

ค่าพลังงานความร้อนรายปีและต้นทุนวัฏจักรชีวิตของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ ท่อสุญญากาศรูปแบบใหม่

Annual Energy Yield and Life Cycle Cost (LCC) of a New Prototype of Evacuated Tube Collector (ETC)

พรนิภา นริสรา และ อวัช สุริวงษ์

วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

Email : pornnipa.n@gmail.com, tawats@nu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอค่าพลังงานความร้อนรายปีและต้นทุนวัฏจักรชีวิตของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ (ETC) รูปแบบใหม่ที่ประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ โดยตัวเก็บรังสีอาทิตย์นี้ใช้ท่อสุญญากาศจำนวน 15 ท่อ คิดเป็นพื้นที่ดูดกลืนรังสีอาทิตย์เท่ากับ 1.08 m^2 และมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุด (η_{max}) เท่ากับ 52 ผลการประเมินค่าพลังงานความร้อนรายปีต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่ตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์มีค่าเท่ากับ $1,117.9 \text{ kWh/m}^2$ หรือเท่ากับ $1,207.3 \text{ kWh}$ ($4,346.4 \text{ MJ}$) สำหรับต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศนี้ สำหรับการประเมินค่าต้นทุนวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Cost, LCC) ของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ พบว่ามีค่าเท่ากับ 22,993 บาท ซึ่งเป็นค่าต้นทุนวัฏจักรชีวิตที่ต่ำกว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่จำหน่ายของพาณิชย์สรุปได้ว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่ประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์มีความสามารถในการแข่งขันเชิงพาณิชย์ และมีศักยภาพในการผลิตพลังงานความร้อนผ่านน้ำร้อน สำหรับภาคครัวเรือนและภาคอุตสาหกรรมที่ต้องการน้ำร้อนในกระบวนการผลิต

คำสำคัญ

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ อะลูมิเนียมอะโนไดซ์ ตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ ต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต

Abstract

This research presents the annual energy yield and economic evaluation of a new prototype of evacuated tube collector (ETC) with applied anodized aluminium sheet as solar absorber. The size of ETC was 15 vacuum tubes with 1.08 m^2 solar absorber area. The maximum thermal

efficiency (η_{max}) of ETC was 0.72. As the results, annual energy yield of ETC per a unit area of solar absorber was 1,117.9 kWh/m² or 1,207.3 kWh (4,346.4 MJ) for the prototype ETC (1.08 m² solar absorber area). According to the Life Cycle Cost (LCC) evaluation, LCC of this prototype ETC was 22,993 Baht which is lower than commercial solar collector. Therefore, the evacuated tube collector (ETC) with applied anodized aluminium sheet as the solar absorber can be competitive with commercial solar collector, and it is high potential for producing the hot water in household and industrial sectors that required hot water in manufacturing.

Keywords

solar collector, aluminium anodize, solar absorber, life cycle cost

1. บทนำ

ปัจจุบันพลังงานเป็นปัจจัยสำคัญในการดำรงชีวิตเมื่ออัตราการเพิ่มประชากรสูงขึ้นการใช้พลังงานจึงมีอัตราความต้องการเพิ่มขึ้นตาม ส่งผลให้หน่วยงานต่างๆ ทั้งภาครัฐและเอกชนภายในประเทศเล็งเห็นความสำคัญของการพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ ด้านพลังงานทดแทน รวมถึงการประเมินหาค่าพลังงานความร้อนและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของเทคโนโลยีนี้ ซึ่งถือเป็นเรื่องที่ต้องให้ความสำคัญ พลังงานแสงอาทิตย์ถือเป็นพลังงานสะอาดจากธรรมชาติ ปราศจากการก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม พลังงานแสงอาทิตย์ถูกนำมาใช้ประโยชน์สองด้านหลักๆ คือ การผลิตไฟฟ้าและการทำความร้อน ปัจจุบันมีการพัฒนาเทคโนโลยีการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ใช้เพื่อพลังงานความร้อนของเทคโนโลยีตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar collector) ซึ่งในประเทศไทยมีการใช้งานมาไม่น้อยกว่า 25 ปี [1] ตัวเก็บรังสีอาทิตย์จำแนกประเภทตามการติดตามดวงอาทิตย์ (Tracking) เช่น ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรวมแสงชนิดรางพาราโบล (Parabolic trough collector) และแบบที่ไม่มีการติดตามดวงอาทิตย์ (Station collector) เช่น ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat-plate collector, FPC) และแบบท่อสุญญากาศ (Evacuated tube collector,

