



วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อเทอร์โมไซฟอนแบบแบน Mathematical model of flat thermosyphon photovoltaic

อนุชารีย์ ขุนทิพย์ทอง พิทักษ์ พร้อมไธสง อีรพัฒน์ ชมภูคำ นรินทร์ ศิริวรรณ*

หน่วยวิจัยท่อความร้อนและออกแบบอุปกรณ์ทางความร้อน สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

Anutcharee khuntiptong Pitak Promthaisong Teerapat Chompookham Narin Siriwan*

Heat Pipe Thermal Tool Design Research Unit, Faculty of Engineering, Mahasarakham University Kantharawichai Mahasarakham
44150

* Corresponding author.

E-mail: narin.s@msu.ac.th; Telephone: 083 372 8207

วันที่รับบทความ 14 สิงหาคม 256-; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 28 กันยายน 2563 ; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 24 พฤศจิกายน 2563

วันที่ตอบรับบทความ 19 มกราคม 2564

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อเทอร์โมไซฟอนแบบแบนโดยในการศึกษานี้ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อเทอร์โมไซฟอนแบบแบน อีกทั้งยังได้ทำการทดลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบไม่ติดตั้งท่อเทอร์โมไซฟอนแบบแบน และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อเทอร์โมไซฟอนแบบแบนที่เติมสารทำงาน R-11 และ R-134a จากการศึกษพบว่าค่าประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อเทอร์โมไซฟอนแบบแบนจากแบบจำลองและการทดลองมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยร้อยละ 0.44 ค่าประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อเทอร์โมไซฟอนแบบแบนที่เติมสารทำงาน R134a มีค่าสูงกว่าค่าประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อเทอร์โมไซฟอนแบบแบนที่เติมสารทำงาน R11 และค่าประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ติดตั้งท่อเทอร์โมไซฟอนแบบแบนได้ค่าประสิทธิภาพน้อยที่สุด โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้ง R-134a ให้ค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยดีกว่า R-11 ร้อยละ 4.5

คำสำคัญ

ท่อเทอร์โมไซฟอนแบบแบน แผงเซลล์แสงอาทิตย์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ประสิทธิภาพ

Abstract

This research aims to study the mathematical model of the flat thermosyphon photovoltaic (FTPV). In this study created the mathematical model to predict the efficiency of the flat thermosyphon photovoltaic, the experimental of the photovoltaic, and the flat thermosyphon photovoltaic with filling the working fluid of R- 11 and R- 134a. The results showed that the efficiency of the flat thermosyphon photovoltaic from the numerical model were similar with the results measured from the experimental data, with an average error value of 0.44. The efficiency data from the FTPV with filling the working fluid of R- 134a has higher than the R- 11, and the efficiency data from the Photovoltaic (PV) has lowest the efficiency data, with the FTPV of R-134a has the average efficiency better than R-11 of 4.5%

Keywords

flat thermosyphon; photovoltaic; mathematical model; efficiency

รายการสัญลักษณ์

A	พื้นที่ (m^2)
c	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ($J/kg\ K$)
D	เส้นผ่านศูนย์กลาง (m)
E	กระแสไฟฟ้า (W/m^2)
G	ความเข้มของรังสีอาทิตย์ (W/m^2)
h	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (W/m^2K)
k	ค่าการนำความร้อน ($W/m\ K$)
L	ความยาว (m)
M	มวล (kg)
R	ค่าความต้านทานความร้อน (K/W)
T	อุณหภูมิ (K)
t	เวลา (s)
u	ความเร็ว (m/s)
Pr	Prandtl number
Nu	Nusselt number
Ra	Raleigh number
Re	Reynolds number
ตัวอักษรกรีก	
α	ค่าการดูดซับแสง
γ	ตัวประกอบที่ครอบคลุมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
δ	ความหนา (m)
ε	ค่าการแผ่รังสี
η	ค่าประสิทธิภาพ

θ	มุม ($^{\circ}$)
ρ	ความหนาแน่น (kg/m^3)
σ	ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzman ($W/m^2\ K^4$)
τ	ค่าการส่งผ่าน
ตัวห้อย	
a	อากาศ (ambient)
b	แผงฐาน
c	ตัวเก็บพลังงานแสงอาทิตย์
g	กระจกครอบ
i	ภายใน ค่าอนุพันธ์ตำแหน่ง i
j	ค่าอนุพันธ์ตำแหน่ง j
l	ของเหลว
o	ด้านนอก
s	วัสดุที่หุ้มฉนวนความร้อน
w	น้ำ ผิวน้ำของท่อเทอร์โมไฮฟอนแบบแบน
con	ส่วนควบแน่นของท่อเทอร์โมไฮฟอนแบบแบน
eva	ส่วนทำระเหยของท่อเทอร์โมไฮฟอนแบบแบน
in	ทางเข้า
out	ทางออก
pv	แผงเซลล์แสงอาทิตย์
sky	ท้องฟ้า
tank	ถังน้ำระบายความร้อน

1. บทนำ

พลังงานแสงอาทิตย์ (solar energy) เป็นพลังงานทดแทนประเภทหมุนเวียนที่มีศักยภาพสูงเนื่องจากใช้แล้วไม่มีวันหมดสามารถเกิดขึ้นใหม่ได้เองตามธรรมชาติเป็นพลังงานที่สะอาดและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย การประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์สามารถจำแนกได้หลายรูปแบบ เช่น การผลิตกระแสไฟฟ้า การผลิตความร้อน เป็นต้น การประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในรูปแบบของการผลิตกระแสไฟฟ้านั้น ต้องใช้อุปกรณ์ที่มีความสามารถในการแปลงรังสีอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าที่เรียกว่าเซลล์แสงอาทิตย์หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเซลล์โฟโตโวลตาอิก (photovoltaic cell) [1] โดยทั่วไปแล้วเมื่อนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้งานภายใต้แสงอาทิตย์

เป็นเวลานานจะเกิดความร้อนสะสมอยู่ในโลหะที่ใช้ทำเป็นส่วนประกอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [2] เมื่อ เซลล์แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดลดลงและค่ากระแสลัดวงจรมีการเปลี่ยนแปลงส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดและประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเฉลี่ยแล้วอุณหภูมิการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้นทุก ๆ 1 องศาเซลเซียส จะทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลงประมาณร้อยละ 0.5 [3]

ในการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ค่ากำลังไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มรังสีอาทิตย์และสภาพเงื่อนไขอื่น ๆ เช่น ความร้อนหรืออุณหภูมิที่สะสม โดยจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงจาก

การศึกษาที่ผ่านมาพบว่ามีการวิจัยที่ศึกษาเทคนิคการลดอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในลักษณะการระบายความร้อนให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น ในงานวิจัยของ ชยันต์ บุญยรัช [4] ได้ศึกษาประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้เทคนิคระบายความร้อนใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากการศึกษาพบว่าได้ค่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไปร้อยละ 1.44 นิคม ผึ้งคำ และคณะ [5] ได้ศึกษาการระบายความร้อนที่ใช้ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำ โดยบรรจุอยู่ในท่อทองแดงที่ติดตั้งด้านหลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงส่งผลให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นร้อยละ 9.35 ประจวบ อำนาจประเสริฐสุข [6] ได้ทดสอบชุดแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งด้านหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยชุดแลกเปลี่ยนความร้อนทำมาจากท่อทองแดงภายใน บรรจุน้ำ จากการศึกษาพบว่าชุดแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถระบายความร้อนทำให้อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนและทำให้ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นร้อยละ 6.08 สุรเชษฐ สี ขำชาญ และคณะ [7] ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ท่อความร้อนที่ติดตั้งวัสดุพูนแบบตาข่ายทองแดง จากการศึกษาพบว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ท่อความร้อนติดตั้งวัสดุพูนแบบตาข่ายทองแดงสามารถลดอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดีกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อน พุทธิ์ สกุลช่างสัจจะทัย และณัฏ เกษประดิษฐ์ [3] ได้ทดลองใช้ท่อเทอร์โมไซฟอนแบบแบนและท่อความร้อนแบบสั่นวรอบติดตั้งเพื่อระบายความร้อนให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยระบายความร้อนที่ส่วนควบแน่นด้วยวิธีฉีดย่น้ำจากการศึกษาพบว่าติดตั้งท่อเทอร์โมไซฟอนแบบแบน โดยการระบายความร้อนในส่วนควบแน่นด้วยวิธีฉีดย่น้ำสามารถลดอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดีและให้ผลต่างอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์มากกว่าแผงที่ติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวรอบสูงสุด 10 องศาเซลเซียส และมีประสิทธิภาพโดยรวมสูงกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อความร้อนแบบสั่นวรอบประมาณร้อยละ 1 วสันต์ ศรีเมือง และคณะ [8, 9, 10] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอนแบบแบน พบว่าท่อเทอร์โมไซฟอนแบบแบนให้ค่า

