณีค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดศักย์ไฟฟ้าของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงจะพิจารณา
สาเหตุที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนได้จาก 4 สาเหตุ ดังนี้

- ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการสอบเทียบไฟฟ้าของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง

$u(\delta R_{diffuse,calibration})$

- ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากความแม่นยำของระบบบันทึกข้อมูลของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง

$u(\delta V_{diffuse,daq})$

- ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง

$u(\delta V_{diffuse,temp})$

- ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าชดเชย (offset) ของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง $u(\delta V_{diffuse,offset})$

โดยสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$u(E_{diffuse})_{relative}^2 = \left(\frac{u(\delta V_{diffuse,daq})}{V_{SP}(j)} \right)^2 + \left(\frac{u(\delta V_{diffuse,offset})}{V_{SP}(j)} \right)^2 + \left(\frac{u(\delta V_{diffuse,temp})}{V_{SP}(j)} \right)^2 + \left(\frac{u(\delta R_{diffuse,calibration})}{R_{direct}} \right)^2 \quad (3.23)$$

$$u(E_{diffuse})^2 = u(E_{diffuse})_{relative}^2 \cdot E_{diffuse}^2 \quad (3.24)$$

เมื่อ $u(\delta R_{diffuse,calibration})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการสอบเทียบไฟฟ้าของ
ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง

$u(\delta V_{diffuse,daq})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากความแม่นยำของระบบบันทึกข้อมูลของ
ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง

$u(\delta V_{diffuse,temp})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของ
ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง

$u(\delta V_{diffuse,offset})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าชดเชย (offset) ของ
ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง

$E_{diffuse}$ คือ ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสีรวมของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงของชุดข้อมูลที่ j

เมื่อคำนวณหาผลรวมของค่าความไม่แน่นอนของข้อมูลชุดที่ j ตามสมการ(3.20),(3.21) และ (3.23) แล้ว ผู้วิจัยจะหาค่าเฉลี่ยความไม่แน่นอนของชุดข้อมูล (pool uncertainty) ได้ดังนี้

$$\left(\frac{u(R)_{\text{pool}}}{R}\right)^2 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left(\frac{u(R_s(j))}{R_s(j)}\right)^2 \quad (3.25)$$

เนื่องจากค่าสภาพการตอบสนองสุดท้ายเป็นค่าเฉลี่ยของค่าการตอบสนองของทุกชุดข้อมูล ดังนั้นจึงมีค่าความไม่แน่นอนเกิดขึ้นได้อีก ($u(S)_{\text{reproduce}}$) ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนรวมของระบบ สอบเทียบไพราโนมิเตอร์ตาม ISO 9847 สามารถสรุปดังต่อไปนี้

$$\left(\frac{u(R)}{R}\right)^2 = \left(\frac{u(R)_{\text{pool}}}{R}\right)^2 + \left(\frac{u(R)_{\text{reproduce}}}{R}\right)^2 \quad (3.2 \quad 6)$$

ตามสมการ (3.2 6) จะเห็นว่าค่าความไม่แน่นอนรวมของระบบสอบเทียบทั้งหมดนั้นเป็นผลรวมตามสมการ (3.25) และค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจาก reproduce uncertainty

3.3.4.1 การหาค่าความไม่แน่นอนของระบบสอบเทียบของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

1) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดซ้ำค่าศักย์ไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $u(\delta V_{\text{globalrep}})$

จากการหาค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 130014 ในชุดข้อมูลที่ j ซึ่งมีการวัดศักย์ไฟฟ้าจำนวน 21 ค่า ($n=21$) พบว่า ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) ของชุดข้อมูลดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 0.277 mV และมีค่าเฉลี่ยของศักย์ไฟฟ้าของชุดข้อมูลเท่ากับ 40 mV ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดซ้ำค่าศักย์ไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์ของชุดข้อมูลนี้หาได้จาก

$$\begin{aligned} u(\delta V_{\text{globalrep}}) &= \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{\text{global}}(i, j) - V_{\text{global}}(j))^2}{(n-1)}}}{\sqrt{n}} \\ &= \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \\ &= \frac{0.277 \text{ mV}}{\sqrt{21}} \\ &= 0.06 \text{ mV} \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ที่เกิดจากการวัดซ้ำค่าศักย์ไฟฟ้าของชุดข้อมูลที่ j เท่ากับ

$$\begin{aligned} u(\delta V_{globalrep})_{relative} &= \frac{0.06 \text{ mV}}{9.40 \text{ mV}} \times 100 \% \\ &= 0.643 \% \end{aligned}$$

2) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากความแม่นยำของระบบบันทึกข้อมูลของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $u(\delta V_{globaldaq})$

เนื่องจากสัญญาณของการวัดรังสีอาทิตย์ที่ได้จากไพราโนมิเตอร์จะอยู่ในรูปของศักย์ไฟฟ้า ซึ่งในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้เครื่องบันทึกข้อมูลแบบดิจิทัล ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DX 2000 ที่มีความละเอียด 0.0050% +12 หลัก

กรณีนี้ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของไพราโนมิเตอร์สามารถอ่านได้ 10 mV ดังนั้นสามารถหาค่าของช่วงกึ่งกลาง (semi-range) ได้ดังนี้

$$a = \left[\frac{0.005 \times 10 \text{ mV}}{100} + 0.012 \right] = 12.5 \mu\text{V}$$

และจะได้ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ (standard uncertainty)

$$u(\text{Daq}_{accuracy}) = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{12.5 \mu\text{V}}{\sqrt{3}} = 7.2 \mu\text{V}$$

ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ที่เกิดจากความละเอียดของการบันทึกข้อมูลสามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u(\text{Daq}_{accuracy})_{relative} &= \frac{7.2 \mu\text{V}}{10 \text{ mV}} \times 100 \% \\ &= 0.072 \% \end{aligned}$$

นอกจากนี้ จากรายละเอียดของเครื่องบันทึกข้อมูลแบบดิจิทัล พบว่าสามารถวัดศักย์ไฟฟ้าได้ 20 mV และมีค่าความไม่แน่นอน $\pm 0.0070 \text{ mV}$ ที่มีระดับความเชื่อมั่น $k = 2$ ดังนั้นสามารถคำนวณความไม่แน่นอนของเครื่องบันทึกค่าศักย์ไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} u(\text{Daq}_{calibrate}) &= \frac{0.0070 \text{ mV}}{2} \\ &= 0.0035 \text{ mV} \end{aligned}$$

และค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ในกรณีนี้หาได้จาก

$$\begin{aligned} u(\text{Daq}_{\text{calibrate}})_{\text{relative}} &= \frac{3.5 \mu\text{V}}{10 \text{ mV}} \times 100 \\ &= 0.035 \% \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์รวมที่เกิดจากระบบบันทึกข้อมูลของไพราโนมิเตอร์สามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u(\delta V_{\text{globaldaq}})_{\text{relative}} &= \sqrt{u(\text{Daq}_{\text{accuracy}})_{\text{relative}}^2 + u(\text{Daq}_{\text{calibrate}})_{\text{relative}}^2} \\ &= \sqrt{0.072^2 + 0.035^2} \\ &= 0.08 \% \end{aligned}$$

3) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $u(\delta V_{\text{globaltemp}})$

การสอบเทียบไพราโนมิเตอร์เป็นการสอบเทียบภายนอกอาคาร โดยที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อมนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาในระหว่างการสอบเทียบ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมินี้จะส่งผลกับศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ การสอบเทียบจึงต้องทำการวัดอุณหภูมิแวดล้อมระหว่างการสอบเทียบของแต่ละชุดข้อมูล เพื่อใช้ในการหาค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้ไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 13001 ซึ่งรายละเอียดของเครื่องมีดังนี้

- Sensitivity is $13.05 \mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
- Temperature error = 0.5%
- The standard uncertainty for the temperature ranges from -20°C to $+40^{\circ}\text{C}$

ซึ่งค่าความไม่แน่นอนดังกล่าวเป็นค่าที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด ทำให้สามารถหาค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} u(\delta V_{\text{globaltemp}})_{\text{relative}} &= \frac{0.5 \%}{2\sqrt{3}} \\ &= 0.144338 \% \end{aligned}$$

4) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าชดเชย (offset) ของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $u(\delta V_{\text{globaloffset}})$

ในที่นี้ค่า zero offset (type B) ของไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 130014 ที่กำหนดโดยบริษัทผู้ผลิตมี ค่าเท่ากับ $\pm 1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ดังนั้นผู้วิจัยสามารถหาของช่วงกึ่งกลางได้จาก

$$a = 1 \text{ W/m}^2 \times 13.05 \text{ } \mu\text{V/W.m}^{-2} \\ = 13.05 \text{ } \mu\text{V}$$

และได้ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์เท่ากับ

$$u(\delta V_{\text{globaloffset}}) = \frac{a}{\sqrt{3}} \\ = 7.534 \text{ } \mu\text{V}$$

ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ที่เกิดจากค่าชดเชย (offset) ของไพราโนมิเตอร์ สามารถหาได้ดังนี้

$$u(\delta V_{\text{globaloffset}})_{\text{relative}} = \frac{u(\delta V_{\text{globaloffset}})}{V_{\text{global}}(j)} \times 100\% \\ = \frac{7.534 \text{ } \mu\text{V}}{5.00 \text{ mV}} \times 100\% \\ = 0.150\%$$

3.3.4.2 การหาค่าความไม่แน่นอนของระบบสอบเทียบไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง

1) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากความแม่นยำของระบบบันทึกข้อมูลของไพร์เฮริโอมิเตอร์

อ้างอิง $u(\delta V_{\text{direct,daq}})$

เนื่องจากสัญญาณของการวัดรังสีอาทิตย์ที่ได้จากไพร์เฮริโอมิเตอร์จะอยู่ในรูปของศักย์ไฟฟ้า ซึ่งในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้เครื่องบันทึกข้อมูลแบบดิจิทัลยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DX 2000 ที่มีความละเอียด 0.0050% +12 หลัก

กรณีนี้ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของไพร์เฮริโอมิเตอร์สามารถอ่านได้ 10 mV ดังนั้นสามารถหาค่าของช่วงกึ่งกลาง (semi-range) ได้ดังนี้

$$a = \left[\frac{0.005 \times 10 \text{ mV}}{100} + 0.012 \right] = 12.5 \text{ } \mu\text{V}$$

และจะได้ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ (standard uncertainty)

$$u(\text{Daq}_{\text{accuracy}}) = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{12.5 \text{ } \mu\text{V}}{\sqrt{3}} = 7.2 \text{ } \mu\text{V}$$

ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ที่เกิดจากความละเอียดของการบันทึกข้อมูลสามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u(\text{Daq}_{\text{accuracy}})_{\text{relative}} &= \frac{7.2 \mu\text{V}}{10 \text{ mV}} \times 100 \% \\ &= 0.072 \% \end{aligned}$$

นอกจากนี้ จากรายละเอียดของเครื่องบันทึกข้อมูลแบบดิจิทัล พบว่าสามารถวัดศักย์ไฟฟ้าได้ 20 mV และมีค่าความไม่แน่นอน $\pm 0.0070 \text{ mV}$ ที่มีระดับความเชื่อมั่น $k = 2$ ดังนั้นสามารถคำนวณความไม่แน่นอนของเครื่องบันทึกค่าศักย์ไฟฟ้าของโพรเฮริโอมิเตอร์ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} u(\text{Daq}_{\text{calibrate}}) &= \frac{0.0070 \text{ mV}}{2} \\ &= 0.0035 \text{ mV} \end{aligned}$$

และค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ในกรณีนี้หาได้จาก

$$\begin{aligned} u(\text{Daq}_{\text{calibrate}})_{\text{relative}} &= \frac{3.5 \mu\text{V}}{10 \text{ mV}} \times 100 \\ &= 0.035 \% \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์รวมที่เกิดจากระบบบันทึกข้อมูลของโพรเฮริโอมิเตอร์สามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u(\delta V_{\text{direct,daq}})_{\text{relative}} &= \sqrt{u(\text{Daq}_{\text{accuracy}})_{\text{relative}}^2 + u(\text{Daq}_{\text{calibrate}})_{\text{relative}}^2} \\ &= \sqrt{0.072^2 + 0.035^2} \\ &= 0.08 \% \end{aligned}$$

3) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการปรับตำแหน่งที่ผิดพลาดของโพรเฮริโอมิเตอร์อ้างอิง

$$u(\delta V_{\text{direct,direction}})$$

ตามกระบวนการสอบเทียบ ISO 9846 นั้นจะต้องนำโพรเฮริโอมิเตอร์ติดบนเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ดวงอาทิตย์ เพื่อให้โพรเฮริโอมิเตอร์ชี้ตรงตำแหน่งดวงอาทิตย์ ซึ่งจะทำให้เกิดค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการปรับตำแหน่งขึ้นในระหว่างการสอบเทียบ โดยมีวิธีการคำนวณดังต่อไปนี้

- กรณีค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากตำแหน่งของโพรเฮริโอมิเตอร์

ในการสอบเทียบตามกระบวนการ ISO 9846 ผู้วิจัยใช้โพรเฮริโอมิเตอร์ ยี่ห้อ Eppley รุ่น sNIP serial no: 37868E6 โดยกำหนดให้โพรเฮริโอมิเตอร์มีตำแหน่งของจุดรับแสงเพียงเบนไม่เกิน

0.1 เซนติเมตร และความยาวระหว่างจุดรับแสงกับช่องที่แสงผ่านของโพสิเทรโอมิเตอร์มีเท่ากับ 10 เซนติเมตร ดังนั้นความผิดพลาดของมุมรับแสงหาได้จาก

$$\delta\theta = \arctan\left(\frac{0.1}{10}\right) = 0.57^\circ$$

และหาความผิดพลาด (error) ของแนวรับแสงของโพสิเทรโอมิเตอร์ หาได้จาก

$$\begin{aligned}\% \text{ERROR} &= (1 - \cos(\delta\theta)) \times 100 \% \\ &= 0.004999 \%\end{aligned}$$

ซึ่งทำให้ได้ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ของจุดรับแสงของโพสิเทรโอมิเตอร์ ดังนี้

$$\begin{aligned}u(\text{Tracking}_{\text{mounting}})_{\text{relative}} &= \frac{\% \text{ERROR}}{\sqrt{3}} \\ &= 0.002886 \%\end{aligned}$$

- กรณีค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการปรับตำแหน่งของเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์

ผู้วิจัยกำหนดความถูกต้องของเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ที่ 0.1 องศา ดังนั้นความผิดพลาดของตำแหน่งของเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ หาได้จาก

$$\begin{aligned}\% \text{ERROR} &= (1 - \cos(\delta\theta)) \times 100 \% \\ &= 0.00015 \%\end{aligned}$$

ทำให้ได้ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ของเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ดังนี้

$$\begin{aligned}u(\text{Tracking}_{\text{accuracy}})_{\text{relative}} &= \frac{\% \text{ERROR}}{\sqrt{3}} \\ &= 0.00009 \%\end{aligned}$$

ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ที่เกิดจากการปรับตำแหน่งที่ผิดพลาดของระบบสอบเทียบ หาได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}u(\delta V_{\text{direct, direction}})_{\text{relative}} &= \sqrt{0.002886^2 + 0.00009^2} \\ &= 0.002887 \%\end{aligned}$$

4) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง

$$u(\delta V_{\text{direct,temp}})$$

การสอบเทียบไพร์เฮริโอมิเตอร์เป็นการสอบเทียบภายนอกอาคาร โดยที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อมนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาในระหว่างการสอบเทียบ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมินี้จะส่งผลกับศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ การสอบเทียบจึงต้องทำการวัดอุณหภูมิแวดล้อมระหว่างการสอบเทียบของแต่ละชุดข้อมูล เพื่อใช้ในการหาค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้ไพร์เฮริโอมิเตอร์ ยี่ห้อ Eppley รุ่น sNIP serial no: 37868E6 ซึ่งรายละเอียดของเครื่องมีดังนี้

- Sensitivity is $8.66 \mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$

- Temperature error = 0.5%

- The standard uncertainty for the temperature ranges from -20°C to $+40^{\circ}\text{C}$

ซึ่งค่าความไม่แน่นอนดังกล่าวเป็นค่าที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด ทำให้สามารถหาค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} u(\delta V_{\text{direct,temp}})_{\text{relative}} &= \frac{0.5\%}{2\sqrt{3}} \\ &= 0.144338\% \end{aligned}$$

5) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าชดเชย (offset) ของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง

$$u(\delta V_{\text{direct,offset}})$$

ในที่นี้ค่า zero offset (type B) ของไพร์เฮริโอมิเตอร์ ยี่ห้อ Eppley รุ่น sNIP serial no: 37868E6 ที่กำหนดโดยบริษัทผู้ผลิตมีค่าเท่ากับ $\pm 1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ดังนั้นผู้วิจัยสามารถหาของช่วงกึ่งกลางได้จาก

$$\begin{aligned} a &= 1 \text{ W}/\text{m}^2 \times 8.66 \mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2} \\ &= 8.66 \mu\text{V} \end{aligned}$$

และได้ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์เท่ากับ

$$\begin{aligned} u(\delta V_{\text{direct,offset}}) &= \frac{a}{\sqrt{3}} \\ &= 4.999 \mu\text{V} \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ที่เกิดจากค่าชดเชย (offset) ของไพร์เฮริโอมิเตอร์ สามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยศักย์ไฟฟ้า ($4.5 \times 10^3 \mu\text{V}$) ดังนี้

$$\begin{aligned}
 u(\delta V_{\text{direct,offset}})_{\text{relative}} &= \frac{u(\delta V_{\text{direct,offset}})}{V_{\text{direct}}(j)} \\
 &= \frac{4.999 \mu\text{V}}{4.5 \times 10^3 \mu\text{V}} \times 100 \% \\
 &= 0.11 \%
 \end{aligned}$$

6) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าสภาพการตอบสนองของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง

$$u(\delta R_{\text{direct}})$$

ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง ยี่ห้อ Eppley รุ่น sNIP serial no: 37868E6 ซึ่งได้รับการสอบเทียบโดยใช้ไพร์เฮริโอมิเตอร์แบบ absolute cavity เป็นเครื่องวัดอ้างอิงตามวิธีการ ISO 9059 ซึ่งกล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3

- The sensitivity of sNIP, $R_{\text{direct}} = 8.66 \mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^2$

- The expanded uncertainty ($k=2$) = 1.16 %

ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนของ standard uncertainty ที่เกิดจาก sensitivity ของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง หาได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 u(S_{\text{direct,calibration}})_{\text{relative}} &= \frac{1.16\%}{2} \\
 &= 0.58 \%
 \end{aligned}$$

3.2.4.3 การหาค่าความไม่แน่นอนของระบบสอบเทียบไพราโนมิเตอร์อ้างอิง

1) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากความแม่นยำของระบบบันทึกข้อมูลของไพราโนมิเตอร์อ้างอิง

$$u(\delta V_{\text{diffusedaq}})$$

เนื่องจากสัญญาณของการวัดรังสีอาทิตย์ที่ได้จากไพราโนมิเตอร์จะอยู่ในรูปของศักย์ไฟฟ้า ซึ่งในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้เครื่องบันทึกข้อมูลแบบดิจิตอล ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DX 2000 ที่มีความละเอียด 0.0050% +12 หลัก

กรณีนี้ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของไพราโนมิเตอร์สามารถอ่านได้ 10 mV ดังนั้นสามารถหาค่าของช่วงกึ่งกลาง (semi-range) ได้ดังนี้

$$a = \left[\frac{0.005 \times 10 \text{ mV}}{100} + 0.012 \right] = 12.5 \mu\text{V}$$

และจะได้ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ (standard uncertainty)

$$u(\text{Daq}_{\text{accuracy}}) = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{12.5 \mu\text{V}}{\sqrt{3}} = 7.2 \mu\text{V}$$

ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ที่เกิดจากความละเอียดของการบันทึกข้อมูลสามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u(\text{Daq}_{\text{accuracy}})_{\text{relative}} &= \frac{7.2 \mu\text{V}}{10 \text{ mV}} \times 100 \% \\ &= 0.072 \% \end{aligned}$$

นอกจากนี้ จากรายละเอียดของเครื่องบันทึกข้อมูลแบบดิจิทัล พบว่าสามารถวัดศักย์ไฟฟ้าได้ 20 mV และมีค่าความไม่แน่นอน ± 0.0070 mV ที่มีระดับความเชื่อมั่น $k = 2$ ดังนั้นสามารถคำนวณ ความไม่แน่นอนของเครื่องบันทึกค่าศักย์ไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} u(\text{Daq}_{\text{calibrate}}) &= \frac{0.0070 \text{ mV}}{2} \\ &= 0.0035 \text{ mV} \end{aligned}$$

และค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ในกรณีนี้หาได้จาก

$$\begin{aligned} u(\text{Daq}_{\text{calibrate}})_{\text{relative}} &= \frac{3.5 \mu\text{V}}{10 \text{ mV}} \times 100 \\ &= 0.035 \% \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์รวมทั้งที่เกิดจากระบบบันทึกข้อมูลของไพราโนมิเตอร์สามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u(\delta V_{\text{diffuse,daq}})_{\text{relative}} &= \sqrt{u(\text{Daq}_{\text{accuracy}})_{\text{relative}}^2 + u(\text{Daq}_{\text{calibrate}})_{\text{relative}}^2} \\ &= \sqrt{0.072^2 + 0.035^2} \\ &= 0.08 \% \end{aligned}$$

2) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไพราโนมิเตอร์อ้างอิง

$u(\delta V_{\text{diffuse,temp}})$

การสอบเทียบไพราโนมิเตอร์เป็นการสอบเทียบภายนอกอาคาร โดยที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อมนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาในระหว่างการสอบเทียบ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมินี้จะส่งผลกับศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ การสอบเทียบจึงต้องทำการวัดอุณหภูมิแวดล้อมระหว่างการสอบเทียบของแต่ละชุดข้อมูล เพื่อใช้ในการหาค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้ไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP22 serial no: 130520 ซึ่งรายละเอียดของเครื่องมีดังนี้

- Sensitivity is $8.71 \mu\text{V/W.m}^{-2}$

- Temperature error = 0.5%
- The standard uncertainty for the temperature ranges from -20°C to $+40^{\circ}\text{C}$ ซึ่งค่าความไม่แน่นอนดังกล่าวเป็นค่าที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด ทำให้สามารถหาค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดังต่อไปนี้

$$u(\delta V_{\text{diffuse,temp}})_{\text{relative}} = \frac{0.5\%}{2\sqrt{3}}$$

$$= 0.144338\%$$

3) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าชดเชย (offset) ของไพราโนมิเตอร์อ้างอิง

$$u(\delta V_{\text{diffuse,offset}})$$

ในที่นี้ค่า zero offset (type B) ของไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP22 serial no: 130520 ที่กำหนดโดยบริษัทผู้ผลิตมี ค่าเท่ากับ $\pm 1 \text{ W.m}^{-2}$ ดังนั้นผู้วิจัยสามารถหาของช่วงกึ่งกลางได้จาก

$$a = 1 \text{ W.m}^{-2} \times 8.71 \mu\text{V/W.m}^{-2}$$

$$= 8.71 \mu\text{V}$$

และได้ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์เท่ากับ

$$u(\delta V_{\text{diffuse,offset}}) = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

$$= 5.028 \mu\text{V}$$

ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ที่เกิดจากค่าชดเชย (offset) ของไพราโนมิเตอร์ สามารถหาได้ตั้งจากค่าเฉลี่ยของศักย์ไฟฟ้า ($4.5 \times 10^3 \mu\text{V}$) นี้

$$u(\delta V_{\text{diffuse,offset}})_{\text{relative}} = \frac{u(\delta V_{\text{diffuse,offset}})}{V_{\text{diffuse}}(j)}$$

$$= \frac{5.028 \mu\text{V}}{4.5 \times 10^3 \mu\text{V}} \times 100\%$$

$$= 0.11\%$$

4) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์อ้างอิง
 $u(\delta R_{diffuse})$

ไพราโนมิเตอร์อ้างอิง ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP22 serial no: 130520 ซึ่งได้รับการสอบเทียบโดยใช้ไพร์เฮริโอมิเตอร์ ยี่ห้อ Eppley รุ่น sNIP serial no: 37868E6 เป็นเครื่องวัดอ้างอิงตามวิธีการ ISO 9059 ซึ่งกล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3

- The sensitivity of sNIP, $R_{diffuse} = 8.66 \mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$

- The expanded uncertainty (k=2) = 1.16 %

ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนของ standard uncertainty ที่เกิดจาก sensitivity ของไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง หาได้ดังต่อไปนี้

$$u(S_{diffuse,calibration})_{relative} = \frac{1.16\%}{2} = 0.58\%$$

3.2.4.4 ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการหาค่าสภาพการตอบสนองซ้ำ (reproduce)

ในการหาค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 130014 ที่ได้จากค่าเฉลี่ยของการสอบเทียบชุดข้อมูลที่ j ซึ่งผู้วิจัยได้ข้อมูลค่าสภาพการตอบสนองทั้งหมดจำนวน 11 ค่า ($n=11$) ทำให้ได้ค่าสภาพการตอบสนองของไพร์เฮริโอมิเตอร์เฉลี่ยเท่ากับ $13.54 \mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) เท่ากับ $0.019 \mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ดังนั้นความไม่แน่นอนที่เกิดจากการสอบเทียบหาได้จาก

$$u(\delta S_{globalrep}) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{0.019 \mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}}{\sqrt{11}} = 0.005 \mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$$

ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์จากการหาค่าสภาพการตอบสนองซ้ำหาได้ดังนี้

$$u(\delta S_{globalrep})_{relative} = \frac{0.005 \mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}}{13.54 \mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}} \times 100\% = 0.036\%$$

จากการคำนวณค่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการหาค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 130014 ดังที่กล่าวมา พบว่าระบบสอบเทียบให้ผลการสอบเทียบที่มีค่าความไม่แน่นอนเท่ากับ 1.34 % และไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 127522 มีค่าความไม่แน่นอนเท่ากับ 1.61 %

3.4 ระบบสอบเทียบไพราโนมิเตอร์มิเตอร์ที่ใช้ภาคสนามโดยใช้ไพราโนมิเตอร์อ้างอิงเป็นมาตรฐาน ISO 9847

3.4.1 ข้อกำหนด ISO

3.4.1.1 เครื่องมือ ISO กำหนดให้ไพรามิเตอร์อ้างอิงต้องได้รับการสอบเทียบตามมาตรฐาน ISO 9846 และไพราโนมิเตอร์ที่ใช้งานภาคสนามจะต้องอยู่ในลำดับชั้นที่ต่ำกว่าหรือลำดับชั้นเดียวกับไพราโนมิเตอร์อ้างอิง

3.4.1.2 แหล่งกำเนิดรังสี (radiation source) ต้องทำการสอบเทียบโดยใช้รังสีอาทิติย์ที่เป็นความเข้มรังสีรวมที่ตกกระทบกับไพราโนมิเตอร์มากกว่า 100 W.m^{-2}

3.4.1.3 สภาพแวดล้อมทางอุณหภูมิวิทยา

ก) กรณีสภาพห้องฟ้าที่ปราศจากเมฆ มุมเงยดวงอาทิตย์ในขณะทำการสอบเทียบต้องไม่น้อยกว่า 20 องศา

ข) กรณีสภาพห้องฟ้าที่มีเมฆบางส่วน มุมเงยดวงอาทิตย์ในขณะทำการสอบเทียบต้องมากกว่า 20 องศา

3.4.1.4 การติดตั้งเครื่องมือ ไพราโนมิเตอร์อ้างอิงและไพราโนมิเตอร์ภาคสนามที่ต้องการสอบเทียบต้องติดตั้งบนพื้นราบ และระยะห่างระหว่างไพราโนมิเตอร์อ้างอิงกับไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบต้องไม่เกิน 4 เมตร

3.4.1.5 การเก็บข้อมูล ISO 9847 กำหนดให้เก็บข้อมูลเป็นชุดๆ แบ่งตามสภาพห้องฟ้าระหว่างทำการสอบเทียบไพราโนมิเตอร์ภายนอกอาคาร ดังนี้

ก)) สอบเทียบไพราโนมิเตอร์บนระนาบในแนวระดับ ในสภาพห้องฟ้าที่ปราศจากเมฆ กำหนดให้เก็บข้อมูลเป็นชุดๆ แต่ละชุดใช้เวลา 10-20 นาที โดยในชุดหนึ่งๆ ต้องเก็บข้อมูลอย่างน้อย 20 ค่า ควรสอบเทียบอย่างน้อย 2-3 วัน

ข)) สอบเทียบไพราโนมิเตอร์บนระนาบในแนวระดับ ในสภาพห้องฟ้าที่มีเมฆบางส่วน กำหนดให้เก็บข้อมูลเป็นชุดๆ แต่ละชุดใช้เวลา 1-5 นาที ระหว่างการบันทึกข้อมูลในแต่ละชุด เมฆควรอยู่ห่างจากดวงอาทิตย์มากกว่า 30 องศา และควรสอบเทียบอย่างน้อย 5 วัน

ค) สอบเทียบไพราโนมิเตอร์บนระนาบในแนวระดับ ในสภาพห้องฟ้าที่มีเมฆปกคลุมทั้งหมดกำหนดให้เก็บข้อมูลเป็นชุดๆ แต่ละชุดใช้เวลา 1 ชั่วโมง ระหว่างการบันทึกข้อมูลในแต่ละชุด ความเข้มรังสีอาทิติย์จากไพราโนมิเตอร์นั้นต้องมากกว่าหรือเท่า 100 W.m^{-2} และควรสอบเทียบอย่างน้อย 10 วัน

