

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการออกแบบตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา

Mathematical Modeling and the Design of Solar Parabolic Trough

ประกอบ สุรพัฒน์วรรณ^{1*} และ ชีรภัทร หลิมบุญเรือง¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ

E-mail: fengpsw@ku.ac.th โทรศัพท์: 02-9428555 ต่อ 1803 โทรสาร: 02-5794576

บทคัดย่อ

ตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาเป็นอุปกรณ์ที่มีลักษณะของรูปร่างผิวโค้งเป็นแบบพาราโบลา ทรงกระบอก มีวัตถุประสงค์สะท้อนแสงบริเวณผิวทำหน้าที่สะท้อนแสงอาทิตย์ให้ไปรวมที่จุดโฟกัส ซึ่งมีของไหลที่ใช้สำหรับในการดูดซับความร้อนและมีการหมุนเวียนเอาของไหลที่มีพลังงานความร้อนไปใช้งาน ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา มีอยู่หลายประการประกอบไปด้วยการสะท้อนรังสีดวงอาทิตย์ ความแม่นยำของแบบจำลองการเดินทางของดวงอาทิตย์ การถ่ายเทความร้อนให้กับของไหล ระบบควบคุมกลไก การขับเคลื่อนรางพาราโบลาและความเร็วลม ฯลฯ สมการที่ใช้ในการออกแบบขนาดที่เหมาะสมต่อการรวมแสงของตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลายู่ในรูปแบบของสมการอนุพันธ์และมีความซับซ้อนในการแก้สมการ ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์แบบฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิก เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาขนาดที่ถูกต้องทำให้การผลิตชิ้นส่วนสำหรับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาสามารถทำได้อย่างแม่นยำในเชิงตัวเลขและจะมีประโยชน์ในกรณีที่มีการผลิตเป็นจำนวนมาก ตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาที่มีระยะโฟกัสเท่ากับ 300 มิลลิเมตร ความยาว 1.52 เมตร จำนวน 3 ชั้น ได้ถูกออกแบบและจัดสร้างขึ้น เพื่อทดสอบความสามารถในการสร้างความร้อน ใช้การหมุนเวียนของน้ำ 3 ลิตรต่อนาที ผ่านท่อสุญญากาศ ซึ่งจัดวางไว้ ณ ตำแหน่งจุดโฟกัสของตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา จากการทดสอบในสภาพแสงแดด พบว่าระบบสามารถสร้างพลังงานความร้อนได้โดยเฉลี่ย 4,180 กิโลจูล ในช่วงการทดสอบ 5 ชั่วโมง

คำสำคัญ: Solar parabolic trough, Hyperbolic function, Production of parabolic trough

Abstract

A parabolic trough solar concentrator is built from cylindrical parabolic sheet with a curved surface shape. There is a surface used to reflect sunlight to the focal point. Working fluid is circulated at this focal point and used for absorbing heat energy. The performance of parabolic trough depends on many factors such as the reflection of sun beam, the tracking accuracy of sun moving path, heat transfer to working fluid, control and drives mechanism, wind speed, etc. A derivative equation used to design the dimension of parabolic trough is complex and not convenient to solve. This research work proposed the analysis using Hyperbolic function to determine the sizing. This calculation method enables the precise production of parabolic trough. This will also provide benefit when mass production is required for solar power plant. Three parabolic troughs with 300 mm focus length and 1.52 meter long were designed and built to test for the heat absorbing capacity. Vacuum tube installed at focal point is used to absorb heat and water flow inside the tube is circulated at 3 LPM. The result shows that the system can generate heat energy up to 4,180 kJ during 5 hr operating time.

Keywords: Solar parabolic trough, Hyperbolic function, Production of parabolic trough

1. บทนำ

ในปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีแล้วว่าทรัพยากรทางพลังงานในโลกนี้เช่น น้ำมัน ถ่านหิน แก๊สธรรมชาติ เป็นต้น มีปริมาณจำกัดและจะมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการขาดแคลนและอาจหมดสิ้นไปในอนาคต การหาแหล่งพลังงานอื่นๆ มาทดแทนจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องให้ความสนใจ โดยที่แหล่งพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งมีค่าพลังงานที่ตกลงมายังผิวโลกต่อหนึ่งตารางเมตรจะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1367 [7] วัตต์ต่อตารางเมตร นับเป็นค่าพลังงานที่น่าสนใจและสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้มากที่สุด พลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ เมื่อแหล่งพลังงานอื่นๆ ใกล้เคียงหมดประเทศไทยตั้งอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตรและมีศักยภาพทางด้านพลังงานแสงอาทิตย์เป็นอย่างมาก เมื่อเทียบกับประเทศอื่นๆ หากมีการพัฒนาเทคโนโลยีทางพลังงานแสงอาทิตย์ขึ้นใช้เองภายในประเทศ จะเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกหนึ่งที่ทำให้อาจไม่ต้องซื้อพลังงานในรูปแบบอื่นและเพื่ออนาคตของประเทศต่อไป