การถ่ายเทความร้อนที่ดีและเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานในการระบายความร้อนให้กับอุปกรณ์ที่มีความร้อนต่าง ๆ ได้ดี

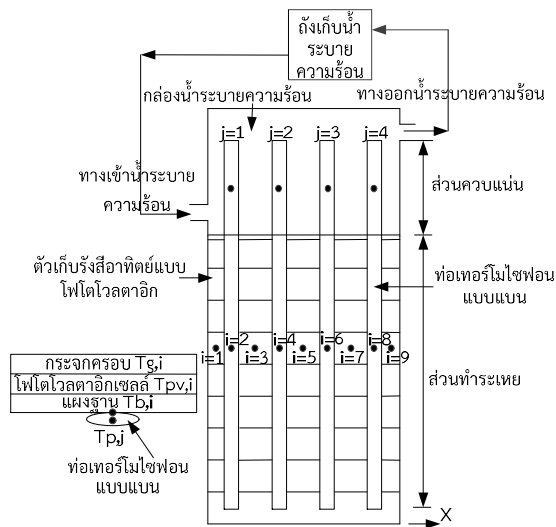
จากงานวิจัยที่ผ่านมา นักวิจัยมุ่งที่จะหาวิธีการในการลดอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการศึกษาลดอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ท่อเทอร์โมไซฟอนแบบแบนยังมีผู้ศึกษาไม่มากนัก ดังนั้นงานวิจัยในครั้งนี้จึงได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อเทอร์โมไซฟอนแบบแบนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และนำผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จริงจากการทดลอง เช่น ค่าอุณหภูมิได้แผง กำลังไฟฟ้า และประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

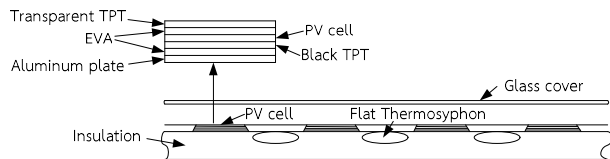
2.1 ลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อเทอร์โมไซฟอนแบบแบน

รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อเทอร์โมไซฟอนแบบแบน (Flat thermosyphon photovoltaic, FTPV) ในการออกแบบ FTPV ประกอบไปด้วย ท่อเทอร์โมไซฟอนแบบแบน (Flat Thermosyphon, FT) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic, PV) กล่องน้ำระบายความร้อน และถังเก็บน้ำ ที่แผงฐานของ FTPV ส่วนทำระเหยของท่อ FT แบ่งออกเป็นช่องซึ่งมีขนาดเท่ากับทิศทางตามแนวแกนที่เชื่อมกันกับจุดต่อในตำแหน่งต่าง ๆ ที่ตำแหน่ง $i = 1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6\ 7\ 8$ และ 9 ตามลำดับ โดยตำแหน่ง $i = 2\ 4\ 6$ และ 8 เป็นตำแหน่งแผงฐานตรงกับส่วนทำระเหยของ FT เมื่อพิจารณาส่วนควบแน่นของท่อ FT ที่เชื่อมกันตรงจุดต่อในตำแหน่งต่าง ๆ ที่ตำแหน่ง $j = 1\ 2\ 3$ และ 4 ตามลำดับ โดยกล่องน้ำระบายความร้อนจะรับน้ำจาก ถังเก็บน้ำและไหลเข้าที่ส่วนควบแน่นตรงตำแหน่ง $j = 1$ น้ำระบายความร้อนจะไหลออกที่ส่วนควบแน่นตรงตำแหน่ง $j = 4$ แผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแบบ single-crystalline silicon รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างของแผง FTPV โดยแต่ละชั้นประกอบไปด้วย ชั้นของกระจกครอบ ชั้น tedlar polyester teller (TPT) ชั้นกาว (EVA) ชั้นของโฟโตโวลตาอิกเซลล์ (PV cells) ชั้นของ black tedlar polyester teller (TPT) และ ชั้นของ แผ่นอะลูมิเนียม

ตามลำดับ โดยชั้นของ black tedlar polyester teller (TPT) มีหน้าที่ในการเป็นฉนวนไฟฟ้าของตัวเก็บรังสีอาทิตย์และยังช่วยเพิ่มการดูดซึมรังสีแสงอาทิตย์สำหรับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแผง PV รุ่น M55/53 ขนาด 53 WP มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ความเข้มรังสีอาทิตย์ $1,000 \text{ W/m}^2$ แสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 1 รายละเอียดของแผง FTPV



รูปที่ 2 โครงสร้างของแผง FTPV

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของแผง PV ที่ใช้ในการทดลองและประสิทธิภาพอ้างอิง

	การทดลองนี้	อ้างอิง
Power (± 10 , Wp)	53	55
Current (at load), A	3.05	3.25
Voltage (at load), V	17.4	17.8
Short Circuit Current, A	3.27	3.5
Open Circuit Current, V	21.8	21.7

2.2 สมการควบคุม

ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผง PV สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นประกอบไปด้วยสมการควบคุม 7 สมการคือ (1) สมการความร้อนที่กระจกครอบ (2) สมการทาง ความร้อนที่แผง PV

(3) สมการทางความร้อนที่แผงฐาน (4) สมการทางความร้อนของท่อ FT (5) สมการทางความร้อนของน้ำที่ส่วนควบแน่น (6) สมการทางความร้อนของน้ำที่ถังเก็บน้ำและ (7) สมการการถ่ายเทความร้อนของ FTPV [11] เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ FTPV จึงต้องมีการตั้งสมมติฐานของแบบจำลองขึ้นดังนี้

- 1) ไม่คิดการนำความร้อนที่มีทิศทางตามแนวยาวกับแผ่นอะลูมิเนียม
- 2) อุณหภูมิของแผ่นกาว (EVA TPT และ PV cell) ที่มีทิศทางเดียวกันพิจารณาให้เท่ากัน
- 3) ไม่คิดค่าการนำความร้อนของแผ่นกาว (EVA และ TPT)

สำหรับการวิเคราะห์สมการทั้ง 7 สมการสามารถดูรูปที่ 1 และรูปที่ 2 ประกอบในการวิเคราะห์สมการแต่ละส่วน ดังแสดงรายละเอียดของสมการดังนี้

2.2.1 สมการความร้อนที่กระจกครอบ

สมการทางความร้อนที่กระจกครอบสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$\delta_g \rho_g c_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = h_a (T_a - T_g) + h_{sky,g} (T_{sky} - T_g) + h_{g,pv} (T_{pv} - T_g) + G \alpha_g \quad (1)$$

T_{sky} คำนวณได้จากสมการที่ (2) [12]

$$h_e^4 = f_{sky} \cdot T_{sky}^4 + f_{gr} \cdot T_{gr}^4 + f_{sur} \cdot T_{sur}^4 \quad (2)$$

เมื่อ h_a และ $h_{sky,g}$ คือ ค่าการพาความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนระหว่างแผ่นกระจกและสภาวะแวดล้อม $h_{g,pv}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างกระจกและแผง PV T_{sky} T_{gr} และ T_{sur} คือ อุณหภูมิท้องฟ้า พื้นดิน และสภาพแวดล้อม ตามลำดับ f_{sky} f_{gr} และ f_{sur} คือ ตัวแปรต่าง ๆ ที่ผิวหน้าของกระจกกับท้องฟ้า พื้นดิน และสภาพแวดล้อม ตามลำดับ

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนระหว่างกระจกและสภาพแวดล้อมคำนวณได้จากสมการที่ (3) [13]

$$h_a = 2.8 + 3.0u_a \quad (3)$$

และสมการที่ (4)

$$h_{sky,g} = \varepsilon_g \sigma (T_e^2 + T_g^2) (T_e + T_g) \quad (4)$$

เมื่อ u_a คือความเร็วของอากาศ

โดยการรวมค่าการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสี และการพาความร้อน ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์และชั้นกระจกสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5) [13]

$$h_{g,pv} = \sigma (T_{pv}^2 + T_g^2) (T_{pv} + T_g) \times \left(\frac{\gamma}{\sqrt{\varepsilon_{pv}} + \gamma(1/\varepsilon_g - 1)} + \frac{1-\gamma}{\sqrt{\varepsilon_{TPT}} + (1-\gamma)(1/\varepsilon_g - 1)} \right) + \frac{Nu.k_a}{l} \quad (5)$$

