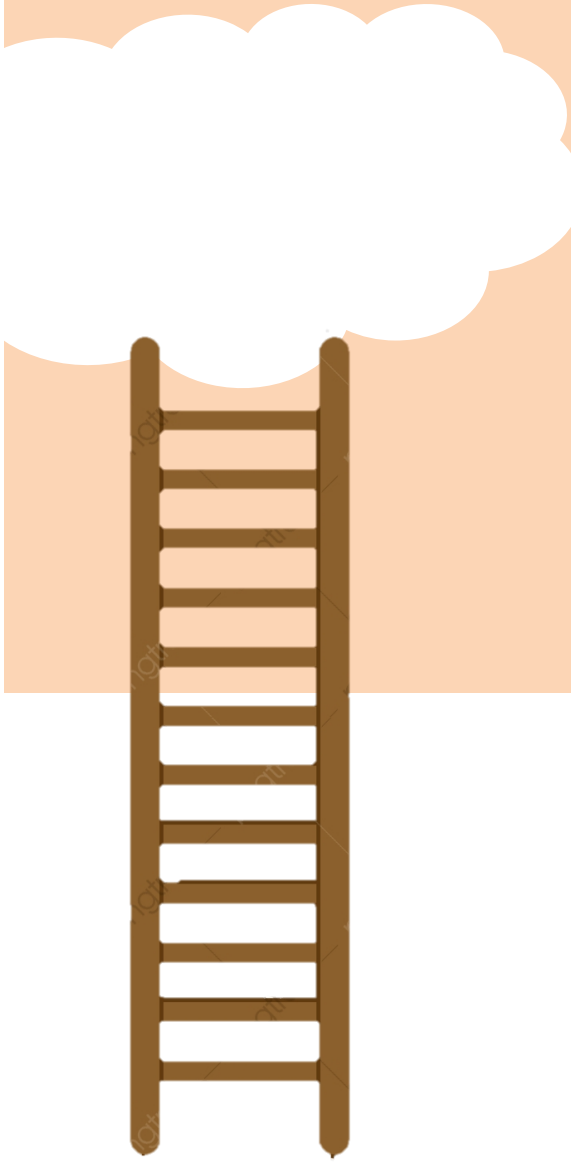




UPDATE

สมท. สาร ปีที่ 24 ฉบับที่ 2 เดือนเมษายน - มิถุนายน ปี 2562



METROLOGY SOCIETY
OF THAILAND

หน้า

3

ความน่าเชื่อถือของการตรวจวัด
สารหนูอินทรีย์ในอาหาร

7

การสอบเทียบไพรานอมิเตอร์ โดยอาศัย
หลักการวัดรังสีเชิงสเปกตรัม

15

รวมภาพกิจกรรม

สวัสดีค่ะท่านผู้อ่านและสมาชิกสมาคมมาตรวิทยาแห่งประเทศไทยทุกท่าน

วารสาร UPDATE ฉบับนี้เป็นฉบับที่ 2 ของปี 2562 และเป็นฉบับที่ 3 ที่ทางสมาคมทำในรูปแบบ E-UPDATE ให้เข้ากับสมัยยุค 4.0 และประหยัดการใช้กระดาษ เนื้อเรื่องที่จะลงในฉบับนี้ จะมีทั้งมาตรวิทยาทางฟิสิกส์และเคมี ผู้เขียนทั้ง 2 ท่านมาจากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติทั้งคู่ ทางคณะกรรมการเชิญชวนท่านสมาชิกส่งเรื่องมาร่วมเผยแพร่ด้วย เพื่อให้เกิดความหลากหลายของเนื้อหาและมีบทบาทของหน่วยงานอื่นทั้งภาครัฐและเอกชนมาร่วมด้วย

ในช่วงนี้ทางสมาคมมีกิจกรรมเรื่องการสอบรับรองสมรรถนะของบุคคลในสาขาวิชาชีพมาตรวิทยา อาชีพผู้สอบเทียบเครื่องมือวัดด้านมวลชิ้น 2 ด้านอุณหภูมิชิ้น 2 และชิ้น 3 และสาขามิติชิ้น 1 ท่านผู้สนใจติดตามใน website ของสมาคมฯ

บรรณาธิการ

ดร.ลักขมี ปลั่งแสงมาศ
นายเชื่อมศักดิ์กร สีนชัยศรี
ดร.ปนัดดา ชิลวา

ความน่าเชื่อถือของการตรวจวัด สารหนูอินทรีย์ในอาหาร

สุทธินันท์ แต่บรรพกุล ปราณี พุกพัฒนาชัย

อุษณา เทียงมณี เนตติกานต์ อ่อนไทย จรรย์ ยะผา

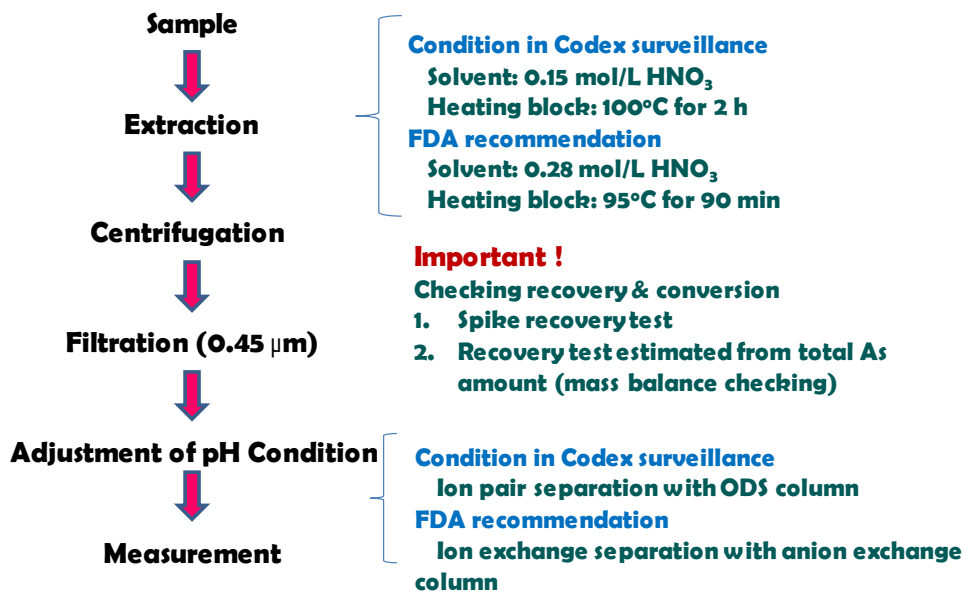
กลุ่มงานวิเคราะห์อินทรีย์เคมี สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