3.4.1.6 การประมวลผลของข้อมูล

ค่าแฟคเตอร์ของการสอบเทียบ (calibratio factor) หรือค่าสภาพการตอบสนอง (responivity) จากชุดข้อมูล j และลำดับข้อมูล i สามารถหาได้จากสมการ

$$F(i, j) = \frac{V_R(i, j)}{V_F(i, j)} F_R \quad (3.27)$$

เมื่อ $F(i, j)$ คือ แฟคเตอร์ของการสอบเทียบจากชุดข้อมูล j ลำดับ i ($\text{W.m}^{-2}/\mu\text{V}$)

$V_R(i, j)$ คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากไพราโนมิเตอร์อ้างอิง (mV)

$V_F(i, j)$ คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ (mV)

F_R คือ ค่าสภาพตอบสนองของการสอบเทียบของไพราโนมิเตอร์อ้างอิง ($W \cdot m^{-2} / \mu V$)

ทำการคำนวณ $F(i, j)$ ของทุกลำดับข้อมูลในชุดข้อมูล j ตามสมการ (3.27) และหาค่าเฉลี่ยของสภาพการตอบสนองที่ได้จากทุกลำดับข้อมูลในชุดข้อมูล j ($F(j)$) จากสมการ

$$F(j) = \frac{F_R \sum_{i=1}^n V_R(i, j)}{\sum_{i=1}^n V_F(i, j)} \quad (3.28)$$

จากนั้นจะใช้ค่า $F(j)$ ที่ได้มากำหนดช่วงข้อมูลที่ยอมรับได้โดยกำหนดว่าข้อมูล $F(i, j)$ ที่ยอมรับได้ต้องมีค่าอยู่ในช่วง $F(j) \pm 2\%$ หลังจากนั้นเราจะทำการคำนวณ $F(j)$ ใหม่ โดยใช้ข้อมูล $F(j)$ ที่ยอมรับได้เท่านั้น ทำเช่นนี้กับทุกชุดข้อมูลและหาค่า $F(j)$ ที่ได้จากทุกชุดข้อมูลแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย โดยค่าเฉลี่ยที่ได้นี้จะถือว่าเป็นค่าสภาพตอบสนองที่ต้องการ อย่างไรก็ตาม บางครั้งอาจทำการหาค่าสภาพการตอบสนองในรูปของ sensitivity จึงหาได้จาก

$$S(i, j) = \frac{V_{FP}(i, j)}{E_{SP}(i, j)} \quad (3.29)$$

และมีหน่วยเป็น ($mV/W \cdot m^{-2}$)

3.4.2 การพัฒนาระบบสอบเทียบตามมาตรฐาน ISO 9847

ผู้วิจัยได้จัดหาเครื่องมือต่างๆ เพื่อนำมาทดสอบระบบสอบเทียบตามมาตรฐาน ISO 9847 ดังนี้

- 1) ไพราโนมิเตอร์ที่จะนำมาเป็นเครื่องมาตรฐาน ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP 11 serial no: 130014 (รูปที่ 3.33)
- 2) เครื่องบันทึกสัญญาณ จะใช้เครื่อง ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DX 2000 มีคุณสมบัติตามที่ ISO กำหนด
- 3) กล้องถ่ายภาพห้องฟ้า (ใช้ร่วมกับระบบสอบเทียบที่ ISO 9847) ในหัวข้อที่ 3.2
- 4) เครื่องตรวจอากาศอัตโนมัติ (ใช้ร่วมกับระบบสอบเทียบที่ ISO 9847) ในหัวข้อที่ 3.2

3.2

หลังจากที่ได้เครื่องมือที่จำเป็นต่อระบบการสอบเทียบดังกล่าว ผู้วิจัยได้ติดตั้งไพราโนมิเตอร์อ้างอิงบนเสาโลหะสูง 1.5 เมตร บนตาดฟ้าชั้น 11 อาคารวิทยาศาสตร์ 1 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร



รูปที่ 3.34 ไพรานมิเตอร์มิเตอร์อ้างอิง ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 130014

3.4.3 การทดสอบสมรรถนะของระบบสอบเทียบ

3.4.3.1 การทดสอบสมรรถนะของระบบสอบเทียบกรณีห้องฟ้าปราศจากเมฆ

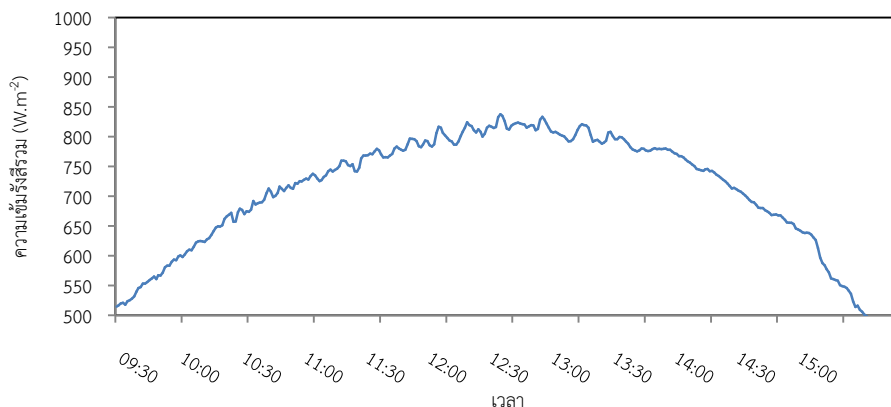
ผู้วิจัยจะทำการสอบเทียบไพรานมิเตอร์จำนวน 5 เครื่อง โดยวางไพรานมิเตอร์ดังกล่าวบนแท่นวาง (รูปที่ 3.35) ซึ่งอยู่บนที่โล่งแจ้งใกล้กับไพรานมิเตอร์อ้างอิง และต่อสายสัญญาณไฟฟ้าของไพรานมิเตอร์ทุกเครื่องเข้ากับเครื่องบันทึกสัญญาณ จากนั้นทำการเก็บข้อมูลตามข้อกำหนด ISO 9847 รายละเอียดเครื่องมือและช่วงเวลาสอบเทียบแสดงได้ในตารางที่ 3.23 และผลการสอบเทียบแสดงในรูปที่ 3.36-3.45



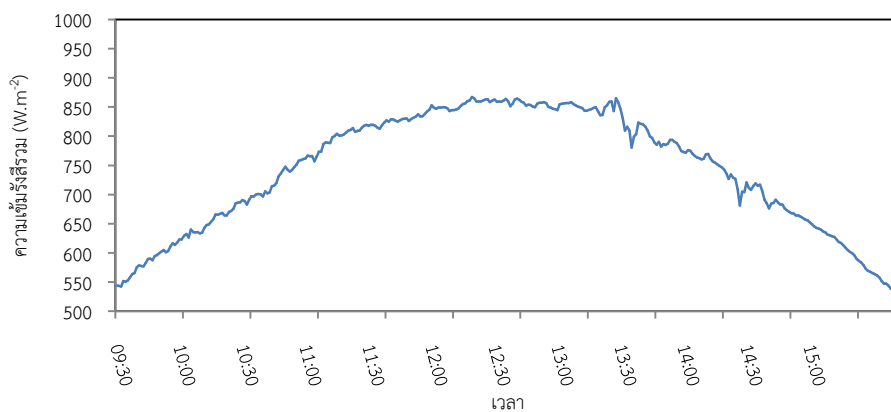
รูปที่ 3.35 การติดตั้งไพรานมิเตอร์ที่จะทำการสอบเทียบ

ตารางที่ 3.2.3 รายละเอียด ของไพราโนมิเตอร์ อ่างอิงและไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบรวมถึง ช่วงเวลาที่สอบเทียบสำหรับ การสอบเทียบบนพื้นราบภายนอกอาคารและช่วงเวลาที่ ทำการสอบเทียบ

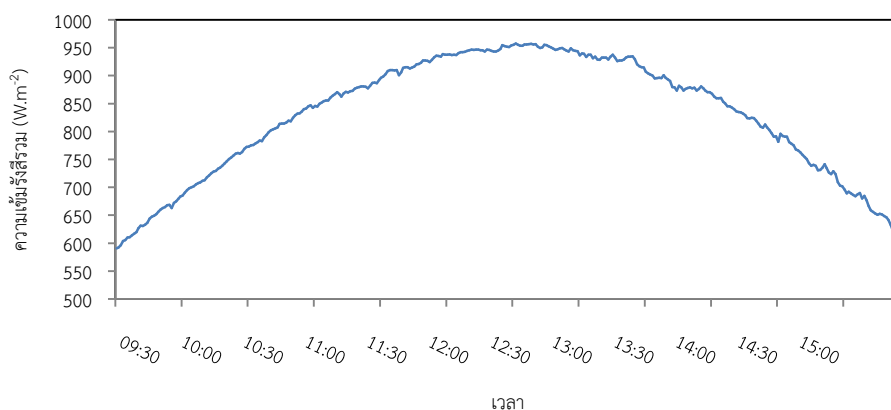
ไพราโนมิเตอร์ ที่ต้องการสอบเทียบ	ไพราโนมิเตอร์อ้างอิง	ช่วงระยะเวลา สอบเทียบ
Model: CMP11 Serial no: 080196 Company: Kipp&Zonen	Model: CMP11 Serial no: 130014 Sensitivity:13.05 $\mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ Company: Kipp&Zonen	4-5 มกราคม 2559 1-3 มีนาคม 2559 4-6 มีนาคม 2559 13-14 มีนาคม 2559
Model: CMP11 Serial no: 080199 Company: Kipp&Zonen	Model: CMP11 Serial no: 130014 Sensitivity:13.05 $\mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ Company: Kipp&Zonen	4-5 มกราคม 2559 1-3 มีนาคม 2559 4-6 มีนาคม 2559 13-14 มีนาคม 2559
Model: CMP11 Serial no: 080634 Company: Kipp&Zonen	Model: CMP11 Serial no: 130014 Sensitivity:13.05 $\mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ Company: Kipp&Zonen	4-5 มกราคม 2559 1-3 มีนาคม 2559 4-6 มีนาคม 2559 13-14 มีนาคม 2559
Model: CMP11 Serial no: 127522 Company: Kipp&Zonen	Model: CMP11 Serial no: 130014 Sensitivity:13.05 $\mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ Company: Kipp&Zonen	4-5 มกราคม 2559 1-3 มีนาคม 2559 4-6 มีนาคม 2559 13-14 มีนาคม 2559
Model: CMP11 Serial no: 152219 Company: Kipp&Zonen	Model: CMP11 Serial no: 130014 Sensitivity:13.05 $\mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ Company: Kipp&Zonen	4-5 มกราคม 2559 1-3 มีนาคม 2559 4-6 มีนาคม 2559 13-14 มีนาคม 2559



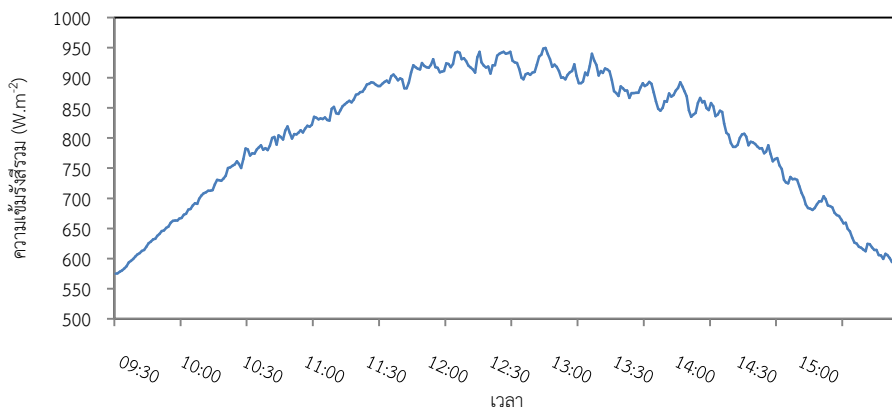
รูปที่ 3.36 การแปรค่าความเข้มรังสีรวมจากไพราโนมิเตอร์อ้างอิง ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 130014 จากการสอบเทียบวันที่ 4 มกราคม 2559



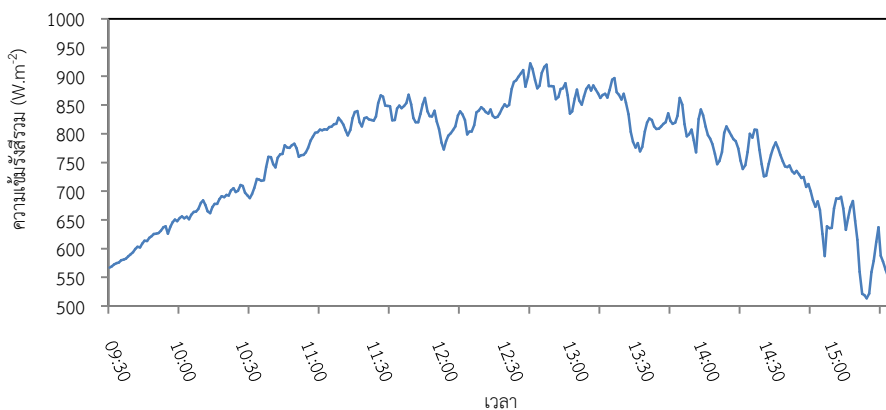
รูปที่ 3.37 การแปรค่าความเข้มรังสีรวมจากไพราโนมิเตอร์อ้างอิง ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 130014 จากการสอบเทียบวันที่ 5 มกราคม 2559



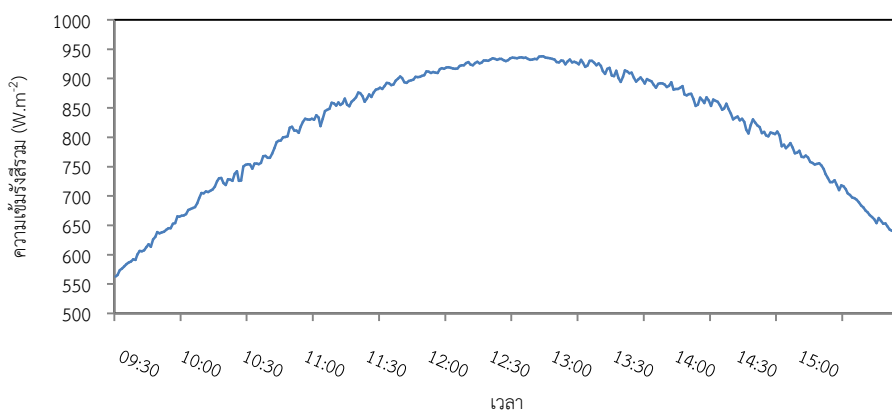
รูปที่ 3.38 การแปรค่าความเข้มรังสีรวมจากไพราโนมิเตอร์อ้างอิง ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 130014 จากการสอบเทียบวันที่ 1 มีนาคม 2559



