



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การปรับปรุงประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของ
PV/T Air Solar Collector

โดย อนุสรณ์ แสงประจักษ์

ธันวาคม พ.ศ. ๒๕๕๔

สัญญาเลขที่ MRG5180285

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การปรับปรุงประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของ PV/T Air Solar Collector

นายอนุสรณ์ แสงประจักษ์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

ภาษาไทย และภาษาอังกฤษ

Project Code : MRG5180285
(รหัสโครงการ)

Project Title : The overall efficiency improvement of the PV/T Air solar collector
(ชื่อโครงการ) การปรับปรุงประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของ PV/T Air solar collector

Investigator : Arnusorn Saengprajak / Mahasarakham University
(ชื่อนักวิจัย) : อนุสรณ์ แสงประจักษ์ / มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
(ชื่อนักวิจัยที่ปรึกษา) รศ.ดร.สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์ / มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

E-mail Address : arnusorn.s@msu.ac.th
Project Period : 2 years
(ระยะเวลาโครงการ) : 2 ปี

บทคัดย่อ

การพัฒนารูปการถ่ายเทความร้อนของแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมที่ใช้อากาศไหลเวียน (PV/T Air Solar Collector) มีวัตถุประสงค์เพื่อการปรับปรุงประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์ของแผง PV/T โดยการใช้รูปแบบของครีบริบายความร้อนแบบไม่คงที่ (non uniform fin shape, NFS) ติดในแผง ทดแทนครีบริบายความร้อนแบบคงที่ (uniform fin shape, UFS) จากการศึกษาการทำงานเปรียบเทียบกันที่ความเร็วลมเข้าแผง แบบอิสระ 1.0 2.0 2.5 และ 3.0 เมตรต่อวินาทีตามลำดับในแต่ละวันติดต่อกัน พบว่าแผง PV/T ที่ติดครีบริบายความร้อนแบบ NFS สามารถทำให้การไหลเวียนของอากาศได้แรงสูงชันกว่าแผง PV/T แบบ UFS ทุกกรณี เป็นผลให้ค่าอัตราการไหลของอากาศได้แรงเฉลี่ยของแผง PV/T แบบ NFS สูงกว่าแผง PV/T แบบ UFS ถึง 1.6 เท่า การเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศดังกล่าวส่งผลให้อัตราการไหลออกของความร้อนที่สะสมบนแผงเพิ่มสูงขึ้น ทำให้อุณหภูมิแผง PV/T แบบ NFS ต่ำกว่าแบบ UFS ถึงร้อยละ 6.2 โดยเฉลี่ย โดยถึงแม้อัตราการไหลของอากาศในแผง PV/T แบบ NFS จะสูงกว่าแบบ UFS แต่อุณหภูมิอากาศจากแผง PV/T แบบ NFS ต่ำกว่าแบบ UFS เพียงร้อยละ 1.8 โดยเฉลี่ยเท่านั้น ทำให้แผง PV/T แบบ NFS ผลิตอากาศร้อนออกมาได้มากกว่าแผง PV/T แบบ UFS เมื่อทำงานในช่วงเวลาเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ส่งผลให้ประสิทธิภาพทางความร้อนและประสิทธิภาพทางความร้อนรวมของแผง PV/T แบบ NFS เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 33.95 และร้อยละ 61.65 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าแผง PV/T แบบ UFS ถึงร้อยละ 17.0 และ 8.8 สำหรับประสิทธิภาพทางความร้อนและประสิทธิภาพทางความร้อนรวมโดยเฉลี่ยตามลำดับ โดยความแตกต่างของประสิทธิภาพทางความร้อนและประสิทธิภาพทางความร้อนรวมเกิดขึ้นสูงสุดที่เงื่อนไขความเร็วลมเข้าแผงเท่ากับ 1.0 เมตรต่อวินาที ในส่วนของประสิทธิภาพทางไฟฟ้านั้นแผง PV/T แบบ NFS มีค่าสูงกว่าแบบ UFS ร้อยละ 2.6 โดยเฉลี่ย

คำหลัก : (แผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วม, PV/T, ครีบริบายความร้อน)

Abstract:

This research was improved the solar conversion efficiency of the Photovoltaic/Thermal (PV/T) Air Solar Collector. The non-uniform fin shape (NFS) was created and integrated into the PV/T panel replace of the uniform fin shape (UFS). Consequently, comparison of potentially useful among the PV/T+NFS and the PV/T+UFS were performed under the differentiation of inlet air flow velocity conditions, which were arranged as following; free flow condition, force flow condition at 1.0, 2.0, 2.5 and 3.0 m/s, respectively. Moreover, in the each experiment was evaluated in the consecutive days. The results were showed as an average air flow rate in the PV/T+NFS higher than PV/T+UFS for 1.6 times, it is recommended this result for improving the heat removal rate of the PV/T+NFS. That changed in the PV/T+NFS bottom air flow caused an average PV module temperature was reduced lower than the PV/T+UFS for 6.2 percent. Designed of the PV/T+NFS also increased the average outlet air temperature higher than the PV/T+UFS for 1.8 percent. However the major benefit of this technique was on the thermal efficiency and the overall thermal efficiency. The experiment was found that percentage of average thermal efficiency and overall thermal efficiency of the PV/T+NFS is 33.95 and 61.5 respectively, which is 17.0 and 8.8 percent higher than the PV/T+UFS respectively. At the air inlet velocity, 1.0 m/s found that the highest differentiate among the thermal efficiency and overall thermal efficiency was occurred. The experiment results show that there are less significant difference on the electrical efficiency of the PV/T+NFS and the PV/T+UFS. Hence, a new PV/T+NFS is improvable technique for thermal efficiency and overall thermal efficiency.

Keywords : (Photovoltaic/Thermal Solar Collector, PV/T, Fins)

Executive summary

The study of the Photovoltaic/Thermal (PV/T) Air Solar Collector was done at the Faculty of Science, Mahasarakham University. The aim of a study was to improve the thermal efficiency of the PV/T module via applying the non-uniform fin shape (NFS) to the PV/T module instead of the uniform fin shape (UFS). The NFS was provided a good characteristic for the PV/T module, especially on the air duct size under the module. The PV/T+NFS has higher area of the air inlet tunnel than the PV/T+UFS, which benefit for reducing of the pressure drop inside the air tunnel. The comparative study on the thermal performance of both types PV/Ts were evaluated at differences air inlet velocity. The result found that air flow rate on the PV/T+NFS was increased, as well as, the average thermal efficiency and overall thermal efficiency. The percentage of average thermal efficiency and overall thermal efficiency of the PV/T+NFS are 33.95 and 61.5, respectively, which higher than PV/T+UFS for 17.0 and 8.8 percent, respectively. At the air inlet velocity, 1.0 m/s found that the highest differentiate among the thermal efficiency and overall thermal efficiency was occurred. Thus, the major benefit of a new PV/T+NFS was increased the thermal efficiency of the PV/T module.

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ (ระบุชื่อผู้แต่ง ชื่อเรื่อง ชื่อวารสาร ปี เล่มที่ เลขที่ และหน้า) หรือผลงานตามที่คาดไว้ในสัญญาโครงการ
 - A. Saengprajak and S. Pattanasethanon, 2009, “The Low Temperature Analysis of the Used PV Modules during On-Site Generation in Thailand” Journal of Applied Science
2. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์
 - เชิงพาณิชย์ (มีการนำไปผลิต/ขาย/ก่อให้เกิดรายได้ หรือมีการนำไปประยุกต์ใช้โดยภาคธุรกิจ/บุคคลทั่วไป)
 -
 - เชิงนโยบาย (มีการกำหนดนโยบายอิงงานวิจัย/เกิดมาตรการใหม่/เปลี่ยนแปลงระเบียบข้อบังคับหรือวิธีทำงาน)
 -
 - เชิงสาธารณะ (มีเครือข่ายความร่วมมือ/สร้างกระแสความสนใจในวงกว้าง)
 -
 - เชิงวิชาการ (มีการพัฒนาการเรียนการสอน/สร้างนักวิจัยใหม่)
 - ได้ต้นแบบแผง PV/T แบบ NFS สำหรับการเรียนการสอนรายวิชา Energy Laboratory สำหรับนิสิตสาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
 - สร้างนักวิจัยระดับปริญญาโท จำนวน 2 คน และบัณฑิตระดับปริญญาตรี 4 คน จากการอาศัยดำเนินงานวิจัยดังกล่าว
3. อื่นๆ (เช่น ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการในประเทศ การเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการ หนังสือ การจดสิทธิบัตร)
 - Arnusorn Saengprajak, Singthong, Pattanasethanon, Vichian Srilapat and Piyanut Phonilamai, “Comparative Study of Heat Ventilation on PV Module via Using the Uniform and Non-uniform Fin Shapes”, 9th International conference on Sustainable Energy Technologies, 24-27 August 2010, Shanghai

สารบัญ

1	วัตถุประสงค์	11
1.1	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	11
1.2	วัตถุประสงค์	12
1.3	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและเอกสารอ้างอิง	12
1.4	ระเบียบวิธีวิจัย	14
1.5	ขอบเขตของการวิจัย	16
1.6	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	16
2	วิธีการทดลอง	17
2.1	สมมูลพลังงานของแผง PV/T	17
2.2	ประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง PV/T	20
2.3	การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	20
2.3.1	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม	20
2.3.2	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาในช่องอากาศ	21
2.3.3	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี	22
2.4	การไหลของความร้อนออกจากครีบบระบายความร้อน	22
2.5	การสูญเสียความดันใต้แผง	23
2.6	ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV/T	24
2.7	ประสิทธิภาพรวมของแผง PV/T	25
2.8	การสำรวจเบื้องต้นเกี่ยวกับการทำงานของแผง PV	26
2.9	การออกแบบแผง PV/T	26
2.10	การทดสอบแผง PV/T	27
2.10.1	สถานที่ในการเก็บข้อมูล	28
2.10.2	ตัวแปรที่ทำการศึกษา	29
2.10.3	อุปกรณ์เครื่องมือวัดและการบันทึกผล	30
3	ผลการทดลอง	33
3.1	ผลการสำรวจเบื้องต้นเกี่ยวกับการทำงานของแผง PV	33
3.2	ผลการศึกษาการทำงานของแผง PV/T	35
3.2.1	ความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อม	35
3.2.2	อัตราการไหลของอากาศใต้แผง PV/T	36
3.2.3	อุณหภูมิอากาศใต้แผง PV/T	38
3.2.4	อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์	42
3.2.5	แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า	45
3.2.6	ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV/T	47

3.2.7	ประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง PV/T	49
3.2.8	ประสิทธิภาพทางความร้อนรวมของแผง PV/T	51
3.3	วิเคราะห์การทำงานของแผง PV/T แบบ UFS และ NFS	57
3.4	แนวทางการนำไปใช้ประโยชน์	57
4	สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง และข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	59
A	ประวัติย่อ่นักวิจัย	63
B	ข้อมูลรังสีอาทิตย์	64
C	ข้อมูลอุณหภูมิแวดล้อม	66
D	ข้อมูลอัตราการไหลของอากาศใต้แผง PV/T	68
E	ข้อมูลอุณหภูมิอากาศออกจากแผง PV/T	72
F	ข้อมูลอุณหภูมิแผง PV/T	76
G	ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV/T	80
H	ประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง PV/T	84
I	ประสิทธิภาพทางความร้อนรวมของแผง PV/T	88

สารบัญตาราง

2.1	ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ทำการศึกษาและเก็บข้อมูล	32
3.1	ค่าเฉลี่ยรายวันของอัตราการไหลของอากาศได้แฝง PV/T	38
3.2	ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิอากาศได้แฝง PV/T แบบ UFS และ NFS	40
3.3	ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิแฝงเซลล์แสงอาทิตย์ในแผง PV/T แบบ UFS และ NFS	44
3.4	ค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและกระแสไฟฟ้าวงจรปิดของ PV/T แบบ UFS และ NFS ที่เงื่อนไขความเร็วลมเข้าแผงในการทดสอบต่างๆ กัน	45
3.5	ค่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเฉลี่ยของแผง PV/T แบบ UFS และ NFS ที่เงื่อนไขความเร็วลมเข้าแผงในการทดสอบต่างๆ กัน	49
3.6	ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนเฉลี่ยของแผง PV/T แบบ UFS และ NFS ที่เงื่อนไขความเร็วลมเข้าแผงต่างๆ กัน	51
3.7	ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนรวมเฉลี่ยของแผง PV/T แบบ UFS และ NFS ที่เงื่อนไขความเร็วลมเข้าแผงในการทดสอบต่างๆ กัน	54
3.8	ข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสำหรับการอบแห้งพืชสมุนไพรไทย	58
B.1	ข้อมูลรังสีอาทิตย์ระหว่างการทดสอบแผง PV/T	64
C.1	ข้อมูลอุณหภูมิแวดล้อมระหว่างการทดสอบแผง PV/T	66
D.1	ข้อมูลอัตราการไหลอากาศได้แฝง PV/T แบบ NFS	68
D.2	ข้อมูลอัตราการไหลอากาศได้แฝง PV/T แบบ UFS	70
E.1	ข้อมูลอุณหภูมิอากาศออกจากแผง PV/T แบบ NFS	72
E.2	ข้อมูลอุณหภูมิอากาศออกจากแผง PV/T แบบ UFS	74
F.1	ข้อมูลอุณหภูมิแฝงเซลล์แสงอาทิตย์ในแผง PV/T แบบ NFS	76
F.2	ข้อมูลอุณหภูมิแฝงเซลล์แสงอาทิตย์ในแผง PV/T แบบ UFS	78
G.1	ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV/T แบบ NFS	80
G.2	ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV/T แบบ UFS	82
H.1	ประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง PV/T แบบ NFS	84
H.2	ประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง PV/T แบบ UFS	86
I.1	ประสิทธิภาพทางความร้อนรวมของแผง PV/T แบบ NFS	88
I.2	ประสิทธิภาพทางความร้อนรวมของแผง PV/T แบบ UFS	90

สารบัญรูป

1.1	ลักษณะของแผง PVT/Air ของ Tonui และ Tripanagnostopoulos กรณีไม่มีกระจกด้านบน (a) แบบธรรมดา (b) แบบมีแผ่นอลูมิเนียมด้านใน และ (c) แบบมีครีบบระบายความร้อนด้านใน	14
1.2	เปรียบเทียบลักษณะของแผง PVT/Air แบบ UFS (a) และ NFS (b) ที่ออกแบบสำหรับการศึกษานี้	15
2.1	ลักษณะภาคตัดขวางของโครงสร้างแผง PV/T แต่ละแบบ (Tonui and Tripanagnostopoulos, 2007)	17
2.2	โหนดอุณหภูมิและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของแผง PV/T ชนิดที่มีกระจกประคลุมด้านบน (REF+GL system) (Tonui and Tripanagnostopoulos, 2007)	18
2.3	มิติต่างๆ ของครีบบระบายความร้อนแบบ UFS (a) และ NFS (b)	19
2.4	ลักษณะของโครงสร้างแผง PV/T (Aste et al., 2008)	27
2.5	ลักษณะของโครงสร้างแผง PV/T ที่ทำการออกแบบ (a) ลักษณะโครงสร้างของแผงและการไหลเวียนอากาศ (b) ภาคตัดขวางช่องอากาศไหลเข้าด้านล่าง (c) ภาคตัดขวางช่องอากาศไหลออกด้านบน	28
2.6	ระยะห่าง และความสูงของครีบบระบายความร้อน	29
2.7	แผง PV/T ที่มีครีบบระบายความร้อนแบบ NFS	29
2.8	แผนที่แสดงตำแหน่งในการเก็บข้อมูลแผง PV/T	30
2.9	ข้อมูล (a) รังสีอาทิตย์รวมรายชั่วโมง (W/m^2) (b) ค่าความสว่างรายชั่วโมง (klux) และ (c) ค่ารังสีกระจายรายชั่วโมง (W/m^2) บนพื้นราบของพื้นที่ๆ ทำการทดลอง ในช่วงปี 2004 - 2005 (Pattanasethanon et al., 2007)	31
2.10	แผนภาพแสดงการบันทึกข้อมูลจากการวัดโดยใช้เครื่องบันทึกข้อมูลยี่ห้อ Agilent 34970A Data Acquisition Switch Unit	32
3.1	การเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิแผงและค่า V_{oc} ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด c-Si ในระหว่างทำการทดสอบ	34
3.2	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่า V_{oc} ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด c-Si และ mc-Si	34
3.3	ร้อยละของการลดลงของค่า V_{oc} จากค่ามาตรฐานที่ STC	35
3.4	ความเข้มรังสีอาทิตย์ในวันต่างๆ ที่ทำการเก็บข้อมูล	36
3.5	อุณหภูมิแวดล้อมในวันต่างๆ ที่ทำการเก็บข้อมูล	37

3.6	อัตราการไหลเฉลี่ยของอากาศใต้แผง PV/T ที่ทำการทดสอบ ณ อัตราเร็วของอากาศเข้าแผงที่การไหลแบบอิสระ (a) และแบบบังคับที่ 1.0 m/s (b) 2.0 m/s (c) 2.5 m/s (d) และ 3.0 m/s (e)	39
3.7	ความแตกต่างในอัตราการไหลเฉลี่ยของอากาศใต้แผง PV/T ที่ทำการทดสอบ ณ ความเร็วลมเข้าแผงต่างๆ กัน	40
3.8	อุณหภูมิอากาศเข้าและออกใต้แผง PV/T ที่ทำการทดสอบ ณ อัตราเร็วของอากาศเข้าแผงที่การไหลแบบอิสระ (a) และแบบบังคับที่ 1 m/s (b) 2 m/s (c) 2.5 m/s (d) และ 3.0 m/s (e)	41
3.9	ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิอากาศเข้าและออกแผง PV/T แบบ UFS และ NFS กับความเร็วลมเข้าแผงต่างๆ กัน	42
3.10	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ขณะทำการทดสอบ ณ อัตราเร็วของอากาศเข้าแผงที่การไหลแบบอิสระ (a) และแบบบังคับที่ 1 m/s (b) 2 m/s (c) 2.5 m/s (d) และ 3.0 m/s (e)	43
3.11	ผลต่างของอุณหภูมิแผง PV/T แบบ UFS และ NFS ที่ ความเร็วลมเข้าแผงต่างๆ กัน	44
3.12	แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดจากการทดสอบที่เงื่อนไขต่างๆ	46
3.13	แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่า V_{ov} และ I_{sc} เฉลี่ย ที่เงื่อนไขการทดสอบต่างๆ ของแผง PV/T แบบ UFS และ NFS	47
3.14	การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV/T แบบ NFS และ UFS ขณะทำการทดสอบ ณ อัตราเร็วของอากาศเข้าแผงที่การไหลแบบอิสระ (a) และแบบบังคับที่ 1 m/s (b) 2 m/s (c) 2.5 m/s (d) และ 3.0 m/s (e)	48
3.15	การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV/T แบบ UFS (a) และ NFS (b) ที่ความเร็วลมใดๆ ต่อความเข้มรังสีอาทิตย์	50
3.16	การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง PV/T แบบ NFS และ UFS ขณะทำการทดสอบ ณ อัตราเร็วของอากาศเข้าแผงที่การไหลแบบอิสระ (a) และแบบบังคับที่ 1 m/s (b) 2 m/s (c) 2.5 m/s (d) และ 3.0 m/s (e)	52
3.17	การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางความร้อน ต่อค่า $\Delta T/G$ ของแผง PV/T แบบ NFS และ UFS ขณะทำการทดสอบ ณ อัตราเร็วของอากาศเข้าแผงต่างๆ กัน	53
3.18	การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางความร้อนรวมของแผง PV/T แบบ NFS และ UFS ขณะทำการทดสอบ ณ อัตราเร็วของอากาศเข้าแผงที่การไหลแบบอิสระ (a) และแบบบังคับที่ 1.0 m/s (b) 2.0 m/s (c) 2.5 m/s (d) และ 3.0 m/s (e)	55
3.19	การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางความร้อนรวม ต่อค่า $\Delta T/G$ ของแผง PV/T แบบ NFS และ UFS ขณะทำการทดสอบ ณ อัตราเร็วของอากาศเข้าแผงต่างๆ กัน	56
3.20	เปรียบเทียบความแตกต่างของประสิทธิภาพการทำงานแผง PV/T แบบ NFS และ UFS ที่ค่าความเร็วลมเข้าแผงต่างๆ กัน	57

บทที่ 1

วัตถุประสงค์

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การใช้งานระบบไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ในปัจจุบันนั้นยังประสบปัญหาในเรื่องของราคาของระบบที่ยังค่อนข้างสูง อีกทั้งยังเสถียรภาพของระบบในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องต่อผู้ใช้อย่างไม่ดีพอ ซึ่งในการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ค่าพารามิเตอร์หลักที่มีผลต่อค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ได้ออกมาจากตัวเซลล์แสงอาทิตย์ว่ามากหรือน้อยนั้นประกอบไปด้วย ค่าความเข้มรังสี (solar irradiation) และค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งความเข้มรังสีอาทิตย์ในกรณีของประเทศไทย มีความเหมาะสมอย่างยิ่งในการผลิตไฟฟ้าโดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากความเข้มรังสีอาทิตย์อยู่ในช่วง 350 ถึง 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร (Janjai, 2010) โดยหลักการนั้น เมื่อรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบมีความเข้มสูงจะทำให้ได้กำลังไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์สูงตามไปด้วย แต่โดยลักษณะความเข้มรังสีที่ตกลงบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นไม่สามารถเปลี่ยนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ทั้งหมด จึงส่งผลให้เกิดความร้อนสะสมที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์สูงขึ้น ลักษณะดังกล่าวส่งผลทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าหักล้างกันภายในตัวเซลล์แสงอาทิตย์สูงขึ้นมากด้วย เป็นผลทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้ออกมา มีค่าต่ำกว่าที่ควรจะเป็น เป็นผลทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงเมื่ออุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์สูงขึ้นนั่นเอง

ในการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีความสำคัญมาก โดยทั่วไปจะนิยมใช้ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่ระบุไว้โดยผู้ผลิตซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบโดยอ้างอิงกับเงื่อนไขมาตรฐานการทดสอบ (standard test condition, STC) นั่นคือการทดสอบภายใต้สภาวะอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เท่ากับ 1 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร และค่ามวลอากาศ (air mass) เท่ากับ 1.5 แต่ในสภาพการใช้งานจริงในประเทศไทยอุณหภูมิที่สะสมบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยเฉพาะในฤดูร้อน มีค่าสูงเกินกว่า 60 องศาเซลเซียส ได้ซึ่งเป็นผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำกว่าที่ระบุไว้ในเอกสารจากผู้ผลิต ทำให้พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ ต่ำกว่าที่ได้ทำการออกแบบไว้ ทำให้เกิดปัญหาในการใช้งาน ดังนั้นการศึกษาศึกษาแนวทาง เทคนิคและวิธีการลดอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขณะใช้งานให้มีค่าต่ำลง จึงมีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ประสิทธิภาพสูงสุด

เทคนิคการลดอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการนำเอาความร้อนจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้ประโยชน์ หรือที่เรียกว่าแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วม (photovoltaic/thermal module, PV/T) เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมในการใช้ลดอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเทคนิคการนำเอาความร้อนออกจากแผงทำได้โดยการใช้ของไหล โดยปกติได้แก่น้ำหรืออากาศ ไหลผ่านแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อนำความร้อนออกมาใช้ประโยชน์ ลักษณะดังกล่าว เป็นการดึงเอาพลังงานรังสีอาทิตย์ที่ตกลงบนแผงที่ไม่สามารถเปลี่ยนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ แต่อยู่ในรูปของความร้อนที่สะสมบนแผงมาใช้ ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานรังสีอาทิตย์ต่อพื้นที่รับรังสีให้มากขึ้น วิธีดังกล่าวโดยมากจะนิยมใช้อากาศเป็นตัวกลาง (PV/T Air) ในการนำความร้อนมากกว่าน้ำ เนื่องจากต้นทุนต่ำกว่าและสามารถจัดการได้ง่ายกว่า ซึ่งในการศึกษาระบบ PV/T Air นั้น รูปแบบของแผงที่ต่างประเทศเคยศึกษามา ล้วนแล้วแต่อยู่ในลักษณะเดียวกัน คือมีความลึกของช่องอากาศคงที่ตลอดแนว ยังไม่มีข้อมูลเชิงเทคนิคของแผงที่ทำให้เกิดการไหลเวียนดีที่สุด ที่สอดคล้องกับสภาวะภูมิอากาศของประเทศไทย ผู้วิจัยเล็งเห็นปัญหาดังกล่าว จึงมีแนวคิดในการศึกษาและปรับปรุงประสิทธิภาพของแผงรับรังสีอาทิตย์แบบ PV/T Air ที่เหมาะสมกับประเทศไทยขึ้นมา ซึ่งอากาศร้อนที่ได้สามารถนำไปใช้ในกระบวนการทางความร้อนต่างๆ ได้ เช่น การอบแห้งใบหม่อน หรือผลิตผลทางการเกษตรอื่นๆ เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้ เกี่ยวข้องกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตในประเทศไทย ซึ่งได้ถูกนำไปผลิตไฟฟ้าในหลาย ๆ พื้นที่ของประเทศโดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. เพื่อวิจัยและพัฒนาองค์ความรู้ เกี่ยวกับแผง PV/T Air Solar Collector ที่สอดคล้องกับการใช้งานในสภาพภูมิอากาศไทย
2. เพื่อปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของ PV/T Air Collector
3. เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านแผง PV/T Air Collector ให้สามารถใช้งานได้จริงกับภาคการผลิต บริการและครัวเรือน เป็นการเพิ่มศักยภาพการใช้พลังงานหมุนเวียนภายในประเทศ

1.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและเอกสารอ้างอิง

ในการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้น เมื่อรังสีอาทิตย์ตกกระทบลงบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ รังสีเพียงส่วนหนึ่งเท่านั้นที่ถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานไฟฟ้า ส่วนที่เหลือจะกลายเป็นพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ อันเป็นผลทำให้ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำลง ดังนั้น การทำการระบายความร้อนที่เกิดขึ้นบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์จึงทำให้ ประสิทธิภาพการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดีขึ้น เทคนิคการระบายความร้อนที่เกิดขึ้นบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยอาศัยของไหลเป็นตัวกลางในการนำความร้อนออกมา เทคนิคแบบดังกล่าว จะให้ของไหล ไหลผ่านแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แล้วเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้กับของไหล แล้วได้ของไหลที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นออกมา ซึ่งสามารถนำเอาไปใช้ใน

กระบวนการทางความร้อนอื่น ๆ ได้ต่อไป ลักษณะที่ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ในการผลิตความร้อนและไฟฟ้าร่วมกันดังกล่าว ทำให้มันถูกเรียกว่า แผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วม (Photovoltaic/Thermal solar collector, PV/T) ของไหลส่วนใหญ่ที่ใช้เป็นตัวกลางในการระบายความร้อนได้แก่ น้ำและอากาศ ซึ่ง Prakash (Prakash, 1994) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ PV/T ที่ใช้อากาศ และน้ำเป็นตัวกลาง พบว่า ตัวกลางในการนำความร้อนที่เป็นน้ำ จะมีประสิทธิภาพดีกว่าอากาศ และกรณีของไหลที่เป็นตัวกลางคือ อากาศ ก็จะใช้แผงดังกล่าวว่า PVT/Air solar collector อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ (การใช้งานจริง) PVT/Air ได้รับความนิยมมากกว่าแบบอื่น เนื่องจากมูลค่าของระบบและค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาต่ำกว่า

หลักการของแผง PV/T มีมากกว่าสามสิบปีมาแล้ว โดย Florschuetz (Florschuetz, 1979) ปรับปรุงสมการของ Whillier-Bliss เพื่อทำแบบจำลองการทำงานของแผง PV/T และ Raghuraman (Raghuraman, 1981) ได้คิดค้นแบบจำลองการทำงานของแผง PV/T ขึ้นมา ซึ่งอธิบายถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ และอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อใช้น้ำและอากาศเป็นสารทำงาน

Sopian และคณะ (Sopian et al., 1996) ได้ศึกษาการวิเคราะห์ความร้อน ของแผง PVT/Air แบบช่องเดียวกับสองช่อง (single and double-pass configuration) ซึ่งพบว่าการระบายความร้อนด้วยอากาศแบบสองช่องจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า นอกจากนี้ Garg และ Adhikari (Garg and Adhikari, 1997) ได้พัฒนาแบบจำลองการทำงานของแผง PVT/Air ที่ไม่ขึ้นกับเวลา (steady state simulation model) ซึ่งสามารถให้ผลการวิเคราะห์ครอบคลุม ถึงผลกระทบของการออกแบบ และสภาพของตัวแปรในการทำงานต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่าสมรรถนะของแผง PVT/Air แบบช่องเดียวและสองช่อง ซึ่งพบว่าการออกแบบนั้น ความจำเป็นในการที่ต้องใช้กระจกติดเพิ่มเข้าไปอีกชั้นหนึ่ง บนแผง PVT/Air นั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิทำงานของแผง PVT/Air แต่ก็ไม่ได้ระบุไว้ว่า เมื่อใช้งานจริง จะต้องติดกระจกเข้าไปหรือไม่

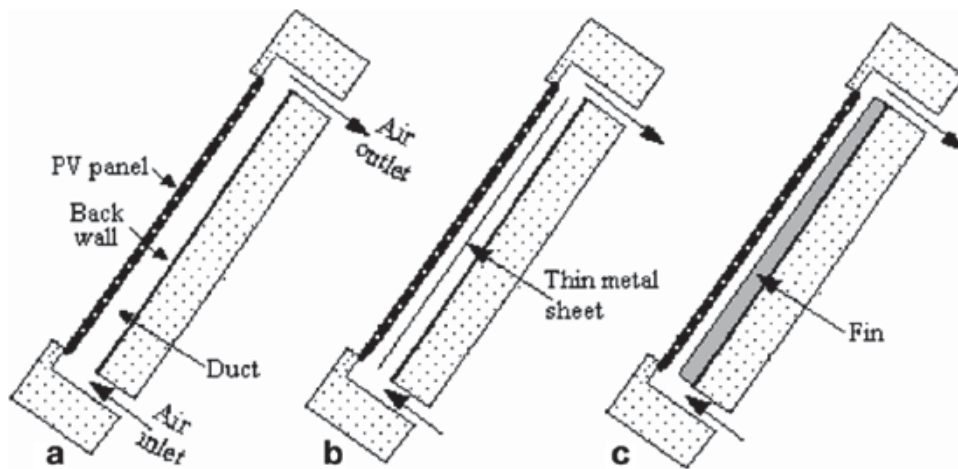
Hegazy (Hegazy, 2000) ก็ได้ศึกษาแบบจำลองของ PVT/Air เช่นกัน ซึ่งแบบจำลองดังกล่าว ครอบคลุมองค์ประกอบเบื้องต้นในการออกแบบแผง PVT/Air สี่ชนิดด้วยกันได้แก่ ความร้อนที่เกิดขึ้นบนแผง พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้โดยแผง การไหลเวียนของอากาศ และค่าสมรรถนะโดยรวมของแผง ซึ่งเขาก็ได้แนะนำลักษณะของแผง PVT/Air ที่เหมาะสมเอาไว้ด้วย

Tonui และ Tripanagnostopoulos (Tonui and Tripanagnostopoulos, 2007) ได้ทำการศึกษาการทำงานของแผง PVT/Air แบบมีกระจกและไม่มีกระจก สามลักษณะ คือแผง PVT/Air ธรรมดา แผง PVT/Air แบบมีแผ่นอลูมิเนียมด้านใน และแผง PVT/Air แบบมีเคลือบระบายความร้อนด้านใน ซึ่งพบว่า แผง PVT/Air ที่มีเคลือบระบายความร้อนด้านในจะมีประสิทธิภาพดีที่สุด

T.T. Chow (Chow et al., 2007) และคณะ ได้ศึกษาสมรรถนะของแผง PVT ที่ใช้น้ำเป็นตัวนำความร้อน โดยให้เกิดการไหลเวียนเองตามธรรมชาติ ในการศึกษาดังกล่าวได้สร้างแบบจำลองเพื่อประเมินการทำงานและหาปริมาณพลังงานที่ได้จากแผงดังกล่าว รวมทั้งใช้ในการหาจุดคุ้มทุนด้วย จากการศึกษา พบว่าแผง PVT มีจุดคุ้มทุนอยู่ที่ 12 ปี เร็วกว่าแผง PV ธรรมดา

N. Aste และคณะ (Aste et al., 2008) ได้ทำการสร้างระบบ PVT ที่ใช้อากาศเป็นสารทำงาน และพัฒนาแบบจำลองที่สามารถประเมินค่าสมรรถนะการทำงานของระบบดังกล่าวได้ ที่ประเทศอิตาลี ในการทดลองได้กำหนด ความเร็วของอากาศที่ไหล มีค่าเป็น 0.5 เมตรต่อวินาที โดยมีปริมาตรการไหลเท่ากับ 127 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ซึ่งผลการทดลองพบว่าค่าสมรรถนะของแผง PVT เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอากาศที่ไหลผ่านออกไปมีค่าสูงกว่า 40 องศาเซลเซียส โดยจะเกิดในช่วงเดือน พฤษภาคม มิถุนายน และ กันยายน ตุลาคม (ช่วง mid-seasons) ผลจากการศึกษาดังกล่าวได้ถูกนำไปใช้ในการออกแบบติดตั้งระบบ PVT กับอาคารในประเทศอิตาลี