การตรวจวัดระดับสารหนูอินทรีย์ในอาหารได้รับความสนใจและพิจารณาว่ามีความสำคัญสำหรับห้องปฏิบัติการทดสอบด้านอาหาร หรือแม้แต่ผู้บริโภค หน่วยงานการศึกษา องค์กรด้านสุขภาพ รวมถึงผู้ออกข้อบังคับด้านความปลอดภัย เนื่องจากความเป็นพิษของมันที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็ง จึงมีความต้องการในการพัฒนาวิธีวิเคราะห์ที่ให้ความถูกต้องและน่าเชื่อถือในการตรวจวัดปริมาณสารหนูอินทรีย์ซึ่งมีความจำเพาะในตัวอย่างอาหารที่หลากหลายได้ ซึ่งผลจากการเปรียบเทียบกับระหว่างห้องปฏิบัติการ เช่น ในโปรแกรมเปรียบเทียบผลการวัดรายการ IMEP-107: Determination of total and inorganic As in rice, IMEP- 112: Determination of total and inorganic arsenic in wheat, vegetable food and algae และ TISTR-PT-2015-01-02: The 2nd Proficiency Testing in Thailand: Trace Elemental Analysis in Polished Rice flour ได้ชี้ให้เห็นถึงผลการวัดสารหนูอินทรีย์ของห้องปฏิบัติการที่สอดคล้องกัน จึงนำไปสู่ข้อสรุปว่าระดับของสารหนูอินทรีย์ในอาหารจำพวกข้าวและพืชนั้นไม่ขึ้นอยู่กับวิธีการทดสอบ อย่างไรก็ตามการวัดสารหนูอินทรีย์ในตัวอย่างอาหารทะเล เช่น IMEP-109/30-Analysis of total Cd, Pb, As and Hg, as well as methylmercury (MeHg) and inorganic arsenic (iAs) in seafood โดยผลการวัดจากห้องปฏิบัติการที่เชี่ยวชาญจำนวน 5 ห้องปฏิบัติการนั้นพบว่า มีความแตกต่างและไม่สอดคล้องกัน โดยค่ามีลักษณะกระจาย ชี้ให้เห็นถึงปัญหาในเชิงเทคนิคการวิเคราะห์ซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการสกัดหรือการตรวจวัด แสดงให้

เห็นถึงการวัดสารหนูอินทรีย์ในอาหารทะเลมีความยากกว่าในตัวอย่างข้าว [1-2]

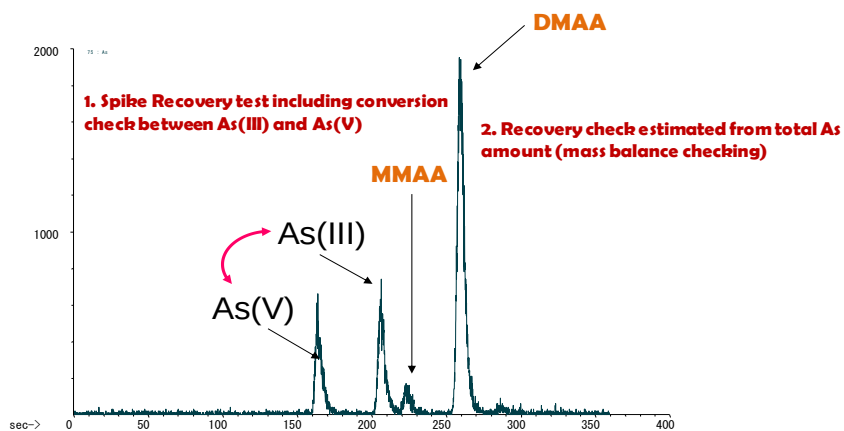
ถึงแม้ว่าเทคนิคทาง spectroscopy จะมีการใช้ในการตรวจวัดระดับของสารหนูอินทรีย์ แต่ทั้งนี้การตรวจวัดโดย high-performance liquid chromatography inductively coupled plasma-mass spectrometry (HPLC-ICP-MS) ด้วยวิธีการสกัดสารหนูอินทรีย์ในเงื่อนไขที่ไม่รุนแรงนัก พบว่ายังเป็นที่ยอมรับมากกว่า เนื่องจากสามารถให้ข้อมูลสัดส่วนการกระจายของรูปฟอร์มของสารหนูในตัวอย่างที่ชัดเจนกว่า อีกทั้งสามารถตรวจวัดในระดับความเข้มข้นที่ต่ำได้อย่างน่าเชื่อถือ

ตัวอย่างของวิธีการสกัดสารหนูอินทรีย์ และการตรวจวัดปริมาณสารหนูอินทรีย์ในตัวอย่างข้าวที่เป็นที่ยอมรับ ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยแบบที่ 1 เป็นวิธีโดย Codex surveillance [3] และแบบที่ 2 เป็นวิธีโดย FDA recommendation [4] ทั้ง 2 วิธีนี้จะมีการใช้ตัวสกัดที่เป็นกรดไนตริกเจือจาง สกัดที่อุณหภูมิประมาณ 95–100 °C เป็นเวลา 1.5–2 ชั่วโมง ส่วนในขั้นตอนตรวจวัดใช้เทคนิค HPLC-ICP-MS ซึ่งเป็นการแยกรูปฟอร์มของสารหนูด้วยคอลัมน์โครมาโทกราฟี โดยสามารถดำเนินการผ่านกลไกการแยก 2 แบบคือ ion exchange และ reverse phase ซึ่งแต่ละแบบมีข้อดีที่แตกต่างกันออกไป ก่อนจะทำการตรวจวัดด้วยเครื่อง ICP-MS แบบออนไลน์



รูปที่ 1 แผนผังแสดงกระบวนการสกัดและตรวจวัดปริมาณสารหนูอนินทรีย์ในตัวอย่างข้าวโดยวิธี HPLC-ICP-MS