การวิจัยอุปกรณ์ที่ช่วยในการรวบรวมรังสีแบบรางพาราโบลาที่มีมาอย่างต่อเนื่อง สำหรับในประเทศไทย นันทศักดิ์ ศักดิ์โษษิตและคณะ [1] ได้ศึกษาการจำลองและสมรรถนะของตัวรับรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลา บัญชา คงตระกูล [2] ได้ศึกษาถึงขนาดรูปร่างและความเหมาะสมของตัวรวมแสงแบบจานพาราโบลาเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อน พิสิษฐ์ สุวรรณแพทย์และเสริม จันทรฉาย [3] ได้ศึกษาถึงศักยภาพการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ระบบรวมความร้อนแบบรางพาราโบลาสำหรับการผลิตไฟฟ้าขนาด 10 เมกกะวัตต์ ในส่วนของการประยุกต์การใช้งาน วัชรินทร์ ดงบังและวิทยา พวงสมบัติ [4] ได้ทำเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้รางรวมแสงแบบพาราโบลา

สำหรับในต่างประเทศ Bakos G.C. [5] ได้ออกแบบอุปกรณ์ให้สามารถติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ตลอดทั้งวันโดยกระบวนการควบคุมแบบอัตโนมัติ รวมถึงศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและหาค่า

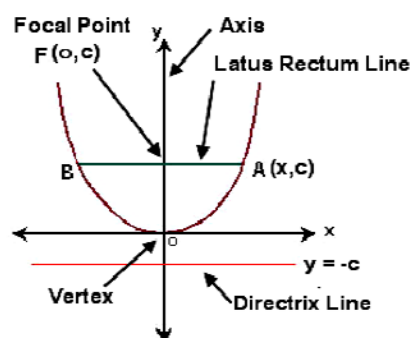
ประสิทธิภาพของพลังงาน Dirk K. [6] และคณะได้สร้างตัวเก็บความร้อนแบบรางพาราโบลา โดยนำความร้อนมาใช้ในการระบบทำความเย็นและการผลิตกระแสไฟฟ้า ในปัจจุบันมีการพัฒนาอุปกรณ์ที่ติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ออกมาหลายรูปแบบเพื่อให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน

จากการศึกษาถึงงานวิจัยที่ผ่านมาจะมุ่งเน้นการพัฒนาไปที่การออกแบบตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาเพื่อทำหน้าที่สะท้อนรังสีดวงอาทิตย์ให้ไปรวมกันที่บริเวณท่อดูดกลืนรังสีซึ่งอยู่ที่จุดโฟกัสของรางพาราโบลาที่มีของไหลที่ใช้ในการดูดซับความร้อนและมีการหมุนเวียนของไหลนำพลังงานความร้อนไปใช้งาน ซึ่งจะมีความเหมาะสมในการขยายขนาดของระบบเพิ่มเติมในอนาคตและปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของประสิทธิภาพในการสร้างพลังงานความร้อนมีอยู่หลายประการประกอบไปด้วย ความแม่นยำของแบบจำลองการเดินทางของดวงอาทิตย์ ระบบควบคุมและกลไกขับเคลื่อน ความเร็วลม ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้มีความประสงค์ศึกษาวิจัยการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ต้นแบบของตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา ตลอดจนวิเคราะห์ถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบและออกแบบระบบควบคุมที่เหมาะสมสำหรับการติดตามดวงอาทิตย์

2. การคำนวณและการออกแบบ

2.1 การวิเคราะห์หาขนาดของ parabolic trough

พาราโบลาเป็นรูปทรงที่สามารถสะท้อนแสงหรือรังสีที่ตกกระทบขนานกับแกนของพาราโบลาเข้าไปสู่จุดๆ หนึ่ง (โฟกัส) เสมอดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ส่วนประกอบต่างๆ ของพาราโบลา

โดยที่มีสมการของของพาราโบลาแบบหงายขึ้นที่มีจุดยอดอยู่ที่จุดกำเนิด (0,0) คือ

$$y = \frac{x^2}{4f} \quad (1)$$

การออกแบบให้ระยะในแนวดิ่งหรือความลึกของ Parabola trough เท่ากับระยะโฟกัส สามารถทำได้โดย

$$y=f ; x= \frac{w}{2} \quad (2)$$

$$f= \frac{\left(\frac{w}{2}\right)^2}{4f} \quad (3)$$

$$\frac{f}{w}=0.25 \quad (4)$$

อัตราส่วนเหมาะสมในการออกแบบตัวพาราโบลา ระหว่างความยาวโฟกัสต่อความกว้างของช่องรับรังสี (Ratio f) จะมีค่าเท่ากับ 0.25

