

ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนด้วยเซลล์แสงอาทิตย์
ในประเทศไทย

THE STUDY ON OPTIMIZATION CONDITIONS OF
PHOTOVOLTAIC AND THERMAL IN THAILAND

สุพัตน์ ทองหนู้ย
SUPAT THONGNUNUI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนด้วยเซลล์
แสงอาทิตย์ในประเทศไทย

สุวัฒน์ ทองหนู้ย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

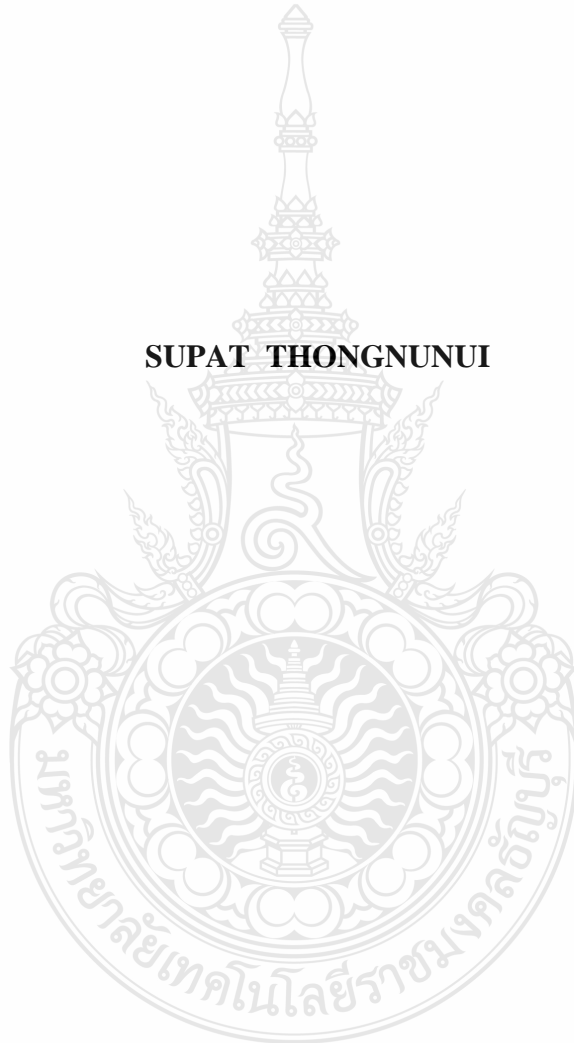
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

**THE STUDY ON OPTIMIZATION CONDITIONS OF
PHOTOVOLTAIC AND THERMAL IN THAILAND**

SUPAT THONGNUNUI



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF THE
REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
PROGRAM IN MECHANICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI
ACADEMIC YEAR 2014
COPYRIGHT OF RAJAMANGALA UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY THANYABURI**

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนด้วยเซลล์
แสงอาทิตย์ในประเทศไทย
The study on Optimization Conditions of Photovoltaic and Thermal
in Thailand

ชื่อ-นามสกุล นายสุวัฒน์ ทองหนู้ย
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สถาพร ทองวิก, Ph.D.
ปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ดร.มนูศักดิ์ จานทอง, Ph.D.)

..... กรรมการ
(ดร.พิพัฒน์ ปราโมทย์, Ph.D.)

..... กรรมการ
(.....)

..... กรรมการ
(ดร.สถาพร ทองวิก, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สิวกอ อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ เดือน พ.ศ.

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนด้วย เซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทย
ชื่อ – นามสกุล	นายสุพัฒน์ ทองหนูน้อย
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์สถาพร ทองวิก, Ph.D.
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งท่อน้ำระบายความร้อนไว้ด้านหลังแผงรับแสงอาทิตย์ (PVT) สองชนิด ได้แก่ แบบผลึกพื้นที่รับแสง 1.96 ตารางเมตร และแบบอะมอร์ฟัส พื้นที่รับแสง 1.69 ตารางเมตร ติดตั้งท่อน้ำระบายความร้อนไว้ด้านหลังแผงรับแสงอาทิตย์ ทดสอบที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี (ละติจูด 14.04 และ ลองจิจูด 100.73) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนและทางไฟฟ้า โดยทดสอบที่อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ 0.01, 0.02 และ 0.03 กิโลกรัมต่อวินาที ตามลำดับ

ผลการทดสอบในวันที่ค่าความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยระหว่าง 600-800 วัตต์ต่อตารางเมตร และอุณหภูมิของน้ำขาออกแผงรับแสงอยู่ระหว่าง 29-60 องศาเซลเซียส พบว่าประสิทธิภาพทางความร้อนและทางไฟฟ้าขึ้นอยู่กับอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ สภาวะที่เหมาะสมของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองชนิด คือ ที่อัตราการไหล 0.03 กิโลกรัมต่อวินาที โดยที่เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกให้ประสิทธิภาพทางความร้อนและทางไฟฟ้าที่ร้อยละ 44.46 และ 13.86 ตามลำดับสูงกว่าแบบอะมอร์ฟัส ที่ร้อยละ 35.43 และ 11.50 ตามลำดับ

ผลการศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมสภาวะการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองชนิดเพื่อให้ทำงานที่สภาวะที่เหมาะสม นอกจากนี้จะได้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าสูงสุดแล้วยังได้น้ำร้อนไว้ใช้งานอีกด้วย

คำสำคัญ: พลังงานแสงอาทิตย์ แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อน พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานทดแทน

Thesis Title	The Study on Optimization Conditions of Photovoltaic and Thermal in Thailand
Name – Surname	Mr.Supat Tongnunui
Program	Mechanical Engineering
Thesis Advisor	Mr.Sathaporn Thongwik, Ph.D.
Academic Year	2014

ABSTRACT

This research aimed to study the suitable operation of the two types of photovoltaic–thermal (PVT) modules such as the crystal line type with absorbed area of 1.96 m² and the amorphous type with absorbed area of 1.69 m². The experiments were set up at the Rajamangala University of Technology Thanyaburi Pathum-Thani Thailand (latitude 14.04 and longitude 100.73). In order to compare the thermal and photovoltaic efficiencies, the experiments were tested with the water mass flow rate of 0.01 , 0.02 and 0.03 kg/s respectively.

The experiments were tested during daytime with the solar radiation between 600-800 w/m² and the water outlet temperature of 29-60°C. The result shown that the thermal efficiency and photovoltaic efficiency were depended on the water mass flow rate. The suitable conditions for both PVT used 0.03 kg/s of the water mass flow rate. The crystal line type had the thermal and photovoltaic efficiency of 44.46 % and 13.86 % respectively, which were higher than those of the amorphous type with 35.43% and 11.50 % respectively.

This result could be applied to control the suitable operation condition of both PVT types. Not only, it has the highest electrical efficiency, but also it can be applied for hot water applications as well.

Keywords: solar energy, photovoltaic–thermal, PVT, renewable energy

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ดร.สถาพร ทองวิก ซึ่งได้ให้คำปรึกษาแนะนำ และหาแนวทางแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำงานวิจัย โดยตลอด ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ และขอบคุณอาจารย์พงศ์พิชญ์ ต่วนภูษา เอื้อเพื่อวัสดุอุปกรณ์ ขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่เอื้อเพื่อสถานที่ นักศึกษาปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ช่วยเก็บข้อมูล และวิทยาลัยเกษตร และเทคโนโลยีกระบี่ สังกัดสำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษาที่สนับสนุนทุนการศึกษา

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ให้กำลังใจเสมอมา ทำให้สามารถฝ่าฟันอุปสรรคนานาประการจนสำเร็จ ประโยชน์อันใด จากงานวิจัย ขอมอบเป็นกตัญญูตราบาแต่ บิดา มารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

สุพัฒน์ ทองหนูชัย



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญรูป.....	(8)
สารบัญตาราง.....	(11)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(12)
บทที่ 1 บทนำ.....	13
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	13
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	14
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	14
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	14
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.1 ทฤษฎีพลังงานแสงอาทิตย์.....	15
2.2 เซลล์แสงอาทิตย์.....	19
2.3 การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์.....	20
2.4 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์.....	22
2.5 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์.....	24
2.6 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์.....	25
2.7 คุณลักษณะและตัวแปรที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์.....	29
2.8 การผลิตน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์.....	37
2.9 ประเภทของระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์.....	39
2.10 สมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์.....	40
2.11 การถ่ายเทความร้อน.....	41
2.12 เทคโนโลยีการผลิตน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์.....	58
2.13 การพิจารณาประสิทธิภาพแผงรับแสงอาทิตย์.....	60

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.14 การหาประสิทธิภาพทางความร้อนของเซลล์แสงอาทิตย์.....	66
2.15 การหาประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	66
2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	67
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	68
3.1 เครื่องมือและวิธีการ.....	68
3.2 การออกแบบการทดสอบ.....	70
3.3 การทดสอบแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์.....	70
3.4 วิธีการทดสอบ.....	71
3.5 การรวบรวมและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	73
บทที่ 4 ผลและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	75
4.1 ผลการประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อน.....	75
4.2 ผลการประเมินประสิทธิภาพเชิงไฟฟ้า.....	78
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	83
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	83
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	83
5.3 ปัญหาและอุปสรรค.....	83
รายการอ้างอิง.....	84
ภาคผนวก.....	87
ภาคผนวก กเอกสารข้อมูลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	88
ภาคผนวก ขผลงานตีพิมพ์.....	95
ประวัติผู้เขียน.....	108

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ระยะทางจากโลกถึงดวงอาทิตย์.....	15
รูปที่ 2.2พลังงานแสงอาทิตย์จากประเทศต่างๆ ทั่วโลก.....	16
รูปที่ 2.3พลังงานแสงอาทิตย์ภายในประเทศไทย.....	18
รูปที่ 2.4เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกซิลิคอนในปี ค.ศ.1954.....	20
รูปที่ 2.5ผลึกสารซิลิคอนบริสุทธิ์.....	21
รูปที่ 2.6เกลเลียมอาเซไนด์.....	21
รูปที่ 2.7แคดเมียมเทลเลอไรด์.....	21
รูปที่ 2.8การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์.....	23
รูปที่ 2.9โครงสร้างภายในรอยต่อ.....	23
รูปที่ 2.10 โครงสร้างภายในแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	25
รูปที่ 2.11 เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว.....	26
รูปที่ 2.12 การผลิตเซลล์แบบผลึกเดี่ยว.....	26
รูปที่ 2.13 แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกรวม.....	27
รูปที่ 2.14 การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกรวม.....	27
รูปที่ 2.15 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส.....	28
รูปที่ 2.16 การต่อของเซลล์แสงอาทิตย์.....	28
รูปที่ 2.17 การทดสอบเพื่อสร้างกราฟกระแสและแรงดัน.....	29
รูปที่ 2.18 ค่าต่างที่สามารถหาได้ใน I-Vcurve.....	30
รูปที่ 2.19 กราฟ I-V curve กรณีความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง.....	30
รูปที่ 2.20 กราฟ P-V curve กรณีความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง.....	31
รูปที่ 2.21กราฟ I-V curve กรณีอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง.....	33
รูปที่ 2.22กราฟ P-V curve กรณีอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง.....	33
รูปที่ 2.23กราฟแสดงการหาค่าฟิลแฟคเตอร์.....	35
รูปที่ 2.24วงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ในทางปฏิบัติ.....	35
รูปที่ 2.25ตัวกักเก็บความร้อน.....	37
รูปที่ 2.26การเปรียบเทียบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์.....	41

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.27 ทิศทางการไหลของความร้อน.....	45
รูปที่ 2.28 ปริมาตรฮีเลเมนต์ที่ใช้วิเคราะห์การนำความร้อนในหนึ่งมิติ.....	45
รูปที่ 2.29 ปริมาตรของฮีเลเมนต์ที่ใช้วิเคราะห์การนำความร้อนในสามมิติ.....	47
รูปที่ 2.30 ค่าสภาพการนำความร้อนของของแข็งบางชนิด.....	50
รูปที่ 2.31 ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุฉนวนที่ใช้กับความเย็นยิ่งยวด.....	51
รูปที่ 2.32 การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาออกจากแผ่นเรียบ.....	53
รูปที่ 2.33 การนำและการพาความร้อนหนึ่งมิติผ่านครีบทรงเรขาคณิต.....	55
รูปที่ 2.34 แผงระบายความร้อน.....	57
รูปที่ 2.35 ส่วนประกอบของแผงรับแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ.....	59
รูปที่ 2.36 กราฟประสิทธิภาพตามมาตรฐาน ASHRAE 93:77.....	61
รูปที่ 3.1 การติดตั้งการทดลองแผงผลิตน้ำร้อนและไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์.....	68
รูปที่ 3.2 อุปกรณ์วัดความเข้มของแสงอาทิตย์.....	68
รูปที่ 3.3 เครื่องวัดอุณหภูมิ.....	69
รูปที่ 3.4 อุปกรณ์เก็บบันทึกข้อมูล.....	69
รูปที่ 3.5 ไดอะแกรมการทดสอบ.....	72
รูปที่ 3.6 แผนผังการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล.....	74
รูปที่ 4.1(a) ประสิทธิภาพเชิงความร้อน PVT c-si Type ที่อัตราการไหล 0.01 kg/s.....	75
(b) ประสิทธิภาพเชิงความร้อน PVT a-si Type ที่อัตราการไหล 0.01 kg/s.....	75
รูปที่ 4.1(c) ประสิทธิภาพเชิงความร้อน PVT c-si Type ที่อัตราการไหล 0.02 kg/s.....	76
(d) ประสิทธิภาพเชิงความร้อน PVT a-si Type ที่อัตราการไหล 0.02 kg/s.....	76
รูปที่ 4.1(e) ประสิทธิภาพเชิงความร้อน PVT c-si Type ที่อัตราการไหล 0.03 kg/s.....	77
(f) ประสิทธิภาพเชิงความร้อน PVT a-si Type ที่อัตราการไหล 0.03 kg/s.....	77
รูปที่ 4.2(a) ประสิทธิภาพเชิงไฟฟ้า PVT c-si Type ที่อัตราการไหล 0.01 kg/s.....	79
(b) ประสิทธิภาพเชิงไฟฟ้า PVT a-si Type ที่อัตราการไหล 0.01 kg/s.....	79
รูปที่ 4.2(c) ประสิทธิภาพเชิงไฟฟ้า PVT c-si Type ที่อัตราการไหล 0.02 kg/s.....	80
(d) ประสิทธิภาพเชิงไฟฟ้า PVT a-si Type ที่อัตราการไหล 0.02 kg/s.....	80

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.2 (e) ประสิทธิภาพเชิงไฟฟ้าPVT c-si Type ที่อัตราการไหล0.03 kg/s.....	81
(f)ประสิทธิภาพเชิงไฟฟ้าPVT a-si Type ที่อัตราการไหล0.03 kg/s.....	81



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ระดับอนุหภูมิของแผงรับแสงอาทิตย์.....	59
ตารางที่ 3.1 แสดงเงื่อนไขในการทดสอบ.....	70



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

PV	คือ Photovoltaic
PVT	คือ Photovoltaic and Thermal
a-si	คือ เซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัส
c-si	คือ เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก
I-V curv	คือ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า
P-V curv	คือ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานจากธรรมชาติ เป็นพลังงานที่สะอาดปราศจากมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ได้หลากหลาย ดังนั้นหากมนุษย์สามารถนำพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่มีมหาศาล มาทดแทนพลังงานจากฟอสซิล ซึ่งนอกจากไม่ยั่งยืนแล้วยังก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมด้วย ปัจจุบันมีการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้อยู่หลักๆ 2 ด้าน ได้แก่ การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells) ซึ่งเซลล์ดังกล่าวผลิตจากธาตุซิลิกอน และการผลิตความร้อนโดยใช้เทคโนโลยีการนำแผ่รังสีแสงอาทิตย์มาใช้ในการผลิตน้ำสำหรับอุปโภคและบริโภค

สำหรับประเทศไทย ซึ่งตั้งอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตร อากาศค่อนข้างร้อน ทำให้เมื่อใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์เป็นเวลานานอุณหภูมิจะสูง ทำให้ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานต่ำลง ฉะนั้นหากจะเพิ่มประสิทธิภาพของการนำพลังงานจากแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ จึงมีการทำแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์รับความร้อนส่วนเกินจากการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่ายเทสู่น้ำที่ไหลในท่อที่อยู่ด้านล่างของแผง จึงทำให้แผงเซลล์มีอุณหภูมิลดลง มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์และสามารถนำน้ำร้อนที่ผลิตได้ไปใช้ประโยชน์ในการอุปโภคและอื่นๆ ซึ่งการทดลองทำให้เกิดแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ หรือที่เรียกว่า “Photovoltaic and Thermal”

ปัจจุบันมีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์หลายชนิด แต่ที่นิยมใช้ในประเทศไทยนั้นนิยมใช้แบบผลึกและแบบอะมอร์ฟัส เนื่องจากหาง่ายในท้องตลาดและราคาไม่สูงมากนัก ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งหาสถานะที่เหมาะสมที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าและความร้อน ซึ่งหากสามารถหาสถานะที่เหมาะสมได้นั้น ก็สามารถปรับองค์ประกอบต่างๆให้เหมาะสม เพื่อผู้ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถประเมินศักยภาพในการใช้งานได้อย่างถูกต้องและเพียงพอต่อการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อสภาวะการทำงานของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนแบบผลึกและแบบอะมอร์ฟัส

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 2 แบบ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ทดสอบโดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ แบบผลึกและแบบอะมอร์ฟัส

1.3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา คือ ความเข้มแสงอาทิตย์ อัตราการไหล และประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อน

1.3.3 สภาวะที่เหมาะสมวิเคราะห์จากประสิทธิภาพของระบบ

1.3.4 ทดสอบในพื้นที่ภาคกลาง จ.ปทุมธานี

1.3.5 ติดตั้งแผงทำมุมเอียง 15 องศา

1.3.6 ทดสอบตามมาตรฐาน ASHRAE 93-77

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงตัวแปรที่ส่งผลต่อสภาวะการทำงานของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อน แบบผลึก (Crystal Panels) และ แบบอะมอร์ฟัส (Amorphous Panels)

1.4.2 ได้สภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 2 แบบ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลังงานแสงอาทิตย์

2.1.1 ดวงอาทิตย์

ดวงอาทิตย์ เป็นกลุ่มก๊าซร้อนรูปทรงกลมที่มีความหนาแน่นสูง มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.39×10^9 เมตร และมีระยะห่างเฉลี่ยจากโลกประมาณ 1.5×10^{11} เมตร ดังรูปที่ 2.1 เมื่อสังเกตจากโลก ดวงอาทิตย์จะใช้เวลาในการหมุนรอบแกนตัวเองประมาณ 4 สัปดาห์ อย่างไรก็ตาม ดวงอาทิตย์ไม่ได้หมุนอย่างของแข็ง การหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์ที่บริเวณศูนย์สูตรจะใช้เวลาประมาณ 27 วัน และสำหรับบริเวณขั้วโลกประมาณ 30 วัน ดวงอาทิตย์เปรียบเสมือนวัตถุดำที่มีอุณหภูมิประสิทธิภาพ 5,777 K อุณหภูมิที่จุดศูนย์กลางของดวงอาทิตย์มีค่าประมาณ 8×10^6 ถึง 40×10^6 K และมีความหนาแน่นประมาณ 100 เท่าของความหนาแน่นของน้ำ [2]



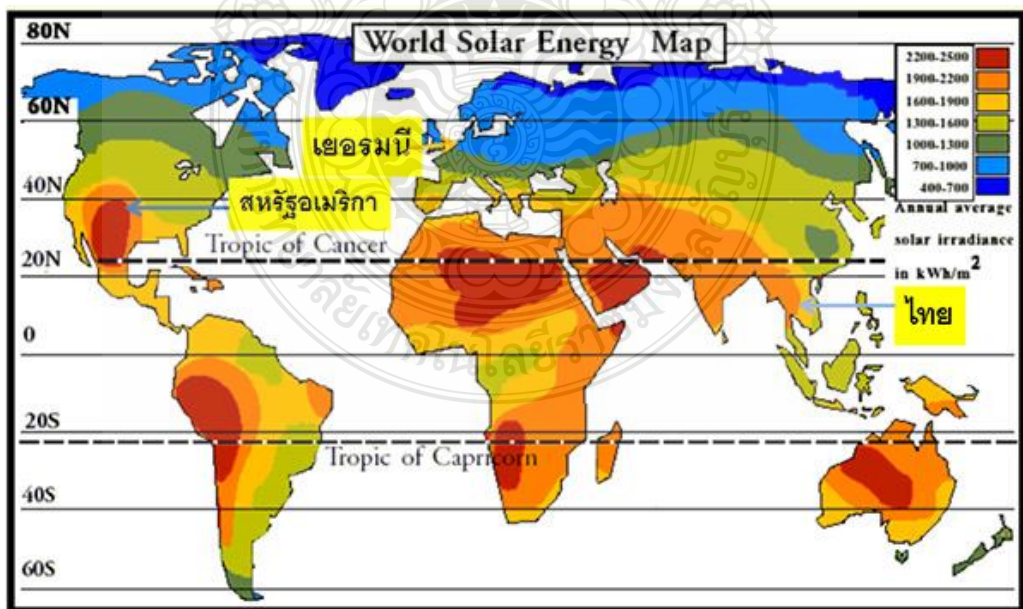
รูปที่ 2.1 ระยะทางจากโลกถึงดวงอาทิตย์

2.1.2 แสงอาทิตย์

แสงอาทิตย์ เป็นแหล่งพลังงานธรรมชาติที่มีขนาดใหญ่ที่สุด เป็นพลังงานสะอาดและมีอยู่ทั่วไป แต่การนำมาใช้ประโยชน์อาจยังมีข้อจำกัดอยู่บ้าง เนื่องจากแสงอาทิตย์มีเฉพาะในตอนกลางวัน ตลอดจนมีความเข้มของแสงที่ไม่แน่นอน เพราะขึ้นอยู่กับสภาพอากาศและฤดูกาลที่เปลี่ยนไป แสงอาทิตย์เกิดจากปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ในดวงอาทิตย์ เมื่อแสงอาทิตย์เดินทางมาถึงนอกชั้นบรรยากาศของโลก จะมีความเข้มของแสงโดยเฉลี่ยประมาณ 1,350 วัตต์/ตารางเมตร แต่กว่า

จะลงมาถึงพื้นโลก พลังงานบางส่วนต้องสูญเสียไปเมื่อผ่านชั้นบรรยากาศต่างๆ ที่ห่อหุ้มโลก เช่น ชั้น โอโซน ชั้นไอน้ำ ชั้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ความเข้มของแสงลดลงเหลือประมาณ 1,000 วัตต์/ตารางเมตร (หรือประมาณร้อยละ 70) ปริมาณแสงอาทิตย์ที่ได้รับบนพื้นที่ใดพื้นที่หนึ่ง จะมีปริมาณสูงสุดเมื่อพื้นที่นั้นทำมุมตั้งฉากกับแสงอาทิตย์ ดังนั้นหากต้องการให้พื้นที่ได้รับแสงอาทิตย์ ได้มากที่สุดต่อวัน ก็จะต้องปรับพื้นที่รับแสงนั้นๆ ตามการเคลื่อนที่ของแสงอาทิตย์ ซึ่งจะเคลื่อนที่ จากทิศตะวันออกไปสู่ทิศตะวันตกเสมอ นอกจากนั้น จากการศึกษาที่โลกเอียง ทำให้ซีกโลกเหนือหันหน้า เข้าหาดวงอาทิตย์ในฤดูร้อน และเอียงซีกโลกใต้หันหน้าเข้าหาดวงอาทิตย์ในฤดูหนาว ดังนั้นเราจึง ต้องปรับมุมพื้นที่รับแสงนั้นๆ ในแนวเหนือใต้ (มุมก้มและมุมเงย) ให้สอดคล้องตามฤดูกาลด้วย เพื่อให้พื้นที่นั้นๆ รับแสงอาทิตย์ได้มากที่สุดตลอดทั้งปี ประเทศไทยตั้งอยู่ระหว่างเส้นขนานที่ 6-10 องศาเหนือ จะได้รับแสงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปี ประมาณ 4-5 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ตารางเมตร/วัน ซึ่งหาก สามารถปรับพื้นที่รับแสงให้ติดตามแสงอาทิตย์ได้ตลอดเวลาแล้ว คาดว่าจะสามารถรับแสงได้เพิ่มขึ้น อีกประมาณ 1.3-1.5 เท่า [3]