ETC) [2] ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบไม่มีการติดตามดวงอาทิตย์เป็นที่ยอมรับ และได้มีการนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายสำหรับการผลิตน้ำร้อนในบ้านเรือน โรงแรม และโรงพยาบาล อย่างไรก็ตามสำหรับประเทศไทยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ยังไม่ได้ได้รับความนิยมในการติดตั้งและใช้งานมากนัก เนื่องจากสภาพอากาศและปริมาณความต้องการการใช้น้ำร้อนภาคครัวเรือนยังไม่สูง และต้นทุนตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ส่วนใหญ่นำเข้าจากต่างประเทศเป็นหลัก และผลิตเองในประเทศได้เพียงบางส่วน โดยส่วนที่มีต้นทุนสูงคือท่อเลือกรับรังสีอาทิตย์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่มีการเคลือบสารเลือกรับรังสีอาทิตย์ที่บริเวณผิวด้านนอกของท่อแก้วชั้นใน ซึ่งกระบวนการเคลือบสารเลือกรับรังสีอาทิตย์นี้จำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูง (การเคลือบด้วยโลหะ) เช่น Sputtering, Evaporation Pyrolysis, Electro-deposition และการทำอะโนไดซ์ (Anodization) [3-5] ซึ่งการผลิตในประเทศไทยทำได้ยาก เนื่องจากเทคนิคส่วนใหญ่ต้องใช้เครื่องมือที่มีขนาดใหญ่และราคาแพง ส่งผลให้มีการผลิตตัวเก็บรังสีอาทิตย์ภายในประเทศ

งานวิจัยที่ผ่านมาของผู้วิจัยได้ศึกษาความเป็นไปได้ทางเทคนิคสำหรับการเปลี่ยนตำแหน่งตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์จากผิวด้านนอกของท่อแก้วด้านในของท่อแก้วสุญญากาศสองชั้นมาเป็นการประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการทำฟิล์มอะโนไดซ์ที่มีการเติมธาตุทังสเตมในฟิล์ม (Ni-Al₂O₃) หรือแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ร่วมกับท่อแก้วสุญญากาศสองชั้น ซึ่งประสบความสำเร็จในการเปลี่ยนตำแหน่งตัวดูดกลืนรังสี-อาทิตย์ โดยแผ่นอะลูมิเนียมนี้ทำหน้าที่สองอย่างพร้อมกันคือ ทำหน้าที่ดูดกลืนรังสีอาทิตย์และถ่ายเทความร้อนจากรังสีอาทิตย์ให้กับสารทำงานในท่อความร้อนภายในท่อแก้วสุญญากาศแบบสองชั้น ซึ่งเป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับการพัฒนาตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบไม่มีการเคลือบสารเลือกรับรังสีอาทิตย์บนท่อสุญญากาศ [6] รวมถึงมีการรายงานผลการศึกษาความเป็นไปได้ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่ประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสี-อาทิตย์ พบว่ามีความสามารถและศักยภาพการแข่งขันเชิงพาณิชย์ [7] อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่ได้มีการพิจารณาในส่วนของต้นทุนประเมินค่าพลังงานความร้อนรายปี โดยเปรียบเทียบกับค่าพลังงานความร้อนรายปีของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทั้งแบบแผ่นเรียบและแบบท่อสุญญากาศที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ [8] และการประเมินต้นทุนวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Cost, LCC) ให้ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินค่าพลังงานความร้อนที่สามารถผลิตได้รายปีของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศสองชั้นรูปแบบใหม่ที่ประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์เปรียบเทียบกับค่าพลังงานความร้อน

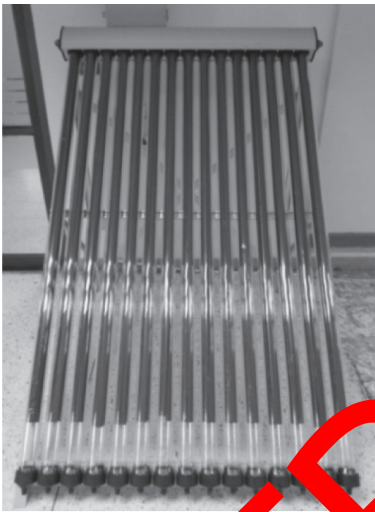
รายปีของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทั้งแบบแผ่นเรียบและแบบท่อสุญญากาศที่มีจำหน่ายทั่วไปในเชิงพาณิชย์ รวมถึงการประเมินต้นทุนวัฏจักรชีวิตของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ

2. วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการประเมินความเป็นไปได้ของค่าพลังงานความร้อนรายปีที่สามารถผลิตได้ และของด้านเศรษฐศาสตร์ของต้นแบบตัวเก็บรังสี-อาทิตย์แบบท่อสุญญากาศสองชั้นที่มีการเคลือบแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ที่มีการเติมธาตุทังสเตมในฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ (Ni-Al₂O₃) เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ โดยนำข้อมูลสมการสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Performance of solar collector) มาคำนวณหาต้นทุนพลังงานความร้อนที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์สามารถผลิตได้ต่อปีและตลอดอายุการใช้งาน จากงานวิจัยที่ผ่านมาของผู้วิจัย [6] พบว่าสามารถประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ในตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศสองชั้นได้ การประกอบต้นแบบตัวเก็บ-รังสีอาทิตย์รูปแบบใหม่ที่ประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ร่วมกับท่อแก้วสุญญากาศสองชั้นที่ไม่มีการเคลือบสารเลือกรับรังสีอาทิตย์ที่ผิวด้านนอกของท่อแก้วชั้นในจำนวน 15 ท่อ เข้ากับชุดตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ ดังแสดงในภาพที่ 1 สำหรับงานวิจัยนี้มีการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar collector thermal efficiency) ตามมาตรฐาน ISO9806-1 รายละเอียดการทดสอบแสดงในงานวิจัยของ พรนิภา และคณะ [6]

การคำนวณค่าพลังงานรายปีที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์สามารถผลิตได้และตลอดอายุการใช้งานสามารถหา

ได้จากสมการสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่คำนวณผ่านตัวแปรต่างๆ ในสภาวะที่กำหนดตามรายละเอียดในตารางที่ 1 อันได้แก่ G_t , T_a , T_i และ T_o เมื่อใส่ค่าในตัวแปรในสมการสมรรถนะทางความร้อนทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน ณ สภาวะที่กำหนด จากนั้นนำประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ได้มาคูณกับค่าพลังงานรังสีอาทิตย์เฉลี่ยรายปีของประเทศไทย (E) ทำให้ได้ค่าพลังงานรายปีที่สามารถ



ภาพที่ 1 ต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศรูปแบบใหม่ที่ประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์

ตารางที่ 1 ข้อมูลภาพวิเคราะห์ค่าพลังงานรายปี [3]

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่าตัวแปร	หน่วย
ความเข้มรังสีอาทิตย์	G_t	800	W/m^2
อุณหภูมิอากาศแวดล้อม	T_a	30	$^{\circ}C$
อุณหภูมิน้ำเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์	T_i	35	$^{\circ}C$
อุณหภูมิน้ำออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์	T_o	60	$^{\circ}C$
ค่าพลังงานรังสีอาทิตย์เฉลี่ยรายปีของประเทศไทย [9]	E	1,800	$kWh/m^2\text{-year}$

ผลิตได้ต่อพื้นที่ 1 ตารางเมตร ($1 m^2$) นำค่าที่ได้นี้คูณด้วยพื้นที่ของตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์สำหรับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ $1.08 m^2$ ผลที่ได้คือค่าพลังงานที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์สามารถผลิตได้รายปีและสุดท้ายเมื่อคูณด้วยจำนวนอายุการใช้งาน (16 ปี) ทำให้ทราบถึงค่าพลังงานที่ผลิตได้ตลอดอายุการใช้งานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ [8] ดังรายละเอียดในแผนภาพการวิเคราะห์ค่าพลังงานความ รังสีอาทิตย์รายปีในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 การคำนวณค่าพลังงานรายปีที่ตัวเก็บรังสี-อาทิตย์สามารถผลิตได้ตลอดอายุการใช้งาน

การประเมินต้นทุนวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Cost, LCC) ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์เป็นการประเมินต้นทุนที่เกิดขึ้นตลอดช่วงอายุการใช้งาน มีขอบเขตการพิจารณาจากค่าใช้จ่ายในการลงทุนอุปกรณ์ประกอบไปด้วยค่าชุดอุปกรณ์ถังน้ำร้อน แผ่นครีบบอะลูมิเนียม ค่าดำเนินการอื่นๆ แรงงานในการติดตั้งระบบรวมถึงค่ากระบวนการเคลือบสารเลือกรับรังสีอาทิตย์และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาที่เกิดขึ้นตลอดช่วงอายุการใช้งานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (คิดจาก ร้อยละ 0.5 ของเงินลงทุน) โดยอายุการใช้งานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 16 ปี [10] การคำนวณต้นทุนวัฏจักรชีวิตสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 [11, 12] นำค่าใช้จ่ายทั้งหมดนี้มาปรับคิดเป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิ โดยการใช้อัตราดอกเบี้ยที่กำหนดโดยธนาคารกสิกรไทย [13]

$$LCC = C_c + \sum_{n=1}^N \frac{C_n}{(1+i)^n} - \frac{SV}{(1+i)^N} \quad (1)$$

เมื่อ

CC = เงินลงทุนเริ่มต้น (Initial capital cost) (บาท)

