

การศึกษาเงื่อนไขตัวแปรธรรมชาติที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการทดสอบ สมรรถนะตัวรับรังสีอาทิตย์ในประเทศไทย

พรพิมล เพ็ชรวัฒนา¹ สมบูรณ์ คงเพชรศักดิ์¹ ศิริรุช จินดารักษ์² และ นิพนธ์ เกตุจ้อย^{3*}
มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก 65000

รับเมื่อ 7 ธันวาคม 2547 ตอบรับเมื่อ 27 กรกฎาคม 2548

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเงื่อนไขตัวแปรธรรมชาติที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีแผ่นเรียบ แบบกลางแจ้งสำหรับประเทศไทย โดยทำการศึกษาเงื่อนไขการทดสอบสมรรถนะทางความร้อนตามมาตรฐานการทดสอบตัวรับรังสีแผ่นเรียบของ American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) Standard 93-1986 และ Australian Standard รวมถึงศึกษาความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ อัตราเร็วลม และอุณหภูมิเฉลี่ยในประเทศไทย เพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดมาตรฐานตัวรับรังสีแผ่นเรียบที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย ผลการศึกษาทำให้ได้ School of Renewable Energy Technology (SERT) Standard 2003 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่แสดงประสิทธิภาพทางความร้อนของตัวรับรังสีดวงอาทิตย์ในรูปสมการถดถอยเชิงเส้นคือ $\eta = F_R[(\tau\alpha)_e - U_L(T_i - T_a)/I_t]$ ซึ่งสามารถบ่งชี้ค่าผลคูณระหว่างสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนของตัวรับรังสีดวงอาทิตย์กับสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของตัวรับรังสีดวงอาทิตย์ ($F_R U_L$) และผลคูณระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนของตัวรับรังสีดวงอาทิตย์กับผลคูณประสิทธิภาพของค่าการส่งผ่านและค่าดูดกลืนรังสี ($F_R(\tau\alpha)_e$) ตัวอย่างผลการทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีแผ่นเรียบแบบกลางแจ้งตาม SERT Standard 2003 คือ $\eta = 0.499 - 16.996(T_i - T_a)/I_t$ ได้ $F_R U_L = 16.996 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ และ $F_R(\tau\alpha)_e = 0.499$ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบตาม SERT Standard 2003 กับ ASHRAE Standard 93-1986 และ Australian Standard ผลการเปรียบเทียบพบว่าประสิทธิภาพที่ได้จาก SERT standard 2003 มีค่าแตกต่างกับมาตรฐาน ASHRAE และ Australian ประมาณร้อยละ 1.2 และ 5.1 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า SERT Standard 2003 ให้ผลการทดสอบที่สอดคล้องกับมาตรฐานสากล ภายใต้เงื่อนไขตัวแปรธรรมชาติได้แก่ อุณหภูมิแวดล้อม และอัตราเร็วลม ซึ่งการทดสอบสามารถกระทำได้สะดวกในประเทศไทย จึงทำให้ SERT Standard 2003 เป็นมาตรฐานการทดสอบตัวรับรังสีแบบกลางแจ้งที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย

คำสำคัญ : ตัวรับรังสี / สมรรถนะทางความร้อน / ASHRAE Standard / Australian Standard / SERT Standard

¹ นักศึกษาปริญญาตรี ภาควิชาฟิสิกส์

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาฟิสิกส์

³ อาจารย์ วิทยาลัยพลังงานทดแทน

* Corresponding author: E-mail address: ketjoy@yahoo.com, niponk@nu.ac.th

A Study of Suitable Meteorological Condition for Solar Collector Performance Testing for Thailand

**Pornpimon Phetwattana ¹, Somboon Khongphetsak ¹, Sirinuch Jindarak ²,
and Nipon Ketjoy^{3,*}**

Naresuan University, Phitsanulok 65000

Received 7 December 2004 ; accepted 27 July 2005

Abstract

This research purpose is to study suitable meteorological condition for outdoor testing of thermal efficiency of flat plate solar collector for Thailand. The condition of thermal efficiency testing of flat plate solar collector is conducted based on American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) Standard 93-1986 and Australian Standard. Solar radiation, wind velocity, and average temperature in Thailand are also taken into account in the test. Based on the above test, the School of Renewable Energy Technology (SERT) Standard 2003, which shows solar collector efficiency in the form of linear equation $\eta = F_R[(\tau\alpha)_e - U_L(T_i - T_a)/I_t]$, is developed. The equation shows the products of the heat transfer coefficient and over all heat loss coefficients ($F_R U_L$), and the heat transfer coefficient and an effective transmittance-absorbance product ($F_R(\tau\alpha)_e$). For example, thermal efficiency of SERT Standard 2003 is $\eta = 0.499 - 16.996(T_i - T_a)/I_t$, $F_R U_L = 16.996 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ and $F_R(\tau\alpha)_e = 0.499$, of which the result is 1.2% and 5.1% different from ASHRAE and Australian Standard respectively. The result shows that SERT Standard 2003 corresponds to International Standards under meteorological condition such ambient temperature and wind velocity of Thailand. Then SERT Standard 2003 is suitable for flat plate solar collector outdoor testing in Thailand.

Keywords : Collector / Thermal Efficiency / ASHRAE Standard / Australian Standard / SERT Standard

¹ Under-graduated Student, Department of Physics.

² Assistant Professor, Department of Physics.

³ Lecturer, School of Renewable Energy Technology.

* Corresponding author: E-mail address: ketjoy@yahoo.com, niponk@nu.ac.th

1. บทนำ

ประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง ด้วยศักยภาพด้านพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีค่อนข้างสูงทำให้เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (solar water heater) สามารถใช้ได้ดีในประเทศไทย เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ประกอบด้วยอุปกรณ์หลักสองส่วน คือส่วนรับรังสีดวงอาทิตย์ (solar collector) เพื่อทำให้น้ำร้อน และส่วนที่ใช้กักเก็บน้ำร้อนหรือถังน้ำร้อน (storage tank) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

(ที่มา: บ้านพลังงานแสงอาทิตย์ โครงการสวนพลังงาน มหาวิทยาลัยนครสวรรค์)

ปัจจุบันกระแสดันตัวเกี่ยวกับการใช้เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มีมากขึ้น ธุรกิจเกี่ยวกับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เริ่มเกิดการแข่งขัน เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แต่ละชนิดที่ออกสู่ตลาดจึงมีความหลากหลายทั้งชนิด ราคา และคุณภาพ มาตรฐานการทดสอบจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะบ่งชี้ประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อน ซึ่งมาตรฐานที่ใช้ต้องเหมาะสมและเป็นที่ยอมรับเพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการตัดสินใจเลือกซื้อของผู้บริโภค

ประเทศไทยมีมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมสำหรับตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบ โดยมาตรฐานดังกล่าวจะทำการทดสอบทั้งคุณภาพของวัสดุที่นำมาใช้สร้างตัวรับรังสีว่ามีความแข็งแรงทนทานต่อสภาพอากาศของประเทศไทยหรือไม่ ส่วนการทดสอบสมรรถนะทางความร้อนจะอ้างอิงมาตรฐานการทดสอบของมาตรฐาน ASHRAE 93 เป็นหลัก [1] เนื่องจากยังไม่มีประกาศกำหนดการทดสอบแบบอื่นๆ แต่การทดสอบโดยใช้มาตรฐาน ASHRAE 93 ยังไม่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย เพราะมาตรฐานนี้กำหนดขึ้นเพื่อใช้ในภูมิภาคที่มีอุณหภูมิอากาศแวดล้อมเฉลี่ยค่อนข้างต่ำ ซึ่งแตกต่างจากประเทศไทยที่มีสภาพอากาศเป็นแบบร้อนชื้น มีอุณหภูมิอากาศแวดล้อมค่อนข้างสูง ทำให้การทดสอบทำได้ยากมากในพื้นที่ของประเทศไทย เพราะไม่สามารถควบคุมสภาพทดสอบได้ตามมาตรฐานที่กำหนด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาเงื่อนไขทางธรรมชาติที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทยเพื่อใช้บ่งชี้ประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ [2]