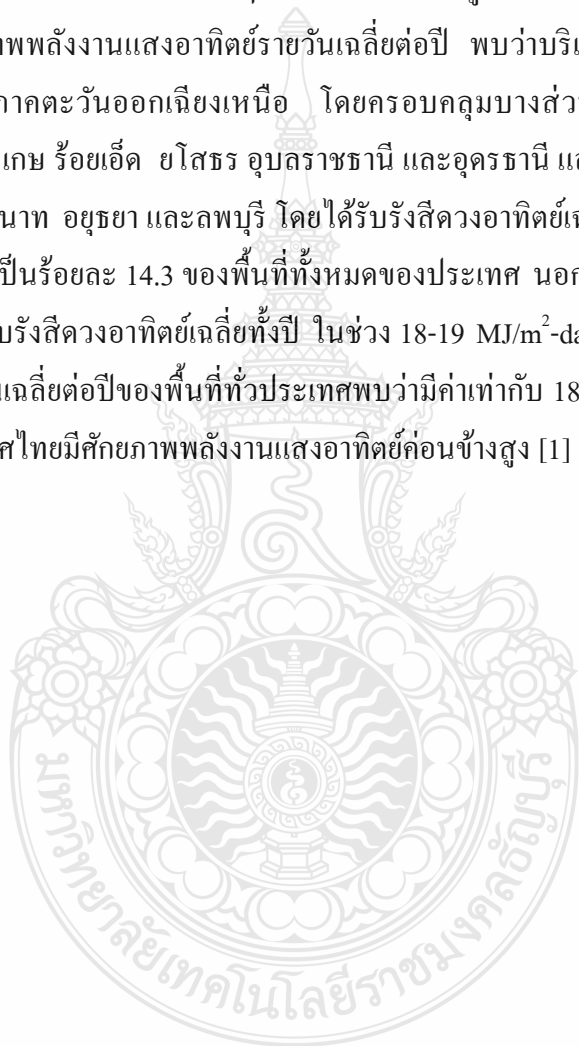
พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานสะอาดไม่ทำปฏิกิริยาใดๆ อันจะทำให้สิ่งแวดล้อมเป็น พิษ เซลล์แสงอาทิตย์ จึงเป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ผลิตไฟฟ้า เนื่องจาก สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ปัจจุบันในประเทศไทย มีหลายหน่วยงาน ได้ทำการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อใช้งานในลักษณะต่างๆ กัน

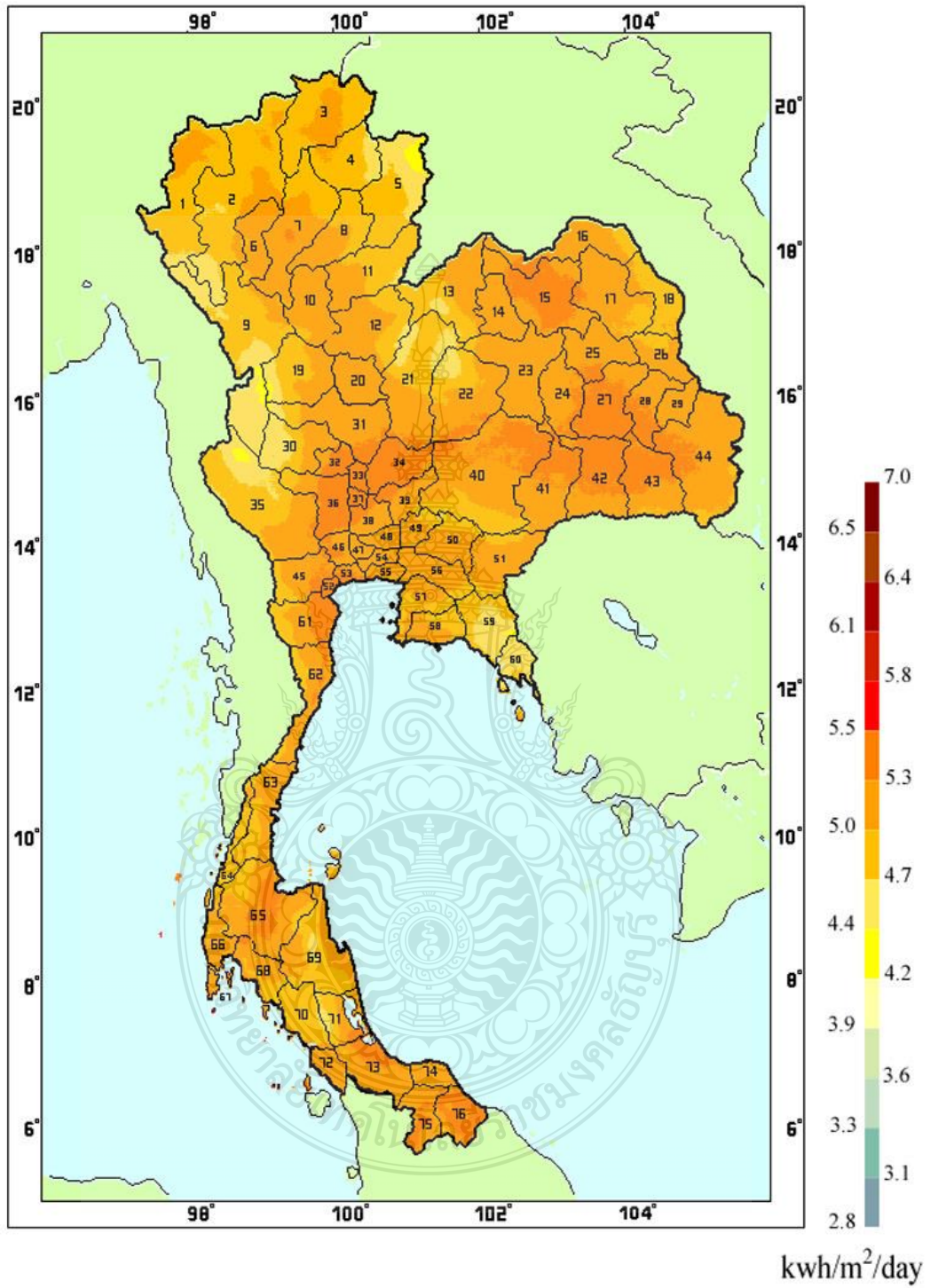


รูปที่ 2.2 พลังงานแสงอาทิตย์จากประเทศต่างๆทั่วโลก

2.1.3 ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย

จากแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย (พ.ศ. 2542) โดยกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงานและคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร พบว่าการกระจายของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ตามบริเวณต่างๆ ในแต่ละเดือนของประเทศ ได้รับอิทธิพลสำคัญจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ และลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดระหว่างเดือนเมษายน และพฤษภาคม โดยมีค่าอยู่ในช่วง 20 ถึง 24 MJ/m²-day เมื่อพิจารณาแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปี พบว่าบริเวณที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดเฉลี่ยทั้งปีอยู่ที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยครอบคลุมบางส่วนของจังหวัดนครราชสีมา บุรีรัมย์ สุรินทร์ ศรีสะเกษ ร้อยเอ็ด ยโสธร อุบลราชธานี และอุดรธานี และบางส่วนของภาคกลางที่จังหวัดสุพรรณบุรี ชัยนาท อัญญา และลพบุรี โดยได้รับรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปี 19 ถึง 20 MJ/m²-day พื้นที่ดังกล่าวคิดเป็นร้อยละ 14.3 ของพื้นที่ทั้งหมดของประเทศ นอกจากนี้ยังพบว่าร้อยละ 50.2 ของพื้นที่ทั้งหมดได้รับรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปี ในช่วง 18-19 MJ/m²-day จากการคำนวณรังสีรวมของดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ทั่วประเทศพบว่ามีค่าเท่ากับ 18.2MJ/m²-day จากผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง [1]

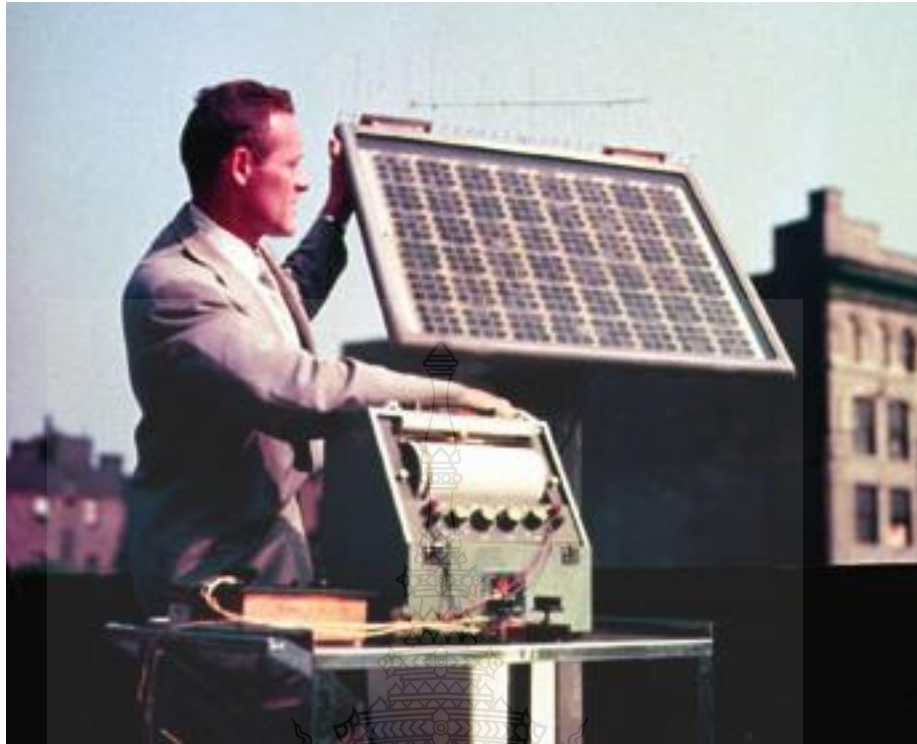




รูปที่ 2.3 พลังงานแสงอาทิตย์ภายในประเทศไทย

2.2 เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ชนิดหนึ่งซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง โดยอาศัยคุณสมบัติสำคัญที่เรียกว่า “ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก” (Photovoltaic effect) ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ถูกค้นพบเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ.1839 โดยนักวิทยาศาสตร์ที่ชื่อ Alexander Edmond Becquerel ได้สังเกตเห็นการเกิดแรงดันไฟฟ้าปริมาณหนึ่งขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองซึ่งจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เมื่อมีแสงมาตกกระทบและในปี ค.ศ.1876 ก็ได้มีการค้นพบปรากฏการณ์นี้ขึ้นในสาร Selenium ต่อมาได้มีการพัฒนาโดยใช้สาร Selenium และสารประกอบของ Cuprous oxide และเมื่อในปี ค.ศ.1941 เริ่มมีการค้นพบเทคโนโลยีของการสร้างรอยต่อสาร พี-เอ็น (P-N junction) โดยวิธีการที่เรียกว่า Grown junction เทคโนโลยีดังกล่าวมีส่วนอย่างมากในการพัฒนาของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ จนกระทั่งในปี ค.ศ.1954 กลุ่มนักวิจัยจากบริษัท Bell telephone ได้ประกาศความสำเร็จในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็นของผลึกซิลิคอนขึ้นมาเป็นผลสำเร็จ แต่ในครั้งแรกนี้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพเพียงร้อยละ 6 เท่านั้น ตั้งแต่ปี ค.ศ.1960 เป็นต้นมาเซลล์แสงอาทิตย์ก็ได้ถูกพัฒนาและสร้างขึ้นให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยเฉพาะการเพิ่มประสิทธิภาพ และการลดต้นทุนในตัวโครงสร้าง การใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานจึงมีการขยายการใช้งานเป็นวงกว้าง เพราะเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถเปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง และไฟฟ้าที่ได้นั้นเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current; DC) ที่สะอาดและไม่สร้างมลภาวะใดๆ ในขณะที่ใช้งาน เพียงแค่ติดตั้งไว้กลางแสงแดดก็สามารถใช้งานได้ทันที และทำงานได้โดยไม่สร้างเสียงรบกวน เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่กับที่ขณะทำงานจึงไม่มีปัญหาด้านการสึกหรอหรือต้องการการบำรุงรักษาเหมือนอุปกรณ์การผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบอื่น ข้อเสียของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คือต้นทุนการติดตั้งสูง ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ค่อนข้างต่ำ ขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่นำมาผลิต โดยทั่วไปประมาณร้อยละ 10–20 [2]



รูปที่ 2.4 เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกซิลิคอนในปี ค.ศ.1954

2.3 การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์

วัสดุสำคัญที่ใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ใช้มากที่สุดในปัจจุบันได้แก่ สารซิลิคอน (Si) ซึ่งเป็นสารชนิดเดียวกับที่ใช้ทำชิปในคอมพิวเตอร์และเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ ซิลิคอนเป็นสารซึ่งไม่เป็นพิษ มีการนำมาผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ ใช้กันอย่างแพร่หลายเพราะมีราคาถูก คงทน และเชื่อถือได้ นอกจากนี้ยังมีวัสดุชนิดอื่นที่สามารถนำมาผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ได้ เช่น แกลเลียมอาเซไนด์ CIS และแคดเมียมเทลลูไรด์ แต่ยังมีราคาสูงและบางชนิดยังไม่มีการพิสูจน์เรื่องอายุการใช้งานว่าสามารถใช้งานได้ นาน ข้อเสียของ Si: การทำให้บริสุทธิ์และอยู่ในรูปสารที่พร้อมจะทำเซลล์ฯ มีราคาแพงและแตกหักง่ายในขบวนการผลิต [11]



รูปที่ 2.5 ผงถ่านหินผง



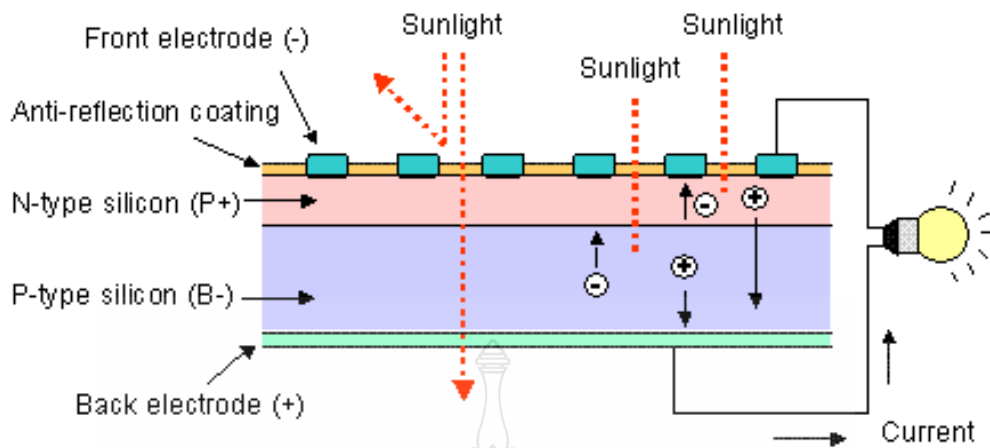
รูปที่ 2.6 แกลเลียมอะไซด์



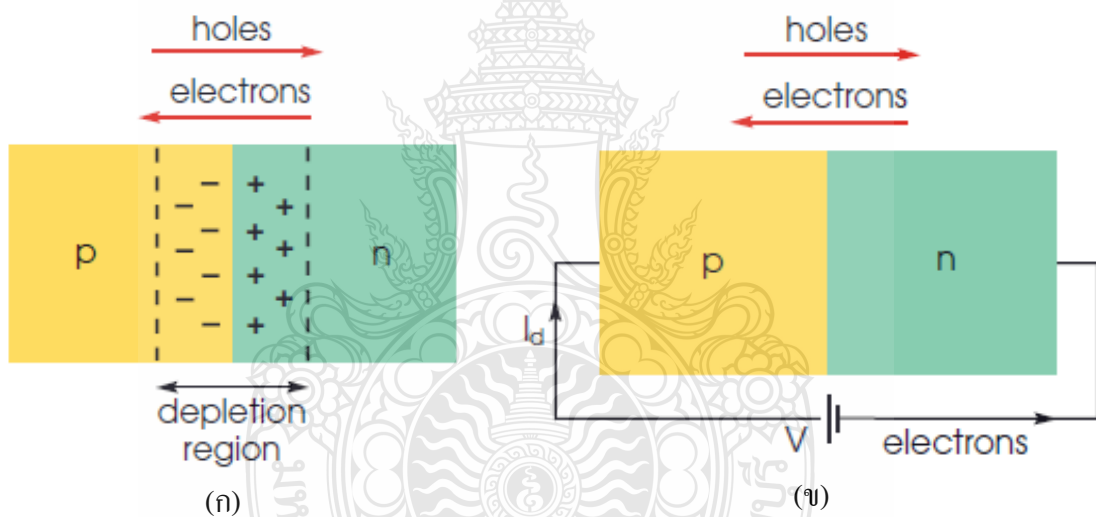
รูปที่ 2.7 แกลเลียมเทลลูไรด์

2.4 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อพลังงานจากแสงมาตกกระทบบนแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ รังสีของแสงที่มีอนุภาคของพลังงานประกอบที่เรียกว่า “โฟตอน” (Photon) จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอน (Electron) ในสารกึ่งตัวนำจนมีพลังงานมากพอที่จะกระโดดออกมาจากแรงดึงดูดของอะตอม (Atom) และเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ครบวงจรจะทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรงขึ้น วัสดุสำคัญที่ใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ สารซิลิคอน (Si) ซึ่งเป็นสารชนิดเดียวกับที่ใช้ทำชิปในคอมพิวเตอร์ และเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ ซิลิคอนเป็นสารซึ่งไม่เป็นพิษ มีการนำมาผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ ใช้กันอย่างแพร่หลายเพราะมีราคาถูก คงทน และเชื่อถือได้ นอกจากนี้ยังมีวัสดุชนิดอื่นที่สามารถนำมาผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น แกลเลียมอาเซไนด์ CIS และ แคดเมียมเทลลูไรด์ แต่ยังมีราคาสูง และบางชนิดยังไม่มีการพิสูจน์เรื่องอายุการใช้งานว่าสามารถใช้งานได้นาน ข้อเสียของ Si : การทำให้บริสุทธิ์และอยู่ในรูปสารที่พร้อมจะทำเซลล์แสงอาทิตย์ มีราคาแพง และ แดกหักง่ายในขบวนการผลิต การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นขบวนการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้าได้โดยตรง โดยเมื่อแสงซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและมีพลังงานกระทบกับสารกึ่งตัวนำ จะเกิดการถ่ายทอดพลังงานระหว่างกัน พลังงานจากแสงจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า (อิเล็กตรอน) ขึ้นในสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถต่อกระแสไฟฟ้างดงกล่าวไปใช้งานได้ N-type ซิลิคอน ซึ่งอยู่ด้านหน้าของเซลล์ คือ สารกึ่งตัวนำที่ได้การโด๊ปด้วยสารฟอสฟอรัส มีคุณสมบัติเป็นตัวให้อิเล็กตรอนเมื่อรับพลังงานจากแสงอาทิตย์ P-type ซิลิคอน คือสารกึ่งตัวนำที่ได้การโด๊ปด้วยสารโบรอน ทำให้โครงสร้างของอะตอมสูญเสียอิเล็กตรอน (โฮล) เมื่อรับพลังงาน จากแสงอาทิตย์จะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน เมื่อนำซิลิคอนทั้ง 2 ชนิดมาประกบต่อกันด้วย P-n junction จึงทำให้เกิดเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ในสถานะที่ยังไม่มีแสงแคด N-type ซิลิคอนซึ่งอยู่ด้านหน้าของเซลล์ ส่วนประกอบส่วนใหญ่พร้อมจะให้อิเล็กตรอน แต่ก็ยังมีโฮลปะปนอยู่บ้างเล็กน้อย ด้านหน้าของ N-type จะมีแถบโลหะเรียกว่า “Front Electrode” ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ส่วน P-type ซิลิคอนซึ่งอยู่ด้านหลังของเซลล์ โครงสร้างส่วนใหญ่เป็นโฮล แต่ยังคงมีอิเล็กตรอนปะปนบ้างเล็กน้อย ด้านหลังของ P-type ซิลิคอนจะมีแถบโลหะเรียกว่า “Back Electrode” ทำหน้าที่เป็นตัวรวบรวมโฮล [1]



รูปที่ 2.8 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2.9 โครงสร้างภายในรอยต่อ PN junction

เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบ แสงอาทิตย์จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนและโฮล ทำให้เกิดการเคลื่อนไหวเมื่อพลังงานพอทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะวิ่งเข้าหาเพื่อจับคู่กันอิเล็กตรอนจะวิ่งไปยังชั้น N-type และโฮลจะวิ่งไปยังชั้น P-type เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบ แสงอาทิตย์จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนและโฮล ทำให้เกิดการเคลื่อนไหว เมื่อพลังงานพอทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะวิ่งเข้าหาเพื่อจับคู่กัน อิเล็กตรอนจะวิ่งไปยังชั้น N-type และโฮลจะวิ่งไปยังชั้น P-type อิเล็กตรอนวิ่งไปรวมกันที่ Front Electrode และโฮลวิ่งไปรวมกันที่ Back Electrode เมื่อมีการต่อวงจรไฟฟ้าจาก Front

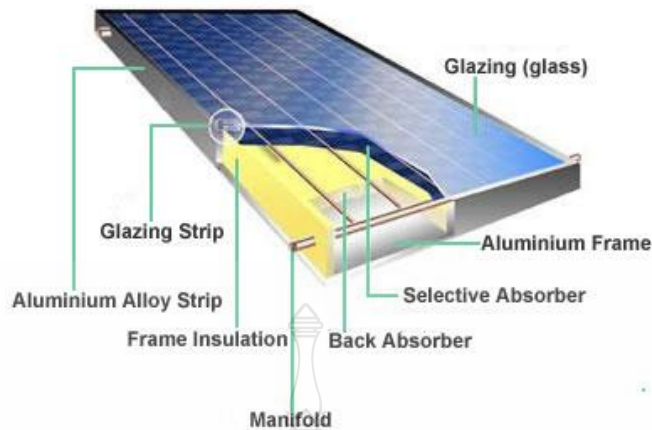
Electrode และ Back Electrode ให้ครบวงจร ก็จะเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น เนื่องจากทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะวิ่งเพื่อจับคู่กัน [2]

ในการการผลิตเซลล์เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดได้มีการปรับปรุงใน 2 ลักษณะคือ ทำให้หน้าสัมผัสเชื่อมติดกับผิวหน้าของเซลล์เพื่อที่จะรวบรวมประจุโดยไม่มีกรบดบังแสงที่มากกระทบมากนัก และสุดท้ายคือการเคลือบสารลดการสะท้อนที่ด้านหน้าของเซลล์เพื่อลดการสะท้อนกลับของแสง คุณสมบัติเด่นของสารเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอนคือ สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้ถึง 0.5 V มีอายุการใช้งานที่ยาวนานถ้ามีการป้องกันความชื้นที่ดี [3]