อย่างไรก็ดี ทุกกรณีที่เคยศึกษามานั้น ใช้ขนาดความลึกของช่องอากาศระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์และผนังด้านหลัง (back wall) คงที่ตลอดแนว (ดังแสดงในรูปที่ 1.1) ซึ่งมีผลทำให้อัตราการไหลของอากาศภายในช่องดังกล่าวเกิดขึ้นได้ไม่เต็มที่ เนื่องจากผลของการสูญเสียความดันได้แผงนั่นเอง ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาเกิดขึ้นได้ไม่ดี งานวิจัยนี้ จึงมีแนวคิดใหม่ในการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศในช่องดังกล่าว ซึ่งจะทำให้การปรับปรุงเทคนิคการออกแบบแผง PVT/Air แบบมีครีปใหม่ โดยการทำให้ขนาดความลึกของช่องไม่คงที่ โดยความลึกจะลดลงเรื่อย ๆ จากด้านล่างของแผงไปจนถึงด้านปลายของแผง (ดังแสดงในรูปที่ 1.2)



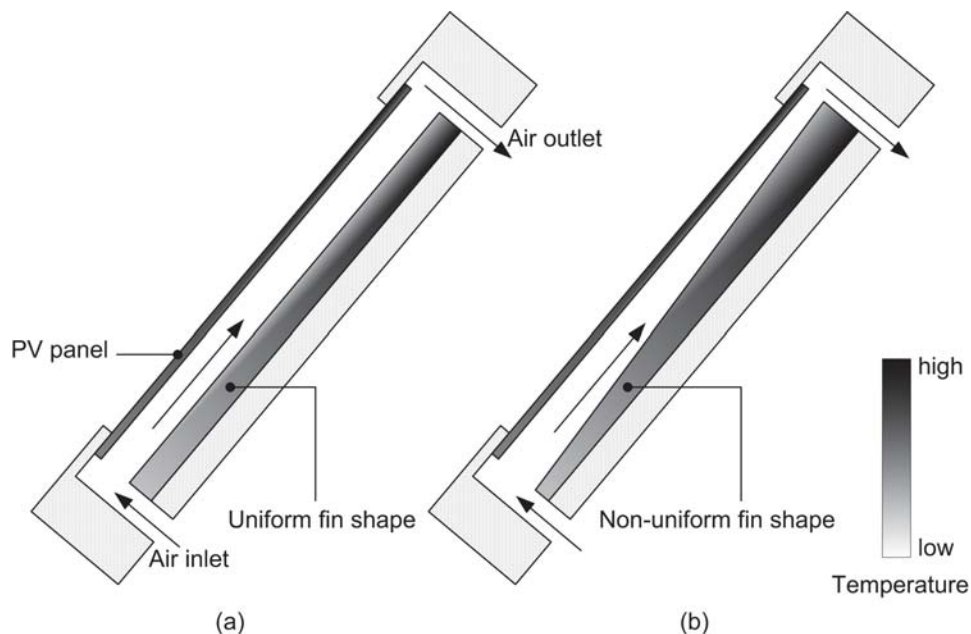
รูปที่ 1.1: ลักษณะของแผง PVT/Air ของ Tonui และ Tripanagnostopoulos กรณีไม่มีกระจกด้านบน (a) แบบธรรมดา (b) แบบมีแผ่นอลูมิเนียมด้านใน และ (c) แบบมีครีประบายความร้อนด้านใน

ลักษณะของแผ่นผนังด้านหลังที่ลาดเอียง (ความลึกของช่องอากาศที่ลดลง) จะช่วยทำให้อากาศร้อนที่ออก มีอัตราการไหลที่เร็วกว่าปกติ ทำให้เกิดการดูดอากาศเข้ามาแทนที่ได้เร็วขึ้นนั่นเอง ซึ่งโดยแนวคิดดังกล่าวนี้ จะทำให้อัตราการระบายความร้อนจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดีขึ้นตามไปด้วย

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

การศึกษานี้เป็นการศึกษาเชิงทดลอง โดยมีระเบียบวิธีวิจัยดังนี้

1. ศึกษารายละเอียดของปัญหาที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผง PV/T Air ขึ้นตอนนี้ ได้ทำการศึกษาเทคนิคการถ่ายเทความร้อนของแผง PV/T Air solar collector โดยใช้อากาศเป็นตัวกลาง แบบต่าง ๆ เพื่อให้ทราบถึงลักษณะของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน และทำการศึกษาเทคนิคการถ่ายเทความร้อนแบบ Air flow in natural/active flow system เพื่อพัฒนาลักษณะโครงสร้างและรูปแบบการถ่ายเทความร้อนของแผง PV/T และทำการออกแบบการทดลองเพื่อทดสอบค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน



รูปที่ 1.2: เปรียบเทียบลักษณะของแผง PVT/Air แบบ UFS (a) และ NFS (b) ที่ออกแบบสำหรับการศึกษานี้

2. ศึกษารายละเอียดของปัญหาที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพเชิงไฟฟ้าของ แผง PV/T Air ขั้นตอนนี้ได้ทำการศึกษาว่าตัวแปรทางด้านภูมิอากาศ อาทิเช่น ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ ค่าอุณหภูมิแวดล้อม มีผลต่อค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแผง PV/T อย่างไร และทำการออกแบบการทดลองเพื่อทดสอบค่าประสิทธิภาพเชิงไฟฟ้า
3. ทำการออกแบบแผง PV/T โดยละเอียด โดยคำนึงถึงตัวแปรต่างๆ ที่ได้ศึกษาไว้ข้างต้น เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานในประเทศไทยมากที่สุด ลักษณะของแผงแบบต่างๆ ที่ออกแบบได้ดำเนินการสร้างและทำการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนและไฟฟ้า
4. ทดสอบแผงภายในห้องทดสอบ (indoor test) ขั้นตอนนี้จะทำการทดสอบประสิทธิภาพแผง PV/T แต่ละชนิดในห้องทดลอง ซึ่งเป็นสภาวะที่ต้องควบคุมตัวแปร อาทิเช่นอุณหภูมิ หรือค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ เพื่อทดสอบความน่าเชื่อถือของแผง PV/T (reliability test) ตัวแปรเหล่านี้จะถูกบันทึกค่าระหว่างทำการทดลอง โดยใช้เครื่องบันทึกข้อมูลต่อกับชุดเทอร์โมคัปเปิ้ล ส่วนค่าความเข้มรังสีจะวัดโดยใช้ เครื่องวัดความเข้มรังสี Amplified Pyranometer Sensor รุ่น Apogee SP-212 ความแม่นยำที่ $\pm 5\%$ ข้อมูลที่ได้จะนำมาศึกษาว่ากรณีที่แผง PVT/ Air ที่สร้างขึ้นแต่ละแบบทำงานที่สภาวะอากาศต่างๆ กัน จะมีผลต่อค่าประสิทธิภาพแผงที่ได้อย่างไร
5. ทำการทดสอบแผงภายใต้สภาวะการใช้งานจริง (outdoor test) ขั้นตอนนี้ได้ทำการศึกษาสภาพของค่าความเข้มรังสีและอุณหภูมิ ที่เพิ่มขึ้นอย่างไม่เป็นเชิงเส้น ต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแผง PV/T ข้อมูลของตัวแปรและผลของการทดลอง จะถูกวัดและบันทึก และทำการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนและไฟฟ้าของแผง PV/T และเพื่อประเมินค่าพลังงาน (ความร้อนและไฟฟ้า) ที่ได้จากแผง PV/T รายปี และสรุปแบบที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด

6. ศึกษาและกำหนดมาตรฐานการติดตั้งและการใช้งานจริง ขั้นตอนนี้จะทำการศึกษามาตรฐานการติดตั้งแผง PV/T กับอาคารเพื่อให้การติดตั้งและใช้งาน เกิดประสิทธิภาพสูงสุด
7. ประเมินศักยภาพการใช้ความร้อนจากแผง PV/T ในการอบผลผลิตทางการเกษตร เพื่อหาแนวทางในการนำเอาความร้อนจากแผง PV/T ไปใช้ในกระบวนการดังกล่าว

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1. ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ อยู่ในช่วงความเข้มรังสีอาทิตย์ของประเทศไทย
2. อุณหภูมิแผงที่ทดสอบในห้องทดลอง < 80 องศาเซลเซียส
3. แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ เป็นแบบผลึกรวมซิลิคอนเท่านั้น
4. สารทำงานที่ใช้ในการนำความร้อน เป็นอากาศ
5. ขนาดของระบบที่ทำศึกษา กรณีนำไปใช้จริง < 7 ตารางเมตร
6. ทดสอบโดยกำหนดมุมเอียงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ตามตำแหน่งพละจุดของพื้นที่ทำการทดสอบ
7. อัตราการไหลของอากาศขาเข้าของครีบบระบายความร้อนแบบคงที่และแบบไม่คงที่ ที่การไหลแบบอิสระ และแบบบังคับที่ 1.0 2.0 2.5 และ 3.0 เมตรต่อวินาที
8. กำหนดเงื่อนไขในการวิเคราะห์ทางความร้อนของระบบเป็นแบบสภาวะคงที่ (steady state)

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

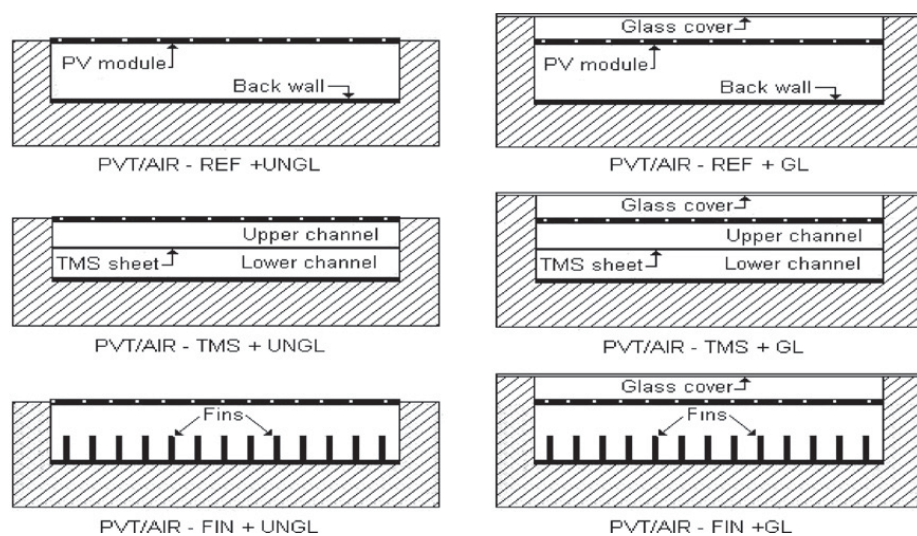
1. ได้องค์ความรู้ใหม่ เกี่ยวกับเทคโนโลยีแผง PV/T Air Solar Collector ที่สอดคล้องกับการใช้งานในสภาพภูมิอากาศไทย
2. ได้ลักษณะของแผง PV/T Air Collector ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น
3. ได้เทคโนโลยีทางด้านแผง PV/T Air Collector พัฒนาเพิ่มขึ้น และสามารถใช้งานได้จริงกับภาคการผลิต บริการและครัวเรือน เป็นการเพิ่มศักยภาพการใช้พลังงานหมุนเวียนภายในประเทศ
4. มีผลงานตีพิมพ์ระดับชาติและนานาชาติ
5. สร้างเครือข่ายนักวิจัยทางด้านพลังงานหมุนเวียน ทั้งภายในและต่างประเทศ

บทที่ 2

วิธีการทดลอง

2.1 สมดุลพลังงานของแผง PV/T

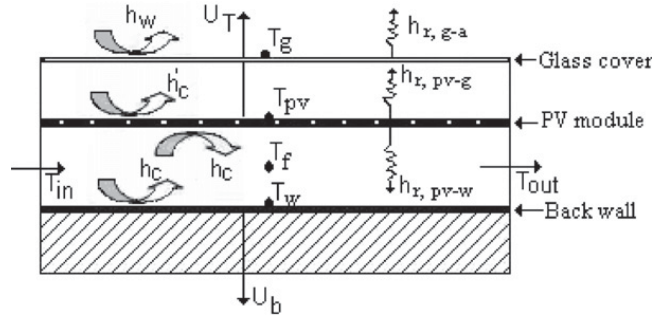
จากการทดสอบประสิทธิภาพของแผง PV/T แบบต่างๆ ดังรูปที่ 2.1 (Tonui and Tripanagnostopoulos, 2007) พบว่าแผง PV/T ชนิด FIN + UNGL ซึ่งประกอบครีบบระบายอากาศด้านล่าง และไม่มีชั้นกระจกด้านบนมีประสิทธิภาพดีที่สุด ทั้งนี้ งานวิจัยนี้ ทำการพัฒนาประสิทธิภาพของแผงรูปแบบดังกล่าว โดยการใช้ครีบบระบายความร้อนแบบไม่คงที่ (non-uniform fin shape, NFS) ทดแทนการใช้ครีบบระบายความร้อนแบบคงที่ (uniform fin shape, UFS) โดยรูปสมการสำหรับการวิเคราะห์สมดุลพลังงานของแผง อธิบายไว้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.1: ลักษณะภาคตัดขวางของโครงสร้างแผง PV/T แต่ละแบบ (Tonui and Tripanagnostopoulos, 2007)

แบบจำลองทางทฤษฎีของแผง PV/T ที่ติดครีบบระบายความร้อน จะเกี่ยวข้องกับสมการไหลของพลังงาน ซึ่งอาจแสดงทั้งในรูปของความร้อนและไฟฟ้า รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างของภาคตัดขวางของแผง PV/T ที่นำเสนอการไหลของความร้อนในรูปแบบต่างๆ ที่เกิดขึ้นบนแผง PV/T ที่มีกระจกปกคลุมด้านบนส่วนด้านล่างเป็นช่องอากาศ แต่ในกรณีศึกษานี้ไม่มีกระจกปกคลุม

ด้านบน จึงไม่พิจารณาการไหลของความร้อนในช่วงดังกล่าว เงื่อนไขสำหรับการวิเคราะห์ จะกำหนดให้การไหลของความร้อนเป็นไปในหนึ่งมิติ ไม่ขึ้นกับเวลา ไม่คิดความจุความร้อนของแผง ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h_c) ระหว่างพื้นผิวด้านหลังเซลล์แสงอาทิตย์และพื้นผิวครีบริบายความร้อนกับอากาศที่ไหล มีค่าเท่ากัน ความร้อนสูญเสียจากผิวนอกด้านต่างๆ ของแผงไหลสู่อากาศแวดล้อมที่เงื่อนไขเดียวกัน การสูญเสียพลังงานที่กระจกและเซลล์แสงอาทิตย์ ประเมินได้จากการนำค่า สัมประสิทธิ์การส่องผ่าน ($\tau = 0.92$) คูณกับค่าการดูดกลืนความร้อนของเซลล์แสงอาทิตย์ ($\alpha = 0.9$) ค่าการสูญเสียที่กระจกและเซลล์ทำให้เกิดส่วนของพลังงานไฟฟ้าและความร้อนขึ้นมานั่นเอง โหนดอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งจะสมมติให้มีค่าคงที่ตลอดความยาว การสูญเสียด้านหลังของแผงเกิดโดยการนำผ่านฉนวนและพื้นผิวด้านหลังของแผง โดยกรณีศึกษา นี้ กำหนดให้ อุณหภูมิฉนวนด้านหลังเท่ากับอุณหภูมิอากาศ จากเงื่อนไขดังกล่าว



รูปที่ 2.2: โหนดอุณหภูมิและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของแผง PV/T ชนิดที่มีกระจก ประคลุมด้านบน (REF+GL system) (Tonui and Tripanagnostopoulos, 2007)

ทำให้สามารถประเมินหาสมการสมดุลพลังงานได้ โดยพิจารณาขนาดของครีบริบายความร้อนแบบ UFS และ NFS ดังรูปที่ 2.3 เมื่อครีบริบายหนาน้อยมาก ($t = 1.2 \text{ mm}$) หากเทียบกับความยาว ($L = 0.8 \text{ m}$) ทำให้พื้นผิวที่เกิดการถ่ายเทความร้อนโดยการพาของครีบริบายแบบ UFS และ NFS มีค่าเป็น $2LH$ และ $L(Hi + Hf)$ ตามลำดับ

ดังนั้นสมการสมดุลพลังงานในกรณีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็น

$$\begin{aligned} A_{pv} \tau \alpha (1 - \eta_E) I_r &= A_{pv} U_t (T_{pv} - T_a) + A_{pv} h_a (T_{pv} - T_f) \\ &+ A_{pv} h_{r,pv-w} (T_{pv} - T_w) \end{aligned} \quad (2.1)$$

กรณีครีบริบาย UFS

สมการสมดุลพลังงานในกรณีของอากาศที่ไหลในช่องด้านล่างเป็น

$$\begin{aligned} \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in}) &= A_{pv} h_c (T_{pv} - T_f) + A_{int} h_c (T_w - T_f) \\ &+ \left[N \int_{z=0}^{z=H} 2 h_c L (T_{fin} - T_f) dz \right] \end{aligned} \quad (2.2)$$

สมการสมดุลพลังงานที่แผ่นดูดกลืนความร้อนด้านหลังเป็น

$$A_{pv} h_{r,pv-w} (T_{pv} - T_w) = A_{pv} U_b (T_w - T_a) + A_{int} h_c (T_w - T_f)$$

$$+ N \left(-k A_{cf} \frac{dT_{in}}{dz} \right) \quad (2.3)$$

เมื่อ

$$N \left(-k A_{cf} \frac{dT_{fin}}{dz} \right) \Big|_{z=0} = N \int_{z=0}^{z=H} 2h_c L (T_{fin} - T_f) dz \quad (2.4)$$

กรณีครีบบน NFS

สมการสมดุลพลังงานในกรณีของอากาศไหลในช่องด้านล่างเป็น

$$\begin{aligned} \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in}) &= A_{pv} h_c (T_{pv} - T_f) + A_{int} h_c (T_w - T_f) \\ &+ \left[N \int_{z=0}^{z=H_i} 2h_c L (T_{fin} - T_f) dz + N \int_{z=H_i}^{z=H_f} 2h_c L \left(\frac{z - H_i}{m_{s,fin}} \right) (T_{fin} - T_f) dz \right] \end{aligned} \quad (2.5)$$

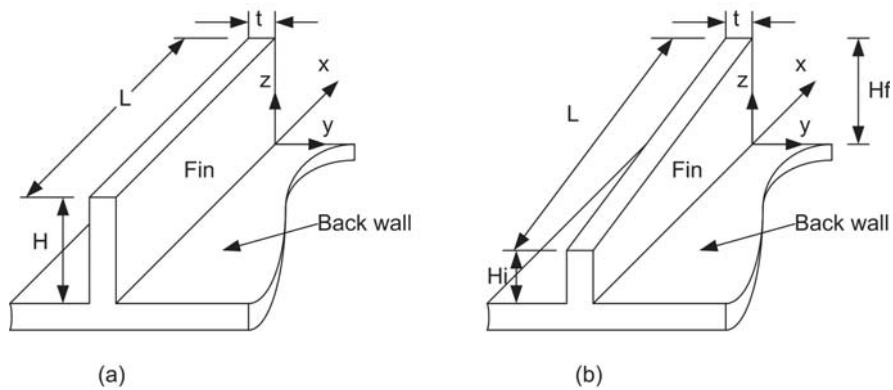
โดย $m_{s,fin}$ คือความชันของครีบบน NFS

ในส่วนของการสมดุลพลังงานที่แผ่นดูดกลืนความร้อนด้านหลังเป็น

$$\begin{aligned} A_{pv} h_{r,pv-w} (T_{pv} - T_w) &= A_{pv} U_b (T_w - T_a) + A_{int} h_c (T_w - T_f) \\ &+ N \left(-k A_{cf} \frac{dT_{fin}}{dz} \right) \end{aligned} \quad (2.6)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} N \left(-k A_{cf} \frac{dT_{fin}}{dz} \right) \Big|_{z=0} &= N \int_{z=0}^{z=H_i} 2h_c L (T_{fin} - T_f) dz \\ &+ N \int_{z=H_i}^{z=H_f} 2h_c L \left(\frac{z - H_i}{m_{s,fin}} \right) (T_{fin} - T_f) dz \end{aligned} \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.3: มิติต่างๆ ของครีบบระบายความร้อนแบบ UFS (a) และ NFS (b)

โดยสำหรับสมการต่างๆ ข้างต้น N คือ จำนวนของครีบบน ($N = 20$) H ความสูงของครีบบนแบบ UFS ($= 0.04 \text{ m}$) H_i และ H_f คือ ความสูงด้านเริ่มต้น (initial fin height) และ ความสูงด้านปลาย (final fin height) ของครีบบน NFS ในแนวแกน z ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ระยะห่างระหว่าง ครีบบระบายความร้อน W เท่ากับ 0.025 เมตร

2.2 ประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง PV/T

Florschuetz (Florschuetz, 1979) ได้ทำการปรับปรุงแบบจำลองของ Hottel-Whillier-Bliss (Duffie and Beckman, 1991) ซึ่งถูกใช้ในการศึกษานี้ โดยสมการประสิทธิภาพทางความร้อน ได้แก่

$$\eta_{th} = \bar{F}_R \left[\tau\alpha(1 - \eta_E) - \bar{U}_L \left(\frac{T_{in} - T_a}{G} \right) \right] \quad (2.8)$$

โดย η_E คือประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV ได้จากการประเมิน ณ อุณหภูมิแวดล้อม $\bar{U}_L$ คือสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม $\bar{F}_R$ คือแฟกเตอร์การดึงความร้อนออกของแผง ค่า $\bar{F}_R$ จะเกี่ยวข้องกับค่าแฟกเตอร์ประสิทธิภาพ (collector efficiency factor, $\bar{F}'$)

โดยในกรณีของแผงที่มีครีบบระบายความร้อน ค่า $\bar{F}'$ ประเมินได้จากสมการที่ 2.9 ได้แก่

$$\bar{F}' = F_0 \left[1 + \frac{2H\eta_f(1 - F_0)}{2HF_o + W} \right] \quad (2.9)$$

โดย η_f คือประสิทธิภาพของครีบบระบายอากาศ ซึ่งอธิบายไว้ในหัวข้อ 2.4 หน้าที่ 22 W คือระยะห่างระหว่างครีบบระบายความร้อน F_o แฟกเตอร์ประสิทธิภาพ กรณี ที่แผงไม่มีครีบบระบายความร้อนติดด้านล่าง โดยประเมินจากสมการที่ 2.10 ได้แก่

$$F_o = \left[\tau\alpha(1 - \eta_E) - \bar{U}_L \left(\frac{T_{in} - T_a}{G} \right) \right] \quad (2.10)$$

ทำให้ค่าแฟกเตอร์การดึงความร้อนออก $\bar{F}_R$ ของแผง แสดงได้ดังสมการที่ 2.11 นั่นคือ

$$\bar{F}_R = \frac{\dot{m}C_p}{A_{PV}\bar{U}_L} \left[1 - \exp \left(-\frac{A_{PV}\bar{U}_L\bar{F}'}{\dot{m}C_p} \right) \right] \quad (2.11)$$

โดย $\dot{m}$ และ C_p เป็นอัตราการไหลและความจุความร้อนจำเพาะของอากาศตามลำดับ

นอกจากนี้ ในสภาวะคงที่ (steady-state) ประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง PV/T ที่ใช้อากาศเป็นสารทำงานยังสามารถประเมินได้จากสมการ 2.12 นั่นคือ

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}C_p(T_{out} - T_{in})}{A_a G} \quad (2.12)$$

2.3 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

2.3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (overall heat transfer coefficients, U_L) สำหรับแผงรับรังสีอาทิตย์โดยทั่วไป ปกติแล้วจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนด้านบน (U_t) และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนด้านล่าง (U_b) โดยยกเว้นกรณีของการสูญเสียความร้อนด้านข้าง (U_e) ซึ่งเขียนแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ 2.13 นั่นคือ

$$U_L = U_t + U_b \quad (2.13)$$

U_t สามารถประเมินได้โดยอาศัยสมการ 2.14 โดย h_w คือค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศเหนือผิวกระจกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ค่า $h_{r,pv-a}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี จากกระจกของแผงเซลล์อาทิตย์สู่ท้องฟ้า (Duffie and Beckman, 1991)

$$U_t = h_w + h_{r,pv-a} \quad (2.14)$$

โดย h_w สามารถประเมินได้จากสมการ 2.15 นั่นคือ

$$h_w = 2.8 + 3.0V_w \quad (2.15)$$

เมื่อ V_w คืออัตราเร็วการไหลของอากาศ

นอกจากนี้ ค่า $h_{r,g-a}$ สามารถประเมินได้จากสมการ 2.16 นั่นคือ

$$h_{r,g-a} = \sigma \epsilon_{pv} \frac{(T_{pv}^4 - T_s^4)}{T_{pv} - T_a} \quad (2.16)$$

ซึ่ง T_s คืออุณหภูมิท้องฟ้า สามารถประเมินได้จากสมการ 2.17 นั่นคือ

$$T_s = 0.0552T_a^{1.5} \quad (2.17)$$

ในส่วนของ U_b ทำการประเมินหาจากการสูญเสียในฉนวนด้านล่างของแผง โดยแสดงดังสมการที่ 2.18 นั่นคือ

$$U_b = \frac{\kappa_{ins}}{\delta_{ins}} \quad (2.18)$$

เมื่อ κ_{ins} และ δ_{ins} คือ ค่าการนำความร้อนของฉนวน และความหนาของฉนวนตามลำดับ

ในการศึกษานี้ ทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม โดยอาศัยสมการที่ปรับแก้โดย Florschuetz (Florschuetz, 1979) นั่นคือ

$$\bar{U}_L = U_L - \tau \alpha \eta_{ref} \beta_{ref} G \quad (2.19)$$

อย่างไรก็ดี ค่า $\bar{U}_L$ และ U_L นั้นมีความแตกต่างกันเล็กน้อย และค่า $\bar{F}'$ กับ $\bar{F}_R$ ก็มีความแตกต่างจาก F' กับ F_R เพียงร้อยละ 1 ทั้งในกรณีของแผง PV/T ที่มีกระจกปกคลุมด้านบน (glazed, GL) และไม่มีกระจกปกคลุมด้านบน (unglazed, UNGL) ถึงแม้โครงสร้างของแผงทั้งสองมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน Florschuetz (Florschuetz, 1979)

2.3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาในช่องอากาศ

ในกรณีที่อากาศที่ไหลในช่องมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็นเชิงเส้น (linear variation) ตามทิศทางการไหล ดังนั้นอุณหภูมิเฉลี่ย T_f ที่ทำให้คุณสมบัติของอากาศคงที่ สามารถหาได้จากสมการ 2.20 นั่นคือ

$$T_f = \frac{T_o + T_i}{2} \quad (2.20)$$

กรณีการไหลของอากาศแบบบังคับภายในช่องอากาศระยะสั้นๆ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนถือว่าคงที่ตลอดความยาวของช่องอากาศ การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดย

การพา (convection heat transfer coefficient, h_c) จะเริ่มต้นจากการหาเลขนัสเซลล์ท์ (Nusselt number, Nu) โดยอาศัยสมการของ Tan and Charters (Tan and Charters, 1969) ดังแสดงในสมการ 2.21 นั่นคือ

$$Nu = 0.0182 Re^{0.8} Pr^{0.4} \left[1 + S \frac{D_H}{L} \right] \quad (2.21)$$

โดย $S = 14.3 \log(L/D_H) - 7.9$ สำหรับ $0 < L/D_H \leq 60$ และ สำหรับ $L/D_H > 60$ S คือค่าคงที่ เมื่อ $L/D_H = 60$ หรือ 17.5 เมื่อทราบค่า Nu ทำให้สามารถประเมินหาค่า h_c ได้จากสมการ 2.22 นั่นคือ

$$h_c = \frac{k_a}{D_H} Nu \quad (2.22)$$

ในส่วนของค่า Re นั้นสามารถประเมินได้จาก สมการ 2.23 นั่นคือ

$$Re = \frac{\rho u_m D_H}{\mu} \quad (2.23)$$

โดย D_H คือเส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิก (hydraulic diameter) หาได้จากสมการ 2.24 ซึ่งเกี่ยวข้องกับพื้นที่ฐานครี (A_c) และความยาวรอบรูป (wetted perimeter, P)

$$D_H = \frac{4A_c}{P} \quad (2.24)$$

2.3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี

การแผ่รังสีความร้อนในช่องอากาศ สามารถใช้สมการ 2.25 ของ Stefan-Boltzman ประเมินหาค่าดังกล่าวได้ นั่นคือ

$$h_{r,1-2} = \sigma(T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2) \left(\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)^{-1} \quad (2.25)$$

โดยตัวห้อย 1 และ 2 หมายถึงพื้นผิว 1 และ 2 ที่มองเห็นกันและกันตามลำดับ

2.4 การไหลของความร้อนออกจากครีระบายความร้อน

การคำนวณเกี่ยวกับการไหลของความร้อนของครีระบายความร้อนนั้น จะเกี่ยวข้องกับการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตสองตำแหน่งได้แก่ ขอบเขต ณ ตำแหน่งฐานครี (fin root) และ ปลายครี (fin tip) ตามลำดับ โดยอุณหภูมิที่ฐานครีมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของแผ่นปิดด้านหลังได้แก่ T_w นั่นเอง ครีในการศึกษานี้แสดงในรูปที่ 2.3 หน้าที่ 19 การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของครี จะอาศัยสมการของ Incropera and DeWitt (Frank and David, 1996) ดังแสดงในสมการ 2.26 ซึ่งความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพาจากครี จะเกิดขึ้นสูงสุดเมื่อ อุณหภูมิครีเท่ากับอุณหภูมิของแผ่นปิดด้านหลัง T_w

$$Q_{fin} = N A_f h_c \eta_f (T_w - T_f) \quad (2.26)$$

จากสมการ 2.26 N คือจำนวนครีระบายความร้อน A_f คือพื้นที่ผิวของครีระบายความร้อน โดย $A_f = 2HL$ ในกรณีที่แผง PV/T ติดครีแบบ NFS และ $A_f = (Hi + Hf) * L$ ใน

กรณีที่แผง PV/T ติดครีบบนแบบ UFS ในส่วนของประสิทธิภาพของครีบบ (fin efficiency, η_f) ที่บางมาก สามารถประเมินหาค่า η_f ได้จากสมการ 2.27 (Frank and David, 1996) นั่นคือ

$$\eta_f = \frac{\tan h mH}{mH} \quad (2.27)$$

เมื่อ

$$m = \sqrt{\frac{2h_c L}{\kappa A_{cf}}} \quad (2.28)$$

โดย κ คือ ค่าการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำครีบบ และ A_{cf} คือ พื้นที่หน้าตัดของครีบบ

2.5 การสูญเสียความดันใต้แผง

การสูญเสียความดัน (pressure drop) ของอากาศใต้แผง สามารถวิเคราะห์ได้โดยอาศัยสมการของ เบร์นูลลี (Bernoulli's theorem) สมการสมดุลพลังงานของระบบ โดยทำการกำหนดเงื่อนไขในการวิเคราะห์จากสภาพของระบบที่ทำการพิจารณา (Esposito, 1998) สำหรับการไหลแบบบังคับ การไหลของอากาศเกิดจากการทำงานของพัดลมดูดอากาศ ที่ทำการขับอากาศให้ไหลข้ามค้ำยกของพัดลมดูดอากาศ (pump head, H_p) ซึ่งมีค่าเท่ากับค้ำยกเนื่องจากความเสียดทานรวม (total head loss, H_L) อันเกิดจากแรงเสียดทานระหว่างอากาศและผิวท่อ (friction head) และการสูญเสียเล็กน้อยอันเนื่องมาจากสภาพการไหลที่ไม่เรียบภายในช่องอากาศ ซึ่งประเมินได้โดยอาศัยค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย (loss coefficient, k_i) และค้ำยกของความเร็วกว (velocity head, $v^2/2g$) ที่ร่วมกันต้านทานการไหลดังกล่าว การสูญเสียค้ำยกความดันรวม หรือค้ำยกของพัดลมดูดอากาศ จึงเขียนแสดงได้ดังสมการ ที่ 2.29 นั่นคือ

$$H_p = H_L = H_f + \sum_i k_i \frac{v^2}{2g} \quad (2.29)$$

โดย k_i คือค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียต่างๆ ในระบบแผงรับรังสี เมื่อคิดรวมเข้าด้วยกันจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียรวม (total loss coefficients, k) ซึ่ง Young และคณะ (Young et al., 2010) กำหนดค่าดังกล่าวสำหรับแผง PV/T ในปัจจุบันที่ $k = 7.2$ ค่า H_f สามารถประเมินได้จากสมการของ Darcy-Weisbach (Esposito, 1998) นั่นคือ

$$H_f = \frac{v^2}{2g} f \left(\frac{L}{D_H} \right) \quad (2.30)$$

เมื่อแทนค่า k_i และ H_f จากสมการ 2.30 ลงในสมการ 2.29 จะได้สมการค้ำยกของเครื่องสูบลมอากาศเป็น

$$H_p = \frac{v^2}{2g} \left(7.2 + \frac{fL}{D_H} \right) \quad (2.31)$$

เพราะฉะนั้น การสูญเสียความดันในช่องอากาศของแผง PV/T จึงประเมินได้จากสมการ 2.32 นั่นคือ

$$\Delta P = \rho g H_p \quad (2.32)$$

ตัวแปร f ในสมการ 2.30 และ 2.31 คือค่าแฟกเตอร์ความเสียดทาน สามารถคำนวณได้โดยสมการของ Incropera และ Dewitt () นั่นคือ

$$f = 64Re^{-1} \quad (\text{laminar flow, } Re \leq 2300) \quad (2.33)$$

$$f = 0.316Re^{-0.25} \quad (\text{Turbulent flow upto } 2 \times 10^4) \quad (2.34)$$