เมื่อ $\gamma = A_{pv}/A_c$, A_{pv} คือ พื้นที่ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ A_c คือ พื้นที่ของตัวเก็บพลังงานแสงอาทิตย์

สำหรับมุมเอียงที่อยู่ในช่วง 0° ถึง 75° [14] ได้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง Nusselt and Raleigh numbers ไว้ดังสมการที่ (6)

$$Nu = 1 + 1.14 \left(1 - \frac{1708 \cdot (\sin 1.8\theta)^{1.6}}{Ra \cdot \cos \theta} \right) \left[1 - \frac{1708}{Ra \cdot \cos \theta} \right]^+ + \left[\left(\frac{Ra \cdot \cos \theta}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^+ \quad (6)$$

เมื่อ + หมายถึง เลขชี้กำลังต้องมีค่าเป็นบวกสำหรับพจน์ที่อยู่ในวงเล็บเหลี่ยมเท่านั้น ในกรณีที่เป็ลบให้ใช้ค่าเป็นศูนย์

2.2.2 สมการทางความร้อนที่แผง PV

สมการทางความร้อนของชั้นเซลล์แสงอาทิตย์ รวมไปถึงแผง PV EVA และ TPT สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7)

$$\gamma \delta_{pv} \rho_{pv} c_{pv} \frac{\partial T_{pv}}{\partial t} = h_{g,pv} (T_g - T_{pv}) + h_{sky,g} \left(\frac{T_b - T_{pv}}{R_{b,pv}} \right) + G(\alpha\tau)_{pv} - E_{pv} \quad (7)$$

เมื่อ $R_{b,pv}$ คือ ความต้านทานทางความร้อนระหว่างชั้นแผง PV และแผงฐาน (แผ่นอะลูมิเนียม) คำนวณได้จากสมการ $R_{b,pv} = \delta_{ad}/k_{ad}$

E_{pv} คำนวณได้จากสมการที่ (8)

$$E_{pv} = \gamma G \tau \eta_r (1 - B_r (T_{pv} - T_r)) \quad (8)$$

η_r คือ ค่าประสิทธิภาพอ้างอิงที่อุณหภูมิทำงาน $T_r = 298.15 K$ B_r คือค่าประสิทธิภาพของอุณหภูมิ และ $B_r = 0.0045 K^{-1}$ และ τ คำนวณได้จากสมการที่ (9) [13]

$$\tau = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\tau_o \tau_i}{1 - \rho_o \rho_i} \right)_\perp + \left(\frac{\tau_o \tau_i}{1 - \rho_o \rho_i} \right)_\parallel \right] \quad (9)$$

เมื่อ τ_o และ τ_i คือ ค่าการส่งผ่านของชั้นนอก (ชั้นกระจก) และชั้นใน (ชั้นกาว) ตามลำดับ ρ_o และ ρ_i คือ ค่าการสะท้อนที่ด้านนอก (ชั้นกระจก) และชั้นใน (ชั้นกาว) ตามลำดับ และ $\perp$ และ $\parallel$ บอกถึงส่วนประกอบที่ตั้งฉากและขนานของการแผ่รังสีที่ไม่ผ่านชั้นปิด ตามลำดับ

$(\alpha\tau)_{pv}$ คำนวณได้จากสมการที่ (10)

$$(\alpha\tau)_{pv} = \frac{\tau\alpha}{1 - (1 - \alpha)\rho_d} \quad (10)$$

เมื่อ α คือ ค่าประสิทธิภาพการดูดซับของแผ่น PV ซึ่งถูกกำหนดโดยน้ำหนักเฉลี่ยของการดูดซับของแผง PV (α_{pv}) และ TPT α_{TPT} โดย $\alpha = \gamma \alpha_{pv} + (1 - \gamma) \alpha_{TPT}$ และ ρ_d คือ ค่าสะท้อนของด้านในของชั้นกระจายรังสี ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ $\rho_d = 1 - \alpha_{ad} - \tau_{ad}$ ที่การแผ่รังสีที่มุม 60° [13]

2.2.3 สมการทางความร้อนที่แผงฐาน

สำหรับที่แผงฐานระยะกริจะแสดงดังรูปที่ 3 สมการการนำความร้อนในส่วนนี้มีสองสมการคือ สมการสำหรับตำแหน่ง

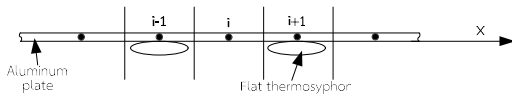
ที่ตรงกับท่อ FT และสมการสำหรับตำแหน่งที่ไม่ตรงกับท่อ FT สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (11) และ (12)

สำหรับตำแหน่งที่ตรงกับท่อ FT

$$\rho_b c_b \frac{\partial T_b}{\partial t} = k_b \frac{\partial^2 T_b}{\partial x^2} + \frac{1}{\delta_b} [(T_a - T_b) / R_{b,a} + (T_{pv} - T_b) / R_{b,pv} + (T_{p,eva} - T_b) / (R_{p,b} \cdot A_{bi})] \quad (11)$$

สำหรับตำแหน่งที่ไม่ตรงกับท่อ FT

$$\rho_b c_b \frac{\partial T_b}{\partial t} = k_b \frac{\partial^2 T_b}{\partial x^2} + \frac{1}{\delta_b} [(T_a - T_b) / R_{b,a} + (T_{pv} - T_b) / R_{b,pv}] \quad (12)$$



รูปที่ 3 ระยะกริชของแผงฐาน

เมื่อ $R_{b,a}$ คือ ความต้านทานความร้อนระหว่างแผงฐานและอากาศที่สภาวะแวดล้อมคำนวณได้จากสมการที่ (13)

$$R_{b,a} = \delta_s / k_s + 1 / h_a \quad (13)$$

$R_{p,b}$ คือ ความต้านทานความร้อนระหว่างแผงฐานกับท่อ FT คำนวณได้จากสมการ $R_{p,b} = \delta_{pb} / (k_p \cdot A_{pb})$

เมื่อ A_{pb} และ δ_{pb} คือ พื้นที่สัมผัสและความหนาระหว่างแผงฐานและส่วนทำระเหยของท่อ FT ตามลำดับ

2.2.4 สมการทางความร้อนของท่อ FT

สมการทางความร้อนของท่อ FT กำหนดโดยส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น ค่าการถ่ายเทความร้อนจากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่นสามารถคำนวณโดยใช้สมการความต้านทานทางความร้อน $R_{eva,con}$ ซึ่งจะถูกกำหนดโดยผลของความดันตกคร่อมจากการไหลของไอตามแนวยาวของท่อ FT ที่แกนไอสมมติว่าเป็นอุณหภูมิทำงานที่มีค่าความดันอ้อมตัว

คงที่ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารทำงานตามแนวยาวของท่อ FT สามารถตัดทิ้งออกไปได้ ค่าของ $R_{eva,con}$ ประกอบไปด้วยค่าความต้านทานการนำความร้อนผ่านผนังท่อที่ส่วนทำระเหย ค่าความต้านทานทางความร้อนจากการควบแน่น และค่าความต้านทานการนำความร้อนผ่านผนังท่อ FT ที่ส่วนควบแน่น โดยคำนวณได้จากสมการที่ (14)

$$R_{eva,con} = R_{eva,p} + R_{con,i} + R_{con,p} \quad (14)$$

เมื่อ $R_{eva,p}$ และ $R_{con,i}$ คำนวณได้จากสมการที่ (15) และ (16)

$$R_{eva,p} = \frac{\ln(D_{eva,o} / D_{eva,i})}{2\pi L_{eva} k_p} \quad (15)$$

$$R_{con,i} = \frac{1}{\pi D_{con,i} L_{con} h_{con,i}} \quad (16)$$

เมื่อ $h_{con,i}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การควบแน่นของฟิล์ม สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (17) [15]

$$h_{con,i} = [0.997 - 0.334(\cos \theta)^{0.108}] \left[\frac{g \rho_f^2 k_f^3 h_{fg}}{\mu_f \Delta T_{cr} L_{con}} \right]^{0.25} \left[\frac{L_{con}}{D_{con,i}} \right] [0.254(\cos \theta)^{0.385}] \quad (17)$$