2.5 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์

โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่นิยมใช้กันมากที่สุดได้แก่ รอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำซึ่งวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ราคาถูกที่สุดและมีมากที่สุดบนพื้นโลกได้แก่ซิลิคอน ซึ่งถลุงได้จากแร่ควอตซ์และผ่านขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ตลอดจนการทำให้เป็นผลึก สารซิลิคอนบริสุทธิ์ปกติจะมีความเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ต่ำมากเพราะอิเล็กตรอนไม่มีการเคลื่อนที่ในบอนด์ แต่เมื่อใช้วิธีการโดปิ้ง (Doping) โดยสารโบรอน จะทำให้ความเป็นตัวนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพราะ โบรอนจะทำหน้าที่เป็นตัวเป็นตัวพาประจุ (Charge Carrier) ซึ่งเป็นประจุบวกคือไม่มีอิเล็กตรอน แต่จะเป็นช่องว่างที่เรียกว่า “Gaps” หรือ “โฮล (holes)” ซึ่งอิเล็กตรอนจะมาจับคู่ด้วยในโครงสร้างของรูปผลึกเมื่อผ่านขบวนการนี้แล้ว เรียกว่า “P-type” การโดปิ้งอีกแบบหนึ่งใช้สารฟอสฟอรัส (Phosphorous) สารซิลิคอนที่ผ่านขบวนการโดปิ้งแล้ว เรียกว่า “N-type” ซึ่งหมายความว่าฟอสฟอรัสจะทำหน้าที่เป็นตัวพาอิเล็กตรอนหรือประจุลบ

ซิลิคอนเกือบทั้งหมดในเซลล์แสงอาทิตย์ คือส่วนที่เป็น P-type ในขณะที่ผิวส่วนหน้าของเซลล์ด้านที่แสงตกกระทบจะเป็นเพียงชั้นบางๆแบบ N-type รอยต่อที่อยู่ระหว่างชั้นทั้งสองเรียกว่า “PN junction” ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดในเซลล์แสงอาทิตย์เพราะจะเป็นบริเวณที่มีประจุอิสระเคลื่อนที่ผ่าน และทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นระหว่าง junction ในส่วนของสารซิลิคอนที่เป็น N-type นั้นอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนไหวได้อย่างอิสระที่อุณหภูมิห้อง ในขณะที่ซิลิคอนส่วนที่เป็น P-type มีส่วนที่เรียกว่า “โฮล” คือส่วนที่อิเล็กตรอนขาดหายไป (Electron space) สามารถเคลื่อนไหวได้อย่างอิสระที่อุณหภูมิห้องเช่นเดียวกัน [4]



รูปที่ 2.10 โครงสร้างภายในแผงเซลล์แสงอาทิตย์

2.6 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์

วัสดุที่นำมาใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์นั้นส่วนมากจะเป็นซิลิคอน เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีอยู่มาก และมีราคาถูก เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการใช้งานแล้วในเชิงพาณิชย์แบ่งได้ 3 ชนิดดังต่อไปนี้

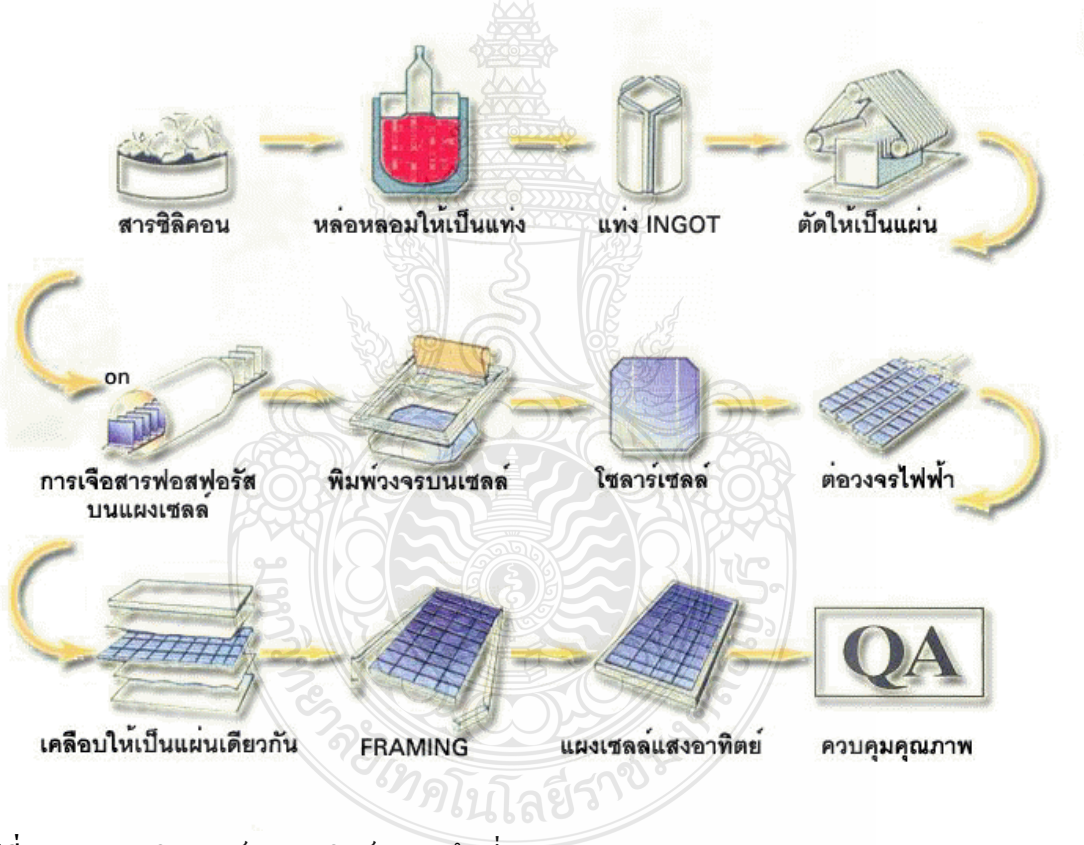
2.6.1 เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว (Single Crystalline)

การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว (Single Crystalline) หรือที่รู้จักกันในชื่อ Mono Crystalline การเตรียมสารซิลิคอนชนิดนี้ เริ่มต้นจากนำสารซิลิคอน ซึ่งผ่านการทำให้เป็นก้อนที่มีความบริสุทธิ์สูงมาก ร้อยละ 99.999 มาหลอมละลายในเตา Induction Furnace ที่อุณหภูมิสูงถึง 1,500 องศาเซลเซียส เพื่อทำการสร้างแท่งผลึกเดี่ยว ขนาดใหญ่ เส้นผ่านศูนย์กลาง 6-8 นิ้ว พร้อมกับใส่สารเจือปน Boron เพื่อทำให้เกิด P-type แล้วทำให้เกิดการเย็นตัว จับตัวกัน เป็นเทคโนโลยีการดึงผลึก จะได้แท่งผลึกยาวเป็นรูปทรงกระบอก คุณภาพของผลึกเดี่ยวจะสำคัญมาก ต่อคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์

จากนั้นนำแท่งผลึกมาตัดให้เป็นแผ่นบางๆ ด้วยลวดตัดเพชร (Wire Cut) ที่เรียกว่า “เวเฟอร์” ซึ่งจะได้แผ่นผลึก มีการทำให้เกิดเป็น P-n junction ขึ้นบนแผ่นเวเฟอร์ ด้วยวิธีการ Diffusion ที่อุณหภูมิระดับ 1,000 องศาเซลเซียสจากนั้นนำไปทำขั้วไฟฟ้าเพื่อนำกระแสไฟฟ้าออกมาเพื่อป้องกันการสะท้อนแสงให้น้อยที่สุด ตอนนี้จะได้เซลล์ที่พร้อมใช้งาน หลังจากนั้นก็นำไปประกอบเข้าแผงโดยใช้กระจกเป็นเกราะป้องกันแผ่นเซลล์และใช้ซิลิโคนและอีวีเอ (Ethelele Vinyl Acetate) ช่วยป้องกันความชื้น ในการใช้งานจริงจะนำเซลล์แต่ละเซลล์มาต่ออนุกรมกันเพื่อเพิ่มแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้ได้ตามต้องการ [1]



รูปที่ 2.11 เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว



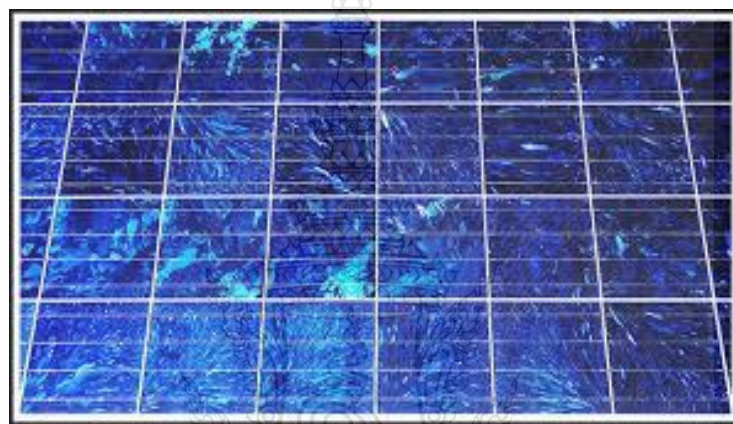
รูปที่ 2.12 การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว

2.6.2 เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกรวม (Poly Crystalline)

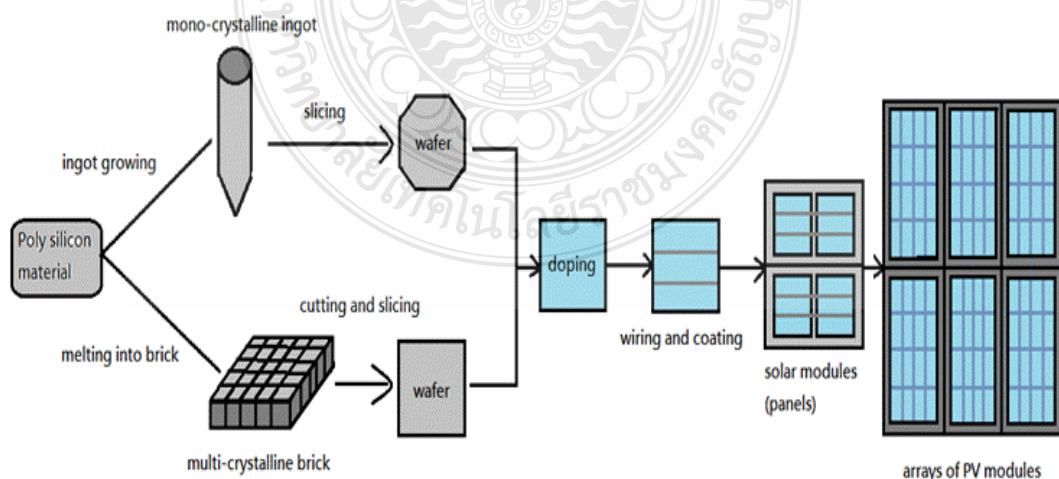
การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกรวม (Poly Crystalline) การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ โดยวิธีนี้ จะมีค่าใช้จ่ายที่ถูกลงกว่าวิธีแรก คือการทำแผ่นเซลล์ จะใช้วิธีการหลอมสารซิลิคอน ให้ละลายพร้อมกับใส่สารเจือปน Boron เพื่อทำให้เกิด P-type แล้วเทลงในแบบพิมพ์ เมื่อ

สารละลายซิลิคอนแข็งตัวก็จะได้เป็นแท่งซิลิคอนแบบผลึกรวม (ตกผลึกไม่พร้อมกัน) จากนั้นนำไปตัดเป็นแผ่น เช่นเดียวกับแบบผลึกเดี่ยว ความแตกต่างระหว่างแบบผลึกเดี่ยวและแบบผลึกรวมสังเกตได้จากผิวผลึก ถ้ามีโหนดที่แตกต่างกันซึ่งเกิดจากผลึกเล็ก P-type หลายผลึกในแผ่นเซลล์จะเป็นแบบผลึกรวม ในขณะที่แบบผลึกเดี่ยวจะเห็นเป็นผลึกเนื้อเดียว คือ มีสีเดียวตลอดทั้งแผ่น [2]

ส่วนกรรมวิธีการผลิตเซลล์ที่เหลืองจะเหมือนกัน เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกรวม (Poly Crystalline) จะให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าแบบผลึกเดี่ยว ประมาณร้อยละ 2-3 อย่างไรก็ตามเซลล์ทั้ง 2 ชนิด มีข้อเสียในการผลิตคือ แรกหักง่ายเช่นกัน [1]



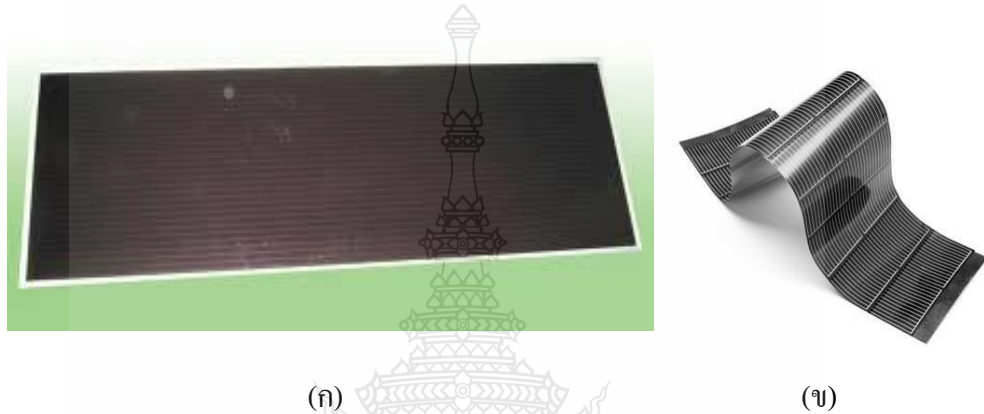
รูปที่ 2.13 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกรวม



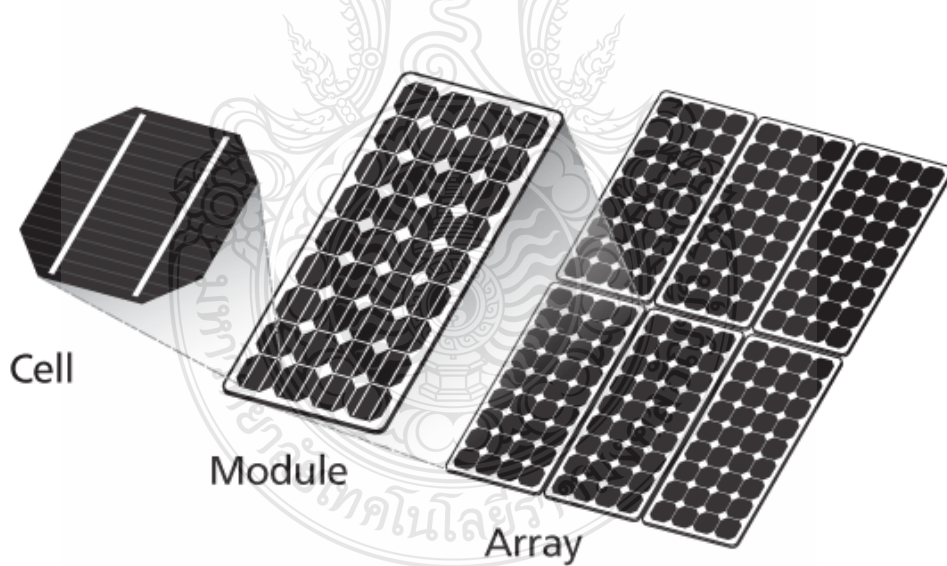
รูปที่ 2.14 การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกรวม

2.6.3 เซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส (Amorphous Silicon Cells)

เป็นฟิล์มบางที่มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้ามีความหนาประมาณ 0.5–1.0 ไมครอน ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในเครื่องคิดเลขซึ่งมีลักษณะสีม่วงน้ำตาล มีความบางเบา ราคาถูก ผลิตให้เป็นพื้นที่เล็กจนถึงใหญ่หลายตารางเมตร มีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 6-8 ดังรูปที่ 2.15 [1]



รูปที่ 2.15 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส



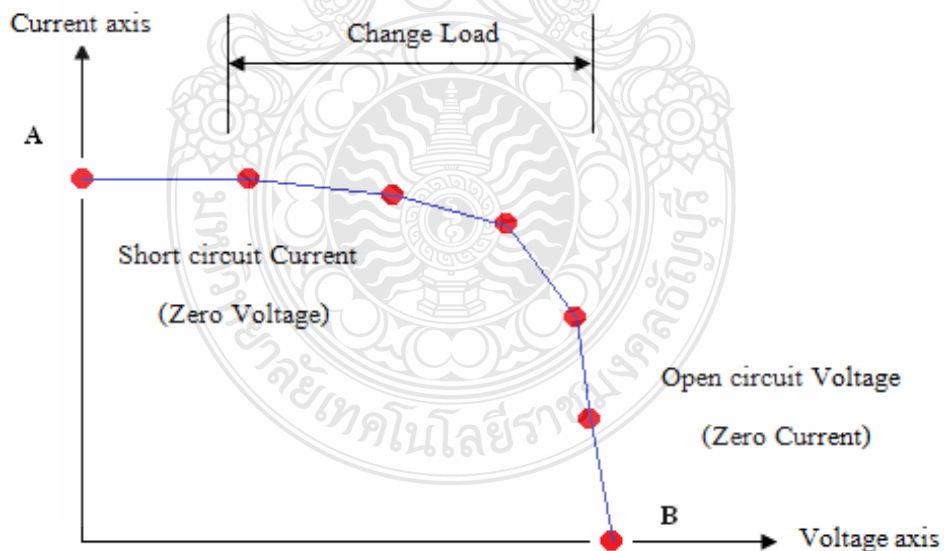
รูปที่ 2.16 การต่อของเซลล์แสงอาทิตย์

โดยทั่วไปแล้วเซลล์แสงอาทิตย์จะให้กระแสไฟฟ้าลัดวงจรประมาณ 10-20 mA และสามารถให้แรงดันไฟฟ้าขณะวงจรเปิดประมาณ 0.6-0.7 V ดังนั้นการใช้งานโซลาร์เซลล์จะไม่นำมาใช้

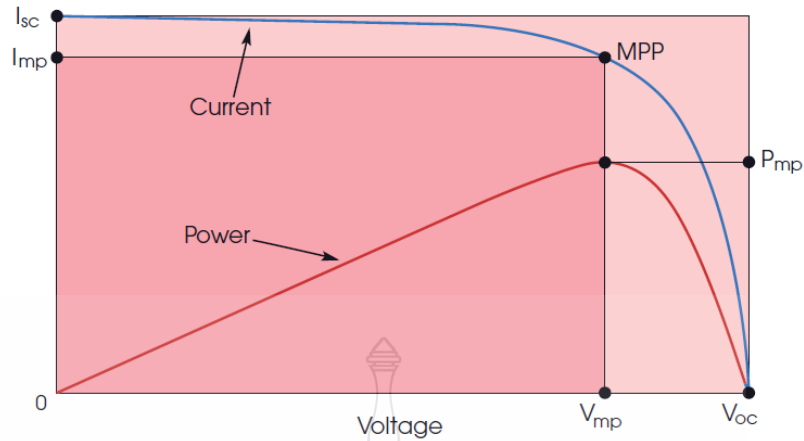
งานเพียงเซลล์เดียว (Cell) เนื่องจากให้กำลังไฟฟ้าน้อย จึงนำเซลล์มาต่อขนานกันเพื่อให้กระแสไฟฟ้า มีค่าเพิ่มขึ้น หรือถ้าต้องการแรงดันสูงก็นำเซลล์มาต่ออนุกรมกัน ที่เรียกว่า “โมดูล (Module)” และ หากนำโมดูลมาต่อรวมกันอีกจะเรียกว่า “อาร์เรย์ (Array)” ดังรูปที่ 2.16 [4]

2.7 คุณลักษณะและตัวแปรที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ [7]

คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นสามารถแสดงได้โดยใช้ I-V curve ซึ่งมีประโยชน์มากสำหรับใช้ตรวจสอบกำลังผลิตสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ โดย (I) หมายถึง กระแสไฟฟ้าซึ่งแทนด้วยเส้นกราฟแนวตั้ง และ (V) หมายถึงแรงดันไฟฟ้าซึ่งแทนด้วยเส้นกราฟ แนวนอน ที่อุณหภูมิของเซลล์และปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่ สามารถสร้างกราฟ I-V curve ได้โดยวัดแรงดันไฟฟ้าที่ไม่มีการต่อโหลด เรียกว่า “Open circuit voltage” (V_{OC}) จะให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุด A จากนั้นให้เซลล์แสงอาทิตย์เริ่มจ่ายกระแสจนถึง ค่ากระแสสูงสุดในสภาวะลัดวงจร ที่จุดนี้จะให้ค่ากระแสสูงสุด เรียกว่า “Short circuit current” (I_{SC}) ซึ่งเป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่จุด B จากนั้นลากเส้นผ่านจุดทุกจุดที่ทดสอบจะเกิดเป็น I-V curve ขึ้น ดัง รูปที่ 2.17 [5]



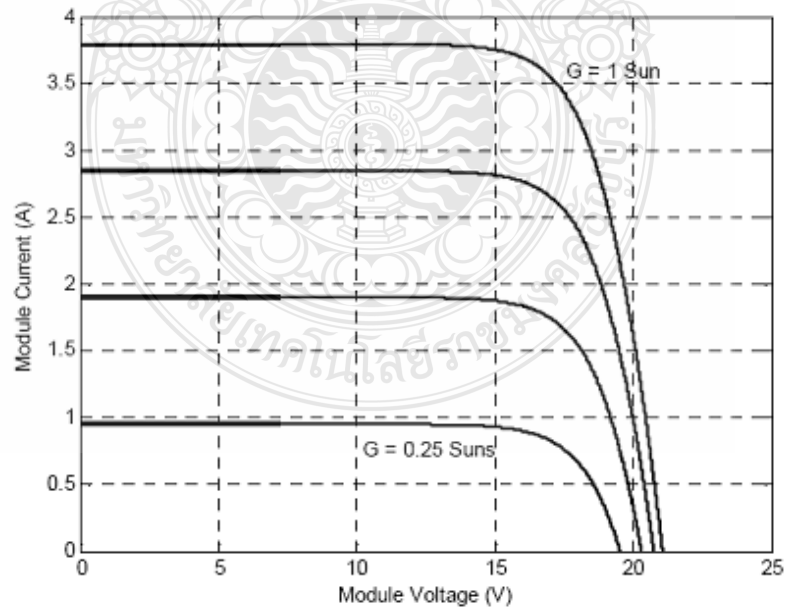
รูปที่ 2.17 การทดสอบเพื่อสร้างกราฟกระแสและแรงดัน I-V curve



รูปที่ 2.18 ค่าต่างๆที่สามารถหาได้ใน I-V curve

ดังนั้นตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีอยู่ 2 ตัวแปรหลักที่มีผลกระทบต่อจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด คือ ปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และอุณหภูมิที่แผงเซลล์ นอกจากนั้นอาจมีปัจจัยอื่น ๆ อีกที่มีผลกระทบ เช่น โหลดที่ต่อกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ลักษณะการบังเงา อาจรวมไปถึงชนิดและการต่อเซลล์แสงอาทิตย์ [6]

2.7.1 ผลกระทบจากระดับความเข้มแสง



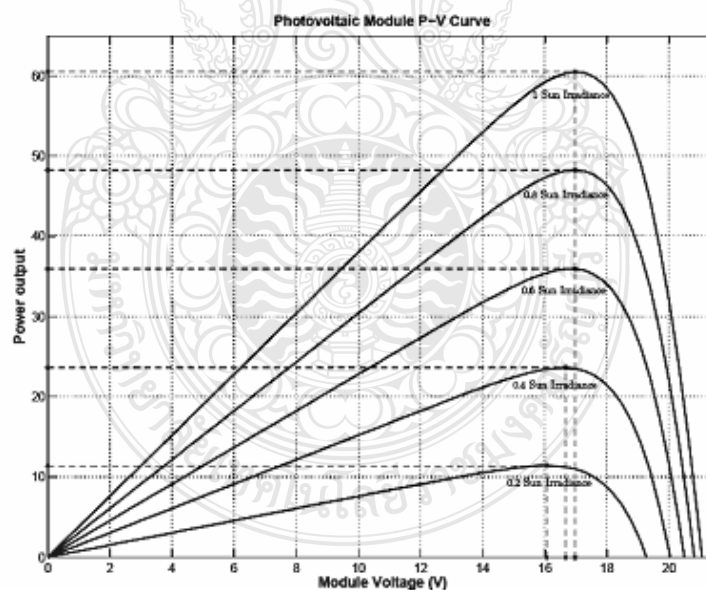
รูปที่ 2.19 กราฟ I-V curve กรณีความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง

ตามความสัมพันธ์ของกระแสโฟโตที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความเข้มแสงนั้นคือ หากความเข้มแสงมีค่าสูง กระแสที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะสูงขึ้น ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ดังรูปที่ 2.10 ความเข้มแสงที่ใช้วัดเป็นมาตรฐาน คือความเข้มแสงที่วัดได้บนพื้นโลกในสภาพอากาศปลอดโปร่งปราศจากเมฆบังและวัดที่ระดับน้ำทะเลในขณะที่รับแสงจากดวงอาทิตย์ 1.5 AM และความเข้มแสงจะมีค่า 1000 W/m^2 [7]

ความสัมพันธ์ของกระแสโฟโตกับความเข้มแสงอาทิตย์ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.1)

$$I_{ph} = [I_{sc} + k_I(T - T_{ref})] \cdot \lambda \quad (2.1)$$

- เมื่อ I_{sc} คือ กระแสลัดวงจรของเซลล์ที่ 25°C ; A
 k_I คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกระแสลัดวงจร; $\text{A}/^\circ\text{C}$
 T_{ref} คือ อุณหภูมิอ้างอิงของเซลล์; Kelvin
 λ คือ ความเข้มแสง; kW/m^2



รูปที่ 2.20 กราฟ P-V curve กรณีความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง

2.7.2 ผลกระทบของอุณหภูมิ

กระแสไฟฟ้าที่ตัวเซลล์แสงอาทิตย์จะแปรตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจะลดลงเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงมากขึ้น ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วทุกๆ $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่เพิ่มขึ้น จะทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลงร้อยละ 0.5 และในกรณีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาตรฐานที่ใช้กำหนดประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คือที่ค่าอุณหภูมิ $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ เช่น หากกำหนดไว้ว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีแรงดันไฟฟ้าที่วงจรเปิด (Open circuit voltage ; V_{oc}) ที่ 21 โวลต์ ณ ที่ค่าอุณหภูมิ $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ก็จะหมายความว่า แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อยังไม่ได้ต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิที่ $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะเท่ากับ 21 โวลต์ ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ เช่น $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะทำให้แรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง ร้อยละ 2.5 นั่นคือ แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อไม่มีโหลด ลดลง 0.525 โวลต์ จะเหลือเพียง 20.475 โวลต์ เท่านั้นจากสมการไดโอดในอุดมคติที่บรรยายคุณสมบัติกระแส-แรงดันของรอยต่อพีเอ็นตลอดช่วงกว้างของกระแสและแรงดัน สามารถเขียนได้ตามสมการที่ (2.2) [5]

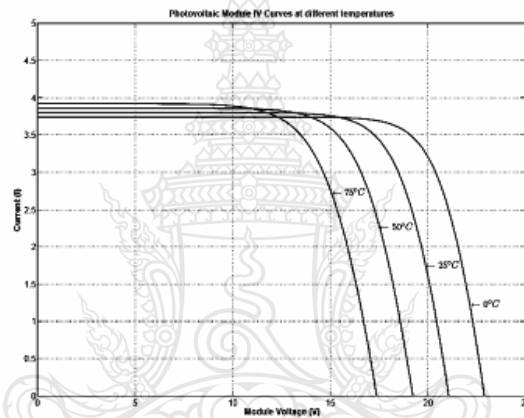
$$I = I_s(t) \left[\exp\left(\frac{q \cdot V}{k \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (2.2)$$

เมื่อ I_s คือ Cell 's reverse saturation current of diode; A
 V คือ แรงดันที่ตกคร่อมไดโอด; V
 ค่ากระแสรั่วในสถานะอิมิตัวขณะจ่ายไบอัสกลับสามารถหาได้จากสมการที่ (2.3)

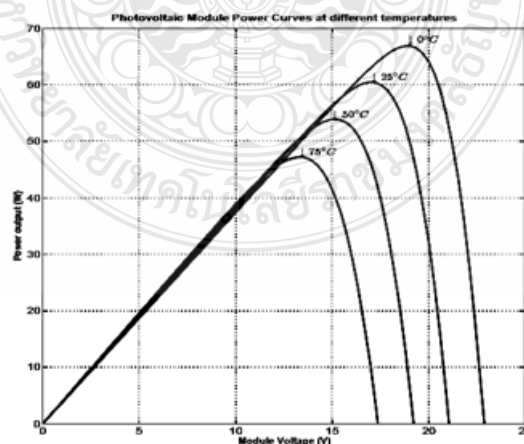
$$I_s(t) = I_s \left[\frac{T}{T_{ref}} \right]^3 \cdot \exp \left[\left(\frac{T}{T_{ref}} - 1 \right) \cdot \frac{E_g}{N \cdot V_t} \right] \quad (2.3)$$

- เมื่อ E_g คือ Band gap energy of semiconductor
 V_t คือ Thermal voltage at room temperature
 T คือ อุณหภูมิที่รอยต่อขณะทำงานของเซลล์; Kelvin degree
 T_{ref} คือ อุณหภูมิอ้างอิงของเซลล์; Kelvin degree
 N คือ Ideal factor

จากสมการที่ 2.3 อุณหภูมิทำงานของเซลล์ที่สูงขึ้นมีผลต่อแรงดันขาออกของเซลล์ที่ลดลง
 ได้ผลกราฟกระแส-แรงดัน ดังรูปที่ 2.21 และกราฟกำลังไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.21 กราฟ I-V curve กรณีอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 2.22 กราฟ P-V curve กรณีอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง

ในการพิจารณาคุณลักษณะทางกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีพารามิเตอร์ที่สำคัญที่จะต้องเกี่ยวข้องดังนี้ [8]

1 แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc}) เป็นค่าแรงดันที่วัดขณะเปิดวงจร หรือเป็นแรงดันไฟฟ้าเมื่อโหลดทางไฟฟ้ามีค่าสูงมาก โดยที่ค่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรมีความสัมพันธ์กับค่าความเข้มแสงในรูปลอการิทึม (Logarithm)

2 กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc}) เป็นค่ากระแสที่วัดจากการลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ หรือค่ากระแสของเซลล์เมื่อภาระทางไฟฟ้าเป็นศูนย์ โดยที่ค่ากระแสลัดวงจรนี้จะเพิ่มขึ้นตามค่าความเข้มของแสงที่ตกกระทบบนตัวเซลล์แสงอาทิตย์

3 กำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{max}) เป็นค่ากำลังสูงสุดที่ปริมาณความเข้มของแสงที่ตกกระทบบและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ค่าหนึ่งๆ โดยที่นำโหลดทางไฟฟ้าที่เหมาะสมมาต่อเข้ากับแผงเซลล์แสงอาทิตย์

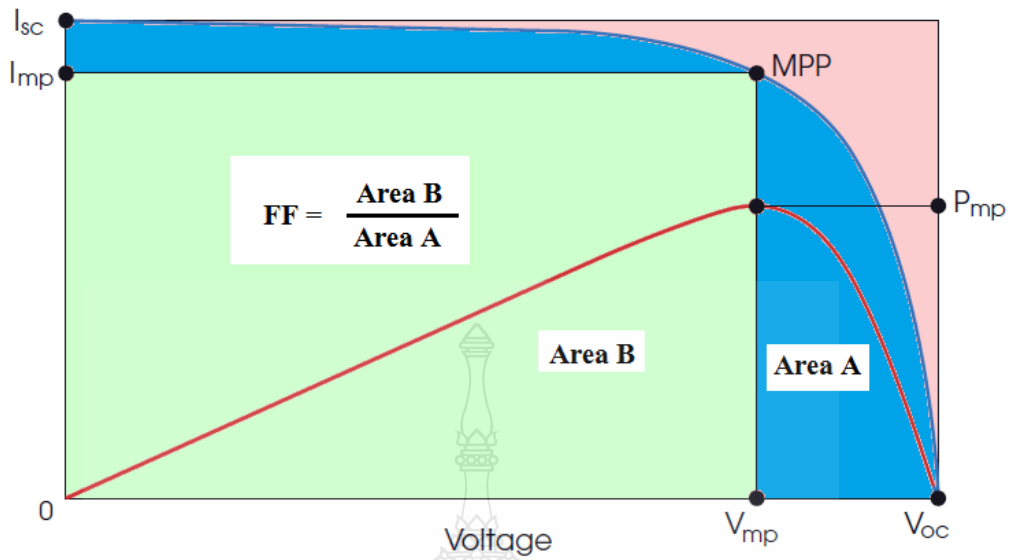
4 กระแสสูงสุด (I_{mp}) เป็นค่ากระแสที่จุดจ่ายกำลังสูงสุดโดยที่นำโหลดทางไฟฟ้าที่เหมาะสมมาต่อเข้ากับแผงเซลล์แสงอาทิตย์

5 แรงดันสูงสุด (V_{mp}) เป็นค่าแรงดันที่ตกคร่อมโหลดทางไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังงานสูงสุด

6 ฟิลล์แฟกเตอร์ (FF) เป็นค่าอัตราส่วนของกำลังสูงสุดต่อผลคูณระหว่างกระแสขณะลัดวงจรกับค่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรดังรูปที่ 2.23 ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ เป็นค่าที่แสดงถึงคุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$FF = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (2.4)$$

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีคุณภาพดี ควรมีค่าฟิลล์แฟกเตอร์เข้าใกล้ 1 เพื่อที่จะทำงาน (Operation point) ใกล้กับจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด



รูปที่ 2.23 กราฟแสดงการหาค่าฟิลล์แฟกเตอร์

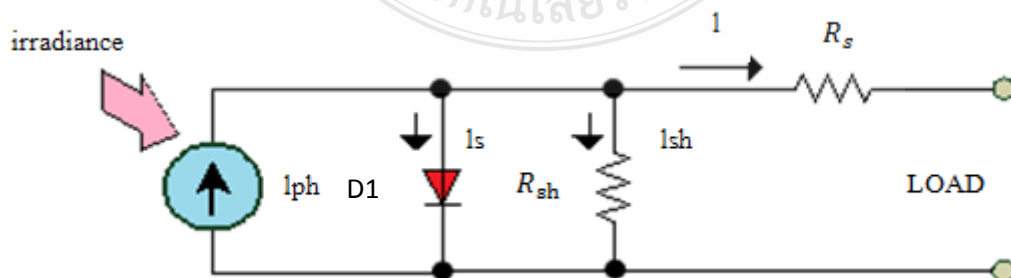
7 ประสิทธิภาพสูงสุด (η_m) เป็นค่าอัตราส่วนของกำลังต่อค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\eta = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{P_{in}} \quad (2.5)$$

เมื่อ P_{in} คือ พลังงานแสงอาทิตย์ที่แผงเซลล์ได้รับต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ; (W/m^2)

2.7.3 วงจรสมมูลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆในเซลล์แสงอาทิตย์นั้น จะต้องแทนเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวงจรสมมูล (Equivalent circuit) ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 วงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ในทางปฏิบัติ

สำหรับวงจรทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในทางปฏิบัติจะประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกระแสแบบคงที่ที่ต่อขนานกับไดโอด และค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรมเกิดจากความต้านทานของซิลิคอนที่เรียงกันเป็นชั้นและความต้านทานของขั้วโลหะด้านหน้าและด้านหลังที่เป็นผลมาจากการต่อกับขั้วต่อภายนอก ส่วนค่าความต้านทานที่ต่อขนานส่วนใหญ่เกิดจากการรั่วไหลของกระแสเนื่องจากรอยต่อ P-N junction ที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้เกิดการลัดวงจรบางส่วน โดยเฉพาะใกล้กับขอบเซลล์แสงอาทิตย์ค่าต่างๆเหล่านี้จะมีผลกับค่าของ Fill Factor จะส่งผลให้ค่ากำลังด้านออกสูงสุดลดลง สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [8]

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{N \cdot K \cdot T} - 1 \right] - \frac{(V + I \cdot R_s)}{R_{sh}} \quad (2.6)$$

- เมื่อ I คือ กระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์; A
 I_s คือ กระแสรั่วในสภาวะอิ่มตัวขณะจ่ายไบอัสกลับของไดโอด; A
 q คือ ประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C
 N คือ ค่า Ideal factor
 K คือ ค่าคงที่ของ Boltzman มีค่าเท่ากับ $1.3806504 \times 10^{-23}$; J/Kelvin
 T คือ อุณหภูมิที่รอยต่อขณะทำงานของเซลล์; Kelvin degree
 V คือ แรงดันตกคร่อมไดโอด; V
 R_s คือ ค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์; Ω
 R_{sh} คือ ค่าความต้านทานขนานของเซลล์; Ω

แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ โมดูล เป็นการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อแบบอนุกรมเพื่อเพิ่มแรงดันให้เหมาะสมกับพิกัดแรงดันของแบตเตอรี่คือ 12 โวลต์ ส่วนการต่อแบบขนานจะเป็นการเพิ่มกระแสไฟฟ้า โดยแรงดันและกระแสของเซลล์จะแปรผันตามตัวแปรในสมการที่ (2.6) หากไม่คิดผลของ R_s และ R_{sh} จะได้สมการของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามสมการที่ (2.7) [8]

$$I = n_p \cdot I_{ph} - n_p \cdot I_s \left[\exp \frac{q \cdot V}{N \cdot K \cdot T \cdot n_s} - 1 \right] \quad (2.7)$$

เมื่อ n_p คือ จำนวนเซลล์ที่ต่อขนาน
 n_s คือ จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรม

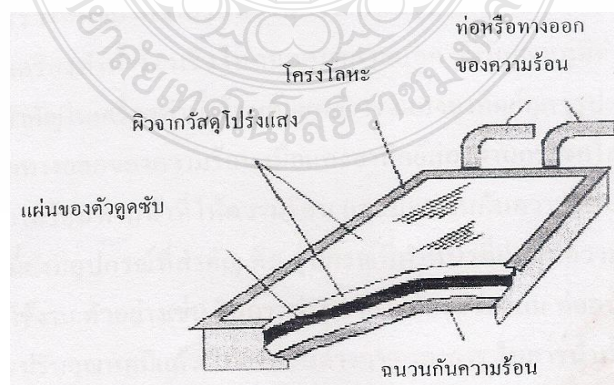
2.8 การผลิตน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ [9]

ในปัจจุบันมีการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ในงานโดยตรงมากขึ้น มีการคิดประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า แต่ยังมีปัญหาในเรื่องของประสิทธิภาพและราคา ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ยังไม่เป็นที่แพร่หลาย สำหรับในต่างประเทศการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ให้ความอบอุ่นและทำน้ำร้อนให้แก่ที่พักอาศัย โดยตัวกักเก็บความร้อน ซึ่งนอกจากจะเป็นอุปกรณ์ประหยัดพลังงาน ยังเป็นอุปกรณ์ที่ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม

2.8.1 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนจากพลังงานจากพลังงานแสงอาทิตย์

เครื่องทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นการใช้รังสีจากดวงอาทิตย์ เพื่อผลิตเป็นความร้อน โดยมีส่วนประกอบสำคัญ คือมีตัวกักเก็บความร้อน ดังรูปที่ 2.25 ถังกักเก็บน้ำร้อน (Storage Tanks) โดยตัวกักเก็บความร้อนจะมีส่วนประกอบหลักๆ ดังนี้

1. มีผนังโปร่งใส เป็นผิวด้านที่รับพลังงานจากแสงอาทิตย์
2. มีผิวสีดำหรือสีทึบด้านใน เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับความร้อน
3. มีการหุ้มฉนวน เพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนที่ดูดซับไว้รั่วไหลออกจากเครื่อง
4. มีท่อหรือทางออกของความร้อน ซึ่งจะเป็นช่องทางนำความร้อนที่กักเก็บไว้ออกไปใช้งาน โดยผ่านตัวนำ เช่น น้ำ หรือของเหลวอื่นๆ



รูปที่ 2.25 ตัวกักเก็บความร้อน

ผิวหนังที่รับพลังงานจากแสงอาทิตย์ สามารถใช้วัสดุโปร่งใสในการทำผิวหนังที่รับพลังงานแสงอาทิตย์ แต่โดยทั่วไป กระจกจะเป็นที่นิยมมากที่สุด เนื่องจากกระจกสามารถผลิตและหาซื้อได้ง่าย ในการทำเครื่องทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ ควรเลือกกระจกที่มีความแข็งแรง ทนต่อการแตกร้าวและการขีดข่วน เมื่อแสงอาทิตย์ผ่านกระจก และตกกระทบผิวภายในเครื่องทำน้ำร้อน แสงอาทิตย์จะก่อให้เกิดความร้อนขึ้น ซึ่งสมบัติเด่นของกระจก ก็ยอมให้แสงผ่านได้ง่ายแต่เป็นฉนวนความร้อนที่ดี ทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นในเครื่องทำน้ำร้อนจะถูกกักเก็บไว้

ตัวดูดซับความร้อนที่เกิดขึ้นในเครื่องทำน้ำร้อน จะถูกดูดซับไว้โดยวัสดุภายในเครื่อง ไม่ว่าจะวัสดุนั้นจะเป็นแผ่น โลหะ ถังเก็บน้ำ ท่อน้ำ ก้อนอิฐ หรือก้อนหิน ซึ่งวัสดุเหล่านี้ ควรทาสีดำหรือสีทึบ เนื่องจากวัสดุสีดำหรือสีทึบจะมีความสามารถในการดูดความร้อนสูง เช่น รถยนต์ที่มีเบาะหนังสีดำหรือสีทึบ เมื่อจอดทิ้งไว้กลางแดดโดยไม่เปิดกระจก พลังงานจากแสงอาทิตย์จะผ่านกระจกเข้ามาในรถและความร้อนจะถูกดูดซับไว้โดยเบาะหนังสีดำ หากมีคนเข้าไปนั่งจะพบว่า เบาะนั่งจะร้อนมาก ซึ่งหากเบาะนั่งมีสีอ่อนๆ เช่น สีเหลือง หรือสีขาว แสงอาทิตย์จะถูกสะท้อนออกไปทำให้เบาะนั่งจะร้อนน้อยกว่าเบาะนั่งสีดำ แสดงให้เห็นว่า สีดำหรือสีทึบมีการดูดซับความร้อนได้ดี วัสดุที่เป็นตัวดูดซับ มีความจำเป็นมากในการทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจากหากปราศจากตัวดูดซับ จะทำให้ระบบการทำน้ำร้อนไม่สามารถผลิตความร้อนมาให้เพียงพอต่อการทำให้น้ำร้อนมีอุณหภูมิตามที่ต้องการได้

ฉนวนกันความร้อน โดยธรรมชาติของความร้อนจะมีการเคลื่อนที่จากที่ร้อนไปยังที่ที่เย็นกว่า หรือที่เรียกว่า การถ่ายเทความร้อน ฉนวนกันความร้อนจะเป็นสิ่งป้องกันความร้อนรั่วไหล หรือเป็นการชะลอการรั่วไหลของความร้อน เนื่องจากฉนวนกันความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่ป้องกันไม่ให้ความร้อนภายในเครื่องทำน้ำร้อนรั่วออกมาภายนอก ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า และฉนวนกันความร้อนเป็นอุปกรณ์สำคัญในเครื่องทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ทุกรูปแบบ

ท่อหรือทางออกของความร้อน เมื่อแสงอาทิตย์ส่องผ่านกระจกใสเข้ามาในเครื่องทำน้ำร้อน โดยมีตัวดูดซับความร้อนทำหน้าที่ให้ความร้อน และมีฉนวนกันความร้อน ในการป้องกันความร้อนรั่วไหล นอกจากนี้ยังอุปกรณ์ที่สำคัญ คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนจากเครื่องทำน้ำร้อนไปยังที่ที่ต้องการใช้งาน ตัวอย่างเช่น ในการปรับอากาศต้องมีช่องลม ท่อลม และพัดลมในการที่จะนำอากาศที่ได้รับการปรับอุณหภูมิแล้ว ไปยังส่วนต่างๆ ของอาคาร ในการนำน้ำร้อนไปใช้งานก็ต้องมี ท่อน้ำ ปั๊มน้ำ และอุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้ในการนำน้ำร้อนไปยังถังเก็บหรืออุปกรณ์ที่ต้องการใช้ความร้อนจากน้ำร้อน

2.9 ประเภทของระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

ในการทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ มีทั้งระบบแอคทีฟ(Active Solar Heater) และระบบพาสซีฟ (Passive Solar Heater) ระบบแอคทีฟนั้น จะมีการใช้ปั้มน้ำแบบใช้ไฟฟ้าบังคับการไหลหมุนเวียนของของเหลวที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อน ส่วนระบบพาสซีฟ จะไม่มีปั้มน้ำแต่จะใช้การไหลเคลื่อนที่ตามธรรมชาติของของเหลวที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนแทน สำหรับปริมาณน้ำร้อนที่จะผลิตได้จะขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของระบบ นอกจากนี้ปริมาณแสงอาทิตย์ ลักษณะการติดตั้งมุมเอียง และทิศทางที่ติดตั้งตัวกักเก็บความร้อนมีผลต่อปริมาณน้ำร้อนที่ผลิตได้

ลักษณะของเครื่องทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ อาจแยกเป็นแบบระบบเปิด หรือแบบส่งน้ำร้อนโดยตรง (Open Loop or Direct) และแบบระบบปิด หรือแบบส่งน้ำร้อนทางอ้อม (Closed Loop or Indirect) สำหรับระบบเปิด น้ำที่ผ่านตัวกักเก็บความร้อนจะถูกนำไปใช้งานโดยตรง และในระบบปิด จะใช้ของเหลวที่ใช้ถ่ายเทความร้อน ซึ่งจะเป็นน้ำที่ได้รับการบำบัดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดตะกรัน หรือของเหลวที่มีจุดเยือกแข็งต่ำ ซึ่งเหมาะกับเมืองหนาว โดยของเหลวที่ใช้ถ่ายเทความร้อนจะนำความร้อนจากตัวกักเก็บความร้อนส่งมายังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) ซึ่งจะมีการถ่ายเทไปให้น้ำร้อนที่จะนำไปใช้ประโยชน์

2.9.1 ระบบแอคทีฟ เป็นระบบที่มีการใช้ปั้มน้ำไฟฟ้า วาล์ว และตัวควบคุม เพื่อบังคับให้น้ำหรือของเหลวที่ใช้ถ่ายเทความร้อนหมุนเวียนในระบบ ผ่านตัวกักเก็บความร้อน โดยทั่วไปจะมีราคาแพงกว่าพาสซีฟ แต่ระบบแอคทีฟ มีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบพาสซีฟ นอกจากนี้ ในด้านการติดตั้งระบบแอคทีฟ ยังติดตั้งง่ายกว่าระบบพาสซีฟ เนื่องจากถังกักเก็บน้ำร้อนในระบบพาสซีฟ จำต้องติดตั้งให้อยู่สูงกว่าตัวกักเก็บความร้อนและต้องอยู่ใกล้กัน แต่ระบบแอคทีฟ ต้องใช้ไฟฟ้าทำให้เสียค่าใช้จ่ายด้านพลังงานมากกว่าระบบพาสซีฟ

ระบบแอคทีฟแบบปิด ระบบนี้จะใช้ปั้มน้ำในการหมุนเวียนน้ำที่ต้องการนำไปใช้ให้ผ่านตัวกักเก็บความร้อน ลักษณะการออกแบบเช่นนี้ จะทำให้มีประสิทธิภาพสูงและค่าใช้จ่ายในการทำน้ำร้อนต่ำ แต่ไม่เหมาะกับกรณีที่น้ำที่นำไปใช้มีความกระด้าง หรือมีความเป็นกรดมาก ตัวอย่างเช่น น้ำบาดาล หรือน้ำประปา ซึ่งลักษณะของน้ำดังกล่าวจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดตะกรัน หรือสนิมขึ้น ซึ่งจะ ทำให้เครื่องทำน้ำร้อนมีอายุการใช้งานสั้นลง