สิ่งสำคัญในการตรวจสอบการใช้ได้ของวิธีวัดสารหนูอนินทรีย์ คือ การตรวจสอบค่าการกลับคืน (recovery) โดยทำการศึกษา ร้อยละประสิทธิภาพการสกัด รวมถึงเปรียบเทียบปริมาณรวมของสารหนูที่สกัดได้ทั้งหมดกับปริมาณที่ตรวจวัดผ่านเครื่อง HPLC-ICP-MS ว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่ ซึ่งจัดว่าเป็นการตรวจสอบ mass balance เพื่อใช้ในการประเมินความน่าเชื่อถือของวิธี และอีกประเด็นหนึ่งคือ ควรจะต้องมีการศึกษาติดตามความเป็นไปได้ที่อาจมีการเปลี่ยนแปลงของรูปฟอร์มของสารหนูซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในระหว่างขั้นตอนการสกัด การแยกภายในคอลัมน์ (ซึ่งไม่เป็นที่ปรารถนา) โดยการ spike รูปฟอร์มของสารหนูที่เราสนใจ และดูการเปลี่ยนแปลงที่อาจจะมีขึ้น ซึ่งทั้งนี้ในตัวอย่างข้าว อาจพบการเปลี่ยนแปลงระหว่างรูปฟอร์มของสารหนูอนินทรีย์ As(III) และ As(V) ที่มักเกิดจากเงื่อนไขการสกัด และ pH ที่ใช้ในการสกัด ดังรูปที่ 2



Reference: T. Narukawa et al., Talanta, 77, 427-432 (2008).

รูปที่ 2 ตัวอย่างโครมาโทแกรม HPLC-ICP-MS ในการตรวจวัดรูปฟอร์มสารหนูในตัวอย่างข้าว

ถึงแม้ในปัจจุบัน จะมีวัสดุอ้างอิงรับรองจำนวนมากสำหรับการทดสอบความใช้ได้ของวิธี และประเมินความถูกต้องของการหาปริมาณสารหนูรวม แต่วัสดุอ้างอิงรับรองสำหรับการวัดสารหนูอนินทรีย์มีจำนวนไม่มากนัก ยิ่งในกรณีที่มีเมทริกซ์ซึ่งมีการกระจายตัวของรูปฟอร์มของสารหนูที่หลากหลาย เช่น อาหารทะเล ด้วยแล้ว การผลิตวัสดุอ้างอิงรับรองสำหรับการวัดสารหนูอนินทรีย์ในอาหารทะเลจึงมีความสำคัญเพื่อช่วยในการทดสอบความถูกต้องของวิธีวัด เพื่อได้ค่าการวัดที่น่าเชื่อถือ ในขณะเดียวกันโปรแกรมการทดสอบความชำนาญ (PT) สำหรับการวัดสารหนูอนินทรีย์ก็ยังเป็นที่ต้องการ เพื่อใช้ประเมินความน่าเชื่อถือของวิธีการทดสอบผ่าน external quality control การเข้าร่วม PT และการวิเคราะห์ในวัสดุอ้างอิงรับรอง จึงมีความจำเป็นเพื่อใช้ประกอบการเข้ารับการประเมินความสามารถห้องปฏิบัติการตามระบบ ISO/IEC 17025

ในการพัฒนาหรือเลือกใช้วิธีการวัดทางเคมีสำหรับห้องปฏิบัติการทดสอบแล้ว ควรจะต้องมีเกณฑ์การยอมรับของวิธี ซึ่งที่รู้จักกันดีคือ Codex guideline [5] เพื่อที่จะทดสอบว่าเหมาะกับเป้าหมายประสงค์ (fit for purpose) หรือไม่ เช่น ในปัจจุบันมีวิธีการวัดปริมาณสารหนูอนินทรีย์ในข้าวด้วยวิธี HPLC-ICP-MS 6 วิธี เช่น Method A, B, C, D, E และ F เราจะมีการเลือกใช้วิธีใดนั้น ทาง Codex ได้ชี้แนะแนวทางโดยทำเป็นตารางเพื่อเทียบความสามารถของวิธี (performance of methods) ในเทอมของ Validation, Applicability, Minimum applicable range, LOD, LOQ, Precision และ Recovery กับเกณฑ์การยอมรับของวิธีด้วย Codex guideline ดังปรากฏใน Appendix III Information of Methods of Analysis that are Fit for Purpose [6]

นอกจากนี้ AOAC ยังได้จัดทำหลักเกณฑ์เพื่อใช้ตรวจสอบความสามารถของวิธีการวัดในการหาปริมาณรูปฟอร์มของสารหนูในตัวอย่างอาหารและเครื่องมือสำหรับใช้เป็นวิธีการอ้างอิง หากมีข้อโต้แย้ง โดยได้กำหนด Standard method performance requirement ซึ่งเป็นแนวคิดให้ผู้พัฒนาวิธีวิเคราะห์เสมือน voluntary consensus standards ที่พัฒนาขึ้นจากผู้มีส่วนเกี่ยวข้องเพื่ออธิบายถึง minimum analytical performance requirements ผู้ใช้งาน guideline นี้จะได้รับการแนะนำว่า ไม่ใช่คัมภีร์ที่ผู้ใช้ต้องปฏิบัติตาม แต่ให้ใช้เป็นแนวทาง โดยเอกสารจะมีการปรับปรุงเป็นระยะ ดังนั้นผู้ใช้งานควรหมั่นตรวจสอบสถานะบนเว็บไซต์ของ AOAC [7]

คุณลักษณะเฉพาะของวิธีที่สำคัญซึ่งกำหนดโดยคณะกรรมการผู้เชี่ยวชาญจาก AOAC เพื่อใช้ในการประเมินข้อมูลจากการศึกษาการทดสอบความใช้ได้ของวิธี และในการตั้งเกณฑ์การยอมรับการทวนสอบวิธีการทดสอบของห้องปฏิบัติการ ดังปรากฏในตารางที่ 1 ซึ่งได้ยกตัวอย่างเกณฑ์การตรวจสอบความสามารถของวิธีการวัดปริมาณของรูปฟอร์มของสารหนู [8] ได้แก่ arsenite, arsenate, monomethylarsonic acid (MMA), dimethylarsinic acid (DMA), arsenobetaine และ total inorganic arsenic ในอาหารและเครื่องมือ เช่น