กำลังไฟฟ้าที่ต้องจ่ายให้กับอากาศใต้แผง PV/T เกิดการเคลื่อนที่ หาได้จากการนำเอาประสิทธิภาพของพัดลมดูดอากาศ (η_{fan}) และประสิทธิภาพของมอเตอร์ (η_{motor}) คูณเข้าด้วยกัน ผลคูณของทั้งสองค่า มีค่าเท่ากับ 0.8 ดังนั้นสมการการคำนวณจึงเป็น

$$P = \frac{\dot{m}\Delta P}{\rho} = \frac{\dot{m}\Delta P}{\rho \eta_{fan} \eta_{motor}} \quad (2.35)$$

2.6 ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV/T

เซลล์แสงอาทิตย์ คือ สิ่งประดิษฐ์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิคอน (Silicon), แกลเลียม อาร์เซไนด์ (Gallium Arsenide), อินเดียม ฟอสไฟด์ (Indium Phosphide), แคดเมียม เทลลูไรด์ (Cadmium Telluride) และคอปเปอร์ อินเดียม ไดเซเลไนด์ (Copper Indium Diselenide) เป็นต้น ซึ่งเมื่อได้รับรังสีอาทิตย์โดยตรงก็จะเปลี่ยนเป็นพาหะนำไฟฟ้า และจะถูกแยกเป็นประจุไฟฟ้าบวกและลบเพื่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วทั้งสองของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อนำขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อเข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรง กระแสไฟฟ้าจะไหลเข้าสู่อุปกรณ์เหล่านั้น ทำให้สามารถทำงานได้

ตัวแปรที่สำคัญที่มีส่วนทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพการทำงานในแต่ละพื้นที่ต่างกัน และมีความสำคัญในการพิจารณานำไปใช้ในแต่ละพื้นที่ ตลอดจนการนำไปคำนวณระบบหรือคำนวณจำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต้องใช้ในแต่ละพื้นที่ มีดังนี้

- **ความเข้มของรังสีอาทิตย์** กระแสไฟ (Current) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของรังสีอาทิตย์ หมายความว่าเมื่อความเข้มของรังสีอาทิตย์สูง กระแสที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะสูงขึ้น ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าหรือโวลต์แทบจะไม่แปรไปตามความเข้มของรังสีอาทิตย์มากนัก ความเข้มของรังสีอาทิตย์ที่ใช้วัดเป็นมาตรฐานคือ ความเข้มของรังสีอาทิตย์ที่วัดบนพื้นโลกในสภาพอากาศปลอดโปร่ง ปราศจากเมฆหมอกและวัดที่ระดับน้ำทะเลในสภาพที่รังสีอาทิตย์ตั้งฉากกับพื้นโลก ซึ่งความเข้มของรังสีอาทิตย์จะมีค่าเท่ากับ 100 mW/m^2 หรือ $1,000 \text{ W/m}^2$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ AM 1.5 (Air Mass 1.5) และถ้าแสงอาทิตย์ทำมุม 60 องศา กับพื้นโลกความเข้มของแสง จะมีค่าเท่ากับประมาณ 75 mW/m^2 หรือ 750 W/m^2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ AM2 กรณีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะใช้ค่า AM 1.5 เป็นมาตรฐานในการวัดประสิทธิภาพของแผง
- **อุณหภูมิ** กระแสไฟ (Current) จะไม่แปรตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่แรงดันไฟฟ้า (โวลต์) จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วทุกๆ 1 องศาที่เพิ่มขึ้น จะทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลง 0.5% และในกรณีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาตรฐานที่ใช้กำหนดประสิทธิภาพของแผงแสงอาทิตย์คือ ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เช่น กำหนดไว้ว่าแผงแสงอาทิตย์มีแรงดันไฟฟ้าที่วงจรเปิด (Open Circuit Voltage หรือ V_{oc}) ที่ 21 V ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ก็จะหมายความว่า แรงดันไฟฟ้าที่จะได้จากแผงเซลล์

แสงอาทิตย์ เมื่อยังไม่ได้ต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะเท่ากับ 21 V ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 25 องศาเซลเซียส เช่น อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จะทำให้แรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง 2.5% ($0.5\% \times 5$ องศาเซลเซียส) นั่นคือ แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ V_{oc} จะลดลง 0.525 V ($21\text{ V} \times 2.5\%$) เหลือเพียง 20.475 V ($21\text{V} - 0.525\text{V}$) สรุปได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แรงดันไฟฟ้าก็จะลดลง ซึ่งมีผลทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงด้วย

ค่าประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell efficiency, η_E) ในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า คืออัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดต่อพลังงานรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งใช้สัญลักษณ์ เป็น η_E ซึ่ง สามารถประเมินได้จากสมการ

$$\eta_E = \frac{I_{max} \times V_{max}}{A_{PV} \times E_{sol}} \quad (2.36)$$

เมื่อ I_{max} คือ ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด และ V_{max} คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีหน่วยเป็น แอมป์ (A) และ โวลต์ (V) ตามลำดับ A_{PV} คือ พื้นที่ของเซลล์แสงอาทิตย์ มีหน่วยเป็น ตารางเมตร (m^2) E_{sol} คือความเข้มรังสีอาทิตย์ มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2) นั่นเอง นอกจากสมการดังกล่าวแล้ว ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ยังสามารถประเมินได้จาก

$$\eta_E = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times FF}{E_{sol} \times A_{PV}} \times 100 \quad (2.37)$$

โดย V_{oc} คือ แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (open circuit voltage) I_{sc} คือ กระแสไฟฟ้าวงจรปิด (short-circuit current) มีหน่วยเป็น โวลต์ (V) และ แอมป์ (A) ตามลำดับ FF คือ ค่าฟิลแฟคเตอร์ (fill factor) สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกกรวมซิลิคอน (mc-Si PV module) โดยทั่วไปมีค่าระหว่าง 0.75-0.85 (Quaschnig, 2005)

นอกจากนี้แล้วประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ยังสามารถประเมินได้จากสมการความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงในสมการ 2.38 นั่นคือ

$$\eta_E = \eta_{ref} [1 - \beta_{ref}(T_{pv} - T_{ref})] \quad (2.38)$$

เมื่อ η_{ref} β_{ref} คือค่าประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากการทดสอบที่อุณหภูมิอ้างอิงมาตรฐาน (T_{ref}) ที่ STC (25 องศาเซลเซียส) ตามลำดับ

2.7 ประสิทธิภาพรวมของแผง PV/T

ประสิทธิภาพทางความร้อนรวมของแผง PV/T ประเมินได้จากสมการ 2.39 นั่นคือ

$$\eta_{O,TH} = \frac{\sum_{i=1}^T [\eta_c I(t) bL \tau_g \beta_c + \dot{q}_u]}{\sum_{i=1}^T I(t) bL} \quad (2.39)$$

หรือ

$$\eta_{O,TH} = \eta_E + \frac{\sum_{i=1}^T \dot{q}_u}{\sum_{i=1}^T I(t)bL} = \eta_E + \eta_{TH} \quad (2.40)$$

ทั้งนี้ การเปลี่ยนประสิทธิภาพทางไฟฟ้า η_E ในสมการ 2.40 ให้เป็นประสิทธิภาพทางความร้อน ต้องนำ 0.38 ไปหารประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ทำให้สมการประสิทธิภาพทางความร้อนรวมของแผงเป็นดังสมการที่ 2.41 นั่นคือ

$$\eta_{O,TH} = \frac{\eta_E}{0.38} + \eta_{TH} \quad (2.41)$$

2.8 การสำรวจเบื้องต้นเกี่ยวกับการทำงานของแผง PV

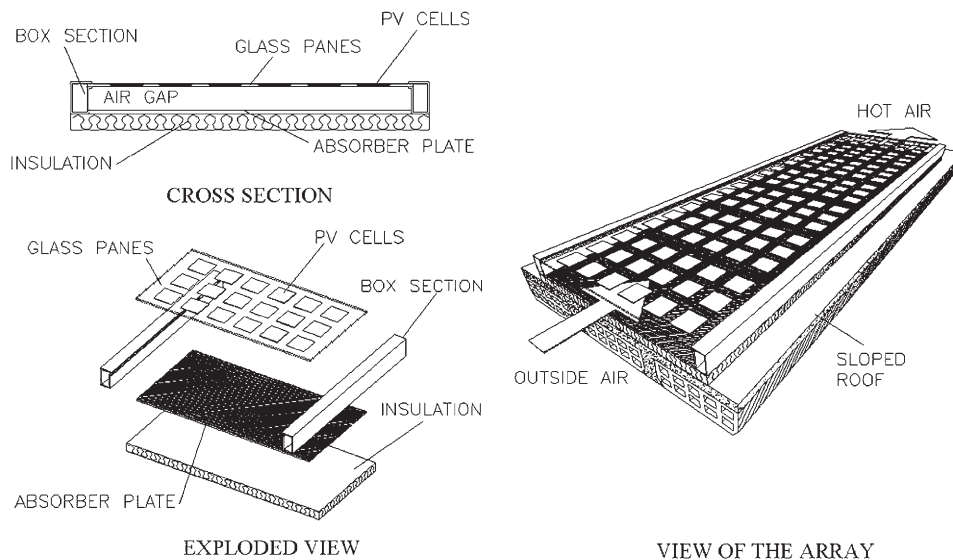
ในการเบื้องต้นเกี่ยวกับการทำงานของแผง PV นั้น ได้เน้นศึกษาที่ความร้อน หรืออุณหภูมิบนแผง PV อันเป็นส่วนของพลังงานแสงอาทิตย์ ที่ตกกระทบแต่ไม่ได้ใช้ประโยชน์ โดยทำการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญ ว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรเมื่ออุณหภูมิแผงสูงขึ้น ค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) และกระแสไฟฟ้าวงจรปิด (I_{sc}) ในแง่ของการคำนวณประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และการใช้งานนั้น การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้ามีอิทธิพลต่อค่าประสิทธิภาพของแผง และการทำงานของโหลด หรือภาระทางไฟฟ้ามากกว่าการแกว่งในส่วนของกระแสไฟฟ้าจากแผง PV

ดังนั้นการสำรวจเกี่ยวกับผลของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด จึงได้ดำเนินการไว้ในเบื้องต้นของการศึกษานี้ โดยทำการวัดค่าอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกเพิ่มค่าขึ้นเรื่อยๆ ในระหว่างวัน พร้อมกับทำการวัดค่าของแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด ที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แล้วทำการประเมินผลของการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว และนำผลที่ได้ไปใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบแผง PV/T ที่ทำการติดครีบบระบายความร้อนแต่ละลักษณะ

2.9 การออกแบบแผง PV/T

ในการทำงานของแผง PV/T ที่ใช้อากาศระบายความร้อนนั้น จะประกอบไปด้วยส่วนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ หรือแผง "PV" (photovoltaic, PV) อยู่ด้านบน และช่องอากาศอยู่ส่วนล่างของแผง โดยแผง PV จะรับรังสีอาทิตย์โดยตรงและส่งผ่านความร้อนมายังช่องอากาศและแผ่นดูดกลืนความร้อนด้านล่าง (absorber plate) ของแผง PV/T โดยความร้อนด้านล่างแผง PV จะส่งผ่านไปยังแผ่นดูดกลืนความร้อนด้านล่างโดยการแผ่รังสีความร้อน เมื่อแผ่นดูดกลืนความร้อนด้านล่างได้รับความร้อน จึงทำให้อุณหภูมิของส่วนดังกล่าวมีค่าสูงขึ้น อากาศที่ไหลเวียนในช่องด้านล่าง จึงได้รับความร้อนในรูปแบบของการถ่ายเทความร้อนโดยการพาจากด้านหลังของแผ่น PV และแผ่นดูดกลืนความร้อนด้านล่าง ทำให้อุณหภูมิอากาศที่ผ่านแผง PV/T ออกไปมีค่าสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.4

จากลักษณะของแผง PV/T ข้างต้น ทำให้ผู้วิจัยเกิดแนวคิดของการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของแผง PV/T โดยการเพิ่มอัตราการไหลเวียนของอากาศ ภายในช่องใต้แผง PV/T ด้วยวิธีการใช้ครีบบระบายความร้อนแบบ NFS เพิ่มเข้าไปในด้านล่างของแผง ดังรูปที่ 2.5



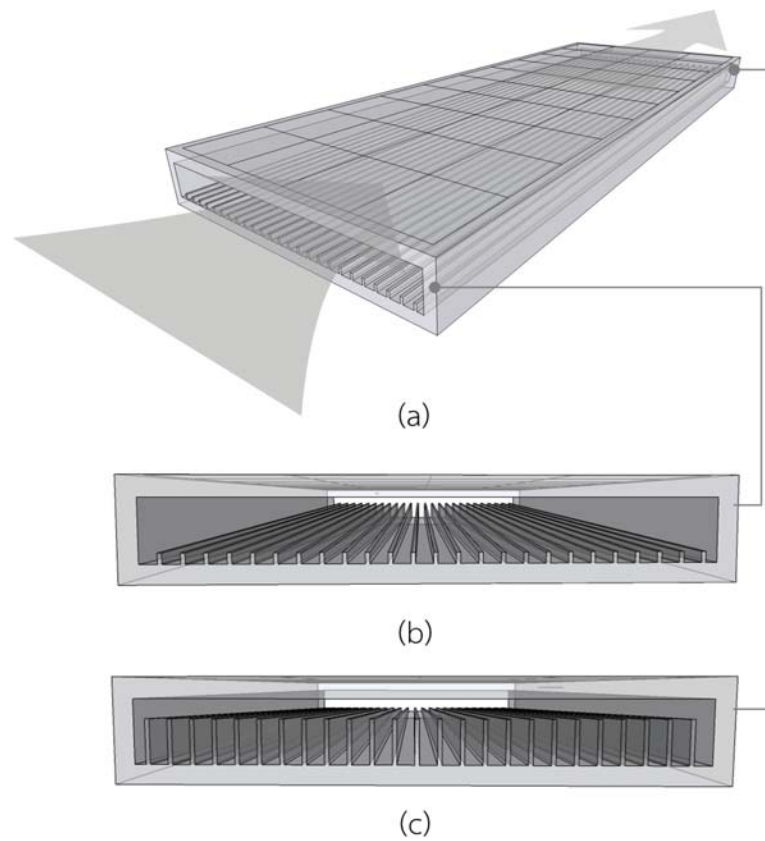
รูปที่ 2.4: ลักษณะของโครงสร้างแผง PV/T (Aste et al., 2008)

ทดแทนครีบบระบายความร้อนแบบ UFS ที่เคยมีผู้ทำการศึกษามาก่อน โดยครีบบระบายความร้อนแบบ NFS ดังกล่าว จะทำให้ช่องอากาศไหลเข้าแผงด้านล่าง มีขนาดใหญ่กว่าช่องอากาศไหลออกด้านบนของแผง ทำให้อากาศไหลเวียนดีขึ้น และจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพรวมของแผง PV/T สูงขึ้นด้วย

การกำหนดระยะห่าง และความสูงของครีบบระบายความร้อนของครีบบระบายความร้อนที่ใช้ในการศึกษานี้ มีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดย รูปด้านซ้ายแสดงลักษณะของครีบบระบายความร้อนแบบ UFS โดยมีขนาดความสูงของครีบท่อกับ 4 เซนติเมตร ตลอดความยาวของครีบบระบายความร้อนดังกล่าว ส่วนรูปด้านขวา คือลักษณะของครีบบระบายความร้อนแบบ NFS ครีบบระบายความร้อนดังกล่าว มีความสูง ณ ตำแหน่งช่องอากาศไหลเข้า 2 เซนติเมตร และเพิ่มความสูงขึ้นเรื่อยๆ ตามแนวความยาวของครีบท่อกับ 4 เซนติเมตร ณ ตำแหน่งด้านปลายสุดของครีบบระบายความร้อน จากรูปจะเห็นได้ว่า การติดครีบบระบายความร้อนแบบ NFS ทำให้พื้นที่ว่างของช่องอากาศเข้า มีมากกว่าช่องอากาศเข้าของครีบบระบายความร้อนแบบ UFS ซึ่งน่าจะมีผลต่อการไหลของอากาศและการระบายความร้อนที่จะเกิดขึ้นใต้แผงครีบบระบายความร้อนทั้งสองแบบได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อยึดเข้าไปในช่องอากาศ ณ ตำแหน่งด้านล่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่กว้าง 40.5 เซนติเมตร สูง 5.0 เซนติเมตร และทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทำงาน

2.10 การทดสอบแผง PV/T

แผง PV/T แบบ UFS และ NFS ได้ถูกสร้างขึ้น (ดังรูปที่ 2.7) และทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของแผง PV/T ทั้งสองแบบ โดยในการทดสอบได้ทำการวัดค่าตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการหาประสิทธิภาพของแผง PV/T รายละเอียดในขั้นตอนของการทดสอบแผงอธิบายไว้ดังต่อไปนี้

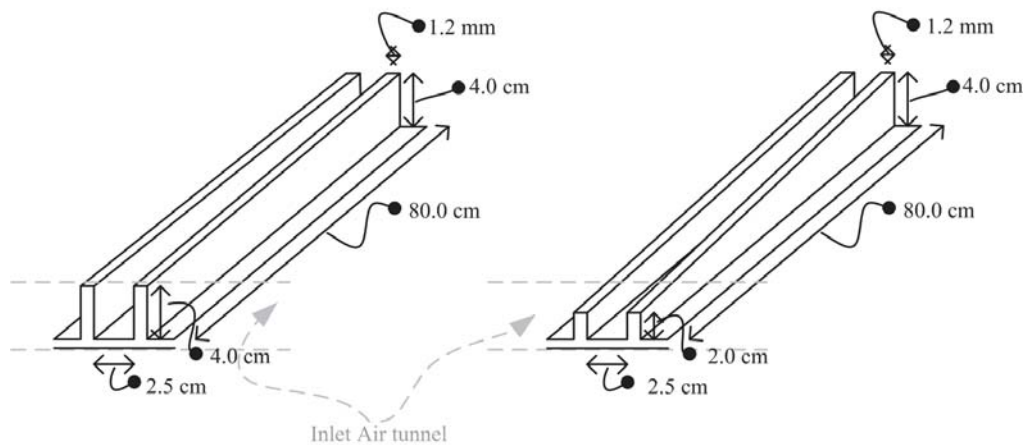


รูปที่ 2.5: ลักษณะของโครงสร้างแผง PV/T ที่ทำการออกแบบ (a) ลักษณะโครงสร้างของแผง และการไหลเวียนอากาศ (b) ภาคตัดขวางช่องอากาศไหลเข้าด้านล่าง (c) ภาคตัดขวางช่องอากาศไหลออกด้านบน

2.10.1 สถานที่ในการเก็บข้อมูล

การศึกษาเปรียบเทียบการทำงานของแผง PV/T ที่ติดตั้งระบายความร้อนแบบ UFS และ NFS ได้ดำเนินการทดลอง ณ จังหวัดมหาสารคาม ที่ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ซึ่งตำแหน่งละติจูดที่ 16.24 องศาเหนือ และลองจิจูดที่ 103.25 องศาตะวันออก อยู่สูงจากระดับน้ำทะเล 150 เมตร อากาศในช่วงฤดูหนาว (พฤศจิกายน - กุมภาพันธ์) และฤดูร้อน (เมษายน - มิถุนายน) ขอน้างแห้ง อุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้ อยู่ระหว่าง 44-45 องศาเซลเซียส (Khedari et al., 2002) ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยและค่าความชื้นสัมพัทธ์ (Rh) ในฤดูร้อนและฤดูหนาว คือ 20 องศาเซลเซียส 50 % และ 35 องศาเซลเซียส 60 % ตามลำดับ สำหรับฤดูฝน (กรกฎาคม - ตุลาคม) มีค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยที่ 29 องศาเซลเซียส และ 70 % ตามลำดับ

ข้อมูลรังสีอาทิตย์รายปี (ช่วงปี คศ. 2004-2005) ในรูปที่ 2.9 ของพื้นที่ๆ ทำการทดลอง แสดงให้เห็นว่า พื้นที่ดังกล่าวมีศักยภาพด้านพลังงานแสงอาทิตย์ ขอน้างสูง โดยมีค่ารังสีอาทิตย์รวมรายชั่วโมงสูงสุดเท่ากับ $1,243 \text{ W/m}^2$ และมีค่าเฉลี่ยรายปีที่ 446 W/m^2



รูปที่ 2.6: ระยะห่าง และความสูงของครีบริบายความร้อน

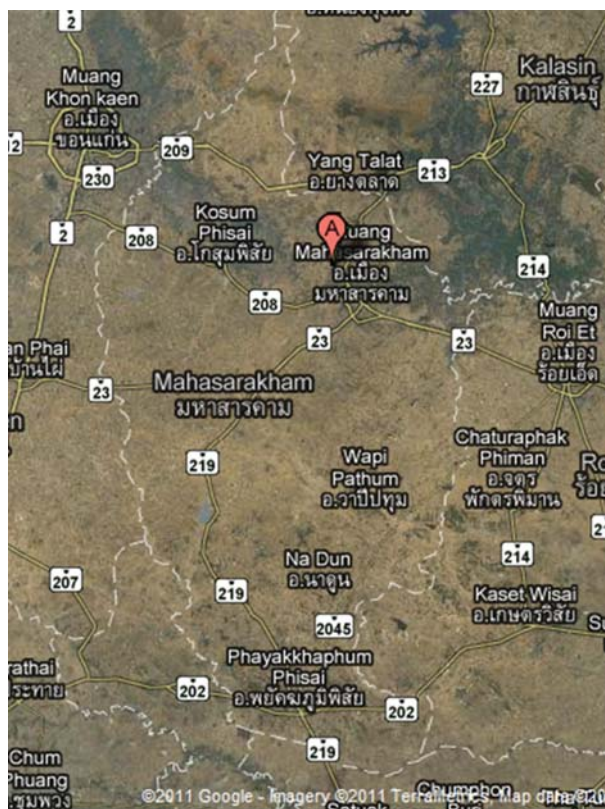


รูปที่ 2.7: แผง PV/T ที่มีครีบริบายความร้อนแบบ NFS

2.10.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษา

ในการดำเนินการศึกษา ได้ทำการกำหนดตัวแปรต่างๆ ที่ต้องใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของแผง PV/T โดยตัวแปรต่างๆ ดังกล่าว สรุปลไว้ในตารางที่ 2.1 โดยในการเก็บข้อมูลนั้นได้ กำหนดให้เครื่องบันทึกข้อมูล ทำการบันทึกข้อมูลตัวแปรค่าต่างๆ ทุกๆ 10 นาที

ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เช่นแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า นอกจากนั้น ยังเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิของแผง PV/T ซึ่งเชื่อมโยงกับอุณหภูมิอากาศร้อนที่ได้จากแผง PV/T ประสิทธิภาพทางความร้อนรวม (ดังแสดงในสมการที่ 2.41) และประสิทธิภาพทางไฟฟ้า (ดังสมการที่ 2.38) ของแผง PV/T อีกด้วย ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ในการศึกษานี้ ทำการบันทึกค่าในหน่วยของ W/m^2 ส่วนอุณหภูมิและอัตราการไหลก็มีความสำคัญต่อการประเมินประสิทธิภาพของแผง PV/T ตามสมการที่ 2.41 เช่นกัน



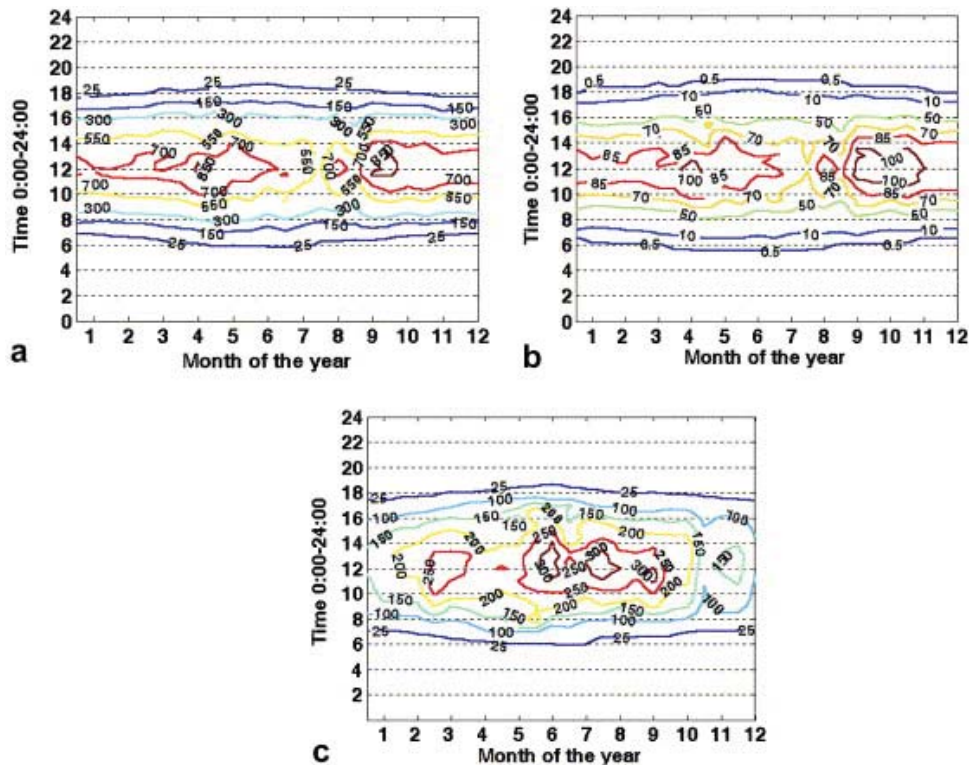
รูปที่ 2.8: แผนที่แสดงตำแหน่งในการเก็บข้อมูลแผง PV/T

2.10.3 อุปกรณ์เครื่องมือวัดและการบันทึกผล

ในการทดลองเพื่อศึกษาเปรียบเทียบการทำงานของ แผง PV/T ที่ติดตั้งระบายความร้อนแบบ NFS และ UFS นั้น ได้นำแผง PV/T ทั้งสองแบบมาติดตั้งบนโครงสร้างรองรับแผง ที่สามารถทำการปรับมุมเอียงได้ ในการทดลองจะทำการควบคุมอัตราการไหลของอากาศเข้า ณ ค่าเริ่มต้นที่เท่ากันทุกๆ เงื่อนไขของค่าความเร็วลมที่ทำการทดสอบ ซึ่งทำได้โดยการใช้อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์พัดลม การทดสอบแต่ละกรณี เริ่มทำการทดสอบที่เวลา 8 นาฬิกา และสิ้นสุดที่เวลา 16 นาฬิกา

ตัวแปรต่างๆ (ดังแสดงในตารางที่ 2.1) ที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพการทำงานของแผง PV/T ได้ถูกทำการวัดและบันทึกค่าทุกๆ 10 นาที รูปที่ 2.10 แสดงการวัดและบันทึกค่าตัวแปรต่างๆ ที่ทำการศึกษา โดยค่าอุณหภูมิ วัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิ้ล type K ตำแหน่งในการวัดค่าได้แก่ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 1 จุด อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 3 จุด อุณหภูมิอากาศภายในแผง 3 จุด และอุณหภูมิครีบบระบายความร้อนอีก 3 จุด ส่วนความเร็วลมเข้าด้านล่างของแผง และออกด้านบนของแผงนั้นทำการวัดโดยใช้เครื่องมือวัดความเร็วลม แบบ Hot Wire Anemometer รุ่น AM-4214SD สามารถวัดความเร็วลมได้ระหว่าง 0.2 ถึง 20.0 เมตรต่อวินาที

ความเข้มรังสีอาทิตย์ ทำการวัดโดยใช้เครื่องมือวัดความเข้มรังสี Amplified Pyranometer Sensor รุ่น Apogee SP-212 ความแม่นยำที่ $\pm 5\%$ แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและกระแสไฟฟ้าวงจรปิดที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ถูกทำการวัดโดยใช้เครื่องวัดของ Hewlett Packard multimeter model 973A สัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์การวัดแต่ละตัว ถูกส่งมารวมกัน

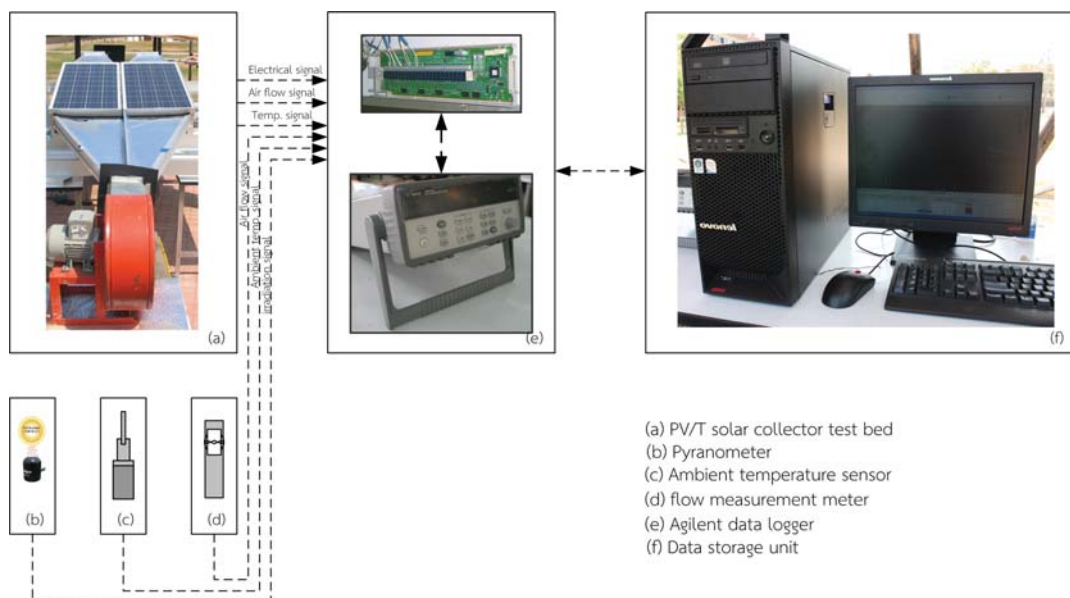


รูปที่ 2.9: ข้อมูล (a) รังสีอาทิตย์รวมรายชั่วโมง (W/m^2) (b) ค่าความสว่างรายชั่วโมง (klux) และ (c) ค่ารังสีกระจายรายชั่วโมง (W/m^2) บนพื้นราบของพื้นที่ๆ ทำการทดลอง ในช่วงปี 2004 - 2005 (Pattanasethanon et al., 2007)

ที่เครื่องบันทึกข้อมูล ยี่ห้อ Agilent รุ่น Agilent 34970A Data Acquisition Switch Unit มีช่องสำหรับใส่ชุดวัดสัญญาณ (Plug-in Module) 3 ช่องสัญญาณ สามารถบันทึกใช้บันทึกข้อมูลได้สูงสุด 60 จุด สามารถทำการจัดการการทำงานโดยคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยอาศัยซอฟต์แวร์ของเครื่อง ผ่านทางพอร์ตเชื่อมต่อ RS-232 และสามารถทำการกำหนดค่าการวัดผ่านจอของเครื่องบันทึกข้อมูลดังกล่าวได้โดยตรง มีค่าความละเอียดการวัด (Resolution) 6 หลัก สามารถวัดอุณหภูมิ ได้ทั้งแบบ RTD, Thermocouple สามารถรองรับการวัดโดยใช้ RTD ในย่านการวัด -150 องศาเซลเซียส ถึง 500 องศาเซลเซียส หรือกว้างกว่า โดยมีค่าความแม่นยำ ± 0.005 องศาเซลเซียส และสามารถรองรับการวัดโดยใช้ Thermocouple ในย่านการวัด -100 องศาเซลเซียส ถึง 1500 องศาเซลเซียส หรือกว้างกว่า โดยมีค่าความแม่นยำ ± 0.05 องศาเซลเซียส สายวัดอุณหภูมิที่ใช้ เป็นสายเทอร์โมคัพเปิล type K จำนวน 13 เส้น ซึ่งตั้งค่าในการทำงานให้ตรวจจับสัญญาณและบันทึกค่า ผ่านทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทุกๆ 10 นาที

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	หน่วย
ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์	W/m^2
อุณหภูมิอากาศแวดล้อม	$^{\circ}C$
อุณหภูมิอากาศเข้าแผง PV/T	$^{\circ}C$
อุณหภูมิอากาศออกจากแผง PV/T	$^{\circ}C$
อุณหภูมิอากาศภายในแผง PV/T	$^{\circ}C$
อุณหภูมิแผง PV/T	$^{\circ}C$
อุณหภูมิเครื่องระบายความร้อน	$^{\circ}C$
ความเร็วลมเข้าแผง PV/T	m/s
ความเร็วลมออกแผง PV/T	m/s

ตารางที่ 2.1: ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ทำการศึกษาและเก็บข้อมูล



รูปที่ 2.10: แผนภาพแสดงการบันทึกข้อมูลจากการวัดโดยใช้เครื่องบันทึกข้อมูลยี่ห้อ Agilent 34970A Data Acquisition Switch Unit