การวิเคราะห์หาระยะความโค้งของ Parabolic trough

$$s=2 \int_0^x \sqrt{1+\left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \quad (5)$$

ใช้แนวคิดของ Hyperbolic function ในการวิเคราะห์

$$\frac{dy}{dx} = \frac{x}{2f} = \sinh u \quad (6)$$

$$\sqrt{1+\left(\frac{dy}{dx}\right)^2} = \sqrt{1+\sinh^2 u} \quad (7)$$

$$\sqrt{1+\sinh^2 u} = \cosh u \quad (8)$$

$$x = 2f \sinh u \quad (9)$$

$$dx = 2f \cosh u du \quad (10)$$

$$s=2 \int_0^x \cosh u \cdot 2f \cosh u \cdot du \quad (11)$$

$$s=4f \int_0^x \cosh^2 u du \quad (12)$$

$$s=4f \left(\frac{\sinh(2u)}{4} + \frac{u}{2} \right) \quad (13)$$

จะเห็นได้ว่าระยะความโค้งของ Parabolic trough อยู่ในรูปตัวแปรของ f (ระยะโฟกัส) และ u ซึ่งเป็นตัวแปรของ Hyperbolic function ดังนั้นขั้นตอนต่อไปจึงต้องดำเนินการวิเคราะห์ค่า u โดยการ Inverse hyperbolic function

$$\frac{x}{2f} = \sinh u \quad (14)$$

$$\frac{f}{w}=0.25 \text{ แทนค่า } x= \frac{w}{2} \quad (15)$$

$$\frac{f}{(2x)}=0.25 \text{ จะได้ว่า } x=2f \quad (16)$$

$$\sinh u = \frac{x}{2f} = 1 \quad (17)$$

$$\frac{1}{2} (e^u - e^{-u}) = 1 \quad (18)$$

$$e^u - \frac{1}{e^u} = 2 \quad (19)$$

คูณทั้งสองด้านด้วย e^u

$$(e^u)^2 - 2(e^u) - 1 = 0 \quad (20)$$

สมการอยู่ในรูป Quadratic equation และสามารถ Solve สมการนี้ได้

$$e^u = 2.415 \text{ และ } u = 0.882 \quad (21)$$

แทนค่า u ในสมการ S

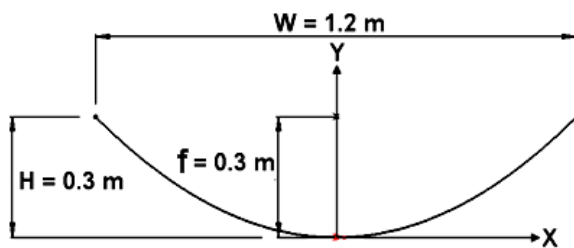
$$s=4f \left(\frac{\sinh(1.764)}{4} + \frac{0.882}{2} \right) \quad (22)$$

รูปแบบของสมการ (22) จะสามารถนำไปใช้ในการหาระยะความโค้ง S หรือระยะความกว้างของแผ่นที่ใช้ผลิต parabolic trough และสามารถใช้ได้กับการออกแบบที่มีระยะ $f/w = 0.25$ ในกรณีงานวิจัยนี้ใช้ค่า $f = 0.3$ เหตุผลเนื่องมาจากความเหมาะสมในการใช้ขนาดวัสดุ ซึ่งในกรณีนี้ใช้แผ่นโลหะขนาดมาตรฐานอย่างคุ้มค่า โดยให้มีส่วนเหลือทิ้งน้อยที่สุด ดังนั้นจะต้องใช้ระยะ S เท่ากับ

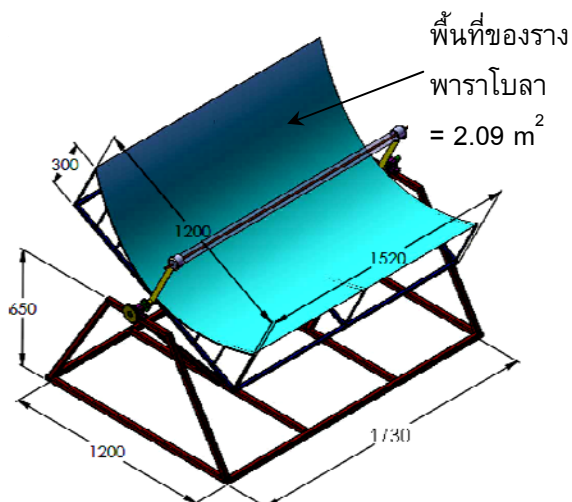
$$s = 4(0.3) \left(\frac{\sinh(1.764)}{4} + \frac{0.882}{2} \right) \quad (23)$$

