



**การพัฒนาและประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ในตัวเก็บ
รังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ**

พรนิภา นุโนชา^{1,*} ธวัช สุริวงษ์^{1,*} และทศพล ตรีรุจิราภาพงศ์²

**Development and Application of Anodized Aluminium for Selective Absorber in
Evacuated Tube Collector (ETC)**

Pornnipa Nunocha^{1,*} Tawat Suriwong^{1,*} and Thotsaphon Threrujirapapong²

¹วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก 65000

²ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก 65000

¹School of Renewable Energy Technology, Naresuan University Phitsanulok 65000

²Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University Phitsanulok 65000

* Corresponding author. E-mail address: Pornnipa.n@gmail.com, tawats@nu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการทำฟิล์มอะโนไดซ์ที่มีผงนิกเกิล (Ni-Al₂O₃) หรือแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ มาเป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ในตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศแบบ 2 ชั้น โดยท่อแก้วสุญญากาศไม่มีการเคลือบสารเลือกรับรังสีอาทิตย์ โดยเปลี่ยนตำแหน่งของการเคลือบจากเดิมที่เคลือบที่ผิวแก้วท่อนั้น มาเป็นเคลือบที่แผ่นอะลูมิเนียม แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์มีการวิเคราะห์หาเฟส สันฐานวิทยา และค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ด้วยเทคนิค ด้วยเครื่อง X-ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscope (SEM), Energy Dispersive Spectrometry (EDS), และ Ultraviolet-Visible-Near Infrared Spectrometer การทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (η) ที่มีการใช้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์มาเป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ ตามมาตรฐาน ISO 9806-1 ผลการทดลอง พบว่า ค่าการดูดกลืนรังสี (α) และค่าการสะท้อนรังสี (R) ของแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์มีค่า 0.94 และ 0.06 ตามลำดับ ความหนาเฉลี่ยของชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมอะโนไดซ์เท่ากับ 11.8 ไมโครเมตร ผลการประเมินค่าประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุด (η_{max}) มีค่าเท่ากับ 0.72 และ 0.69 สำหรับกรณีที่พิจารณาว่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม (U_L) มีค่าคงที่และไม่คงที่ ตามลำดับ

คำสำคัญ: ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ท่อแก้วสุญญากาศ อะลูมิเนียมอะโนไดซ์ สารเลือกรับรังสีอาทิตย์

Abstract

The objective of present research is focused on to apply the Ni-pigmented on aluminium oxide films or anodized aluminium (Ni-Al₂O₃) through anodizing process as solar absorber in evacuated tube collectors (ETC). In this study, double layers evacuated tube was used without coating solar on outer surface of the inside glass vacuum tube. The solar absorber was coated on aluminium sheets. Anodized aluminium was characterized phase, morphology and solar absorbance by X-ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscope (SEM), Energy Dispersive Spectrometry (EDS) and Ultraviolet-Visible-Near Infrared Spectrometer. Collector thermal efficiency (η) for using the aluminium anodized as solar absorber in ETC were evaluated, according to ISO 9806-1. In the results, absorbance (α) and reflectance (R) of sample were 0.94 and 0.06, respectively. The average thickness of Ni-Al₂O₃ films was 11.8 μ m. The maximum thermal efficiency (η_{max}) of solar collector was 0.72 and 0.69 for constant and non-constant of the overall heat loss coefficient (U_L), respectively.

Keywords: Solar collector, Vacuum tube, Anodize aluminium, Selective solar absorber



บทนำ

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานจากธรรมชาติที่มีความสะอาดปราศจากการก่อกมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์จำแนกเป็นสองด้านหลัก ๆ คือ การผลิตไฟฟ้าและการผลิตความร้อน โดยเทคโนโลยีการผลิตความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์คือ การใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar Collector) มาผลิตน้ำร้อนเพื่อนำไปใช้ในการอุปโภคบริโภค สามารถจำแนกได้สองประเภทตามระดับอุณหภูมิที่ใช้งานคือระบบผลิตความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 100°C และระบบผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิต่ำที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C ตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีการนำมาใช้ในประเทศไทยแล้วไม่น้อยกว่า 25 ปี ตัวเก็บรังสีอาทิตย์สามารถจำแนกประเภทได้ตามการติดตามดวงอาทิตย์ (Tracking) และแบบที่ไม่มีการติดตามดวงอาทิตย์ (Stationary Collectors) ในปัจจุบันตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบไม่ติดตามดวงอาทิตย์เป็นที่ยอมรับและได้มีการนำมาใช้ในการผลิตน้ำร้อนสำหรับบ้านเรือน โรงแรม โรงพยาบาล อย่างกว้างขวาง ที่นิยมใช้คือตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat-plate collector, FPC) และแบบท่อสุญญากาศ (Evacuated tube collector, ETC) อย่างไรก็ตาม สำหรับประเทศไทยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทุกชนิดมีการนำเข้าจากต่างประเทศเป็นหลักและผลิตเองในประเทศบางส่วน ในปัจจุบันท่อเลือกรับรังสีอาทิตย์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ มีการเคลือบสารเลือกรับรังสีอาทิตย์ที่บริเวณผิวท่อกว้างขึ้นใน ซึ่งกระบวนการเคลือบสารเลือกรับรังสีอาทิตย์นี้ต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูง (การเคลือบด้วยโลหะ) เช่น Sputtering, Evaporation Pyrolysis, Electrodeposition และการทำอะโนไดซ์ (Anodization) Kennedy. (2002); Kalogirou. (2004, pp. 231-295); Wazwaz, Salmi, & Bes. (2010, pp. 1679-1683). ซึ่งการผลิตในประเทศไทยทำได้ยาก เนื่องจากเทคนิคส่วนใหญ่ต้องใช้เครื่องมือที่มีขนาดใหญ่และราคาแพง ถึงสามารถพันท่อรับรังสีอาทิตย์ขนาดความยาวมากกว่า 1 เมตร ได้ ทำให้มีเพียงเทคนิคการทำอะโนไดซ์ที่สามารถผลิตได้และมีอุตสาหกรรมนี้ภายในประเทศ อีกทั้งตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศมีข้อจำกัดคือเมื่อท่อรับรังสี