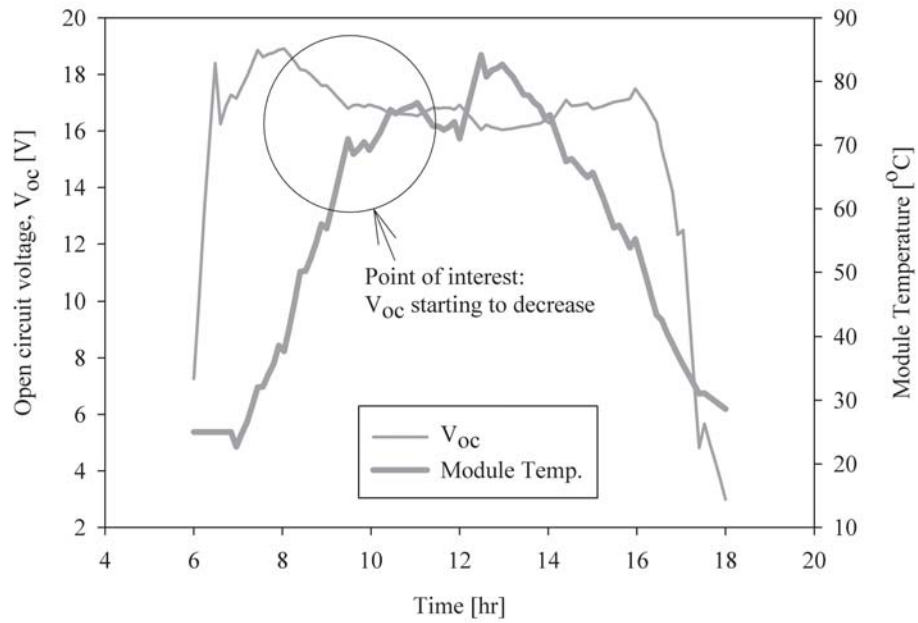
บทที่ 3

ผลการทดลอง

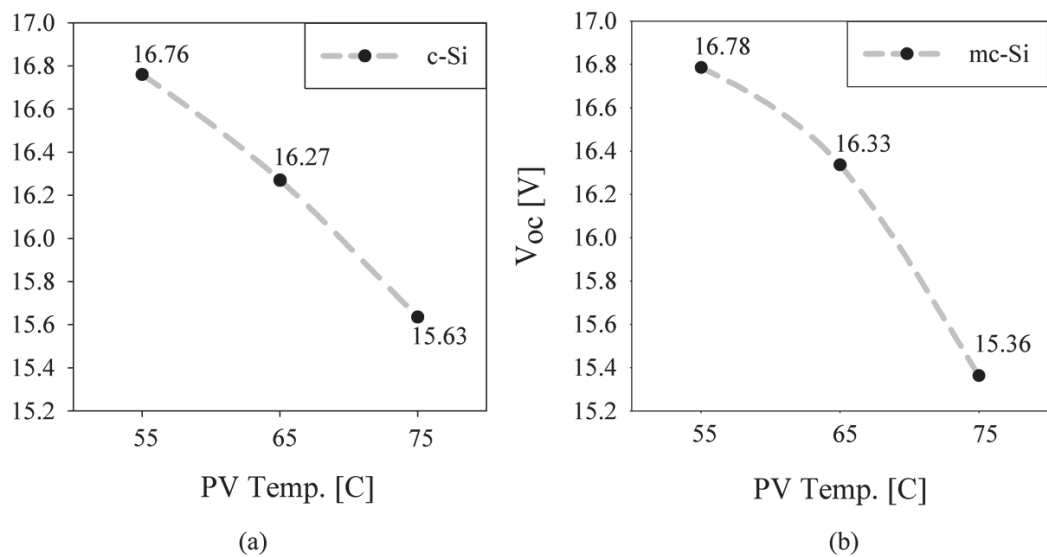
3.1 ผลการสำรวจเบื้องต้นเกี่ยวกับการทำงานของแผง PV

การสำรวจการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในเบื้องต้นนั้น เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า ในพื้นที่การใช้งานจริง เมื่อเกิดการสะสมของความร้อนบนแผงเป็นเวลานาน ได้แสดงผลการเก็บข้อมูล ดังรูปที่ 3.1 จากรูปแสดงให้เห็นว่าในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน เมื่ออุณหภูมิแผงเซลล์สูงถึงจุดหนึ่ง จะทำให้แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดลดลงอย่างรวดเร็ว รูปที่ 3.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิแผงและค่า V_{oc} จากข้อมูลในรูปพบว่า ค่า V_{oc} จะแปรผกผันกับอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (T_{pv}) โดย V_{oc} มีค่าสูงในช่วงเช้าและลดลงเมื่ออุณหภูมิแวดล้อมและอุณหภูมิแผงมีค่าสูงขึ้น อันเนื่องมาจากการสะสมความร้อนเมื่อรับรังสีอาทิตย์นั่นเอง และเมื่อทำการวิเคราะห์แนวโน้มของการลดลงอย่างละเอียดแล้วพบว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน (crystalline silicon, c-Si) มีแนวโน้มการลดลงของค่า V_{oc} ในช่วงอุณหภูมิแผงต่ำกว่า 65 องศาเซลเซียส สูงกว่าการลดลงที่เกิดในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกรวมซิลิคอน (multi-crystalline silicon, mc-Si) (ดังแสดงในรูปที่ 3.2) อย่างไรก็ตาม เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 65 องศาเซลเซียสขึ้นไปการลดลงของค่า V_{oc} ในแผงชนิด c-Si จะต่ำกว่าที่พบในแผงชนิด mc-Si

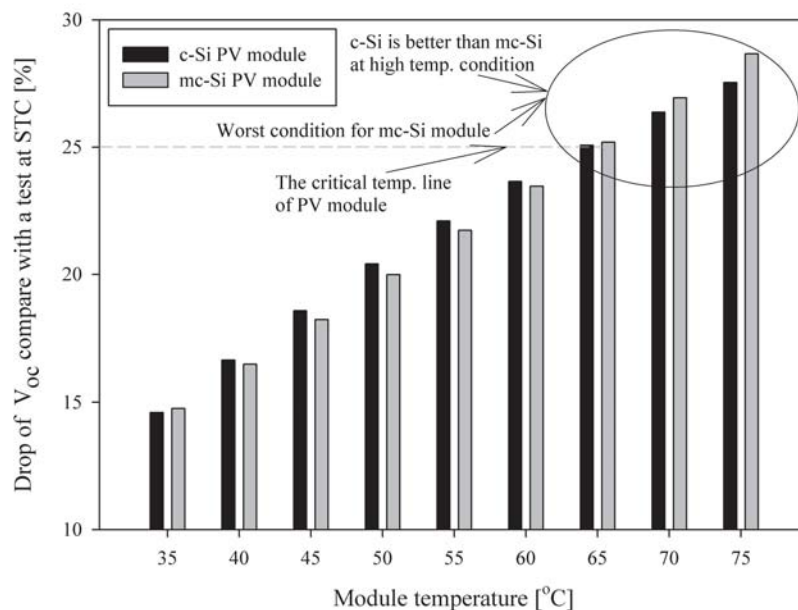
จะเห็นได้ว่า ในการใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นการลดลงของแรงดันไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการสะสมความร้อนจากการรับรังสีอาทิตย์ที่ไม่สามารถเปลี่ยนเป็นไฟฟ้าได้นั่นเอง ดังนั้น อุณหภูมิวิกฤติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขณะใช้งาน ที่ช่วยให้ทราบถึงขีดจำกัดของอุณหภูมิแผงเซลล์ที่จะส่งผลต่อการลดของแรงดันไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว จึงมีความสำคัญต่อการนำไปใช้ออกแบบและประยุกต์ใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นอุณหภูมิวิกฤติจึงกำหนดขึ้นโดยอาศัยพฤติกรรมของแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ รูปที่ 3.3 แสดงการกำหนดค่าอุณหภูมิวิกฤติสำหรับการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยทำการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของแผงเซลล์ชนิด c-Si และ mc-Si กับค่ามาตรฐานที่ทดสอบตามเงื่อนไข STC จากการศึกษาพบว่า อุณหภูมิวิกฤติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ คือ 65.0 องศาเซลเซียส เป็นค่าอุณหภูมิที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของแผงเซลล์ทั้งสองชนิด มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานถึงร้อยละ 25



รูปที่ 3.1: การเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิแผงและค่า V_{oc} ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด c-Si ในระหว่างทำการทดสอบ



รูปที่ 3.2: ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่า V_{oc} ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด c-Si และ mc-Si



รูปที่ 3.3: ร้อยละของการลดลงของค่า V_{oc} จากค่ามาตรฐานที่ STC

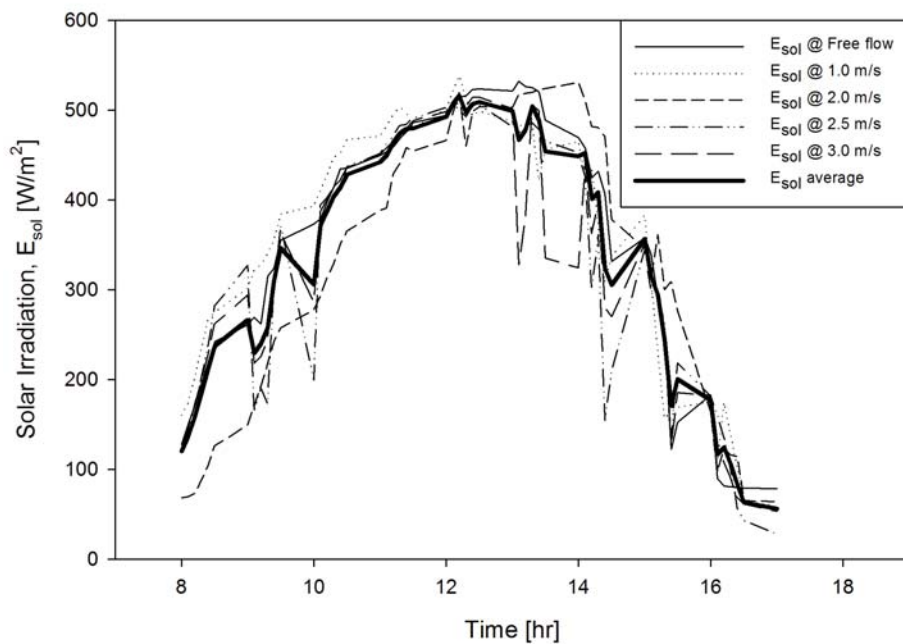
3.2 ผลการศึกษาการทำงานของแผง PV/T

เนื้อหาส่วนนี้เป็นรายงานผลการดำเนินการศึกษา เรื่อง การศึกษาเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ระหว่างครีบบระบายความร้อนแบบ UFS และแบบ NFS โดยผลการศึกษาล้างที่ได้ทำการเก็บข้อมูลค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ความเข้มรังสีอาทิตย์ (ดังแสดงในรูปที่ 3.4) ค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม และอุณหภูมิของครีบบระบายความร้อน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในการทดลองนั้น ได้ศึกษาเปรียบเทียบการระบายความร้อนของครีบบระบายความร้อนแบบ UFS และแบบ NFS ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกร่วมซิลิคอน โดยทำการเก็บข้อมูลการทำงานของครีบบระบายความร้อนแบบ UFS และแบบ NFS ที่ความเร็วลมต่าง ๆ กันในช่วงวันทำงานที่ต่อกัน โดยทำการศึกษาการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกร่วมซิลิคอน ที่ติดครีบบระบายความร้อนแบบ UFS และแบบ NFS ข้อมูลความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ ค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม และอุณหภูมิของครีบบระบายความร้อน ได้นำเสนอไว้ดังนี้

3.2.1 ความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อม

ข้อมูลรังสีอาทิตย์ระหว่างการทดสอบแต่ละกรณี แสดงดังรูปที่ 3.4 โดยข้อมูลเชิงตัวเลขแสดงไว้ในภาคผนวก หน้าที่ 64 จากรูปที่ 3.4 ค่าเฉลี่ยรังสีอาทิตย์รายวันในช่วงที่ทำการทดลอง มีค่าเท่ากับ 336.00 W/m^2 มีค่าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 518.24 W/m^2 โดยวันที่ทำการทดสอบการทำงานที่ความเร็วลม 2.0 เมตรต่อวินาที ท้องฟ้ามีเมฆประปรายในช่วงเช้า ส่วนวันที่ทำการทดสอบการทำงานที่ความเร็วลมเข้าแผง 2.5 เมตรต่อวินาที ท้องฟ้ามีเมฆในช่วงเช้า (9:00 - 10:00 นาฬิกา) และช่วงบ่าย (14:00-15:00 นาฬิกา)

ในส่วนของอุณหภูมิแวดล้อมในช่วงที่ทำการทดสอบ เพื่อเปรียบเทียบการทำงานของแผง



รูปที่ 3.4: ความเข้มรังสีอาทิตย์ในวันต่างๆ ที่ทำการเก็บข้อมูล

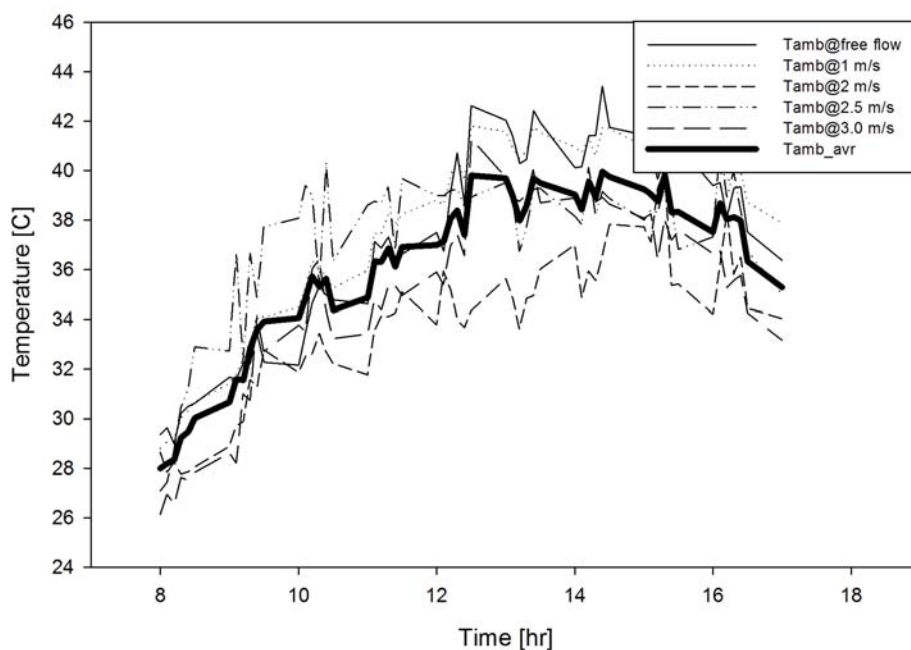
ทั้งสองรูปแบบ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.5 ข้อมูลเชิงตัวเลขแสดงไว้ในภาคผนวก หน้าที่ 66 โดยอุณหภูมิในช่วงเวลากลางวัน ระหว่างการทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงระหว่าง 27.0 ถึง 46.9 องศาเซลเซียส มีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับและอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 37.0 และ 40.7 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

3.2.2 อัตราการไหลของอากาศได้แฝง PV/T

ในการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบการทำงานของแผง PV/T ที่ทำการติดครีบบระบายความร้อนแบบ UFS และแบบ NFS ได้ดำเนินการทดสอบโดยกำหนดเงื่อนไขการไหลของอากาศ 5 รูปแบบด้วยกัน ได้แก่

- การไหลเวียนแบบอิสระ (free flow)
- การไหลเวียนแบบบังคับ ที่ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที
- การไหลเวียนแบบบังคับ ที่ความเร็วลม 2.0 เมตรต่อวินาที
- การไหลเวียนแบบบังคับ ที่ความเร็วลม 2.5 เมตรต่อวินาที
- การไหลเวียนแบบบังคับ ที่ความเร็วลม 3.0 เมตรต่อวินาที

โดยทำการศึกษาอัตราการไหลของอากาศเข้าและออกแผง PV/T แบบ UFS และ NFS ในแต่ละกรณีในหน่วย กิโลกรัมต่อวินาที (kg/s) แล้วหาค่าเฉลี่ยอัตราการไหลของอากาศได้แฝง PV/T แต่ละรูปแบบ โดยข้อมูลอัตราการไหลเฉลี่ยของอากาศได้แฝง PV/T แบบ UFS และ NFS ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.6 ข้อมูลเชิงตัวเลขแสดงไว้ในภาคผนวก หน้าที่ 68 ซึ่งอธิบายไว้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.5: อุณหภูมิแวดล้อมในวันต่างๆ ที่ทำการเก็บข้อมูล

1. การไหลเวียนแบบอิสระ (free flow) อัตราการไหลของอากาศที่เวียนแบบอิสระ ในแผง PV/T แบบ UFS และ NFS แสดงไว้ในรูปที่ 3.6 (a) โดยอัตราการไหลของอากาศในแผง PV/T ทั้งสองรูปแบบแปรผันตรงกับอุณหภูมิแวดล้อมและความเข้มรังสีอาทิตย์ โดยมีอัตราการไหลเฉลี่ยเท่ากับ 0.004 kg/s และ 0.005 kg/s สำหรับแผง PV/T แบบ UFS และ NFS ตามลำดับ
2. การไหลเวียนแบบบังคับ ที่ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที อัตราการไหลของอากาศที่เวียนในแผง PV/T แบบ UFS และ NFS แสดงไว้ในรูปที่ 3.6 (b) โดยอัตราการไหลของอากาศในแผง PV/T ทั้งสองรูปแบบค่อนข้างคงที่ โดยมีค่าเฉลี่ยของอัตราการไหลในแผง PV/T แบบ UFS และ NFS แปรผันตรงกับอุณหภูมิแวดล้อมและความเข้มรังสีอาทิตย์ โดยมีอัตราการไหลเฉลี่ยเท่ากับ 0.010 kg/s และ 0.035 kg/s
3. การไหลเวียนแบบบังคับ ที่ความเร็วลม 2.0 เมตรต่อวินาที อัตราการไหลของอากาศที่ไหลเวียนในแผง PV/T แบบ UFS และ NFS แสดงไว้ในรูปที่ 3.6 (c) โดยอัตราการไหลของอากาศในแผง PV/T ทั้งสองรูปแบบแปรผันตรงกับอุณหภูมิแวดล้อมและความเข้มรังสีอาทิตย์ โดยมีอัตราการไหลเฉลี่ยเท่ากับ 0.016 kg/s และ 0.048 kg/s สำหรับแผง PV/T แบบ UFS และ NFS ตามลำดับ
4. การไหลเวียนแบบบังคับ ที่ความเร็วลม 2.5 เมตรต่อวินาที อัตราการไหลของอากาศที่เวียนในแผง PV/T แบบ UFS และ NFS แสดงไว้ในรูปที่ 3.6 (d) โดยอัตราการไหลของอากาศในแผง PV/T ทั้งสองรูปแบบแปรผันตรงกับอุณหภูมิแวดล้อมและความเข้มรังสีอาทิตย์ โดยมีอัตราการไหลเฉลี่ยเท่ากับ 0.195 kg/s และ 0.055 kg/s

ความเร็วลมเข้าแผง ($\frac{m}{s}$)	ค่าเฉลี่ยอัตราการไหล แผง PV/T แบบ UFS ($\frac{kg}{s}$)	ค่าเฉลี่ยอัตราการไหล แผง PV/T แบบ NFS ($\frac{kg}{s}$)	ความแตกต่าง (%)
Free Flow	0.004	0.005	35.54
1.0	0.010	0.035	241.0
2.0	0.016	0.048	199.5
2.5	0.019	0.055	181.0
3.0	0.023	0.056	140.2
Average	0.015	0.040	159.4

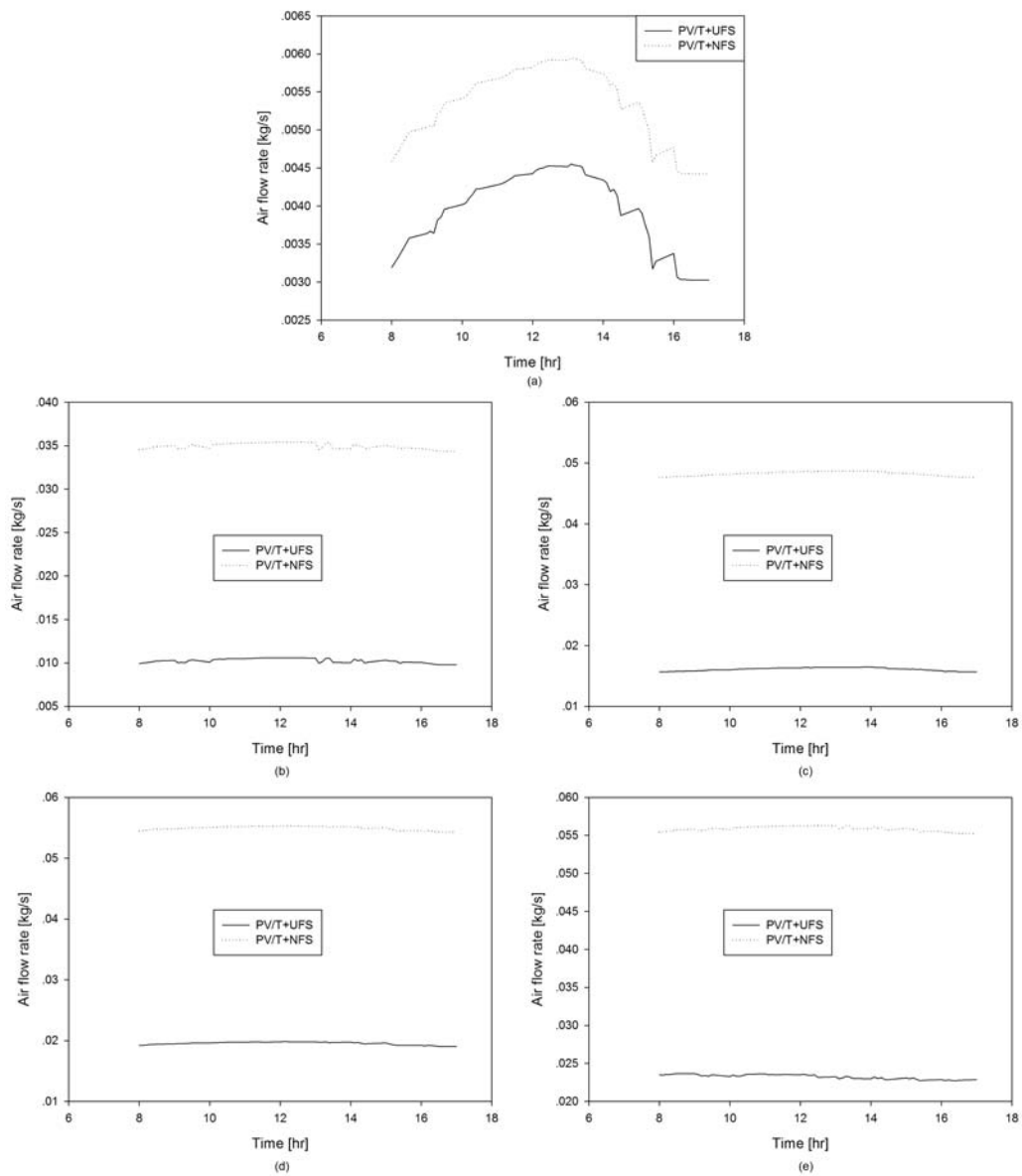
ตารางที่ 3.1: ค่าเฉลี่ยรายวันของอัตราการไหลของอากาศใต้แผง PV/T

5. การไหลเวียนแบบบังคับ ที่ความเร็วลม 3.0 เมตรต่อวินาที อัตราการไหลของอากาศที่เวียนในแผง PV/T แบบ UFS และ NFS แสดงไว้ในรูปที่ 3.6 (e) โดยอัตราการไหลของอากาศในแผง PV/T ทั้งสองรูปแบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.023 kg/s และ 1.129 kg/s สำหรับแผง PV/T แบบ UFS และ NFS ตามลำดับ

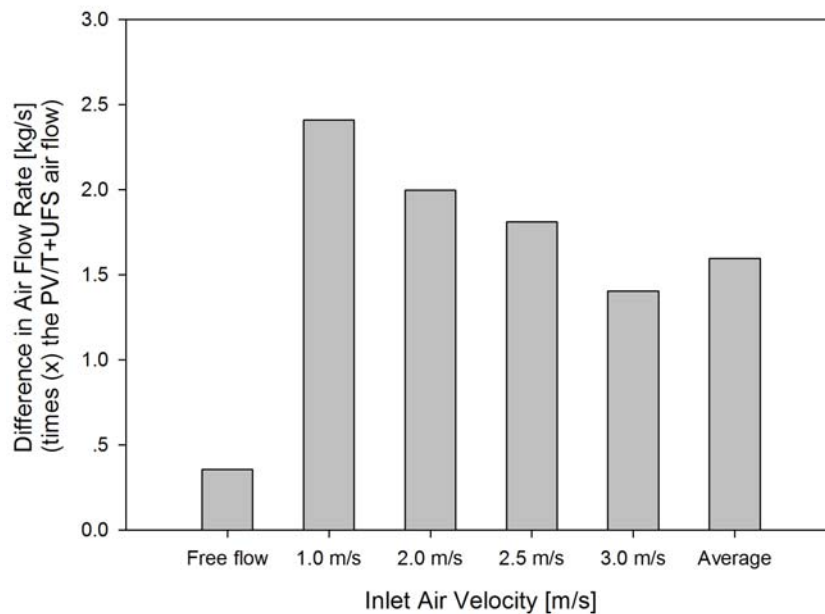
ตารางที่ 3.1 แสดงค่าเฉลี่ยรายวันของอัตราการไหลของอากาศใต้แผง PV/T ที่ติดตั้งระบายความร้อนแบบ UFS และ NFS ขณะทำการทดสอบที่เงื่อนไขความเร็วลมเข้าแผงต่างๆ กัน ข้อมูลในรูป 3.6 และตารางที่ 3.1 แสดงให้เห็นว่า แผง PV/T ที่ติดตั้งระบายความร้อนแบบ NFS ทำให้อัตราการไหลของอากาศใต้แผง สูงขึ้นกว่าแผง PV/T ที่ติดตั้งระบายความร้อนแบบ UFS ในทุกเงื่อนไขการทดสอบ โดยรูปที่ 3.7 แสดงความแตกต่างในอัตราการไหลเฉลี่ยของอากาศใต้แผง PV/T แบบ UFS และ NFS ที่ทำการทดสอบ ณ ความเร็วลมต่างๆ กัน โดยมีค่าเป็นจำนวนเท่าของอัตราการไหลเฉลี่ยของอากาศใต้แผง PV/T แบบ UFS ซึ่งผลการวิเคราะห์ดังกล่าวดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ร้อยละของความแตกต่างในอัตราการไหลเฉลี่ยของอากาศใต้แผง PV/T ทั้งสองแบบเกิดขึ้นมากที่สุด เมื่อทำการทดสอบที่ความเร็วลมเข้าแผงเท่ากับ 1.0 เมตรต่อวินาที โดยอัตราการไหลเฉลี่ยของอากาศใต้แผง PV/T แบบ NFS มีค่าสูงกว่าถึง 2.41 เท่า และมีค่าเฉลี่ยของความแตกต่าง อยู่ที่ 1.5 เท่า ความแตกต่างดังกล่าวจะลดลงเมื่อความเร็วของอากาศเข้าแผง PV/T มีค่าสูงขึ้น ข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า รูปแบบของครีบบระบายความร้อน ที่แตกต่างกันในสองลักษณะส่งผลต่อความแตกต่างของอัตราการไหลน้อยลง เมื่อความเร็วลมเข้าแผงมีค่ามากขึ้น

3.2.3 อุณหภูมิอากาศใต้แผง PV/T

ในส่วนของอุณหภูมิอากาศเข้าออกแผง PV/T ที่ติดตั้งระบายอากาศแบบ UFS และ NFS นั้น ได้แสดงข้อมูลการไว้ในรูปที่ 3.8 โดย รูป (a) (b) (c) (d) และ (e) คือข้อมูลอุณหภูมิอากาศเข้าออกแผง PV/T แบบ UFS และ NFS จากการทดสอบ ณ เงื่อนไขอัตราเร็วของอากาศเข้าแผงแบบอิสระ และแบบบังคับที่ 1.0 2.0 2.5 และ 3.0 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ โดยข้อมูลเชิงตัวเลขแสดงไว้ในภาคผนวก หน้า 72 เมื่อนำข้อมูลจากรูปที่ 3.8 ไปวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิอากาศเข้าและออกแผง PV/T แบบ UFS และ NFS กับความเร็วลมเข้าแผงต่างๆ กัน ทำให้ได้ผลของความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ซึ่งจากรูปดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า แผง PV/T ที่ติดตั้งระบายความร้อนแบบ NFS มีค่าอุณหภูมิอากาศออกแผง ต่ำกว่าแผง PV/T ที่ติดตั้งระบายความร้อนแบบ UFS ในทุกกรณี



รูปที่ 3.6: อัตราการไหลเฉลี่ยของอากาศใต้แผง PV/T ที่ทำการทดสอบ ณ อัตราเร็วของอากาศเข้าแผงที่การไหลแบบอิสระ (a) และแบบบังคับที่ 1.0 m/s (b) 2.0 m/s (c) 2.5 m/s (d) และ 3.0 m/s (e)

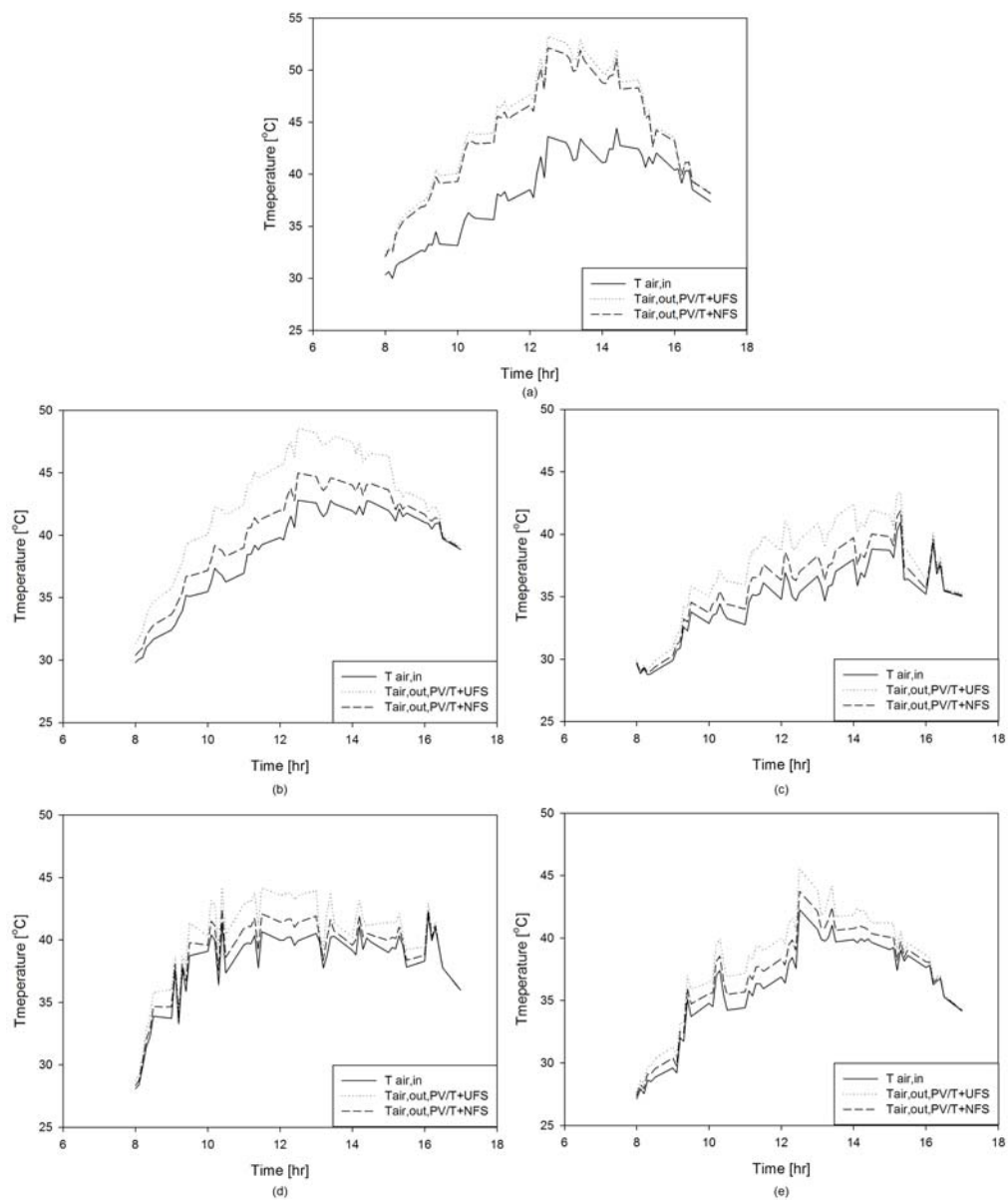


รูปที่ 3.7: ความแตกต่างในอัตราการไหลเฉลี่ยของอากาศใต้แผง PV/T ที่ทำการทดสอบ ณ ความเร็วลมเข้าแผงต่างๆ กัน

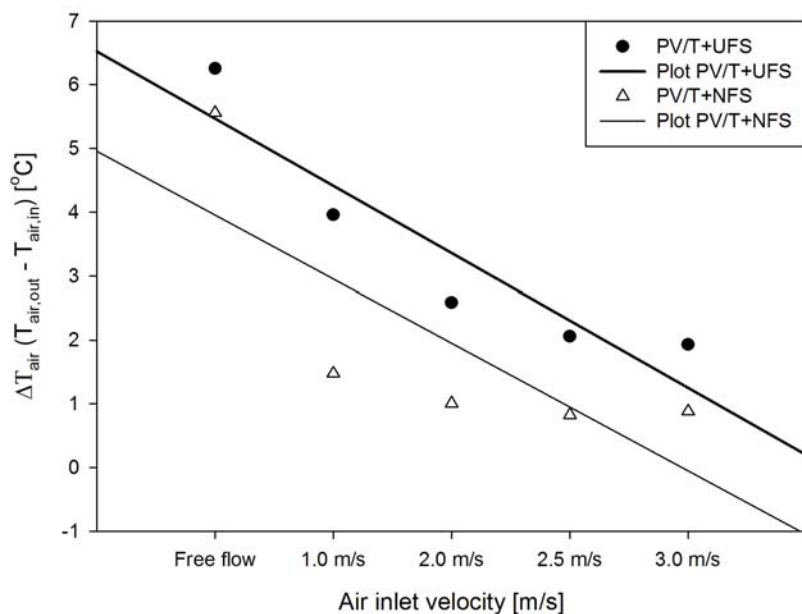
ความเร็วลมเข้าแผง ($\frac{m}{s}$)	ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิอากาศ แผง PV/T แบบ UFS ($^{\circ}C$)	ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิอากาศ แผง PV/T แบบ NFS ($^{\circ}C$)	ความแตกต่าง (%)
Free Flow	41.2	40.9	0.8
1.0	40.5	39.3	3.0
2.0	36.1	35.3	2.2
2.5	39.2	38.5	1.6
3.0	37.2	36.5	1.4
Average	38.8	38.1	1.8