- ข้าว ผลิตภัณฑ์จากข้าว ธัญพืช อาหารธัญพืชเพื่อทารก อาหารสูตรทารก
- น้ำผลไม้ น้ำแอปเปิล น้ำองุ่น
- อาหารเสริมน้ำมันจากปลา
- อาหารทะเล ปลากระดุกแช่แข็ง อาหารทะเลที่มีเปลือก สหรัยทะเล

ตารางที่ 1 เกณฑ์การตรวจสอบความสามารถของวิธีการวัดสารหนูอนินทรีย์ในอาหารและเครื่องดื่มโดย AOAC SMPR 2015.006

พารามิเตอร์	ช่วง	เกณฑ์การยอมรับต่ำสุด
ช่วงการวิเคราะห์ (Analytical range)		10 ppb- 1 ppm
ขีดจำกัดการวัดเชิงปริมาณ (LOQ)		< 10 ppb
การกลับคืน (Recovery)	10-100 ppb	60-115%
	≥ 100 ppb-10 ppm	80-110%
ความทวนซ้ำได้ (Repeatability, RSD _r)	≤ 10-50 ppb	≤ 20%
	≥ 50-300 ppb	≤ 13%
	≥ 300 ppb-1 ppm	≤ 12%
ความทำซ้ำได้ (Reproducibility, RSD _R)	≤ 10-50 ppb	≤ 30%
	≥ 50-300 ppb	≤ 20%
	≥ 300 ppb-1 ppm	≤ 18%

วิธีการวัดที่เหมาะสม ควรจะต้องมีมาตรการสำหรับควบคุมคุณภาพภายใน เช่น การทำ blank ควบคู่ไปกับตัวอย่าง การใช้ internal standard หรือ check standard เพื่อการตรวจสอบ instrumental drift, การตรวจสอบประสิทธิภาพ การสกัด chromatographic recovery รวมถึง mass balance และการใช้วัสดุอ้างอิงรับรอง (matrix CRMs) เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

1. Arsenic Speciation in food – current status on standardization of methods for specific determination of inorganic arsenic. Abstract from Annual NRL – EURL Workshop EURL – CEFAO, Rome, Italy.
2. Inorganic Arsenic Determination in Food: A Review of Analytical Proposals and Quality Assessment Over the Last Six Years, Applied Spectroscopy, 2017, 71(1), 25-69.
3. Codex Alimentarius Commission CF/7 CRD 23, Preliminary report on international validation of analytical method to determine inorganic arsenic in rice, April 2013, 1-10.
4. FDA Elemental Analysis Manual for Food and Related Products. Analytical Methods 4.11 Arsenic Speciation in Rice and Rice Products Using High Performance Liquid Chromatography-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometric Determination (ver1.1; 2012).
5. Criterial required by the Guidelines for Establishing Numeric Values for Method Criteria and/or Assessing Methods for Compliance Thereof, Section II in the Procedural Manual when setting an ML at 0.35 mg/kg.
6. Codex Committee on Contaminants in foods, proposals for maximum levels for inorganic arsenic in husked rice, CX/CF/16/10/5, February 2016.
7. Appendix F: Guidelines for Standard Method Performance Requirements, 2016 AOAC INTERNATIONAL.
8. AOAC SMPR 2015.006, Standard Method Performance RequirementsSM (SMPRs) for Quantitation of Arsenic Species in Selected Foods and Beverage.

การสอบเทียบไพรานอมิเตอร์ โดยอาศัยหลักการวัดรังสีเชิงสเปกตรัม

Pyranometer calibration based on spectroradiometric method



พลวัฒน์ จำปาเรือง (POLLAWAT JAMPARUANG)

ห้องปฏิบัติการแสง (Radiometry Laboratory) กลุ่มงานแสงและสี (Light and Color Group)

ฝ่ายมาตรวิทยายอุณหภูมิและแสง (Thermometry and Optical Metrology Department)

กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (Ministry of Science and Technology)

บทนำ

ไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer) เป็นชื่อเรียกของเครื่องมือที่ใช้วัดรังสีอาทิตย์รวมทั้งหมด (Total global solar radiation) ทั้งรังสีตรงและรังสีกระจายที่มาจากรังสีอาทิตย์ โดยสามารถตรวจจับคลื่นแสงได้ในช่วงรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดบี (UV-B) รังสีอัลตราไวโอเลตชนิดเอ (UV-A) แสงสว่าง (Visible) คลื่นรังสีความร้อนย่านใกล้ (Near-IR) ครอบคลุมไปจนถึงคลื่นรังสีความร้อนย่านกลาง (Mid-IR) โดยประมาณ ซึ่งนิยมใช้ในงานด้านอุตุนิยมวิทยา งานวิจัยด้านฟิสิกส์บรรยากาศเพื่อศึกษาอิทธิพลของรังสีอาทิตย์ต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลก องค์การอุตุนิยมวิทยาโลก (World Meteorology Organization; WMO) จึงร่วมกับสภาแห่งสหพันธรัฐสวิสเซอร์แลนด์ให้ทุนแก่องค์การการสำรวจทางอุตุนิยมวิทยาแห่งเมืองดาวอส (Physikalisch Meteorologisches Observatorium Davos; PMOD) เพื่อจัดตั้งศูนย์สอบเทียบสำหรับการวัดด้านรังสีอาทิตย์ขึ้น ในปี พ.ศ. 2513 มีชื่อเรียกว่าศูนย์รังสีอาทิตย์โลก (World Radiation Center; WRC) ต่อมาเมื่อเทคโนโลยีเซลล์

พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar cell technology) พัฒนาให้ใช้งานได้อย่างกว้างขวางทั้งในด้านพาณิชย์และภาคการใช้งานทั่วไป จึงมีการนำไพรานอมิเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดเพื่อติดตามค่าความรับรังสีอาทิตย์ (Solar irradiance monitoring) ในระบบผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic System) ในช่วงแรกๆ ของการพัฒนาด้านนี้