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาเงื่อนไขตัวแปรธรรมชาติที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีแผ่นเรียบแบบกลางแจ้ง สำหรับประเทศไทย

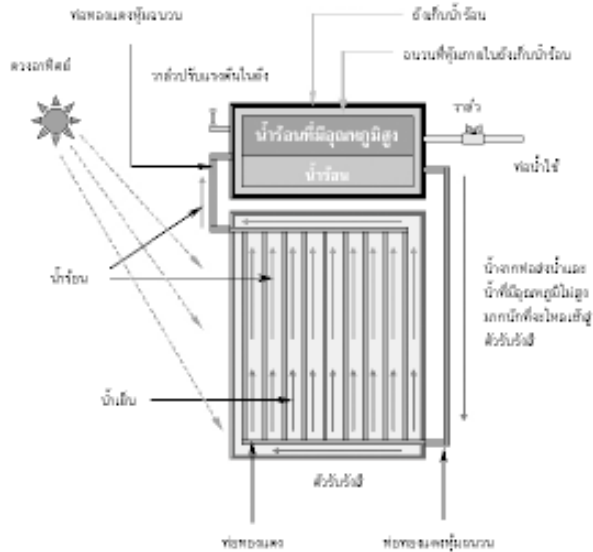
โดยการทดสอบใช้แทนทดสอบ ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร ซึ่งตั้งอยู่บนเส้นละติจูด $16^{\circ} 44'$ เหนือและลองจิจูด $100^{\circ} 11'$ ตะวันออก

3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบเป็นอุปกรณ์ที่สามารถรับแสงจากดวงอาทิตย์และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนและถ่ายเทให้กับของไหลหรือสารทำงาน (working fluid) เพื่อนำไปใช้งาน ของไหลที่ใช้โดยมากมักได้แก่น้ำหรืออากาศ ตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบนับเป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้กันแพร่หลายเมื่อเปรียบเทียบกับตัวรับรังสีแบบอื่นๆ ตัวอย่างของการประยุกต์ใช้ได้แก่ ระบบผลิตน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ซึ่งใช้ตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบเป็นตัวดูดรังสี

ตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบมีความเหมาะสมกับงานที่ไม่ต้องการอุณหภูมิสูงคือประมาณ $50 - 60^{\circ}\text{C}$ ในขณะที่อากาศแวดล้อมมีอุณหภูมิระหว่าง $10 - 30^{\circ}\text{C}$ หรืออาจสูงถึง $80 - 90^{\circ}\text{C}$ ถ้าตัวดูดรังสีเป็นแบบผิวเลือกรังสีหรือมีแผ่นใสปิดด้านบนของตัวรับรังสีมากกว่าหนึ่งชั้น แม้ว่าตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบจะมีข้อจำกัดด้านความไม่เหมาะสมในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง แต่ก็มีข้อดีหลายอย่างเมื่อเปรียบเทียบกับตัวรับรังสีแบบอื่นๆ เช่น สามารถรับได้ทั้งรังสีตรงและรังสีกระจาย ไม่ต้องมีกลไกในการบังคับให้ตัวรับรังสีหันหน้าเข้าหาดวงอาทิตย์ มีความจำเป็นในการบำรุงรักษาน้อยและที่สำคัญที่สุดคือมีความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งในหลายๆ กรณีเช่นระบบผลิตน้ำร้อนสำหรับบ้านพักอาศัย

แผ่นดูดรังสีจะดูดกลืนแสงอาทิตย์และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน แล้วถ่ายเทโดยการนำจากแผ่นดูดรังสีไปยังท่อโลหะ และของไหลที่ไหลอยู่ในท่อด้านข้างและด้านหลังของตัวรับรังสีจะมีฉนวนเพื่อลดการสูญเสียความร้อน กระจกใสยอมให้รังสีดวงอาทิตย์ส่องผ่านและช่วยป้องกันไม่ให้รังสีความร้อน ซึ่งเป็นรังสีประเภทคลื่นยาวส่งผ่านจากตัวดูดรังสีกลับไปยังบรรยากาศภายนอก การสูญเสียความร้อนจากตัวรับรังสีไปยังบรรยากาศภายนอกมีทั้งการนำ การพา และการแผ่รังสี ซึ่งสามารถแบ่งบริเวณที่มีการสูญเสียความร้อนเป็นสามบริเวณคือ ด้านบน ด้านหลัง และด้านข้างของตัวรับรังสี [3]



รูปที่ 2 หลักการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
(ที่มา: วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร)

หลักการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์อาศัยปรากฏการณ์หมุนเวียนความร้อนแบบธรรมชาติที่เรียกว่า thermosyphon โดยน้ำร้อนซึ่งมีความหนาแน่นน้อยจะเคลื่อนที่ขึ้นไปยังถังเก็บน้ำร้อนขณะที่น้ำเย็นซึ่งมีความหนาแน่นสูงกว่าจะไหลลงด้านล่างของตัวรับรังสีดวงอาทิตย์ จากรูปที่ 2 น้ำเย็นในส่วนล่างของถังเก็บน้ำร้อนจะไหลผ่านตัวรับรังสีดวงอาทิตย์ ซึ่งจะทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนให้แก่ น้ำเย็น เมื่อน้ำเย็นมีอุณหภูมิสูงขึ้นก็จะลอยตัวขึ้นตามท่อทองแดงที่อยู่ภายในตัวรับรังสีไหลเข้าไปสู่ถังเก็บน้ำร้อนและลอยตัวขึ้นสู่ส่วนบนของถังพร้อมที่จะนำไปใช้ได้และวนเวียนเช่นนี้อย่างเป็นระบบ [4]

เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบมีราคาต่อระบบประมาณ 30,000-35,000 บาท ขนาดตัวรับรังสีประมาณ 2 ตารางเมตร สามารถผลิตน้ำร้อนได้วันละ 200 ลิตร ที่อุณหภูมิ 60-90 °ซ มีอายุการใช้งานยาวนานถึง 10 ปี และสามารถคืนทุนได้ภายใน 4-5 ปี น้ำร้อนที่ผลิตได้จากเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มีปริมาณมากเพียงพอเพื่อใช้อาบ ใช้ทำความสะอาดสุขภัณฑ์ ล้างภาชนะ ชักผ้า ฯลฯ นอกจากนี้ น้ำที่ทิ้งจากการใช้น้ำร้อนยังสามารถช่วยไล่หนู แมลงสาบ และชำระล้างไขมันที่อุดตันในระบบท่อน้ำทิ้ง น้ำร้อนที่ผลิตได้จากพลังงานแสงอาทิตย์ช่วยประหยัดพลังงาน เป็นการใชพลังงานจากธรรมชาติ และช่วยรักษาสีสิ่งแวดล้อม

เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายทั้งในยุโรป อเมริกา แคนาดา ญี่ปุ่น และจีน ส่วนในประเทศไทยในช่วงแรกยังไม่แพร่หลายเท่าที่ควรเพราะราคาเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มีราคาแพงกว่าแบบใช้ไฟฟ้าและก๊าซหุงต้ม อีกทั้งบริการหลังการขาย และการซ่อมบำรุงทำได้ไม่ถี่นัก เพราะส่วนมากตัวแทนจำหน่ายจะอยู่ในส่วนกลาง แต่ผู้ใช้ส่วนมากจะอยู่ในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบน ซึ่งเป็นบริเวณที่มีอากาศค่อนข้างหนาว