ระบบแอคทีฟแบบปิด ระบบนี้จะใช้ปั้มน้ำในการหมุนเวียนของเหลวที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนให้ผ่านตัวกักเก็บความร้อน ซึ่งโดยทั่วไป จะใช้ของผสมระหว่างไกลคอลกับน้ำ (Glycol-Water Antifreeze Mixtuer) ซึ่งเป็นของผสมที่มีจุดเยือกแข็งต่ำ ระบบนี้จะใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ใน

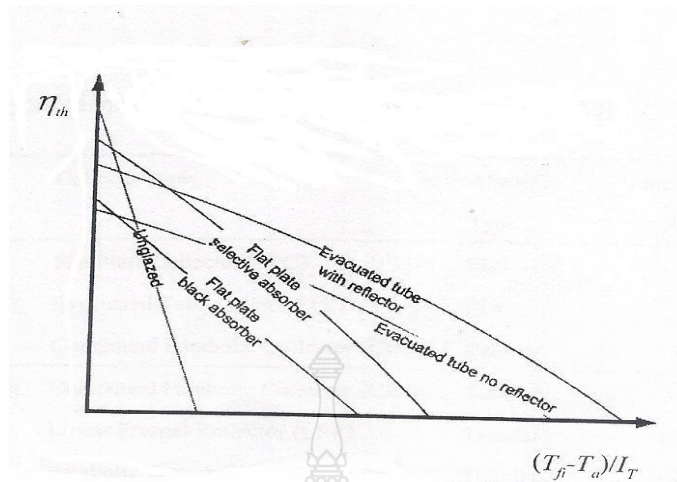
การถ่ายเทความร้อนจากของเหลวที่ใช้ถ่ายเทความร้อนกับน้ำที่ต้องการ นำไปใช้ประโยชน์ ซึ่งจะถูกนำไปเก็บในถังเก็บน้ำร้อน

ระบบท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอน (Thermosiphon Systems) ระบบนี้จะใช้หลักการพาความร้อนตามธรรมชาติ คือ น้ำที่ร้อนกว่าจะอยู่ด้านบน ดังนั้น เมื่อทำการติดตั้งถังเก็บน้ำร้อนให้อยู่สูงกว่าตัวถังเก็บความร้อน จะทำให้เกิดการหมุนเวียนของน้ำ ระหว่างตัวถังเก็บความร้อนกับถังเก็บน้ำร้อน เพราะเมื่อน้ำในตัวถังเก็บความร้อนถูกทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น จะส่งผลให้น้ำมีน้ำหนักเบาขึ้น และจะขึ้นไปอยู่ในถังเก็บน้ำร้อนด้านบนตามหลักการพาความร้อนตามธรรมชาติขณะเดียวกันน้ำเย็นที่อยู่ด้านล่างของถังเก็บน้ำร้อน จะไหลไปสู่ด้านล่างของตัวถังเก็บความร้อน เพื่อระบบที่มีลักษณะคล้ายกับกาลักน้ำ (Siphon) ระบบท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอน มีประสิทธิภาพดี และมีราคาไม่สูง แต่ข้อควรระวัง คือ ในการติดตั้งครั้งแรกต้องได้มาตรฐาน เพราะระบบจะทำงานไม่ได้ถ้ามีข้อผิดพลาดจากการติดตั้ง สำหรับในประเทศเมืองหนาวจะมีการป้องกันน้ำแข็งตัว โดยใช้ของเหลวที่มีจุดเยือกแข็งต่ำร่วมการใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งมีลักษณะคล้ายระบบแอ็คทีฟแบบปิด

2.10 สมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ [10]

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์เป็นอุปกรณ์หลักในระบบทำน้ำร้อนด้วยรังสีอาทิตย์ โดยทำหน้าที่ดูดกลืนการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์เปลี่ยนความร้อน และถ่ายโอนให้กับตัวกลางแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ ซึ่งวัสดุที่ใช้ผลิตตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ดี ต้องมีค่าส่งผ่านและการดูดกลืนรังสีอาทิตย์สูง โดยสีค่ามีค่าดูดกลืนรังสีสูงสุด ดังนั้นผิวแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์สูง และการเปล่งรังสีความร้อนต่ำ ($\alpha = 0.9$ และ $\varepsilon = 0.1$) เพื่อลดการสูญเสียความร้อนจากการเปล่งรังสีจากจากแผ่นดูดกลืนรังสีสู่สิ่งแวดล้อมได้ดีกว่าสีค่าด้านทั่วไป ซึ่งปัจจุบันกรรมวิธีการผลิตผิวเลือกรังสีอาทิตย์มีต้นทุนต่ำลง จึงสามารถพัฒนาตัวเก็บรังสีอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงขึ้น และราคาต่ำ (วัสดุชนิดเดียวกันจะมีค่าแปรผกผันกัน) การปิดผิวแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ เพื่อเพิ่มความสามารถดูดกลืนรังสีและลดการสูญเสียความร้อน จากการพาความร้อนสู่บรรยากาศ ซึ่งการวิเคราะห์สมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะพิจารณาการถ่ายโอนความร้อนที่สภาวะคงตัว

การทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยนำข้อมูลการทดสอบดังกล่าวมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง η_{th} และกราฟที่ได้สามารถวิเคราะห์เป็นสมการเส้นตรงที่ได้จากการพล็อตกราฟโดยข้อมูลที่ได้จะแสดงสัมประสิทธิ์ต่างๆ ดังนี้ โดยที่จุดตัดบนแกนประสิทธิภาพ η_{th} จะแสดงค่า $F_r(\tau\alpha)$ และค่าความชันของเส้นกราฟจะแสดงค่า $F_r U_L$ ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดต่างๆ ตามลำดับดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 การเปรียบเทียบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์

การพิจารณาเปรียบเทียบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ดังรูปที่ 2.26 พบว่าที่สภาวะเดียวกัน ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบที่มีกระจกปิด มีสมรรถนะสูงกว่าตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบที่ไม่มีกระจกปิด โดยแผ่นดูดกลืนรังสีที่เคลือบผิวเลือกกรองสีบนแผ่นดูดกลืนรังสี มีสมรรถนะสูงกว่าการเคลือบด้วยสีดำ ในขณะที่ตัวเก็บรังสีแบบท่อสุญญากาศ มีสมรรถนะสูงกว่าตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบ เนื่องจากสุญญากาศ ช่วยลดการสูญเสียความร้อนออกจากแผ่นดูดกลืนรังสี ตามลำดับ และมีสมรรถนะสูงขึ้น

2.11 การถ่ายเทความร้อน [10]

กระบวนการถ่ายเทความร้อน เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนย้ายถ่ายเทและเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนซึ่งอยู่ในขอบเขตของกฎข้อที่หนึ่งและข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ที่ว่า “พลังงานต่างๆ ไม่ถูกสร้างขึ้นหรือถูกทำลายได้แต่สามารถเปลี่ยนจากรูปหนึ่งของพลังงานไปเป็นอีกรูปหนึ่งได้” และ “ไม่มีกระบวนการใดๆที่จะเคลื่อนย้ายถ่ายเทพลังงานจากอุณหภูมิต่ำกว่าไปยังอุณหภูมิที่สูงกว่า” วิทยาศาสตร์ทางการถ่ายเทความร้อนกล่าวถึงหลักการที่ว่าความร้อนจะเคลื่อนที่จากแหล่งที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่แหล่งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งเป็นหลักการเดียวกันอัตราการถ่ายเทความร้อนมีความสำคัญมากต่อการออกแบบเครื่องมืออื่นๆ

การถ่ายเทความร้อนโดยวิธีต่าง ๆ ที่กล่าวแล้วแต่ละวิธีของการกระบวนการถ่ายเทความร้อนอาจจะแบ่งแยกออกเป็นประเภทได้ตามสภาวะ การถ่ายเทพื้นฐานภายนอกและจำนวนมิติที่เกิดการถ่ายเท

1. การถ่ายเทความร้อนในสภาวะสม่ำเสมอ (Steady State) เป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่ออัตราการเคลื่อนไหลของความร้อนในระบบหรือในกระบวนการไม่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลาที่เปลี่ยนไป เช่นเมื่อเวลาคงที่หรือเมื่อพิจารณาหาค่าการถ่ายเทความร้อนที่เวลาใดเวลาหนึ่ง อุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ จะคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

2. การถ่ายเทความร้อนในสภาวะไม่สม่ำเสมอ (Unsteady or Transient State) การถ่ายเทความร้อนในสภาวะนี้เกิดขึ้นอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ในระบบเปลี่ยนไปตามเวลาที่เปลี่ยนอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปนี้แสดงให้เห็นถึงการเกิดการเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายในระบบ

3. การถ่ายเทความร้อนตามลักษณะตั้งฐานภายนอก (Configuration) การถ่ายเทความร้อนในลักษณะนี้อาจเป็นไปตามรูปลักษณะทรงเรขาคณิตศาสตร์ เช่น การถ่ายเทความร้อนของวัตถุรูปผืนง้วนเรียบ รูปทรงกระบอก รูปท่อและรูปแผ่นขนาน

หรือเป็นไปตามลักษณะการวางของวัตถุ เช่น การถ่ายเทความร้อนในแนวดิ่งหรือแนวตั้ง ในแนวราบหรือแนวนอน และในแนวเอียงลาด เป็นต้น

หรือเป็นไปตามลักษณะการไหลของของเหลวหรือก๊าซผ่านไปมาตามวัตถุแข็ง เช่น การถ่ายเทความร้อนในลักษณะการไหลผ่านภายในและการไหลผ่านภายนอก เป็นต้น

4. การถ่ายเทความร้อนตามจำนวนมิติการถ่ายเท (Number of Dimension) การถ่ายเทความร้อนอาจมีทิศทางไปทางเดียวเรียกว่าการถ่ายเทความร้อนหนึ่งมิติ เช่น การถ่ายเทความร้อนของท่อที่ฝังอยู่ใต้พื้นดิน หรือมีทิศทางไปสามทางเป็นการถ่ายเทความร้อนสามมิติ เช่น การถ่ายเทความร้อนจากท่อที่ยื่นออกมาจากตึก เป็นต้น

2.11.1 วิธีการถ่ายเทความร้อน

ความร้อนหรือพลังงานความร้อนจะเคลื่อนย้ายถ่ายเทได้ 3 วิธีด้วยกัน คือการนำ (Conduction) การพา (Convection) และการแผ่รังสี (Radiation)

แม้จะมีการแบ่งแยกวิธีการเคลื่อนย้ายถ่ายเทความร้อนและการวิเคราะห์การเคลื่อนย้ายถ่ายเทความร้อนออกเป็น 3 วิธี ดังกล่าว แต่การถ่ายเทความร้อนส่วนมากในสภาพทั่วไป ความร้อนจะไม่เคลื่อนย้ายโดยวิธีใดวิธีหนึ่งเพียงวิธีเดียว แต่จะถ่ายเทโดยหลายวิธีที่กล่าวมาพร้อมกัน ในการแก้ปัญหาจะพิจารณาถึงวิธีการที่ความร้อนเคลื่อนย้ายถ่ายเทไปมากที่สุด เป็นวิธีการที่ความร้อน

ใช้ในการถ่ายเทความร้อนโดยไม่คำนึงถึงวิธีการอื่นๆ ที่ความร้อนใช้ในการถ่ายเทแต่ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทโดยวิธีนั้นๆ น้อย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหานั้น

1. การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ เป็นกระบวนการที่ความร้อนเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าภายในตัวกลาง (ของแข็ง ของเหลวหรือ ก๊าซ) หรือวัตถุเดียวกัน หรือระหว่างตัวกลางที่ต่างกันแต่อยู่สัมผัสหรือติดต่อกันโดยตรง การเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการนำนี้พลังงานภายในวัตถุจะถ่ายเทหรือเคลื่อนย้ายโดยการติดต่อโดยตรงของโมเลกุลและปราศจากการเคลื่อนย้ายของโมเลกุลของวัตถุนั้น ๆ วัตถุแข็งที่บดแสงจะมีการเคลื่อนย้ายของความร้อนโดยวิธีการนำเพียงอย่างเดียว การเคลื่อนย้ายความร้อนของความร้อนในตัวกลางหรือวัตถุที่ไม่เป็นของแข็ง ส่วนมากจะเป็นไปแบบผสมกล่าวคือ ความร้อนจะเคลื่อนที่ถ่ายเทไปด้วยวิธีการนำและการพาไปทั้งสองวิธีและบางลักษณะจะมีการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีการแผ่

2. การถ่ายเทความร้อนโดยการพา เป็นกระบวนการถ่ายความร้อนระหว่างผิวของวัตถุแข็งกับของเหลวหรือก๊าซ กระบวนการถ่ายเทความร้อน ไม่มีเฉพาะความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างวัตถุเพียงอย่างเดียว แต่มีองค์ประกอบอื่น ๆ อีกที่เกี่ยวข้องและมีผลต่อกระบวนการถ่ายเทความร้อนโดยวิธีการพา นี้ เช่นลักษณะการเคลื่อนที่ของเหลวหรือก๊าซ เป็นต้น อย่างไรก็ตามการถ่ายเทความร้อนโดยวิธีนี้ก็ให้ผลเหมือนกับการถ่ายเทความร้อนโดยวิธีอื่น ๆ คือมีการเคลื่อนย้ายพลังงานเกิดขึ้นและเคลื่อนย้ายไปตามอุณหภูมิที่ลดต่ำลง (Temperature Gradient) การถ่ายเทความร้อนโดยวิธีการพานี้เป็นกระบวนการที่สำคัญมาก เพราะความร้อนจะถูกนำพาไปด้วยพลังงานจะถูกสะสมและเคลื่อนย้ายด้วยวิธีต่างๆ ปนกันไป (Mixing Motion) การพาความร้อนจึงอาจแบ่งแยกออกเป็นประเภทย่อยตามลักษณะต่าง ๆ

3. การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่เป็นกระบวนการที่ความร้อนเคลื่อนจากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่วัตถุนั้นอยู่ห่างจากกัน และแม้ว่าระยะห่างนั้นจะเป็นบริเวณสุญญากาศก็ตาม การแผ่ความร้อนโดยทั่วไปหมายถึงกระบวนการถ่ายทอดหรือส่งพลังงานออกไปโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การกระจายของคลื่นแม่เหล็กที่เกิดจากผลต่างของอุณหภูมิและทำให้พลังงานเคลื่อนย้ายเรียกว่า การแผ่ความร้อน (Thermal Radiation) ซึ่งต่างกับการแผ่กระจายของแสง (Light Radiation) ที่ช่วงความยาวคลื่น (Wave Length) ต่างกัน

2.6.2 การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำ (Conduction Heat Transfer)

เมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิที่ถ่ายเทจากด้านในของวัตถุหนึ่งสู่ด้านนอก กรณีนี้แสดงว่ามี การถ่ายเทพลังงานจากขอบเขตที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ขอบเขตที่มีอุณหภูมิต่ำ ลักษณะเช่นนี้เราได้กล่าว ว่าพลังงานถ่ายเทด้วยวิธีการนำ นั่นแสดงว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เป็นสัดส่วน โดยตรงกับค่าอุณหภูมิ

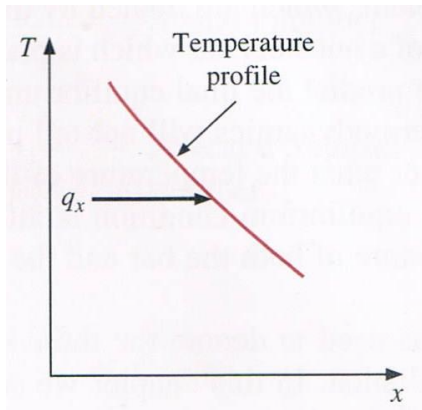
$$\frac{q}{A} \sim \frac{\partial T}{\partial x}$$

เมื่อแทนด้วยสัดส่วนที่เป็นค่าคงที่ จะได้สมการดังนี้

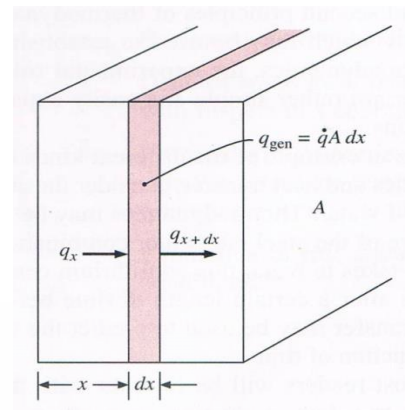
$$q = kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.8)$$

เมื่อ q คืออัตราการถ่ายเทความร้อน $\frac{\partial T}{\partial x}$ คือค่าอุณหภูมิในทิศทางที่ความร้อนไหล ค่าคงที่ k มีค่าเป็นบวก เรียกว่า “สภาพการนำความร้อนของวัสดุ” และถ้ามีค่าเป็นลบแสดงว่า เป็นไปตามหลัก การของกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ ตัวอย่างเช่น ความร้อนที่ไหลจะมีค่าลดต่ำลงตามสเกลอุณหภูมิที่แสดงด้วยระบบ โคออร์ดิเนต ดังรูปที่ 2.27 สมการที่ 2.8 เรียกว่า “กฎของฟูรีเยร์ของการนำความร้อน” ที่ได้จากนักฟิสิกส์และคณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศสชื่อ โจเซฟ ฟูรีเยร์ (Joseph Fourier) เป็นผู้รวบรวมหลักสำคัญพร้อมทั้งแสดงวิธีการวิเคราะห์ปัญหาการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำ ซึ่งถือว่ามีค่าสำคัญมากจากสมการที่ 2.28 เป็นสมการของสภาพการนำความร้อน และค่า k มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวเมตรต่อหนึ่งองศาเซลเซียส ในขณะที่เดียวกันค่าของ ความร้อนมีหน่วยเป็นวัตต์

ให้พิจารณาระบบที่เป็นหนึ่งมิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.28 ถ้าระบบอยู่ในสภาวะคงตัว (สม่ำเสมอ) ตัวอย่างเช่น ถ้าค่าอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาแล้วให้นำเอาสมการที่ 2.8 มาทำการอินทิเกรตและแทนค่าลงไป ก็จะได้ผลลัพธ์ตามต้องการ



รูปที่ 2.27 ทิศทางการไหลของความร้อน



รูปที่ 2.28 ปริมาตรอีเลเมนต์ที่ใช้วิเคราะห์การนำความร้อนในหนึ่งมิติ

อย่างไรก็ดี ถ้าค่าอุณหภูมิของของแข็งมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กัเวลา หรือถ้ามีแหล่งกำเนิดความร้อน หรือตัวรับความร้อน อยู่ภายในของแข็ง ก็จะทำให้ปัญหานี้ยุ่งยากมากขึ้น เราพิจารณากรณีต่างๆ ไป ซึ่งอุณหภูมิอาจจะเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กัเวลา และแหล่งกำเนิดความร้อน ประกอบรวมอยู่ในวัตถุ สำหรับอีเลเมนต์นี้มีความหนา dx การสมดุลพลังงานจะได้ดังนี้

พลังงานที่ถูกนำมาที่ผิวด้านซ้าย + พลังงานที่ผลิตขึ้นในอีเลเมนต์ = พลังงานภายในที่เปลี่ยนแปลง + พลังงานที่ถูกนำออกมาที่ผิวด้านขวา

ปริมาณของพลังงานดังกล่าว พิจารณาได้ดังต่อไปนี้

$$\text{พลังงานที่ถูกนำมาที่ผิวด้านซ้าย} = q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$\text{พลังงานที่ผลิตขึ้นในอีเลเมนต์} = \dot{q} A dx$$

$$\text{พลังงานภายในที่เปลี่ยนแปลง} = \rho c A \frac{\partial T}{\partial x} dx$$

$$\text{พลังงานที่ถูกนำออกมาที่ผิวด้านขวา} = q_{x+dx} = -kA \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{x+dx}$$

$$= -A \left[k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right]$$

- เมื่อ \dot{q} = พลังงานที่ผลิตขึ้นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (วัตต์ต่อตารางเมตร)
 c = ความร้อนจำเพาะของวัสดุ (จูลต่อกิโลกรัมเซลเซียส)
 ρ = ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อตารางเมตร)

ให้รวมความสัมพันธ์ต่างๆ ข้างบนนี้ในสมการสมดุลพลังงาน จะได้

$$-kA \frac{\partial T}{\partial x} + \dot{q} A dx = \rho c A \frac{\partial T}{\partial x} dx - A \left[k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right]$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (2.9)$$

สมการที่ 2.9 เป็นการนำความร้อนหนึ่งมิติที่กำหนดค่าให้ปริมาณความร้อนไหลเป็นจำนวนมาก ดังนั้นสิ่งที่เราต้องพิจารณาก็คือ การนำความร้อนเท่านั้น ที่ไหลเข้าและออกจากปริมาตรๆ หนึ่งทั้งสามทิศทาง ที่แสดงด้วยโคออร์ดิเนต ดังในรูปที่ 2.12 (a) การสมดุลพลังงานคือ

$$-q_x + q_y + q_z + q_{gen} = q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_{z+dz} + \frac{dE}{d\tau}$$

และปริมาณพลังงานที่ให้มีดังนี้

$$q_x = -k dy dz \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$q_{x+dx} = - \left[k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] dy dz$$

$$q_y = -k dy dz \frac{\partial T}{\partial y}$$

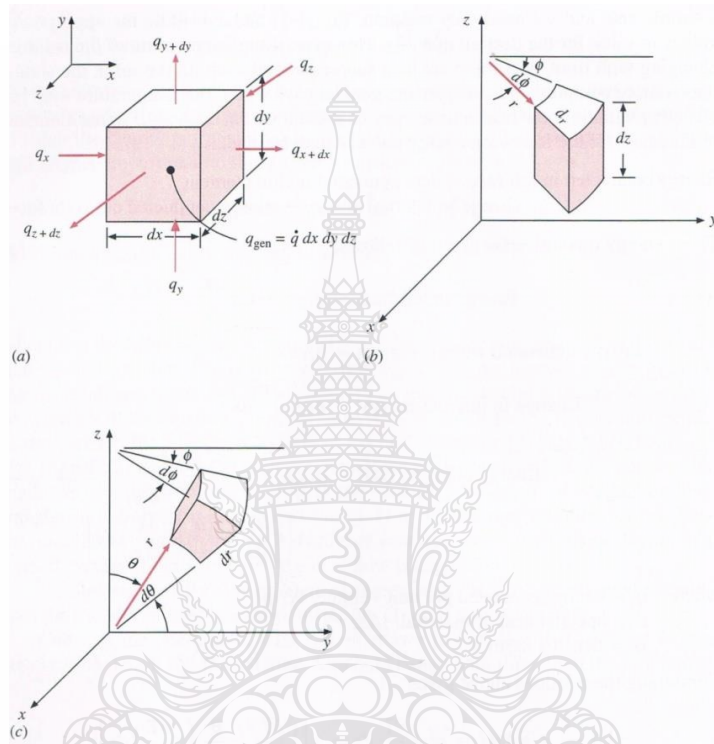
$$q_{y+dy} = - \left[k \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) dy \right] dx dz$$

$$q_z = -k dx dy \frac{\partial T}{\partial z}$$

$$q_{z+dz} = - \left[k \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) dz \right] dx dy$$

$$q_{gen} = \dot{q} \, dx \, dy \, dz$$

$$\frac{dE}{dT} = \rho c \, dx \, dy \, dz \frac{\partial T}{\partial \tau}$$



รูปที่ 2.29 ปริมาตรของอีเลเมนต์ที่ใช้วิเคราะห์การนำความร้อนสามมิติ

- (a) ระบบพิกัดคาร์ทีเซียน
- (b) ระบบพิกัดซลินดริคัล
- (c) ระบบพิกัดสเฟียริคัล

ดังนั้นรูปทั่วไปของสมการการนำความร้อนสามมิติ จะแสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (2.10)$$

สำหรับกรณีที่ค่าสภาพการนำความร้อนที่ค่าคงที่ ดังนั้นสมการที่ 2.10 นำมาเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (2.11)$$