มนุษย์โลกเรียนรู้การใช้ประโยชน์เทคโนโลยีรังสีอาทิตย์ (Solar technology) มาตั้งแต่ พ.ศ.550 โดยการใช้แผ่นขยายรวมรังสีอาทิตย์เพื่อทำให้เกิดการจุดประกายไฟและเผาไหม้ไม้ และมีการพัฒนาเรื่อยมาจนถึงปี พ.ศ.2310 นักวิทยาศาสตร์ชาวสวิสเซอร์แลนด์ชื่อ Horace de Saussure ได้รับการยกย่องว่าเป็นนักวิทยาศาสตร์คนแรกของโลกที่นำอุปกรณ์กักเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar collector) มาใช้ในอาคารบ้านเรือนเพื่อให้แสงสว่างตลอดจนมีการนำมาใช้ในการหุงต้มทำอาหาร ในช่วงนี้นักวิทยาศาสตร์หลายคนทั่วโลกก็ได้ค้นพบปรากฏการณ์ที่พลังงานรังสีอาทิตย์สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานทางไฟฟ้าได้ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “Photovoltaic effect”

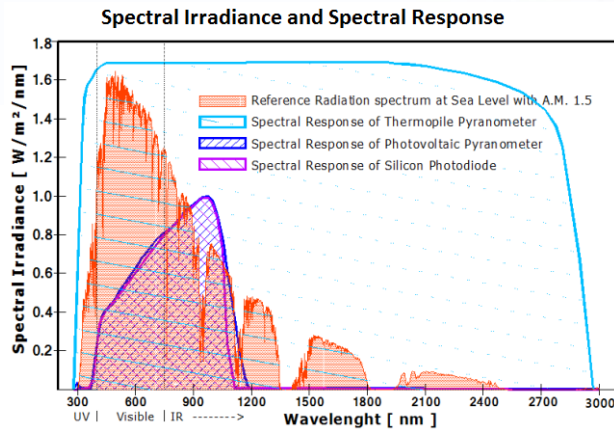
และได้มีการผลิตอุปกรณ์ดังกล่าวขึ้นในปี พ.ศ. 2426 โดย Charles Fritts นักประดิษฐ์ชาวอเมริกาซึ่งสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จากธาตุซิลิเนียมบนชั้นฟิล์มบางทองคำในเวลาใกล้เคียงกันอีก 10 ปีต่อมา Anders Knutsson Angstrom นักอุตุนิยมวิทยาและนักวิทยาศาสตร์ชาวสวีเดนได้สร้างไพรานอมิเตอร์ขึ้นมาครั้งแรกของโลก โดยอาศัยหลักการการเปลี่ยนแปลงพลังงานคลื่นแสงเป็นพลังงานความร้อนและทำให้เกิดความต่างศักย์ทางไฟฟ้าด้วยเทอร์โมโพล (Thermopile detector) ในปี พ.ศ. 2436 จนกระทั่งผ่านมา 61 ปี การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์จึงเริ่มต้นเป็นเทคโนโลยีฐานจากซิลิกอน (Silicon photovoltaic cell) ในปี พ.ศ.2497 จะเห็นได้ว่าการใช้งานและพัฒนาไพรานอมิเตอร์ชนิดเทอร์โมโพล (Thermopile pyranometer) มีมาอย่างยาวนานมากกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน (Silicon photovoltaic cell) ดังนั้นการตรวจวัดค่าความรังสีอาทิตย์รวม (Global solar irradiance) ที่พื้นผิวโลกในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จึงนิยมนำไพรานอมิเตอร์ชนิดเทอร์โมโพลมาประยุกต์ใช้งานในปัจจุบันเพื่อให้สอดคล้องตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง แต่อย่างไรก็ตามการใช้งานไพรานอมิเตอร์ชนิดเทอร์โมโพลในการตรวจวัดค่าความรังสี (Irradiance) ในบางวัตถุประสงค์ จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์ข้อมูล เนื่องจากความไม่สอดคล้องกันระหว่างคุณลักษณะเฉพาะของไพรานอมิเตอร์ชนิดเทอร์โมโพลและคุณลักษณะเฉพาะเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน (Silicon PV cell) ในหลายพารามิเตอร์ ปัจจุบันจึงมีการสร้างไพรานอมิเตอร์ขึ้นอีก 2 ชนิด คือ ไพรานอมิเตอร์ชนิดโฟโตไดโอด (Photodiode pyranometer) และไพรานอมิเตอร์ชนิดโฟโตโวลเทอิก (Photovoltaic pyranometer) ซึ่งทั้ง 2 ชนิดนิยมทำมาจากซิลิกอน เพื่อกำจัดปัญหาดังกล่าวออกไป

การตรวจสอบและการสร้างความน่าเชื่อถือของข้อมูลในการตรวจวัดค่าความรังสีด้วยไพรานอมิเตอร์นั้นจะสร้างความเป็นธรรมระหว่างผู้ซื้อกับผู้จำหน่ายระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในรูปแบบที่เป็นการประกันหน่วยไฟฟ้าที่ผลิตได้ อีกทั้งจะเป็นประโยชน์ต่อการตัดสินใจพัฒนาต่อยอดขยายการลงทุน รวมไปถึงการบำรุงรักษาระบบอย่างเหมาะสม ดังนั้นจำเป็นจะต้องทำการสอบเทียบเครื่องมือเหล่านี้ให้ถูกต้องเหมาะสมตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ซึ่งต้องกำหนดพารามิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ (Measurand) อย่างชัดเจน หรือจะต้องทำการแก้ค่าความคลาดเคลื่อนต่าง ๆ ให้เหมาะสมกับการใช้งาน

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ไพรานอมิเตอร์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ซึ่งจะมีการตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 1 ปัจจุบันได้รับการยอมรับในเวทีระหว่างประเทศให้มีการสอบกลับได้ไปยังกลุ่มเครื่องมือมาตรฐานปฐมภูมิ (Cavity radiometer) ซึ่งมีจำนวน 6 เครื่อง ที่เก็บค่าสเกลรังสีอาทิตย์อ้างอิงโลก (World Radiometric Reference; WRR) ไว้ โดยได้กำหนดให้เป็นวิธีการสอบเทียบตามมาตรฐานระหว่างประเทศ (ISO standard method) ผ่านศูนย์รังสีอาทิตย์โลก ซึ่งทำหน้าที่ในการวิจัยพัฒนามาตรฐาน วิธีการสอบเทียบและสอบเทียบเครื่องมือวัดการแผ่รังสีที่ใช้ในงานอุตุนิยมวิทยาของโลกและจัดเปรียบเทียบผลการวัดให้กับกลุ่มประเทศสมาชิกที่มีการใช้งานเครื่องมือเหล่านี้เป็นประจำทุกๆ 5 ปี