สุญญากาศมีความเสียหายเกิดขึ้นเช่น ท่อแก้วได้รับการกระแทก เกิดการแตกหักเสียหายและ/หรือเสียความเป็นสุญญากาศภายในท่อ ซึ่งส่งผลให้ท่อรับรังสีอาทิตย์ไม่สามารถใช้งานได้เต็มประสิทธิภาพและต้องทำการเปลี่ยนท่อรับรังสีอาทิตย์เป็นท่อใหม่ทั้งชุดพร้อมกับสารเลือกรับรังสี ทำให้เสี่ยงประมาณการซ่อมบำรุงหรือการเปลี่ยนที่สูงขึ้น เนื่องจากต้องทำการเปลี่ยนท่อแก้วสุญญากาศและสารเคลือบเลือกรับรังสีอาทิตย์พร้อมกัน สารเลือกรับรังสีอาทิตย์ยังก่อให้เกิดมลพิษ เนื่องจากสารเลือกรับรังสีอาทิตย์บางชนิดไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

งานวิจัยที่ผ่านมา มีการรายงานถึงความเป็นไปได้ในการนำเทคโนโลยีตัวเก็บรังสีอาทิตย์มาใช้อย่างกว้างขวางและหลากหลายโดย D Antoni, & Saro, (2012, pp. 3666-3679). และ มีการพัฒนาการออกแบบที่คำนึงถึงประสิทธิภาพ ราคา และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม วัสดุสะสมพลังงาน Tian, & Zhao. (2013, pp. 538-553); Ma, Lu, Zhang, & Liang. (2010, pp. 1595-1957). รายงานผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศซึ่งมีลักษณะเป็นตัวยู วิเคราะห์สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนและประสิทธิภาพความร้อนในสภาวะคงที่ รวมทั้งศึกษาอิทธิพลของชั้นอากาศระหว่างท่อดูดซับและครีบทองแดงและความเข้มรังสีอาทิตย์ที่มีต่อประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ในประเทศไทยมีการรายงานค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนและประเมินค่าพลังงานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีขายในประเทศจำนวน 10 บริษัท (ฉัตรชัย ศิริสัมพันธ์, รัฐพร เงินมีศรี, นิพนธ์ เกตุจ้อย และวิสุทธิ แซ่มสะอาด. 2555) โดยตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศทั้งหมดมีการเคลือบสารเลือกรับรังสีอาทิตย์บนผิวท่อกว้างขึ้นใน นอกจากนี้มีการรายงานผลของปริมาณนิกเกิลบนอะลูมิเนียมอะโนไดซ์มีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพทางความร้อน (thermal efficiency) ค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ (absorptivity) และค่าการปลดปล่อยรังสี (emissivity) (Wazwaz, Salmi, & Bes, 2010, pp. 1679-1683)

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่มีการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนตำแหน่งสารเลือกรับรังสีอาทิตย์ คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนาตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อ

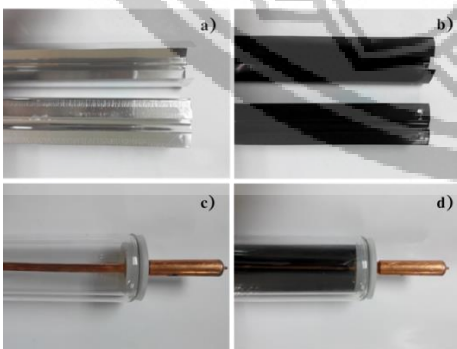
สุญญากาศด้วยการเปลี่ยนตำแหน่งของตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์จากเดิมที่เคลือบบนผิวท่อแก้วชั้นใน มาเคลือบบนครีบบนอะลูมิเนียมที่ใส่ไว้เพื่อทำหน้าที่นำความร้อนจากท่อแก้วชั้นในไปยังท่อความร้อน (Heat pipe) การประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมเคลือบสารเลือกรับรังสีอาทิตย์ด้วยกระบวนการทำอะโนไดซ์ หรือแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์มาเป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ร่วมกับท่อแก้วสุญญากาศ 2 ชั้น โดยแผ่นอะลูมิเนียมนี้ทำหน้าที่สองอย่างพร้อมกันคือ ทำหน้าที่ดูดกลืนรังสีอาทิตย์และถ่ายเทความร้อนจากรังสีอาทิตย์ให้กับสารทำงานในท่อความร้อนภายในท่อแก้วสุญญากาศแบบสองชั้น ซึ่งแตกต่างจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบเดิม ซึ่งเป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับการพัฒนาตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยไม่มีการเคลือบสารเลือกรับรังสีอาทิตย์บนท่อแก้ว ในงานวิจัยมีการวิเคราะห์เฟส สัณฐานวิทยา และค่าการดูดกลืนรังสีของแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ รวมถึงการประเมินประสิทธิภาพทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลองเพื่อพัฒนาและประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสี

อาทิตย์ในตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ นำแผ่นอะลูมิเนียมขึ้นรูปหนา 0.002 เมตร ยาว 1.6 เมตร (รูป 1a) ไปผ่านกระบวนการทำฟิล์มอะโนไดซ์ที่มีนิกเกิลในชั้นฟิล์ม (Nickel-pigmented aluminium oxide, Ni-Al₂O₃) หรือแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ (รูป 1b) ณ บริษัท แอลเมทไทย จำกัด จังหวัดสมุทรปราการ ทำการวิเคราะห์เฟส สัณฐานวิทยา (Morphology) และค่าการสะท้อนรังสีของแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ ด้วยเครื่องมือวัดเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ที่มีการติดตั้งเทคนิคการวิเคราะห์ Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และเครื่อง Ultraviolet-Visible-Near Infrared Spectrometer ที่ช่วงความยาวคลื่น 250-2,500 นาโนเมตร ค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ (Solar absorptance, α) คำนวณได้จากสมการที่ (1) เมื่อ $R(\lambda)$ คือ สเปกตรัมของการสะท้อนรังสีของผิวตัวอย่าง และ $I_{sol}(\lambda)$ คือสเปกตรัมความหนาแน่นกำลังรังสีอาทิตย์ ($W/m^2 \cdot \mu m$) ตามมาตรฐาน ASTM G173-03 ที่ air mass เท่ากับ 1.5 (1.5 AM) (Katumba, et al., 2008, pp. 1285-1292).

$$\alpha = \frac{\int_{0.3 \mu m}^{2.5 \mu m} I_{sol}(\lambda)(1-R(\lambda))d\lambda}{\int_{0.3 \mu m}^{2.5 \mu m} I_{sol}(\lambda)d\lambda} \quad (1)$$



รูปที่ 1 a) แผ่นอะลูมิเนียม b) แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ที่มีการเติมนิกเกิลในชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ c) ท่อแก้วสุญญากาศสองชั้นที่ไม่มีการเคลือบสารเลือกรับรังสีอาทิตย์ที่ผิวท่อด้านนอกของท่อชั้นใน d) การประกอบแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์เข้ากับท่อแก้วสุญญากาศสองชั้น

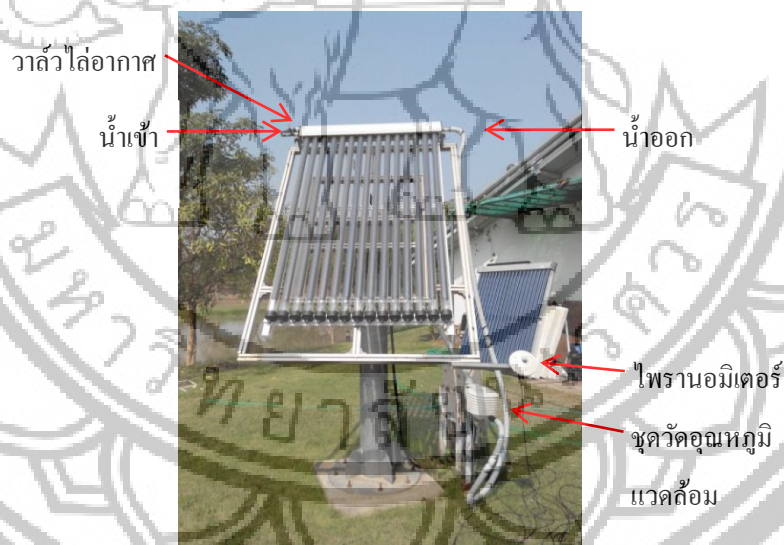


จากนั้นนำแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ที่ประกอบเข้ากับท่อแก้วสุญญากาศสองชั้นที่ไม่มีการเคลือบสารเลือกรับรังสีอาทิตย์ที่ผิวท่อด้านนอกของท่อชั้นใน (รูปที่ 1c) โดยท่อแก้วสุญญากาศสองชั้นที่ประกอบเข้ากับแผ่นอะลูมิเนียม-อะโนไดซ์ ดังรูปที่ 1d โดยทำการประกอบจำนวน 15 ท่อ และทำการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนตามมาตรฐาน ISO9806-1 บันทึกผลและเก็บข้อมูลพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงในตารางที่ 1 ดังนี้ ค่ารังสีอาทิตย์ (G_t) อุณหภูมิแวดล้อม (T_a) อัตราการไหล