$$s = 1.379 \text{ m} \quad (24)$$

จากระยะโฟกัสมีค่าเท่ากับ 0.3 เมตร จะได้ค่าความกว้างของช่องรับรังสีคือ 1.2 เมตร จะได้สัดส่วนของส่วนโค้งพาราโบลาตั้งรูปที่ 2 และแบบจำลองของตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาที่ได้ออกแบบดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 มิติของพาราโบลาที่ออกแบบ



รูปที่ 3 ขนาดของชุดพาราโบลาที่ออกแบบ หน่วย:mm

ตารางที่ 1 ขนาดของรางพาราโบลาที่ออกแบบ

ลำดับที่	รายละเอียด	ขนาด
1	Parabola Length (L)	1520 mm
2	Parabola aperture (W)	1200 mm
3	Focal distance (f)	300 mm
4	Thickness (mean value)	3 mm
5	Aperture area (A_a)	2.09 m ²

ค่าของตัวรวมรังสีที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยที่สุดที่จะสามารถรองรับรังสีทั้งหมดที่สะท้อนมาจากรางพาราโบลาที่มีความโค้งสมบูรณ์ มีค่าคือ (โดยที่ $a = w/f$)

$$d_{\text{req}} = \frac{f}{8} (a^2 + 16) \sin \theta_s \quad (25)$$

2.2 ประสิทธิภาพทางความร้อนของตัวเก็บรังสี

พิจารณาถึงค่าของแฟกเตอร์ที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวรวบรวม โดยพิจารณาที่ระบบรวบรวมรังสีเป็นแบบเชิงเส้นที่มีตัวรับแสงแบบทรงกระบอก F' คือ

$$F' = \frac{1/U_L}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_o}{h_{fi} D_i} + \left(\frac{D_o}{2k} \ln \frac{D_o}{D_i} \right)} \quad (26)$$

ค่าพลังงานความร้อนของของไหลที่ไหลอยู่ภายในท่อในนี้คือน้ำคือ

$$Q_u \Delta t = m C_p (T_1 - T_2) \quad (27)$$

และค่าประสิทธิภาพของระบบสามารถหาได้จาก

$$\eta = \frac{Q_u}{A_a I_b} \quad (28)$$

2.3 การเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์

มุมเดคลิเนชัน (Declination angle) เป็นมุมที่แสดงตำแหน่งเชิงมุมของดวงอาทิตย์ที่เวลาเที่ยงสุริยะ

(Solar noon) เมื่อเทียบกับระนาบของเส้นศูนย์สูตร
ซึ่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง $-23.45^{\circ} \leq \delta \leq 23.45^{\circ}$ โดย
จะคำนวณได้จาก [7]

$$\delta = 23.45 \sin \left(360 \times \frac{248+n}{365} \right) \quad (29)$$

มุมของแต่ละชั่วโมงหาได้จาก

$$\omega = 15(12 - st) \quad (30)$$

เมื่อ st คือเวลามาตรฐานท้องถิ่นเทียบกับเวลา
เที่ยงสุริยะ (Solar noon) ในพื้นที่ทดสอบหาได้จาก

$$st = \text{Standard time} + E-4(\text{Long}_{st} - \text{Long}_{Loc}) \quad (31)$$

เมื่อ Long_{st} คือ เส้นแวงที่ลากผ่านเวลามาตรฐาน
 Long_{Loc} คือ เส้นแวงที่ลากผ่านเวลาท้องถิ่น

จากค่าและสมการต่าง ๆ ที่ได้กำหนดจะนำไป
ออกแบบหารูปร่าง ขนาดและการติดตั้งดวงอาทิตย์
ของรางพาราโบลา ซึ่งจะนำค่าที่คำนวณได้จัดสร้าง
ต้นแบบตัวรวบรวมแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา
ขึ้นมาเพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ในการทดสอบ

3. อุปกรณ์และวิธีการทดสอบ

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้

ตัวรับและรวบรวมแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา
เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนพลังงานที่ได้จากรังสี
ของดวงอาทิตย์ไปเป็นความร้อนให้แก่ของไหลทำงาน
ซึ่งชุดรับและรวบรวมรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลา
ดังแสดงในรูปที่ 4 มีส่วนประกอบหลักดังนี้คือ 1)ท่อ
สุญญากาศ (Evacuated tubes) เป็นแบบ 2 ชั้น โดยมี
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 47 mm และขนาด
เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 33 mm ชั้นนอกจะเป็น
สุญญากาศ ส่วนภายในหลอดแก้วจะมีท่อทองแดง
สำหรับให้น้ำไหลผ่านอยู่ตรงกลางอีกที จะอาศัยการ
กักเก็บความร้อน โดยระหว่างหลอดแก้วมีค่าเป็น