Cn = ต้นทุนในการดำเนินงาน (Operating cost)

ค่าซ่อมบำรุง, เชื้อเพลิง และ อื่นๆ ในแต่ละปี

(บาท)

SV = มูลค่าซากที่เหลือสุดท้ายของโครงการ (บาท)

i = อัตราดอกเบี้ย (Interest rate) หรือ อัตรา

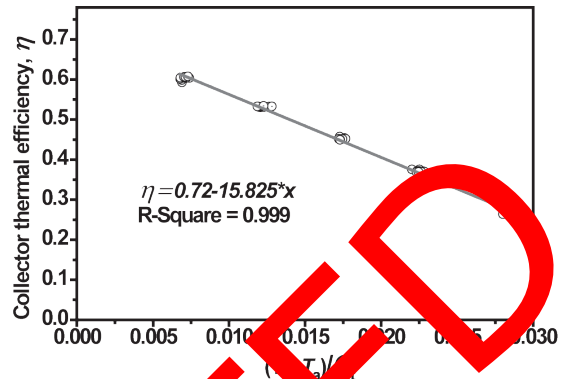
คิดลด (Discount rate)

n = อายุการใช้งานโครงการ (Project period)

N = จำนวนปีที่สิ้นสุดโครงการ (Year at the end of project)

En = พลังงานที่สามารถผลิตได้ในแต่ละปี

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล



ภาพที่ 3 สมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่ประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นวัสดุเคลือบรังสีอาทิตย์ [14]

สมรรถนะทางความร้อนของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่ประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์เคลือบผิววัสดุเคลือบรังสีอาทิตย์ที่ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 9806-1 แสดงดังภาพที่ 3 ในงานวิจัยนี้พิจารณาที่สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม (UL) มีค่าคงที่ ซึ่งมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรงระหว่างประสิทธิภาพทางความร้อน (η) กับ $(T_i - T_a)/G_t$ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับกรณีพิจารณาที่สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม (UL) มีค่าไม่คงที่ จากสมรรถนะทางความร้อนพบว่าค่าประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุด (η_{max}) ของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 0.72 ที่อุณหภูมิน้ำขาเข้ามีค่าเท่ากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ($\Delta T = T_i - T_a = 0$) และผลคูณของแฟกเตอร์การดึงความร้อน (F_R) กับสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวมหรือค่าการสูญเสียความร้อน ($-FRUL$) มีค่าเท่ากับ $15.83 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ (ความชันของกราฟ) ดังนั้นสมการสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรง คือ $\eta = 0.72 - 15.825x$ เมื่อแกน x คือ $(T_i - T_a)/G_t$ การเปรียบเทียบสมรรถนะ

ทางความร้อนของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ที่ผ่านการทดสอบโดยวิทยาลัยพลังงานทดแทน ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุด (η_{max}) ของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศในงานวิจัยนี้มีค่าสูงกว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบของบริษัท A-G และสูงกว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศของบริษัท I แต่มีค่าต่ำกว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ของบริษัท H และ J ตามลำดับ

ค่าพลังงานรายปีของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์กับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ถูกคำนวณจากสมการสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ คือ $\eta = 0.72-15.83x$ เมื่อ x คือ $(T_i - T_a)/G_t$ ผ่านตัวแปรต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าค่าประสิทธิภาพต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศมีค่าเท่ากับ 0.62 เมื่อคูณด้วยค่าพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายปีของประเทศไทย (E) ทำให้ได้ค่าพลังงานรายปีของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 1,117.9 kWh/m² งานวิจัยนี้มีพื้นที่ของตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 1.08 m² ดังนั้นทำให้ได้ค่าพลังงานรายปีของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศนี้สามารถผลิตได้มีค่าเท่ากับ 1,209.3 kWh หรือ 4,346.3 MJ หรือคิดเป็นพลังงานที่ผลิตได้ตลอดอายุการใช้งาน (16 ปี) มีค่าเท่ากับ 19,316.8 kWh หรือ 6,9540.5 MJ เมื่อเปรียบเทียบพลังงานรายปีที่สามารถผลิตได้ต่อพื้นที่ 1 m² ของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศในงานวิจัยนี้กับค่าพลังงานรายปีของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ โดยคำนวณจากสมการสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ของ