เมื่อ $R_{con,p}$ คำนวณได้จากสมการที่ (18)

$$R_{con,p} = \frac{\ln(D_{con,o} / D_{con,i})}{2\pi L_{con} k_p} \quad (18)$$

สมการทางความร้อนของท่อ FT สำหรับตำแหน่งที่ส่วนทำระเหยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (19)

$$M_{p,eva} c_p \frac{\partial T_{p,eva}}{\partial t} = (T_{p,eva} - T_{p,con}) / R_{eva,con} + (T_b - T_{p,eva}) / R_{p,b} \quad (19)$$

สมการทางความร้อนของท่อ FT สำหรับตำแหน่งที่ส่วนควบแน่นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (20)

$$M_{p,con} c_p \frac{\partial T_{p,con}}{\partial t} = (T_{p,eva} - T_{p,con}) / R_{eva,con} + A_w h_{w,con} (T_w - T_{p,con}) \quad (20)$$

เมื่อ $R_{w,con}$ คือ ค่าความต้านทานความร้อนระหว่างส่วนควบแน่นของท่อ FT และน้ำระบายความร้อน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (21)

$$R_{w,con} = \frac{1}{A_w h_w} \quad (21)$$

เมื่อ h_w คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างส่วนควบแน่นของท่อ FT และน้ำระบายความร้อนซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (22) [16]

$$h_w = Nu \frac{k_w}{D} \quad (22)$$

และ Nu คำนวณได้จากสมการที่ (23)

$$Nu = C Re^m Pr^n (Pr_\infty / Pr_s)^{1/4} \quad (23)$$

เมื่อ $Pr \leq 10$, $n = 3.7$ และ เมื่อ $Pr > 10$, $n = 3.6$ ค่าของ C และ m ขึ้นอยู่กับ Reynolds number

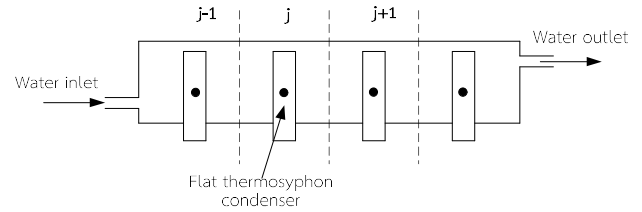
2.2.5 สมการทางความร้อนของน้ำที่ส่วนควบแน่น

ระยะกรีซสำหรับน้ำในกล่องน้ำระบายความร้อนแสดงดังรูปที่ 4 ในแผนภาพมีการใช้สมการเชิงอนุพันธ์สำหรับกรีซ j สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (24)

$$m_w c_w \frac{\partial T_{w,j}}{\partial t} + \dot{m}_w c_w (T_{w,j} - T_{w,j-1}) = (T_a - T_{w,j}) / R_{a,w} + A_w h_{w,con} (T_{p,con} - T_{w,j}) \quad (24)$$

เมื่อ m_w คือ มวลของน้ำในปริมาตรควบคุม และ $\dot{m}_w$ คือ อัตราการไหลของน้ำ ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$\dot{m}_w = \rho_w u_w A$ และ $R_{w,a}$ คือ ค่าสมมูลความต้านทานความร้อนระหว่างน้ำและอากาศภายนอก



รูปที่ 4 ระยะกรีซของน้ำระบายความร้อนที่ส่วนควบแน่น

2.2.6 สมการทางความร้อนของน้ำที่ถังเก็บน้ำ

สำหรับน้ำในถังเก็บ สมการทางความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (25)

$$M_{w,tank} c_w \frac{\partial T_{w,t}}{\partial t} = (T_a - T_{w,t}) / R_{a,wt} + n \dot{m}_w c_w (T_{w,out} - T_{w,in}) \quad (25)$$

เมื่อ $M_{w,tank}$ คือ มวลของน้ำในถังเก็บ $R_{a,wt}$ คือ ค่าสมมูลความต้านทานทางความร้อนระหว่างน้ำและอากาศ $T_{w,in}$ และ $T_{w,out}$ คือ อุณหภูมิของน้ำระบายความร้อนที่ทางเข้าและทางออกของกล่องน้ำระบายความร้อนที่ส่วนควบแน่น ตามลำดับ และ n คือ จำนวนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

2.2.7 สมการการถ่ายเทความร้อนของ FTPV จากแบบจำลอง

สมการการถ่ายเทความร้อนของ FTPV จากแบบจำลองสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (26)

$$Q_w = M_{w,tank} C_w (T_{w,t,f} - T_{w,t,i}) \quad (26)$$

เมื่อ $T_{w,t,f}$ และ $T_{w,t,i}$ คือ อุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิค่าสุดท้ายของถังเก็บ

2.2.8 สมการการถ่ายเทความร้อนของ FTPV จากการทดลอง

ค่าการถ่ายเทความร้อนของ FTPV จากการทดลองสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (27)

$$Q_w = \dot{m} C_p (T_{w,out} - T_{w,in}) \quad (27)$$

เมื่อ Q_w คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนของท่อ FT $\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำระบายความร้อน C_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำระบายความร้อน $T_{w,in}$ คือ อุณหภูมิของน้ำระบายความร้อนที่ทางเข้าของ ส่วนควบแน่น และ $T_{w,out}$ คือ อุณหภูมิของน้ำระบาย ความร้อนที่ทางออกของส่วนควบแน่น

ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (28)

$$\dot{Q}_w = q_w = \frac{Q_w}{A_{p,con}} = \frac{Q_w}{\pi D_o L_c N} \quad (28)$$

เมื่อ q_w คือ ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อ FT $A_{p,con}$ คือ พื้นที่ของท่อ FT ในส่วนควบแน่น D_o คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อ FT ในส่วนควบแน่น L_c คือ ความยาวของท่อ FT ในส่วนควบแน่น N คือ จำนวนท่อ FT ที่ส่วนควบแน่น

2.2.9 ประสิทธิภาพของ FTPV

ค่าประสิทธิภาพของ FTPV สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (29)

$$\eta_{FTPV} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (A_c \dot{Q}_w + A_{pv} E_{pv}) dt}{A_c \int_{t_1}^{t_2} G dt} \quad (29)$$

เมื่อ η_{FTPV} คือ ประสิทธิภาพของ FTPV A_c คือ พื้นที่ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ $\dot{Q}_w$ คือ ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน

A_{pv} คือ พื้นที่เซลล์ของแผง PV E_{pv} คือ พลังงานไฟฟ้า ที่ได้จากเซลล์ของแผง PV G คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์

2.3 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

ในการคำนวณของสมการต่าง ๆ ที่ได้นำเสนอมาดจะต้องใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเข้ามาช่วยเพื่อให้สามารถคำนวณได้ค่าที่ถูกต้องและแม่นยำ สำหรับระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้ในการคำนวณในครั้งนี้คือระเบียบวิธีของแครังก์-นิโคลสัน โดยระเบียบวิธีของแครังก์-นิโคลสันมีหลักการในการคำนวณคือการประมาณพจน์อนุพันธ์อันดับหนึ่งที่แปรผันกับเวลาที่กึ่งกลางระหว่างของการคำนวณเวลาที่ t และ $t+1$ [17] ดังสมการที่ (30)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_i^{t+1} - T_i^t}{\Delta t} \quad (30)$$

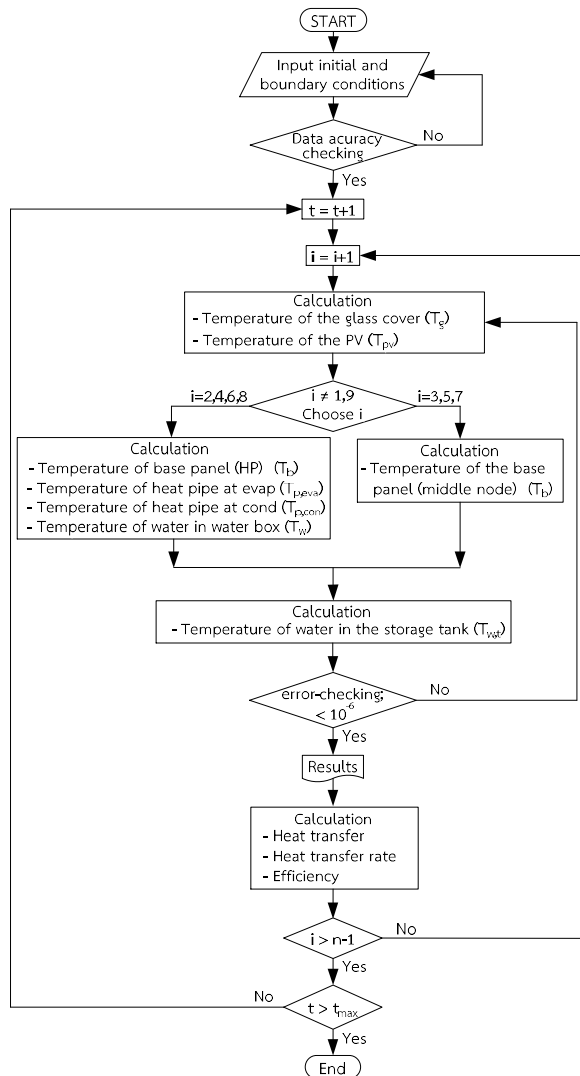
ประมาณพจน์อนุพันธ์อันดับสองที่แปรผันกับระยะทางดังสมการที่ (31)