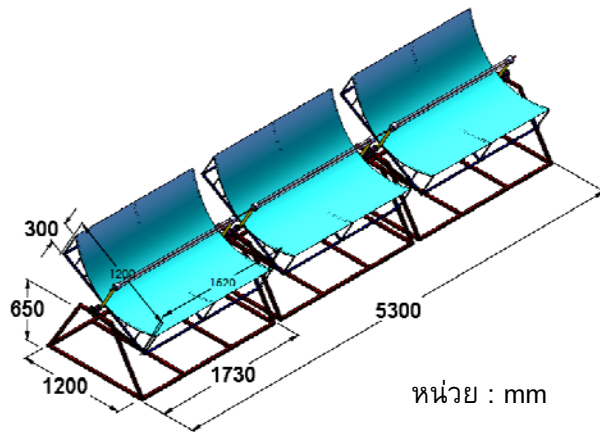
สุญญากาศจะเป็นการป้องกันการสูญเสียความร้อน
และสามารถสะสมความร้อนได้เป็นอย่างดี 2)ชุด
รวบรวมรังสีจากแสงอาทิตย์ ซึ่งติดตั้งแผ่นสะท้อนรังสี
ดวงอาทิตย์ (Solar Reflector film) ที่มีการเคลือบวัสดุ
ที่เป็นอลูมิเนียมไว้ที่ชั้นใน เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ
ในการสะท้อนรังสีได้เป็นอย่างดี โดยจะเคลือบอยู่
บริเวณด้านบนพื้นผิวของรางพาราโบลา แผ่นสะท้อน
รังสีนี้จะช่วยหักเหรังสีทั้งหมดไปที่ท่อแก้วสุญญากาศ
ทำให้ความร้อนรวมกันและดูดซับค่าพลังงานความ
ร้อนได้มากขึ้นมีอัตราการสะท้อนรังสีดวงอาทิตย์อยู่ที่
85% 3)ระบบท่อและถังสะสมความร้อนเพื่อให้สาร
ทำงานไหลหมุนเวียนอยู่ภายใน โดยจะใช้ท่อทองแดง
ขนาด 3 นิ้ว (3/8 นิ้ว) ซึ่งเป็นขนาดที่สามารถรับรังสี
ดวงอาทิตย์ที่รวบรวมได้หมดพอดี ซึ่งจะใช้ราง
พาราโบลาทั้งหมด 3 รางประกอบกันเป็นแนวยาวดัง
รูปที่ 5 และมีขนาดโดยรวมดังรูปที่ 6



รูปที่ 4 ด้านหน้าของรางพาราโบลา

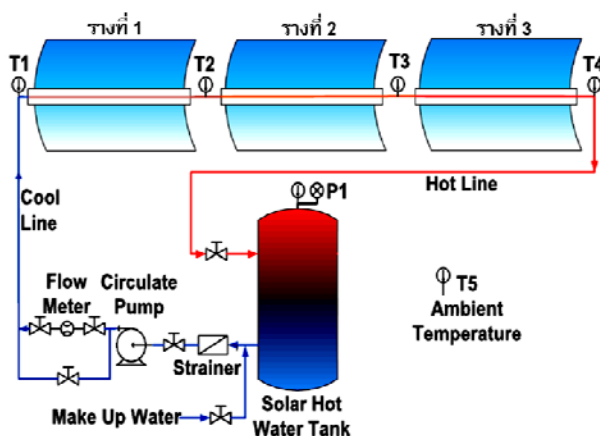


รูปที่ 5 ชุดรวบรวมแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา



รูปที่ 6 ขนาดโดยรวมของอุปกรณ์ทดสอบ

รูปที่ 7 แสดงแผนผังของชุดรวบรวมแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาที่ได้กำหนดตำแหน่งต่างๆ ของจุดที่จะทำการบันทึกอุณหภูมิของของไหลภายในท่อและอุณหภูมิของอากาศในบริเวณที่ทำการทดสอบ โดยจะประกอบไปด้วย อุณหภูมิของไหลภายในท่อที่ออกจากรางที่ 1 (T1), อุณหภูมิของไหลภายในท่อที่ออกจากรางที่ 1 (T2), อุณหภูมิของไหลภายในท่อที่ออกจากรางที่ 2 (T3), อุณหภูมิของไหลภายในท่อที่ออกจากรางที่ 3 (T4) และอุณหภูมิของอากาศในบริเวณที่ทำการทดสอบ (T5) ซึ่งระยะระหว่าง T1-T4 จะค่าเท่ากับ 1.7 เมตร