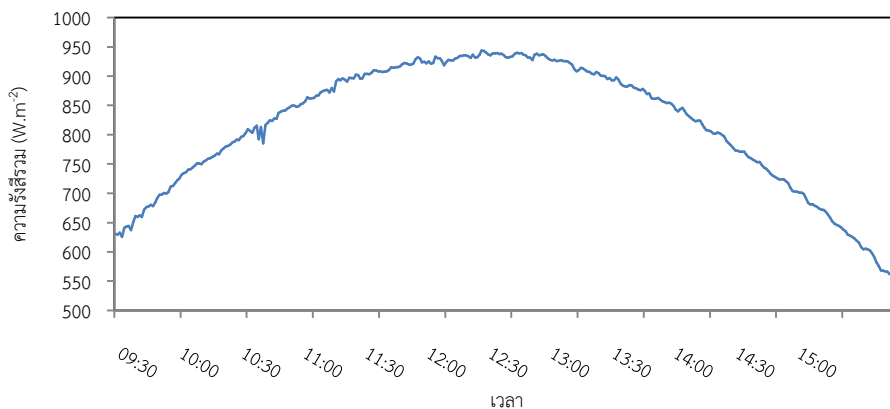
รูปที่ 3.39 การแปรค่าความเข้มรังสีรวมจากไพราโนมิเตอร์อ้างอิง ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 130014 จากการสอบเทียบวันที่ 2 มีนาคม 2559



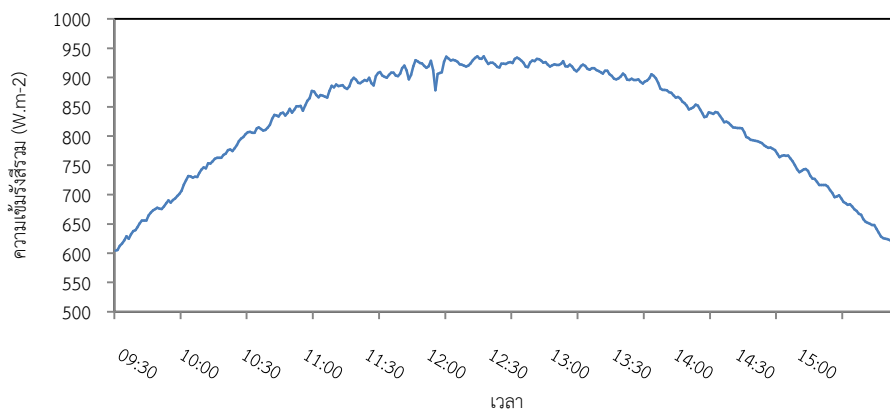
รูปที่ 3.40 การแปรค่าความเข้มรังสีรวมจากไพราโนมิเตอร์อ้างอิง ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 130014 จากการสอบเทียบวันที่ 3 มีนาคม 2559



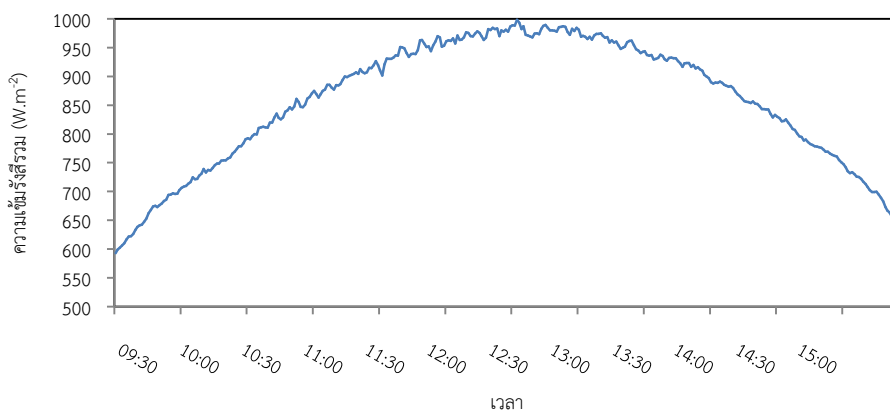
รูปที่ 3.41 การแปรค่าความเข้มรังสีรวมจากไพราโนมิเตอร์อ้างอิง ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 130014 จากการสอบเทียบวันที่ 4 มีนาคม 2559



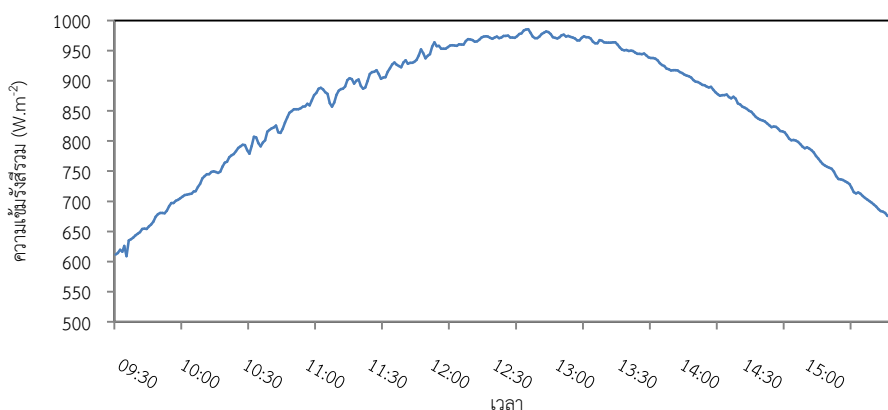
รูปที่ 3.42 การแปลค่าความเข้มรังสีรวมจากไพราโนมิเตอร์อ้างอิง ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 130014 จากการสอบเทียบวันที่ 5 มีนาคม 2559



รูปที่ 3.43 การแปลค่าความเข้มรังสีรวมจากไพราโนมิเตอร์อ้างอิง ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 130014 จากการสอบเทียบวันที่ 6 มีนาคม 2559



รูปที่ 3.44 การแปลค่าความเข้มรังสีรวมจากไพราโนมิเตอร์อ้างอิง ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 130014 จากการสอบเทียบวันที่ 13 มีนาคม 2559



รูปที่ 3.45 การแปลค่าความเข้มรังสีรวมจากไพราโนมิเตอร์อ้างอิง ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 130014 จากการสอบเทียบวันที่ 14 มีนาคม 2559

หลังจากได้ข้อมูลแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการประเมินผลตามข้อกำหนด ISO 9847 ซึ่งผลที่ได้ตามตารางที่ 3.24-3.37

ตารางที่ 3.24 ค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP 11 Serial no: 080196

ว/ด/ป	จำนวนชุดข้อมูล	ค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ ($\mu\text{V}/\text{W.m}^2$)
1/03/2016	12	8.9366
02/03/2016	12	8.9206
03/03/2016	12	8.9286
4/03/2016	12	8.9047
5/03/2016	12	8.9127
6/03/2016	12	8.9047
4/01/2016	12	8.7796
5/01/2016	12	8.7566
13/03/2016	12	8.9047
14/03/2016	12	8.9127
ค่าเฉลี่ย		8.8731

ตารางที่ 3.25 ค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP 11 Serial no: 080199

ว/ด/ป	จำนวนชุดข้อมูล	ค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ ($\mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
1/03/2016	12	8.4388
02/03/2016	12	8.4746
03/03/2016	12	8.4674
4/03/2016	12	8.4674
5/03/2016	12	8.4746
6/03/2016	12	8.4531
4/01/2016	12	8.2440
5/01/2016	12	8.2645
13/03/2016	12	8.4674
14/03/2016	12	8.4746
ค่าเฉลี่ย		8.4246

ตารางที่ 3.26 ค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP 11 Serial no: 080634

ว/ด/ป	จำนวนชุดข้อมูล	ค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ ($\mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
1/03/2016	12	7.2359
02/03/2016	12	7.3368
03/03/2016	12	7.3855
4/03/2016	12	7.2727
5/03/2016	12	7.2886
6/03/2016	12	7.2674
4/01/2016	12	7.3260
5/01/2016	12	7.2886
13/03/2016	12	8.4674
14/03/2016	12	7.3584
ค่าเฉลี่ย		7.4349

ตารางที่ 3.27 ค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP 11 Serial no: 127522

ว/ด/ป	จำนวนชุดข้อมูล	ค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ ($\mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
1/03/2016	12	8.9526
02/03/2016	12	8.9445
03/03/2016	12	8.9526
4/03/2016	12	8.9526
5/03/2016	12	8.9526
6/03/2016	12	8.9526
4/01/2016	12	8.7642
5/01/2016	12	8.7108
13/03/2016	12	8.9606
14/03/2016	12	8.9606
ค่าเฉลี่ย		8.8968

ตารางที่ 3.28 ค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP 11 Serial no: 152219

ว/ด/ป	จำนวนชุดข้อมูล	ค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ ($\mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
1/03/2016	12	9.2421
02/03/2016	12	9.2507
03/03/2016	12	9.2421
4/03/2016	12	9.2507
5/03/2016	12	9.2421
6/03/2016	12	9.2507
4/01/2016	12	9.1575
5/01/2016	12	9.1575
13/03/2016	12	9.2507
14/03/2016	12	9.2593
ค่าเฉลี่ย		9.2251

3.4.3.2 การทดสอบสมรรถนะของระบบสอบเทียบกรณีห้องฟามีเมฆบางส่วน

ผู้วิจัยจะทำการสอบเทียบไพราโนมิเตอร์จำนวน 5 เครื่อง โดยวางไพรามิเตอร์ดังกล่าวบนแท่นวาง (รูปที่ 3.35) ซึ่งอยู่บนที่โล่งแจ้งใกล้กับไพราโนมิเตอร์อ้างอิง และต่อสายสัญญาณไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์ทุกเครื่องเข้ากับเครื่องบันทึกสัญญาณ จากนั้นทำการเก็บข้อมูลตามข้อกำหนด ISO 9847 รายละเอียดเครื่องมือและช่วงเวลาสอบเทียบแสดงได้ในตารางที่ 3.23 และผลการสอบเทียบแสดงในรูปที่ 3.36-3.45

ตารางที่ 3. 29 แสดงการคำนวณค่าสภาพการตอบสนองของเครื่องวัดไพราโนมิเตอร์ Kipp&Zonen รุ่น CMP 11 Serial no: 080196

ยี่ห้อ

ว/ด/ป	จำนวนชุดข้อมูล	ค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ ($\mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
7/03/2016	42	8.9206
8/03/2016	24	8.9127
9/03/2016	17	8.9047
11/03/2016	42	8.9047
12/03/2016	28	8.8968
14/10/2015	5	8.9366
15/10/2015	14	8.8968
16/10/2015	11	8.9127
17/10/2015	14	8.9366
18/10/2015	7	8.9286
ค่าเฉลี่ย		8.9151

ตารางที่ 3. 30 แสดงการคำนวณค่าสภาพการตอบสนองของเครื่องวัดไพราโนมิเตอร์ Kipp&Zonen รุ่น CMP 11 Serial no: 080199

ยี่ห้อ

ว/ด/ป	จำนวนชุดข้อมูล	ค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ ($\mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
7/03/2016	42	8.4746
8/03/2016	24	8.4602
9/03/2016	17	8.4746
11/03/2016	42	8.4674
12/03/2016	28	8.4602
14/10/2015	5	8.5251
15/10/2015	14	8.4746
16/10/2015	11	8.4890
17/10/2015	14	8.5179
18/10/2015	7	8.4962
ค่าเฉลี่ย		8.4840

ตารางที่ 3. 31 แสดงการคำนวณค่าสภาพการตอบสนองของเครื่องวัดไพราโนมิเตอร์ Kipp&Zonen รุ่น CMP 11 Serial no: 080634

ยี่ห้อ

ว/ด/ป	จำนวนชุดข้อมูล	ค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ ($\mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
7/03/2016	42	7.4074
8/03/2016	24	7.3638
9/03/2016	17	7.3475
11/03/2016	42	7.2993
12/03/2016	28	7.2307
14/10/2015	5	7.3046
15/10/2015	14	7.3529
16/10/2015	11	7.3801
17/10/2015	14	7.4294
18/10/2015	7	7.4460
ค่าเฉลี่ย		7.3562

ตารางที่ 3.32 แสดงการคำนวณค่าสภาพการตอบสนองของเครื่องวัดไพราโนมิเตอร์ Kipp&Zonen รุ่น CMP 11 Serial no: 127522

ยี่ห้อ

ว/ด/ป	จำนวนชุดข้อมูล	ค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ ($\mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
7/03/2016	42	8.9526
8/03/2016	24	8.9606
9/03/2016	17	8.9286
11/03/2016	42	8.9526
12/03/2016	28	8.9526
14/10/2015	5	8.9686
15/10/2015	14	8.9445
16/10/2015	11	8.9445
17/10/2015	14	8.9606
18/10/2015	7	8.9526
ค่าเฉลี่ย		8.9518

ตารางที่ 3.33 แสดงการคำนวณค่าสภาพการตอบสนองของเครื่องวัดไพราโนมิเตอร์ Kipp&Zonen รุ่น CMP 11 Serial no: 152219

ยี่ห้อ

ว/ด/ป	จำนวนชุดข้อมูล	ค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ ($\mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
7/03/2016	42	9.2678
8/03/2016	24	9.2678
9/03/2016	17	9.2336
11/03/2016	42	9.2593
12/03/2016	28	9.2507
14/10/2015	5	9.3023
15/10/2015	14	9.2764
16/10/2015	11	9.2764
17/10/2015	14	9.2937
18/10/2015	7	9.2678
ค่าเฉลี่ย		9.2696

3.4.4 การหาค่าความไม่แน่นอนของระบบสอบเทียบ ไพราโนมิเตอร์มิเตอร์ที่ใช้ภาคสนาม โดยใช้ไพราโนมิเตอร์อ้างอิง

เนื่องจากค่าสภาพการตอบสนองของไพโรเฮริโอมิเตอร์ที่ได้จากระบบสอบเทียบที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นตามระบบ ISO 9847 สามารถเกิดความคลาดเคลื่อนในกระบวนการสอบเทียบ ซึ่งอาจเกิดจากอุปกรณ์ที่จัดเตรียมขึ้นและเกิดจากขั้นตอนการสอบเทียบ ปัจจัยต่างๆ เหล่านี้เป็นสาเหตุของการเกิดความไม่แน่นอนของค่าสภาพการตอบสนอง ผู้วิจัยจึงแบ่งสาเหตุความไม่แน่นอนเป็นสองส่วนหลักๆ คือ ความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของเครื่องวัดที่ต้องการสอบเทียบ และความไม่แน่นอนที่เกิดจากความเข้มรังสีตรงจากเครื่องวัดอ้างอิงหรือเขียนในรูปของสมการได้ ดังนี้

$$\left(\frac{u(S_j)}{S_j}\right)^2 = \left(\frac{u(V_{FP}(j))}{V_{FP}(j)}\right)^2 + \left(\frac{u(V_{SP}(j))}{V_{SP}(j)}\right)^2 + \left(\frac{u(S_{SP,Calibration})}{S_{SP}}\right)^2 \quad (3.30)$$