ประชากรที่อาศัยในเขตเทศบาลร้อยละ 5 – 8 (ประมาณ 7 ล้านครัวเรือน) ใช้เครื่องทำน้ำร้อนจากไฟฟ้า และก๊าซหุงต้ม ประชากรในชนบทบางส่วนใช้น้ำร้อนจากการหุงต้มด้วยฟืนร้อยละ 60 ที่เหลือใช้ก๊าซหุงต้มและถ่าน หากประเมินการใช้เครื่องทำน้ำร้อนด้วยพลังงานไฟฟ้าที่มีอยู่ประมาณร้อยละ 5 ของครัวเรือนที่มีอยู่ทั้งหมดในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือประมาณ 3.5 แสนครัวเรือน จะใช้ไฟฟ้าถึงวันละประมาณ 2.8×10^6 กิโลวัตต์ คิดเป็นค่าพลังงานไฟฟ้าประมาณ 1 พันล้านบาทต่อปี และเป็นการใช้ไฟฟ้าในช่วง Peak Load ในส่วนของโรงแรมมีการใช้น้ำร้อนประมาณ 1.3 ล้านลิตรต่อวัน คิดเป็นพลังงานความร้อน 163 GJ ต่อวัน เท่ากับพลังงานไฟฟ้า 45,278 กิโลวัตต์ ต่อวัน เทียบเท่ากับก๊าซธรรมชาติ 6,123 ลิตรต่อวัน และน้ำมันดีเซล 4,476 ลิตรต่อวัน [5]

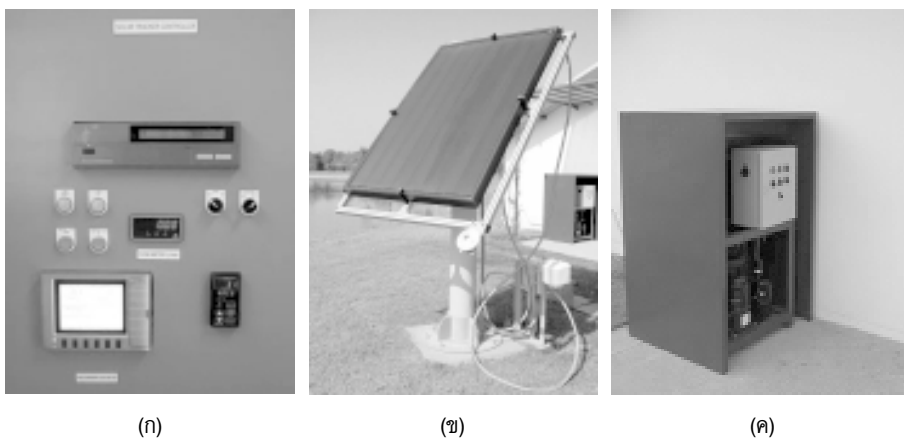
ตัวรับรังสีดวงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์หลักในระบบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ตัวรับรังสีที่ดีจะต้องมีสมรรถนะทางความร้อนสูง การทดสอบสมรรถนะทางความร้อนแบบกลางแจ้งมีอยู่หลายมาตรฐาน โดยปกติแล้วจะมีความแตกต่างกันที่เงื่อนไขทางธรรมชาติที่ใช้สำหรับการทดสอบ ซึ่งแต่ละมาตรฐานก็กำหนดเงื่อนไขให้สอดคล้องกับสภาพภูมิอากาศของท้องถิ่น Fischer [2] ได้นำเสนอบทความเรื่องมาตรฐานการทดสอบระบบพลังงานแสงอาทิตย์และอุปกรณ์ประกอบตัวรับรังสีดวงอาทิตย์ European Standard EN 12975:2000 ซึ่งได้ประกาศใช้เมื่อ เมษายน พ.ศ. 2544 มีผลทำให้มาตรฐานอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบดังกล่าวที่ใช้อยู่ในกลุ่มประเทศยุโรปต้องถูกยกเลิกไป และต้องใช้มาตรฐานใหม่ที่กำหนดขึ้นเท่านั้น มาตรฐานนี้ได้กำหนดวิธีการทดสอบความทนทาน ความเชื่อถือ และความปลอดภัยของตัวรับรังสีแบบทำของเหลวร้อน มาตรฐานได้ระบุวิธีการทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีแบบทำของเหลวร้อนไว้สองวิธี ได้แก่ การทดสอบแบบสภาวะคงที่ตามมาตรฐาน ISO 9806-1 ISO 9806-3 และ ASHARE 93-77 สำหรับการทดสอบของ EN 12975 จะยอมรับการทดสอบแบบสภาวะกึ่งไม่คงที่ด้วย Maxwell Li [6] ได้ทำการศึกษาความไม่แน่นอนของการทดสอบตัวรับรังสีภายใต้มาตรฐาน ISO 9806-1 ผลการศึกษาพบว่าค่าประสิทธิภาพทางความร้อนของตัวรับรังสีที่ทดสอบมีความไม่แน่นอนร้อยละ 1.6 Abdullah [7] ได้ทำการทดสอบตัวรับรังสีด้วยมาตรฐาน ASHRAE 93-86 โดยใช้เงื่อนไขการทดสอบที่ค่ารังสีดวงอาทิตย์ประมาณ 800 วัตต์/ม.² อุณหภูมิอากาศแวดล้อม 40 °ซ ซึ่งเป็นสภาพภูมิอากาศในช่วงเที่ยงวันของประเทศคูเวตในช่วงฤดูใบไม้ผลิและฤดูร้อน การทดสอบทำโดยการป้อนน้ำเข้าที่อุณหภูมิ 40 – 85 °ซ ที่อัตราการไหล 0.01 – 0.017 กก./วินาที ผลการทดสอบนำเสนอในรูปแบบกราฟและสมการประสิทธิภาพของตัวรับรังสี ซึ่งได้จากการเฉลี่ยข้อมูล 15 ค่าในแต่ละจุด การทดสอบในแต่ละครั้งใช้เวลาประมาณ 15 นาที พบว่าการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของอุณหภูมิอากาศแวดล้อมคือ ± 0.5 °ซ อุณหภูมิน้ำเข้า ± 0.1 °ซ และอุณหภูมิน้ำออก ± 0.3 °ซ โดยที่ค่ารังสีดวงอาทิตย์เปลี่ยนแปลงสูงสุดที่ ± 16 วัตต์/ม.²

4. วัสดุและอุปกรณ์

งานวิจัยนี้ใช้ระบบทดสอบตัวรับรังสีดวงอาทิตย์ ที่ตั้งอยู่ ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร ซึ่งสามารถใช้ทดสอบตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แผ่นเรียบแบบกลางแจ้ง โดยระบบทดสอบสามารถแบ่งออกเป็นส่วนต่างๆ ได้ดังนี้