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{2} \left(\frac{T_{i+1}^{t+1} - 2T_i^{t+1} + T_{i-1}^{t+1}}{\Delta x^2} + \frac{T_{i+1}^t - 2T_i^t + T_{i-1}^t}{\Delta x^2} \right) \quad (31)$$

2.4 หลักการทำงานของโปรแกรม

ในการคำนวณของระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อให้ได้ผลการคำนวณที่ถูกต้องและแม่นยำจึงได้ทำการใช้โปรแกรมช่วยในการคำนวณ โดยมีขั้นตอนในการคำนวณของโปรแกรมหาดังแสดงในรูปที่ 5 และมีรายละเอียดในการคำนวณดังนี้

1) เมื่อเรียกใช้งานโปรแกรม ผู้ใช้จะต้องป้อนข้อมูลเพื่อใช้ในการคำนวณ คือ อุณหภูมิแวดล้อม (K) ความเข้มรังสีอาทิตย์ (W/m^2) ความเร็วลม (m/s) อัตราการไหลเชิงมวลของสารรับความร้อน (kg/s) เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายในของท่อ FT (m) ความยาวของท่อ FT ที่ส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น (m) และค่าการนำความร้อนของสารทำงาน ($W/m K$)



รูปที่ 5 แผนผังการคำนวณของ FTPV

2) เมื่อป้อนข้อมูลโปรแกรมจะตรวจสอบข้อมูลที่ป้อนเข้ามาและจะเริ่มคำนวณอุณหภูมิใหม่ที่จุดต่อใด ๆ ที่เวลาถัดไป

3) คำนวณหาค่าอุณหภูมิของกระจกครอบ

4) คำนวณหาค่าอุณหภูมิที่เซลล์โฟโตโวลตาอิก

5) คำนวณหาค่าอุณหภูมิของแผงฐาน แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ คำนวณหาค่าอุณหภูมิแผงฐานในตำแหน่งที่ไม่ตรงกับท่อ FT และคำนวณหาค่าอุณหภูมิแผงฐานในตำแหน่งที่ตรงกับท่อ FT

6) คำนวณหาค่าอุณหภูมิที่ส่วนทำระเหยของท่อ FT

7) คำนวณหาค่าอุณหภูมิที่ส่วนควบแน่นของท่อ FT

8) คำนวณหาค่าอุณหภูมิของน้ำที่กล่องน้ำ

9) คำนวณหาค่าอุณหภูมิของน้ำที่ถังเก็บน้ำ

10) คำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อนที่น้ำได้รับจากส่วนควบแน่นของท่อ FT

11) คำนวณประสิทธิภาพของแผง FTPV

12) จบการคำนวณรอบแรกของโปรแกรมและโปรแกรมจะคำนวณตามขั้นตอนที่ (1) - (11) ไปเรื่อย ๆ โดยการคำนวณจะทำซ้ำจนกว่าที่คำนวณเข้าสู่ผลลัพธ์ที่มีความผิดพลาดที่ยอมรับได้จึงจะหยุดการซ้ำ ซึ่งใช้ค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้เพื่อหยุดการคำนวณเท่ากับ 10^{-6}

3. การติดตั้งการทดลอง

ในการทดลองแผง PV และแผง FTPV ประกอบไปด้วยการติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลองดังแสดงในรูปที่ 6 และการติดตั้งการทดลองจริงดังแสดงในรูปที่ 7 ในการทดลองได้บันทึกข้อมูลที่ช่วงเวลาตั้งแต่ 09.00-15.30 น. ซึ่งทำการทดลองที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม และมีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

1) นำแผง FTPV พร้อมจัดวางชุดทดลอง โดยหันหน้าแผงไปในแนวทิศใต้และวางทำมุม 18 องศากับแนวระดับ

2) ในชุดทดลองแผง FTPV ได้ติดตั้งปั๊มน้ำที่ถังเก็บน้ำเพื่อใช้น้ำในการระบายความร้อนออกจากส่วนควบแน่นของท่อ FT ซึ่งกำหนดอัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 0.5 ลิตรต่อนาที

3) ติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองและอุปกรณ์ในการตรวจวัดเข้ากับชุดทดลองแผง FTPV ดังแสดงในรูปที่ 6

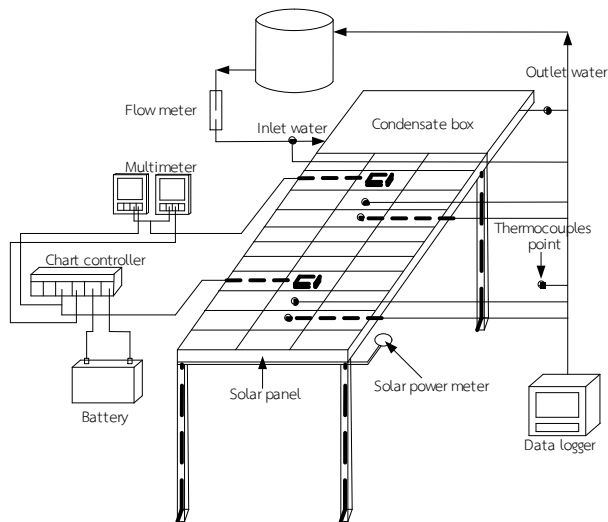
4) ในการติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 6 ประกอบด้วยตำแหน่งตรวจวัดอุณหภูมิแวดล้อม 1 จุด ตำแหน่งตรวจวัดอุณหภูมิกระจกครอบและอุณหภูมิแผงฐานอย่างละ 2 จุดต่อแผง ตำแหน่งตรวจวัดอุณหภูมิของน้ำขาเข้าและขาออกที่ส่วนควบแน่นอย่างละ 1 จุดและทำการบันทึกอุณหภูมิทุก ๆ 10 นาที

5) วัดกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าโดยใช้มัลติมิเตอร์

6) วัดค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ด้วยเครื่อง solar power meter

7) วัดค่าความชื้นสัมพัทธ์และค่าความเร็วลม

8) นำผลที่ได้จากการทดสอบไปใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล



รูปที่ 6 แผนภาพการติดตั้งการทดลองแผง FTPV



รูปที่ 7 การติดตั้งการทดลองแผง FTPV

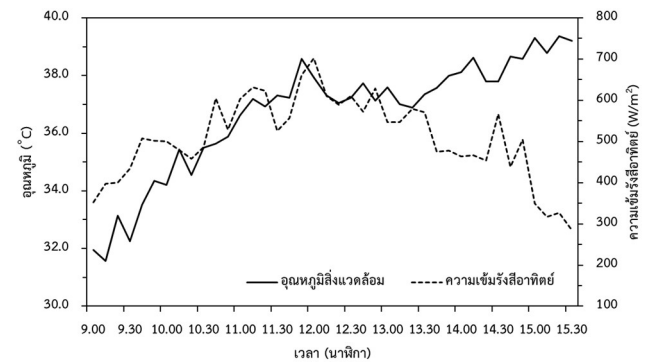
4. ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองท่อ FTPV ที่เดิมสารทำงาน R-11