เชิงมวล (m) อุณหภูมิของน้ำขาเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (T_i) ซึ่งมีค่าคงที่ แบ่งเป็น 5 ชุดข้อมูล คือ 35 40 45 50 และ 55°C และอุณหภูมิของน้ำขาออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (T_o) อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่มีการติดตั้งระบบดังแสดงในรูปที่ 2 การทดสอบที่ทำการเปลี่ยนแปลงค่า ΔT ($\Delta T = T_i - T_a$) ตามอุณหภูมิของน้ำขาเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อมเพื่อหาค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ (Parameter) ที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อน

พารามิเตอร์ (Parameter)	ค่าตัวแปร
ค่ารังสีอาทิตย์, G_t (Test solar irradiance)	$800 \pm 50 \text{ W/m}^2$
อุณหภูมิแวดล้อม, T_a (Surrounding air temperature)	$29-31^\circ\text{C}, \pm 1^\circ\text{C}$
อัตราการไหลเชิงมวล, m (Fluid mass flowrate)	$0.216 \text{ kg/s}, \pm 1\%$
อุณหภูมิของน้ำขาเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์, T_i (Fluid temperature at the collector inlet)	$35-55^\circ\text{C}, \pm 0.1^\circ\text{C}$



รูปที่ 2 ชุดทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทนมหาวิทยาลัยนเรศวร ตั้งอยู่บนละติจูด $16^\circ 44'$ เหนือ และลองจิจูด $100^\circ 11'$ ตะวันออก

การวิเคราะห์หาประสิทธิภาพเชิงความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) และ (3) สำหรับสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม (Overall heat loss coefficient, U_L) ที่มีค่าคงที่และไม่คงที่ ตามลำดับ โดย

การสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ΔT ($\Delta T = T_i - T_a$)/ G_t กับ η โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่า ΔT

$$\eta = F_R(\tau\alpha)_n - F_R U_L \frac{(T_i - T_a)}{G_t} \quad (2)$$

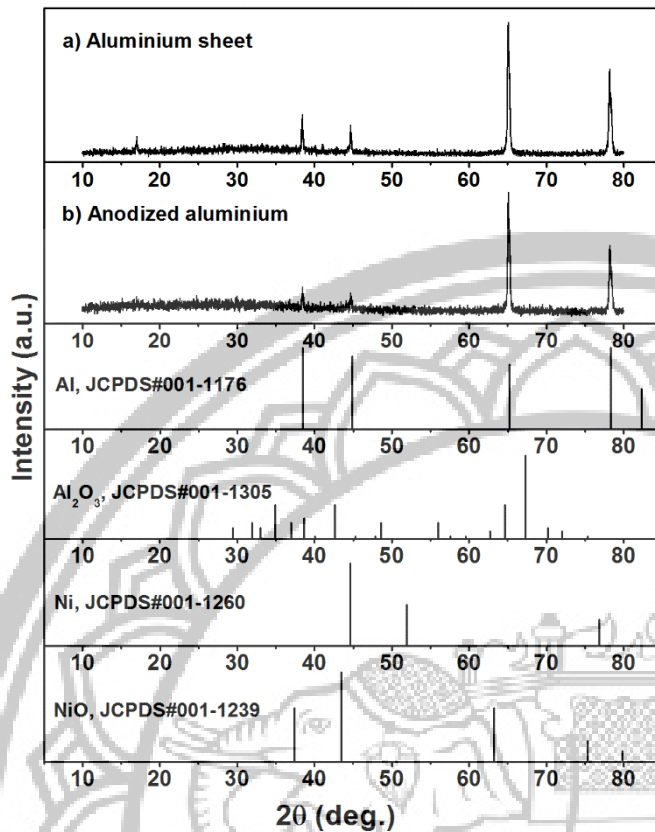
$$\eta = F_R(\tau\alpha) - c_1 \frac{(T_i - T_a)}{G_t} - c_2 \frac{(T_i - T_a)^2}{G_t} \quad (3)$$
$$F_R U_L = c_1 + c_2(T_i - T_a)$$

- เมื่อ F_R = แฟกเตอร์การดึงความร้อนหรือแฟกเตอร์แก้ไข (Heat remove factor)
 G_t = รังสีอาทิตย์รวมที่ตกกระทบลงบนตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Global solar irradiance), W/m^2
 τ = สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์ของท่อแก้วครอบ (Transmission factor of cover), %
 α = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Absorption factor), %
 U_L = สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม (Overall heat loss coefficient), $W/m^2 \cdot ^\circ C$
 T_a = อุณหภูมิแวดล้อม (Ambient temperature), $^\circ C$
 T_o = อุณหภูมิของเหลวขาออก (Outlet temperature), $^\circ C$
 T_i = อุณหภูมิของเหลวขาเข้า (Inlet temperature), $^\circ C$