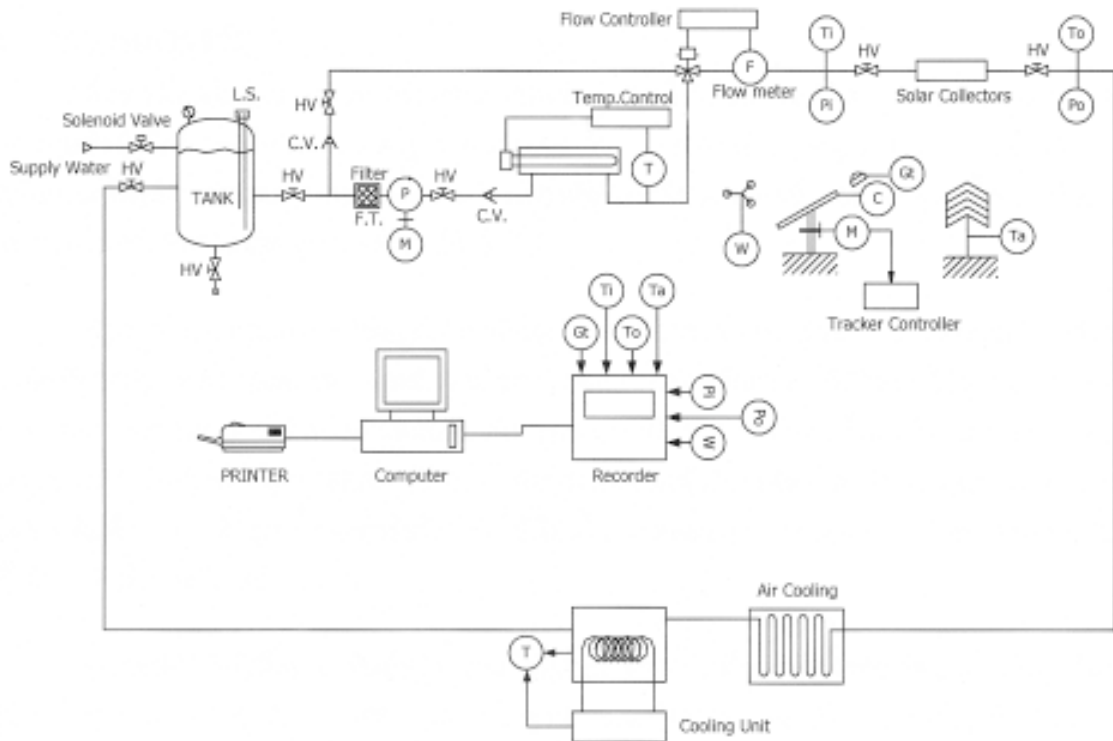
- ส่วนควบคุมระบบ (control system) ประกอบไปด้วย สวิตซ์เปิด – ปิด สามารถเลือกการควบคุมระบบด้วยมือ/อัตโนมัติ (manual/auto) เครื่องบันทึกข้อมูล (data recorder) ทำหน้าที่เก็บข้อมูลในระหว่าง

การทดสอบทุกๆ 10 วินาที เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller) ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิ น้ำที่ไหลเข้าตัวรับรังสีดวงอาทิตย์ให้เป็นไปตามที่กำหนด เครื่องควบคุมอัตราการไหล (flow controller) ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำในระบบให้คงที่ เครื่องควบคุมระบบติดตามดวงอาทิตย์ (solar tracker controller) ทำหน้าที่ปรับแทนทดสอบเพื่อให้ระนาบของตัวรับรังสีดวงอาทิตย์ตั้งฉากกับรังสีดวงอาทิตย์ ดังรูปที่ 3 (ก)



รูปที่ 3 (ก) ส่วนควบคุม (ข) แทนทดสอบ (ค) ส่วนทำความเย็น

- ส่วนควบคุมน้ำ (water controller) ประกอบไปด้วย ถังกักเก็บน้ำ (storage tank) ปั๊มน้ำ (water pump) ทำหน้าที่สูบน้ำจากถังเก็บน้ำเข้าสู่ตัวรับรังสีดวงอาทิตย์ และเครื่องทำความร้อน (heater) ทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่น้ำเพื่อให้ได้อุณหภูมิตามที่กำหนด จากนั้นน้ำจะถูกส่งไปที่ตัวรับรังสีดวงอาทิตย์
- แทนทดสอบ (test base) ทำหน้าที่ปรับระนาบของตัวรับรังสีดวงอาทิตย์ให้ตั้งฉากกับรังสีดวงอาทิตย์ ตัวรับรังสีดวงอาทิตย์ที่ใช้ในการระบบทดสอบนี้มีความยาว 1.8 ม. ความกว้าง 1.2 ม. ความหนา 0.76 ม. พื้นที่ตัวรับรังสีดวงอาทิตย์ทั้งหมด 2.16 ม.² และมีพื้นที่รับแสงอาทิตย์สุทธิ 2.13 ม.² ดังรูปที่ 3 (ข)
- ส่วนทำความเย็น (cooling unit) ทำหน้าที่พักน้ำร้อนที่ไหลออกมาจากตัวรับรังสีแล้วลดอุณหภูมิน้ำให้ต่ำลงก่อนส่งน้ำกลับไปยังถังกักเก็บน้ำ ในส่วนควบคุมน้ำ ดังรูปที่ 3 (ค)



C : Solar Collector, C.V. : Check valve, F : Flow transducer, F.T. : Water filter, Gt : Solar radiation on collector plane, HV : Hand valve, L.S. : Level switch control, M : AC motor drive pump, P : Water pump, Pi : Pressure transducer inlet, Po : Pressure transducer outlet, T : Temperature heating control, Ta : Ambient temperature, Ti : Inlet temperature, To : Outlet temperature, W : Wind speed

รูปที่ 4 แผนผังของระบบทดสอบที่ใช้ในการทำวิจัย

ตารางที่ 1 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ

รายการ	เครื่องมือวัด
1. ค่ารังสีดวงอาทิตย์	Pyranometer CM11 (Kipp & Zonen) Temperature response $\pm 1\%$, Spectral response $\pm 2\%$, Non-linearity $\pm 0.6\%$, Tilt response $\pm 0.25\%$.
2. อุณหภูมิ	Pt100 (Wilmers Meßtechnik) Accuracy $\pm 0.1\%$ °C
3. อัตราเร็วลม	Wind Speed Sensor Model010C (Met One Instrument) Accuracy ± 0.15 mph
4. อัตราการไหล	Flow meter DHSF (meister strömungstechnik) Accuracy $\pm 1.0\%$ of rate
5. ความดัน	Pressure transmitter ST 18 (NUOVA FIMA) Accuracy ± 3.5 kPa
6. เครื่องบันทึกข้อมูล	Data recorder (Endress + Hauser) Base Accuracy $0.25\%FSD \pm 1$ digit, Analog/Digital input, Scan cycle 125 ms/channel, Input impedance 1 MOhm

5. วิธีดำเนินการวิจัย

ศึกษาเงื่อนไขการทดสอบ กระบวนการทดสอบ รวมถึงวิธีวิเคราะห์ผลการทดสอบ และทดลองทดสอบตัวรับรังสีแผ่นเรียบตามมาตรฐาน ASHRAE 93 – 1986 และมาตรฐาน AUSTRALIA [8] สรุปหลักเกณฑ์ที่ใช้ทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีดวงอาทิตย์จากมาตรฐานทั้งสองเพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดมาตรฐาน SERT 2003

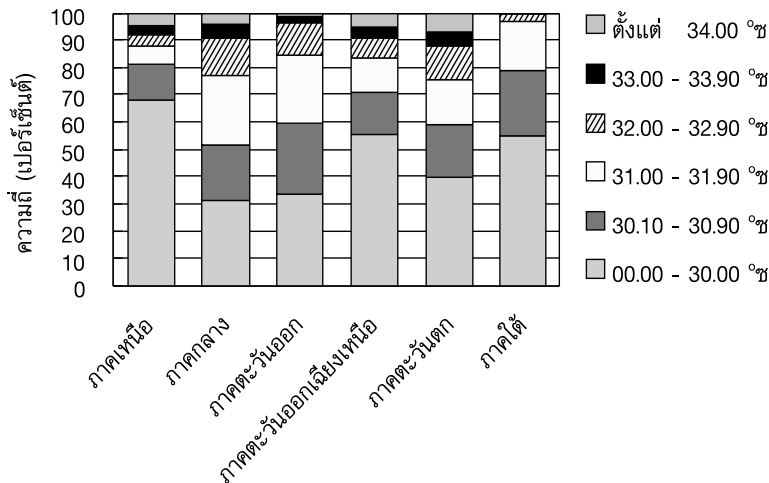
ทำการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติของอุณหภูมิอากาศ อัตราเร็วลม และค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ของประเทศไทยเพื่อใช้กำหนดเงื่อนไขการทดสอบตามหลักเกณฑ์ที่กำหนดไว้ข้างต้น จากนั้นกำหนดสภาวะการทดสอบสำหรับทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีแผ่นเรียบแบบกลางแจ้งที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย (SERT 2003) ทำการทดสอบตัวรับรังสีดวงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบแบบกลางแจ้งเพื่อหาประสิทธิภาพของตัวรับรังสีโดยใช้เงื่อนไขการทดสอบที่กำหนดขึ้น โดยกำหนดอุณหภูมิน้ำที่ไหลเข้าตัวรับรังสีคือ 30 - 40 °ซ

ทดสอบตัวรับรังสีดวงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบแบบกลางแจ้งเพื่อหาประสิทธิภาพของตัวรับรังสีโดยใช้มาตรฐาน ASHRAE 93 – 1986 และมาตรฐาน AUSTRALIA เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับมาตรฐานที่กำหนดขึ้น โดยกำหนดอุณหภูมิน้ำที่ไหลเข้าตัวรับรังสีค่าเดียวกัน วิเคราะห์ผลการทดสอบโดยนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาประสิทธิภาพทางความร้อนของตัวรับรังสี แสดงผลการทดสอบในรูปกราฟประสิทธิภาพ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากการทดสอบในแต่ละมาตรฐาน และสรุปผลการหามาตรฐานการทดสอบตัวรับรังสีอาทิตย์แบบกลางแจ้งที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย

6. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

6.1 ผลการศึกษาข้อมูลด้านอุณหภูมิอากาศของประเทศไทยและการกำหนดอุณหภูมิอากาศแวดล้อมระหว่างทดสอบตัวรับรังสีดวงอาทิตย์

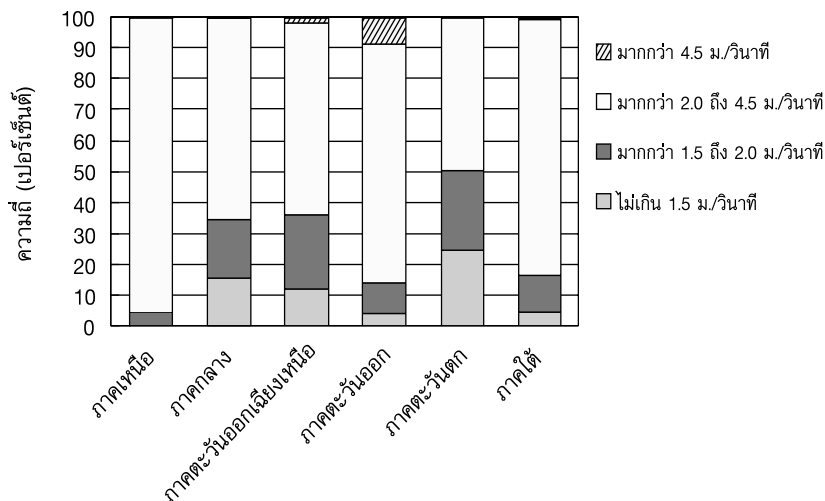
จากสถิติของอุณหภูมิอากาศแวดล้อมจากสถานีตรวจวัดต่างๆ ทั่วประเทศของประเทศไทย ซึ่งได้ศึกษาข้อมูล 10 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2529–2538 (ที่มา: www.teenet.chula.ac.th) โดยกำหนดให้มีความถี่ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 พบว่า อุณหภูมิอากาศแวดล้อมในทุกภาคของประเทศไทยแสดงในรูปที่ 5 พบว่าอยู่ในช่วง 0 – 33 °ซ แต่เนื่องจากการทดสอบตัวรับรังสีดวงอาทิตย์ อุณหภูมิของอากาศแวดล้อมระหว่างการทดสอบสามารถแปรผันได้สูงสุด ± 1 °ซ (อ้างอิงตามมาตรฐาน ASHRAE 93 – 1986) เพราะฉะนั้นอุณหภูมิอากาศแวดล้อมสูงสุดในระหว่างการทดสอบตัวรับรังสีดวงอาทิตย์จึงควรกำหนดให้มีค่าไม่เกิน 34 °ซ ในกรณีที่อุณหภูมิสูงกว่านี้จะไม่ทำการทดสอบ



รูปที่ 5 ความถี่ของการพบอุณหภูมิอากาศแวดล้อมในช่วงต่างๆ

6.2 ผลการศึกษาอัตราเร็วลมของประเทศไทยและการกำหนดอัตราเร็วลมระหว่างการทดสอบตัวรับรังสีดวงอาทิตย์

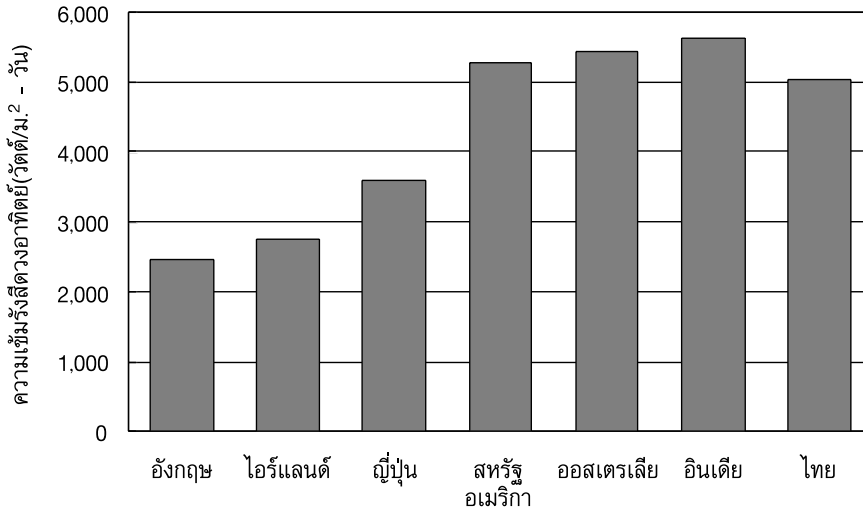
จากการศึกษาวิเคราะห์อัตราเร็วลมของประเทศไทยพบว่าอัตราเร็วลมระหว่างทดสอบต้องมีค่าระหว่าง 1.5-4.0 ม./วินาที เพราะความถี่ในการพบอัตราเร็วลมในช่วงนี้มีถึงร้อยละ 82 และเมื่อพิจารณาความถี่ของการพบอัตราเร็วลมช่วงดังกล่าวในแต่ละภูมิภาค จะมีความถี่ในการพบเป็นดังนี้ ภาคตะวันออกและภาคตะวันตกร้อยละ 81 ภาคกลาง ร้อยละ 82 ภาคตะวันออกเฉียงเหนือร้อยละ 86 ภาคใต้ร้อยละ 90 และภาคเหนือพบสูงสุดร้อยละ 99 ดังรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าอัตราเร็วลมช่วงดังกล่าวเหมาะสมกับประเทศไทย เนื่องจากถ้ากำหนดสภาวะทดสอบตามสภาวะดังกล่าวการทดสอบตัวรับรังสีในประเทศไทยจะกระทำได้ดีในทุกภูมิภาคของประเทศไทย ทำให้สะดวกและเหมาะสมในการทดสอบ [9]



รูปที่ 6 ความถี่ที่พบอัตราเร็วลมเฉลี่ยค่าต่างๆ ของประเทศไทยจำแนกตามภูมิภาค

6.3 ผลการศึกษาค่ารังสีดวงอาทิตย์รวมของประเทศไทยและการกำหนดค่ารังสีดวงอาทิตย์รวมเพื่อใช้ในการทดสอบตัวรับรังสีดวงอาทิตย์

เมื่อเปรียบเทียบศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยเทียบกับประเทศต่างๆ พบว่าค่าเฉลี่ยรังสีดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีของประเทศไทย (5,055 วัตต์/ม.²-วัน) ใกล้เคียงกับของประเทศสหรัฐอเมริกา (5,277 วัตต์/ม.²-วัน) และออสเตรเลีย (5,444 วัตต์/ม.²-วัน) แสดงดังรูปที่ 7 การกำหนดค่ารังสีดวงอาทิตย์ในการทดสอบจึงควรกำหนดให้สอดคล้องกับมาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกาและออสเตรเลีย เพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากการทดสอบตัวรับรังสีดวงอาทิตย์ ดังนั้น ค่ารังสีดวงอาทิตย์ในการทดสอบควรมีค่าไม่ต่ำกว่า 790 วัตต์/ม.² และแปรผันได้ไม่เกิน 32 วัตต์/ม.²



รูปที่ 7 เปรียบเทียบค่ารังสีดวงอาทิตย์ของประเทศไทยกับต่างประเทศ [10]

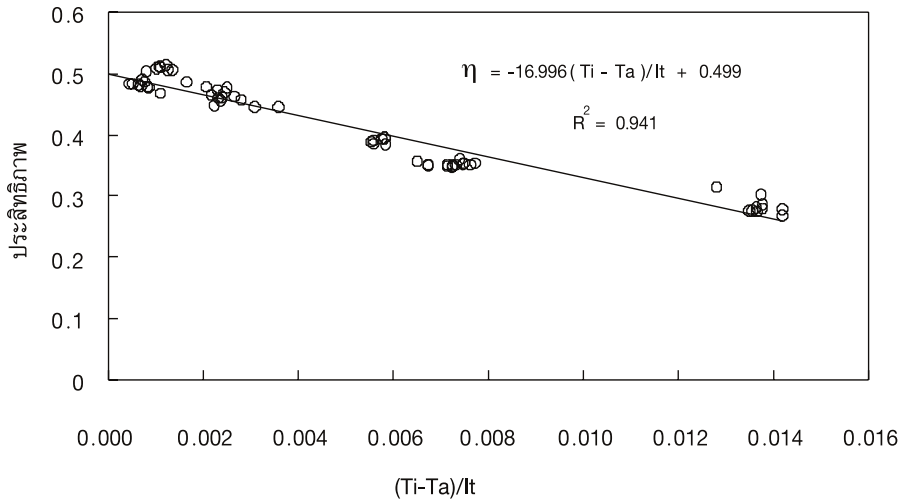
การกำหนดเงื่อนไขของมาตรฐาน SERT 2003

การทดสอบภายใต้มาตรฐาน SERT 2003 จะต้องมียุทธศาสตร์ของการทดสอบดังต่อไปนี้ เครื่องมือทดสอบและความถูกต้องแม่นยำในการเก็บข้อมูล อ้างอิงตามมาตรฐาน ASHRAE 93 – 1986

เงื่อนไขในการทดสอบกำหนดว่า อุณหภูมิน้ำเข้าตัวรับรังสีต้องมีแปรผันไม่เกิน ± 1 °ซ (อ้างอิงตามมาตรฐาน ASHRAE 93 – 1986) อุณหภูมิแวดล้อมต้องเป็นค่าคงที่และต้องมีค่าไม่เกิน 34 °ซ โดยค่าที่ถูกละเลือกเพื่อใช้ทดสอบจะแปรผันได้ไม่เกิน 1 °ซ ค่ารังสีดวงอาทิตย์รวมต้องเป็นค่าคงที่และต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 790 วัตต์/ม.² โดยค่าที่ถูกละเลือก เพื่อใช้ทดสอบจะแปรผันได้ไม่เกิน 32 วัตต์/ม.² อัตราเร็วลมต้องมีค่าคงที่และต้องอยู่ในช่วง 1.5 - 4.0 ม./วินาที โดยระหว่างการทดสอบจะแปรผันได้ไม่เกิน ± 0.5 ม./วินาที การวัดความดันในตัวรับรังสีแบบใช้น้ำ ค่าความดันที่ทางเข้าตัวรับรังสีและความดันที่ทางออกของตัวรับรังสีจะต้องมีความแตกต่างไม่เกิน 3.5 kPa หรือ 0.5 psi (อ้างอิงตามมาตรฐาน ASHRAE 93 – 1986)

6.4 ผลการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพทางความร้อนของตัวรับรังสีดวงอาทิตย์ตามมาตรฐาน SERT 2003

ทดสอบภายใต้เงื่อนไขดังต่อไปนี้ ช่วงอุณหภูมิอากาศแวดล้อม 26 - 33 °ซ ค่ารังสีดวงอาทิตย์ในช่วง 989 ± 32 วัตต์/ม.² อัตราการไหล 0.02 กก./วินาที $\pm 1.0\%$ อุณหภูมิน้ำเข้า 30 - 40 °ซ ± 1 °ซ อัตราเร็วลม 2.0 ± 0.5 ม./วินาที และความแตกต่างของความดันระหว่างทางเข้าและทางออกไม่เกิน 3.5 kPa

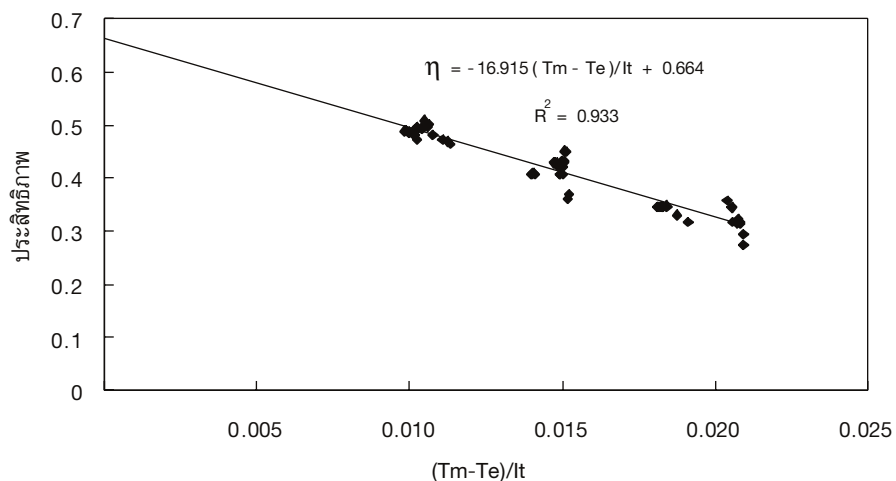


รูปที่ 8 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของตัวรับรังสีดวงอาทิตย์ตามมาตรฐาน SERT 2003

จากรูปที่ 8 จะได้สมการ $\eta = -16.996(T_i - T_a)/I_t + 0.499$ เมื่อเปรียบเทียบกับสมการการหาค่าประสิทธิภาพ $\eta = F_R[(\tau\alpha)_e - U_L(T_i - T_a)/I_t]$ (ASHRAE, 1986) จะได้ว่า $F_R(\tau\alpha)_e = 0.499$ และ $F_R U_L = 16.996 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

6.5 ผลการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพทางความร้อนของตัวรับรังสีดวงอาทิตย์ตามมาตรฐาน AUSTRALIA