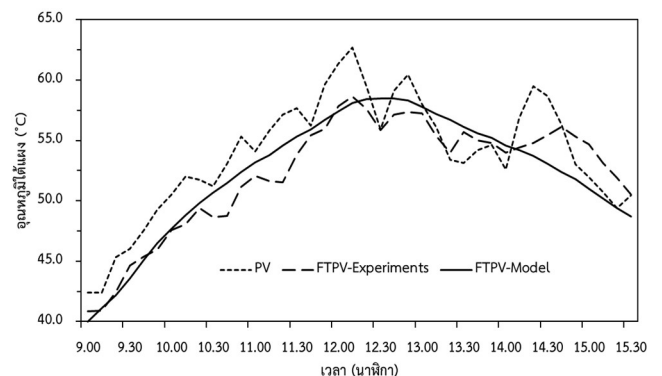
รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและความเข้มรังสีอาทิตย์จากการทดลองที่ใช้ สารทำงาน R-11 จากการศึกษาพบว่าค่าเฉลี่ยความเข้มรังสีอาทิตย์ตลอดทั้งการทดลองมีค่าเท่ากับ 508.27 W/m^2 โดย ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงสุดเท่าที่มีค่าเท่ากับ 702.57 W/m^2 ที่ช่วงเวลาประมาณ 12.00 - 12.30 นาฬิกา และจากข้อมูลพบว่าในช่วงเวลาระหว่างวัน อุณหภูมิจะมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยตลอดช่วงการทดลองมีค่าเท่ากับ 36.67°C

รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิได้แผง PV แผง FTPV จากการทดลองที่ใช้สารทำงาน R-11 และแผง FTPV จากแบบจำลอง จากการศึกษาพบว่าค่าเฉลี่ยของ

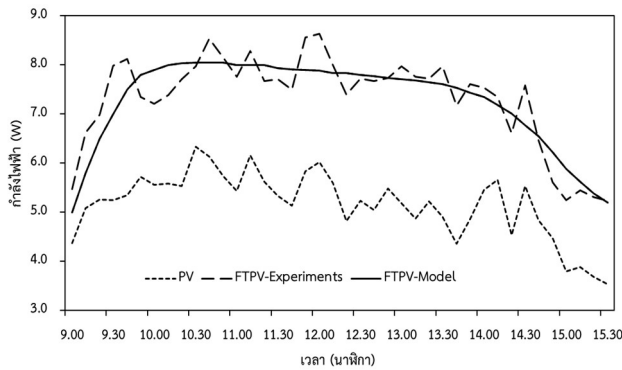
อุณหภูมิได้แผง PV จากการทดลองมีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิได้แผง FTPV จากการทดลอง โดยค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิได้แผง PV มีค่าเท่ากับ 53.89°C และค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิได้แผง FTPV มีค่าเท่ากับ 52.28°C เมื่ออุณหภูมิได้แผง PV สูงขึ้นส่งผลให้ท่อ FT ทำงานได้ดี โดยท่อ FT ทำหน้าที่ในการดึงความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และไประบายความร้อนให้กับน้ำที่ส่วนควบแน่นของท่อ FT ส่งผลให้อุณหภูมิได้แผง FTPV มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิแผง PV และเมื่อเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิได้แผง FTPV จากการทดลองและจากแบบจำลอง พบว่าค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกันและมีค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิได้แผงจากแบบจำลอง 52.40°C โดยมีความผิดพลาดเฉลี่ยร้อยละ 0.23



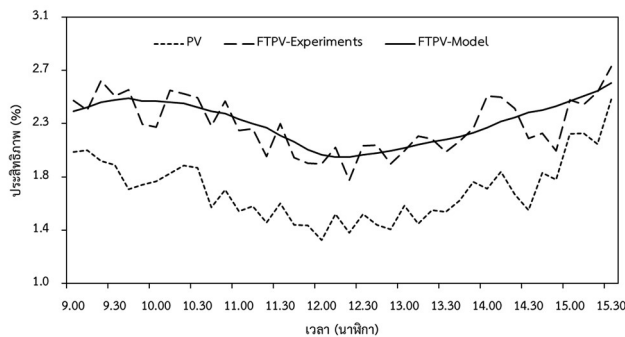
รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และ ความเข้มรังสีอาทิตย์จากการทดลองที่ใช้สารทำงาน R-11



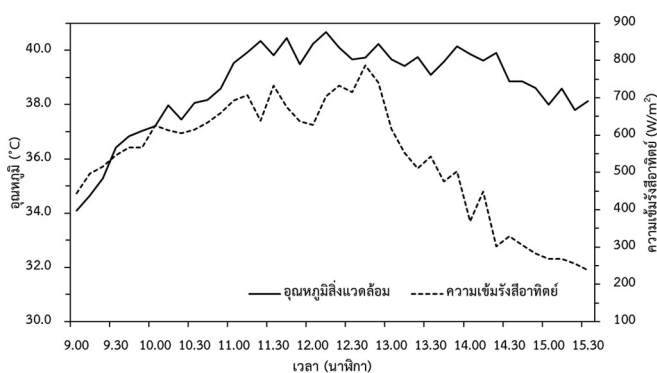
รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิได้แผง PV แผง FTPV จากการทดลองที่ใช้สารทำงาน R-11 และแผง FTPV จากแบบจำลอง



รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้าของแผง PV แผง FTPV จากการทดลองที่ใช้สารทำงาน R-11 และแผง FTPV จากแบบจำลอง



รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับประสิทธิภาพของแผง PV แผง FTPV จากการทดลองที่ใช้สารทำงาน R-11 และแผง FTPV จากแบบจำลอง



รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ใช้สารทำงาน R-134a

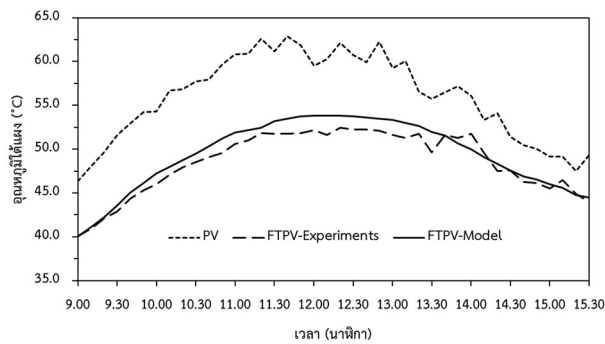
รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้าของแผง PV แผง FTPV จากการทดลองที่ใช้สารทำงาน R-11 และแผง FTPV จากแบบจำลอง จากการศึกษพบว่า ค่าเฉลี่ย

กำลังไฟฟ้าของแผง PV จากการทดลองมีค่าน้อยกว่าค่าเฉลี่ย กำลังไฟฟ้าของแผง FTPV จากการทดลอง โดยค่าเฉลี่ย กำลังไฟฟ้าของแผง PV มีค่าเท่ากับ 5.16 W ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 6.34 W และค่าเฉลี่ยกำลังไฟฟ้าของแผง FTPV มีค่าเท่ากับ 7.41 W ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 8.63 W เนื่องมาจากอุณหภูมิใต้แผงของแผง PV นั้น สูงกว่าแผง FTPV มีผลให้อุณหภูมิสูงขึ้นที่ตาเซลล์และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ส่งผลต่อการลดลงของช่องว่างพลังงานและการเพิ่มขึ้นของอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งส่งผลต่อแรงดันของวงจรทำให้วงจรเปิดและกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้ลดลง และเมื่อเปรียบเทียบกับค่ากำลังไฟฟ้าของแผง FTPV จากการทดลองและจากแบบจำลอง พบว่าค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกันและมีค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าจากแบบจำลอง 7.28 W โดยมีความผิดพลาดเฉลี่ยร้อยละ 0.56

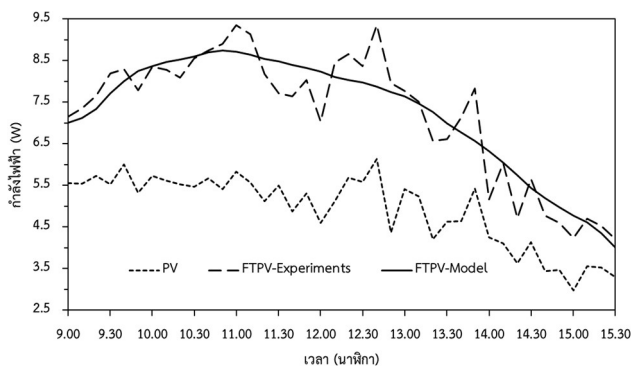
รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับประสิทธิภาพของแผง PV แผง FTPV จากการทดลองที่ใช้สารทำงาน R-11 และแผง FTPV จากแบบจำลอง จากการศึกษพบว่า ค่าประสิทธิภาพแผง FTPV สูงกว่าแผง PV เนื่องมาจากอุณหภูมิใต้แผง PV นั้นสูงกว่าแผง FTPV ส่งผลให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าน้อยกว่าแผง FTPV และส่งผลให้ประสิทธิภาพแผง FTPV สูงกว่าแผง PV โดยในการทดลองแผง PV มีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 1.73 ประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 2.44 และแผง FTPV มีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 2.25 ประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 2.70 และเมื่อเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของแผง FTPV จากการทดลองและจากแบบจำลองพบว่าค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกัน และมีค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพจากแบบจำลองร้อยละ 2.26 โดยมีความผิดพลาดเฉลี่ยร้อยละ 0.44