- เมื่อ $u(S_j)$ คือ ค่าความไม่แน่นอนของค่าสภาพการตอบสนองของชุดข้อมูลที่ j
 S_j คือ ค่าสภาพการตอบสนองของชุดข้อมูลที่ j
 $u(V_{FP}(j))$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากศักย์ไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบชุดที่ j
 $u(E_{SP}(j))$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากความเข้มรังสีตรงของไพราโนมิเตอร์อ้างอิงชุดที่ j
 $V_{FP}(j)$ คือ ศักย์ไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบชุดที่ j
 $E_{SP}(j)$ คือ ความเข้มรังสีตรงของไพราโนมิเตอร์อ้างอิงชุดที่ j

จากการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของชุดที่ j ตามสมการ (3.30) สามารถพิจารณาสาเหตุย่อยๆ ของแต่ละกรณี ได้ดังนี้

กรณีค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ จะพิจารณาสาเหตุที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนได้จาก 5 สาเหตุ ดังนี้

- ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $u(\delta V_{FP,rep})$
- ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากความแม่นยำของระบบบันทึกข้อมูลของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $u(\delta V_{FP,daq})$
- ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการปรับตำแหน่งที่ผิดพลาดของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $u(\delta V_{FP,direction})$
- ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $u(\delta V_{FP,temp})$
- ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าชดเชย (offset) ของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $u(\delta V_{FP,offset})$

โดยสามารถเขียนสมการการหาค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ ได้ดังนี้

$$u(V_{FP}(j))_{relative}^2 = \left(\frac{u(\delta V_{FP,rep})}{V_{FP}(j)} \right)^2 + \left(\frac{u(\delta V_{FP,daq})}{V_{FP}(j)} \right)^2 + \left(\frac{u(\delta V_{FP,cosine})}{V_{FP}(j)} \right)^2 + \left(\frac{u(\delta V_{FP,temp})}{V_{FP}(j)} \right)^2 + \left(\frac{u(\delta V_{FP,offset})}{V_{FP}(j)} \right)^2 \quad (3.31)$$

- เมื่อ $u(V_{FP}(j))_{relative}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ที่เกิดจากการศัลยกรรมไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ
- $u(\delta V_{FP,rep})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดซ้ำค่าศัลยกรรมไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ
- $u(\delta V_{FP,daq})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากความแม่นยำของระบบบันทึกข้อมูลของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ
- $u(\delta V_{FP,cosine})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากมุมตกกระทบของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ
- $u(\delta V_{FP,temp})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ
- $u(\delta V_{FP,offset})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าชดเชย (offset) ของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ
- $V_{FP}(j)$ คือ ค่าเฉลี่ยศัลยกรรมไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบของชุดข้อมูลที่ j

กรณีค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดศัลยกรรมไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์อ้างอิง จะพิจารณาสาเหตุที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนได้จาก 5 สาเหตุ ดังนี้

- ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดซ้ำค่าศัลยกรรมไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์อ้างอิง $u(\delta V_{SP,rep})$
- ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากความแม่นยำของระบบบันทึกข้อมูลของไพราโนมิเตอร์อ้างอิง $u(\delta V_{SP,daq})$
- ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากมุมตกกระทบไพราโนมิเตอร์อ้างอิง $u(\delta V_{SP,cosine})$
- ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไพราโนมิเตอร์อ้างอิง $u(\delta V_{SP,temp})$
- ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าชดเชย (offset) ของไพราโนมิเตอร์อ้างอิง $u(\delta V_{SP,offset})$

โดยสามารถเขียนการคำนวณได้ดังสมการ

$$u(V_{SP}(j))_{relative}^2 = \left(\frac{u(\delta V_{SP,rep})}{V_{SP}(j)} \right)^2 + \left(\frac{u(\delta V_{SP,daq})}{V_{SP}(j)} \right)^2 + \left(\frac{u(\delta V_{SP,cosine})}{V_{SP}(j)} \right)^2 + \left(\frac{u(\delta V_{SP,temp})}{V_{SP}(j)} \right)^2 + \left(\frac{u(\delta V_{SP,offset})}{V_{SP}(j)} \right)^2 \quad (3.32)$$

- เมื่อ $u(V_{SP}(j))_{relative}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ที่เกิดจากการค้ำยไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์อ้างอิง
- $u(\delta V_{SP,rep})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดค่าค้ำยไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์อ้างอิง
- $u(\delta V_{SP,daq})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากความแม่นยำของระบบบันทึกข้อมูลของไพราโนมิเตอร์อ้างอิง
- $u(\delta V_{SP,cosine})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากมุมตกกระทบของไพราโนมิเตอร์อ้างอิง
- $u(\delta V_{SP,temp})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไพราโนมิเตอร์อ้างอิง
- $u(\delta V_{SP,offset})$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าชดเชย (offset) ของไพราโนมิเตอร์อ้างอิง
- $V_{SP}(j)$ คือ ค่าเฉลี่ยค้ำยไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์อ้างอิงของชุดข้อมูลที่ j

เมื่อคำนวณหาผลรวมของค่าความไม่แน่นอนของข้อมูลชุดที่ j ตามสมการ (3.31) และ (3.32) แล้ว ผู้วิจัยจะหาค่าเฉลี่ยความไม่แน่นอนของทุกชุดข้อมูล (pool uncertainty) ได้ดังนี้

$$\left(\frac{u(S)_{pool}}{S} \right)^2 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left(\frac{u(S_j)}{S_j} \right)^2 \quad (3.33)$$

เนื่องจากค่าสภาพการตอบสนองสุดท้ายเป็นค่าเฉลี่ยของค่าการตอบสนองของทุกชุดข้อมูล ดังนั้นจึงมีค่าความไม่แน่นอนเกิดขึ้นได้อีก ($u(S)_{reproduce}$) ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนรวมของระบบสอบเทียบไพราโนมิเตอร์เตอร์ตาม ISO 9847 สามารถสรุปดังต่อไปนี้

$$\left(\frac{u(S)}{S} \right)^2 = \left(\frac{u(S)_{pool}}{S} \right)^2 + \left(\frac{u(S)_{reproduce}}{S} \right)^2 \quad (3.34)$$

จากสมการ (3.34) จะเห็นว่าค่าความไม่แน่นอนรวมของระบบสอบเทียบทั้งหมดนั้นเป็นผลรวมจากสมการ (3.33) และค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจาก reproduce uncertainty

3.4.4.1 การหาค่าความไม่แน่นอนของระบบสอบเทียบ ของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

1) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดซ้ำค่าศักย์ไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $u(\delta V_{FP,rep})$

จากการหาค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 080196 ในชุดข้อมูลที่ j ซึ่งมีการวัดศักย์ไฟฟ้าจำนวน 21 ค่า ($n=21$) พบว่า ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) ของชุดข้อมูลดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 0.191 mV และมีค่าเฉลี่ยของศักย์ไฟฟ้าของชุดข้อมูลเท่ากับ 5.53 mV ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดซ้ำค่าศักย์ไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์ของชุดข้อมูลนี้หาได้จาก

$$\begin{aligned} u(\delta V_{FP,rep}) &= \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (V_{FP}(i,j) - V_{FP}(j))^2}}{\sqrt{n}} \\ &= \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \\ &= \frac{0.191 \text{ mV}}{\sqrt{21}} \\ &= 0.041 \text{ mV} \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ที่เกิดจากการวัดซ้ำค่าศักย์ไฟฟ้าของชุดข้อมูลที่ j เท่ากับ

$$\begin{aligned} u(\delta V_{FP,rep})_{\text{relative}} &= \frac{0.041 \text{ mV}}{5.535 \text{ mV}} \times 100 \% \\ &= 0.753 \% \end{aligned}$$

2) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากความแม่นยำของระบบบันทึกข้อมูลของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $u(\delta V_{FP,daq})$

เนื่องจากสัญญาณของการวัดรังสีอาทิตย์ที่ได้จากไพราโนมิเตอร์จะอยู่ในรูปของศักย์ไฟฟ้า ซึ่งในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้เครื่องบันทึกข้อมูลแบบดิจิทัล ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DX 2000 ที่มีความละเอียด 0.0050% +12 หลัก

กรณีนี้ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของไพราโนมิเตอร์สามารถอ่านได้ 10 mV ดังนั้นสามารถหาค่าของช่วงกึ่งกลาง (semi-range) ได้ดังนี้

$$a = \left[\frac{0.005 \times 10 \text{ mV}}{100} + 0.012 \right] = 12.5 \mu\text{V}$$

และจะได้ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ (standard uncertainty)

$$u(\text{Daq}_{\text{accuracy}}) = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{12.5 \mu\text{V}}{\sqrt{3}} = 7.2 \mu\text{V}$$

ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ที่เกิดจากความละเอียดของการบันทึกข้อมูลสามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u(\text{Daq}_{\text{accuracy}})_{\text{relative}} &= \frac{7.2 \mu\text{V}}{10 \text{ mV}} \times 100 \% \\ &= 0.072 \% \end{aligned}$$

นอกจากนี้ จากรายละเอียดของเครื่องบันทึกข้อมูลแบบดิจิทัล พบว่าสามารถวัดศักย์ไฟฟ้าได้ 20 mV และมีค่าความไม่แน่นอน $\pm 0.0070 \text{ mV}$ ที่มีระดับความเชื่อมั่น $k = 2$ ดังนั้นสามารถคำนวณความไม่แน่นอนของเครื่องบันทึกศักย์ไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} u(\text{Daq}_{\text{calibrate}}) &= \frac{0.0070 \text{ mV}}{2} \\ &= 0.0035 \text{ mV} \end{aligned}$$

และค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ในกรณีนี้หาได้จาก

$$\begin{aligned} u(\text{Daq}_{\text{calibrate}})_{\text{relative}} &= \frac{3.5 \mu\text{V}}{10 \text{ mV}} \times 100 \\ &= 0.035 \% \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์รวมที่เกิดจากระบบบันทึกข้อมูลของไพราโนมิเตอร์สามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u(\delta V_{\text{FP,daq}})_{\text{relative}} &= \sqrt{u(\text{Daq}_{\text{accuracy}})_{\text{relative}}^2 + u(\text{Daq}_{\text{calibrate}})_{\text{relative}}^2} \\ &= \sqrt{0.072^2 + 0.035^2} \\ &= 0.08 \% \end{aligned}$$

3) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากมุมตกกระทบของไพรีเฮริโอมิเตอร์อ้างอิง $u(\delta V_{\text{FP,cosine}})$

ข้อมูลการวัดที่ได้จากไพราโนมิเตอร์ตามกระบวนการสอบเทียบ ISO 9847 จะติดไพราโนมิเตอร์บนพื้นราบในแนวระดับ และข้อมูลที่ได้จากการวัดนั้นจะมีความผิดพลาดจากมุมตกกระทบของไพราโนมิเตอร์ โดยที่แต่ละเครื่องวัดจะมีการตอบสนองต่อมุมตกกระทบที่ไม่เท่ากัน ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้ไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 080196 โดยมีความผิดพลาดสำหรับการวัดที่มุมน้อยกว่า 80 องศา จะมีความผิดพลาดสำหรับการวัดความเข้มรังสีอาทิตย์เท่ากับ 10 W.m^{-2} ที่ความเข้มรังสีอาทิตย์ 1000 W.m^{-2} สามารถได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\% \text{ERROR} &= \frac{10 \text{ W/m}^2}{1000 \text{ W/m}^2} \times 100 \% \\ &= 1.00 \%\end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ที่เกิดจากมุมตกกระทบของไพราโนมิเตอร์ที่ทำการวัดรังสีอาทิตย์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}u(\delta V_{FP, \text{cosine}})_{\text{relative}} &= \frac{\% \text{ERROR}}{2\sqrt{3}} \\ &= \frac{1.00\%}{2\sqrt{3}} \\ &= 0.288 \%\end{aligned}$$

4) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $u(\delta V_{FP, \text{temp}})$

การสอบเทียบไพราโนมิเตอร์เป็นการสอบเทียบภายนอกอาคาร โดยที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อมนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาในระหว่างการสอบเทียบ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมินี้จะส่งผลกับศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ การสอบเทียบจึงต้องทำการวัดอุณหภูมิแวดล้อมระหว่างการสอบเทียบของแต่ละชุดข้อมูล เพื่อใช้ในการหาค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้ไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 080196 ซึ่งรายละเอียดของเครื่องมีดังนี้

- Sensitivity is $9.05 \mu\text{V/W.m}^{-2}$

- Temperature error = 0.5%

- The standard uncertainty for the temperature ranges from -20°C to $+40^{\circ}\text{C}$ ซึ่งค่าความไม่แน่นอนดังกล่าวเป็นค่าที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด ทำให้สามารถหาค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}u(\delta V_{FP, \text{temp}})_{\text{relative}} &= \frac{0.5 \%}{2\sqrt{3}} \\ &= 0.144338 \%\end{aligned}$$

5) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าชดเชย (offset) ของไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ $u(\delta V_{FP,offset})$

ในที่นี้ค่า zero offset (type B) ของไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 080196 ที่กำหนดโดยบริษัทผู้ผลิตมี ค่าเท่ากับ $\pm 2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ดังนั้นผู้วิจัยสามารถหาของช่วงกึ่งกลางได้จาก

$$a = 2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \times 9.05 \mu\text{V}\cdot\text{W}\cdot\text{m}^{-2} \\ = 18.1 \mu\text{V}$$

และได้ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์เท่ากับ

$$u(\delta_{FR,offset}) = \frac{a}{\sqrt{3}} \\ = 10.45 \mu\text{V}$$

ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ที่เกิดจากค่าชดเชย (offset) ของไพราโนมิเตอร์สามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยศักย์ไฟฟ้า ($4.5 \times 10^3 \mu\text{V}$) ดังนี้

$$u(\delta_{FR,offset})_{relative} = \frac{u(\delta V_{FP,offset})}{V_{SP}(j)} \\ = \frac{10.45 \mu\text{V}}{4.5 \times 10^3 \mu\text{V}} \times 100 \% \\ = 0.23 \%$$

3.4.4.2 การหาค่าความไม่แน่นอนของระบบสอบเทียบของไพราโนมิเตอร์อ้างอิง

1) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์อ้างอิง $u(\delta V_{SP,rep})$

จากการหาค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 13014 ในชุดข้อมูลที่ j ซึ่งมีการวัดศักย์ไฟฟ้าจำนวน 21 ค่า ($n=21$) พบว่า ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) ของชุดข้อมูลดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 0.191 mV และมีค่าเฉลี่ยของศักย์ไฟฟ้าของชุดข้อมูลเท่ากับ 5.53 mV ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์ของชุดข้อมูลนี้หาได้จาก

$$\begin{aligned}
 u(\delta V_{SP,rep}) &= \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{SP}(i,j) - V_{SP}(j))^2}{(n-1)}}}{\sqrt{n}} \\
 &= \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \\
 &= \frac{0.191 \text{ mV}}{\sqrt{21}} \\
 &= 0.041 \text{ mV}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ที่เกิดจากการวัดซ้ำค่าศักย์ไฟฟ้าของชุดข้อมูลที่ j เท่ากับ

$$\begin{aligned}
 u(\delta V_{SP,rep})_{\text{relative}} &= \frac{0.041 \text{ mV}}{5.535 \text{ mV}} \times 100 \% \\
 &= 0.753 \%
 \end{aligned}$$

2) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากความแม่นยำของระบบบันทึกข้อมูลของไพราโนมิเตอร์อ้างอิง $u(\delta V_{SP,daq})$

เนื่องจากสัญญาณของการวัดรังสีอาทิตย์ที่ได้จากไพราโนมิเตอร์จะอยู่ในรูปของศักย์ไฟฟ้า ซึ่งในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้เครื่องบันทึกข้อมูลแบบดิจิทัล ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DX 2000 ที่มีความละเอียด 0.0050% +12 หลัก

กรณีนี้ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของไพราโนมิเตอร์สามารถอ่านได้ 10 mV ดังนั้นสามารถหาค่าของช่วงกึ่งกลาง (semi-range) ได้ดังนี้

$$a = \left[\frac{0.005 \times 10 \text{ mV}}{100} + 0.012 \right] = 12.5 \mu\text{V}$$

และจะได้ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ (standard uncertainty)

$$u(\text{Daq}_{\text{accuracy}}) = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{12.5 \mu\text{V}}{\sqrt{3}} = 7.2 \mu\text{V}$$

ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ที่เกิดจากความละเอียดของการบันทึกข้อมูลสามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u(\text{Daq}_{\text{accuracy}})_{\text{relative}} &= \frac{7.2 \mu\text{V}}{10 \text{ mV}} \times 100 \% \\ &= 0.072 \% \end{aligned}$$

นอกจากนี้ จากรายละเอียดของเครื่องบันทึกข้อมูลแบบดิจิทัล พบว่าสามารถวัดศักย์ไฟฟ้าได้ 20 mV และมีค่าความไม่แน่นอน $\pm 0.0070 \text{ mV}$ ที่มีระดับความเชื่อมั่น $k = 2$ ดังนั้นสามารถคำนวณความไม่แน่นอนของเครื่องบันทึกค่าศักย์ไฟฟ้าของไพราโนมิเตอร์ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} u(\text{Daq}_{\text{calibrate}}) &= \frac{0.0070 \text{ mV}}{2} \\ &= 0.0035 \text{ mV} \end{aligned}$$

และค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ในกรณีนี้หาได้จาก

$$\begin{aligned} u(\text{Daq}_{\text{calibrate}})_{\text{relative}} &= \frac{3.5 \mu\text{V}}{10 \text{ mV}} \times 100 \\ &= 0.035 \% \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์รวมที่เกิดจากระบบบันทึกข้อมูลของไพราโนมิเตอร์สามารถทำได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u(\delta V_{\text{SP,daq}})_{\text{relative}} &= \sqrt{u(\text{Daq}_{\text{accuracy}})_{\text{relative}}^2 + u(\text{Daq}_{\text{calibrate}})_{\text{relative}}^2} \\ &= \sqrt{0.072^2 + 0.035^2} \\ &= 0.08 \% \end{aligned}$$

3) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากมุดตกระทบของไพรีเฮริโอมิเตอร์อ้างอิง $u(\delta V_{\text{FP,cosine}})$

ข้อมูลการวัดที่ได้จากไพราโนมิเตอร์ตามกระบวนการสอบเทียบ ISO 9847 จะติดไพราโนมิเตอร์บนพื้นราบในแนวระดับ และข้อมูลที่ได้จากการวัดนั้นจะมีความผิดพลาดจากมุดตกระทบของไพราโนมิเตอร์ โดยที่แต่ละเครื่องวัดจะมีการตอบสนองต่อมุดตกระทบที่ไม่เท่ากัน ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้ไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 130014 โดยมีความผิดพลาดสำหรับการวัดที่มุดน้อยกว่า 80 องศา จะมีความผิดพลาดสำหรับการวัดความเข้มรังสีอาทิตย์เท่ากับ $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ที่ความเข้มรังสีอาทิตย์ $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ สามารถได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \% \text{ERROR} &= \frac{10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}}{1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}} \times 100 \% \\ &= 1.00 \% \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ที่เกิดจากมุมตกกระทบของไพราโนมิเตอร์ที่ทำการวัดรังสีอาทิตย์ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u(\delta V_{SP, \cos \theta})_{relative} &= \frac{\% \text{ERROR}}{2\sqrt{3}} \\ &= \frac{1.00\%}{2\sqrt{3}} \\ &= 0.288\% \end{aligned}$$

4) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไพราโนมิเตอร์อ้างอิง

$$u(\delta V_{SP, temp})$$

การสอบเทียบไพราโนมิเตอร์เป็นการสอบเทียบภายนอกอาคาร โดยที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อมนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาในระหว่างการสอบเทียบ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมินี้จะส่งผลกับศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ การสอบเทียบจึงต้องทำการวัดอุณหภูมิแวดล้อมระหว่างการสอบเทียบของแต่ละชุดข้อมูล เพื่อใช้ในการหาค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้ไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 130014 ซึ่งรายละเอียดของเครื่องมีดังนี้

- Sensitivity is $13.05 \mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$

- Temperature error = 0.5%

- The standard uncertainty for the temperature ranges from -20°C to $+40^{\circ}\text{C}$

ซึ่งค่าความไม่แน่นอนดังกล่าวเป็นค่าที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด ทำให้สามารถหาค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} u(\delta V_{SP, temp})_{relative} &= \frac{0.5}{2\sqrt{3}} \% \\ &= 0.144338\% \end{aligned}$$

5) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าชดเชย (offset) ของไพราโนมิเตอร์อ้างอิง $u(\delta V_{SP, offset})$

ในที่นี้ค่า zero offset (type B) ของไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 130014 ที่กำหนดโดยบริษัทผู้ผลิตมีค่าเท่ากับ $\pm 2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ดังนั้นผู้วิจัยสามารถหาของช่วงกึ่งกลางได้จาก

$$\begin{aligned} a &= 2 \text{ W}/\text{m}^2 \times 13.05 \mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2} \\ &= 26.1 \mu\text{V} \end{aligned}$$

และได้ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์

$$\begin{aligned} u(\delta_{SR,offset}) &= \frac{a}{\sqrt{3}} \\ &= 15.06 \mu\text{V} \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ที่เกิดจากค่าชดเชย (offset) ของไพราโนมิเตอร์ สามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u(\delta_{SR,offset})_{relative} &= \frac{u(\delta V_{SP,offset})}{V_{SP}(j)} \\ &= \frac{15.06 \mu\text{V}}{4.5 \times 10^3 \mu\text{V}} \times 100 \% \\ &= 0.33 \% \end{aligned}$$

3.1.4.3 ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการหาค่าสภาพการตอบสนอง

ในการหาค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 080196 ตาม ISO 9847 ที่ได้จากค่าเฉลี่ยของการสอบเทียบชุดข้อมูลที่ j ซึ่งผู้วิจัยได้ข้อมูลค่าสภาพการตอบสนองทั้งหมดจำนวน 12 ค่า ($n=12$) ทำให้ได้ค่าค่าสภาพการตอบสนองของไพโรฮีโรมิเตอร์เฉลี่ยเท่ากับ $8.93 \mu\text{V/W.m}^{-2}$ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) เท่ากับ $0.028 \mu\text{V/W.m}^{-2}$ ดังนั้น ความไม่แน่นอนที่เกิดจากการสอบเทียบซ้ำหาได้จาก

$$u(\delta S_{FP,rep}) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{0.028 \mu\text{V/Wm}^{-2}}{\sqrt{12}} = 0.005 \mu\text{V/Wm}^{-2}$$

ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์จากการหาค่าสภาพการตอบสนองซ้ำหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u(\delta S_{FP,rep})_{relative} &= \frac{0.005 \mu\text{V/Wm}^{-2}}{8.93 \mu\text{V/Wm}^{-2}} \times 100 \\ &= 0.089 \% \end{aligned}$$

จากการคำนวณค่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการหาค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ ดังที่กล่าวมา พบว่าระบบสอบเทียบให้ผลการสอบเทียบที่มีค่าความไม่แน่นอนของไพราโนมิเตอร์ มีดังต่อไปนี้

- ไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 080196 เท่ากับ 2.10 %
- ไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 080199 เท่ากับ 2.13 %

- ไพรานมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 080634 เท่ากับ 2.32 %
- ไพรานมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 127522 เท่ากับ 2.15 %
- ไพรานมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 152219 เท่ากับ 2.13 %

3.4.5 การทดสอบข้อกำหนดระยะเวลาการสอบเทียบ ISO 9847

เนื่องจากการสอบเทียบไพรานมิเตอร์ภาคสนามโดยใช้ไพรานมิเตอร์อ้างอิงเป็นมาตรฐานตามข้อกำหนด ISO 9847 นั้น มีการกำหนดระยะเวลาในการสอบเทียบโดยแบ่งตามสภาพท้องฟ้าเป็น 3 กรณี ดังนี้

- กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ ต้องทำการสอบเทียบอย่างน้อย 3 วัน
- กรณีท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน ต้องทำการสอบเทียบอย่างน้อย 5 วัน
- กรณีท้องฟ้ามีเมฆปกคลุม ต้องทำการสอบเทียบอย่างน้อย 10 วัน

ซึ่งข้อกำหนดดังกล่าวกำหนดขึ้นภายใต้สภาพท้องฟ้าของยุโรปเป็นส่วนใหญ่ แต่ระบบสอบเทียบที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นตาม ISO 9847 จะใช้เพื่อการสอบเทียบไพรานมิเตอร์ภาคสนามในประเทศไทยซึ่งอยู่ในบริเวณเขตเส้นศูนย์ และเป็นบริเวณที่ได้รับรังสีอาทิตย์ในแต่ละวันในปริมาณที่สูงกว่าและยาวนานกว่าพื้นที่แถบยุโรป ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงได้เสนอการลดระยะเวลาในการสอบเทียบไพรานมิเตอร์ภาคสนามโดยจะพิจารณาใน 2 กรณี ดังนี้

- กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ จะลดระยะเวลาการสอบเทียบจาก 3 วัน เป็น 1 หรือ 2 วัน
- กรณีท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน จะลดระยะเวลาการสอบเทียบจาก 5 วัน เป็น 2 หรือ 3 วัน

โดยผู้วิจัยจะทำการเปรียบเทียบค่าสภาพการตอบสนองของไพรานมิเตอร์ที่ได้จากข้อมูลการสอบเทียบตามระยะเวลาที่ ISO 9847 กำหนด กับค่าสภาพการตอบสนองที่ได้จากข้อมูลการสอบเทียบตามระยะเวลาที่ผู้วิจัยเสนอขึ้น

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยอาศัยวิธีการเปรียบเทียบทางสถิติของ dunnett's test ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบข้อมูลตั้งแต่สองชุดขึ้นไปโดยจะมีชุดข้อมูลหนึ่งเป็นชุดข้อมูลควบคุม กรณีที่ชุดข้อมูลที่ต้องการเปรียบเทียบไม่มีความแตกต่างกับชุดข้อมูลควบคุมอย่างมีนัยสำคัญจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขดังนี้

$$\left| \bar{y}_i - \bar{y}_k \right| < d_\alpha (k-1, N-k) \sqrt{MSE \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_k} \right)} \quad (3.35)$$

เมื่อ \bar{y}_i คือ กลุ่มค่าเฉลี่ยของค่าสภาพการตอบสนองของชุดข้อมูลที่ต้องการเปรียบเทียบ

\bar{y}_k คือ กลุ่มค่าเฉลี่ยของค่าสภาพการตอบสนองของชุดควบคุม

α คือ ระดับนัยสำคัญ

d คือ ค่าการทดสอบทางสถิติ

MSE คือ ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน

N คือ จำนวนข้อมูลที่ทำกรสุ่มทั้งหมด

k คือ ชุดของจำนวนวันการสอบเทียบเครื่องวัด

n_i คือ จำนวนวันที่ทำการสอบเทียบของชุดที่ต้องการเปรียบเทียบ

n_k คือ จำนวนวันที่ทำการสอบเทียบของชุดควบคุม

จะเห็นว่าพจน์ทางซ้ายของสมการ (3.35) คือ ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยค่าสภาพการตอบสนองที่ได้จากข้อมูลสอบเทียบตามระยะเวลาที่ผู้วิจัยเสนอ (\bar{y}_i) กับค่าที่ได้จากการสอบเทียบตามระยะเวลาที่ ISO กำหนด (\bar{y}_k) ส่วนพจน์ทางขวา คือ ค่าการทดสอบ dunnett's test ซึ่งสามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Error mean square, MSE) โดยพิจารณาระดับนัยสำคัญ (d_α) ที่ 0.05 สำหรับตัวอย่างการคำนวณโดยใช้วิธีการของ dunnett's test มีดังต่อไปนี้

จากตารางที่ 3.34 เป็นค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 080196 ซึ่งสุ่มมาจากผลการสอบเทียบแบบ 3 วัน 2 วัน และ 1 วัน กรณีห้องฟ้าปราศจากเมฆ

ตารางที่ 3.34 ค่าเฉลี่ยค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 080196

ค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ตาม ISO แบบ 3 วัน	ค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ที่ลดจำนวนวันสอบ แบบ 2 วัน	ค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ที่ลดจำนวนวันสอบ แบบ 1 วัน
8.8545	8.8811	8.9858
8.9571	8.8855	8.9937
8.9589	8.9034	9.0015
8.9527	8.9071	8.9925
8.9269	8.9091	8.9847
8.9266	8.9096	8.9661
8.9219	8.9189	8.9606
8.9199	8.9098	8.9391
8.9344	8.9167	8.9233
8.9480	8.9144	8.8995
8.9485	8.9170	8.8702
8.9269	8.9208	8.8534
$y_3=107.1763$	$y_2=106.8933$	$y_1=107.3705$

จากตารางสามารถคำนวณหาค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนตามวิธีการดังต่อไปนี้

- การคำนวณความผันแปรรวม

$$\begin{aligned} SSTO &= \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{N} \\ &= 8.8545^2 + 8.9571^2 + \dots + 8.8534^2 - \frac{(321.4402)^2}{32} = 0.0482 \end{aligned}$$

เมื่อ N คือ จำนวนค่าสภาพการตอบสนองที่ทำการสุ่มมาทั้งหมด

k คือ จำนวนชุดข้อมูลของค่าการตอบสนอง ($k=3$)

y_{ij} คือ ค่าสภาพการตอบสนองของชุดที่ j ลำดับที่ i

$y_{..}$ คือ ผลรวมค่าสภาพการตอบสนองที่สุ่มมาทั้งหมด ($y_1+y_2+y_3$)

- การคำนวณความผันแปรของค่าการตอบสนอง (treatment sum of squares, SSTR)

$$\begin{aligned} SSTR &= \sum_{i=1}^k \frac{y_i^2}{n_i} - \frac{y_{..}^2}{N} \\ &= \frac{107.1763^2 + 106.8933^2 + 107.3705^2}{12} - \frac{(321.4402)^2}{32} = 0.0096 \end{aligned}$$