รูปที่ 7 แผนผังของระบบพาราโบลาที่ออกแบบ

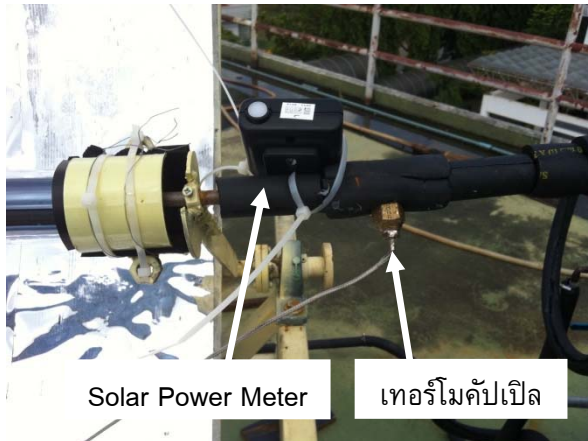
3.2 วิธีการทดสอบ

การทดสอบจะทำการทดสอบจริงกับแสงอาทิตย์โดยการวางตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา

ให้ตัวท่อบรับแสงอาทิตย์วางไปตามแนวทิศเหนือ-ใต้ และให้ตัวรางพาราโบลาที่รวบรวมแสงอาทิตย์เคลื่อนที่ตามแนวทิศตะวันออก-ตะวันตก เริ่มการทดสอบตัวรางพาราโบลาจะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเริ่มต้นและจะมีการปรับให้ตัวรางพาราโบลาเคลื่อนที่ติดตามดวงอาทิตย์ทุกๆ ชั่วโมงๆ ละ 15 องศา สารที่ใช้ในการทดสอบเป็นน้ำเปล่าให้ไหลด้วยอัตราการไหลคงที่คือ 3 LPM และน้ำจะถูกทำให้ไหลหมุนเวียนภายในระบบ ซึ่งถึงที่ใช้สะสมความร้อนมีปริมาตร 50 ลิตร ส่วนการเก็บข้อมูลจะเริ่มตั้งแต่เวลา 12.00-16.00 น. ตลอดการทดสอบจะวัดและเก็บบันทึกข้อมูลอุณหภูมิของน้ำในท่อแต่ละจุดและอุณหภูมิของอากาศบริเวณที่ทำการทดสอบตามที่ได้กำหนดไว้ด้วยเทอร์โมคัปเปิลแบบชนิด K จะติดตั้งที่ท่อทองแดงตามตำแหน่ง T1 ถึง T5 ตามรูปที่ 7 จะเก็บค่าอุณหภูมิโดยใช้อุปกรณ์บันทึกข้อมูลแบบต่อเนื่อง (data logger) และวัดค่าความเข้มรังสีของดวงอาทิตย์ (I) ในหน่วยของ W/m^2 ด้วยเครื่อง Solar Power Meter รุ่น TES-1333R ทุกๆ 1 นาที ซึ่งเป็นแบบเก็บบันทึกข้อมูลได้ในตัวจนครบ 4 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 9 นำผลการทดสอบมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำภายในท่อและอุณหภูมิของอากาศภายนอกบริเวณที่ทำการทดสอบกับเวลาที่รับแสงอาทิตย์