เมื่อ ปริมาณ $\alpha = k/\rho c$ เรียกว่า ค่าสภาพการแพร่กระจายความร้อนของวัสดุ

สำหรับค่า α ที่มีค่ามาก ความร้อนจะเกิดการแพร่กระจายผ่านวัสดุได้เร็วมากด้วย เราจะเห็นได้จากการทดสอบว่าการทำให้ค่า α มีค่ามากขึ้น มักเป็นผลต่อเนื่องมาจากค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุมีค่ามากด้วย ซึ่งชี้ให้เห็นว่ามีอัตราการถ่าย เทพพลังงานรวดเร็ว หรืออาจเป็นเพราะค่าความจุความร้อน (ρc) มีค่าต่ำ ค่าความจุความร้อนต่ำ หมายถึง พลังงานมีการเคลื่อนที่ผ่านวัสดุน้อย จะทำให้ดูเคลื่อนความร้อนได้น้อย และใช้เพื่อทำให้อุณหภูมิของวัสดุเพิ่มขึ้น ดังนั้นพลังงานจำนวนมากนี้จะนำไปใช้เพื่อการถ่ายเทต่อไป ค่าสภาพการแพร่กระจายความร้อน มีหน่วยเป็นตารางเมตรต่อวินาที

จากความสัมพันธ์ข้างบน แสดงอนุพันธ์ที่ $x + dx$ นำมาเขียนในรูปของอนุกรมเทย์เลอร์ด้วย เทอมสองเทอมแรกที่จะนำมาใช้ในการคำนวณต่อไป สมการที่ 2.16 นำมาปรับเปลี่ยนได้ทั้ง โคออร์ดิเนตทรงกระบอกหรือทรงกลมด้วยเทคนิคการคำนวณที่เป็นมาตรฐาน ผลเฉลยที่ได้มีดังนี้

โคออร์ดิเนตทรงกระบอก

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (2.12)$$

โคออร์ดิเนตทรงกลม

$$\frac{1}{r} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} (rT) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{q}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (2.13)$$

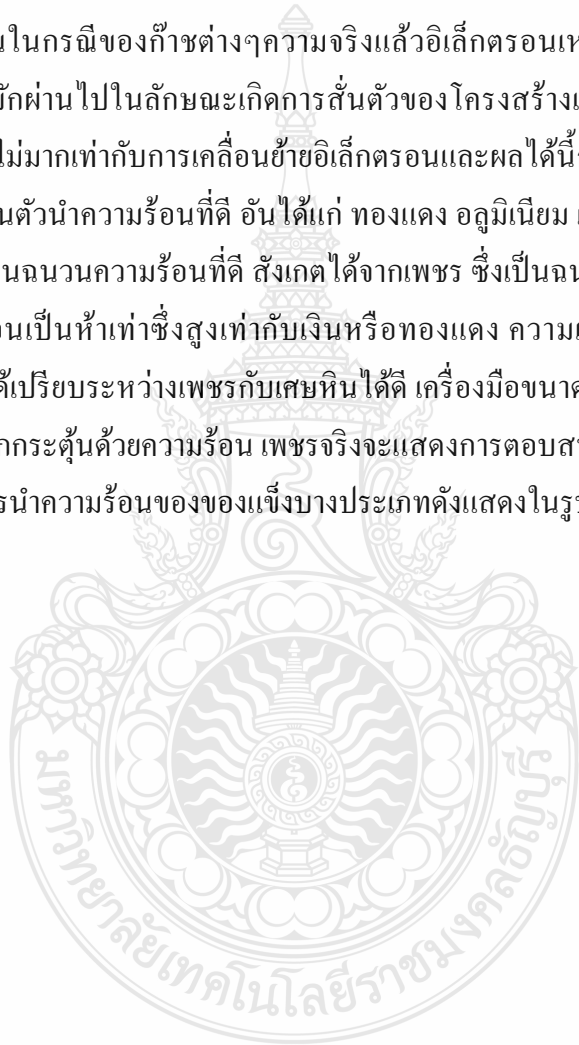
ระบบโคออร์ดิเนตที่ใช้กับสมการที่ 2.8 และ 2.9 ตามลำดับปัญหาในทางปฏิบัติส่วนมาก รวมทั้งกรณีพิเศษเฉพาะของสมการทั่วไปที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น จะใช้เป็นแนวทางในบทต่อไป โดยภาพรวมแล้วสามารถแสดงการลดรูปได้ เพื่อให้สามารถนำไปใช้กับกรณีต่างๆ หลากๆ กรณีในทางปฏิบัติได้เป็นอย่างดี

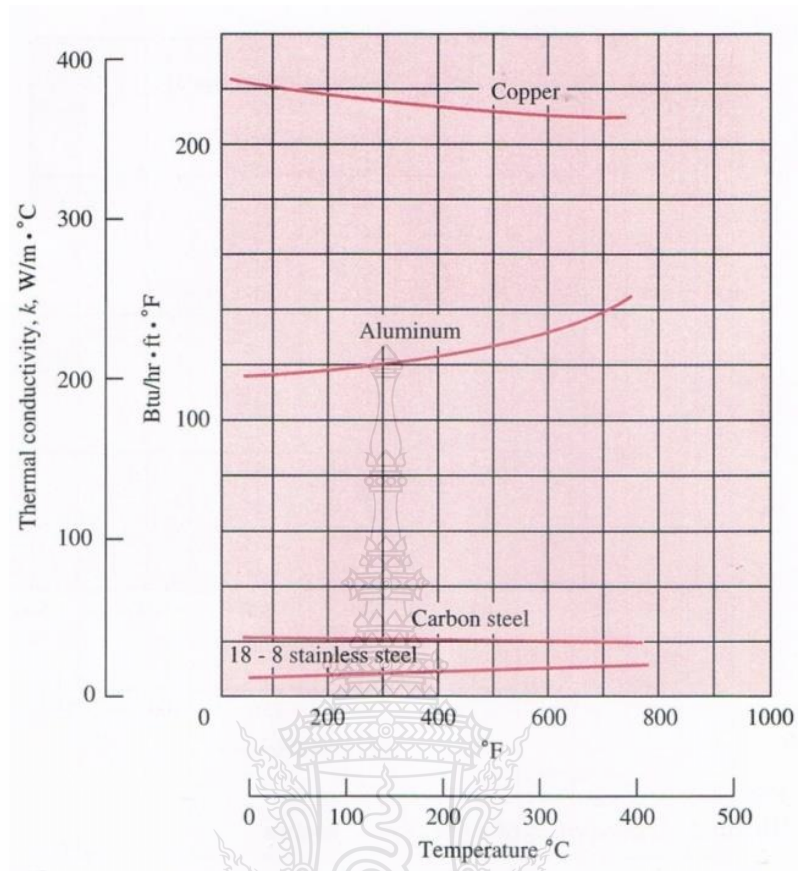
2.6.3 สภาพการนำความร้อน (Thermal Conductivity)

สมการที่ 2.17 เป็นสมการที่กำหนดสภาพการนำความร้อน การกำหนดนี้จะขึ้นอยู่กับพื้นฐานของค่าที่วัดได้จากการทดลองโดยการหาค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุชนิดต่างๆ สำหรับ ก๊าซที่ให้ค่าอุณหภูมิ การวิเคราะห์ได้กำหนดไว้ในทฤษฎีของโคเนติกหรือทฤษฎีของไหลของก๊าซต่างๆ ต้องนำมาใช้เพื่อกำหนดค่าความถูกต้องซึ่งเป็นค่าที่ได้จากทดลอง ทฤษฎีเหล่านี้สามารถนำมาใช้กับการกำหนดสภาพการนำความร้อนในของเหลวและของแข็ง แต่โดยทั่วไปแล้วมีค่าต่างกัน

ค่อนข้างมาก และรวมทั้งแนวคิดที่ต้องการค่าเพื่อนำไปใช้เฉพาะเจาะจงลงไปว่าเป็นของเหลวและแข็งชนิดใด

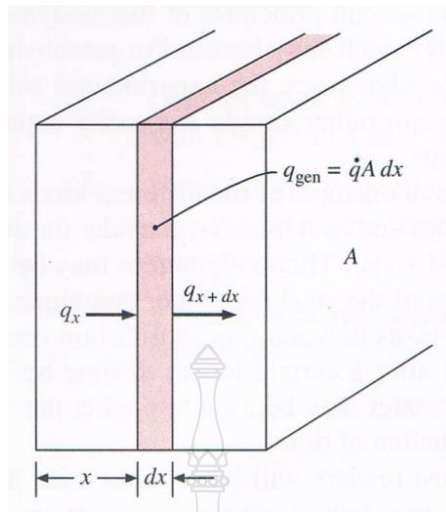
พลังงานความร้อนที่ไหลผ่านของแข็งเกิดขึ้นได้ 2 วิธี คือ การสั่นของแลตทิซและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ สำหรับตัวนำความร้อนที่ดีจะมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมากเคลื่อนที่ภายในโครงสร้างของแลตทิซของวัสดุนั้น ขณะที่อิเล็กตรอนของวัสดุนั้นอาจจะเคลื่อนที่ด้วยประจุไฟฟ้า เช่นเดียวกับพลังงานความร้อนที่เคลื่อนย้ายจากขอบเขตพื้นที่อุณหภูมิสูงไปขอบเขตที่มีอุณหภูมิต่ำ ดังเช่นในกรณีของก๊าซต่างๆความจริงแล้วอิเล็กตรอนเหล่านี้ก็ต้องอ้างอิงถึงก๊าซอิเล็กตรอน พลังงานมักผ่านไปในลักษณะเกิดการสั่นตัวของ โครงสร้างแลตทิซของวัสดุโดยทั่วไปวิธีการถ่ายเทพลังงานไม่มากเท่ากับการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนและผลได้นี้ก็คือเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ซึ่งเกือบทั้งหมดมักจะเป็นตัวนำความร้อนที่ดี อันได้แก่ ทองแดง อลูมิเนียม และเงิน และฉนวนๆไฟฟ้าโดยปกติแล้วจะต้องเป็นฉนวนความร้อนที่ดี สังกะสีได้จากเพชร ซึ่งเป็นฉนวนไฟฟ้าแต่สามารถให้ค่าสภาพการนำความร้อนเป็นห้าเท่าซึ่งสูงเท่ากับเงินหรือทองแดง ความเป็นจริงนี้นักเจียรนัยเพชรสามารถพิจารณาข้อได้เปรียบระหว่างเพชรกับเศษหินได้ดี เครื่องมือขนาดเล็กสามารถนำมาใช้วัดผลตอบสนองของหินที่ถูกระตุ้นด้วยความร้อน เพชรจริงจะแสดงการตอบสนองที่รวดเร็วมากกว่าหินที่คุณภาพไม่ดี สภาพการนำความร้อนของของแข็งบางประเภทดังแสดงในรูปที่ 2.30





รูปที่ 2.30 ค่าสภาพการนำความร้อนของของแข็งบางชนิด

ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุต่างๆ ที่นำมาใช้ทำฉนวนหลายชนิด ค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนบางประเภท ที่อุณหภูมิสูง การถ่ายเทพลังงานผ่านวัสดุฉนวนอาจเกิดขึ้นได้หลายวิธี เช่น การนำผ่านไฟเบอร์หรือวัสดุแข็งที่มีเนื้อพรุน การนำผ่านช่องอากาศในพื้นที่จัดระยะห่างเอาไว้ และที่อุณหภูมิสูง จะเกิดการแผ่รังสีความร้อนด้วย



รูปที่ 2.31 ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุฉนวนที่ใช้กับความเย็นยิ่งยวด

ปัญหาทางเทคนิคที่สำคัญประการหนึ่ง คือ การสะสมและการส่งของของเหลวที่เป็นการทำความเย็นอย่างยิ่งยวด เช่นเดียวกับไฮโดรเจนเหลวในช่วงเวลาที่เกิดขึ้น ดังนั้นการนำมาประยุกต์ให้เกิดการพัฒนาเป็นฉนวนที่ดีที่สุด (Superinsulations) เพื่อใช้ในกรณีที่มีอุณหภูมิต่ำมากๆ (ต่ำประมาณ -250 องศาเซลเซียส) ประสิทธิภาพของฉนวนเหล่านี้ส่วนมากประกอบด้วยวัสดุหลายๆ ชั้น โดยมีวัสดุที่มีค่าการสะท้อนกลับได้สูงติดตั้งแยกออกจากกัน โดยการกำหนดเป็นระยะห่างของการติดตั้งฉนวนในแต่ละระบบจะต้องนำมาใช้เพื่อกำหนดในการนำความร้อนผ่านอากาศมีค่าต่ำสุด และค่าสภาพการนำความร้อนอาจมีค่าต่ำถึง 0.3 มิลลิวัตต์ต่อเมตรเซลเซียส ก็ได้ กล่าวโดยสรุปในแง่การใช้งานนั้น ต้องเลือกวัสดุฉนวนให้สอดคล้องกับอุณหภูมิเย็นยิ่งยวดดังแสดงในรูปที่ 2.31

2.6.4 ความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance)

การเปรียบเทียบความสามารถระบายความร้อนของเครื่องระบายความร้อนรูปปร่างต่าง ๆ นั้น จะใช้ค่าความต้านทานความร้อน โดยหาได้จากสมการที่ 2.14

$$R_{th} = \frac{1}{\bar{h}_c A_s} = \frac{(T_s - T_j)}{IV} \quad (2.14)$$

- โดยที่ R_{th} คือ ความต้านทานความร้อน (เคลวินต่อวัตต์)
 \bar{h}_c คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย (วัตต์ต่อตารางเมตรเคลวิน)
 A_s คือ พื้นที่ผิวที่สัมผัสของไหล (ตารางเมตร)

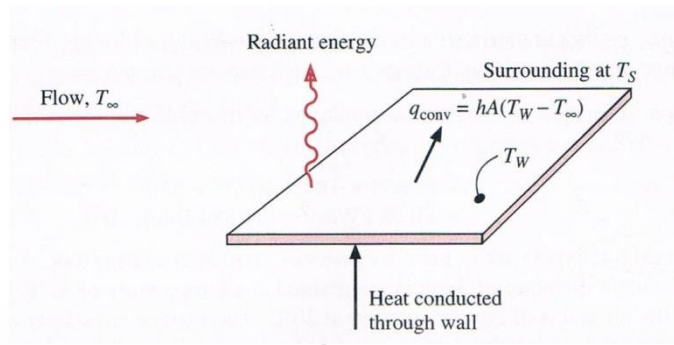
การหาค่าพื้นที่ผิวที่สัมผัสของไหล (A_s) สมการหาได้จากสมการที่ 2.11

$$A_s = A_{base} + \eta_{fin} (\pi d_{fin} h_{fin}) + 4 (t_{base} L_{base}) \quad (2.15)$$

โดยที่	A_{base}	คือ พื้นที่ฐานของครีบริบายความร้อน (ตารางเมตร)
	η_{fin}	คือ จำนวนครีบริบายความร้อน
	π	คือ Pi = 3.1416
	d_{fin}	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของครีบริบายความร้อน (เมตร)
	h_{fin}	คือ ความสูงของครีบริบายความร้อน (เมตร)
	t_{base}	คือ ความหนาของฐานครีบริบายความร้อน (เมตร); ($t_{base} = 0.005$ เมตร)
	L_{base}	คือ ความยาวของฐานครีบริบายความร้อน (เมตร)

2.6.5 การถ่ายเทความร้อนด้วยการพา (Convection Heat Transfer)

มักทราบกันดีแล้วว่า แผ่นโลหะร้อนจะเย็นตัวลงได้อย่างรวดเร็วเมื่อนำไปวางให้พัดลมเป่ามากกว่าการนำไปวางไว้ในอากาศนิ่ง ๆ วิธีการนี้เรียกว่าการพา หรือเรียกว่า กระบวนการถ่ายเทความร้อนด้วยการพา สำหรับการพาได้มาจากการดึงเอาพฤติกรรมที่สังเกตได้ในกระบวนการถ่ายเทความร้อน อย่างไรก็ตามการดึงเอาข้อสังเกตต้องขยายความออกมาด้วย เหตุผลหนึ่งก็เพื่อใช้เป็นข้อเปรียบเทียบ แล้วนำมากำหนดการวิเคราะห์ในปัญหานั้นๆ ขึ้น ตัวอย่างเช่น เราทราบว่าความเร็วที่อากาศเป่าบนแผ่นเรียบที่ร้อนทำให้มีผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน เป็นต้น และมีผลกระทบทำให้เกิดการระบายความร้อนโดยตรง ตัวอย่างเช่น ถ้าเพิ่มความเร็วเป็นสองเท่า อัตราการถ่ายเทความร้อนจะเป็นสองเท่าหรือไม่? เรามักสงสัยว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนอาจจะแตกต่างกัน ถ้าเราระบายความร้อนแผ่นเรียบด้วยน้ำแทนที่จะใช้อากาศ จะมีค่าแตกต่างกันเท่าไร คำถามเหล่านี้อาจต้องตอบก่อนเพื่อช่วยให้การวิเคราะห์ในขั้นพื้นฐานดีขึ้น ดังจะได้กล่าวในบทต่อไป สำหรับขณะนี้ เราสเก็ชกลไกทางกายภาพของการถ่ายเทความร้อนด้วยการพา และแสดงความสัมพันธ์ไปถึงกระบวนการนำความร้อนด้วย



รูปที่ 2.32 การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาออกจากแผ่นเรียบ

พิจารณาการให้ความร้อนแผ่นเรียบ ดังภาพที่ 2.15 อุณหภูมิของแผ่นเรียบคือ T_w และอุณหภูมิของของไหล คือ T_∞ ความเร็วของของไหลดังแสดงรูป และความเร็วนี้ลดลงจนกระทั่งมีค่าเป็นศูนย์ที่ผิวแผ่นเรียบเพราะเกิดการกระทำของค่าความหนืด เมื่อความเร็วของชั้นของของไหลที่ผนังเป็นศูนย์ ความร้อนต้องถ่ายเทด้วยการนำความร้อนที่จุด ๆ นั้น ดังนั้น เราต้องคำนวณการถ่ายเทความร้อนโดยใช้สมการที่ 2.21 ด้วยค่าสมการนำความร้อนของของไหลและอุณหภูมิของของไหลที่ผนัง ถ้าการไหลของความร้อนเกิดขึ้นลักษณะที่เป็นการนำความร้อนในชั้นนี้ หรือเมื่อเราพูดถึงการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาแล้วต้องพิจารณาค่าความเร็วของของไหลด้วยหรือ? คำตอบก็คือ ค่าอุณหภูมินั้นขึ้นอยู่กับอัตราของของไหลที่นำความร้อนออกไป หากมีความเร็วสูงก็จะทำให้มีค่าการพาความร้อนที่อุณหภูมิสูงด้วย ดังนั้นค่าอุณหภูมิที่บริเวณผนังนั้นจะขึ้นอยู่กับสนามการไหล และต้องนำเอาความสัมพันธ์วิเคราะห์ร่วมกันในภายหลังปริมาณทั้งสองดังกล่าว แม้ว่าเราต้องจำกลไกเชิงกายภาพของการถ่ายเทความร้อนในผนังว่าเป็นกระบวนการนำความร้อน การแสดงผลกระทบรวมของการพาความร้อน เราใช้กฎของนิวตันว่าด้วยการระบายความร้อนจะได้

$$Q = hA(T_w - T_\infty) \quad (2.16)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนนี้จะสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่แตกต่างรวมทั้งหมด ระหว่างผนังกับของไหลและพื้นที่ผิว A ปริมาณของ h เรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการพา และสมการที่ 2.16 คือสมการที่ได้จากการกำหนดเงื่อนไขข้างต้นนี้ การวิเคราะห์ผลการคำนวณของค่า h อาจนำไปใช้ในบางระบบ สำหรับในสถานะที่ซับซ้อนต้องหาค่าด้วยวิธีการทดลอง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบางครั้งเรียกว่า การนำผ่านฟิล์ม เพราะความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นกระบวนการนำความร้อนในชั้นบางๆ ของของไหลที่บริเวณผิวของผนัง จากสมการที่ 2.16 เราสังเกต

ได้ว่าหน่วยของ h คือ วัตต์ต่อหนึ่งหน่วยตารางเมตรต่อองศาเซลเซียสเมื่อความร้อนที่ไหลนั้นมีหน่วยเป็นวัตต์

โดยภาพรวมที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป สิ่งหนึ่งอาจจะกำหนดค่าการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาว่าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางความร้อนของของไหล คือ ค่าสภาพการนำความร้อน ความร้อนจำเพาะ ความหนาแน่น เพราะอิทธิพลความหนืดที่มีต่อสภาพของความเร็วที่เปลี่ยนแปลงจากผิวผนังจนถึงชั้นขอบเขตความเร็วที่เกิดขึ้นจริง และความสอดคล้องของอัตราการถ่ายเทพลังงานในขอบเขตให้ใกล้เคียงผนัง

ถ้าแผ่นเรียบที่ให้ความร้อนแล้ว นำไปวางในห้องซึ่งมีอากาศล้อมรอบ จะไม่มีแหล่งความร้อนภายนอกที่อาจเคลื่อนที่เข้ามา การเคลื่อนที่ผ่านของอากาศ ผลลัพธ์ของค่าความหนาแน่นจะอยู่ใกล้กับแผ่นเรียบ เราเรียกว่า “การพาโดยธรรมชาติหรืออิสระ” ลักษณะการพาเช่นนี้แตกต่างกับวิธีการพาด้วยแรงบังคับ ซึ่งจากประสบการณ์ในกรณีนี้ก็คือการใช้พัดลมเป่าอากาศเป่าลงบนแผ่นเรียบ

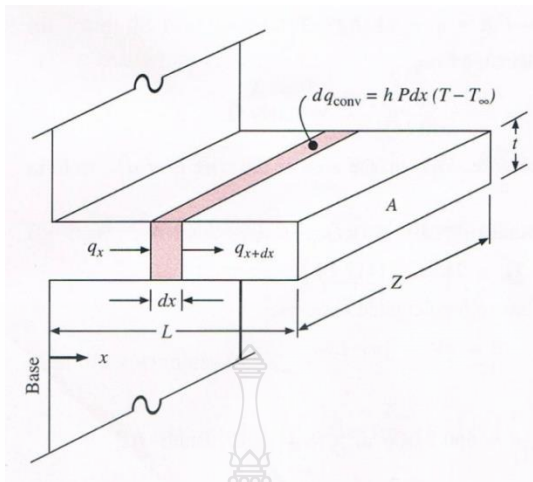
2.6.6 ระบบที่มีการนำและการพาความร้อนร่วมกัน

ความร้อนที่นำผ่านวัสดุมักเกิดกระบวนการพาความร้อนออกมาบางส่วนด้วย ตัวอย่างเช่น การสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตาแล้วปล่อยสู่สภาวะแวดล้อมด้วยวิธีการพาความร้อน การใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดที่เป็นท่อแล้วติดตั้งที่ผิวท่อมักนำมาใช้กับการดึงความร้อนออกจากของเหลวร้อน การถ่ายเทความร้อนจากของเหลวไปสู่ท่อที่ติดตั้งจึงเป็นการพาความร้อน ความร้อนที่นำผ่านวัสดุแล้วปล่อยสู่สภาวะแวดล้อมจะเป็นการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีการพาความร้อน

การวิเคราะห์ระบบที่มีทั้งการนำความร้อนและการพาความร้อนจึงมีความสำคัญกับการนำไปใช้ในทางปฏิบัติมาก สำหรับในส่วนนี้เป็นการทดสอบกับปัญหาพื้นที่ที่ยื่นออกมามีรูปทรงสี่เหลี่ยมง่าย ๆ โดยพิจารณาเป็นครีบริบที่มีหนึ่งมิติสัมผัสกับของไหลที่มีสภาวะแวดล้อมที่อุณหภูมิ T_∞ ดังแสดงในรูปที่ 2.33 ค่าอุณหภูมิที่ฐานของครีบริบคือ T_0 วิธีการแก้ปัญหานี้ให้ทำการสมมูลพลังงานบนอีเลเมนต์ของครีบริบที่มีความหนา dx ดังแสดงในรูปที่ 2.33 ดังนี้

พลังงานที่ผิวด้านซ้าย = พลังงานที่ออกมาที่ผิวด้านขวา + พลังงานที่สูญเสียโดยการพาการกำหนดสมการเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการพา นำมาเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$q = hA(T_w - T_\infty) \quad (2.17)$$