4.2 ผลการทดลองต่อ FTPV ที่เติมสารทำงาน R-134a

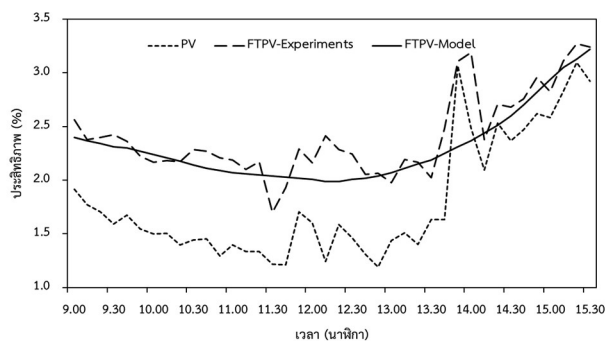
รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและความเข้มรังสีอาทิตย์จากการทดลองที่ใช้สารทำงาน R-134a จากการศึกษพบว่าค่าเฉลี่ยความเข้มรังสีอาทิตย์ตลอดทั้งการทดลองมีค่าเท่ากับ 538.49 W/m^2 โดยค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงสุดเท่าที่มีค่าเท่ากับ 787.29 W/m^2 ที่ช่วงเวลาประมาณ 12.30 - 13.00 นาฬิกา และจากข้อมูลพบว่าในช่วงเวลาระหว่างวัน อุณหภูมิจะมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยตลอดช่วงการทดลองมีค่า 38.70°C



รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิได้แก่งของแผง PV แผง FTPV จากการทดลองที่ใช้สารทำงาน R-134a และแผง FTPV จากแบบจำลอง



รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้าของแผง PV แผง FTPV จากการทดลองที่ใช้สารทำงาน R-134a และแผง FTPV จากแบบจำลอง



รูปที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับประสิทธิภาพของแผง PV แผง FTPV จากการทดลองที่ใช้สารทำงาน R-134a และแผง FTPV จากแบบจำลอง

รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิได้แก่งเซลล์แสงอาทิตย์ของแผง PV แผง FTPV จากการทดลองที่ใช้สารทำงาน R-134a และแผง FTPV จากแบบจำลอง จาก

การศึกษาพบว่าค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิได้แก่ง PV จากการทดลองมีอุณหภูมิสูงกว่าค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิได้แก่ง FTPV จากการทดลอง โดยค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิได้แก่ง PV มีค่าเท่ากับ 55.92°C และค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิได้แก่ง FTPV มีค่าเท่ากับ 48.56°C เมื่ออุณหภูมิได้แก่ง PV สูงขึ้นส่งผลให้ท่อ FT ทำงานได้ดี โดยท่อ FT ทำหน้าที่ ในการดึงความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และไประบายความร้อนให้กับน้ำที่ส่วนควบแน่นของท่อ FT ส่งผลให้อุณหภูมิได้แก่ง FTPV มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิได้แก่ง PV เนื่องจากแผง FTPV มีการระบายความร้อนด้วยท่อเทอร์โมไซฟอน และเมื่อเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิได้แก่ง FTPV จากการทดลองและจากแบบจำลองพบว่าค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกันและมีค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิได้แก่งจากแบบจำลอง 49.36°C โดยมีความผิดพลาดเฉลี่ยร้อยละ 1.63

รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้าของแผง PV แผง FTPV จากการทดลองที่ใช้สารทำงาน R-134a และแผง FTPV จากแบบจำลอง จากการศึกษาพบว่าค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าของแผง PV จากการทดลองมีค่าน้อยกว่าค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าของแผง FTPV จากการทดลอง โดยค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าของแผง PV มีค่าเท่ากับ 4.92 W ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 6.13 W และค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าของแผง FTPV มีค่าเท่ากับ 7.23 W ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 9.36 W เนื่องมาจากอุณหภูมิได้แก่งของแผง PV นั้นสูงกว่าแผง FTPV มีผลให้อุณหภูมิสูงขึ้นที่ตาเซลล์และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ส่งผลต่อการลดลงของช่องว่างพลังงานและการเพิ่มขึ้นของอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งส่งผลต่อแรงดันของวงจรทำให้วงจรเปิดและกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้ลดลง และเมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าของแผง FTPV จากการทดลองและจากแบบจำลองพบว่า ค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกันและมีค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าจากแบบจำลอง 7.25 W โดยมีความผิดพลาดเฉลี่ยร้อยละ 0.28

รูปที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับประสิทธิภาพของแผง PV แผง FTPV จากการทดลองที่ใช้สารทำงาน R-134a และแผง FTPV จากแบบจำลอง จากการศึกษาพบว่าค่าประสิทธิภาพแผง FTPV สูงกว่าแผง PV เนื่องมาจากอุณหภูมิได้แก่ง PV นั้นสูงกว่าแผง FTPV ส่งผลให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าน้อยกว่าแผง FTPV และส่งผลให้ประสิทธิภาพแผง FTPV สูงกว่า

แผง PV โดยในการทดลองแผง PV มีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 1.80 ประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 3.10 และแผง FTPV มีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 2.41 ประสิทธิภาพสูงสุด ร้อยละ 3.27 และเมื่อเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของแผง FTPV จากการทดลองและจากแบบจำลองพบว่าค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกัน และมีค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพจากแบบจำลองร้อยละ 2.30 โดยมีความผิดพลาดเฉลี่ยร้อยละ 4.52

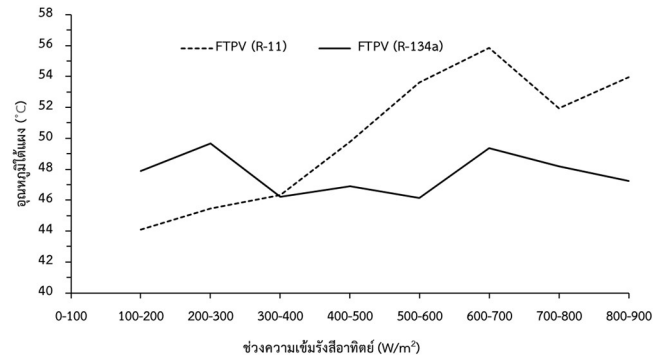
4.3 ผลการเปรียบเทียบการทดลองต่อ FTPV ที่เต็มสารทำงาน R-11 และสารทำงาน R-134a

ผลทดลองหัวข้อ 4.3 เป็นผลการทดลองในหัวข้อ 4.1 และหัวข้อ 4.2 โดยได้นำข้อมูลของแผง FTPV ที่ใช้สารทำงาน R-11 และแผง FTPV ที่ใช้สารทำงาน R-134a มาเปรียบเทียบผลการทดลอง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

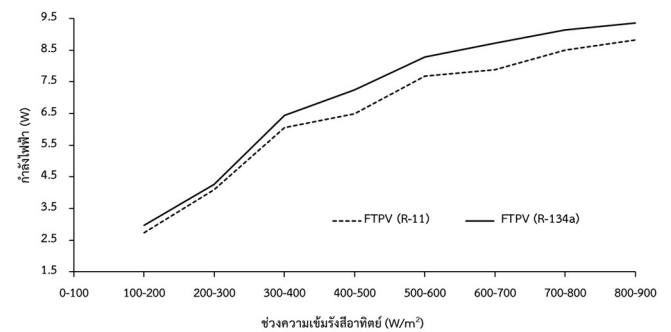
รูปที่ 16 แสดงผลจากการเปรียบเทียบอุณหภูมิได้แผง FTPV ที่ใช้สารทำงาน R-11 และที่ใช้สารทำงาน R-134a จากการทดลอง จากการศึกษาพบว่าค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิได้แผง FTPV ที่ใช้สารทำงาน R-11 มีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิได้แผง FTPV ที่ใช้สารทำงาน R-134a โดยค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิได้แผง FTPV ที่ใช้สารทำงาน R-11 มีค่าเท่ากับ 52.28°C และค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิได้แผง FTPV ที่ใช้สารทำงาน R-134a มีค่าเท่ากับ 48.56°C เนื่องจากสารทำงาน R-134a มีจุดเดือดของสารทำงานที่ต่ำกว่าสารทำงาน R-11 ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสารทำงาน R-134a ที่สูงกว่า สารทำงาน R-11 และค่าความหนืดของสารทำงาน R-134a ที่ต่ำกว่าสารทำงาน R-11 จึงส่งผลให้เมื่อสารทำงาน R-134a อยู่ในท่อ FT จะรับความร้อนจากส่วนทำระเหยไประบายความร้อนที่ส่วนควบแน่นของท่อ FT ได้มากกว่าสารทำงาน R-11