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

รูปแบบ XRD ของแผ่นอะลูมิเนียมและแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ที่มีนิกเกิล แสดงดังรูปที่ 2 ผลการวิเคราะห์เฟสของตัวอย่างทั้งสองกับเฟสมาตรฐาน JCPDS ของ Al, Al_2O_3 , Ni และ NiO_2 (Peuser, Remmers, & Schnauss, 2002) พบว่ารูปแบบ XRD ของแผ่นอะลูมิเนียมและแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์มีเฟสที่ตรงและสอดคล้องกับเฟสมาตรฐานของอะลูมิเนียมเพียงเฟสเดียว ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ cubic ที่มี space

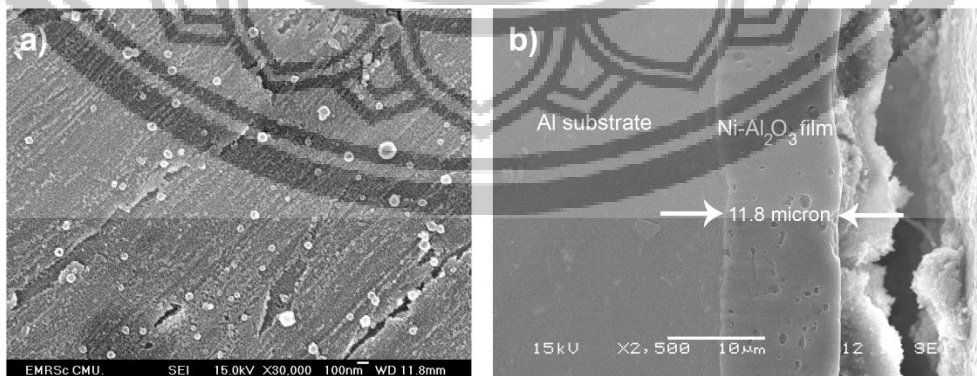
group เป็น Fm3M และ space group number เท่ากับ 225 หรือตรงกับฐานข้อมูล JCPDS รหัส 001-1176 (Al, JCPDS#001-1176) อย่างไรก็ตามผลการทดลองของแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ไม่ปรากฏรูปแบบ XRD ของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และนิกเกิล (Ni) หรือนิกเกิลออกไซด์ (NiO) ที่เคลือบอยู่ในฟิล์มของอะลูมิเนียมออกไซด์ อาจจะเนื่องมาจากเป็นฟิล์มที่มีลักษณะที่ค่อนข้างบางและมีปริมาณนิกเกิลที่ต่ำ ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค XRD



รูปที่ 3 รูปแบบ XRD ของ a) แผ่นอะลูมิเนียม และ b) แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ เทียบกับฐานข้อมูล JCPDS ของ Al, Al_2O_3 , Ni และ NiO_2 ตามลำดับ

การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงในรูปที่ 4 รูป SEM ของตัวอย่างในรูป 4a) แสดงการเกิดฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีนิกเกิลบนพื้นผิวหน้าของแผ่นอะลูมิเนียม นอกจากนี้ยังพบว่าพื้นผิวแผ่นอะลูมิเนียมมีความหยาบและรอยร้าวจากกระบวนการ

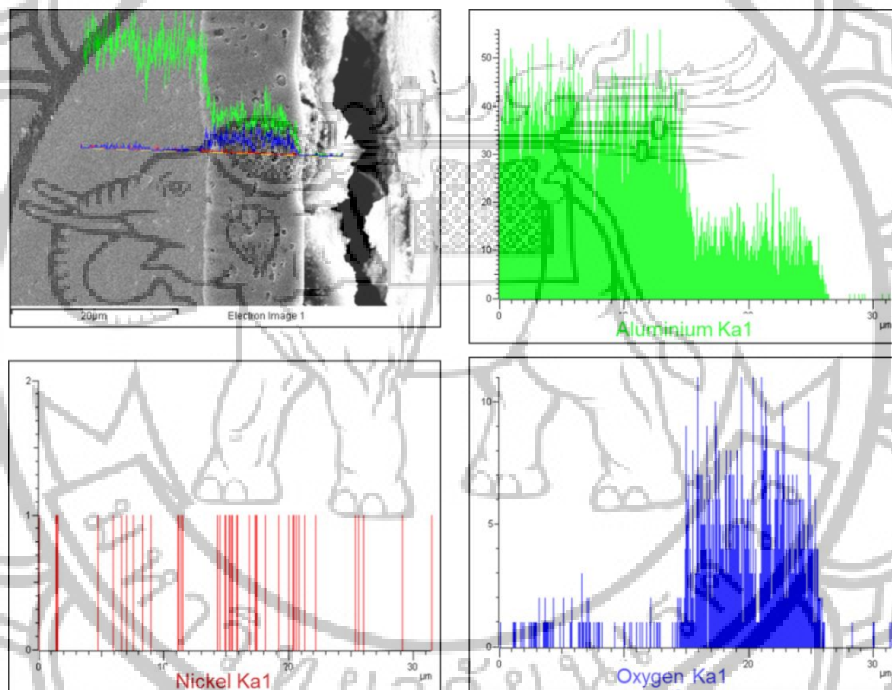
ผลิตแผ่นอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการรีดร้อน รูป SEM 4b) แสดงภาพภาคตัดขวางของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีนิกเกิลผสมอยู่ในชั้นฟิล์ม ความหนาของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์มีความคงที่ตลอดชิ้นงานและมีความหนาเฉลี่ยประมาณ 11.8 ไมโครเมตร