ตารางที่ 3.2: ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิอากาศใต้แผง PV/T แบบ UFS และ NFS

นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิอากาศดังรูปที่ 3.9 แสดงให้เห็นว่า ที่เงื่อนไขการไหลของอากาศแบบอิสระ ผลต่างของอุณหภูมิอากาศเข้าออกแผง PV/T ที่ติดตั้งระบายความร้อนทั้งสองชนิด มีค่าสูงกว่าการทดสอบที่เงื่อนไขความเร็วลมอื่นๆ เนื่องจากโมเลกุลของอากาศใต้แผง เคลื่อนที่ช้า กว่าทุกกรณี (ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (a)) ทำให้มีเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และครีบบระบายความร้อนกับอากาศนานขึ้น เป็นผลให้อากาศออกจากแผงมีอุณหภูมิสูงกว่ากรณีอื่น นอกจากนี้ ตารางที่ 3.2 ซึ่งสรุปค่าเฉลี่ยอุณหภูมิอากาศใต้แผง PV/T แบบ UFS และ NFS จากการทดสอบที่ความเร็วลมเข้าแผงในแต่ละกรณี และรูปที่ 3.9 ยังแสดงให้เห็นอีกว่า ผลต่างอุณหภูมิอากาศเข้า-ออกแผง PV/T ทั้งสองรูปแบบ มีความแตกต่างกันมากที่สุด เมื่อทดสอบที่ความเร็วลมเข้าแผง 1.0 เมตรต่อวินาที โดยมีความแตกต่างกันสูงสุดที่ร้อยละ 3 ซึ่งผลต่างดังกล่าวมีแนวโน้มลดลง เมื่อความเร็วลมสูงขึ้นและต่ำลงกว่าค่าความเร็วลมเข้าแผงดังกล่าว



รูปที่ 3.8: อุณหภูมิอากาศเข้าและออกใต้แผง PV/T ที่ทำการทดสอบ ณ อัตราเร็วของอากาศเข้าแผงที่การไหลแบบอิสระ (a) และแบบบังคับที่ 1 m/s (b) 2 m/s (c) 2.5 m/s (d) และ 3.0 m/s (e)



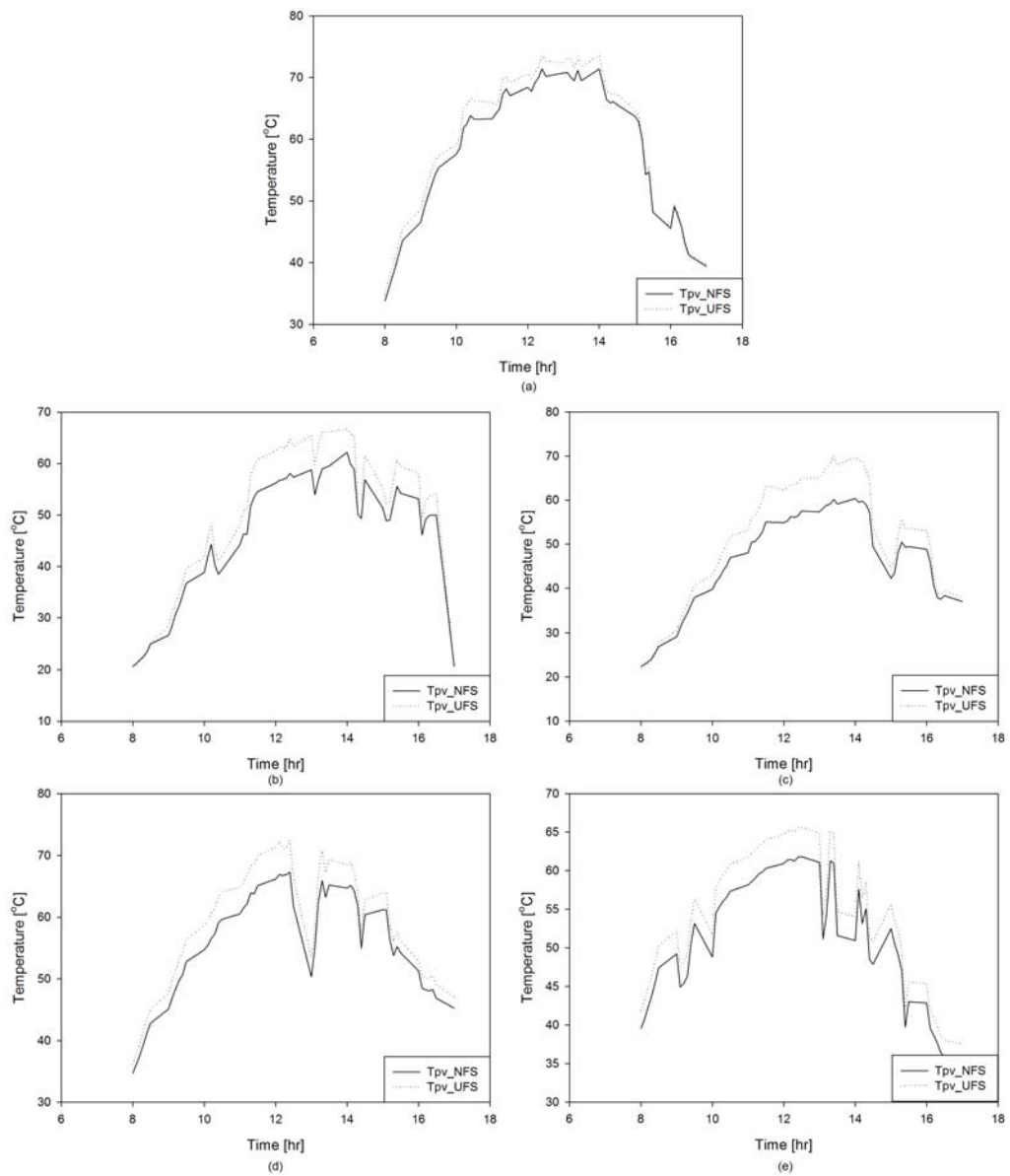
รูปที่ 3.9: ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิอากาศเข้าและออกแผง PV/T แบบ UFS และ NFS กับความเร็วลมเข้าแผงต่างๆ กัน

3.2.4 อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์

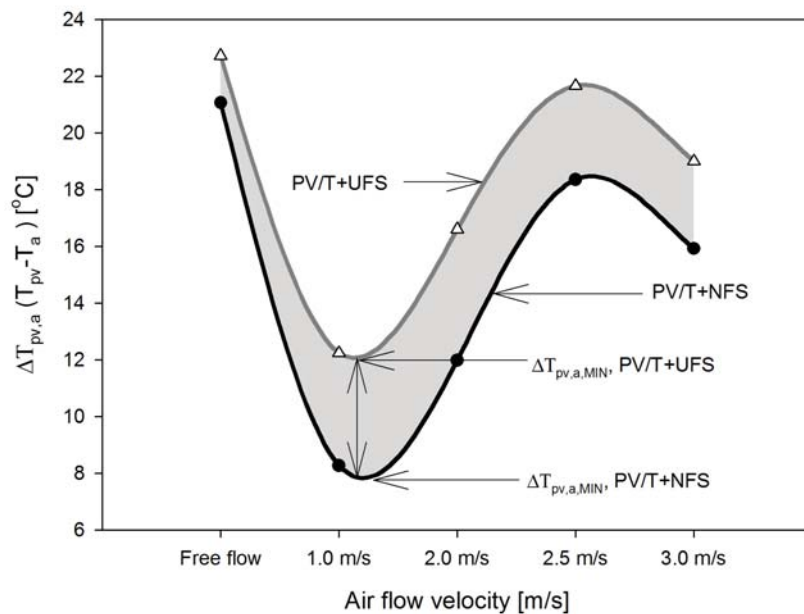
ข้อมูลการวัดอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้น เกิดจากการวัดข้อมูลอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสี่จำนวน 3 ตำแหน่งต่อแผงที่ทำการทำสอบ (บน กลาง และล่าง) แล้วทำการหาค่าเฉลี่ยอุณหภูมิแผง PV/T แบบ UFS และ NFS ค่าเฉลี่ยที่คำนวณได้ดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 3.10 โดยรูป (a) (b) (c) (d) และ (e) คือข้อมูลอัตราการไหลเฉลี่ยของอากาศใต้แผง PV/T แบบ UFS และ NFS ที่ได้จากการทดสอบ ณ เงื่อนไขอัตราเร็วของอากาศเข้าแผงแบบอิสระ และแบบบังคับที่ 1.0 2.0 2.5 และ 3.0 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ โดยข้อมูลเชิงตัวเลขแสดงไว้ในภาคผนวก หน้า 76

จากรูปที่ 3.10 แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์แปรผันตรงกับความเร็วลมเข้าแผง (โดยอุณหภูมิอากาศแวดล้อม T_a) โดยอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแผง PV/T แบบ UFS มีค่าสูงกว่าในแผง PV/T แบบ NFS ในทุกกรณีที่ทำการทดสอบ สำหรับการทดสอบที่ความเร็วลมเข้าแผงแบบอิสระ (รูปที่ 3.10 (a)) นั้น จะทำให้อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์สูงกว่าการทดสอบในกรณีอื่นๆ เนื่องจากอัตราการไหลของอากาศต่ำกว่าในทุกกรณี (รูปที่ 3.6) เป็นผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาต่ำ และทำให้ความร้อนสะสมบนแผงและอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ สูงกว่ากรณีอื่นๆ นั่นเอง

ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ว่ากรณีทดสอบใดทำให้อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแผง PV/T ต่ำที่สุด โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วอากาศไหลเข้าแผงกับผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์และค่าเฉลี่ย อุณหภูมิอากาศแวดล้อม ณ วันใดๆ ที่ทำการทดสอบ ซึ่งผลต่างที่น้อยหมายถึงอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิแวดล้อม นั่นคือการสะสมของความร้อนบนแผง น้อย และ อุณหภูมิแผงเซลล์เพิ่มขึ้นตามความเร็วลม



รูปที่ 3.10: การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ขณะทำการทดสอบ ณ อัตราเร็วของอากาศเข้าแผงที่การไหลแบบอิสระ (a) และแบบบังคับที่ 1 m/s (b) 2 m/s (c) 2.5 m/s (d) และ 3.0 m/s (e)



รูปที่ 3.11: ผลต่างของอุณหภูมิแผง PV/T แบบ UFS และ NFS ที่ ความเร็วลมเข้าแผงต่างๆ กัน

ความเร็วลมเข้าแผง ($\frac{m}{s}$)	ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิแผง PV แผง PV/T แบบ UFS ($^{\circ}C$)	ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิแผง PV แผง PV/T แบบ NFS ($^{\circ}C$)	ความแตกต่าง (%)
Free Flow	59.8	58.2	2.8
1.0	49.8	45.8	8.0
2.0	50.4	45.8	9.0
2.5	58.8	55.5	5.6
3.0	54.0	51.0	5.7
Average	54.6	51.2	6.2

ตารางที่ 3.3: ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแผง PV/T แบบ UFS และ NFS

อาทิตย์น้อยนั่นเอง ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 3.11 โดยจากรูปจะเห็นได้ว่า ความเร็วอากาศเข้าแผง PV/T ทั้งสองแบบที่ 1.0 เมตรต่อวินาที ทำให้ผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์และค่าเฉลี่ยอุณหภูมิอากาศแวดล้อม ต่ำกว่ากรณีทดสอบอื่นๆ แสดงว่าความเร็วลมเข้าแผง PV/T ในกรณีทดสอบดังกล่าวทำให้อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนแปลงในทิศทางที่เพิ่มขึ้นน้อยที่สุด

ตารางที่ 3.3 ซึ่งแสดงค่าเฉลี่ยอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแผง PV/T แบบ UFS และ NFS ในกรณีต่างๆ และรูปที่ 3.11 ต่างแสดงให้เห็นว่า ที่ความเร็วลมเข้าแผง ระหว่าง 1.0 - 2.0 เมตรต่อวินาที ทำให้อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในแผง PV/T แบบ NFS แตกต่างจากแผง PV/T แบบ UFS มากที่สุด โดยมีความแตกต่างระหว่างร้อยละ 8 - 9 โดยกรณีความเร็วลมเข้าแผงที่เพิ่มมากขึ้นในแผง PV/T ทั้งสองแบบ ไม่ได้ทำให้อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญ

จากการวิเคราะห์ข้อมูลอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแผง PV/T ที่ติดครีบบระบายความ

Inlet Air flow ($\frac{m}{s}$)	PV/T+UFS V_{oc} [V]	PV/T+UFS I_{sc} [A]	PV/T+NFS V_{oc} [V]	PV/T+NFS I_{sc} [A]	dV_{oc} (%)	dI_{sc} (%)
Free Flow	17.58	1.85	17.58	1.85	0.0	0.0
1.0	17.66	1.92	17.83	1.95	0.95	1.83
2.0	18.08	1.72	18.27	1.74	1.03	0.98
2.5	18.13	1.78	18.28	1.82	0.81	2.34
3.0	18.12	1.75	18.25	1.78	0.70	1.67
Average	17.91	1.79	18.04	1.82	0.70	1.36

ตารางที่ 3.4: ค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและกระแสไฟฟ้าวงจรปิดของ PV/T แบบ UFS และ NFS ที่เงื่อนไขความเร็วลมเข้าแผงในการทดสอบต่างๆ กัน

ร้อนทั้งสองรูปแบบพบว่า อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแผง PV/T แบบ NFS มีอุณหภูมิขณะทำงานต่ำกว่าที่พบในแผง PV/T แบบ UFS ที่สภาวะการทำงานเดียวกัน โดยเฉพาะขณะใช้งานที่ความเร็วลมเข้าแผงระหว่าง 1.0 - 2.0 เมตรต่อวินาที สามารถทำให้อุณหภูมิแผงมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤติ คือ 65 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิวิกฤติได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.1 หน้า 33) นอกจากการสำรวจในแง่ของอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์แล้ว ยังได้ดำเนินการศึกษาในแง่ของประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ประสิทธิภาพทางความร้อน และประสิทธิภาพทางความร้อนรวม ซึ่งอธิบายไว้ต่อไปนี้

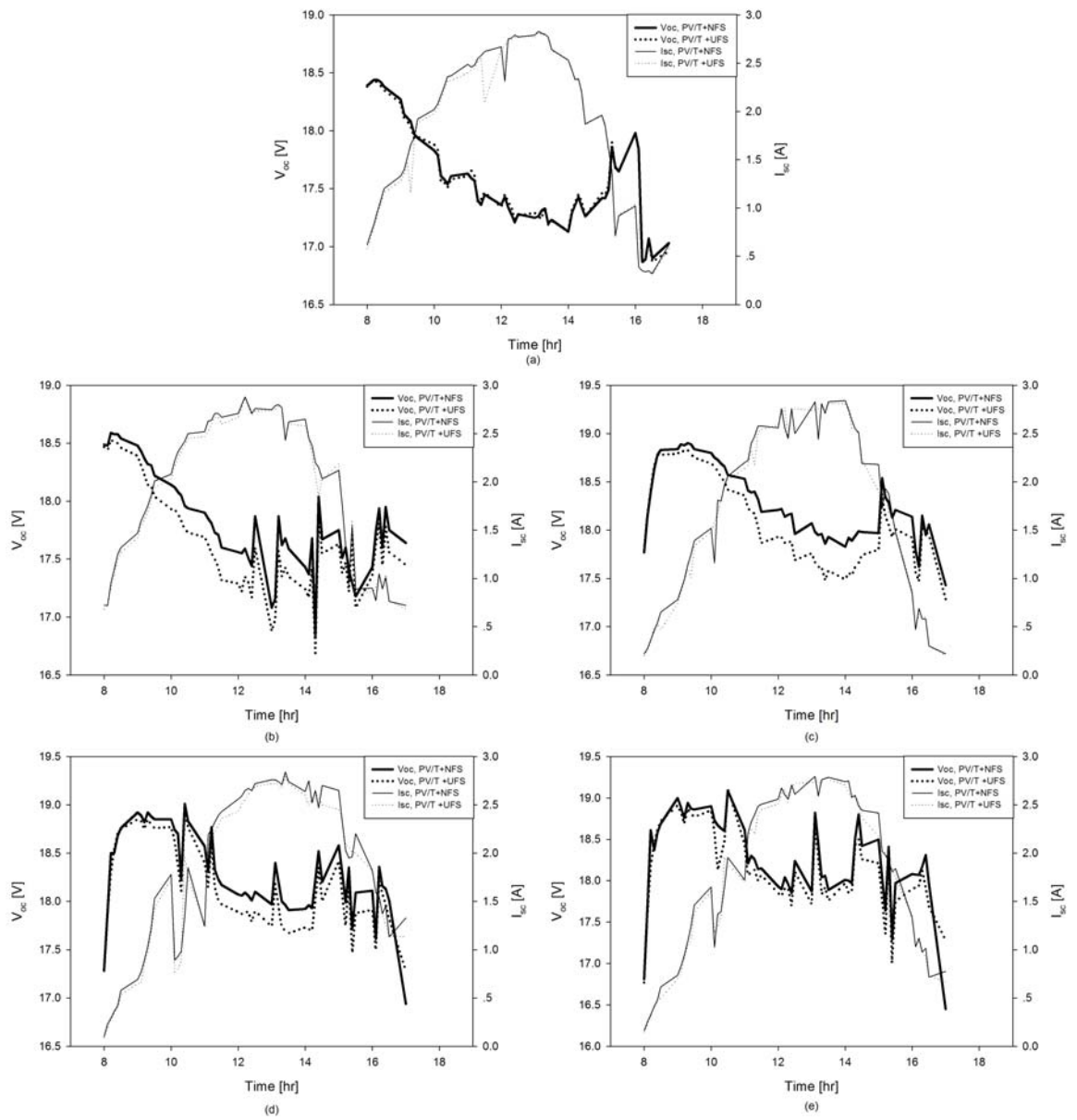
3.2.5 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

การศึกษาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (open-circuit voltage, V_{oc}) และกระแสไฟฟ้าวงจรปิด (short-circuit current, I_{sc}) ของแผง PV/T แบบ UFS และ NFS นั้น ได้ดำเนินการโดยการวัดค่าดังกล่าว ขณะทำการทดสอบที่เงื่อนไขความเร็วลมเข้าแผง PV/T ต่างๆ กัน (ดังอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.2.2 หน้า 36) ค่า V_{oc} และ I_{sc} ที่วัดได้ในแต่ละกรณี แสดงไว้ในรูปที่ 3.12 โดยรูปดังกล่าว แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าวงจรปิดและแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดที่มีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างวัน ขณะทำการทดสอบในแต่ละกรณี โดยกระแสไฟฟ้าวงจรปิด มีการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มรังสีอาทิตย์ ส่วนแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด มีการเปลี่ยนแปลงในทางตรงกันข้าม นอกจากนี้ จากรูปดังกล่าวยังแสดงให้เห็นว่า การทำงานของแผง PV/T แบบ UFS และ NFS ที่ความเร็วลมเข้าแผงแบบอิสระ ไม่ทำให้เกิดความแตกต่างของค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและกระแสไฟฟ้าวงจรปิดระหว่างแผง PV/T ทั้งสองรูปแบบแต่อย่างใด

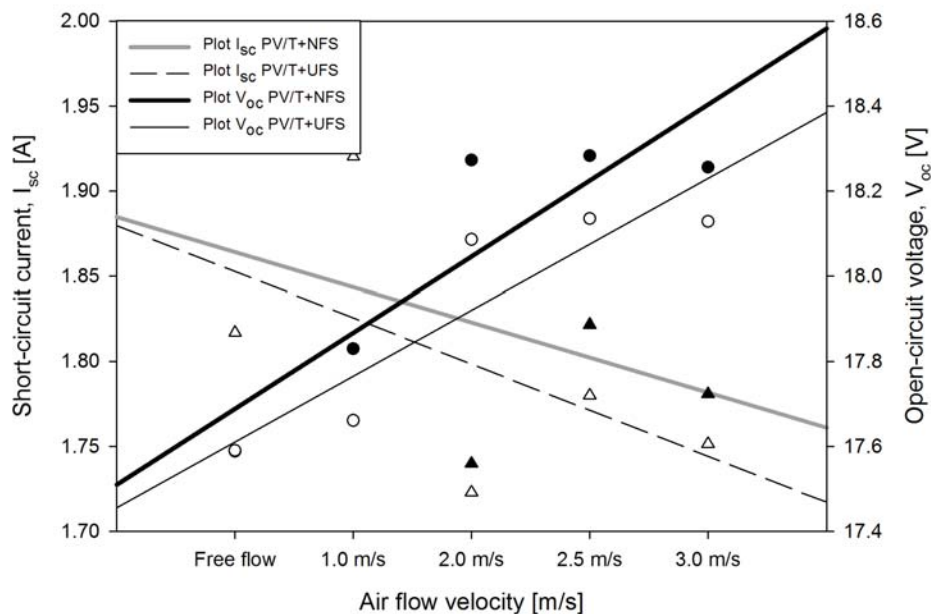
รูปที่ 3.13 แสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่า V_{oc} และ I_{sc} ที่เงื่อนไขการทดสอบต่างๆ ของแผง PV/T แบบ UFS และ NFS จากรูปแสดงให้เห็นว่า แผง PV/T แบบ NFS สามารถให้ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด และกระแสไฟฟ้าวงจรปิด สูงกว่าแผง PV/T แบบ UFS ในทุกเงื่อนไขของการทดสอบ

อย่างไรก็ดี ตารางที่ 3.4 แสดงให้เห็นว่าความแตกต่างของค่าทางไฟฟ้างกล่าวมีค่าน้อยมาก โดยเฉพาะกรณีทดสอบที่การไหลของอากาศเข้าแผงแบบอิสระนั้น ค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้างกล่าวไม่มีความแตกต่างกันแต่อย่างใด ความแตกต่างของค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้ามีความชัดเจนขึ้นเพียงเล็กน้อยที่เงื่อนไขความเร็วลมเข้าแผงเท่ากับ 1.0 - 2.5 เมตรต่อวินาที

จากการศึกษาเปรียบเทียบข้อมูลทางค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ได้จากแผง PV/T แบบ UFS และ NFS อันได้แก่ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด และค่ากระแสไฟฟ้าวงจรปิด พบว่า แผง PV/T แบบ NFS ที่พัฒนาขึ้น ไม่ได้ทำให้เกิดความแตกต่างของค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้างกล่าว อย่างมี



รูปที่ 3.12: แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดจากการทดสอบที่เงื่อนไขต่างๆ



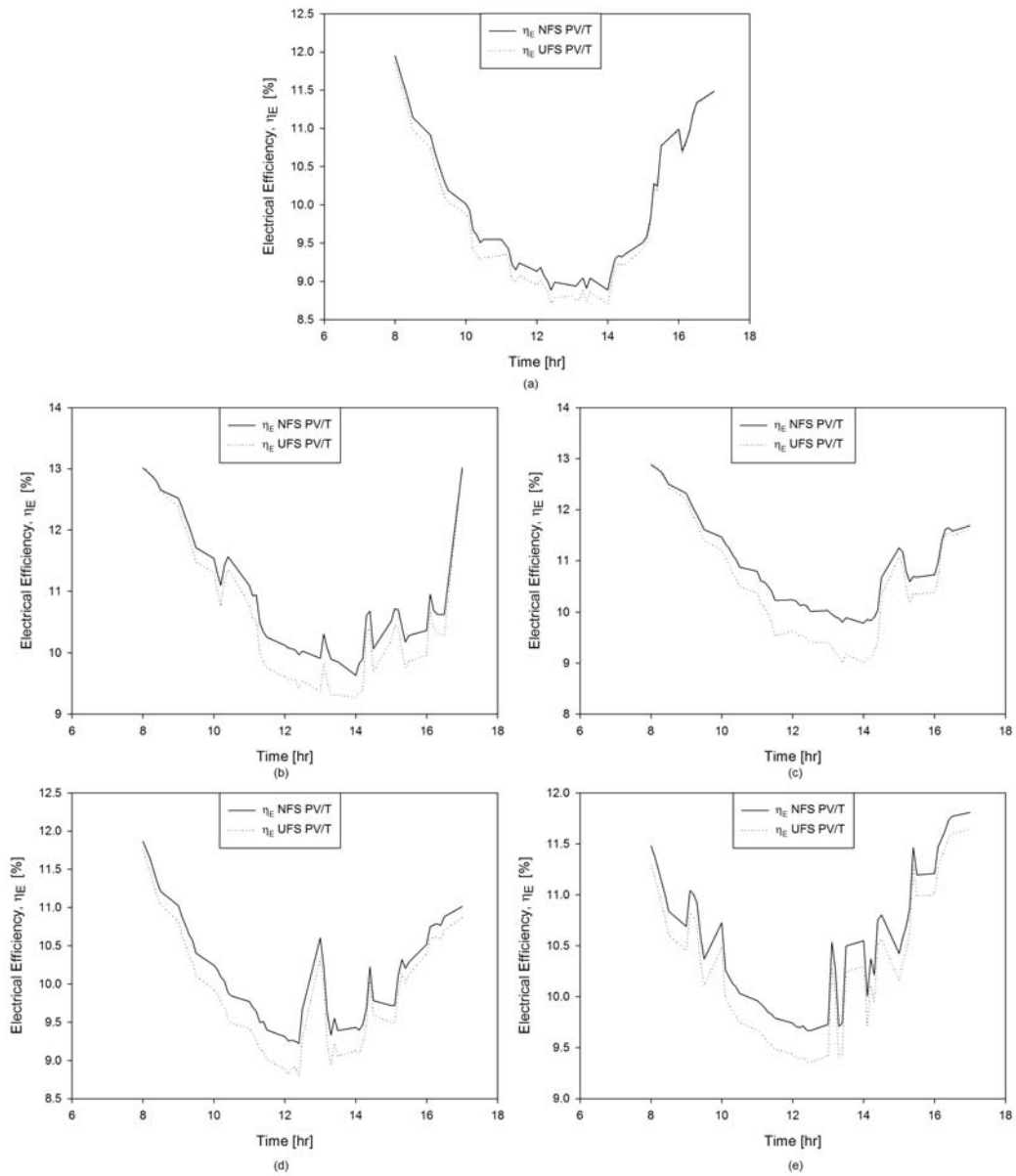
รูปที่ 3.13: แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่า V_{oc} และ I_{sc} เฉลี่ย ที่เงื่อนไขการทดสอบต่างๆ ของแผง PV/T แบบ UFS และ NFS

นัยสำคัญแต่อย่างใด อย่างไรก็ตามความเร็วลมเข้าแผงที่ทำให้เกิดความแตกต่างกัน พบอยู่ในช่วง 1.0 -2.5 เมตรต่อวินาที การวิเคราะห์ในแง่ของประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ได้อธิบายไว้ดังต่อไปนี้

3.2.6 ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV/T

ในการประเมินประสิทธิภาพทางไฟฟ้า เพื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างแผง PV/T แบบ UFS และ NFS นั้นได้อาศัยสมการ 2.38 ในหน้า 25 ในการประเมินค่าประสิทธิภาพในการทำงานของแผง PV/T ทั้งสองรูปแบบ ซึ่งเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ T_{pv} ที่ได้จากการวัดในการทดสอบในแต่ละกรณี ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.10 หน้า 43 ผลจากการประเมินหาค่าประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากแผง PV/T ทั้งสองรูปแบบ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.14 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพตามเวลาในระหว่างวัน ขณะทำการทดสอบ ณ อัตราเร็วของอากาศเข้าแผงแต่ละกรณี จากรูปแสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่ตรงกันข้ามกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่ออุณหภูมิแผงสูงขึ้นในช่วงเวลากลางวัน (ดังรูปที่ 3.10 หน้า 43) ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในแผง PV/T ทั้งสองกรณีกลับลดต่ำลง รูปที่ 3.14 ยังแสดงให้เห็นอีกว่า การพัฒนารูปแบบของครีบบระบายความร้อนให้เป็นแบบ NFS นั้นได้ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในทุกกรณีที่ทำการศึกษา

โดยความแตกต่างดังกล่าว ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.5 ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพเฉลี่ย รวมทั้งร้อยละของความแตกต่างของประสิทธิภาพของแผง PV/T แบบ UFS และ NFS ที่ทำการทดสอบในแต่ละกรณี ตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า แผง PV/T แบบ NFS ให้ประสิทธิภาพเฉลี่ยสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 10.96 ซึ่งเกิดขึ้นที่ความเร็วลมเข้าแผงเท่ากับ 1.0 และ 2.0 เมตรต่อ



รูปที่ 3.14: การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV/T แบบ NFS และ UFS ขณะทำการทดสอบ ณ อัตราเร็วของอากาศเข้าแผงที่การไหลแบบอิสระ (a) และแบบบังคับที่ 1 m/s (b) 2 m/s (c) 2.5 m/s (d) และ 3.0 m/s (e)

ความเร็วลม ($\frac{m}{s}$)	PV/T+UFS ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า, η_E , (%)	PV/T+NFS ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า, η_E (%)	$d\eta_E$ (%)
Free Flow	9.82	9.96	1.37
1.0	10.64	10.96	3.03
2.0	10.59	10.96	3.54
2.5	9.91	10.17	2.71
3.0	10.29	10.54	2.43
Average	10.25	10.52	2.62

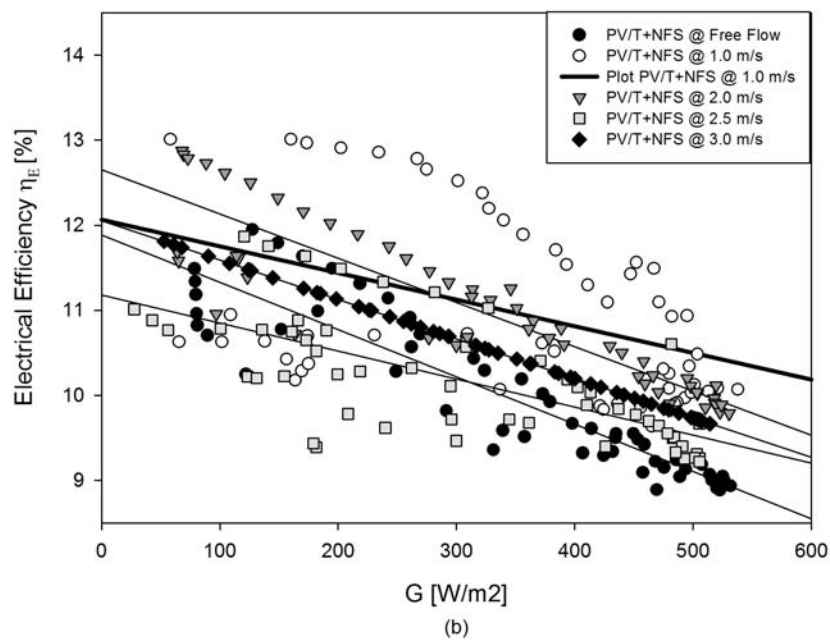
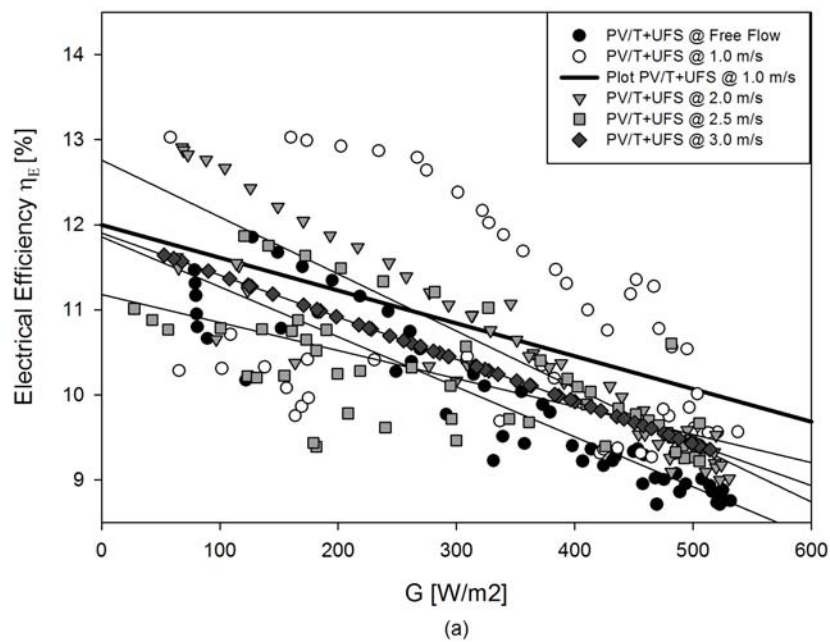
ตารางที่ 3.5: ค่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเฉลี่ยของแผง PV/T แบบ UFS และ NFS ที่เงื่อนไขความเร็วลมเข้าแผงในการทดสอบต่างๆ กัน

วินาที นอกจากนี้ ตารางดังกล่าวยังแสดงให้เห็นอีกว่า เมื่อกำหนดให้ความเร็วลมเข้าแผงเท่ากับ 2.0 เมตรต่อวินาที ประสิทธิภาพของแผง PV/T แบบ NFS จะแตกต่างจากแบบ UFS มากที่สุด โดยมีความแตกต่างเท่ากับร้อยละ 3.54