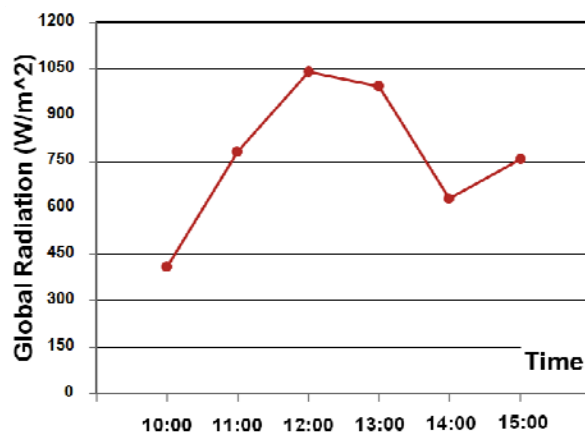
รูปที่ 8 อุปกรณ์สำหรับการทดสอบ



รูปที่ 9 Solar Power Meter และเทอร์โมคัปเปิล

3.3. ผลการทดสอบ

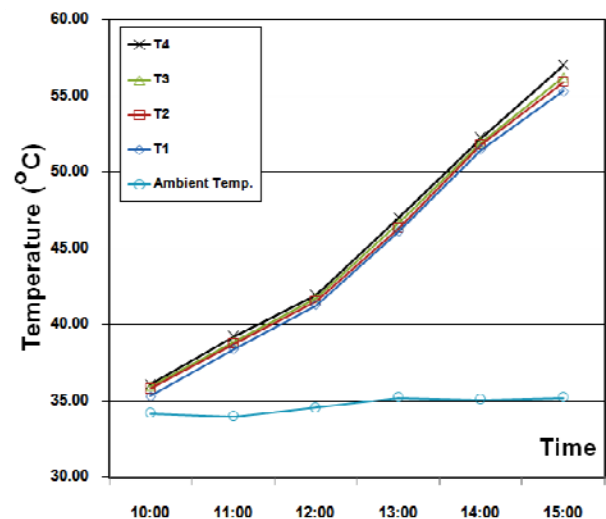
ได้ทำการทดสอบในเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2554 โดยเก็บข้อมูลทุก ๆ 2 นาที แล้วหาค่าเฉลี่ยในเวลา 1 ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 10.00 -15.00 น. เป็นเวลา 5 ชั่วโมง และเลือกทดสอบในวันที่ท้องฟ้าปลอดโปร่ง และมีแดดตลอดทั้งวัน ได้ค่าความเข้มรังสีดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีและเวลา

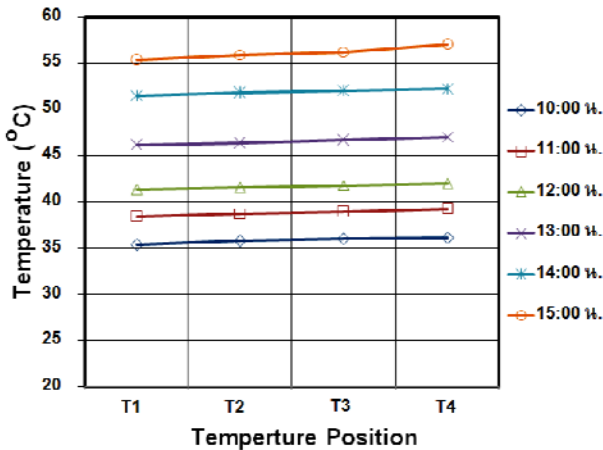
จากรูปที่ 10 พบว่าค่าความเข้มรังสีของดวงอาทิตย์จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นตั้งแต่เวลา 10:00-12:00 น. และมีค่าสูงสุดอยู่ระหว่างช่วงเวลา 12:00 น. และในช่วงตั้งแต่เวลา 13:00-14:00 น. ระดับรังสีจะลดน้อยลงเนื่องจากในช่วงเวลานี้มีเมฆมาบังในบริเวณสถานที่ทดสอบจึงทำให้กราฟจะลดลง แต่ในช่วงตั้งแต่เวลา 14:00-15:00 น. ระดับรังสีเพิ่มขึ้นเนื่องจากในช่วงเวลานี้เมฆที่มาบังในบริเวณสถานที่ทดสอบได้

ผ่านไปจึงทำให้กราฟมีความชันเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 11 อุณหภูมิของน้ำที่ไหลผ่านจุดต่างๆ ของท่อทองแดง ซึ่งอยู่ในท่อแก้วสุญญากาศจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่มีแสงแดดมาตกกระทบบนช่องรับรังสีของรางพาราโบลา ถึงแม้ในช่วงเวลา 13:00-14:00 น. จะมีค่าของรังสีดวงอาทิตย์ที่ลดลงบ้าง ซึ่งทำให้อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิในช่วงนี้ช้าลง โดยอุณหภูมิที่จุด T4 เป็นจุดที่มีน้ำไหลผ่านเป็นจุดสุดท้ายของชุดทดสอบจะมีอุณหภูมิสูงที่สุดตลอดเวลาที่ทำการทดสอบ ขณะที่อุณหภูมิของอากาศแวดล้อมจะมีอุณหภูมิเฉลี่ยคงที่เท่ากับ 35°C



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา

รูปที่ 12 เป็นการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่จุดต่างๆ (T1-T4) พบว่าที่เวลาเดียวกันอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นจากจุด T1 ไปจนถึงจุด T4 ซึ่งจุด T4 เป็นจุดที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดในทุกๆ เวลาและอุณหภูมิจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ที่เวลาทำการทดสอบมากขึ้น



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่ง

รูปที่ 12 และจากสมการที่ 27 จะได้ค่าพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในแต่ละชั่วโมงตั้งแต่วันที่ 10:00-15:00 น. มีค่าเป็นดังนี้ 550, 619, 504, 685, 557 และ 1,265 kJ ตามลำดับ ซึ่งทำให้ได้ค่าพลังงานความร้อนรวมเฉลี่ยเท่ากับ 4,180 kJ