รูปที่ 4 รูป SEM ของ a) พื้นผิวหน้า และ b) ภาพตัดขวางของแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์

การทำส่วนประกอบของธาตุเคมีเพื่อยืนยันการมีนิกเกิลผสมอยู่ในฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ของแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการทำฟิล์มอะโนไดซ์สามารถวิเคราะห์ได้โดยการใช้กล้อง SEM ที่เพิ่มเครื่อง Energy Dispersive Spectroscopy หรือ EDS โดยเครื่อง SEM ที่มีการติดตั้งหัววัดรังสีเอ็กซ์เฉพาะธาตุ (characteristic X-ray) ซึ่งแต่ละธาตุเคมีก็มีรังสีเอ็กซ์เฉพาะธาตุแตกต่างกัน จึงทำให้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์หาธาตุเคมีของตัวอย่างได้ ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 5 จากการศึกษาพบว่าชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ประกอบด้วยธาตุเคมีดังนี้ อะลูมิเนียม นิกเกิล และ

ออกซิเจน แต่ปริมาณของนิกเกิลมีปริมาณที่น้อยเมื่อเทียบกับอะลูมิเนียมและออกซิเจน ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลจากการวิเคราะห์ XRD และกระบวนการทำอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ที่มีการใส่นิกเกิลในชั้นฟิล์มของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่มีส่วนประกอบทางเคมีหลักเป็นอะลูมิเนียมและออกซิเจน สำหรับชั้นแผ่นอะลูมิเนียมนั้นมีเพียงส่วนประกอบธาตุเคมีเดียวคืออะลูมิเนียม จากผลการวิเคราะห์ SEM-EDS ยืนยันได้ว่าชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์มีส่วนประกอบของนิกเกิลผสมอยู่จริง และมีปริมาณเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับอะลูมิเนียมและออกซิเจน



รูปที่ 5 ผลวิเคราะห์ SEM-EDS ของภาพตัดขวางของแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์

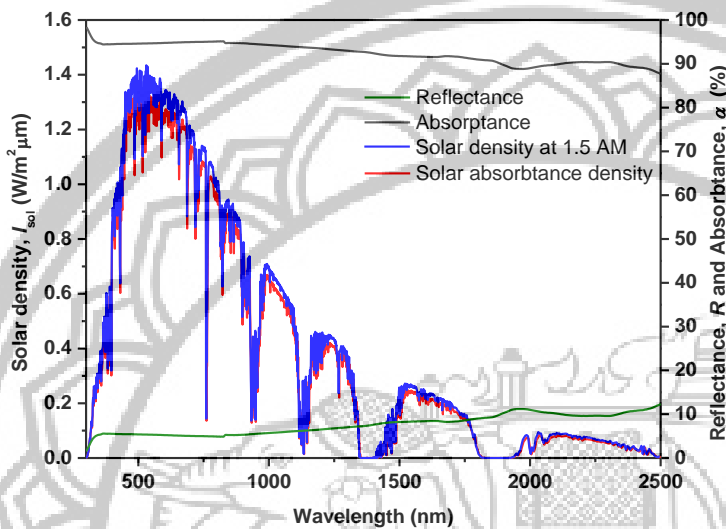
ผลจากการวัดค่าการสะท้อนรังสีด้วยเครื่อง Ultraviolet-Visible-Near Infrared Spectrometer ที่ช่วงความยาวคลื่น 250-2,500 นาโนเมตร และนำผลที่ได้มาคำนวณหาค่าการดูดกลืนรังสีตามสมการที่ (1) ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 6 ค่าการสะท้อนรังสีของแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ที่มีนิกเกิลมีค่าที่ค่อนข้างต่ำและมีค่าการดูดกลืนรังสีที่สูง โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดช่วงความยาวคลื่นเท่ากับ 6% และ 94% ตามลำดับ โดยผลการทดลองสอดคล้องกับสมบัติตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ตามทฤษฎีคือ มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ต่ำและการ

ดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่สูงในช่วงความยาวคลื่น 300-2,500 นาโนเมตร (“NREL”, n.d.; Kumar, Kumar, Nagar, & Yadav, 2013, p. 524715) เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาและที่มีการใช้งานจริงในท้องตลาดสำหรับตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์แบบมีสมบัติเลือกรับรังสีอาทิตย์พบว่ามีการดูดกลืนรังสีอยู่ในช่วง 0.85-0.95 (Kennedy, 2002, 520-31267; Kumar, Kumar, Nagar, & Yadav, 2013, p. 524715) แสดงให้เห็นว่าค่าการดูดกลืนรังสีของแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์มีค่าใกล้เคียงและอยู่ในช่วงที่มีการดูดกลืนรังสีที่สูง ผลการ



คำนวณค่าการดูดกลืนรังสีของแต่ละความยาวคลื่นมาเทียบกับความหนาแน่นกำลังรังสีอาทิตย์ที่ air mass เท่ากับ 1.5 AM (เส้นสีน้ำเงิน) ผลที่ได้แสดงค่าการดูดกลืนกำลังรังสีอาทิตย์ในแต่ละความยาวคลื่นของรังสีอาทิตย์ (เส้นสีแดง) โดยมีค่าการดูดกลืนกำลังรังสี