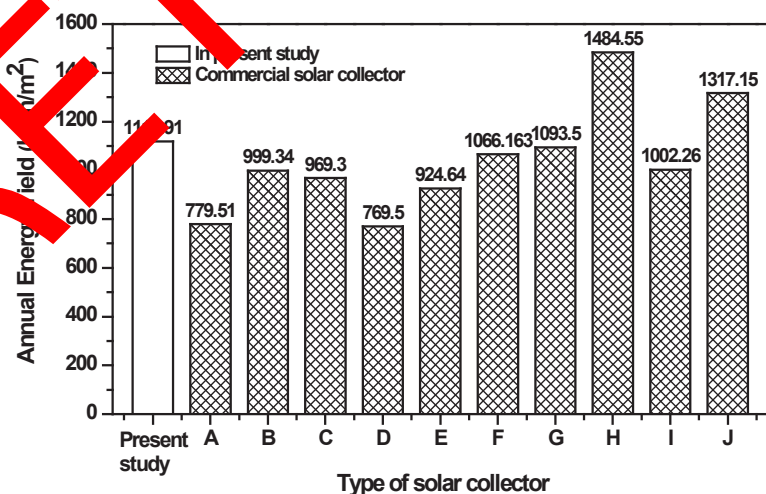
ทุกบริษัทดังตารางที่ 2 (บริษัท A-J) ผ่านตัวแปรต่างๆ ในตารางที่ 1 [8] ผลการคำนวณค่าพลังงานความร้อนรายปีของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศจากงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับค่าพลังงานความร้อนรายปีของตัวเก็บรังสีอาทิตย์จากบริษัทต่างๆ แสดงดังภาพที่ 4 พบว่าค่าพลังงานความร้อนรายปีที่สามารถผลิตได้ของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์สุญญากาศนี้เปรียบเทียบกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบบริษัท A-G มีค่าพลังงานความร้อนรายปีที่ได้ผลิตได้สูงกว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบของบริษัท A-G ยกเว้นบริษัท H และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศชนิด Heat pipe ของบริษัท I และ J นั้น พบว่าต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศนี้สามารถให้ค่าพลังงานความร้อนรายปีอยู่ระหว่างค่าพลังงานความร้อนรายปีของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ของบริษัท I และ J นอกจากนี้ค่าพลังงานความร้อนรายปีที่ได้ผลิตได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทุกชนิดสอดคล้องกับสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ในตารางที่ 2

การผลิตพลังงานความร้อนรายปีของตัวเก็บรังสีอาทิตย์สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ 1) มีความสามารถในการผลิตพลังงานความร้อนน้อยกว่า 500 kWh/m² 2) มีความสามารถในการผลิตพลังงานความร้อนตั้งแต่ 501-899 kWh/m² 3) มีความสามารถในการผลิตพลังงานความร้อนมากกว่า 900 kWh/m² [8] เห็นได้ว่าต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศรูปแบบใหม่ มีความสามารถในการผลิตพลังงานความร้อนอยู่ในช่วงที่ 3 ที่สามารถผลิตได้มากกว่า 900 kWh/m² ซึ่งเป็นกลุ่มที่สามารถผลิตความร้อนได้สูงสุด ดังนั้นสรุปได้ว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์มี

ศักยภาพในการผลิตพลังงานความร้อนหรือน้ำร้อน และอุตสาหกรรมพลังงานทดแทนเช่นเดียวกันกับตัว สำหรับการใช้งานในภาคครัวเรือน ภาคอุตสาหกรรม เก็บรังสีอาทิตย์ที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์

ตารางที่ 2 สมรรถนะทางความร้อนของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียม อะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์และตัวเก็บรังสีอาทิตย์ในเชิงพาณิชย์ที่ผ่านการทดสอบโดยวิทยาลัยพลังงาน ทดแทน [8]

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์	
ความหนา 11.8 ไมโครเมตร	$\eta = 0.72 - 15.83(T_f - T_o)/G_t$
ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ	
Company A	$\eta = 0.57 - 21.91(T_f - T_o)/G_t$
Company B	$\eta = 0.62 - 10.37(T_f - T_o)/G_t$
Company C	$\eta = 0.64 - 16.24(T_f - T_o)/G_t$
Company D	$\eta = 0.45 - 3.6(T_f - T_o)/G_t$
Company E	$\eta = 0.65 - 21.81(T_f - T_o)/G_t$
Company F	$\eta = 0.65 - 13.23(T_f - T_o)/G_t$
Company G	$\eta = 0.66 - 8.4(T_f - T_o)/G_t$
Company H	$\eta = 0.8 - 1.94(T_f - T_o)/G_t$
ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ Flat Pipe	
Company I	$\eta = 0.57 - 0.54(Tm^*) - 0.0036 G_t (Tm^*)^2$
Company J	$\eta = 0.80 - 2.77(Tm^*) - 0.0200 G_t (Tm^*)^2$