รูปที่ 2.33 การนำและการพาความร้อนหนึ่งมิติผ่านครีบทรงเรขาคณิต

เมื่อพื้นในสมการนี้คือพื้นที่ผิวของการพาความร้อน พื้นที่ภาคตัดของครีบ A และเส้นรอบขอบรูป P ดังนั้นปริมาณของพลังงานคือ

$$\text{พลังงานที่ผิวด้านซ้าย} = q_x = -kA \frac{dT}{dx}$$

$$\begin{aligned} \text{พลังงานที่ออกมาที่ผิวด้านขวา} &= q_{x+dx} = -kA \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x+dx} \\ &= -kA \left(\frac{dT}{dx} + \frac{d^2T}{dx^2} dx \right) \end{aligned}$$

$$\text{พลังงานสูญเสียโดยการพา} = hP dx (T - T_{\infty})$$

สังเกตว่าพื้นที่ผิวที่แตกต่างกันที่มีการพา คือ ผลที่ได้จากความยาวเป็นเส้นรอบขอบรูปของครีบ และความหนาที่แตกต่างกัน dx เมื่อเรารวมปริมาณเหล่านี้เข้าด้วยกัน แล้วสมดุลพลังงานจะได้ดังนี้

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{hP}{kA} (T - T_{\infty}) = 0 \quad (2.18)$$

สิ่งที่ได้จากข้อมูลดังกล่าว กำหนดให้ค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นนั้นกระทำในทิศทาง x เท่านั้น สมมติฐานนี้จะเป็นไปได้ถ้าครีบบีความบางเพียงพอ สำหรับครีบบในทางปฏิบัติที่สนใจกันนั้นมักมีค่าผิดพลาดอันเนื่องมาจากสมมติฐานมีค่าน้อยกว่า 1 เปอร์เซนต์ ค่าความถูกต้องรวมทั้งหมดในทางปฏิบัติที่ใช้คำนวณครีบบโดยปกติจะจำกัดโดยค่าความไม่แน่นอนของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h โดยส่วนมากแล้วสังเกตได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในแต่ละผิวมักคิดให้มีค่าเดียวกัน ดังเช่นที่กำหนดข้างบน ถ้าใช้พฤติกรรมที่ไม่คงที่กับปัญหานี้ก็จะต้องใช้เทคนิคเชิงตัวเลขที่เรียกว่า ไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ เพื่อนำมาใช้ปัญหาดังกล่าว

2.6.7 เทคนิคการส่งเสริมการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Enhancement Techniques)

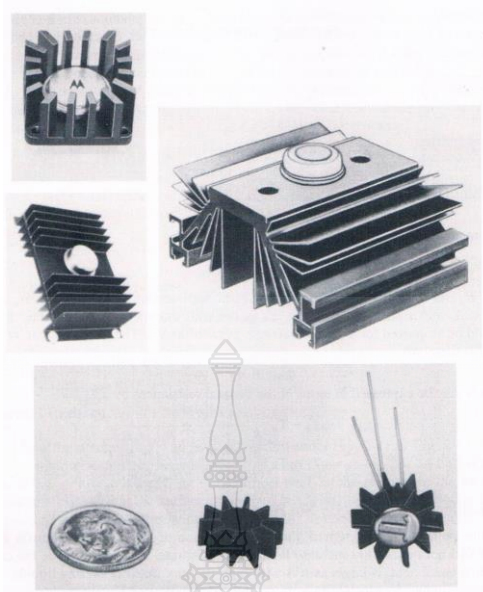
การระบายความร้อนเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็น ถ้าการระบายความร้อนไม่เหมาะสม จะส่งผลให้วัสดุได้รับความเสียหายอันเนื่องมาจากความร้อนเกินขีดจำกัดที่วัสดุจะทนได้ ทำให้การทำงานของเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ต่างๆ ไม่สามารถทำงานตามปกติ ปัจจุบันอุปกรณ์ต่างๆ มีการพัฒนาอย่างมากโดยเฉพาะอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการปลดปล่อยพลังงานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่สูงขึ้นทำให้กลไกการถ่ายเทความร้อนปกติไม่สามารถระบายความร้อนได้ทันกับการปลดปล่อยพลังงานความร้อนของอุปกรณ์เหล่านั้น ทำให้มีการพัฒนาเทคนิคต่างๆ เพื่อเพิ่มการถ่ายเทความร้อน โดยจำแนกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่

1. การเพิ่มพื้นที่ผิว

การเพิ่มพื้นที่ผิวในการและเปลี่ยนความร้อน โดยติดตั้งครีบบระบายความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.14 เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าวบนแหล่งความร้อน พลังงานความร้อนจะส่งผ่านมายังอุปกรณ์ ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนกับของไหลเพิ่มขึ้น โดยทั่วไป ครีบบระบายความร้อนแบ่งตามรูปร่างของครีบบได้ดังต่อไปนี้

1) Plate-fin Heat Sink ครีบบระบายความร้อนมีลักษณะเป็นแผ่น เพราะสามารถผลิตได้ง่าย วิธีการผลิตมีหลายแบบได้แก่ การฉลิตขึ้นรูป ครีบบระบายความร้อนจะเป็นเนื้อเดียวกัน หรือแยกผลิตส่วนครีบบและส่วนฐานแล้วนำมาประกอบภายหลัง โดย การเชื่อม การอัดยึดด้วยสกรู และวิธีใช้การขยายตัว-หดตัวของโลหะ

2) Pin-fin Heat Sink ครีบบระบายความร้อนมีลักษณะเป็นแท่ง เนื่องจากมีครีบบจำนวนมากส่งผลให้มีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนมาก แต่ต้นทุนการผลิตสูงกว่า Plate-Fin Heat Sink



รูปที่ 2.34 แผงระบายความร้อน

2. การเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

การเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการใช้ของไหลพุ่งชนผิว ที่ลดความหนาของชั้นซิดผิวทำให้ความต้านทานทางความร้อนที่ผิวกับของไหลลดลงทำให้มีการและเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะบริเวณที่ใกล้จุดศูนย์กลางการตกกระทบ หรือจุดหยุดนิ่ง (Stagnation Point) การถ่ายเทความร้อนจะมีค่ามากและจะลดลงเมื่อระยะห่างจากจุดดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้น

3. การเพิ่มค่าการนำความร้อน

การเพิ่มการนำความร้อนโดย การเติมอนุภาคนาโนลงในสารทำงานเช่นการเติม TiO_2 หรือ Ag ลงไปในสารทำงานทำให้ของไหลมีคุณสมบัติเปลี่ยนไป มีค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้น

4. เทคนิคอื่นๆ

เทคนิคอื่นๆ ได้แก่ เทอร์โมไซฟอน (Thermosyphons), ฮีทไปป์ (Heat Pipe) และ เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) เทอร์โมไซฟอน (Thermosyphons),คือ อุปกรณ์ที่สามารถถ่ายความร้อนได้อย่างรวดเร็วไม่มีชิ้นส่วนกลไก เทอร์โมไซฟอนมีลักษณะเป็นท่อปลายปิดทั้งสองข้าง ภายในบรรจุสารสำหรับการถ่ายเทความร้อน ด้านหนึ่งของท่ออยู่ที่มีอุณหภูมิสูง อีกด้านหนึ่งอยู่ในที่มีอุณหภูมิต่ำ หลังการทำงานอาศัยการถ่ายเทความร้อนโดยการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารที่บรรจุอยู่ภายในส่วนล่างของท่อ การทำงาน Thermosyphons นั้นเป็นดังนี้ เมื่อสารถ่ายเทความร้อนในสถานะของเหลวได้รับ

ความร้อนที่ส่งผ่านผนังท่อจากแหล่งความร้อน จะเปลี่ยนสถานะเป็นไอแล้วลอยขึ้นสู่ส่วนบนของท่อ ที่ส่วนบนไอสารถ่ายเทความร้อนจะคายความร้อนผ่านผนังท่อ แล้วเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวเกาะผนังท่อ และไหลกลับมาสู่ด้านล่างของท่อด้วยน้ำหนักตัว เมื่อได้รับความร้อนจะเปลี่ยนสถานะเป็นไอลอยขึ้น วนเวียนไปตลอดเวลาที่มีความแตกต่างด้านอุณหภูมิ ส่วนสารถ่ายเทความร้อนอาจเป็นน้ำหรือสารทำความเย็นชนิดใดก็ได้ตามความเหมาะสม เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนแฝงทำให้สามารถถ่ายความร้อนได้อย่างรวดเร็ว

2) ฮีทไปป์ (Heat Pipe) คือ อุปกรณ์ที่สามารถถ่ายความร้อนได้อย่างรวดเร็วมีโครงสร้างและหลักการการทำงานเหมือนกับเทอร์โมไซฟอน แต่ฮีทไปป์สามารถทำงานในแนวนอนได้ไม่เหมือนกับ เทอร์โมไซฟอนที่ส่วนระเหยต้องอยู่ต่ำกว่าส่วนควบแน่นเสมอโดยภายในรอบๆท่อจะมีเส้นลวดโลหะเล็กๆ นำมาถักเป็นโครงข่ายเรียกว่า วิก (Wick) โดยน้ำหรือสารทำความเย็นจะไหลผ่านในส่วนนี้ ลักษณะการทำงานที่ปลายของท่อฮีทไปป์ข้างหนึ่งจะได้รับความร้อนเข้ามาแล้วเปลี่ยนสถานะเป็นไอไปสู่ปลายอีกข้างหนึ่ง เพื่อถ่ายโอนความร้อนออก ในส่วนนี้สารทำความเย็นจะกลั่นตัวเป็นของเหลวแล้วไหลผ่าน วิก กลับมายังด้านระเหยอีกครั้ง

3) เทอร์โมอิเล็กทริก เป็นอุปกรณ์ที่สามารถสร้างกระแสไฟฟ้าได้จากการแตกต่างของอุณหภูมิ และในทางตรงกันข้ามถ้าเราให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปในวัสดุชนิดนี้ มันก็จะเกิดแตกต่างกันของอุณหภูมิขึ้นในตัววัสดุนี้ด้วยเช่นกัน ภายในสารกึ่งตัวนำชนิด N และ P เรียงสลับกันจำนวนมากที่ถูกจัดวางเป็นแบบเมตริกซ์ ทำเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิบนผิวสองด้านบนสารกึ่งตัวนำ

2.12 เทคโนโลยีการผลิตน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ [12]

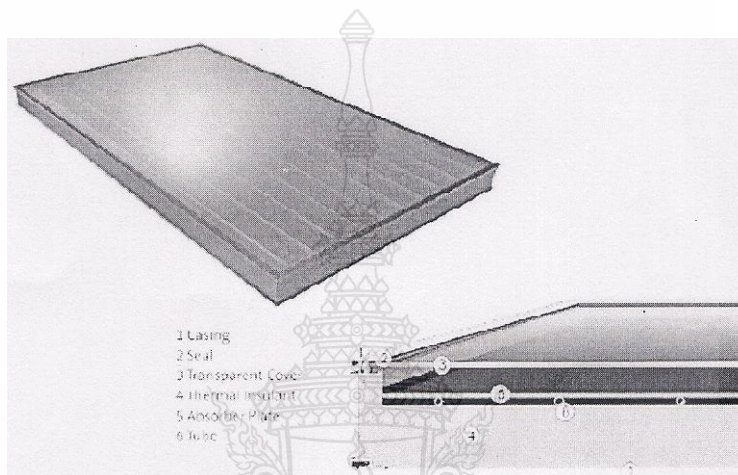
การผลิตน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบ่งออกเป็น 3 ชนิด

2.12.1 การผลิตน้ำร้อนชนิดไหลเวียนตามธรรมชาติ เป็นการผลิตน้ำร้อนชนิดที่มีถังเก็บอยู่สูงกว่าแผงรับแสงอาทิตย์ ใช้หลักการหมุนเวียนตามธรรมชาติ

2.12.2 การผลิตน้ำร้อนชนิดใช้ปั๊มน้ำหมุนเวียนเหมาะสำหรับการใช้ผลิตน้ำร้อนจำนวนมาก และมีการใช้อย่างต่อเนื่อง

2.12.3 การผลิตน้ำร้อนชนิดผสมผสานเป็นการนำเทคโนโลยีการผลิตน้ำร้อนจากแสงอาทิตย์มาผสมผสานกับความร้อนเหลือทิ้งจากการระบายความร้อนของเครื่องทำความเย็น หรือเครื่องปรับอากาศ โดยผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

แผ่นรับแสงแบบแผ่นเรียบ (Flat Plate Solar Collector) เป็นแบบที่สามารถผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิต่ำ แผ่นรับแสงแบบนี้จะไม่มีอุปกรณ์ให้เคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ (non-tracking solar collector) ได้แก่ แผ่นรับแสงแบบแผ่นเรียบชนิดมีแผ่นปิดใส (single glazed) และแผ่นรับแสงแบบแผ่นเรียบชนิดไม่มีแผ่นปิด (un glazed) เป็นต้น แผ่นรับแสงแบบนี้จะสามารถรับแสงอาทิตย์เป็นความที่อุณหภูมิต่ำดังแสดงในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.35 แสดงส่วนประกอบของแผงรับแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ

ตารางที่ 2.1 ระดับอุณหภูมิของแผงรับแสงอาทิตย์

ระดับอุณหภูมิสูงสุดโดยประมาณ (องศาเซลเซียส)	แบบแผ่นรับแสง
40 – 90	1. แผ่นเรียบชนิดมีแผ่นปิดใส (single glazed)
< 40	2. แผ่นเรียบชนิดไม่มีแผ่นปิด (un glazed)
40 – 60	3. สระแสงอาทิตย์ชนิดตื้น (shallow solar pond)
40 – 90	4. สระแสงอาทิตย์ชนิดลึก (deep or salt gradient solar pond)
100 – 200	5. ท่อน้ำสุญญากาศ (evacuated tubular collector)

2.13 การพิจารณาประสิทธิภาพแผงรับแสงอาทิตย์

มาตรฐาน ASHRAE 93:77 เป็นมาตรฐานการพิจารณาประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อน พลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งการพิจารณานั้นจะอยู่ภายใต้ความสัมพันธ์ดังนี้

การพิจารณาความร้อนที่สารตัวนำได้รับ

$$(\tau\alpha)_e I_T A_c = Q_{coll} + U_L A_c (T_p - T_a) \quad (2.19)$$

เมื่อ

$$Q_{coll} = A_c [(\tau\alpha)_e I_T - U_L (T_p - T_{ai})] \quad (2.20)$$

ซึ่งอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้รับจากตัวเก็บรังสีอาจเขียนได้เป็น

$$Q_{coll} = A_c [(\tau\alpha)_e I_T - U_L (T_p - T_{ai})] \quad (2.21)$$

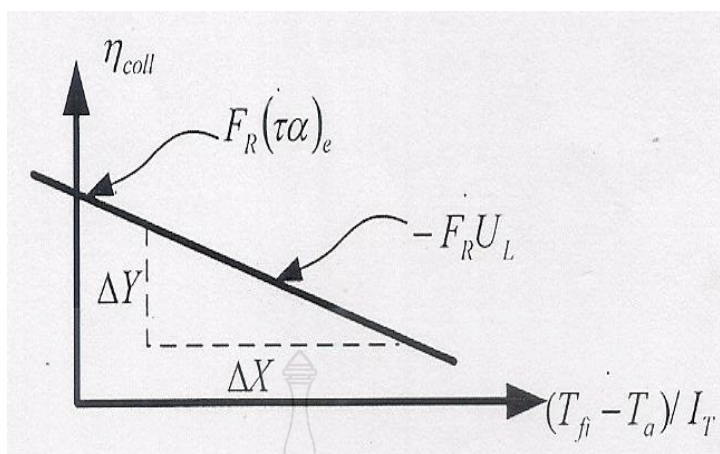
ในทางปฏิบัติการกำหนดค่า (Heat removal Factor, F_R) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของของไหลเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ได้

$$Q_{coll} = A_c [F_R (\tau\alpha)_e I_T - F_R U_L (T_p - T_{ai})] \quad (2.22)$$

การพิจารณาประสิทธิภาพการนำความร้อนไปใช้ประโยชน์ (Collector efficiency, η_{coll}) สามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$\eta_{coll} = \frac{Q}{I_T A_c} = \frac{m_f C_p (T_{fo} - T_{fi})}{I_T A_c} = F_R (\tau\alpha)_e - F_R U_L \frac{(T_{fi} - T_a)}{I_T} \quad (2.23)$$

ถ้าพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง η_{coll} และ $(T_{fi} - T_a) / I_T$ จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวอยู่ในรูปสมการเส้นตรงโดยที่ค่า คือความชันและ คือค่าจุดตัดแกนตั้งแสดงในรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 แสดงกราฟประสิทธิภาพตามมาตรฐาน ASHRAE 93:77

2.8.1 การปรับแก้ผลของอัตราการใช้

ในกรณีการปรับอัตราการใช้ของน้ำผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะทำให้ค่า $F_R(\tau\alpha)_e$ และ $F_R U_L$ ของตัวเก็บรังสีมีการเปลี่ยนแปลง สามารถหาค่า $F_R(\tau\alpha)_e$ และ $F_R U_L$ ใหม่ได้จาก

$$r = \frac{F_R U_L|_{test}}{F_R U_L|_{use}} = \frac{F_R(\tau\alpha)_n|_{use}}{F_R(\tau\alpha)_n|_{test}} \quad (2.24)$$

หรือ

$$r = \frac{\left. \frac{mC_p}{A_c F' U_L} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_c F' U_L}{m\dot{C}_p}\right) \right] \right|_{Use}}{\left. \frac{mC_p}{A_c F' U_L} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_c F' U_L}{m\dot{C}_p}\right) \right] \right|_{Test}} \quad (2.25)$$

โดย

$$\eta_{th} = m\dot{C}_p (T_o - T_i) / I_t A_c \quad (2.26)$$

2.8.2 การหาประสิทธิภาพตามมาตรฐาน ASHRAE STANDARD 93-77

เป็นมาตรฐานที่ใช้หาสมการแสดงคุณสมบัติพื้นฐาน สำหรับกำหนดประสิทธิภาพทางความร้อน ของการทำงานของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ ภายใต้เงื่อนไขที่ภาวะคงที่ มีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$\eta_{th} = (A_a / A_c) F_R [(ta)_e - U_L (T_i - T_a) / I_t] \quad (2.27)$$

และ

$$\eta_{th} = m^o C_p (T_o - T_i) / I_t A_c \quad (2.28)$$

โดยที่

- η_{th} คือ ประสิทธิภาพของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ , %
 m^o คือ อัตราการไหลเชิงมวลของไหล, kg/s
 C_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะของของไหล , J/kg K
 T_i คือ อุณหภูมิของของไหลขาเข้า , °C
 T_o คือ อุณหภูมิของของไหลขาออก , °C
 A_a คือ พื้นที่ของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ , m²
 A_c คือ พื้นที่รับรังสีแสงอาทิตย์ m²
 T_a คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม °C
 F_R คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์
 $(ta)_e$ คือ สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านและดูดซับรังสีแสงอาทิตย์
 U_L คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน , W/m² .K

2.8.3 งานวิจัยด้านเทคโนโลยีการผลิตน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินและวิเคราะห์ระบบผลิตพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์โดยสรุปไว้ดังนี้

กรณีประเมินการทำงานของแผงรับแสงอาทิตย์

มาตรฐาน ASHREA 93-2003 ได้กล่าวสอดคล้องกับ มาตรฐาน EN 12975-2:2001 และ Duffie J.A. และคณะ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พื้นฐานของประสิทธิภาพแผงรับแสงอาทิตย์

$$\eta = \frac{Q_u}{AI_T} = \frac{mC_{pf}(T_o - T_i)}{AI_T} = F_R(\tau\alpha)_n - F_R U_L \frac{(T_i - T_a)}{I_T} \quad (2.29)$$

เนื่องจากสัมประสิทธิ์การสูญเสีย (U_L) นั้นไม่เป็นค่าคงที่ ซึ่ง U_L นั้นเทียบได้กับ $\left(\frac{T_i - T_a}{I_T}\right)$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการใหม่ได้

$$\eta = \frac{Q_u}{AI_T} = F_R(\tau\alpha)_n - F_R U_L \frac{(T_i - T_a)}{I_T} - F_R U_{L/T} \frac{(T_i - T_a)^2}{I_T} \quad (2.30)$$

หรือเขียนใหม่ได้

$$\eta = a_0 - a_1 \frac{(\Delta T)}{I_T} - a_2 \frac{(\Delta T)^2}{I_T} \quad (2.31)$$

ซึ่งตัวแปร a_0, a_1, a_2 เป็นตัวแปรเฉพาะของแผงรับแสงอาทิตย์แต่ละชุดที่มาทำการทดสอบ ตามมาตรฐาน ASHREA, SRCC และ CEN

จากสมการ ΔT นั้นเกิดจาก $(T_i - T_a)$ ซึ่งบางครั้ง การทดสอบประสิทธิภาพนั้นสามารถใช้ ΔT ในรูปแบบอื่นได้ดังนี้

$$\Delta T = \begin{cases} \Delta T_i = T_i - T_a \\ \Delta T_{av} = T_{av} - T_a \\ \Delta T_o = T_o - T_a \end{cases} \quad (2.32)$$

2.8.4 แฟกเตอร์การดึงความร้อนและแฟกเตอร์การไหล

จงจิตร หิรัญลาภ ได้กล่าวถึงอัตราส่วนระหว่างปริมาณพลังงานที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จริงต่อพลังงานที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ว่า

$$F_R = \frac{mC_p(T_{fo} - T_{fi})}{A_c[S - U_L(T_{fi} - T_a)]} \quad (2.33)$$

สามารถกระจายแฟกเตอร์การดึงความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์ได้ดังนี้

$$F_R = \frac{mC_p}{A_cU_L} \left[\frac{(T_{fo} - T_{fi})}{\left[\frac{S}{U_L} - (T_{fi} - T_a) \right]} \right] = \frac{mC_p}{A_cU_L} \left[\frac{(T_{fo} - T_a - \frac{S}{U_L}) - (T_{fi} - T_a - \frac{S}{U_L})}{\left[\frac{S}{U_L} - (T_{fi} - T_a) \right]} \right] \quad (2.34)$$

จาก

$$F_R = \frac{mC_p}{A_cU_L} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_cU_L F'}{mC_p}\right) \right] \quad (2.35)$$

ดังกล่าวแสดงสมการในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง F'' กับ $\frac{mC_p}{A_cU_L F'}$ โดยกำหนดให้

$$F'' = \frac{F_R}{F'} = \frac{mC_p}{A_cU_L} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_cU_L F'}{mC_p}\right) \right] \quad (2.36)$$

เมื่อ F'' คือ แฟกเตอร์การไหลของแผงรับแสงอาทิตย์ (Collector Flow Factor)

ดังนั้นจะสามารถเขียนสมการให้สามารถหาค่าพลังงานใช้ประโยชน์ (Q_u) ในเทอมของ F_R และอุณหภูมิของไหลขาเข้าได้ดังนี้

$$Q_u = A_c F_R [S - U_L(T_i - T_a)] \quad (2.37)$$

2.8.5 ผลของความจุความร้อนในแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์

เนื่องจากระบบพลังงานแสงอาทิตย์นั้นอยู่ในภาวะไม่สม่ำเสมอเมื่อพิจารณาธรรมชาติของแรงขับ (Driving Forces) จากการศึกษาของ Klein et al. (1974) และ Wijjeyundera (1978) ได้ศึกษาระเบียบเชิงตัวเลขถึงผลกระทบของค่าความจุความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์ต่อสมรรถนะของแผงรับแสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถพิจารณาแยกออกเป็น 2 ส่วนคือ

1. เกิดจากการร้อนขึ้นของแผงรับแสงอาทิตย์ในช่วงเช้าที่อุณหภูมิต่ำจนกระทั่งถึงอุณหภูมิสุดท้ายในช่วงบ่าย

2. ความไม่สม่ำเสมอของแรงขับในแต่ละวัน เช่น รังสีอาทิตย์และลม ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เป็นต้น

จากการศึกษาของ Klein et al. (1974) ได้กล่าวว่าในช่วงเช้าของแต่ละวันผลของการสูญเสียความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์มีความสำคัญแต่สามารถตัดทิ้งได้