อย่างไรก็ดี การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกบนแผง PV/T ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ทำให้การพิจารณาว่าแผง PV/T ทำงานที่ความเร็วอากาศเข้าแผงกรณีใด ที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแผง น้อยที่สุด สามารถทำได้ง่ายขึ้น โดยพิจารณารูปกราฟ (a) และ (b) ซึ่งเป็นกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV/T แบบ UFS และ NFS ตามลำดับ โดยถึงแม้ค่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ความเร็วลม 1.0 และ 2.0 เมตรต่อวินาที ในตารางที่ 3.5 จะมีค่าเท่ากัน แต่จากรูปที่ 3.15 แสดงให้เห็นว่า ในช่วงที่ความเข้มรังสีอาทิตย์สูงๆ นั้น การทำงานของแผง PV/T แบบ UFS และ NFS ที่ความเร็วอากาศเข้าแผง เท่ากับ 1.0 เมตรต่อวินาที จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพทางไฟฟ้าในทิศทางที่ลดลงน้อยที่สุด (สังเกตจากเส้นทึบในกราฟรูป (a) และ (b)) โดยเมื่อเปรียบเทียบเส้นแนวโน้มประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV/T ที่ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที รูป (a) เทียบกับรูป (b) พบว่าเส้นในแนวโน้มรูป (b) มีค่าประสิทธิภาพที่ความเข้มรังสีอาทิตย์ต่างๆ สูงกว่ารูป (a) แสดงให้เห็นว่ารูปแบบของแผง PV/T แบบ NFS ให้ผลทางด้านประสิทธิภาพทางไฟฟ้าสูงกว่ารูปทรงแบบ UFS เดิม ถึงแม้ความแตกต่างทางประสิทธิภาพไฟฟ้าดังกล่าวจะไม่มีัยสำคัญทางสถิติก็ตาม

3.2.7 ประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง PV/T

ในแง่ของการเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง PV/T แบบ UFS และ NFS นั้น ได้นำเอาข้อมูลอัตราการไหลของอากาศ และอุณหภูมิอากาศเข้าและออกแผง PV/T ทั้งสองแบบ มาใช้ในการประเมินค่าดังกล่าว โดยค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการคำนวณในแต่ละเงื่อนไขของการทดสอบได้แสดงไว้ ในรูปที่ 3.16 โดยรูป (a) (b) (c) (d) และ (e) คือการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง PV/T แบบ NFS และ UFS ขณะทำการทดสอบ ณ อัตราเร็วอากาศเข้าแผงแบบอิสระ และแบบบังคับที่ 1.0 2.0 2.5 และ 3.0 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ โดยจากรูปแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพทางความร้อนมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของความเข้มรังสีอาทิตย์ โดยประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง PV/T แบบ NFS มีค่าสูงกว่าแผง PV/T แบบ UFS ในทุกกรณีของการทดสอบ และความแตกต่างของประสิทธิภาพทางความร้อนระหว่างแผง PV/T แบบ UFS และ NFS จะลดลงเมื่อความเร็วลม



รูปที่ 3.15: การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV/T แบบ UFS (a) และ NFS (b) ที่ความเร็วลมใดๆ ต่อความเข้มรังสีอาทิตย์

ความเร็วลม ($\frac{m}{s}$)	PV/T+UFS ประสิทธิภาพความร้อน η_{TH} , (%)	PV/T+NFS ประสิทธิภาพความร้อน η_{TH} (%)	$d\eta_{TH}$ (%)
Free Flow	18.15	21.80	20.08
1.0	29.20	37.01	26.80
2.0	31.44	36.47	16.00
2.5	32.65	36.80	12.68
3.0	34.37	37.67	9.58
Average	29.16	33.95	17.02

ตารางที่ 3.6: ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนเฉลี่ยของแผง PV/T แบบ UFS และ NFS ที่เงื่อนไขความเร็วลมเข้าแผงต่างๆ กัน

เข้าแผงมีค่าสูงขึ้น

นอกจากนี้ รูปที่ 3.17 ยังแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางความร้อนต่อค่า $\Delta T/G$ ของแผง PV/T แบบ NFS และ UFS ขณะทำการทดสอบ ณ อัตราเร็วของอากาศเข้าแผงต่างๆ กัน โดยรูป (a) และ (b) คือกรณีของแผง PV/T แบบ UFS และ NFS ตามลำดับ โดยข้อมูลจากรูป (a) แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง PV/T แบบ UFS เพิ่มขึ้นตามความเร็วลมเข้าแผงที่เพิ่มขึ้น โดยที่ความเร็วลมเข้าแผง 3.0 เมตรต่อวินาที ทำให้ประสิทธิภาพของแผงดีที่สุด ทั้งขณะทำงานในช่วงความเข้มรังสีอาทิตย์สูงและต่ำ

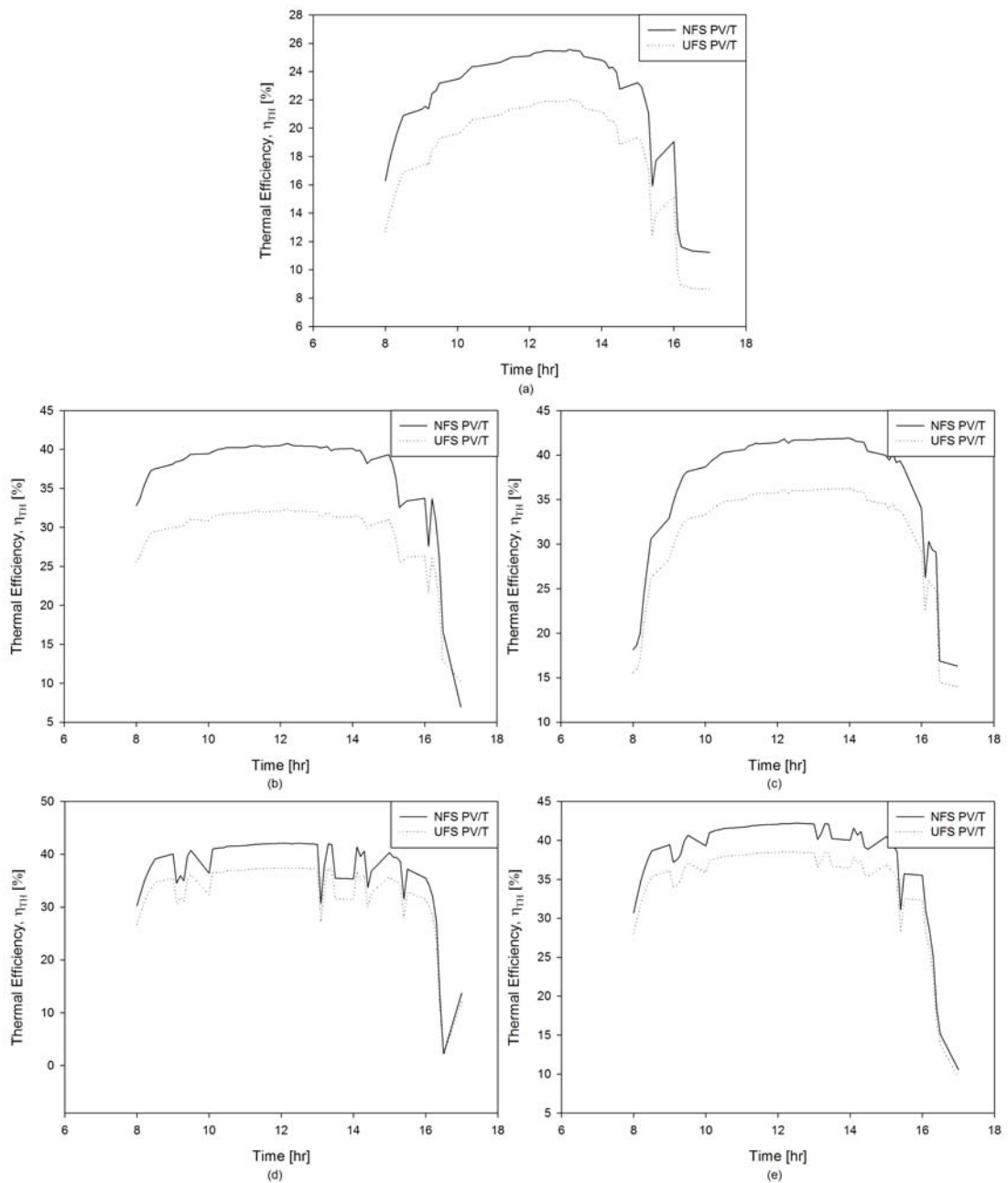
ในส่วนของ แผง PV/T แบบ NFS (รูป (a)) นั้น ในช่วงความเข้มรังสีอาทิตย์สูง ($\Delta T/G < 0.01 \text{ } ^\circ C m^2/W$) ความเร็วลมเข้าแผงที่ 1.0 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป ประสิทธิภาพทางความร้อนของแผงแตกต่างกันน้อยมาก ส่วนความเร็วลมเข้าแผง ที่ทำให้แผง PV/T แบบ NFS ทำงานได้ดีทั้งในช่วงความเข้มรังสีอาทิตย์สูงและต่ำได้แก่ค่าความเร็วลมเข้าแผงที่ 2.0 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 3.6 แสดงค่าประสิทธิภาพทางความร้อนเฉลี่ยของแผง PV/T แบบ UFS และ NFS ที่เงื่อนไขความเร็วลมเข้าแผงในการทดสอบต่างๆ กัน โดยตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง PV/T ทั้งสองแบบ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเร็วลมที่เข้าแผง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของแผง PV/T แบบ UFS นั้นประสิทธิภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้นตามความเร็วลมเข้าแผงอย่างชัดเจน เนื่องจากอัตราการไหลของอากาศร้อนได้แผงเพิ่มขึ้น ทำให้การดึงเอาความร้อนสะสมในแผง PV/T ไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น อันเป็นผลทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผง PV/T ทั้งสองแบบมีความแตกต่างกันน้อยลง เมื่อทำการทดสอบที่ความเร็วลมเข้าแผงสูงๆ นั่นเอง

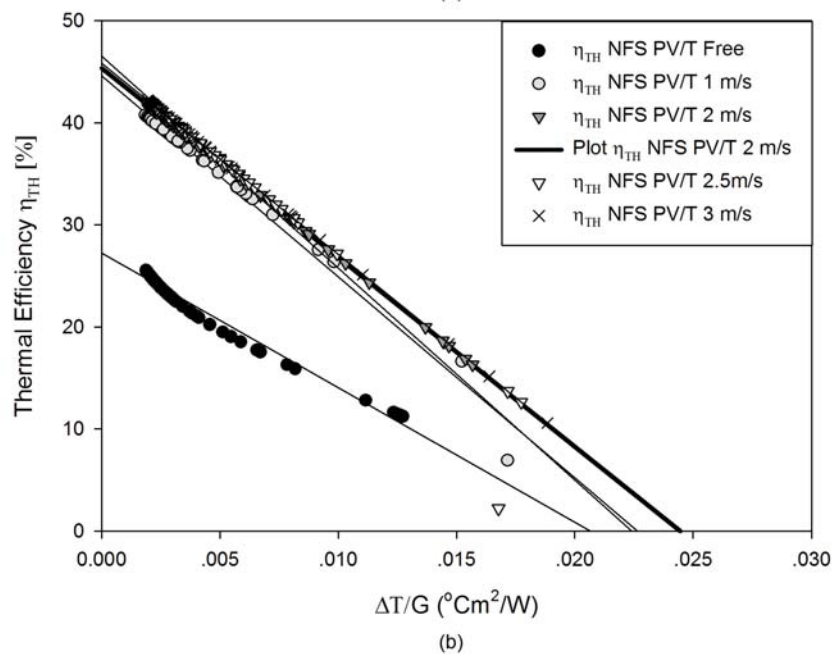
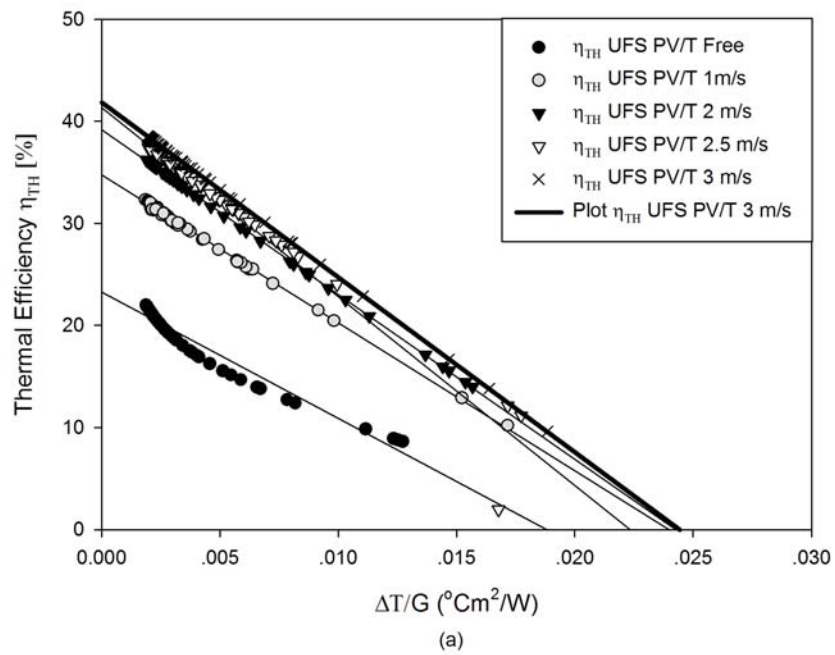
ข้อมูลในตารางที่ 3.6 ยังแสดงให้เห็นว่า การใช้แผง PV/T แบบ NFS ทดแทน แผง PV/T แบบ UFS ที่ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที จะมีความเหมาะสมที่สุด เพราะที่ความเร็วลมดังกล่าวทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผง PV/T แบบ NFS สูงกว่าแบบ UFS ถึงร้อยละ 26.80 โดยค่าประสิทธิภาพทางความร้อนเฉลี่ยรวมจากการทดสอบในแต่ละกรณี มีค่าเท่ากับร้อยละ 29.16 และ 33.95 สำหรับแผง PV/T แบบ UFS และ NFS ตามลำดับ โดยแผง PV/T แบบ NFS มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยสูงกว่าร้อยละ 17.0

3.2.8 ประสิทธิภาพทางความร้อนรวมของแผง PV/T

จากการศึกษาเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ประสิทธิภาพทางความร้อน ของแผง PV/T แบบ UFS และ NFS ที่ค่าความเร็วลมเข้าแผงค่าต่างๆ กัน จะเห็นว่าแผง PV/T แบบ NFS สามารถให้ค่าประสิทธิภาพทั้งสองด้านดังกล่าวสูงกว่าแผง PV/T แบบ UFS ในทุกกรณี เนื้อหา



รูปที่ 3.16: การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง PV/T แบบ NFS และ UFS ขณะทำการทดสอบ ณ อัตราเร็วของอากาศเข้าแผงที่การไหลแบบอิสระ (a) และแบบบังคับที่ 1 m/s (b) 2 m/s (c) 2.5 m/s(d) และ 3.0 m/s (e)



รูปที่ 3.17: การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางความร้อน ต่อค่า $\Delta T/G$ ของแผง PV/T แบบ NFS และ UFS ขณะทำการทดสอบ ณ อัตราเร็วของอากาศเข้าแผงต่างๆ กัน

ความเร็วลม ($\frac{m}{s}$)	ประสิทธิภาพความร้อนรวม $\eta_{O,TH}$, (%), PV/T+UFS	ประสิทธิภาพความร้อนรวม $\eta_{O,TH}$ (%), PV/T+NFS	$d\eta_{O,TH}$ (%)
Free Flow	44.00	48.00	8.33
1.0	57.20	65.88	13.18
2.0	59.31	65.33	9.21
2.5	58.73	63.58	7.62
3.0	61.47	65.43	6.04
Average	56.14	61.65	8.88

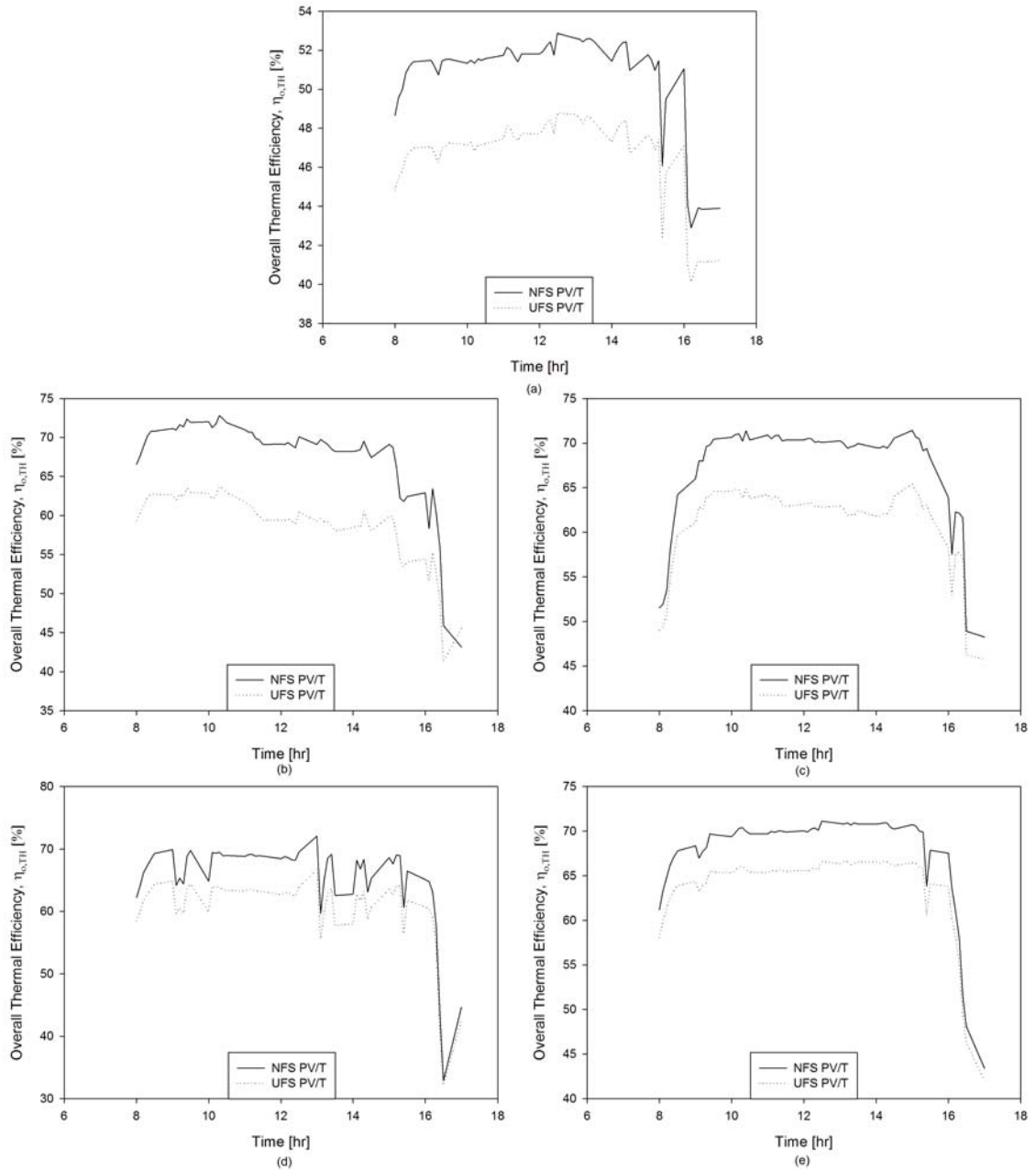
ตารางที่ 3.7: ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนรวมเฉลี่ยของแผง PV/T แบบ UFS และ NFS ที่เงื่อนไขความเร็วลมเข้าแผงในการทดสอบต่างๆ กัน

ในส่วนนี้นำเสนอในส่วนของภาพรวมของประสิทธิภาพการทำงานของแผง PV/T ทั้งสองรูปแบบ โดยนำเสนอในรูปของประสิทธิภาพทางความร้อนรวม ($\eta_{O,TH}$) ของแผง จากการดำเนินงานภายใต้เงื่อนไขการทดสอบในแต่ละกรณี โดยคำนวณจากผลรวมระหว่างประสิทธิภาพทางไฟฟ้ารวมกับค่าประสิทธิภาพทางความร้อน (ดังสมการที่ 2.41 หน้าที่ 26) ข้อมูลประสิทธิภาพทางความร้อนรวมของแผง PV/T ทั้งสองแบบ ที่ทำการทดสอบในแต่ละกรณีแสดงไว้ในรูปที่ 3.18 โดยรูป (a) (b) (c) (d) และ (e) คือการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง PV/T แบบ NFS และ UFS ขณะทำการทดสอบ ณ อัตราเร็วของอากาศเข้าแผงที่การแบบอิสระ และแบบบังคับที่ 1.0 2.0 2.5 และ 3.0 เมตรต่อวินาทีตามลำดับโดยจากรูปจะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง PV/T แบบ NFS มีค่าสูงกว่าแผง PV/T แบบ UFS ในทุกกรณี โดยความแตกต่างมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วลมเข้าแผงมีค่าสูงขึ้น

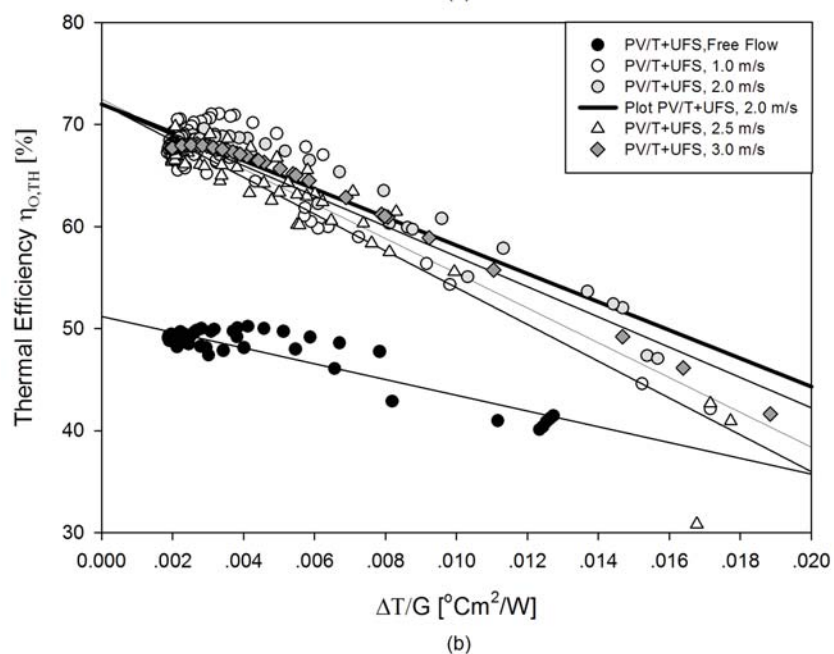
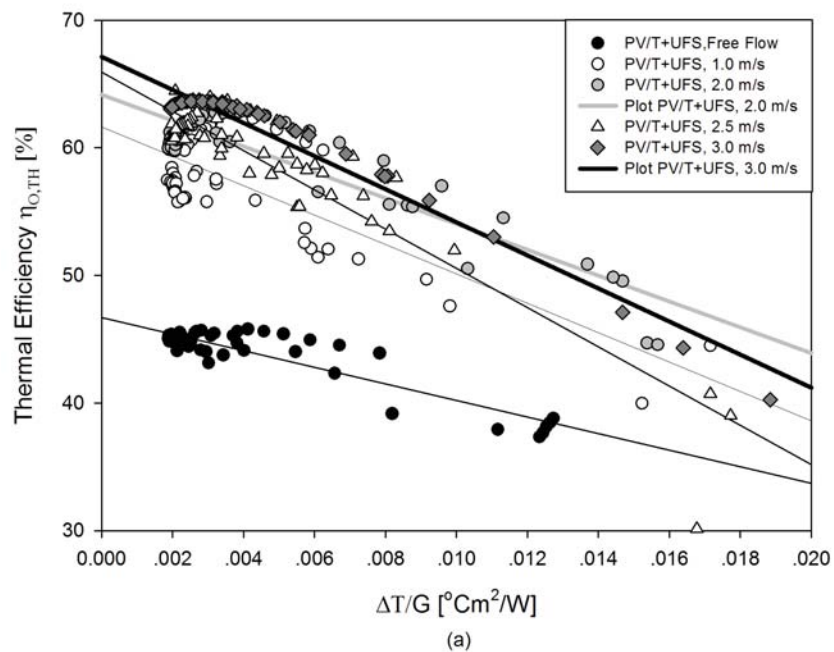
รูปที่ 3.19 แสดงการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางความร้อนต่อค่าผลต่างอุณหภูมิต่อความเข้มรังสีอาทิตย์ ($\Delta T/G$) ของแผง PV/T แบบ UFS (รูป (a)) และ NFS (รูป (b)) รูปดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า แผง PV/T ทั้งสองรูปแบบมีประสิทธิภาพทางความร้อนรวมเพิ่มขึ้นตามความเข้มรังสีอาทิตย์ โดยแผง PV/T แบบ NFS ตอบสนองต่อรังสีอาทิตย์ได้ดีกว่า สังเกตได้จากการให้ประสิทธิภาพทางความร้อนรวมออกมาสูงกว่าขณะทำงาน ที่ความเข้มรังสีอาทิตย์ค่าเดียวกัน

ซึ่งหากพิจารณาการทำงานของแผง PV/T แบบ UFS แล้วจะพบว่า โดยการทำงานที่ความเร็วลม 3.0 เมตรต่อวินาที แผง PV/T แบบ UFS จะให้ประสิทธิภาพทางความร้อนรวม ในย่านความเข้มรังสีอาทิตย์สูง ($\Delta T/G < 0.01 \text{ }^{\circ}\text{Cm}^2/\text{W}$) ออกมาสูงที่สุด โดยในย่านความเข้มรังสีอาทิตย์ต่ำ ($\Delta T/G > 0.01 \text{ }^{\circ}\text{Cm}^2/\text{W}$) พบว่าการใช้งานแผงดังกล่าว ที่ความเร็วลมเข้าแผงเท่ากับ 2.0 เมตรต่อวินาที จะให้ประสิทธิภาพทางความร้อนรวมออกมาสูงที่สุด ในส่วนของแผง PV/T แบบ NFS นั้น ความเร็วลมเข้าแผงที่ 2.0 เมตรต่อวินาที ทำให้ประสิทธิภาพทางความร้อนรวมของแผงสูงที่สุดในขณะทำงานในย่านความเข้มรังสีอาทิตย์สูงและต่ำ

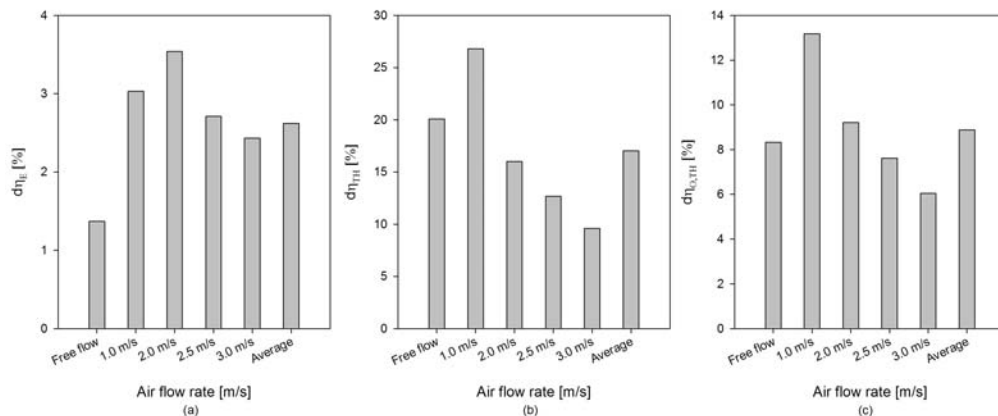
ตารางที่ 3.7 แสดงค่าประสิทธิภาพทางความร้อนรวมเฉลี่ยของแผง PV/T แบบ UFS และ NFS ที่เงื่อนไขความเร็วลมเข้าแผงในการทดสอบต่างๆ กัน โดยตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนรวมเฉลี่ยมีค่าเท่ากับร้อยละ 56.14 และ 61.65 สำหรับแผง PV/T แบบ UFS และ NFS ตามลำดับ โดยแผง PV/T แบบ NFS มีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบ UFS ร้อยละ 8.88 โดยเฉลี่ย โดยการใช้งานแผง PV/T แบบ NFS ที่ความเร็วลมเข้าแผง 1.0 เมตรต่อวินาที จะทำให้ประสิทธิภาพทางความร้อนรวมแตกต่างจากแผง PV/T แบบ UFS มากที่สุด โดยมีค่าความแตกต่างถึงร้อยละ 13.18



รูปที่ 3.18: การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางความร้อนรวมของแผง PV/T แบบ NFS และ UFS ขณะทำการทดสอบ ณ อัตราเร็วของอากาศเข้าแผงที่การไหลแบบอิสระ (a) และแบบบังคับที่ 1.0 m/s (b) 2.0 m/s (c) 2.5 m/s (d) และ 3.0 m/s (e)



รูปที่ 3.19: การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพทางความร้อนรวม ต่อค่า $\Delta T/G$ ของแผง PV/T แบบ NFS และ UFS ขณะทำการทดสอบ ณ อัตราเร็วของอากาศเข้าแผงต่างๆ กัน



รูปที่ 3.20: เปรียบเทียบความแตกต่างของประสิทธิภาพการทำงานของแผง PV/T แบบ NFS และ UFS ที่ค่าความเร็วลมเข้าแผงต่างๆ กัน

3.3 วิเคราะห์การทำงานของแผง PV/T แบบ UFS และ NFS

จากการทดสอบเปรียบเทียบการทำงานของแผง PV/T แบบ UFS และ NFS ในด้านต่างๆ ทำให้สามารถสรุปความแตกต่างของแผง PV/T ทั้งสองรูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.20 โดยแผง PV/T แบบ NFS มีประสิทธิภาพด้านต่างๆ สูงกว่าแผง PV/T แบบ UFS ในทุกกรณีของการศึกษา โดยการเปรียบเทียบในแง่ของการผลิตไฟฟ้าพบว่า แผง PV/T แบบ NFS มีประสิทธิภาพทางไฟฟ้าสูงกว่าแบบ UFS สูงสุดร้อยละ 3.54 ที่ความเร็วลมเข้าแผง 2.0 เมตรต่อวินาที (รูป (a)) ในส่วนของประสิทธิภาพทางความร้อนนั้น รูปที่ 3.20 (b) แสดงให้เห็นว่า แผง PV/T แบบ NFS มีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงกว่าแบบ UFS สูงสุดร้อยละ 26.80 ที่ความเร็วลมเข้าแผง 1.0 เมตรต่อวินาที และในแง่ของประสิทธิภาพทางความร้อนรวมนั้น รูปที่ 3.20 (c) แสดงให้เห็นว่า แผง PV/T แบบ NFS มีประสิทธิภาพทางความร้อนรวมสูงกว่าแบบ UFS สูงสุดร้อยละ 13.18 ที่ความเร็วลมเข้าแผง 1.0 เมตรต่อวินาทีเช่นกัน

โดยผลจากการศึกษาเปรียบเทียบการทำงานของแผง PV/T แบบ UFS และ NFS ดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า การปรับปรุงแผง PV/T โดยการติดตั้งครีบบระบายความร้อนแบบ NFS นั้น มีข้อดีชัดเจนในแง่ของการเพิ่มประสิทธิภาพทางด้านความร้อนรวมให้กับแผง PV/T โดยไม่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพทางไฟฟ้าที่ได้จากแผง PV/T อย่างมีนัยสำคัญแต่อย่างใด โดยในการใช้งานแผง PV/T แบบ NFS นั้น ควรกำหนดความเร็วลมเข้าแผงที่ 1.0 เมตรต่อวินาทีที่จะมีความเหมาะสมที่สุด

3.4 แนวทางการนำไปใช้ประโยชน์

การประยุกต์ใช้แผง PV/T แบบ NFS นั้น เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 3.2 หน้าที่ 40 จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิอากาศร้อนเฉลี่ยที่ออกจากแผง PV/T มีค่าเท่ากับ 38 องศาเซลเซียส ซึ่งอากาศร้อนที่อุณหภูมิดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำได้ ตัวอย่างของผลผลิตทางการเกษตรในประเทศที่มีความเหมาะสมในการอบแห้งที่อุณหภูมิที่สอดคล้องกันกับอุณหภูมิอากาศจากแผง PV/T ในการศึกษาครั้งนี้ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.8

พืช	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความชื้น (%)
กระเจี๊ยบแดง	30-35	ต่ำกว่า 60 %
กระเทียม	18-25	ต่ำกว่า 60%
ขมิ้นชัน	25-30	ระหว่าง 60-80%
ขี้เหล็ก	25-30	ระหว่าง 60-80%
ดีปลี	25-30	สูงกว่า 80%
ตะไคร้หอม	30-35	ต่ำกว่า 60%
พญายอ	25-30	ระหว่าง 60-80%
ฟ้าทะลายโจร	25-30	ระหว่าง 60-80%
มะแว้ง	25-30	ระหว่าง 60-80%
ส้มแขก	25-30	สูงกว่า 80%
บุก	25-30	สูงกว่า 80%
คำฝอย	18-25	ต่ำกว่า 60%
ไพล	25-30	ระหว่าง 60-80%
ชุมเห็ดเทศ	25-30	ระหว่าง 60-80%
ว่านหางจระเข้	30-35	ระหว่าง 60-80%

ตารางที่ 3.8: ข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสำหรับการอบแห้งพืชสมุนไพรไทย