ภาพที่ 4 ค่าพลังงานความร้อนรายปีที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์สามารถผลิตได้

ตารางที่ 3 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์

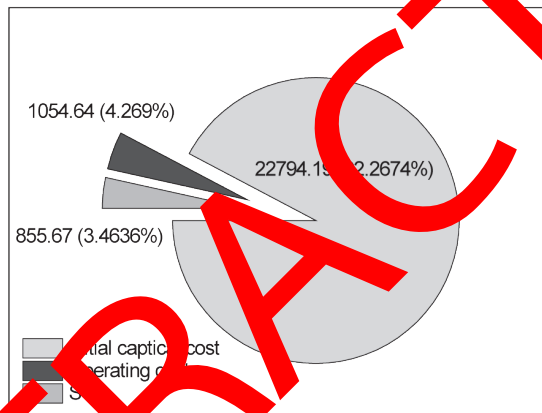
พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่าตัวแปร	หน่วย
เงินลงทุนเริ่มต้น	C_C	22,794.19	บาท
ต้นทุนในการดำเนินการ	C_n	1,054.64	บาท
มูลค่าซากปีที่สุดท้ายของโครงการ	SV	855.67	บาท
พลังงานที่สามารถผลิตได้ในแต่ละปี	E_n	1,207.97	kWh/ปี
อัตราดอกเบี้ย หรือ อัตราคิดลด	i	6.75	ร้อยละ
อายุการใช้งานโครงการ	n	16	ปี
จำนวนปีที่สิ้นสุดโครงการ	N	15	ปี

การประเมินต้นทุนวัฏจักรชีวิต (LCC) ของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศรูปแบบใหม่ที่ใช้ประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ พิจารณาจากต้นทุนและผลประโยชน์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์มาวิเคราะห์ โดยต้นทุนของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยต้นทุน 2 ส่วน ดังแสดงในตารางที่ 3 ส่วนแรก คือ เงินลงทุนเริ่มต้น (ค่าลงทุนอุปกรณ์และพลังงานในการติดตั้งระบบ) ประกอบด้วย ค่าอุปกรณ์ชุดผลิตน้ำร้อน 12,053.60 บาท และค่าแผ่นอะลูมิเนียม 770.80 บาท ซึ่งอุปกรณ์ทั้งสองชนิดมีความจำเป็นที่จะนำเข้ามาจากประเทศจีนส่งผลให้มีค่าขนส่งสินค้าและค่าดำเนินการต่างๆ รวมเป็นเงิน 9,100.00 บาท ค่ากระบวนการทำฟิล์มอะโนไดซ์บนแผ่นอะลูมิเนียม 369.79 บาท รวมเงินลงทุนเริ่มต้นเท่ากับ 22,794.19 บาท โดยสามารถคิดเป็นร้อยละของเงินลงทุนเริ่มต้นตามแต่ละรายการเรียงลำดับสัดส่วนเงินลงทุนจากมากไปน้อยได้ดังต่อไปนี้ ค่าอุปกรณ์ชุดผลิตน้ำร้อน ร้อยละ 52.88 ค่าขนส่งสินค้าและค่าดำเนินการต่างๆ ร้อยละ 42.12 ค่าแผ่นอะลูมิเนียม ร้อยละ 3.38 และค่ากระบวนการทำฟิล์มอะโนไดซ์ ร้อยละ 1.62 ตามลำดับ และต้นทุนในการ

ดำเนินการหรือบำรุงรักษาระบบเท่ากับร้อยละ 0.5 ของมูลค่าการลงทุน หรือ 1,054.64 บาท และส่วนที่สองคือผลประโยชน์ประกอบด้วมูลค่าซากปีที่สุดท้ายของระบบ ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 10 ของมูลค่าการลงทุน หรือ 855.67 บาท ผลประโยชน์ที่ได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ คือมูลค่าพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้โดยได้จากการเปรียบเทียบมูลค่าของไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตน้ำร้อนในปริมาณที่เท่ากัน ผลการประเมินต้นทุนวัฏจักรชีวิต (LCC) ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ มีค่าเท่ากับ 22,993 บาท สามารถคิดเป็นสัดส่วนร้อยละของต้นทุนวัฏจักรชีวิต (ภาพที่ 5) พบว่าร้อยละ 92.27 คือเงินลงทุนเบื้องต้นซึ่งถือเป็นต้นทุนหลักของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ สำหรับร้อยละ 4.37 คือค่าบำรุงรักษา และร้อยละ 3.46 คือมูลค่าซาก (ผลประโยชน์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาต้นทุนวัฏจักรชีวิตของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศรูปแบบใหม่ พบว่ามีค่าที่ต่ำกว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ของบริษัท I, II และ III ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4 และ ภาพที่ 6 เนื่องจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ส่วนใหญ่นำเข้าจากต่างประเทศ ส่งผลให้มีราคาสูงตามไปด้วย อันเนื่อง

มาจากต้นทุนการผลิต ค่าขนส่งและภาษีนำเข้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของท่อดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่เป็นหัวใจหลักในการเปลี่ยนรังสีอาทิตย์ให้เป็นความร้อน ซึ่งเมื่อมีการแตกหักหรือสูญเสียความเป็นสุญญากาศแล้วจำเป็นต้องเปลี่ยนทั้งชุดท่อสุญญากาศ สำหรับต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบทอสุญญากาศรูปแบบใหม่ที่ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ มีข้อได้เปรียบคือสามารถผลิตได้เองด้วยวัตถุดิบและเทคโนโลยีภายในประเทศ ทำให้ราคาต้นทุนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าลดลง และที่สำคัญเมื่อ

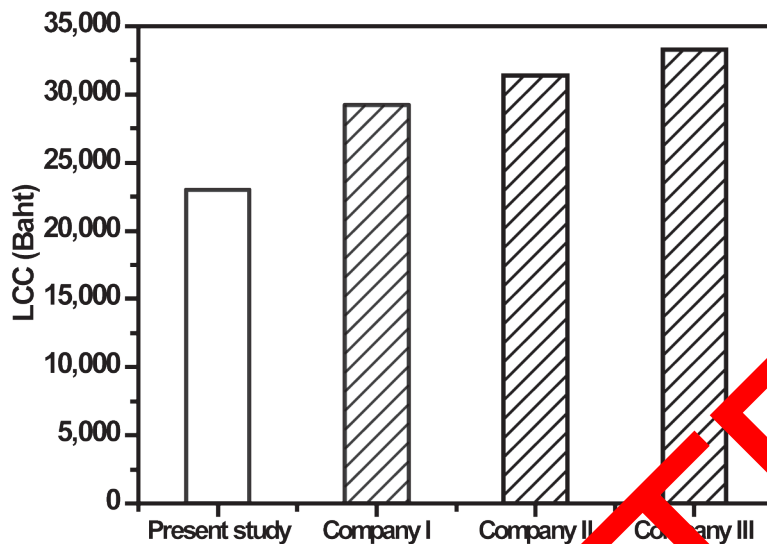
เกิดการแตกหักเสียหายของทอสุญญากาศ ก็สามารถเปลี่ยนเพียงทอแก้วสุญญากาศใสเท่านั้น ไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนในส่วนของตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ ทำให้ค่าบำรุงรักษามีค่าลดลงตามไปด้วย และจากราคาที่ถูกกลงส่งผลให้ภาครัฐและภาคเอกชนมีความสนใจในการลงทุนติดตั้งระบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์มากยิ่งขึ้น ทำให้การใช้พลังงานทดแทนภายในประเทศมีอัตราเติบโตมากขึ้น รวมถึงเป็นการกระตุ้นให้ภาคอุตสาหกรรมอะลูมิเนียมและอุตสาหกรรมพลังงานทดแทนมีการเติบโตทางธุรกิจตามไปด้วย



ภาพที่ 5 ร้อยละของต้นทุนวัฏจักรชีวิตของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบทอสุญญากาศรูปแบบใหม่

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบต้นทุนวัฏจักรชีวิตของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบทอสุญญากาศรูปแบบใหม่กับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบทอสุญญากาศที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์

Type	เงินลงทุนเริ่มต้น (C_i)	ต้นทุนดำเนินการ (C_n)	มูลค่าซากปีสุดท้าย (SV)	ต้นทุนวัฏจักรชีวิต (LCC)
Present study	22,794.19	1,054.64	855.67	22,993.16
company I	29,000.00	1,341.76	1088.63	29,253.13
company II	31,200.00	1,352.06	1171.21	31,380.85
company III	33,000.00	1,526.83	1238.78	33,288.04



ภาพที่ 6 ต้นทุนวัฏจักรชีวิตของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศและตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์

4. สรุปผลการวิจัย

ผลการคำนวณค่าพลังงานความร้อนรายปีและการประเมินต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศรูปแบบใหม่ ประเมินค่าพลังงานความร้อนรายปีของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์สำหรับอาคารพาณิชย์ พบว่าต้นทุนวัฏจักรชีวิตของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศรูปแบบใหม่นี้มาจากเงินลงทุนเริ่มต้น (92.27%) โดยมีค่าต้นทุนวัฏจักรชีวิต (LCC) เท่ากับ 22,993 บาท ซึ่งมีค่าต่ำกว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่มีจำหน่ายทั่วไปในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ส่วนใหญ่ในประเทศไทยนำเข้ามาจากต่างประเทศส่งผลให้ต้นทุนสูงตามไปด้วย ดังนั้น สรุปได้ว่าต้นแบบตัวเก็บ

รังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศรูปแบบใหม่ที่ประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ มีศักยภาพทั้งทางด้านพลังงานความร้อนที่ผลิตได้รายปี และทางเศรษฐศาสตร์ ที่สามารถแข่งขันในด้านเทคนิค และเชิงพาณิชย์กับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีจำหน่ายทั่วไปในท้องตลาด เพื่อใช้เป็นระบบผลิตพลังงานความร้อนหรือน้ำร้อนในภาคครัวเรือน ภาคอุตสาหกรรม และอุตสาหกรรมพลังงานทดแทน

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.)-ปริญญาโท ปี 2557 (MSD57I0148) และสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ผ่านทุนงบประมาณแผ่นดินมหาวิทยาลัยนเรศวร ประจำปี 2558 (R2558B006)

ที่สนับสนุนทุนวิจัยตลอดทั้งโครงการ และขอขอบคุณ บริษัท แอลเมทไทย จำกัด สำหรับการเป็นผู้ร่วมให้ทุน และให้การสนับสนุนในการเตรียมชิ้นงานอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทน และภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยนเรศวร สำหรับความอนุเคราะห์สถานที่ทำงานวิจัย เครื่องมือ และอุปกรณ์ทดสอบ

6. เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักพัฒนาพลังงานแสงอาทิตย์และกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา http://www.dede.go.th/dede/.../usr/.../solar%20energy%20technology_paper.pdf. เข้าดูเมื่อวันที่ 7/4/2556

[2] Duffie J.A. and William A. B. (2006). Solar engineering of thermal processes Hoboken, New Jersey: Wiley.

[3] Kennedy C. E. (2002). Review of Mid-to-High-Temperature Solar Selective Absorber Materials. National Renewable Energy Laboratory (NREL). Colorado.

[4] Kalogirou S.A. (2004). Solar thermal collectors and applications. Progress in Energy and Combustion Science 30. p 231-295.

[5] El Waraouda A., Sami J. and 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): p.1679-1683.

[6] พรนิภา นุโนชา, ธวัช สุวิงษ์ และ ทศพล ตริรุจิราภาพงศ์ (2557). การพัฒนาและประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ในตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ. วารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 22 พฤษภาคม – สิงหาคม 2557 หน้า 75-84.

[7] พรนิภา นุโนชา และ ธวัช สุวิงษ์ (2557). การประเมินด้านเศรษฐศาสตร์ของการประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ในตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ. การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทน กลุ่มชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7 : นครราชสีมา ถ่ายทอดสดแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชน. ประจวบคีรีขันธ์.

[8] อัครชัย ศิริพิมพ์วิงษ์, รัฐพร เงินศิริ, นิพนธ์ นามะน้อย และ วสุทธิ แซ่มะอาด. (2555). การประเมินค่าพลังงานความร้อนรายปีที่ตัวรับรังสีอาทิตย์ผลิตได้. Naresuan University journal. vol 20(1): pp. 16-23.

[9] กองพัฒนาพลังงานทดแทน ฝ่ายแผนงานพัฒนาโรงไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2554). แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย (พ.ศ. 2542). [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา http://www3.egat.co.th/re/egat_pv/sun_thailand.htm. เข้าดูเมื่อวันที่ 25/08/2557..

[10] กฤษณ์ คงเจริญ และ ธันวา จิตต์สงวน (2549). การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการลงทุนโครงการผลิตน้ำร้อนด้วยระบบผสมผสานพลังงานแสงอาทิตย์ :กรณีศึกษา โรงพยาบาลแก่ง จังหวัดระยอง, การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 44, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ.

[11] ชลธิชา สุทธิบุตร (2552). การประเมินวัฏจักรชีวิตและต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตของการผลิต ไบโอดีเซลจากสบู่ดำ, วศ.ม. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่.

[12] วราลักษณ์ มาลี (2553). การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม และต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตของชุดหอเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน, วศ.ม. วิศวกรรมอุตสาหการ, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่.

[13] บมจ.ธนาคารกสิกรไทย. ดอกเบี้ยอ้างอิง ลูกค้ายกยู่ชั้นดี ประเภทเงินกู้แบบมีระยะเวลา (Minimum Loan Rate). [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.kasikornbank.com/TH/RatesAndFees/Lending/Pages/Lending.aspx>, เข้าดูเมื่อวันที่ 19/2/2558.

RETRACTED