4. สรุปผลการวิจัย

- O สมการที่ใช้ในการออกแบบขนาดของที่เหมาะสมต่อการรวมแสงอาทิตย์ของ Parabolic trough อยู่ในรูปแบบของสมการอนุพันธ์ และมีความซับซ้อนในการแก้สมการ
- O ในงานวิจัยนี้ได้เสนอการวิเคราะห์การแก้ปัญหาแบบ Hyperbolic function เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาขนาดที่ถูกต้อง ทำให้การผลิตชิ้นส่วนสำหรับ Parabolic trough สามารถทำได้ง่าย แม่นยำในเชิงตัวเลข และจะมีประโยชน์ในกรณีที่มีการผลิตเป็นจำนวนมาก
- O Parabolic trough ที่มีระยะโฟกัสเท่ากับ 300 mm ความยาว 1.52 m จำนวน 3 ชิ้นได้ถูกออกแบบและจัดสร้างขึ้น เพื่อทดสอบความสามารถในการสร้างความร้อน โดยใช้การหมุนเวียนของน้ำ 3 LPM ผ่านท่อสุญญากาศ ซึ่งได้จัดวางไว้ ณ ตำแหน่งจุดโฟกัสของ Parabolic trough
- O จากการทดสอบในสภาพแสงอาทิตย์ พบว่าระบบสามารถสร้างพลังงานความร้อนได้เฉลี่ย 4,180 kJ ในช่วงการทดสอบ 5 ชั่วโมง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้เงินทุนสนับสนุนโครงการวิจัยและจัดทำต้นแบบ ประจำปีงบประมาณ 2554 ตลอดจนเจ้าหน้าที่ของมหาวิทยาลัยที่ได้ให้ความอนุเคราะห์และได้ให้คำแนะนำในการจัดทำงานวิจัยนี้เป็นอย่างดี

รายการสัญลักษณ์

A_a	พื้นที่ของตัวรวมรังสีที่ไม่ถูกเงาบัง	m^2
C_p	ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ	$J/kg \cdot K$
D_i	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ	m
D_o	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อ	m
d_{req}	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยที่สุดที่สามารถรองรับรังสีทั้งหมด	m
E	สมการของเวลา	นาที
F'	แฟกเตอร์ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสี	
f	ความยาวโฟกัส	m
h_{fi}	สัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนในท่อ	$W/m^2 \cdot K$
I_b	ความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์	W/m^2
m	มวลของน้ำ	kg
n	จำนวนวันในรายปี	วัน
Q_u	พลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์	W
T_1	อุณหภูมิน้ำก่อนได้รับความร้อน	K
T_2	อุณหภูมิน้ำหลังได้รับความร้อน	K
Δt	เวลาในการให้ความร้อนแก่น้ำ	s
U_L	สัมประสิทธิ์สูญเสียความร้อนรวม	$W/m^2 \cdot K$
W	ความกว้างของโค้งพาราโบลา	m
x	ตำแหน่งในแนวราบ	m
y	ตำแหน่งในแนวตั้ง	m
δ	มุมเดคลิเนชัน	องศา
ω	มุมของดวงอาทิตย์แต่ละชั่วโมง	องศา
θ_s	มุมต้นดวงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 0.27	องศา
η	ประสิทธิภาพของระบบ	

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] นันทนศักดิ์ ศักดิ์โฆษิตและคณะ (2552). การจำลองแบบและศึกษาสมรรถนะของตัวรับรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลา, การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5, มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก.
- [2] บัญชา คังตระกูล (2551). Mathematical Modelling of a Parabolic Concentrator for a Solar-Power Stirling Engine, การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 4, มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม.
- [3] พิสิทธิ์ สุวรรณแพทย์และเสริม จันท์ฉาย (2552). ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ระบบความร้อนแบบรางพาราโบลาที่จังหวัดร้อยเอ็ด, การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5, มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก.
- [4] วัชรินทร์ ดงบันและวิทยา พวงสมบัติ (2552). เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้จานรวมแสงแบบพาราโบลา, การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5, มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก.
- [5] Bakos. G.C., (2006). Design and construction of a two-axis Sun tracking system for parabolic trough collector (PTC) efficiency improvement. Renewable Energy. January 2006, pp.2411–2421.
- [6] Dirk K., Yuvaraj P., Klaus H. and Mark S., (2008). Parabolic trough collector testing in the frame of the REACt project. April 2007, pp. 612–618.
- [7] Garg, H.P. and Prakash, J. (2000). *Solar Energy Fundamentals and Application*, Tata Mcgraw Hill, New Delhi.