การสอบเทียบไพรานอมิเตอร์นั้นสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่เป็นมาตรฐานระหว่างประเทศจะมีอยู่ 2 วิธีการ ได้แก่



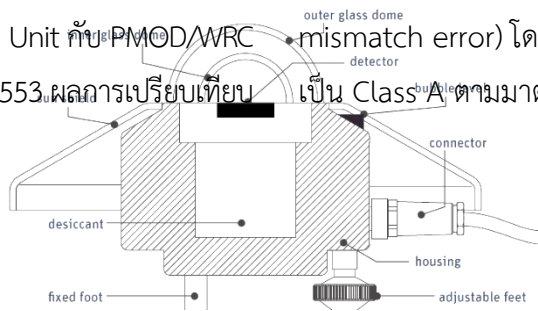
รูปที่ 1 แสดงการตอบสนองเชิงสเปกตรัมของไพรานอมิเตอร์

การสอบเทียบโดยใช้ไพรานอมิเตอร์อ้างอิงเป็นมาตรฐานเทียบตามมาตรฐานหมายเลข ISO 9847:1992 Solar energy- Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer และการสอบเทียบโดยใช้เครื่องวัดรังสีอาทิตย์ทั้งหมด เฉพาะส่วนที่เป็นรังสีตรง (Total direct solar irradiance) ตามมาตรฐานหมายเลข ISO 9847:1993 Solar energy - Calibration of a pyranometer using a pyr heliometer ซึ่งทั้ง 2 มาตรฐานกำหนดให้มีการสอบย้อนกลับได้ทางด้านการวัดไปที่ WRR Scale แต่อย่างไรก็ตามยังสามารถสอบเทียบไพรานอมิเตอร์ได้อีกหลากหลายวิธีการ โดยสามารถสอบย้อนกลับได้ไปที่สเกล SI Unit ตามนิยามหน่วยฐาน ผ่านเครื่องมือมาตรฐานปฐมภูมิทางด้านมาตรวิทยาแสง (Cryogenic Radiometer) ซึ่งแม้ว่าจะไม่ได้เป็นวิธีการตามมาตรฐานระหว่างประเทศ แต่วิธีการเหล่านี้ล้วนเป็นไปตามหลักวิชาการ อีกทั้งมีการลงนามบันทึกความเข้าใจ (MoU) ระหว่าง WMO โดย PMOD/WRC กับสำนักชั่ง ตวง วัดระหว่างประเทศ (BIPM) ในหลายด้านรวมถึงการเปรียบเทียบผลการวัดระหว่างสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติแห่งสหราชอาณาจักร (National Physical Laboratory; NPL-UK) ซึ่งเป็นตัวแทนสเกลของ SI Unit กับ PMOD/WRC ตัวแทนสเกลของ WRR เมื่อปี พ.ศ. 2553 ผลการเปรียบเทียบผลการวัดพบที่มีความแตกต่างกัน

ระหว่างทั้ง 2 สเกลเท่ากับ 0.3 % โดยสเกลของ WRR สูงกว่าสเกลของ SI Unit

การสอบเทียบไพรานอมิเตอร์โดยมีการสอบย้อนกลับได้มาที่สเกลของ SI Unit สามารถทำได้หลากหลายวิธีการ เช่น การสอบเทียบอ้างอิงกับ High temperature blackbody (HTBB) หรือการสอบเทียบอ้างอิงกับ Spectroradiometer เป็นต้น ซึ่งวิธีการเหล่านี้เป็นวิธีการใหม่ ดังนั้นจำเป็นจะต้องมีการทวนสอบวิธีการเหล่านี้ว่ามีความถูกต้องผ่านการเปรียบเทียบผลการวัดหรือช่องทางอื่น

สำหรับการสอบเทียบไพรานอมิเตอร์โดยอาศัยหลักการวิธีการวัดรังสีเชิงสเปกตรัมนั้น จะเป็นการสอบเทียบปริมาณวัดเพื่อกำหนดค่าการตอบสนองต่อความรับรังสีอาทิตย์รวม (Total global solar irradiance responsivity) ในช่วงความยาวคลื่นกว้างที่เครื่องมือมีการตอบสนองเชิงสเปกตรัมต่อรังสีอาทิตย์ (Spectral responsivity) ซึ่งหมายถึง อัตราส่วนระหว่างค่าสัญญาณแสงที่ไพรานอมิเตอร์วัดได้ต่อค่าความรับรังสีอาทิตย์รวมทั้งหมดที่ได้จากเครื่องมือมาตรฐาน สามารถเขียนเป็นสมการดังสมการที่ (1) ทั้งนี้สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติได้ทำการเปิดให้บริการสอบเทียบด้วยวิธีการดังกล่าวนี้เมื่อปี พ.ศ. 2560 โดยใช้ Spectroradiometer มาตรฐานเป็นตัวเทียบอ้างอิงค่าและใช้เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ที่ประกอบจากหลอดซีนอน (Xenon arc lamp) ร่วมกับแผ่นกรองแสง (1.5 Global air mass filter) ที่ทำให้ลักษณะสเปกตรัมเหมือนสเปกตรัมจากดวงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ให้สัญญาณในการสอบเทียบ ทั้งนี้เพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากความไม่สอดคล้องกันเชิงสเปกตรัม (Spectral mismatch error) โดยแหล่งกำเนิดแสงดังกล่าวมีสมบัติเป็น Class 'A' ตามมาตรฐาน IEC 60904-9:2007



$$R_{\text{solar}} = \frac{i}{E_s} = \frac{i}{\int_0^\infty E_{\lambda,c} d\lambda} \quad \text{--- (1)}$$

โดยที่ i คือ ค่าสัญญาณแสงที่ไพรานอมิเตอร์วัดได้ ในหน่วย A หรือ V หรือ W/m^2

E_s คือ ค่าความรับรังสีอาทิตย์รวมทั้งหมดที่ได้จากเครื่องมือมาตรฐาน ในหน่วย W/m^2

$E_{\lambda,c}$ คือ ค่าความรับรังสีเชิงสเปกตรัมที่วัดได้จากเครื่องมือมาตรฐาน ในหน่วย $\text{W/m}^2 \cdot \text{nm}$