- การคำนวณความผันแปรที่เกิดจากความคลาดเคลื่อน (error sum of squares, SSE)

$$\begin{aligned} SSE &= SSTO - SSTR \\ &= 0.0482 - 0.0096 \\ &= 0.0386 \end{aligned}$$

- ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าสภาพการตอบสนอง (Treatment mean square, MSTR)

$$\begin{aligned} MSTR &= \frac{SSTR}{k-1} \\ &= \frac{0.0096}{2} \\ &= 0.0048 \end{aligned}$$

- การคำนวณค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Error mean square, MSE)

$$\begin{aligned} MSE &= \frac{SSE}{N-k} \\ &= \frac{0.0386}{33} \\ &= 0.0012 \end{aligned}$$

สำหรับค่า $d_\alpha(k-1, N-k)$ ซึ่งในที่นี้ $k=3$ และ $N=36$ จะมีค่าเท่ากับ 2.32 ตามตารางที่ 3.35

ตารางที่ 3.35 ค่าสถิติของ dunnett's test แบบสองทาง

		$\alpha = 0.05$ (two-sided)													
$\nu \backslash k$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	15	20		
5	3.03	3.29	3.48	3.62	3.73	3.82	3.90	3.97	4.03	4.09	4.14	4.26	4.42		
6	2.86	3.10	3.26	3.39	3.49	3.57	3.64	3.71	3.76	3.81	3.86	3.97	4.11		
7	2.75	2.97	3.12	3.24	3.33	3.41	3.47	3.53	3.58	3.63	3.67	3.78	3.91		
8	2.67	2.88	3.02	3.13	3.22	3.29	3.35	3.41	3.46	3.50	3.54	3.64	3.76		
9	2.61	2.81	2.95	3.05	3.14	3.20	3.26	3.32	3.36	3.40	3.44	3.53	3.65		
10	2.57	2.76	2.89	2.99	3.07	3.14	3.19	3.24	3.29	3.33	3.36	3.45	3.57		
11	2.53	2.72	2.84	2.94	3.02	3.08	3.14	3.19	3.23	3.27	3.30	3.39	3.50		
12	2.50	2.68	2.81	2.90	2.98	3.04	3.09	3.14	3.18	3.22	3.25	3.34	3.45		
13	2.48	2.65	2.78	2.87	2.94	3.00	3.06	3.10	3.14	3.18	3.21	3.29	3.40		
14	2.46	2.63	2.75	2.84	2.91	2.97	3.02	3.07	3.11	3.14	3.18	3.26	3.36		
15	2.44	2.61	2.73	2.82	2.89	2.95	3.00	3.04	3.08	3.12	3.15	3.23	3.33		
16	2.42	2.59	2.71	2.80	2.87	2.92	2.97	3.02	3.06	3.09	3.12	3.20	3.30		
17	2.41	2.58	2.69	2.78	2.85	2.90	2.95	3.00	3.03	3.07	3.10	3.18	3.27		
18	2.40	2.56	2.68	2.76	2.83	2.89	2.94	2.98	3.01	3.05	3.08	3.16	3.25		
19	2.39	2.55	2.66	2.75	2.81	2.87	2.92	2.96	3.00	3.03	3.06	3.14	3.23		
20	2.38	2.54	2.65	2.73	2.80	2.86	2.90	2.95	2.98	3.02	3.05	3.12	3.22		
24	2.35	2.51	2.61	2.70	2.76	2.81	2.86	2.90	2.94	2.97	3.00	3.07	3.16		
30	2.32	2.47	2.58	2.66	2.72	2.77	2.82	2.86	2.89	2.92	2.95	3.02	3.11		
40	2.29	2.44	2.54	2.62	2.68	2.73	2.77	2.81	2.85	2.87	2.90	2.97	3.06		
60	2.27	2.41	2.51	2.58	2.64	2.69	2.73	2.77	2.80	2.83	2.86	2.92	3.00		
120	2.24	2.38	2.47	2.55	2.60	2.65	2.69	2.73	2.76	2.79	2.81	2.87	2.95		
∞	2.21	2.35	2.44	2.51	2.57	2.61	2.65	2.69	2.72	2.74	2.77	2.83	2.91		

ผู้วิจัยได้ใช้วิธีการของ dunnett's test ในการเปรียบเทียบค่าสภาพการตอบสนองที่ได้จากการสอบเทียบไพราโนมิเตอร์จำนวน 5 เครื่อง ในกรณีห้องฟ้าปราศจากเมฆ ตามตารางที่ 3.36-3.40 และกรณีห้องมีเมฆบางส่วน ตามตารางที่ 3.41-3.45

ตารางที่ 3. 36 การเปรียบเทียบค่า สภาพการตอบสนองที่ได้จากการสอบเทียบ ไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 080196 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ด้วยวิธีการทดสอบของ Dunnett's test

จำนวนชุด	ค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 080196			ค่าการทดสอบ Dunnett's test	ค่าความแตกต่างของกลุ่มทดสอบกับกลุ่มควบคุม	
	3 วัน	2 วัน	1 วัน		2 วัน $ y_3-y_2 $	1 วัน $ y_3-y_1 $
1	8.9314	8.9078	8.9475	0.0324	0.0236	0.0162
2	8.9166	8.9042	8.9356	0.0191	0.0124	0.0190
3	8.9314	8.9133	8.9475	0.0318	0.0181	0.0162
4	8.9166	8.9078	8.9356	0.0200	0.0088	0.0190

ตารางที่ 3. 37 การเปรียบเทียบค่า สภาพการตอบสนองที่ได้จากการสอบเทียบ ไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 080199 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ด้วยวิธีการทดสอบของ Duannett's test

จำนวนชุด	ค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 080199			ค่าการทดสอบ Dunnett's test	ค่าความแตกต่างของกลุ่มทดสอบกับกลุ่มควบคุม	
	3 วัน	2 วัน	1 วัน		2 วัน $ y_3-y_2 $	1 วัน $ y_3-y_1 $
1	8.4702	8.4673	8.4902	0.0433	0.0029	0.0200
2	8.4807	8.4649	8.4902	0.0405	0.0158	0.0095
3	8.4702	8.4592	8.4902	0.0444	0.0110	0.0200
4	8.4807	8.4673	8.4902	0.0402	0.0134	0.0095

ตารางที่ 3.38 การเปรียบเทียบค่า สภาพการตอบสนองที่ได้จากการสอบเทียบ ไพรานอมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 080634 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ด้วยวิธีการทดสอบของ Duannett's test

จำนวนชุด	ค่าสภาพการตอบสนองของ ไพรานอมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 080634			ค่าการทดสอบ dunnett's test	ค่าความแตกต่างของกลุ่ม ทดสอบกับกลุ่มควบคุม	
	3 วัน	2 วัน	1 วัน		2 วัน $ y_3-y_2 $	1 วัน $ y_3-y_1 $
1	7.3206	7.3212	7.4139	0.1139	0.0006	0.0933
2	7.3783	7.3325	7.4139	0.0703	0.0458	0.0357
3	7.3206	7.2916	7.4139	0.1104	0.0290	0.0933
4	7.2783	7.3135	7.2303	0.0824	0.0352	0.0480

ตารางที่ 3.39 การเปรียบเทียบค่า สภาพการตอบสนองที่ได้จากการสอบเทียบ ไพรานอมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 127522 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ด้วยวิธีการทดสอบของ Duannett's test

จำนวนชุด	ค่าสภาพการตอบสนองของ ไพรานอมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 127522			ค่าการทดสอบ dunnett's test	ค่าความแตกต่างของกลุ่ม ทดสอบกับกลุ่มควบคุม	
	3 วัน	2 วัน	1 วัน		2 วัน $ y_3-y_2 $	1 วัน $ y_3-y_1 $
1	8.9475	8.9709	8.9750	0.0477	0.0235	0.0276
2	8.9549	8.8950	8.9750	0.0646	0.0598	0.0202
3	8.9514	8.9637	8.9750	0.0475	0.0124	0.0237
4	8.9549	8.9706	8.9750	0.0458	0.0157	0.0202

ตารางที่ 3.40 การเปรียบเทียบค่า สภาพการตอบสนองที่ได้จากการสอบเทียบ ไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 152219 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ด้วยวิธีการ ทดสอบของ Duannett's test

จำนวนชุด	ค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 152219			ค่าการทดสอบ dunnett's test	ค่าความแตกต่างของกลุ่มทดสอบกับกลุ่มควบคุม	
	3 วัน	2 วัน	1 วัน		2 วัน $ y_3-y_2 $	1 วัน $ y_3-y_1 $
1	9.2482	9.2779	9.2659	0.0397	0.0297	0.0177
2	9.2459	9.2539	9.2659	0.0436	0.0080	0.0200
3	9.2460	9.2594	9.2659	0.0388	0.0133	0.0199
4	9.2459	9.2779	9.2659	0.0383	0.0321	0.0200

จากตารางที่ 3.36-3.40 จะเห็นว่าค่าความแตกต่างของค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ภาคสนามที่ได้จากสอบเทียบ 1 วัน หรือ 2 วัน กับค่าสภาพการตอบสนองที่ได้จากการสอบเทียบ 3 วัน ตาม ISO 9847 ของทุกกรณีมีค่าน้อยกว่าค่าการทดสอบ dunnett's test แสดงว่า การสอบเทียบในช่วงที่ห้องฟ้าปราศจากเมฆ ค่าสภาพการตอบสนองที่ได้จากสอบเทียบ 1 วัน หรือ 2 วัน ไม่มีความแตกต่างกับค่าสภาพการตอบสนองที่ได้จากการสอบเทียบ 3 วันตามที่ ISO 9847 กำหนดอย่างมีนัยสำคัญ



ตารางที่ 3.41 การเปรียบเทียบค่า สภาพการตอบสนองที่ได้จากการสอบเทียบ ไพรานอมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 080196 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ด้วยวิธีการทดสอบของ Dunnett's test

จำนวนชุด	ค่าสภาพการตอบสนองของ ไพรานอมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 080196			ค่าการทดสอบ dunnett's test	ค่าความแตกต่างของกลุ่ม ทดสอบกับกลุ่มควบคุม	
	5 วัน	3 วัน	2 วัน		3 วัน $ y_5-y_3 $	2 วัน $ y_5-y_2 $
1	8.9091	8.9072	8.9093	0.0053	0.0020	0.0002
2	8.9169	8.9173	8.9071	0.0114	0.0004	0.0098
3	8.9041	8.8994	8.9052	0.0079	0.0047	0.0011

ตารางที่ 3.42 การเปรียบเทียบค่า สภาพการตอบสนองที่ได้จากการสอบเทียบ ไพรานอมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 080199 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ด้วยวิธีการทดสอบของ Dunnett's test

จำนวนชุด	ค่าสภาพการตอบสนองของ ไพรานอมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 080199			ค่าการทดสอบ dunnett's test	ค่าความแตกต่างของกลุ่ม ทดสอบกับกลุ่มควบคุม	
	5 วัน	3 วัน	2 วัน		3 วัน $ y_5-y_3 $	2 วัน $ y_5-y_2 $
1	8.4960	8.4919	8.5030	0.0261	0.0042	0.0070
2	8.4957	8.5021	8.4915	0.0145	0.0064	0.0041
3	8.4957	8.5027	8.4910	0.0141	0.0070	0.0046

ตารางที่ 3.43 การเปรียบเทียบค่า สภาพการตอบสนองที่ได้จากการสอบเทียบ ไพรานอมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 080634 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ด้วยวิธีการทดสอบของ Dunnett's test

จำนวนชุด	ค่าสภาพการตอบสนองของ ไพรานอมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 080634			ค่าการทดสอบ dunnett's test	ค่าความแตกต่างของกลุ่ม ทดสอบกับกลุ่มควบคุม	
	5 วัน	3 วัน	2 วัน		3 วัน $ y_5-y_3 $	2 วัน $ y_5-y_2 $
1	7.3721	7.4048	7.3629	0.0423	0.0327	0.0091
2	7.3692	7.3615	7.3636	0.0209	0.0077	0.0056
3	7.3710	7.3504	7.3902	0.0323	0.0205	0.0192

ตารางที่ 3.44 การเปรียบเทียบค่า สภาพการตอบสนองที่ได้จากการสอบเทียบ ไพรานอมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 127522 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ด้วยวิธีการทดสอบของ Dunnett's test

จำนวนชุด	ค่าสภาพการตอบสนองของ ไพรานอมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 127522			ค่าการทดสอบ dunnett's test	ค่าความแตกต่างของกลุ่ม ทดสอบกับกลุ่มควบคุม	
	5 วัน	3 วัน	2 วัน		3 วัน $ y_5-y_3 $	2 วัน $ y_5-y_2 $
1	8.9526	8.9528	8.9464	0.0118	0.0002	0.0062
2	8.9470	8.9360	8.9355	0.0119	0.0109	0.0114
3	8.9513	8.9464	8.9594	0.0224	0.0048	0.0081

ตารางที่ 3.45 การเปรียบเทียบค่า สภาพการตอบสนองที่ได้จากการสอบเทียบ ไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 152219 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ด้วยวิธีการ ทดสอบของ Dunnett's test

จำนวนชุด	ค่าสภาพการตอบสนองของ ไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 serial no: 152219			ค่าการทดสอบ dunnett's test	ค่าความแตกต่างของกลุ่ม ทดสอบกับกลุ่มควบคุม	
	5 วัน	3 วัน	2 วัน		3 วัน $ y_5 - y_3 $	2 วัน $ y_5 - y_2 $
1	9.2772	9.2706	9.2753	0.0111	0.0066	0.0019
2	9.2771	9.2706	9.2753	0.0109	0.0064	0.0018
3	9.2727	9.2737	9.2596	0.0147	0.0011	0.0131

จากตารางที่ 3.36-3.40 จะเห็นว่าค่าความแตกต่างของค่าสภาพการตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ภาคสนามที่ได้จากสอบเทียบ 2 วัน หรือ 3 วัน กับค่าสภาพการตอบสนองที่ได้จากการสอบเทียบ 5 วัน ตาม ISO 9847 ของทุกกรณีมีค่าน้อยกว่าค่าการทดสอบ dunnett's test แสดงว่า การสอบเทียบในช่วงที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆ ค่าสภาพการตอบสนองที่ได้จากสอบเทียบ 2 วัน หรือ 3 วัน ไม่มีความแตกต่างกับค่าสภาพการตอบสนองที่ได้จากการสอบเทียบ 5 วันตามที่ ISO 9847 กำหนดอย่างมีนัยสำคัญ



บทที่ 4

สรุป

เนื่องจากในประเทศไทยยังไม่มีระบบสำหรับสอบเทียบรังสีอาทิติตตามมาตรฐาน ISO ดังนั้น ผู้วิจัยได้พัฒนาระบบสอบเทียบเครื่องวัดรังสีอาทิติตตามมาตรฐาน ISO ขึ้น 4 ระบบ 1) ระบบสอบเทียบไพร์เฮริโอมิเตอร์ภาคสนามโดยใช้ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง (ISO 9059) 2) ระบบสอบเทียบไพราโนมิเตอร์โดยใช้ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงเป็นมาตรฐานแบบใช้วิธีสลับ กันบังรังสีตรง (ISO 9847) 3) ระบบสอบเทียบไพราโนมิเตอร์โดยใช้ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงเป็นมาตรฐานแบบต่อเนื่อง (ISO 9847) และ 4) ระบบสอบเทียบไพราโนมิเตอร์ภาคสนามโดยใช้ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงเป็นมาตรฐาน (ISO 9846) โดยระบบที่ 1 ใช้สอบเทียบไพร์เฮริโอมิเตอร์ภาคสนามโดยใช้ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงที่ได้รับการสอบเทียบมาแล้วเป็นมาตรฐานการสอบเทียบ ระบบดังกล่าวประกอบด้วย ไพร์เฮริโอมิเตอร์แบบ Absolute cavity เครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์แบบ 2 แกน และเครื่องบันทึกข้อมูล ผู้วิจัยได้ทดสอบสมรรถนะของระบบนี้ โดยใช้ระบบดังกล่าวสอบเทียบไพร์เฮริโอมิเตอร์ภาคสนาม 2 เครื่อง ผลการสอบเทียบ พบว่าระบบสอบเทียบนี้ให้ผลการสอบเทียบซึ่งมีความไม่แน่นอน (uncertainty) 1.58 %

ระบบที่ 2) สำหรับสอบเทียบไพราโนมิเตอร์ ISO 9846 โดยใช้ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงเป็นมาตรฐานสอบเทียบและใช้แผ่นบังรังสีตรงสลับกันบังไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ ระบบดังกล่าว ประกอบด้วย ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงแบบเทอร์โมไฟล์ เครื่องติดตามดวงอาทิตย์ และเครื่องบันทึกข้อมูล จากการทดสอบสมรรถนะของระบบนี้ พบว่า ระบบสามารถสอบเทียบไพราโนมิเตอร์ ซึ่งให้ผลการสอบเทียบที่มีความไม่แน่นอน 1.77 %

ระบบที่ 3) เป็นระบบสอบเทียบไพราโนมิเตอร์โดยใช้ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงเป็นมาตรฐานการสอบเทียบแบบต่อเนื่อง (ISO 9846) ระบบดังกล่าวประกอบด้วยไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง ไพราโนมิเตอร์อ้างอิง เครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ และเครื่องบันทึกข้อมูล ผู้วิจัยได้ทดสอบสมรรถนะระบบสอบเทียบนี้ พบว่า สามารถใช้สอบเทียบไพราโนมิเตอร์ โดยมีความไม่แน่นอนเท่ากับ 1.34 %

ระบบที่ 4) เป็นการสอบเทียบไพราโนมิเตอร์ภาคสนามด้วยไพราโนมิเตอร์อ้างอิง (ISO 9847) ระบบนี้มีสมรรถนะในรูปแบบความไม่แน่นอน 2.10 %

สุดท้าย ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบระยะเวลาที่ต้องใช้ในการสอบเทียบไพราโนมิเตอร์ตามข้อกำหนด ISO 9847 และพบว่า ระยะเวลาตามที่กำหนดดังกล่าวสามารถลดลงได้โดยผลที่ได้ไม่แตกต่างจากผลการสอบเทียบตามข้อกำหนดอย่างมีนัยสำคัญ

ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากข้อกำหนด ISO ส่วนใหญ่ใช้สภาพแวดล้อมของยุโรปเป็นเกณฑ์ ในการนำมาใช้งานในประเทศไทยอาจมีข้อกำหนดบางอย่างที่ไม่เหมาะสม ดังนั้นจึงควรทดสอบข้อกำหนดดังกล่าวในสภาพแวดล้อมของประเทศไทย เพื่อให้สามารถใช้ในการสอบเทียบได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

รายการอ้างอิง

- Lester A., Myers D.R. (1964), A method for improving global pyranometer measurements by modeling responsivity functions, *Journal of Applied Meteorology* 3,323-325.
- ISO 9847 (1992), Solar energy - Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer, International Organization for Standardization, (ISO), Geneva, Switzerland.
- ISO 9846 (1993), Solar energy - Calibration of field pyranometers using a pyrhelimeter, International Organization for Standardization, (ISO), Geneva, Switzerland.
- ISO 9059 (1990), Solar energy - Calibration of field pyrhelimeters by comparison to a reference pyrhelimeter, International Organization for Standardization, (ISO), Geneva, Switzerland.
- Reda I., Stoffel T., Myers D.R. (2003), A method to calibrate a solar pyranometer for measuring reference diffuse irradiance, *Solar Energy* 74, 103–112.
- Latimer J.R., (1964), An integrating sphere for pyranometer calibration, *Journal of Applied Meteorology*, 3, 323-326.
- Michalsky J. J., Harrison L. C., Berroaeisea W. E. (1995), Cosine Response Characteristics of Some Radiometric and Photometric Sensors, *Solar Energy* 54, 397-402.
- เสริม จันทร์ฉาย (2014), รังสีอาทิตย์, พิมพ์ครั้งที่ 1, เพชรเกษมการพิมพ์ : จังหวัดนครปฐม.



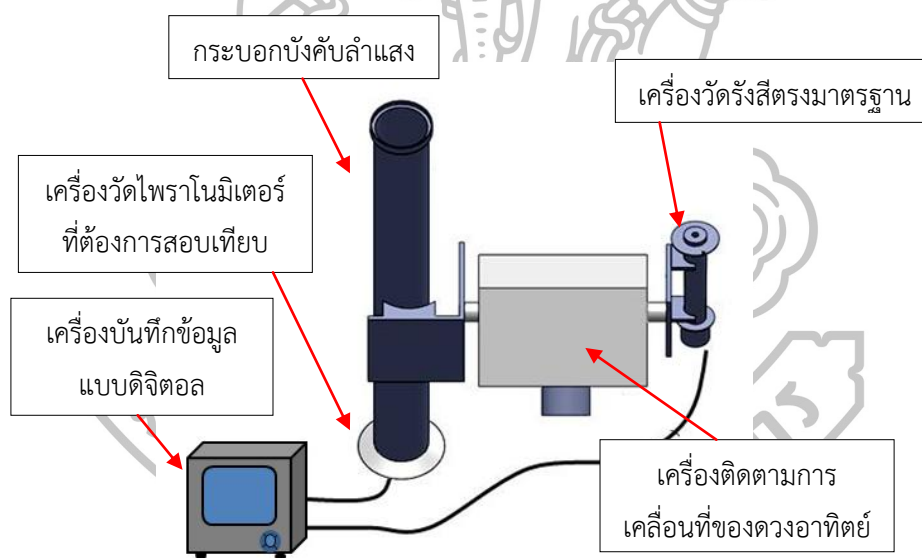


ภาคผนวกที่ 1
การสอบเทียบไพราโนมิเตอร์โดยใช้กระบอกบังคับลำแสง

ภาคผนวกที่ 1

การสอบเทียบไพราโนมิเตอร์โดยใช้กระบอบังคับลำแสง

การสอบเทียบไพราโนมิเตอร์โดยใช้กระบอบังคับลำแสง ประกอบด้วยไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง ไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ กระบอบังคับลำแสง เครื่องบันทึกข้อมูลแบบดิจิทัล และเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ (sun tracker) สำหรับไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงต้องได้รับการถ่ายทอดค่าสภาพการตอบสนองที่ผ่านกระบวนการสอบเทียบตามข้อที่ 3.1 ส่วนไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบต้องประกอบเข้ากับ กระบอบังคับลำแสง ไพราโนมิเตอร์จะถูกติดตั้งไว้กับส่วนท้ายของกระบอบังคับลำแสง แสดงตามรูปที่ A.1 การสอบเทียบเครื่องวัดรังสีอาทิตย์ด้วยกระบอบังคับลำแสงนั้นจะทำการวัดเฉพาะรังสีตรงที่มาจากดวงอาทิตย์ แล้วเปรียบเทียบรังสีตรงจากไพราโนมิเตอร์กับไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง วิธีการสอบเทียบมีขั้นตอนที่ ไม่ซับซ้อนตาม กระบวนการสอบเทียบที่กล่าวมาข้างต้น ต่อสายสัญญาณของเครื่องวัดรังสีอาทิตย์ทั้งคู่ ต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูลแบบดิจิทัล แสดงตามรูปที่ A.1 โดยสัญญาณที่ออกมาจะอยู่ในรูปของความต่างศักย์ไฟฟ้าในหน่วย mV งานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะทำตามข้อกำหนดการบันทึกข้อมูล ISO 9059



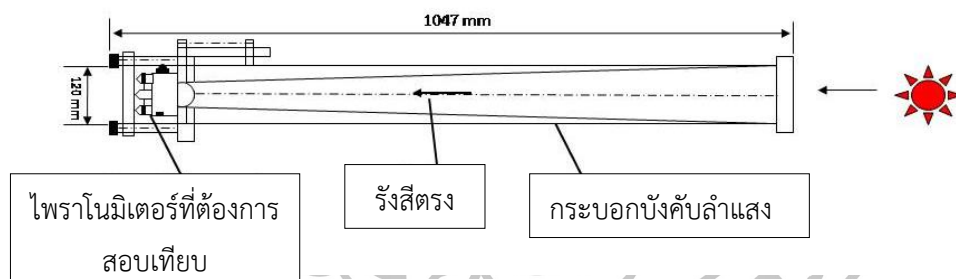
รูปที่ A.1 แสดงอุปกรณ์การสอบเทียบไพราโนมิเตอร์โดยใช้กระบอบังคับลำแสง



รูปที่ A.2 แสดงลักษณะกระบอกบังค้ำลำแสงสำหรับสอบเทียบไพราโนมิเตอร์

A.1.1 การติดตั้งชุดอุปกรณ์การสอบเทียบไพราโนมิเตอร์โดยใช้กระบอกบังค้ำลำแสง

สำหรับการติดตั้งชุดอุปกรณ์การสอบเทียบเครื่องวัดไพราโนมิเตอร์โดยใช้กระบอกบังค้ำลำแสง ติดตั้งบนเครื่องติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ ไพร์เฮลิโอมิเตอร์อ้างอิง ตาม ISO 9059 กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.2 ไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ ติดตั้งเข้ากับส่วนท้ายของตัวยึดฐานของกระบอกบังค้ำลำแสง แสดงตามรูปที่ A.3 และต้องมีระบบระบายความร้อน เพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากอุณหภูมิภายใน



รูปที่ A.3 ลักษณะโครงสร้างของไพราโนมิเตอร์ที่ติดตั้งภายในกระบอกบังค้ำลำแสง



รูปที่ A.4 การประกอบไพราโนมิเตอร์เข้ากับส่วนฐานตัวนทำยกระบอกบังค้ำลำแสง



รูปที่ A.5 การติดตั้งไพราโนมิเตอร์เข้ากับระบบอกบังคับลำแสง



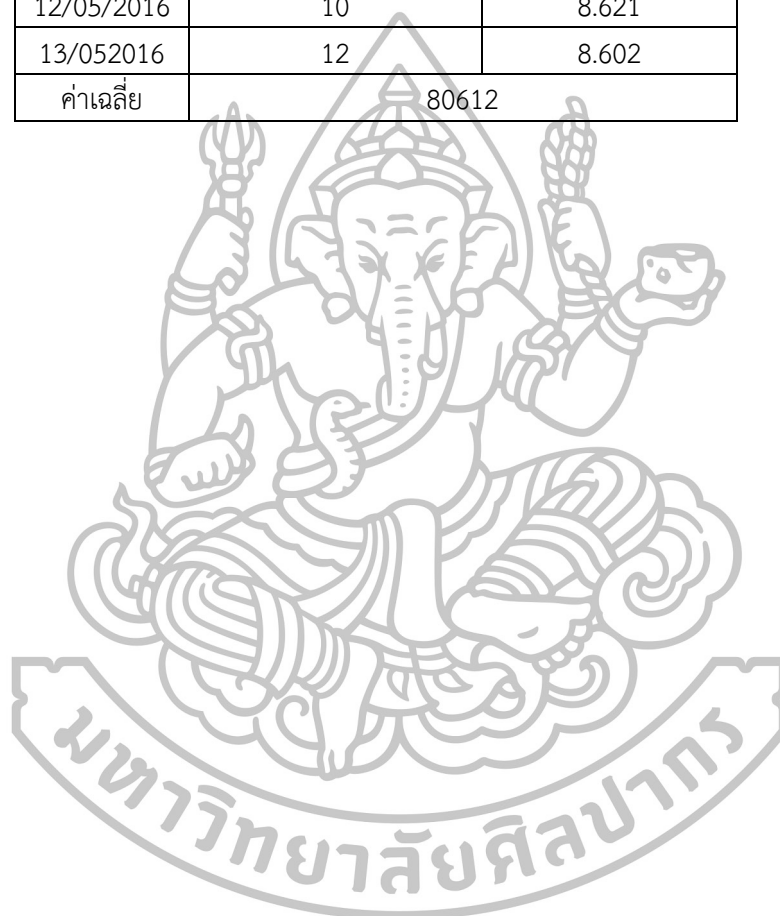
รูปที่ A.6 แสดงการสอบเทียบไพราโนมิเตอร์ด้วยระบบอกบังคับลำแสงเทียบกับไพร์เฮริโอมิเตอร์
อ้างอิง บนตาดฟ้า ชั้น 11 อาคารวิทยาศาสตร์ 1 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

ตารางที่ A.1 ไพราโนมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบและไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิงสำหรับการสอบเทียบ
เครื่องวัดด้วยระบบอกบังคับลำแสง

ไพราโนมิเตอร์ ที่ต้องการสอบเทียบ	ไพร์เฮริโอมิเตอร์อ้างอิง	ช่วงระยะเวลา สอบเทียบ
Company: Kipp&Zonen Model: CMP11 Serial no: 141122	Company: Kipp&Zonen Model: CHP1 Serial no: 130014 Sensitivity: $7.67 \mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	11-12 พฤษภาคม 2559

ตารางที่ A.1 ค่าสภาพตอบสนองของไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11
serial no:141122

ว/ด/ป	จำนวนชุดข้อมูล	ค่าสภาพตอบสนอง $S(i, j)$ ($\mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
11/05/2016	10	8.614
12/05/2016	10	8.621
13/05/2016	12	8.602
ค่าเฉลี่ย	80612	



ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล	นายภาสกร เดชไค่น
ที่อยู่	43 หมู่ 2 ตำบลปากหมัน อำเภอด่านซ้าย จังหวัดเลย
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2552	สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนศรีสองรักษ์วิทยา อำเภอด่านซ้าย จังหวัดเลย
พ.ศ. 2556	สำเร็จการศึกษาวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย
พ.ศ. 2556	ศึกษาต่อระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม