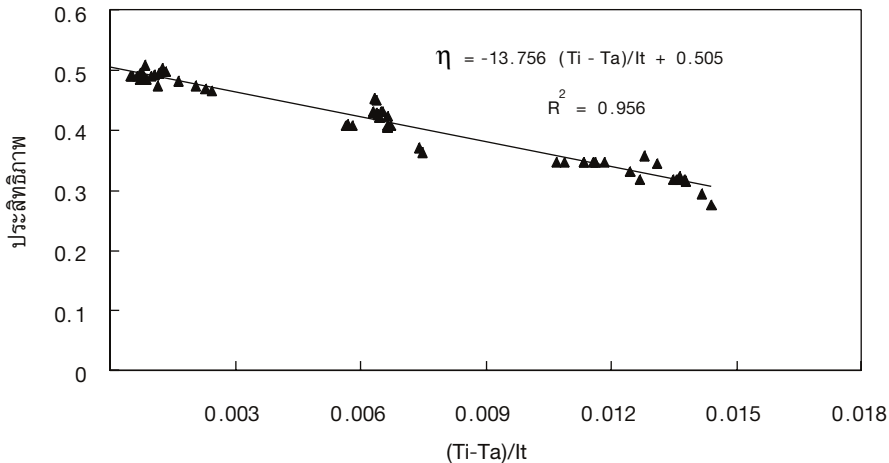
ทดสอบภายใต้เงื่อนไขดังต่อไปนี้ ช่วงอุณหภูมิแวดล้อม $26 - 30 \text{ } ^\circ\text{C}$ ค่ารังสีดวงอาทิตย์ในช่วง 989 ± 32 วัตต์/ม.² อัตราการไหล $0.02 \text{ กก./วินาที} \pm 1.0\%$ อุณหภูมิน้ำเข้า $30 - 40 \text{ } ^\circ\text{C} \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$ อัตราเร็วลม $2.0 \pm 0.5 \text{ ม./วินาที}$ และความแตกต่างของความดันระหว่างทางเข้าและทางออกไม่เกิน 3.5 kPa [8]



รูปที่ 9 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของตัวรับรังสีดวงอาทิตย์ตามมาตรฐาน AUSTRALIA [8]

จากรูปที่ 9 จะได้สมการ $\eta = -16.915(T_m - T_e)/l_t + 0.664$ เมื่อเปรียบเทียบกับสมการการหาค่าประสิทธิภาพ $\eta = \eta_0 - U_0(T_m - T_e)/l_t$ จะได้ว่า $\eta_0 = 0.664$ และ $U_0 = 16.915$

6.6 ผลการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพทางความร้อนของตัวรับรังสีดวงอาทิตย์ตามมาตรฐาน ASHRAE 93-1986



รูปที่ 10 กราฟประสิทธิภาพของตัวรับรังสีดวงอาทิตย์ตามมาตรฐาน ASHRAE 93-1986 [1]

จากรูปที่ 10 จะได้สมการ $\eta = -13.756(T_i - T_a)/l_t + 0.5046$ เมื่อเปรียบเทียบกับสมการการหาค่าประสิทธิภาพ $\eta = F_R[(\tau\alpha)_e - U_L(T_i - T_a)/l_t]$ จะได้ว่า $F_R(\tau\alpha)_e = 0.5046$ และ $F_R U_L = 13.756 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (ทำการทดสอบภายใต้เงื่อนไขเดียวกับมาตรฐาน AUSTRALIA)

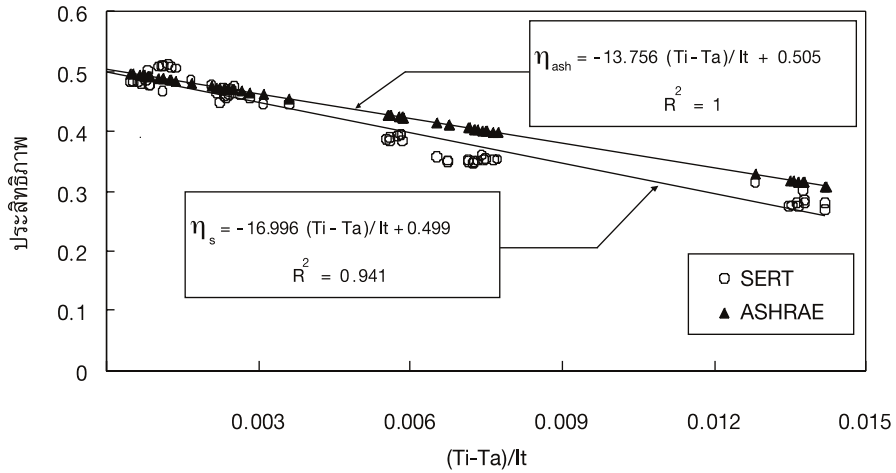
6.7 ผลการเปรียบเทียบมาตรฐาน SERT 2003 กับมาตรฐาน ASHRAE 93-1986 ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน

การเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างมาตรฐาน SERT 2003 กับมาตรฐาน ASHRAE 93 – 1986 ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน (รูปที่ 11) พบว่ามีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\eta_s = 1.235\eta_{ash} - 0.111 \quad (1)$$

เมื่อ η_s คือ ประสิทธิภาพที่ได้จากมาตรฐาน SERT 2003

η_{ash} คือ ประสิทธิภาพที่ได้จาก ASHRAE 93 – 1986



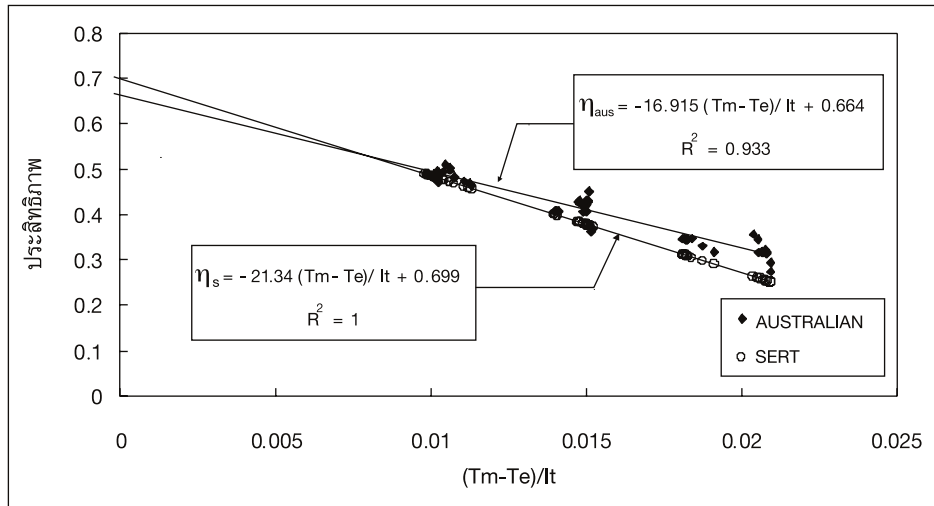
รูปที่ 11 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวรับรังสีดวงอาทิตย์ตามมาตรฐาน SERT 2003 กับมาตรฐาน ASHRAE

จากสมการ (1) ที่จุด $T_i = T_a$ ซึ่งเป็นจุดที่ประสิทธิภาพของตัวรับรังสีดวงอาทิตย์มีค่าสูงสุดพบว่า η_{ash} มีค่าเท่ากับ 0.499 ขณะที่ η_s มีค่า 0.505 แสดงว่าค่าประสิทธิภาพที่ได้จากมาตรฐานทั้งสองมีค่าต่างกันอยู่ 0.006 และค่าความแตกต่างสูงสุดระหว่าง η_s และ η_{ash} มีค่าต่างกันอยู่ร้อยละ 1.2

6.8 ผลการเปรียบเทียบมาตรฐาน SERT 2003 กับมาตรฐาน AUSTRALIA ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน

การเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างมาตรฐาน SERT 2003 กับมาตรฐาน AUSTRALIA ภายใต้เงื่อนไขการคำนวณเดียวกัน (รูปที่ 12) พบว่ามีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\eta_s = 1.261\eta_{aus} - 0.138 \quad (2)$$