ในบางห้องปฏิบัติการอาจจะรายงานผลการวัดเป็นค่าแฟกเตอร์ของการสอบเทียบ (Calibration factor; K_t) ก็ได้ ซึ่งก็คือ ส่วนกลับของค่าการตอบสนองต่อความรับรังสีอาทิตย์รวมทั้งหมด ดังสมการที่ 2

$$K_{\text{solar}} = \frac{1}{R_{\text{solar}}} \quad \text{--- (2)}$$



การสอบเทียบและการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด

การสอบเทียบไพรานอมิเตอร์ชนิดเทอร์โมโพลี จะต้องพิจารณาการอินทิเกรตค่าความรับรังสีเชิงสเปกตรัมที่วัดได้จากเครื่องมือมาตรฐาน ตาม FWHM ของเครื่องมือแต่ละรุ่น และติดตั้งระบบการสอบเทียบในรูปแบบการตกกระทบของลำแสงในมุมปกติ (Normal incident)

กล่าวคือ ลำแสงของเครื่องจำลองแสงอาทิตย์จะตั้งฉากกับระนาบของหัววัดไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer head) และหัวรับแสงของเครื่องวัดรังสีเชิงสเปกตรัมมาตรฐาน (Cosine probe of a standard spectroradiometer) โดยให้พื้นที่รับแสงของทั้ง 2 เครื่องครอบคลุมหมด (Overfill by the radiant flux)

การควบคุมสภาวะแวดล้อม

ห้องปฏิบัติการแสง มีการควบคุมสภาวะแวดล้อมของอุณหภูมิและความชื้น เพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ISO/IEC 17025 โดยที่มีเงื่อนไขการควบคุมดังนี้

อุณหภูมิ ควบคุมไว้ที่ $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$

ความชื้น ควบคุมไว้ที่ $50\% \text{RH} \pm 15\% \text{RH}$

ทั้งนี้ ขึ้นตอนโดยสรุปของการสอบเทียบเป็นดังนี้

1. ทำการติดตั้งหัววัดแสงทั้ง 2 ดังรูปที่ 2 จากนั้นก็ทำการจัดวางแนว (Alignment) โดยใช้เลเซอร์แบบสองทิศทาง (Bi-directional alignment laser) เสร็จแล้วติดตั้งอุปกรณ์อื่น ๆ ดังรูปที่ 3

2. เปิดแหล่งกำเนิดแสง และทำการอุ่นเครื่องเป็นระยะเวลา 30 นาที จากนั้นทำการวัดค่าความรับรังสีเชิงสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงโดยมาตรฐานรังสีเชิงสเปกตรัมมาตรฐานใช้งาน เสร็จแล้วเปลี่ยนตำแหน่งของหัววัดไพรานอมิเตอร์ภายใต้การทดสอบมาให้ตรงกับแนวแกนทัศนศาสตร์ (Optical axis) และทำการวัดค่าความรับรังสีรวมทั้งหมด (Total global solar irradiance) ที่ไพรานอมิเตอร์วัดได้ เมื่อเสร็จแล้วจึงปิดแหล่งกำเนิดแสง



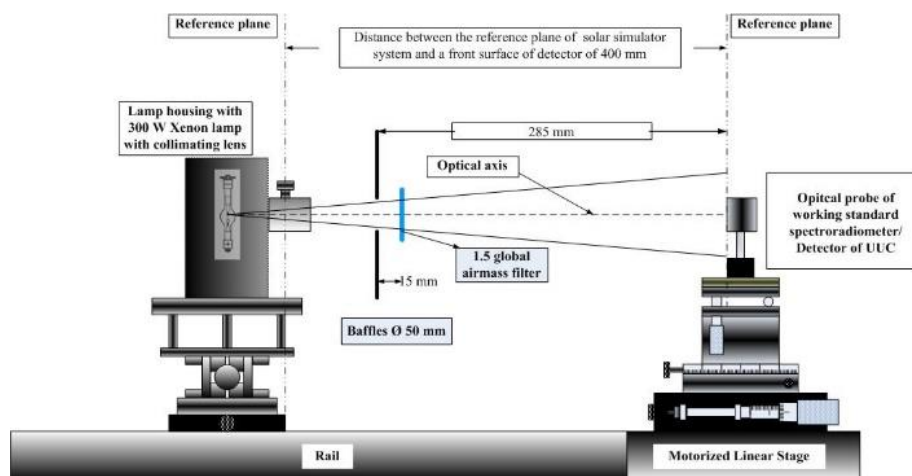


รูปที่ 2 แสดงการติดตั้งหัววัดแสง

ความไม่แน่นอนของการวัด

การคำนวณความไม่แน่นอนของการวัดใช้วิธีการตาม GUM ร่วมกับแบบจำลองการสุ่มด้วยวิธีการ Monte-Carlo Simulation มีองค์ประกอบของความไม่แน่นอนของการวัดดังนี้

- ความไม่แน่นอนของการวัดเนื่องจากการวัดซ้ำ (Repeatability) ของไพรานอมิเตอร์
- ความไม่แน่นอนของการวัดเนื่องจากการวัดซ้ำของการวัดสเปกตรัมด้วยมาตรรังสีเชิงสเปกตรัมมาตรฐาน โดยการใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนรวม (Covariance analysis)
- ความไม่แน่นอนของการวัดเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของความยาวคลื่น (Wavelength accuracy) จากเครื่องวัดรังสีเชิงสเปกตรัมมาตรฐาน มีการประเมินที่ ± 0.3 นาโนเมตร ในช่วง UV/VIS และ ± 1.0 นาโนเมตร ในช่วง NIR/MIR
- ความไม่แน่นอนของการวัดจากสเกลการสอบเทียบของเครื่องวัดรังสีเชิงสเปกตรัมมาตรฐาน