จากตารางจะเห็นได้ว่าแผง PV/T แบบ NFS มีศักยภาพในการนำไปใช้ในภาคการผลิตในระดับครัวเรือนได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานด้านการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร นอกเหนือจากนั้น แผง PV/T แบบ NFS ยังสามารถประยุกต์ใช้กับภาคอุตสาหกรรม หรืออาคารที่ต้องการอากาศร้อนในย่านอุณหภูมิต่ำไปใช้ประโยชน์ได้อีกด้วย

บทที่ 4

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง และข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

การศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมที่ใช้อากาศไหลเวียน (PV/T Air Solar Collector) เพื่อเป็นต้นแบบด้านเทคโนโลยีแผง PV/T สำหรับการประยุกต์ใช้ในภาคการผลิต บริการและครัวเรือนภายในประเทศ ได้ดำเนินการโดยการใช้รูปแบบของครีบบระบายความร้อนแบบไม่คงที่ (non uniform fin shape, NFS) ทดแทนครีบบระบายความร้อนแบบคงที่ (uniform fin shape, UFS) พบว่าแผง PV/T ที่ติดครีบบระบายความร้อนแบบ NFS สามารถทำให้การไหลเวียนของอากาศใต้แผงสูงขึ้นกว่าแผง PV/T แบบ UFS ทุกกรณีทดสอบ โดยข้อมูลจากการทดสอบภายใต้เงื่อนไขความเร็วลมเข้าแผง แบบอิสระ 1.0 2.0 2.5 และ 3.0 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ พบว่าแผง PV/T แบบ NFS สามารถทำให้ค่าอัตราการไหลของอากาศใต้แผงเฉลี่ย สูงกว่าแผง PV/T แบบ UFS ถึง 1.6 เท่า ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากรูปทรงใหม่ของแผง PV/T ที่พื้นที่ครีบบด้านทางเข้าลดลง ทำให้การสูญเสียความดันอากาศใต้แผงลดลงนั่นเอง การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของอากาศใต้แผง PV/T แบบ NFS ดังกล่าวส่งผลโดยตรงกับการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวด้านล่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และอากาศที่ไหลเวียนในช่อง โดยลักษณะดังกล่าวทำให้อัตราการไหลออกของความร้อนที่สะสมบนแผงในระหว่างวัน เกิดขึ้นสูงกว่า ทำให้อุณหภูมิแผง PV/T แบบ NFS ต่ำกว่าแบบ UFS ถึงร้อยละ 6.2 โดยเฉลี่ย โดยอุณหภูมิอากาศจากแผง PV/T แบบ NFS ต่ำกว่าแบบ UFS เพียงร้อยละ 1.8 โดยเฉลี่ยเท่านั้น ทำให้แผง PV/T แบบ NFS ผลิตอากาศร้อนที่อุณหภูมิค่าเดียวกัน ออกมาได้มากกว่าแผง PV/T แบบ UFS เมื่อทำงานในช่วงเวลาเท่าๆ กัน

การเพิ่มของอัตราการผลิตอากาศร้อน ส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในส่วนของประสิทธิภาพทางความร้อน และประสิทธิภาพทางความร้อนรวมของแผง PV/T แบบ NFS โดยข้อมูลจากการสำรวจแสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพทางความร้อน และประสิทธิภาพทางความร้อนรวมโดยเฉลี่ยของแผง PV/T แบบ NFS มีค่าเท่ากับร้อยละ 33.95 และร้อยละ 61.65 ตามลำดับ โดยมีค่าสูงกว่าแผง PV/T แบบ UFS ถึงร้อยละ 17.0 และ 8.8 สำหรับประสิทธิภาพทางความร้อน และประสิทธิภาพทางความร้อนรวมโดยเฉลี่ยตามลำดับ โดยความแตกต่างของประสิทธิภาพทางความร้อนและประสิทธิภาพทางความร้อนรวมเกิดขึ้นสูงสุดที่เงื่อนไขความเร็วลมเข้าแผงเท่ากับ 1.0 เมตรต่อวินาที

ในส่วนของประสิทธิภาพทางไฟฟ้านั้น ข้อมูลจากการสำรวจแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิแผง PV/T แบบ NFS ที่ต่ำกว่าแผง PV/T แบบ UFS ร้อยละ 6.2 โดยเฉลี่ย ได้ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV/T แบบ NFS มีค่าสูงกว่าแบบ UFS เพียงร้อยละ 2.6 โดยเฉลี่ยเท่านั้น

ความแตกต่างดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 5 ซึ่งในทางสถิติไม่ถือว่ามีความสำคัญแต่อย่างใด

จากการศึกษาการทำงานของแผง PV/T ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นทำให้สรุปได้ว่า การเปลี่ยนลักษณะของครีบบระบายความร้อนให้เป็นแบบครีบบังไม่คงที่ (NFS) สามารถทำให้เกิดความแตกต่างอย่างชัดเจนในแง่ของการเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง PV/T ให้สูงขึ้นกว่าการใช้ครีบบระบายความร้อนแบบเดิมถึงร้อยละ 17.0 และการใช้งานภายใต้สภาพภูมิอากาศของพื้นที่ ที่ทำการศึกษา ในประเทศไทยพบว่า ความเร็วลมที่จะทำให้เกิดความเหมาะสมสูงสุดในการใช้งานแผงที่ปรับปรุงดังกล่าว คือที่ความเร็วลมเข้าแผงเท่ากับ 1.0 เมตรต่อวินาที อย่างไรก็ตาม การศึกษาดังกล่าว อยู่ในส่วนของพัฒนาต้นแบบของแผง PV/T แบบ NFS ที่ช่วยให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ทั้งไฟฟ้าและความร้อนได้ดีขึ้น ซึ่งทำให้การใช้ประโยชน์ต่อพื้นที่รับรังสีอาทิตย์สูงขึ้น โดยเป็นแนวทางหนึ่งของการเพิ่มศักยภาพการใช้พลังงานหมุนเวียนด้านพลังงานแสงอาทิตย์ภายในประเทศ การนำต้นแบบของแผง PV/T แบบ NFS ที่มีความเหมาะสมไปประยุกต์ใช้ในภาคการผลิต บริการและครัวเรือนภายในประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแง่ของการประยุกต์ใช้กับงานในย่านอุณหภูมิต่ำ (low temperature applications) เช่นการประยุกต์ใช้ร่วมกันกับระบบอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรบางประเภท เพื่อการแปรรูปในเชิงอุตสาหกรรม ก็เป็นประเด็นวิจัยที่น่าสนใจยิ่งสำหรับการดำเนินการในอนาคตต่อไป

อ้างอิง

- Aste, N., Chiesa, G., and Verri, F. (2008). Design, development and performance monitoring of a photovoltaic-thermal (PVT) air collector. *Renewable Energy*, 33(5):914--927.
- Chow, T., He, W., Ji, J., and Chan, A. (2007). Performance evaluation of photovoltaic-thermosyphon system for subtropical climate application. *Solar energy*, 81(1):123--130.
- Duffie, J. and Beckman, W. (1991). Solar engineering of thermal processes.
- Esposito, A. (1998). *Fluid mechanics with applications*. Prentice Hall.
- Florschuetz, L. (1979). Extension of the Hottel-Whillier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors. *Solar Energy*, 22(4): 361--366.
- Frank, P. and David, P. (1996). Fundamentals of heat and mass transfer.
- Garg, H. and Adhikari, R. (1997). Conventional hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) air heating collectors: steady-state simulation. *Renewable energy*, 11(3): 363--385.
- Hegazy, A. (2000). Comparative study of the performances of four photovoltaic/thermal solar air collectors. *Energy conversion and management*, 41(8):861--881.
- Janjai, S. (2010). A method for estimating direct normal solar irradiation from satellite data for a tropical environment. *Solar Energy*, 84(9):1685--1695.
- Khedari, J., Sangprajak, A., and Hirunlabh, J. (2002). Thailand climatic zones. *Renewable energy*, 25(2):267--280.
- Pattanasethanon, S., Lertsatitthanakorn, C., Atthajariyakul, S., and Soponronnarit, S. (2007). All sky modeling daylight availability and illuminance/irradiance on horizontal plane for mahasarakham, thailand. *Energy conversion and Management*, 48(5):1601--1614.
- Prakash, J. (1994). Transient analysis of a photovoltaic-thermal solar collector for co-generation of electricity and hot air/water. *Energy conversion and management*, 35(11):967--972.

- Quaschnig, V. (2005). *Understanding renewable energy systems*. Earthscan/James & James.
- Raghuraman, P. (1981). Analytical predictions of liquid and air photovoltaic/thermal, flat-plate collector performance. *Journal of solar energy engineering*, 103:291.
- Sopian, K., Yigit, K., Liu, H., Kakac, S., and Veziroglu, T. (1996). Performance analysis of photovoltaic thermal air heaters. *Energy Conversion and management*, 37(11):1657--1670.
- Tan, H. and Charters, W. (1969). Effect of thermal entrance region on turbulent forced-convective heat transfer for an asymmetrically heated rectangular duct with uniform heat flux. *Solar Energy*, 12(4):513--516.
- Tonui, J. and Tripanagnostopoulos, Y. (2007). Air-cooled PV/T solar collectors with low cost performance improvements. *Solar energy*, 81(4):498--511.
- Young, D., Munson, B., Okiishi, T., and Huebsch, W. (2010). *A brief introduction to fluid mechanics*. Wiley.

ภาคผนวก A

ประวัติย่อ นักวิจัย

ชื่อผู้วิจัย : นายอนุสรณ์ แสงประจักษ์

สถานที่ทำงาน : ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ต. ขามเรียง
อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150

หน่วยงาน : มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

วุฒิการศึกษา : Dr.-Ing (Elektrotechnik), special list on Renewable Energy Technology, University of Kassel, Germany

E-mail : arnusorn.s@msu.ac.th

สาขางานวิจัยที่ดำเนินการ : ผู้วิจัยสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอก ในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (Dr.-Ing (Elektrotechnik)) เน้นด้านเทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียน (renewable energy technology) จากสหพันธ์รัฐเยอรมนี มีความเชี่ยวชาญและสนใจเป็นพิเศษเกี่ยวกับการศึกษาวิจัยด้านระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ เทคนิคการผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมโดยใช้แผง "PV/T" การใช้หลักการ "demand side management, DSM" ไปใช้ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (PV-hybrid system) เพื่อยืดอายุการทำงานของแบตเตอรี่ที่ใช้ในระบบดังกล่าว ปัจจุบัน รัับราชการตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ณ ภาควิชาฟิสิกส์คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม โดยทำการสอนและวิจัยทางด้านระบบพลังงานหมุนเวียนสำหรับอาคารและการจัดการพลังงานเป็นหลัก

ภาคผนวก B

ข้อมูลรังสีอาทิตย์

เวลา	Free Flow $E_{sol} (W/m^2)$	1.0 m/s $E_{sol} (W/m^2)$	2.0 m/s $E_{sol} (W/m^2)$	2.5 m/s $E_{sol} (W/m^2)$	3.0 m/s $E_{sol} (W/m^2)$
8.00	127.61	160.12	68.10	120.40	124.01
8.10	149.08	173.62	69.33	141.10	145.09
8.20	169.94	202.46	73.01	172.40	171.17
8.30	195.09	234.36	88.34	202.50	198.80
8.40	218.41	266.87	104.30	238.00	228.21
8.50	242.33	274.85	125.77	281.60	261.97
9.00	260.74	301.23	149.08	327.00	293.87
9.10	269.33	322.09	170.55	166.30	217.82
9.20	261.96	327.61	193.25	190.20	226.08
9.30	314.73	339.88	216.57	173.00	243.87
9.40	323.93	356.44	242.95	308.00	315.97
9.50	355.22	384.05	257.67	371.20	363.21
10.00	373.01	393.25	277.30	199.40	286.21
10.10	379.14	411.05	293.25	393.90	386.52
10.20	398.16	427.61	313.50	402.50	400.33
10.30	414.11	447.24	328.84	413.50	413.81
10.40	434.36	452.15	350.92	410.40	422.38
10.50	434.97	466.87	365.03	436.80	435.89
11.00	449.70	471.17	388.35	451.50	450.60
11.10	453.38	482.21	390.80	462.60	457.99
11.20	458.90	495.09	429.45	471.20	465.05
11.30	468.10	503.68	439.88	482.80	475.45
11.40	475.46	496.94	458.28	484.10	479.78
11.50	485.89	479.76	453.99	490.80	488.35

ตารางที่ B.1: ข้อมูลรังสีอาทิตย์ระหว่างการทดสอบแผง PV/T

เวลา	Free Flow $E_{sol} (W/m^2)$	1.0 m/s $E_{sol} (W/m^2)$	2.0 m/s $E_{sol} (W/m^2)$	2.5 m/s $E_{sol} (W/m^2)$	3.0 m/s $E_{sol} (W/m^2)$
12.00	493.87	501.23	466.26	503.10	498.49
12.10	507.36	520.86	495.09	505.50	506.43
12.20	514.11	538.04	519.63	501.20	507.66
12.30	515.95	512.89	459.51	492.60	504.28
12.40	522.70	493.25	498.16	505.50	514.10
12.50	523.32	498.78	503.68	505.50	514.41
13.00	521.48	486.82	503.07	481.60	501.54
13.10	531.90	474.85	517.79	482.53	327.60
13.20	526.38	479.76	518.41	483.45	383.14
13.30	525.16	484.67	519.63	485.30	505.23
13.40	520.25	421.47	522.70	478.50	499.38
13.50	488.96	455.83	523.93	465.33	335.28
14.00	469.33	465.03	530.68	452.15	324.22
14.10	457.67	424.54	510.43	425.80	441.74
14.20	424.54	436.20	481.60	300.00	362.27
14.30	431.90	372.40	480.37	361.40	396.65
14.40	406.75	308.59	470.55	154.60	280.68
14.50	331.29	336.81	378.53	208.60	269.95
15.00	357.67	382.82	345.71	344.80	351.24
15.10	339.27	309.20	312.89	295.70	317.49
15.20	291.41	230.68	361.35	295.10	293.26
15.30	249.08	156.44	300.00	262.00	255.54
15.40	122.09	163.80	309.20	131.30	126.70
15.50	152.15	169.33	276.69	218.40	185.28
16.00	182.82	174.85	163.80	181.60	182.21
16.10	89.57	109.20	96.93	160.70	125.14
16.20	80.98	174.23	123.31	135.60	108.29
16.30	80.37	138.04	115.95	100.60	90.49
16.40	79.76	101.85	114.11	56.40	68.08
16.50	79.14	65.66	65.03	42.90	61.02
17.00	78.53	58.28	63.80	27.60	53.07

ตารางที่ B.1 ข้อมูลรังสีอาทิตย์ระหว่างการทดสอบแผง PV/T (ต่อ)

ภาคผนวก C

ข้อมูลอุณหภูมิแวดล้อม

เวลา	Free Flow T_a ($^{\circ}C$)	1.0 m/s T_a ($^{\circ}C$)	2.0 m/s T_a ($^{\circ}C$)	2.5 m/s T_a ($^{\circ}C$)	3.0 m/s T_a ($^{\circ}C$)
8.00	29.35	28.80	28.65	27.08	26.13
8.10	29.64	29.07	27.84	27.42	26.94
8.20	28.98	29.19	28.24	28.79	26.53
8.30	30.23	30.03	27.76	30.47	27.62
8.40	30.50	30.32	27.85	31.19	27.52
8.50	30.64	30.68	28.06	32.90	27.85
9.00	31.68	31.42	28.89	32.73	28.61
9.10	31.59	31.82	29.71	36.69	28.21
9.20	32.26	32.42	29.89	32.27	31.00
9.30	32.22	32.96	31.58	36.66	30.75
9.40	33.46	34.18	31.26	34.87	34.12
9.50	32.28	34.10	32.79	37.73	32.72
10.00	32.16	34.48	31.86	38.08	33.78
10.10	33.47	35.29	32.51	39.41	33.52
10.20	34.64	36.35	32.63	38.99	36.02
10.30	35.32	36.01	33.44	35.38	36.41
10.40	34.98	35.78	32.70	40.32	34.39
10.50	34.78	35.26	32.24	36.35	33.24
11.00	34.62	35.97	31.78	38.61	33.43
11.10	37.13	37.47	33.57	38.76	34.79
11.20	36.88	37.46	34.17	38.71	34.38
11.30	37.32	38.21	34.11	39.35	35.36
11.40	36.45	37.81	34.25	36.76	35.35
11.50	36.62	38.24	35.11	39.67	34.96

ตารางที่ C.1: ข้อมูลอุณหภูมิแวดล้อมระหว่างการทดสอบแผง PV/T

เวลา	Free Flow $T_a (^{\circ}C)$	1.0 m/s $T_a (^{\circ}C)$	2.0 m/s $T_a (^{\circ}C)$	2.5 m/s $T_a (^{\circ}C)$	3.0 m/s $T_a (^{\circ}C)$
12.00	37.50	38.81	33.80	38.98	35.91
12.10	36.74	38.62	35.94	38.99	35.41
12.20	39.11	39.76	35.21	39.20	36.98
12.30	40.71	40.54	34.02	39.25	37.44
12.40	38.64	39.60	33.67	38.56	36.58
12.50	42.61	41.81	34.36	38.94	41.29
13.00	42.03	41.58	35.64	39.52	39.71
13.10	41.41	40.92	34.87	38.82	38.91
13.20	40.30	40.48	33.64	36.74	38.76
13.30	40.44	40.81	34.83	37.69	39.03
13.40	42.43	41.76	34.95	39.24	40.04
13.50	41.94	41.52	36.02	39.28	38.69
14.00	40.12	40.96	37.00	38.15	38.90
14.10	40.16	40.70	34.87	37.81	38.63
14.20	41.42	41.33	35.94	40.14	38.95
14.30	41.41	40.61	35.56	38.23	38.74
14.40	43.42	41.74	36.58	39.17	38.92
14.50	41.74	41.71	37.82	38.88	38.64
15.00	41.44	40.98	37.73	38.00	38.09
15.10	40.81	40.63	37.11	38.40	38.25
15.20	39.65	40.13	39.29	38.30	36.43
15.30	40.66	41.11	39.97	39.34	38.06
15.40	40.01	40.48	35.36	38.56	37.18
15.50	41.03	40.79	35.42	36.82	37.61
16.00	39.41	40.02	34.22	37.32	36.65
16.10	39.52	39.93	36.14	40.99	36.81
16.20	38.12	39.50	38.35	38.93	35.27
16.30	39.31	39.94	35.81	39.98	35.56
16.40	39.35	39.97	36.52	38.35	35.77
16.50	37.51	38.71	34.44	36.77	34.27
17.00	36.37	37.88	34.04	34.99	33.17

ตารางที่ C.1 ข้อมูลอุณหภูมิแวดล้อมระหว่างการทดสอบแผง PV/T (ต่อ)

ภาคผนวก D

ข้อมูลอัตราการไหลของอากาศได้แผง PV/T

เวลา	Free Flow $\dot{m}$ (kg/s)	1.0 m/s $\dot{m}$ (kg/s)	2.0 m/s $\dot{m}$ (kg/s)	2.5 m/s $\dot{m}$ (kg/s)	3.0 m/s $\dot{m}$ (kg/s)
8.00	0.0046	0.0345	0.0477	0.0545	0.0554
8.10	0.0047	0.0346	0.0477	0.0545	0.0554
8.20	0.0047	0.0347	0.0477	0.0546	0.0555
8.30	0.0048	0.0347	0.0477	0.0547	0.0556
8.40	0.0049	0.0348	0.0477	0.0547	0.0556
8.50	0.0050	0.0349	0.0478	0.0547	0.0557
9.00	0.0050	0.0350	0.0478	0.0548	0.0558
9.10	0.0051	0.0346	0.0479	0.0548	0.0556
9.20	0.0050	0.0347	0.0479	0.0549	0.0556
9.30	0.0052	0.0347	0.0480	0.0549	0.0557
9.40	0.0052	0.0350	0.0481	0.0549	0.0558
9.50	0.0054	0.0351	0.0481	0.0550	0.0559
10.00	0.0054	0.0347	0.0481	0.0550	0.0558
10.10	0.0054	0.0352	0.0482	0.0550	0.0560
10.20	0.0055	0.0352	0.0482	0.0551	0.0560
10.30	0.0056	0.0352	0.0482	0.0551	0.0560
10.40	0.0056	0.0352	0.0483	0.0551	0.0561
10.50	0.0056	0.0352	0.0483	0.0552	0.0561
11.00	0.0057	0.0353	0.0484	0.0552	0.0561
11.10	0.0057	0.0353	0.0484	0.0552	0.0561
11.20	0.0057	0.0353	0.0485	0.0552	0.0562
11.30	0.0057	0.0354	0.0485	0.0553	0.0562
11.40	0.0058	0.0354	0.0485	0.0552	0.0562
11.50	0.0058	0.0354	0.0485	0.0552	0.0562

ตารางที่ D.1: ข้อมูลอัตราการไหลอากาศได้แผง PV/T แบบ NFS

เวลา	Free Flow	1.0 m/s	2.0 m/s	2.5 m/s	3.0 m/s
	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{m}$ (kg/s)
12.00	0.0058	0.0354	0.0486	0.0553	0.0562
12.10	0.0059	0.0354	0.0486	0.0553	0.0563
12.20	0.0059	0.0354	0.0487	0.0553	0.0563
12.30	0.0059	0.0354	0.0485	0.0553	0.0563
12.40	0.0059	0.0354	0.0486	0.0552	0.0563
12.50	0.0059	0.0354	0.0486	0.0552	0.0563
13.00	0.0059	0.0353	0.0486	0.0552	0.0562
13.10	0.0060	0.0345	0.0487	0.0552	0.0559
13.20	0.0059	0.0348	0.0487	0.0552	0.0560
13.30	0.0059	0.0354	0.0487	0.0552	0.0563
13.40	0.0059	0.0353	0.0487	0.0551	0.0562
13.50	0.0058	0.0347	0.0487	0.0551	0.0559
14.00	0.0057	0.0347	0.0487	0.0552	0.0558
14.10	0.0057	0.0352	0.0487	0.0551	0.0561
14.20	0.0056	0.0349	0.0486	0.0551	0.0559
14.30	0.0056	0.0351	0.0486	0.0550	0.0560
14.40	0.0055	0.0346	0.0486	0.0548	0.0557
14.50	0.0053	0.0347	0.0484	0.0549	0.0557
15.00	0.0054	0.0350	0.0483	0.0550	0.0559
15.10	0.0053	0.0349	0.0482	0.0548	0.0558
15.20	0.0051	0.0349	0.0483	0.0546	0.0558
15.30	0.0050	0.0349	0.0482	0.0545	0.0557
15.40	0.0046	0.0346	0.0482	0.0545	0.0554
15.50	0.0047	0.0348	0.0481	0.0545	0.0555
16.00	0.0048	0.0347	0.0479	0.0545	0.0555
16.10	0.0045	0.0346	0.0477	0.0544	0.0554
16.20	0.0044	0.0346	0.0478	0.0545	0.0554
16.30	0.0044	0.0345	0.0478	0.0544	0.0553
16.40	0.0044	0.0344	0.0478	0.0544	0.0553
16.50	0.0044	0.0344	0.0477	0.0543	0.0553
17.00	0.0044	0.0343	0.0476	0.0543	0.0552

ตารางที่ D.1 ข้อมูลอัตราการไหลอากาศได้แผง PV/T แบบ NFS (ต่อ)

เวลา	Free Flow $\dot{m} \text{ (kg/s)}$	1.0 m/s $\dot{m} \text{ (kg/s)}$	2.0 m/s $\dot{m} \text{ (kg/s)}$	2.5 m/s $\dot{m} \text{ (kg/s)}$	3.0 m/s $\dot{m} \text{ (kg/s)}$
8.00	0.0032	0.0099	0.0157	0.0192	0.0235
8.10	0.0033	0.0100	0.0157	0.0192	0.0235
8.20	0.0033	0.0100	0.0157	0.0193	0.0236
8.30	0.0034	0.0101	0.0157	0.0193	0.0235
8.40	0.0035	0.0101	0.0157	0.0194	0.0236
8.50	0.0036	0.0102	0.0158	0.0194	0.0237
9.00	0.0036	0.0103	0.0158	0.0195	0.0237
9.10	0.0037	0.0100	0.0158	0.0195	0.0235
9.20	0.0036	0.0101	0.0159	0.0195	0.0234
9.30	0.0038	0.0100	0.0159	0.0195	0.0234
9.40	0.0039	0.0103	0.0160	0.0195	0.0233
9.50	0.0040	0.0104	0.0160	0.0196	0.0235
10.00	0.0040	0.0101	0.0160	0.0196	0.0233
10.10	0.0040	0.0104	0.0161	0.0196	0.0235
10.20	0.0041	0.0104	0.0161	0.0197	0.0233
10.30	0.0042	0.0104	0.0161	0.0197	0.0233
10.40	0.0042	0.0104	0.0161	0.0197	0.0235
10.50	0.0042	0.0105	0.0162	0.0197	0.0236
11.00	0.0043	0.0105	0.0162	0.0197	0.0236
11.10	0.0043	0.0105	0.0162	0.0198	0.0235
11.20	0.0043	0.0105	0.0163	0.0198	0.0236
11.30	0.0043	0.0106	0.0163	0.0198	0.0235
11.40	0.0044	0.0106	0.0163	0.0198	0.0235
11.50	0.0044	0.0106	0.0163	0.0198	0.0236
12.00	0.0044	0.0106	0.0163	0.0198	0.0235
12.10	0.0045	0.0106	0.0164	0.0198	0.0236
12.20	0.0045	0.0106	0.0164	0.0199	0.0235
12.30	0.0045	0.0106	0.0163	0.0198	0.0234
12.40	0.0045	0.0106	0.0164	0.0198	0.0235
12.50	0.0045	0.0106	0.0164	0.0198	0.0232
13.00	0.0045	0.0105	0.0164	0.0198	0.0232
13.10	0.0046	0.0099	0.0164	0.0197	0.0230
13.20	0.0045	0.0101	0.0164	0.0198	0.0231
13.30	0.0045	0.0106	0.0164	0.0198	0.0233
13.40	0.0045	0.0105	0.0164	0.0197	0.0232
13.50	0.0044	0.0100	0.0164	0.0197	0.0230

ตารางที่ D.2: ข้อมูลอัตราการไหลอากาศได้แผง PV/T แบบ UFS

เวลา	Free Flow	1.0 m/s	2.0 m/s	2.5 m/s	3.0 m/s
	$\dot{m} \text{ (kg/s)}$	$\dot{m} \text{ (kg/s)}$	$\dot{m} \text{ (kg/s)}$	$\dot{m} \text{ (kg/s)}$	$\dot{m} \text{ (kg/s)}$
14.00	0.0043	0.0100	0.0165	0.0197	0.0230
14.10	0.0043	0.0105	0.0164	0.0197	0.0232
14.20	0.0042	0.0102	0.0164	0.0197	0.0230
14.30	0.0042	0.0103	0.0164	0.0196	0.0231
14.40	0.0041	0.0100	0.0164	0.0195	0.0229
14.50	0.0039	0.0101	0.0162	0.0195	0.0229
15.00	0.0040	0.0103	0.0161	0.0196	0.0231
15.10	0.0039	0.0102	0.0161	0.0195	0.0230
15.20	0.0037	0.0102	0.0162	0.0193	0.0231
15.30	0.0036	0.0102	0.0161	0.0192	0.0229
15.40	0.0032	0.0100	0.0161	0.0192	0.0227
15.50	0.0033	0.0101	0.0160	0.0192	0.0228
16.00	0.0034	0.0100	0.0158	0.0192	0.0229
16.10	0.0031	0.0100	0.0157	0.0191	0.0227
16.20	0.0030	0.0100	0.0158	0.0192	0.0228
16.30	0.0030	0.0099	0.0158	0.0192	0.0228
16.40	0.0030	0.0098	0.0157	0.0191	0.0227
16.50	0.0030	0.0098	0.0157	0.0191	0.0228
17.00	0.0030	0.0098	0.0157	0.0190	0.0229

ตารางที่ D.2 ข้อมูลอัตราการไหลอากาศใต้แผง PV/T แบบ UFS (ต่อ)

ภาคผนวก E

ข้อมูลอุณหภูมิอากาศออกจากแผง PV/T

เวลา	Free Flow $T_{air,out}$ ($^{\circ}C$)	1.0 m/s $T_{air,out}$ ($^{\circ}C$)	2.0 m/s $T_{air,out}$ ($^{\circ}C$)	2.5 m/s $T_{air,out}$ ($^{\circ}C$)	3.0 m/s $T_{air,out}$ ($^{\circ}C$)
8.00	32.07	30.37	29.75	28.33	27.39
8.10	32.77	30.71	28.94	28.74	28.27
8.20	32.51	30.97	29.36	30.21	27.94
8.30	34.23	31.96	28.93	31.98	29.11
8.40	34.93	32.40	29.08	32.82	29.11
8.50	35.51	32.80	29.37	34.66	29.54
9.00	36.88	33.66	30.28	34.64	30.40
9.10	36.94	34.17	31.18	38.09	29.76
9.20	37.48	34.80	31.44	33.74	32.57
9.30	38.37	35.40	33.21	38.08	32.38
9.40	39.76	36.69	32.98	36.72	35.97
9.50	39.12	36.74	34.57	39.77	34.72
10.00	39.30	37.18	33.71	39.58	35.55
10.10	40.71	38.05	34.41	41.52	35.59
10.20	42.19	39.19	34.60	41.13	38.14
10.30	43.14	38.94	35.47	37.55	38.57
10.40	43.12	38.74	34.81	42.48	36.57
10.50	42.93	38.29	34.40	38.60	35.47
11.00	43.01	39.01	34.02	40.90	35.70
11.10	45.58	40.56	35.82	41.09	37.08
11.20	45.42	40.62	36.55	41.06	36.69
11.30	46.00	41.40	36.53	41.74	37.70
11.40	45.25	40.97	36.73	39.15	37.71
11.50	45.58	41.32	37.58	42.09	37.35

ตารางที่ E.1: ข้อมูลอุณหภูมิอากาศออกจากแผง PV/T แบบ NFS

เวลา	Free Flow $T_{air,out}$ ($^{\circ}C$)	1.0 m/s $T_{air,out}$ ($^{\circ}C$)	2.0 m/s $T_{air,out}$ ($^{\circ}C$)	2.5 m/s $T_{air,out}$ ($^{\circ}C$)	3.0 m/s $T_{air,out}$ ($^{\circ}C$)
12.00	46.59	41.99	36.31	41.43	38.33
12.10	46.04	41.89	38.55	41.45	37.85
12.20	48.51	43.11	37.90	41.65	39.42
12.30	50.14	43.77	36.51	41.67	39.87
12.40	48.17	42.74	36.29	41.02	39.04
12.50	52.15	44.97	37.00	41.40	43.75
13.00	51.54	44.69	38.28	41.91	42.14
13.10	51.08	44.02	37.56	40.08	40.80
13.20	49.89	43.59	36.33	38.37	40.82
13.30	50.01	43.91	37.52	40.09	41.46
13.40	51.92	44.56	37.66	41.62	42.46
13.50	50.95	44.52	38.73	40.72	40.61
14.00	48.82	44.01	39.73	39.59	40.78
14.10	48.68	43.52	37.53	40.02	40.87
14.20	49.41	44.22	38.50	41.96	40.95
14.30	49.51	43.20	38.12	40.24	40.85
14.40	51.11	44.03	39.10	40.53	40.67
14.50	48.17	44.13	40.02	40.41	40.36
15.00	48.32	43.61	39.82	39.96	40.05
15.10	47.38	42.91	39.08	40.21	40.11
15.20	45.39	42.04	41.43	40.11	38.21
15.30	45.65	42.66	41.90	41.05	39.73
15.40	42.62	42.07	37.32	39.85	38.45
15.50	44.22	42.41	37.26	38.39	39.06
16.00	43.18	41.67	35.66	38.77	38.09
16.10	41.50	41.26	37.34	42.37	38.07
16.20	39.93	41.15	39.65	40.23	36.48
16.30	41.10	41.41	37.08	41.17	36.71
16.40	41.13	41.26	37.78	39.40	36.86
16.50	39.28	39.84	35.53	37.78	35.33
17.00	38.13	38.96	35.12	35.95	34.20

ตารางที่ E.1 ข้อมูลอุณหภูมิอากาศออกจากแผง PV/T แบบ NFS (ต่อ)

เวลา	Free Flow $T_{air,out}$ ($^{\circ}C$)	1.0 m/s $T_{air,out}$ ($^{\circ}C$)	2.0 m/s $T_{air,out}$ ($^{\circ}C$)	2.5 m/s $T_{air,out}$ ($^{\circ}C$)	3.0 m/s $T_{air,out}$ ($^{\circ}C$)
8.00	32.28	31.36	29.91	28.72	27.69
8.10	33.03	31.80	29.11	29.22	28.65
8.20	32.82	32.30	29.54	30.84	28.41
8.30	34.60	33.54	29.21	32.76	29.69
8.40	35.36	34.24	29.45	33.76	29.78
8.50	35.99	34.68	29.86	35.81	30.33
9.00	37.40	35.75	30.90	36.00	31.31
9.10	37.48	36.48	31.92	38.68	30.41
9.20	38.00	37.14	32.31	34.45	33.26
9.30	39.01	37.85	34.21	38.70	33.13
9.40	40.43	39.23	34.13	37.98	36.99
9.50	39.85	39.47	35.80	41.33	35.90
10.00	40.07	40.05	35.05	40.33	36.45
10.10	41.49	40.99	35.84	43.18	36.86
10.20	43.02	42.26	36.14	42.83	39.47
10.30	43.99	42.16	37.09	39.30	39.95
10.40	44.02	41.99	36.55	44.21	37.97
10.50	43.83	41.65	36.22	40.45	36.90
11.00	43.94	42.40	35.96	42.82	37.19
11.10	46.52	44.03	37.78	43.06	38.61
11.20	46.37	44.18	38.72	43.07	38.24
11.30	46.97	45.03	38.75	43.80	39.29
11.40	46.23	44.55	39.05	41.22	39.32
11.50	46.58	44.75	39.88	44.19	38.98
12.00	47.60	45.58	38.67	43.59	40.00
12.10	47.08	45.64	41.07	43.61	39.55
12.20	49.56	47.00	40.55	43.78	41.14
12.30	51.20	47.46	38.83	43.77	41.58
12.40	49.24	46.28	38.82	43.19	40.78
12.50	53.22	48.55	39.56	43.57	45.53
13.00	52.61	48.19	40.84	43.96	43.86
13.10	52.17	47.60	40.20	40.47	41.88
13.20	50.97	47.15	38.97	39.30	42.11
13.30	51.08	47.38	40.17	42.16	43.19
13.40	52.99	47.55	40.32	43.68	44.17
13.50	51.96	47.92	41.40	41.38	41.72

ตารางที่ E.2: ข้อมูลอุณหภูมิอากาศออกจากแผง PV/T แบบ UFS

เวลา	Free Flow $T_{air,out}$ ($^{\circ}C$)	1.0 m/s $T_{air,out}$ ($^{\circ}C$)	2.0 m/s $T_{air,out}$ ($^{\circ}C$)	2.5 m/s $T_{air,out}$ ($^{\circ}C$)	3.0 m/s $T_{air,out}$ ($^{\circ}C$)
14.00	49.79	47.48	42.44	40.23	41.85
14.10	49.62	46.55	40.13	41.83	42.37
14.20	50.28	47.40	40.95	43.17	42.16
14.30	50.41	45.84	40.56	41.76	42.18
14.40	51.96	46.23	41.49	41.07	41.58
14.50	48.85	46.54	41.92	41.20	41.23
15.00	49.06	46.35	41.53	41.39	41.22
15.10	48.08	45.07	40.62	41.42	41.16
15.20	45.98	43.57	43.23	41.32	39.16
15.30	46.14	43.60	43.36	42.11	40.54
15.40	42.82	43.09	38.84	40.28	38.78
15.50	44.49	43.46	38.60	39.24	39.61
16.00	43.52	42.76	36.37	39.44	38.63
16.10	41.61	41.82	37.67	42.95	38.39
16.20	40.02	42.24	40.12	40.69	36.73
16.30	41.20	42.22	37.51	41.46	36.90
16.40	41.23	41.77	38.21	39.48	36.96
16.50	39.37	40.04	35.67	37.79	35.41
17.00	38.22	39.11	35.26	35.88	34.25

ตารางที่ E.2 ข้อมูลอุณหภูมิอากาศออกจากแผง PV/T แบบ UFS (ต่อ)

ภาคผนวก F

ข้อมูลอุณหภูมิแผง PV/T

เวลา	Free Flow $T_{pv} (^{\circ}C)$	1.0 m/s $T_{pv} (^{\circ}C)$	2.0 m/s $T_{pv} (^{\circ}C)$	2.5 m/s $T_{pv} (^{\circ}C)$	3.0 m/s $T_{pv} (^{\circ}C)$
8.00	33.74	20.70	22.36	34.74	39.53
8.10	35.69	21.19	22.88	36.13	40.73
8.20	37.62	21.93	23.44	37.57	42.22
8.30	39.39	22.58	24.14	39.42	43.80
8.40	41.56	23.52	25.55	41.30	45.48
8.50	43.69	25.03	26.95	42.82	47.41
9.00	46.49	26.71	29.17	45.11	49.23
9.10	48.89	28.44	31.13	46.86	44.89
9.20	50.72	30.68	32.81	48.32	45.36
9.30	52.41	32.38	34.42	49.77	46.37
9.40	54.13	34.49	36.17	50.70	50.49
9.50	55.39	36.70	37.93	52.77	53.19
10.00	57.56	38.82	39.77	54.69	48.79
10.10	58.64	41.77	41.39	55.42	54.52
10.20	61.83	44.27	42.41	56.56	55.31
10.30	62.54	40.19	43.96	57.29	56.08
10.40	63.85	38.49	45.17	59.12	56.57
10.50	63.26	39.38	46.96	59.67	57.34
11.00	63.28	44.25	48.03	60.53	58.18
11.10	64.13	46.33	50.40	61.46	58.60
11.20	64.83	46.20	50.60	62.14	59.00
11.30	67.29	51.79	51.57	63.92	59.60
11.40	68.17	53.52	52.83	63.79	59.84
11.50	67.07	54.57	55.01	65.11	60.33

ตารางที่ F.1: ข้อมูลอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแผง PV/T แบบ NFS

เวลา	Free Flow T_{pv} ($^{\circ}C$)	1.0 m/s T_{pv} ($^{\circ}C$)	2.0 m/s T_{pv} ($^{\circ}C$)	2.5 m/s T_{pv} ($^{\circ}C$)	3.0 m/s T_{pv} ($^{\circ}C$)
12.00	68.41	56.19	54.87	66.20	60.91
12.10	67.77	56.70	55.24	66.88	61.37
12.20	69.16	56.87	56.29	66.77	61.44
12.30	69.99	57.16	56.06	66.91	61.24
12.40	71.44	58.10	56.42	67.30	61.80
12.50	70.20	57.34	57.50	61.80	61.82
13.00	70.70	58.79	57.30	50.32	61.09
13.10	70.83	53.93	58.22	55.03	51.15
13.20	70.08	56.74	58.84	62.43	54.33
13.30	69.47	58.98	59.10	65.97	61.30
13.40	71.17	59.28	60.17	63.21	60.96
13.50	69.52	59.51	59.09	65.22	51.59
14.00	71.40	62.20	60.35	64.71	50.96
14.10	68.89	59.79	59.50	65.14	57.67
14.20	66.48	58.99	59.77	64.31	53.13
14.30	65.90	50.18	58.96	61.71	55.10
14.40	66.09	49.31	57.28	54.95	48.47
14.50	65.61	56.87	49.46	60.41	47.86
15.00	63.72	51.34	42.28	61.21	52.50
15.10	62.82	48.85	43.46	61.21	50.58
15.20	59.98	49.04	48.12	56.39	49.19
15.30	54.28	52.51	50.50	53.76	47.04
15.40	54.71	55.56	49.30	55.23	39.68
15.50	48.20	54.20	49.43	54.24	43.03
16.00	45.55	53.18	48.85	51.31	42.85
16.10	49.07	46.08	45.96	48.51	39.59
16.20	47.59	49.12	40.67	48.21	38.63
16.30	45.89	49.92	37.87	48.05	37.61
16.40	43.17	50.00	37.53	48.28	36.34
16.50	41.26	50.01	38.29	46.87	35.93
17.00	39.41	20.70	36.98	45.26	35.48

ตารางที่ F.1 ข้อมูลอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแผง PV/T แบบ NFS (ต่อ)

เวลา	Free Flow T_{pv} ($^{\circ}C$)	1.0 m/s T_{pv} ($^{\circ}C$)	2.0 m/s T_{pv} ($^{\circ}C$)	2.5 m/s T_{pv} ($^{\circ}C$)	3.0 m/s T_{pv} ($^{\circ}C$)
8.00	34.90	20.48	21.89	36.18	41.85
8.10	37.15	20.92	22.37	37.95	43.14
8.20	39.19	21.75	22.98	39.53	44.73
8.30	41.16	22.42	23.71	41.71	46.41
8.40	43.47	23.39	24.88	43.60	48.20
8.50	45.65	25.23	27.82	45.03	50.26
9.00	48.58	28.42	30.54	47.61	52.20
9.10	51.08	31.06	32.56	49.74	47.57
9.20	52.96	32.83	34.68	51.36	48.07
9.30	54.80	34.57	36.37	53.29	49.15
9.40	56.47	36.96	38.61	54.17	53.54
9.50	57.30	39.59	40.63	56.39	56.42
10.00	59.14	41.64	42.94	58.68	51.73
10.10	60.25	45.43	44.72	59.25	57.84
10.20	65.12	48.41	46.18	60.69	58.68
10.30	65.59	43.17	48.40	61.48	59.50
10.40	66.62	41.06	49.79	63.34	60.03
10.50	66.20	42.03	51.73	64.10	60.85
11.00	65.95	48.15	53.19	64.83	61.74
11.10	65.55	50.84	55.93	65.63	62.19
11.20	66.47	51.11	56.46	66.92	62.62
11.30	69.79	57.61	58.03	68.25	63.26
11.40	70.01	59.54	59.98	68.61	63.52
11.50	69.14	60.78	63.44	69.95	64.04
12.00	70.64	62.51	62.28	71.36	64.66
12.10	69.89	63.12	62.86	72.28	65.14
12.20	70.83	63.10	63.55	71.18	65.22
12.30	71.70	63.20	63.44	71.17	65.01
12.40	73.58	64.73	64.09	72.51	65.61
12.50	72.68	63.37	64.97	66.32	65.63
13.00	72.35	65.51	65.02	53.50	64.85
13.10	73.07	59.82	66.06	57.95	54.25
13.20	73.02	63.65	67.59	67.39	57.64
13.30	71.50	66.24	68.23	70.73	65.07
13.40	73.36	66.17	70.03	67.23	64.71
13.50	71.77	66.19	67.89	69.32	54.72

ตารางที่ F.2: ข้อมูลอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแผง PV/T แบบ UFS

เวลา	Free Flow T_{pv} ($^{\circ}C$)	1.0 m/s T_{pv} ($^{\circ}C$)	2.0 m/s T_{pv} ($^{\circ}C$)	2.5 m/s T_{pv} ($^{\circ}C$)	3.0 m/s T_{pv} ($^{\circ}C$)
14.00	73.59	66.72	69.86	68.46	54.05
14.10	70.64	65.65	68.88	68.91	61.20
14.20	67.98	65.45	68.89	67.36	56.36
14.30	67.25	53.47	66.90	64.20	58.46
14.40	67.33	52.75	64.82	57.28	51.40
14.50	67.27	61.52	53.74	62.81	50.74
15.00	64.78	55.35	44.55	63.91	55.69
15.10	63.76	52.23	46.24	63.94	53.64
15.20	60.55	52.66	52.14	58.67	52.16
15.30	54.36	56.75	55.66	56.05	49.87
15.40	55.61	60.77	53.40	57.62	42.02
15.50	48.12	59.42	53.58	56.17	45.59
16.00	45.79	58.21	53.10	52.91	45.40
16.10	49.59	48.99	49.70	50.47	41.92
16.20	47.93	52.62	42.69	50.13	40.90
16.30	46.04	53.70	39.05	50.16	39.81
16.40	43.37	53.94	38.68	50.55	38.45
16.50	41.58	54.24	39.38	49.06	38.02
17.00	39.68	20.48	37.84	47.04	37.53

ตารางที่ F.2 ข้อมูลอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแผง PV/T แบบ UFS (ต่อ)

ภาคผนวก G

ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV/T

เวลา	Free Flow η_E (%)	1.0 m/s η_E (%)	2.0 m/s η_E (%)	2.5 m/s η_E (%)	3.0 m/s η_E (%)
8.00	11.95	13.01	12.87	11.87	11.48
8.10	11.79	12.97	12.83	11.75	11.38
8.20	11.63	12.91	12.79	11.64	11.26
8.30	11.49	12.86	12.73	11.49	11.13
8.40	11.31	12.78	12.61	11.33	10.99
8.50	11.14	12.66	12.50	11.21	10.84
9.00	10.91	12.52	12.32	11.02	10.69
9.10	10.72	12.38	12.16	10.88	11.04
9.20	10.57	12.20	12.02	10.76	11.00
9.30	10.43	12.06	11.89	10.65	10.92
9.40	10.29	11.89	11.75	10.57	10.59
9.50	10.19	11.71	11.61	10.40	10.37
10.00	10.01	11.54	11.46	10.25	10.73
10.10	9.93	11.30	11.33	10.19	10.26
10.20	9.67	11.09	11.24	10.09	10.20
10.30	9.61	11.42	11.12	10.03	10.13
10.40	9.50	11.56	11.02	9.89	10.09
10.50	9.55	11.49	10.87	9.84	10.03
11.00	9.55	11.09	10.79	9.77	9.96
11.10	9.48	10.93	10.59	9.70	9.93
11.20	9.42	10.94	10.58	9.64	9.90
11.30	9.22	10.48	10.50	9.50	9.85
11.40	9.15	10.34	10.40	9.51	9.83
11.50	9.24	10.26	10.22	9.40	9.79

ตารางที่ G.1: ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV/T แบบ NFS

เวลา	Free Flow η_E (%)	1.0 m/s η_E (%)	2.0 m/s η_E (%)	2.5 m/s η_E (%)	3.0 m/s η_E (%)
12.00	9.13	10.12	10.23	9.31	9.74
12.10	9.18	10.08	10.20	9.26	9.70
12.20	9.07	10.07	10.12	9.26	9.70
12.30	9.00	10.05	10.13	9.25	9.71
12.40	8.88	9.97	10.11	9.22	9.67
12.50	8.99	10.03	10.02	9.67	9.67
13.00	8.94	9.91	10.03	10.60	9.73
13.10	8.93	10.31	9.96	10.22	10.53
13.20	9.00	10.08	9.91	9.62	10.28
13.30	9.04	9.90	9.89	9.33	9.71
13.40	8.91	9.87	9.80	9.55	9.74
13.50	9.04	9.85	9.89	9.39	10.50
14.00	8.89	9.64	9.79	9.43	10.55
14.10	9.09	9.83	9.86	9.40	10.00
14.20	9.29	9.90	9.83	9.46	10.37
14.30	9.34	10.61	9.90	9.68	10.21
14.40	9.32	10.68	10.04	10.23	10.75
14.50	9.36	10.07	10.67	9.78	10.80
15.00	9.51	10.52	11.25	9.72	10.42
15.10	9.59	10.72	11.16	9.72	10.58
15.20	9.82	10.71	10.78	10.11	10.69
15.30	10.28	10.42	10.59	10.32	10.87
15.40	10.24	10.18	10.68	10.20	11.47
15.50	10.77	10.29	10.67	10.28	11.19
16.00	10.99	10.37	10.72	10.52	11.21
16.10	10.70	10.95	10.96	10.75	11.47
16.20	10.82	10.70	11.39	10.77	11.55
16.30	10.96	10.63	11.61	10.79	11.63
16.40	11.18	10.63	11.64	10.77	11.74
16.50	11.34	10.63	11.58	10.88	11.77
17.00	11.49	13.01	11.69	11.01	11.81

ตารางที่ G.1 ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV/T แบบ NFS (ต่อ)

เวลา	Free Flow η_E (%)	1.0 m/s η_E (%)	2.0 m/s η_E (%)	2.5 m/s η_E (%)	3.0 m/s η_E (%)
8.00	11.85	13.03	12.91	11.75	11.29
8.10	11.67	12.99	12.87	11.61	11.19
8.20	11.51	12.92	12.82	11.48	11.06
8.30	11.35	12.87	12.76	11.30	10.92
8.40	11.16	12.79	12.67	11.15	10.77
8.50	10.98	12.64	12.43	11.03	10.61
9.00	10.74	12.38	12.21	10.82	10.45
9.10	10.54	12.17	12.04	10.65	10.83
9.20	10.39	12.02	11.87	10.52	10.78
9.30	10.24	11.88	11.74	10.36	10.70
9.40	10.10	11.69	11.55	10.29	10.34
9.50	10.03	11.47	11.39	10.11	10.11
10.00	9.88	11.31	11.20	9.92	10.49
10.10	9.79	11.00	11.06	9.88	9.99
10.20	9.40	10.76	10.94	9.76	9.92
10.30	9.36	11.18	10.76	9.69	9.85
10.40	9.28	11.35	10.64	9.54	9.81
10.50	9.31	11.28	10.49	9.48	9.75
11.00	9.33	10.78	10.37	9.42	9.67
11.10	9.36	10.56	10.15	9.36	9.64
11.20	9.29	10.54	10.10	9.25	9.60
11.30	9.02	10.01	9.97	9.14	9.55
11.40	9.00	9.85	9.82	9.11	9.53
11.50	9.07	9.75	9.53	9.01	9.49
12.00	8.95	9.61	9.63	8.89	9.44
12.10	9.01	9.56	9.58	8.82	9.40
12.20	8.93	9.56	9.53	8.91	9.39
12.30	8.86	9.55	9.53	8.91	9.41
12.40	8.71	9.43	9.48	8.80	9.36
12.50	8.78	9.54	9.41	9.30	9.36
13.00	8.81	9.37	9.41	10.34	9.42
13.10	8.75	9.83	9.32	9.98	10.28
13.20	8.76	9.52	9.20	9.21	10.01
13.30	8.88	9.31	9.15	8.94	9.40
13.40	8.73	9.31	9.00	9.23	9.43
13.50	8.86	9.31	9.17	9.06	10.24

ตารางที่ G.2: ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV/T แบบ UFS

เวลา	Free Flow η_E (%)	1.0 m/s η_E (%)	2.0 m/s η_E (%)	2.5 m/s η_E (%)	3.0 m/s η_E (%)
14.00	8.71	9.27	9.01	9.13	10.30
14.10	8.95	9.36	9.09	9.09	9.72
14.20	9.17	9.37	9.09	9.22	10.11
14.30	9.23	10.35	9.25	9.47	9.94
14.40	9.22	10.40	9.42	10.04	10.51
14.50	9.22	9.69	10.32	9.59	10.57
15.00	9.43	10.19	11.07	9.50	10.16
15.10	9.51	10.45	10.93	9.49	10.33
15.20	9.77	10.41	10.45	9.92	10.45
15.30	10.27	10.08	10.17	10.14	10.64
15.40	10.17	9.75	10.35	10.01	11.28
15.50	10.78	9.86	10.34	10.13	10.99
16.00	10.97	9.96	10.38	10.39	11.00
16.10	10.66	10.71	10.65	10.59	11.28
16.20	10.80	10.41	11.22	10.62	11.37
16.30	10.95	10.33	11.52	10.61	11.46
16.40	11.17	10.31	11.55	10.58	11.57
16.50	11.31	10.28	11.49	10.70	11.60
17.00	11.47	13.03	11.62	10.87	11.64

ตารางที่ G.2 ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV/T แบบ UFS (ต่อ)

ภาคผนวก H

ประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง PV/T

เวลา	Free Flow η_{TH} (%)	1.0 m/s η_{TH} (%)	2.0 m/s η_{TH} (%)	2.5 m/s η_{TH} (%)	3.0 m/s η_{TH} (%)
8.00	16.28	29.07	18.15	34.08	30.72
8.10	17.55	31.27	18.63	34.99	32.91
8.20	18.53	33.58	19.97	36.52	34.87
8.30	19.49	35.14	24.37	37.78	36.39
8.40	20.23	36.47	27.57	38.75	37.61
8.50	20.89	37.65	30.60	38.96	38.67
9.00	21.34	38.55	32.90	39.56	39.45
9.10	21.53	33.20	34.47	39.96	37.22
9.20	21.37	34.56	35.74	40.06	37.53
9.30	22.46	33.62	36.78	40.27	38.14
9.40	22.63	38.21	37.71	40.52	39.90
9.50	23.17	39.22	38.15	40.90	40.67
10.00	23.46	35.00	38.66	41.02	39.28
10.10	23.55	39.50	39.02	41.23	40.98
10.20	23.84	39.60	39.43	41.40	41.15
10.30	24.07	39.72	39.71	41.60	41.31
10.40	24.35	39.69	40.07	41.64	41.40
10.50	24.36	39.96	40.27	41.77	41.54
11.00	24.56	40.10	40.58	41.81	41.68
11.10	24.60	40.20	40.61	41.90	41.75
11.20	24.68	40.27	41.04	42.01	41.81
11.30	24.79	40.37	41.15	42.07	41.90
11.40	24.89	40.38	41.32	42.02	41.93
11.50	25.01	40.43	41.28	41.88	42.00

ตารางที่ H.1: ประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง PV/T แบบ NFS

เวลา	Free Flow η_{TH} (%)	1.0 m/s η_{TH} (%)	2.0 m/s η_{TH} (%)	2.5 m/s η_{TH} (%)	3.0 m/s η_{TH} (%)
12.00	25.11	40.52	41.39	42.05	42.08
12.10	25.27	40.54	41.62	42.20	42.14
12.20	25.35	40.51	41.81	42.31	42.15
12.30	25.37	40.44	41.33	42.14	42.13
12.40	25.45	40.54	41.65	41.99	42.20
12.50	25.46	40.54	41.69	42.03	42.20
13.00	25.44	40.36	41.69	41.94	42.11
13.10	25.56	29.43	41.79	41.84	40.11
13.20	25.49	36.53	41.80	41.88	40.94
13.30	25.48	40.39	41.80	41.92	42.13
13.40	25.43	40.33	41.83	41.34	42.09
13.50	25.05	34.11	41.83	41.68	40.24
14.00	24.81	33.98	41.88	41.76	40.05
14.10	24.66	39.85	41.74	41.37	41.59
14.20	24.22	38.05	41.52	41.49	40.66
14.30	24.32	39.08	41.51	40.75	41.11
14.40	23.97	32.38	41.43	39.71	39.15
14.50	22.77	35.40	40.46	40.22	38.88
15.00	23.22	38.84	39.99	40.89	40.49
15.10	22.91	37.96	39.42	39.72	39.92
15.20	22.01	37.95	40.22	37.65	39.43
15.30	21.06	37.17	39.17	33.80	38.49
15.40	15.90	30.32	39.35	34.34	31.04
15.50	17.71	35.79	38.64	34.71	35.71
16.00	19.05	34.11	34.02	35.06	35.54
16.10	12.81	32.82	26.22	28.64	30.85
16.20	11.62	30.75	30.31	35.03	28.53
16.30	11.53	26.14	29.36	32.21	25.13
16.40	11.44	12.15	29.10	27.40	18.33
16.50	11.34	2.14	16.87	17.30	15.16
17.00	11.24	7.88	16.32	13.70	10.57

ตารางที่ H.1 ประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง PV/T แบบ NFS (ต่อ)

เวลา	Free Flow η_{TH} (%)	1.0 m/s η_{TH} (%)	2.0 m/s η_{TH} (%)	2.5 m/s η_{TH} (%)	3.0 m/s η_{TH} (%)
8.00	12.70	22.64	15.56	30.16	28.09
8.10	13.80	24.37	15.97	30.97	30.09
8.20	14.66	26.22	17.12	32.34	31.90
8.30	15.55	27.48	20.90	33.47	33.28
8.40	16.25	28.57	23.66	34.34	34.40
8.50	16.90	29.55	26.27	34.53	35.38
9.00	17.35	30.32	28.25	35.07	36.09
9.10	17.55	25.91	29.61	35.44	34.03
9.20	17.38	27.01	30.72	35.53	34.28
9.30	18.52	26.25	31.62	35.72	34.84
9.40	18.70	30.03	32.44	35.95	36.41
9.50	19.29	30.91	32.83	36.30	37.16
10.00	19.60	27.37	33.28	36.41	35.84
10.10	19.71	31.17	33.61	36.60	37.44
10.20	20.03	31.26	33.97	36.77	37.56
10.30	20.29	31.37	34.22	36.95	37.70
10.40	20.61	31.34	34.54	36.99	37.82
10.50	20.62	31.59	34.73	37.12	37.97
11.00	20.84	31.72	35.01	37.15	38.10
11.10	20.90	31.82	35.04	37.24	38.14
11.20	20.98	31.89	35.44	37.34	38.21
11.30	21.12	31.98	35.53	37.40	38.28
11.40	21.23	31.99	35.69	37.35	38.31
11.50	21.38	32.04	35.66	37.22	38.39
12.00	21.49	32.13	35.76	37.38	38.45
12.10	21.68	32.15	35.98	37.52	38.51
12.20	21.77	32.12	36.16	37.63	38.49
12.30	21.80	32.05	35.71	37.46	38.46
12.40	21.89	32.15	36.01	37.32	38.55
12.50	21.90	32.15	36.05	37.36	38.46
13.00	21.88	31.97	36.04	37.28	38.40
13.10	22.02	22.92	36.14	37.18	36.53
13.20	21.94	28.62	36.15	37.22	37.31
13.30	21.92	32.00	36.16	37.26	38.44
13.40	21.86	31.95	36.18	36.71	38.38
13.50	21.42	26.65	36.18	37.03	36.65

ตารางที่ H.2: ประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง PV/T แบบ UFS

เวลา	Free Flow η_{TH} (%)	1.0 m/s η_{TH} (%)	2.0 m/s η_{TH} (%)	2.5 m/s η_{TH} (%)	3.0 m/s η_{TH} (%)
14.00	21.14	26.54	36.23	37.10	36.47
14.10	20.97	31.49	36.09	36.74	37.93
14.20	20.46	29.89	35.88	36.85	37.04
14.30	20.57	30.79	35.87	36.16	37.47
14.40	20.17	25.26	35.80	35.21	35.64
14.50	18.85	27.69	34.90	35.67	35.40
15.00	19.34	30.58	34.47	36.29	36.90
15.10	19.00	29.82	33.96	35.22	36.37
15.20	18.04	29.81	34.68	33.35	35.95
15.30	17.07	29.15	33.73	29.92	35.04
15.40	12.38	23.62	33.90	30.39	28.23
15.50	13.94	28.01	33.27	30.72	32.49
16.00	15.14	26.65	29.22	31.04	32.35
16.10	9.85	25.62	22.50	25.33	28.07
16.20	8.91	23.97	26.01	31.00	25.97
16.30	8.84	20.34	25.19	28.50	22.87
16.40	8.77	9.43	24.97	24.23	16.68
16.50	8.69	1.66	14.46	15.29	13.80
17.00	8.61	16.32	13.99	12.11	9.62

ตารางที่ H.2 ประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง PV/T แบบ UFS (ต่อ)

ภาคผนวก I

ประสิทธิภาพทางความร้อนรวมของแผง PV/T

เวลา	Free Flow $\eta_{O,TH}$ (%)	1.0 m/s $\eta_{O,TH}$ (%)	2.0 m/s $\eta_{O,TH}$ (%)	2.5 m/s $\eta_{O,TH}$ (%)	3.0 m/s $\eta_{O,TH}$ (%)
8.00	47.73	67.01	52.03	61.46	60.92
8.10	48.58	67.78	52.40	63.44	62.86
8.20	49.14	69.10	53.62	65.54	64.51
8.30	49.72	70.18	57.87	66.76	65.69
8.40	50.00	70.92	60.77	67.73	66.54
8.50	50.20	70.80	63.50	68.62	67.19
9.00	50.05	71.03	65.33	69.06	67.58
9.10	49.74	71.00	66.47	63.17	66.28
9.20	49.18	70.62	67.39	64.27	66.49
9.30	49.91	70.45	68.08	62.98	66.88
9.40	49.72	70.28	68.63	67.52	67.76
9.50	49.99	70.19	68.69	68.11	67.95
10.00	49.81	69.80	68.81	63.36	67.50
10.10	49.67	69.42	68.83	67.84	67.98
10.20	49.28	69.06	69.02	67.69	67.98
10.30	49.36	70.12	68.97	67.66	67.97
10.40	49.36	70.52	69.07	67.24	67.96
10.50	49.49	70.47	68.89	67.40	67.93
11.00	49.68	69.46	68.97	67.35	67.90
11.10	49.55	69.11	68.49	67.26	67.87
11.20	49.47	69.24	68.88	67.19	67.85
11.30	49.06	68.11	68.78	66.90	67.81
11.40	48.97	67.69	68.68	66.94	67.80
11.50	49.33	67.33	68.18	66.71	67.76

ตารางที่ I.1: ประสิทธิภาพทางความร้อนรวมของแผง PV/T แบบ NFS

เวลา	Free Flow	1.0 m/s	2.0 m/s	2.5 m/s	3.0 m/s
	$\eta_{O,TH}$ (%)	$\eta_{O,TH}$ (%)	$\eta_{O,TH}$ (%)	$\eta_{O,TH}$ (%)	$\eta_{O,TH}$ (%)
12.00	49.14	67.15	68.31	66.57	67.72
12.10	49.44	67.18	68.47	66.44	67.68
12.20	49.22	67.25	68.43	66.44	67.67
12.30	49.07	67.02	68.00	66.34	67.69
12.40	48.83	66.69	68.24	66.35	67.64
12.50	49.11	66.89	68.05	67.53	67.64
13.00	48.98	66.48	68.09	69.80	67.70
13.10	49.07	67.33	68.00	57.52	67.83
13.20	49.17	66.80	67.87	63.30	67.98
13.30	49.28	66.43	67.83	66.48	67.68
13.40	48.86	65.81	67.62	67.01	67.71
13.50	48.85	66.00	67.86	60.20	67.86
14.00	48.20	65.50	67.63	60.17	67.81
14.10	48.59	65.71	67.67	66.11	67.92
14.20	48.66	65.96	67.40	64.45	67.95
14.30	48.89	67.16	67.56	66.06	67.98
14.40	48.50	66.29	67.84	60.59	67.44
14.50	47.40	65.18	68.54	62.55	67.31
15.00	48.25	67.04	69.61	65.92	67.92
15.10	48.13	66.44	68.79	65.01	67.77
15.20	47.84	64.42	68.59	66.02	67.57
15.30	48.11	59.97	67.03	65.78	67.09
15.40	42.86	59.81	67.47	58.37	61.21
15.50	46.06	60.48	66.73	64.25	65.17
16.00	47.97	61.02	62.23	63.15	65.03
16.10	40.97	56.36	55.06	62.40	61.05
16.20	40.10	61.84	60.27	60.32	58.93
16.30	40.38	58.96	59.92	55.56	55.75
16.40	40.86	54.31	59.73	40.97	49.22
16.50	41.17	44.60	47.34	30.86	46.13
17.00	41.47	42.11	47.07	42.68	41.64

ตารางที่ I.1 ประสิทธิภาพทางความร้อนรวมของแผง PV/T แบบ NFS (ต่อ)

เวลา	Free Flow $\eta_{O,TH}$ (%)	1.0 m/s $\eta_{O,TH}$ (%)	2.0 m/s $\eta_{O,TH}$ (%)	2.5 m/s $\eta_{O,TH}$ (%)	3.0 m/s $\eta_{O,TH}$ (%)
8.00	43.90	59.81	49.54	57.68	57.80
8.10	44.51	60.42	49.85	59.32	59.52
8.20	44.94	61.44	50.87	61.12	60.99
8.30	45.41	62.29	54.49	62.10	62.02
8.40	45.62	62.87	57.00	62.93	62.76
8.50	45.79	62.70	58.98	63.70	63.29
9.00	45.62	62.54	60.38	63.98	63.59
9.10	45.28	62.01	61.31	58.64	62.52
9.20	44.71	61.75	61.96	59.55	62.66
9.30	45.46	61.50	62.51	58.28	62.99
9.40	45.28	61.41	62.85	62.30	63.62
9.50	45.69	61.23	62.80	62.76	63.76
10.00	45.61	60.60	62.76	58.42	63.44
10.10	45.48	60.26	62.70	62.42	63.73
10.20	44.76	59.78	62.76	62.21	63.67
10.30	44.92	61.06	62.53	62.16	63.63
10.40	45.02	61.54	62.56	61.74	63.64
10.50	45.12	61.48	62.33	61.82	63.62
11.00	45.40	60.22	62.30	61.80	63.56
11.10	45.54	59.73	61.74	61.72	63.50
11.20	45.43	59.76	62.02	61.52	63.48
11.30	44.85	58.44	61.78	61.32	63.41
11.40	44.91	57.99	61.53	61.25	63.39
11.50	45.25	57.64	60.75	61.00	63.35
12.00	45.04	57.41	61.10	60.79	63.28
12.10	45.39	57.39	61.20	60.62	63.24
12.20	45.28	57.48	61.22	60.84	63.21
12.30	45.12	57.31	60.80	60.77	63.22
12.40	44.81	56.90	60.96	60.56	63.17
12.50	45.02	57.22	60.81	61.89	63.08
13.00	45.06	56.65	60.80	64.46	63.19
13.10	45.05	57.19	60.68	53.48	63.58
13.20	44.98	56.60	60.35	58.01	63.64
13.30	45.29	56.49	60.22	60.80	63.18
13.40	44.83	56.05	59.86	61.46	63.20
13.50	44.73	55.81	60.33	55.36	63.61

ตารางที่ 1.2: ประสิทธิภาพทางความร้อนรวมของแผง PV/T แบบ UFS

เวลา	Free Flow $\eta_{O,TH}$ (%)	1.0 m/s $\eta_{O,TH}$ (%)	2.0 m/s $\eta_{O,TH}$ (%)	2.5 m/s $\eta_{O,TH}$ (%)	3.0 m/s $\eta_{O,TH}$ (%)
14.00	44.06	55.75	59.95	55.42	63.57
14.10	44.52	56.10	60.02	60.67	63.50
14.20	44.58	56.03	59.81	59.38	63.65
14.30	44.85	58.14	60.23	60.96	63.63
14.40	44.43	57.17	60.59	56.27	63.30
14.50	43.12	55.76	62.07	57.88	63.20
15.00	44.14	57.81	63.60	60.80	63.65
15.10	44.02	57.52	62.73	59.96	63.56
15.20	43.75	55.87	62.19	61.03	63.45
15.30	44.10	52.05	60.49	60.84	63.04
15.40	39.15	51.40	61.14	54.23	57.91
15.50	42.31	52.10	60.47	59.57	61.41
16.00	44.01	52.57	56.53	58.73	61.30
16.10	37.91	49.69	50.53	58.04	57.77
16.20	37.32	53.66	55.54	56.24	55.88
16.30	37.65	51.28	55.50	51.98	53.02
16.40	38.15	47.58	55.36	39.02	47.12
16.50	38.46	39.97	44.70	30.13	44.33
17.00	38.79	44.49	44.56	40.71	40.26

ตารางที่ 1.2 ประสิทธิภาพทางความร้อนรวมของแผง PV/T แบบ UFS (ต่อ)