รูปที่ 17 แสดงผลจากการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของแผง FTPV ที่ใช้สารทำงาน R-11 และที่ใช้สารทำงาน R-134a จากการทดลอง จากการศึกษาพบว่าค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากแผง FTPV ที่ใช้สารทำงาน R-134a สูงกว่าค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากแผง FTPV ที่ใช้สารทำงาน R-11 โดยค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยของแผง FTPV ที่ใช้สารทำงาน R-134a มีค่าเท่ากับ 8.14 W ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 9.36 W และค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยของแผง FTPV ที่ใช้สารทำงาน R-11 มีค่าเท่ากับ 7.41 W ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 8.63 W เนื่องจากอุณหภูมิได้แผงของ

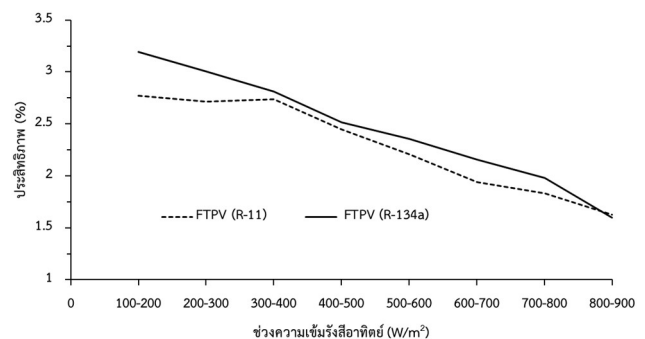
แผง FTPV ที่ใช้สารทำงาน R-11 นั้นมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิได้แผง FTPV ที่ใช้สารทำงาน R-134a จึงส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าของแผง FTPV ที่ใช้สารทำงาน R-134a มีค่าสูงกว่าแผง FTPV ที่ใช้สารทำงาน R-11



รูปที่ 16 แสดงผลจากการเปรียบเทียบอุณหภูมิได้แผงของแผง FTPV ที่ใช้สารทำงาน R-11 และที่ใช้สารทำงาน R-134a จากการทดลอง



รูปที่ 17 แสดงผลจากการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของแผง FTPV ที่ใช้สารทำงาน R-11 และที่ใช้สารทำงาน R-134a จากการทดลอง



รูปที่ 18 แสดงผลจากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผง FTPV ที่ใช้สารทำงาน R-11 และที่ใช้สารทำงาน R-134a จากการทดลอง

รูปที่ 18 แสดงผลจากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผง FTPV ที่ใช้สารทำงาน R-11 และที่ใช้สารทำงาน R-134a จากการทดลอง จากการศึกษพบว่าค่าประสิทธิภาพของแผง FTPV ที่ใช้สารทำงาน R-134a มีค่าสูงกว่าแผง FTPV ที่ใช้สารทำงาน R-11 โดยค่าประสิทธิภาพของแผง FTPV ที่ใช้สารทำงาน R-134a มีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 2.41 และแผง FTPV ที่ใช้สารทำงาน R-11 มีประสิทธิภาพเฉลี่ยร้อยละ 2.31 โดยแผง FTPV ที่ติดตั้ง R-134a ให้ค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยดีกว่าแผง FTPV ที่ติดตั้ง R-11 ร้อยละ 4.5

5. สรุปผลการทดลอง

จากการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิได้แผง ค่ากำลังไฟฟ้า และค่าประสิทธิภาพของแผง FTPV จากแบบจำลองและการทดลองได้ข้อสรุปดังนี้

1) ค่าอุณหภูมิได้แผง ค่ากำลังไฟฟ้า และค่าประสิทธิภาพของแผง FTPV ทั้งจากแบบจำลองและการทดลอง มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันจึงสรุปได้ว่าแบบจำลองสามารถที่จะนำไปทำนายค่าอุณหภูมิได้แผง ค่ากำลังไฟฟ้า และค่าประสิทธิภาพของแผง FTPV ได้

2) ค่าอุณหภูมิได้แผง FTPV มีค่าต่ำกว่าค่าอุณหภูมิได้แผง PV ตลอดช่วงการทดลอง ทั้งการทดลองแผง FTPV ที่ใช้สารทำงาน R-11 และ R-134a

3) ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากแผง FTPV สูงกว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากแผง PV ทั้งการทดลองแผง FTPV ที่ใช้สารทำงาน R-11 และ R-134a

4) ค่าประสิทธิภาพของแผง FTPV ที่เติมสารทำงาน R134a ได้ค่าประสิทธิภาพสูงสุด รองลงมาคือค่าประสิทธิภาพของแผง FTPV ที่เติมสารทำงาน R11 และค่าประสิทธิภาพของแผง PV ได้ค่าประสิทธิภาพน้อยที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากเงินทุนอุดหนุนการวิจัยอาจารย์รุ่นใหม่ จากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปี 2562 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

เอกสารอ้างอิง

- [1] Tiwari GN, Mishra RK, Solanki SC. Photovoltaic modules and their applications: a review on thermal modeling. *Applied Energy*. 2011;88(7): 2287-2304.
- [2] Mehmet EM, Furkan D. A review of the factors affecting operation and efficiency of photovoltaic based electricity generation systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011;15: 2176-2184.
- [3] พงษ์ สกุลช่างสัจจะทัย, ถนัด เกษประดิษฐ์. การศึกษาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อความร้อนเพื่อพัฒนาการใช้พลังงานอย่างยั่งยืน. รายงานการวิจัย: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ; 2555.
- [4] ชยันต์ บุญยรักษ์. การเพิ่มประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้เทคนิคท่อความร้อนระบายความร้อนใต้แผงเซลล์. รายงานการวิจัย: คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์; 2551.
- [5] นิคม ผึ้งคำ, ภราดร รักดีวานิช, ยุทธนา ภูริวงษ์กุล. การเพิ่มสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยระบบหล่อเย็น. *วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ*. 2551;11(2): 1-8.
- [6] ประจวบ อำนาจประเสริฐสุข. การเพิ่มสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยการนำความร้อนทั้งหมดมาใช้ประโยชน์. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. สายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี; 2544.
- [7] สุรเชษฐ สีสานานู, อีรพัฒน์ ชมภูคำ, สัมพันธ์ ฤทธิเดช. การเพิ่มประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ท่อความร้อนที่ติดตั้งวัสดุพูนแบบตาข่ายทองแดง. *วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.* 2559;9(1): 11-22.
- [8] Srimuang W, Rittidech S, Bubphachot B. Heat transfer characteristics of a vertical flat thermosyphon (VFT). *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2009;23: 2548-2554.
- [9] Amatachaya P, Srimuang W. Comparative heat transfer characteristics of a flat two-phase closed thermosyphon (FTPCT) and a conventional two-phase closed thermosyphon (CTPCT). *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2010;37: 293-298.
- [10] Rittidech S, Srimuang W. Correlation to predict heat transfer characteristics of a vertical flat

thermosyphon (VFT) at normal operating conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010;53: 5984–5987.

- [11] Pei G, Fu H, Ji J, Chow TT, Tao Z. Annual analysis of heat pipe PV/T systems for domestic hot water and electricity production. *Energy Conversion and Management*. 2012;56: 8-21.
- [12] Chow TT. Performance analysis of photovoltaic thermal collector by explicit dynamic model. *Solar Energy*. 2003;75: 143–52.
- [13] Duffie JA, Beckman WA. *Solar engineering of thermal processes*. 4nd edition. New York: John Wiley & Sons; 2013.
- [14] Hollands KGT, Unny TE, Raithby GD, Konicek LR. Free convection heat transfer across inclined air layers. *Journal of Heat Transfer*. 1976;98(2) : 189–193.
- [15] Hussein HMS, Mohamad MA, El- Asfour AS. Optimization of a wickless heat pipe flat plate solar collector. *Energy Conversion and Management*. 1999;40(18): 1949–1961.
- [16] Incropera FP, DeWitt DP, Bergman TL, Lavine AS. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 6th edition. New York: John Wiley & Sons; 2007.
- [17] ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม. กรุงเทพฯ:สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2555.