รูปที่ 3 แสดงการติดตั้งระบบในการสอบเทียบ

- ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความละเอียดเชิงสเปกตรัม (Spectral resolution or Bandwidth) ของเครื่องวัดรังสีเชิงสเปกตรัมมาตรฐาน
- ความไม่แน่นอนของการวัดเนื่องจากการทำ Spline Interpolation ของค่าความรับรังสีเชิงสเปกตรัมที่วัดได้จากเครื่องวัดรังสีเชิงสเปกตรัมมาตรฐาน
- ค่าความไม่แน่นอนของการวัดเนื่องจากแสงรบกวน (Stray light)
- ค่าความไม่แน่นอนของการวัดเนื่องจากความเสถียรของเครื่องวัดรังสีเชิงสเปกตรัมมาตรฐาน
- ค่าความไม่แน่นอนของการวัดเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอความรับรังสีเชิงพื้นที่ของแหล่งกำเนิดแสง (Non-uniformity of source) ที่ใช้ในการสอบเทียบ
- ค่าความไม่แน่นอนของการวัดเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเครื่องวัดรังสีเชิงสเปกตรัมมาตรฐาน
- ความไม่แน่นอนของการวัดเนื่องจากความแตกต่างของระยะห่างระหว่าง 2 หัวรับแสงกับระยะอ้างอิงของแหล่งกำเนิดแสง
- ความไม่แน่นอนของการวัดเนื่องจากมุมของการติดตั้ง (Angular Setting) ของเครื่องวัดรังสีเชิงสเปกตรัมมาตรฐาน
- ความไม่แน่นอนของการวัดเนื่องจากการเลื่อนค่าสเกลของเครื่องวัดรังสีเชิงสเปกตรัมมาตรฐาน
- ความไม่แน่นอนของการวัดเนื่องจากความละเอียดของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ใช้ในการอ่านค่าจากไพรานอมิเตอร์
- ความไม่แน่นอนของการวัดเนื่องจากอุณหภูมิสถานะแวดล้อมต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความรับรังสีรวมทั้งหมดของไพรานอมิเตอร์
- ค่าความไม่แน่นอนของการวัดเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของมุมการติดตั้ง (Tilt Setting) ของไพรานอมิเตอร์

ค่าความไม่แน่นอนของการวัดโดยทั่วไปสำหรับไพรานอมิเตอร์ชนิดเทอร์โมไฟล์ สำหรับเครื่องมือภายใต้การทดสอบรุ่น CMP22 ของยี่ห้อ Kipp & Zonen พบว่ามีค่าเท่ากับ 3.4 % ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($k=2$)

อภิปรายและสรุปผล

ระบบการสอบเทียบไพรานอมิเตอร์ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ยังไม่สมบูรณ์แบบมากนัก เนื่องด้วยไม่มีเครื่องวัดรังสีเชิงสเปกตรัมมาตรฐานที่วัดได้ครอบคลุมตาม FWHM ของไพรานอมิเตอร์แต่ละรุ่น แต่ละยี่ห้อ แต่อย่างไรก็ตามได้มีการชดเชยแก้ค่าโดยอาศัยการกระจายตัวเชิงสเปกตรัม (Relative power distribution) ของเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการสอบเทียบ และอาศัยหลักการแปลงรังสีแสงของหลอดประเภทซีนอน นอกจากนี้สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติยังได้ทำการร่วมวิจัยเปรียบเทียบผลการวัดกับห้องปฏิบัติการสอบเทียบเครื่องวัดรังสีอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร พบว่าเมื่อใช้เกณฑ์การตัดสินที่ด้วยเกณฑ์ $En \text{ Ratio} \leq 0.5$ พบว่าการเปรียบเทียบผลการวัดผ่านเกณฑ์ดังกล่าว

ไพรานอมิเตอร์ที่ได้รับการสอบเทียบแล้ว เมื่อนำไปใช้งานวัดรังสีอาทิตย์จากแสงแดดจำเป็นจะต้องพิจารณาความคลาดเคลื่อนอื่นๆ เพิ่มเติมเข้าไปด้วยนอกเหนือจากความไม่แน่นอนของการวัด เช่น ค่าความผิดพลาดเชิงมุมตามกฎของโคไซน์ (Cosine response error) ค่าความผิดพลาดเนื่องจากความเป็นเชิงเส้น (Non-linearity) ค่าความผิดพลาดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature dependent effect error) การเลื่อนค่าสเกลของเครื่องมือ (Drift of instrument) เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณกลุ่มงานแสงและสี ฝ่ายมาตรวิทยาอุณหภูมิและแสง ที่ช่วยให้ความคิดเห็นและเป็นที่ปรึกษาในการสร้างระบบสอบเทียบดังกล่าวนี้ และขอขอบพระคุณ ศ.ดร.เสริม จันทรฉาย อ.ดร.กรทิพย์ โต๊ะสิงห์ และ อ.ดร.สมเจตน์ ภัทรพานิชชัย ห้องปฏิบัติการสอบเทียบเครื่องวัดรังสีอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่อนุเคราะห์การเปรียบเทียบผลการวัดและอนุเคราะห์องค์ความรู้เพิ่มเติม

เอกสารอ้างอิง

สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (ประเทศไทย) (2560) เอกสารคุณภาพ “Calibration of Solar Irradiance Responsivity of a Si-Detector Pyranometer by Comparison against a Working Standard Spectroradiometer applying a Solar Simulator System as a Calibration Light Source” ประเทศไทย

U.S. Department of Energy, “The history of solar” https://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar_timeline.pdf.

ราชบัณฑิตยสถาน. “ศัพท์เทคโนโลยีทางภาพ”. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ ฯ : ด่านสุทธาการพิมพ์, 2548.

ISO 9847:1992 Solar energy -- Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer



สถาบันคุณวุฒิวิชาชีพ (องค์การมหาชน) ตรวจสอบประเมินสถานที่จัดสอบ
วันที่ 25 มิถุนายน 2562
ณ ศูนย์ทดสอบมาตรฐานวิทยา
สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
นิคมอุตสาหกรรมบางปู



การประชุมคณะกรรมการสมาคมมาตรวิทยาแห่งประเทศไทย
วันที่ 23 กรกฎาคม 2562 ณ โรงแรมมารวย การ์เด็น



นายกสมาคมฯ เข้าพบเลขาธิการคณะกรรมการการอาชีวศึกษา

วันที่ 7 สิงหาคม 2562

ณ สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา