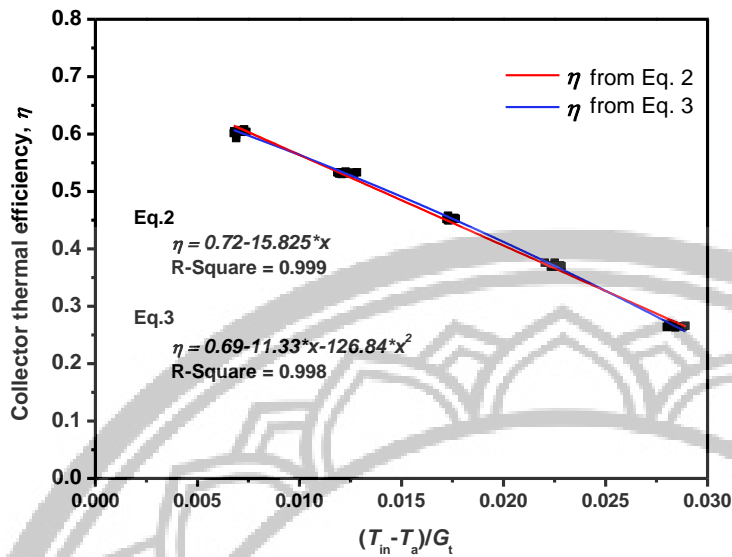
อาทิตย์ใกล้เคียงกับความหนาแน่นกำลังรังสีอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 6 จากผลการทดลองทำให้สามารถสรุปได้ว่าแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์สามารถใช้เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ได้



รูปที่ 6 ค่าการสะท้อนแสง (Reflectance) ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของอะลูมิเนียมอะโนไดซ์เทียบกับความหนาแน่นกำลังรังสีอาทิตย์ที่ air mass เท่ากับ 1.5 AM ในช่วงความยาวคลื่น 250–2,500 นาโนเมตร

ผลการทดสอบและคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์และนำผลทดสอบมาเปรียบเทียบกับสมการที่ 2 และ 3 แสดงในรูปที่ 7 โดยการเปลี่ยนแปลงค่า ΔT ($\Delta T = T_i - T_a$) ของอุณหภูมิน้ำเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อม เพื่อหาค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ในกรณีที่พิจารณาว่า U_L มีค่าคงที่และไม่เปลี่ยนแปลง ตามสมการที่ 2 พบว่าค่าประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุด (η_{max}) ที่อุณหภูมิน้ำเข้ามีค่าเท่ากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ($\Delta T = T_i - T_a = 0$) มีค่าเท่ากับ 0.72 และมีค่าผลคูณของแฟกเตอร์การดึงความร้อนกับสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวมหรือค่าการสูญเสียความร้อน ($-F_R U_L$) เท่ากับ $-15.83 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ (ความชันของกราฟ) สำหรับกรณีที่พิจารณาว่า U_L มีค่าไม่คงที่และมีการเปลี่ยนแปลงตามสมการที่ 3 พบว่า ค่า η_{max} ที่ $\Delta T = 0$ มีค่าเท่ากับ 0.69 และมีค่าการสูญเสียความร้อน ($-F_R U_L = c_1 + c_2(T_i - T_a)$) เท่ากับ $-11.33 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ เมื่อ $\Delta T = 0$ ค่า η_{max} ของ

ทั้งสองสมการมีค่าใกล้เคียงกันและสูงกว่าค่าที่มีการรายงานผลการวิจัยที่มีผ่านมาสำหรับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ $\eta_{max} = 0.55-0.70$ (Ma, Lu, Zhang, & Liang, 2010, pp. 1595–1957; Kim, & Seo, 2007, pp. 772–795; Zambolin, & Col, 2010, pp. 1382–1396; ฉัตรชัย ศิริสัมพันธ์วงศ์, รัฐพร เงินมีศรี, นิพนธ์ เกตุจ้อย, และวิสุทธิ์ แซ่มสะอาด, 2555, น. 16–23) อย่างไรก็ตามในปัจจุบันมีการพัฒนาชนิดของสารเลือกรับรังสีอาทิตย์ รูปแบบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และกลไกการถ่ายเทความร้อน เพื่อช่วยให้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่า η_{max} มีค่าสูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ สรุปได้ว่าแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการทำฟิล์มอะโนไดซ์ที่มีนิกเกิลในชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ สามารถประยุกต์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศแบบสองชั้น โดยมีหน้าที่เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์และตัวนำความร้อนไปยังท่อความร้อน ซึ่งสามารถผลิตได้ภายในประเทศ และลดการนำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีราคาถูกลงซึ่งเป็นแรงจูงใจให้มีการใช้งานมากขึ้นได้ในอนาคต



รูปที่ 7 ประสิทธิภาพประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการทำอะโนไดซ์ที่มีนิกเกิลในชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ (Ni-Al₂O₃) โดยรูปแบบ XRD ของแผ่นอะลูมิเนียมและแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์แสดงให้เห็นว่ามีเฟสที่ตรงและสอดคล้องกับเฟสมาตรฐานของอะลูมิเนียมเพียงเฟสเดียว ผลการวิเคราะห์รูป SEM ของภาพภาคตัดขวางของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีนิกเกิลภายในชั้นฟิล์มมีความหนาของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่คงที่ตลอดชิ้นงานและมีความหนาเฉลี่ยประมาณ 11.8 ไมโครเมตร และผลการวิเคราะห์ SEM-EDS ยืนยันได้ว่าชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์มีส่วนประกอบของนิกเกิลผสมอยู่จริง และมีปริมาณเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับอะลูมิเนียมและออกซิเจน ค่าการสะท้อนรังสีของแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์มีค่าที่ค่อนข้างต่ำและมามีค่าการดูดกลืนรังสีที่สูง โดยมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 6% และ 94% ตลอดช่วงความยาวคลื่น 250-2,500 นาโนเมตร ตามลำดับ ค่าการดูดกลืนกำลังรังสีอาทิตย์ในแต่ละความยาวคลื่นรังสีอาทิตย์ของแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์มีค่าใกล้เคียงกับความหนาแน่นกำลังรังสีอาทิตย์ที่ air mass 1.5 AM ผลการประเมินค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุด (η_{max}) ที่อุณหภูมิน้ำเข้ามีค่าเท่ากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ($\Delta T = 0$) มีค่า

เท่ากับ 0.72 และ 0.69 และมีค่าผลคูณของแฟกเตอร์การดึงความร้อนกับสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวมหรือค่าการสูญเสียความร้อน ($-F_R U_L$) เท่ากับ -15.83 และ -11.33 W/m²·°C สำหรับกรณีที่พิจารณาว่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม (U_L) มีค่าคงที่และไม่คงที่ ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ)-ปริญญาโท ปี 2557 และสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (วช) ที่สนับสนุนทุนวิจัยผ่านทุนงบประมาณแผ่นดินมหาวิทยาลัยนเรศวร ประจำปี พ.ศ. 2558 โดยให้การสนับสนุนทุนวิจัยตลอดทั้งโครงการ และขอขอบคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทน และภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนเรศวร สำหรับความอนุเคราะห์เครื่องมือในการทำงานวิจัย และอุปกรณ์ทดสอบต่างๆ

เอกสารอ้างอิง

ฉัตรชัย ศิริสัมพันธ์วงศ์, รัฐพร เงินมีศรี, นิพนธ์ เกตุจ้อย และวิสุทธิ์ แซ่มสะอาด. (2555). การประเมินค่าพลังงานความร้อนรายปีที่ตัวรับรังสีอาทิตย์ผลิตได้. Naresuan University journal, 20(1), 16-23.



- D Antoni, M., & Saro, O. (2012). Massive Solar-Thermal Collectors: A critical literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3666-3679
- Kalogirou, S. A. (2004). Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30, 231-295.
- Katumba, G., Olumekor, L., Forbes, A., Makiwa, G., Mwakikunga, B., & Lu, J., et al. (2008). Optical, thermal and structural characteristics of carbon nanoparticles embedded in ZnO and NiO as selective solar absorbers. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92(10), 1285-1292.
- Kennedy, C. E. (2002). Review of Mid-to High-Temperature Solar Selective Absorber Materials, *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*, Colorado, NREL/TP-520-31267.
- Kim, Y., & Seo, T. (2007). Thermal performances comparisons of the glass evacuated tube solar collectors with shapes of absorber tube. *Renewable Energy*, 32(5), 772-795.
- Kumar, A., Kumar, S., Nagar, U., & Yadav, A. (2013). Experimental Study of Thermal Performance of One-Ended Evacuated Tubes for Producing Hot Air. Retrieved July 7, 2013, from <http://www.hindawi.com/journals/jse/2013/524715/>
- Ma, L., Lu, Z., Zhang, J., & Liang, R. (2010). Thermal performance analysis of the glass evacuated tube solar collector with U-tube. *Building and Environment*, 45(9), 1595-1957.
- National Renewable Energy Laboratory (NREL), *Reference Solar Spectral Irradiance: Air Mass 1.5*. Retrieved September 24, 2013, from <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/#a>
- Peuser, F. A., Remmers, K. H., & Schnauss, M. (2002). *Solar thermal Systems*. Berlin: Solarpraxis AG.
- Powder Diffraction File. (2001). International Centre for Diffraction Data (ICDD). USA: 12 Campus Boulevard, Newtown Square, PA 19073-3273.
- Tian, Y., & Zhao, C. Y. (2013). A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Applied Energy*, 104, 538-553.
- Wazwaz, A., Salmi, J., & Bes, R. (2010). The effects of nickel-pigmented aluminium oxide selective coating over aluminium alloy on the optical properties and thermal efficiency of the selective absorber prepared by alternate and reverse periodic plating technique. *Energy Conversion and Management*, 51(8), 1679-1683.
- Zambolin, E., & Col, D. D. (2010). Experimental analysis of thermal performance of flat plate and evacuated tube solar collectors in stationary standard and daily conditions. *Solar Energy*, 84(8), 1382-1396.