รูปที่ 12 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวรับรังสีดวงอาทิตย์ตามมาตรฐาน SERT 2003 กับมาตรฐาน AUSTRALIA

เมื่อ η_{aus} คือ ประสิทธิภาพที่ได้จากมาตรฐาน AUSTRALIA

จากสมการ (2) ที่จุด $T_m = T_e$ ซึ่งเป็นจุดที่ประสิทธิภาพของตัวรับรังสีดวงอาทิตย์มีค่าสูงสุดพบว่า η_{aus} มีค่าเท่ากับ 0.664 ขณะที่ η_s มีค่า 0.699 แสดงว่าค่าประสิทธิภาพที่ได้จากมาตรฐานทั้งสองมีค่าต่างกันอยู่ 0.035 และค่าความแตกต่างสูงสุดระหว่าง η_s และ η_{aus} มีค่าต่างกันร้อยละ 5.1

7. สรุปผลการวิจัย

การทดสอบประสิทธิภาพตัวรับรังสีดวงอาทิตย์ตามมาตรฐาน SERT ได้ข้อกำหนดดังนี้คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อมต้องมีค่าไม่เกิน 34 °ซ อุณหภูมิน้ำไหลเข้าขณะทดสอบต้องมีค่าคงที่และแปรผันไม่เกิน 1 °ซ (± 1 °ซ) ค่ารังสีดวงอาทิตย์รวม ต้องมีค่าคงที่และมีค่าไม่น้อยกว่า 790 วัตต์/ม.² ระหว่างทดสอบสามารถแปรผันไม่เกิน 32 วัตต์/ม.² (± 32 วัตต์/ม.²) อัตราเร็วลมขณะทดสอบต้องมีค่าคงที่ และอยู่ในช่วง 1.5 ± 4.0 ม./วินาที ระหว่างทดสอบสามารถแปรผันไม่เกิน 0.5 ม./วินาที (± 0.5 ม./วินาที) อัตราการไหลของน้ำต้องคงที่ และแปรผันได้ไม่เกิน $\pm 1\%$ ในหน่วย กก./วินาที และความแตกต่างของความดันระหว่างทางเข้าและทางออกไม่เกิน 3.5 kPa (ตารางที่ 2)

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน SERT 2003 มาตรฐาน ASHRAE 93 – 1986 และมาตรฐาน AUSTRALIA พบว่าประสิทธิภาพที่ได้จากมาตรฐาน SERT 2003 มีค่าแตกต่างกับมาตรฐาน ASHRAE และมาตรฐาน AUSTRALIA มากที่สุดประมาณร้อยละ 5 จะเห็นได้ว่ามาตรฐาน SERT 2003 สอดคล้องกับมาตรฐานสากลภายใต้เงื่อนไขตัวแปรธรรมชาติได้แก่ อุณหภูมิแวดล้อมและอัตราเร็วลม ซึ่งการทดสอบสามารถกระทำได้สะดวกในประเทศไทย จึงทำให้มาตรฐาน SERT 2003 เป็นมาตรฐานที่เหมาะสมในการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพของตัวรับรังสีแบบกลางแจ้งสำหรับประเทศไทย

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบเงื่อนไขการทดสอบระหว่างมาตรฐาน SERT 2003, AUSTRALIAN, ASHRAE 93-1986

รายการ	SERT	AUSTRALIAN	ASHRAE
1. ค่ารังสีดวงอาทิตย์ (วัตต์/ม. ²)	มากกว่า 790 ±32	มากกว่า 790 ±32	มากกว่า 790 ±32
2. อุณหภูมิแวดล้อม (°ซ)	ต่ำกว่า 34	ต่ำกว่า 30	ต่ำกว่า 30
3. อัตราเร็วลม (ม./วินาที)	1.5 - 4.0 ± 0.5	2.0 - 4.5 ± 0.5	2.0 - 4.5 ± 0.5
4. อัตราการไหล (กก./วินาที)	ไม่กำหนด แต่แนะนำที่ 0.02 ± 1.0%	ไม่กำหนด แต่แนะนำที่ 0.02 ± 1.0%	ไม่กำหนด แต่แนะนำที่ 0.02 ± 1.0%
5. ผลต่างของความดันระหว่าง ทางเข้าและออก (kPa)	3.5	3.5	3.5
6. สมการที่ใช้ในการคำนวณ ประสิทธิภาพของตัวรับรังสี ดวงอาทิตย์	$\eta = F_R[(\tau\alpha)_e - U_L(T_i - T_a)/I_t]$	$\eta = \eta_0 - U_0(T_m - T_e)/I_t$	$\eta = F_R[(\tau\alpha)_e - U_L(T_i - T_a)/I_t]$
7. ประสิทธิภาพที่ได้จาก ตัวอย่างการทดสอบ	$\eta = 0.505 - 16.996(T_i - T_a)/I_t$	$\eta = 0.664 - 16.915(T_m - T_e)/I_t$	$\eta = 0.499 - 13.756(T_i - T_a)/I_t$
8. ประสิทธิภาพเมื่อ T _i =T _a หรือ T _m = T _e (%)	50.50	66.40	49.90

8. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทน (SERT) ซึ่งให้การสนับสนุนในด้านอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ตลอดจนอนุเคราะห์ให้ใช้ระบบทดสอบ ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ฝ่ายอุตสาหกรรม โครงการโครงการอุตสาหกรรมสำหรับระดับปริญญาตรีด้านเงินทุน สำหรับผู้วิจัยขอบคุณมหาวิทยาลัยนเรศวร คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ และกรมอุตุนิยมวิทยา กรุงเทพมหานคร ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ด้านข้อมูล

9. เอกสารอ้างอิง

1. ASHRAE Standard, 1986, ANSI/ASHRAE 93-1986: Method of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors, Atlanta, ASHRAE, Inc.
2. Fischer, S., Heidemann, W., Muller-Steinhagen, H., Perers, B., Bergquist, P., and Hellstrom, B., 2004, "Collector Test Method under Quasi-dynamic Conditions According to the European Standard EN 12975-2," *Solar Energy*, Vol. 76, pp. 117-123.

3. ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, 2531, *อนุกรมพลังงานนอกแบบและการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ เล่มที่ 1 การแผ่รังสีดวงอาทิตย์*, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
4. Kalogirou, S. A., 2004, "Solar Thermal Collectors and Applications," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 30, pp. 231–295.
5. ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมพลังงานแสงอาทิตย์, 2540, "รายงานผลการทดสอบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์," *รายงานการวิจัยเสนอต่อสำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ*.
6. Maxwell Li, Y. C., and Min Lu, S., 2005, "Uncertainty Evaluation of a Solar Collector Testing System in Accordance with ISO 9806-1," *Energy*, Vol. 30, pp. 2447-2452.
7. Abdullah, A. H., Abou-Ziyan, H. Z., and Ghoneim, A. A., 2003, "Thermal Performance of Flat Plate Solar Collector using Various Arrangements of Compound Honeycomb," *Energy Conservation and Management*, Vol. 44, pp. 3093-3112.
8. AUSTRALIAN Standard, 1999, AS/NZS 2535.1:1999: Test Methods for Solar Collectors - Thermal Performance of Glazed Liquid Heating Collectors including Pressure Drop, Sydney, Standards Association of Australia.
9. อาทิตย์ เสมอเชื้อ และ สุภาวดี ทิมทอง, 2540, *การศึกษาความเร็วลมและทิศทางลมในจังหวัดพิษณุโลก*, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต มหาวิทยาลัยนเรศวร.
10. กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงานและภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2542, *แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากข้อมูลดาวเทียมสำหรับประเทศไทย*, รายงานฉบับสมบูรณ์.