จงจิตร หิรัญลาภ ได้กล่าวว่าหากพิจารณาแผงรับแสงอาทิตย์มีแผ่นใสปิดชั้นเดียว สมดุลพลังงานของแผ่นดูดกลืน น้ำ และฉนวน มีค่าดังนี้

$$Q_{coll} = m_f C_p (T_{fo} - T_{fi}) \quad (2.38)$$

โดยที่ c ตัวกำกับล่าง c และ p คือ แผ่นปิดใส (Cover) และแผ่นดูดกลืน (Plate) ตามลำดับ

U_{p-c} คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนจากแผ่นดูดกลืนไปยังแผ่นปิดใส

t คือ เวลา

2.14 การหาประสิทธิภาพทางความร้อนของเซลล์แสงอาทิตย์

ประสิทธิภาพทางความร้อนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หาได้จากสมการ[14]

$$\eta_{th} = \frac{Q}{A_c \cdot I_{rr}} = \frac{m^\circ c_p \Delta T}{A_c \cdot I_{rr}} \quad (2.39)$$

โดยที่ η_{th} = ประสิทธิภาพของแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์, %
 Q = พลังงานความร้อน, kw
 m° = อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ
 c_p = ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่
 ΔT = ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างทางเข้าและทางออกของน้ำจากแผง
 A_c = พื้นที่รับรังสีแสงอาทิตย์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์, m²
 I_{rr} = ค่าความเข้มแสงอาทิตย์, kW/m²

2.15 การหาประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หาได้จากสมการ [14]

$$\eta_e = \frac{P_m}{P_i \cdot A} \quad (2.40)$$

และ

$$P_m = I_m \times V_m \quad (2.41)$$

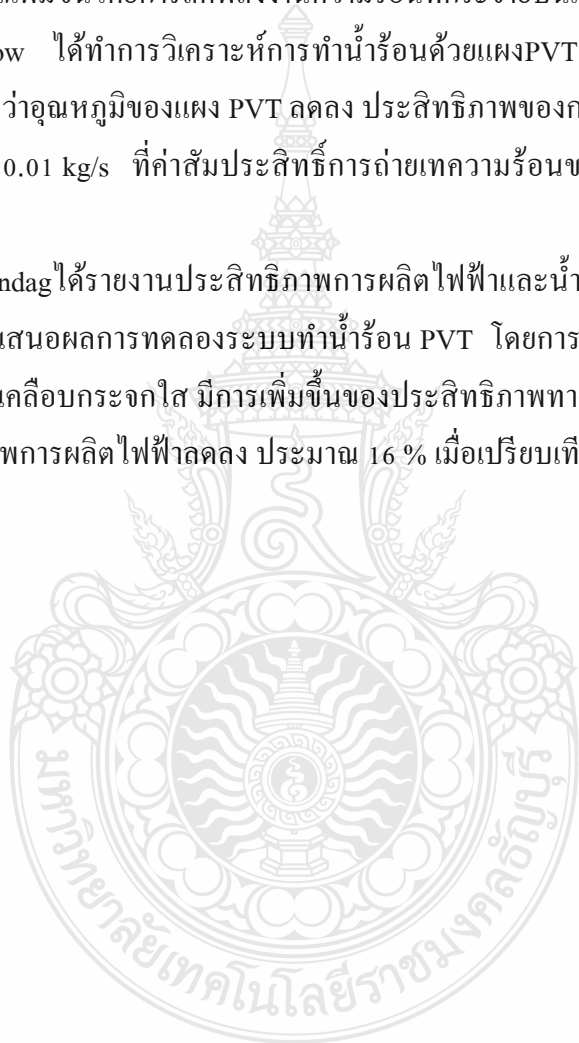
โดยที่ η_e คือ ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์, %
 P_m คือ กำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้, Watts
 P_i คือ ความเข้มแสงที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับ, W/m²
 A คือ พื้นที่รับแสงอาทิตย์ได้รับ, m²

2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

A. D. Jones and C. P. Underwood ได้ศึกษาแผง PVT ที่อุณหภูมิของแผงอยู่ในสถานะไม่คงที่ แปรผันตามช่วงเวลา ได้ทำการทดลองในสถานะที่ท้องฟ้า ปลอดโปร่ง สังเกตได้ว่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 27-52 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแวดล้อม 24.5 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพของแผง PVT หลัก ๆ ขึ้นอยู่กับการสูญเสียความต้านทานและอุณหภูมิของแผง PVT ส่วนประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า สามารถเพิ่มขึ้นโดยการลดพลังงานความร้อนที่กระจายบนแผง PVT [16]

T. T. Chow ได้ทำการวิเคราะห์การทำน้ำร้อนด้วยแผง PVT ด้วยตัวเคลือบชั้นเดียวในสถานะชั่วคราว สังเกตว่าอุณหภูมิของแผง PVT ลดลง ประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 2% ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.01 kg/s ที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของแผ่นเพลท เท่ากับ 10 K w/m²K [17]

H. A. Zondag ได้รายงานประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อน พบว่า ได้ 6.7 % และ 33% ตามลำดับ ได้นำเสนอผลการทดลองระบบทำน้ำร้อน PVT โดยการไหลเวียนน้ำตามธรรมชาติ กล่าวว่ระบบ PVT ที่เคลือบกระจกใส มีการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพทางความร้อน ประมาณ 30 % ขึ้นไป แต่ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าลดลง ประมาณ 16 % เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่ได้เคลือบ [18]



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 เครื่องมือและวิธีการ

3.2.1 แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

แบบผลึก พื้นที่รับแสง 1.96 ตารางเมตร

แบบอะมอร์ฟัส พื้นที่รับแสง 1.69 ตารางเมตร



รูปที่ 3.1 การติดตั้งการทดลองแผงผลิตน้ำร้อนและไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

3.2.2 อุปกรณ์วัดความเข้มแสงอาทิตย์ (Solar power meter) ยี่ห้อ CEM รุ่น DT-1307



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์วัดความเข้มแสงอาทิตย์

3.2.3 เครื่องวัดอุณหภูมิ (Temperature meter) ยี่ห้อ TECPEL รุ่น RS-232



รูปที่ 3.3 เครื่องวัดอุณหภูมิ

3.2.4 อุปกรณ์เก็บบันทึกข้อมูล (Data logger) ยี่ห้อ TSUS



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์เก็บบันทึกข้อมูล(Data logger)

3.2 การออกแบบการทดสอบ

การออกแบบการทดสอบเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากการหาสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ และกำหนดตัวแปรที่เหมาะสมกับพื้นที่ที่ใช้ทำการทดสอบด้วย ซึ่งจะทำให้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบนำไปวิเคราะห์ได้ถูกต้อง และตรงประเด็นการออกแบบเงื่อนไขในการทดสอบ ตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงเงื่อนไขในการทดสอบ

ตัวแปร	เงื่อนไข
ความเข้มรังสีอาทิตย์	ไม่น้อยกว่า 600 W/m^2
อัตราการไหลของน้ำ	ค่าคงที่เท่ากับ 0.01, 0.02 และ 0.03 kg/s
อุณหภูมิอากาศแวดล้อม	ในช่วง $25^\circ \text{C} - 35^\circ \text{C}$
อุณหภูมิน้ำทางเข้า	ในช่วง $25^\circ \text{C} - 28^\circ \text{C}$

3.3 การทดสอบแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์

3.3.1 สถานที่ติดตั้ง ณ อาคารศูนย์อาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ตั้งอยู่บนเส้นละติจูด $13^\circ 57'$ เหนือ และลองจิจูด $100^\circ 46'$ ตะวันออก โดยทำการติดตั้งแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ให้หันไปทางทิศใต้และเอียงทำมุมกับแนวระนาบ 15 องศา ซึ่งเป็นทิศทางและมุมที่เหมาะสมสำหรับการรับแสงอาทิตย์เฉลี่ยตลอดทั้งปีของประเทศไทย แผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์นั้นเป็นแผงแบบแผ่นราบ (Flat Plate Collector) รวมทั้งเป็นตัวโครงสร้างของแผงนั้นไม่มีวัสดุอื่นในการกักเก็บความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ กล่าวคือเป็นแผงที่มีท่อเป็นตัวดูดซับรังสีแสงอาทิตย์อีกทั้งไม่มีฝาครอบทั้งด้านบน ด้านข้างและด้านล่าง รวมถึงไม่มีวัสดุอื่นใดเป็นฉนวนในการป้องกันการระบายความร้อนออกจากวัสดุดูดซับรังสีแสงอาทิตย์และไม่มีฝาครอบด้านบนที่เป็นกระจกอีกด้วย

3.4 วิธีการทดสอบ

การทดสอบแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic and thermal modules) เป็นระบบที่ได้มีการติดตั้งอุปกรณ์หลักและเครื่องมือวัดตามรูปที่ 3.5 ซึ่งการทดสอบจะเป็นการจัดการเพิ่มเติมกับระบบการไหลของน้ำ ซึ่งได้แก่ การกำหนดอัตราการไหลของน้ำให้เป็นไปตามเงื่อนไข โดยทำการทดสอบในช่วงเวลา ตั้งแต่เวลา 9.00 -17.00 น. ซึ่งวิธีการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

3.4.1 ทำการติดตั้งแผง PVT และทำความสะอาดแผ่นปิดใสด้านบนก่อนการทดสอบ

3.4.2 ทำการต่อท่อน้ำกับแผงรับรังสีอาทิตย์ ทั้งทางเข้าและออกแผงรับรังสีอาทิตย์

3.4.3 ติดตั้งเครื่องมือวัดตามรูปต่อเข้ากับเครื่องบันทึกค่าเพื่อบันทึกข้อมูล

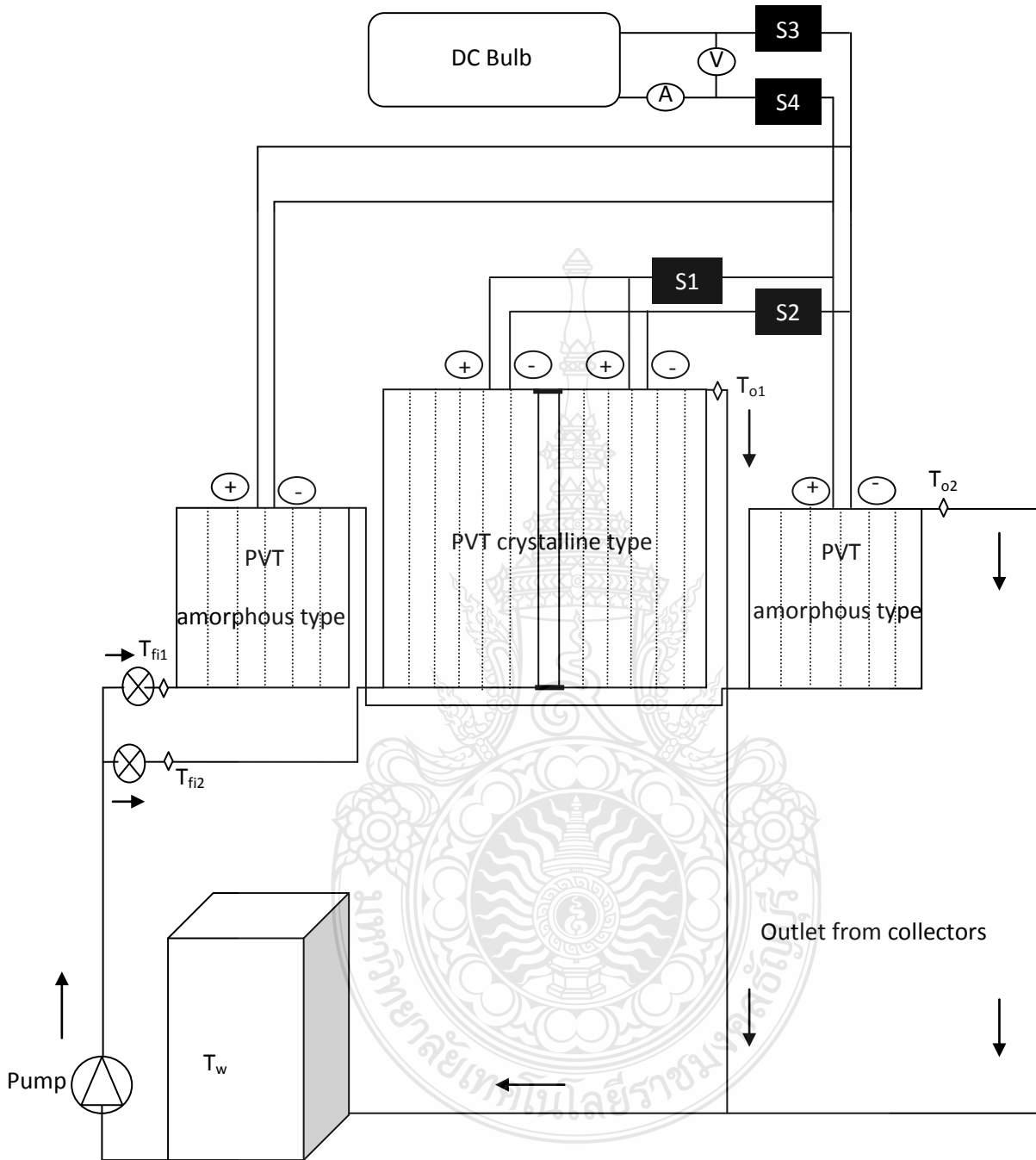
3.4.4 ติดตั้งวาล์วปรับอัตราการไหล

3.4.5 ติดตั้งระบบควบคุมน้ำ ซึ่งประกอบด้วย บัมพ์น้ำ ถังเก็บน้ำ

3.4.6 เริ่มทำการทดสอบตามเงื่อนไขการทดสอบ โดยทดสอบแผง PVT ทั้งสองแบบพร้อมกัน

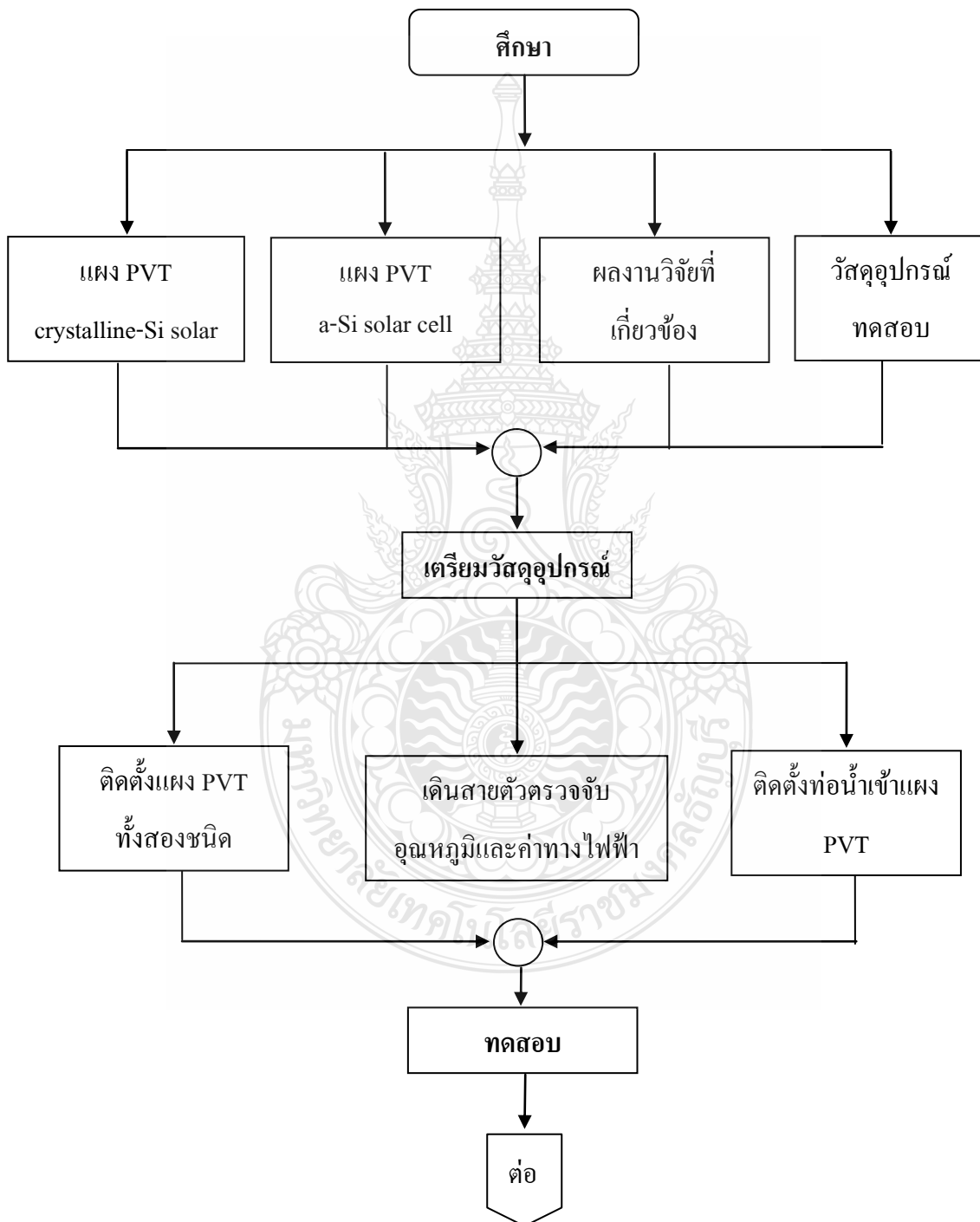
3.4.7 บันทึกผลการทดสอบค่าอุณหภูมิน้ำเข้า (T_i) ค่าอุณหภูมิน้ำออก (T_o) ค่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อม (T_a) ค่าอัตราการไหล (m) ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รวม และค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ ทุกๆ 1 ชั่วโมง

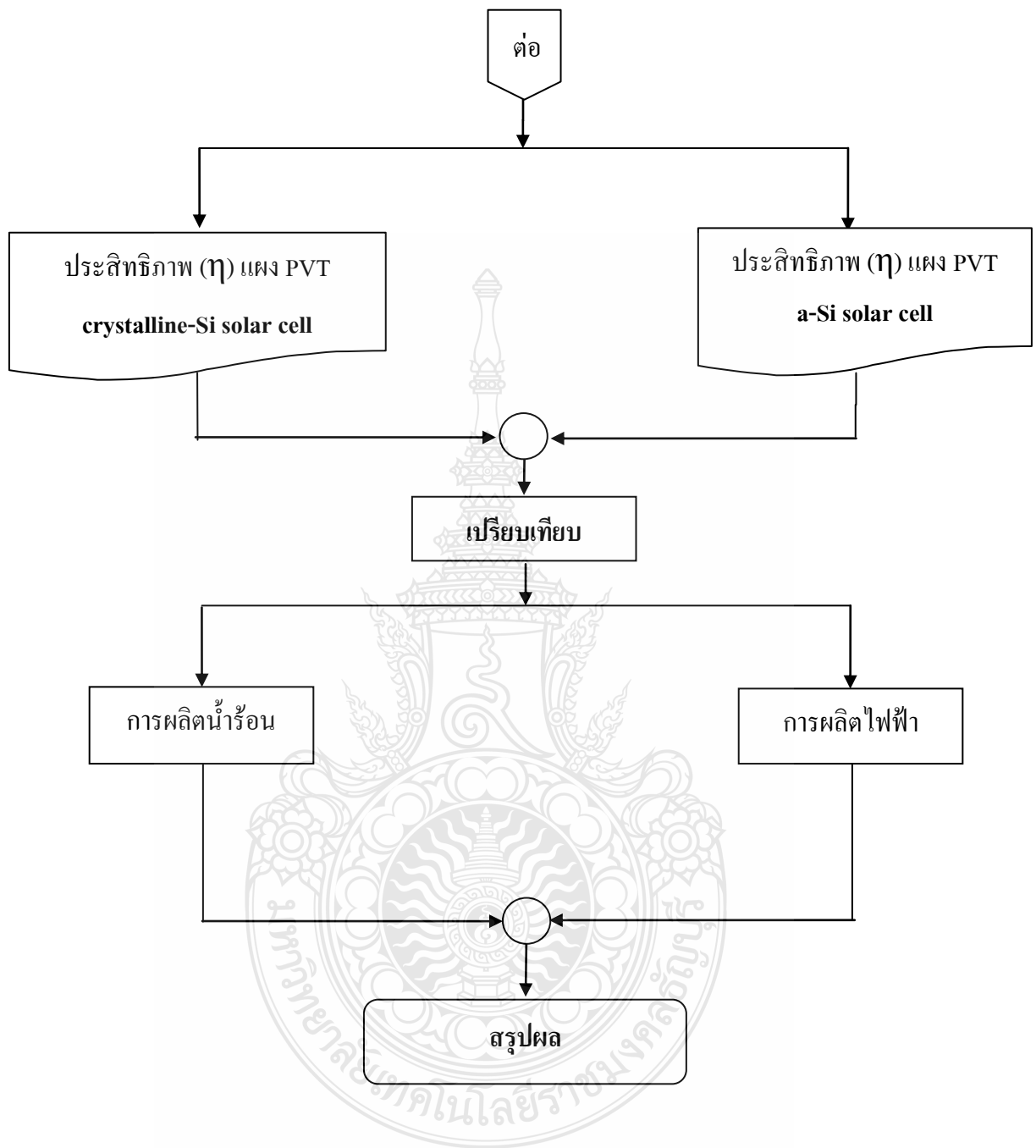
3.4.8 ทำการทดสอบซ้ำ โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำ ตามเงื่อนไขการทดสอบ และบันทึกข้อมูล



รูปที่ 3.5 ไลอะแกรมของการทดสอบ

3.5 การรวบรวมและการวิเคราะห์ข้อมูล





รูปที่ 3.6 แผนผังการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล

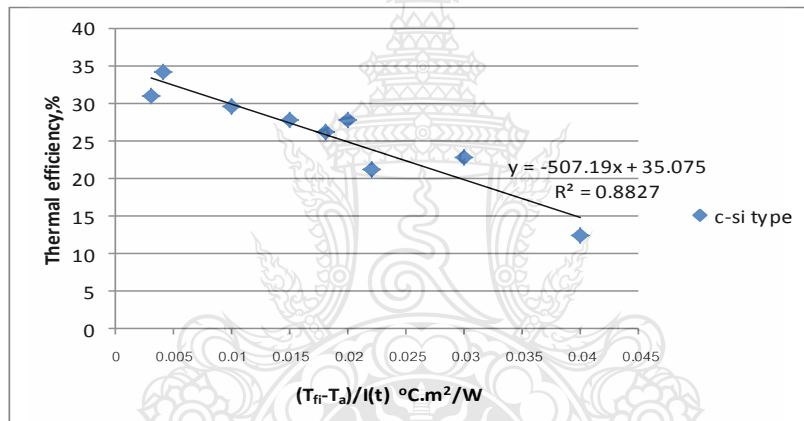
บทที่ 4

ผลการทดลอง

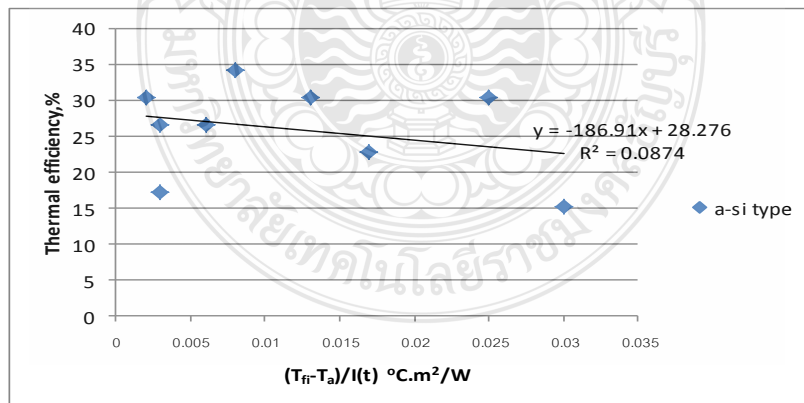
ในการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ ผู้วิจัยได้กำหนดเงื่อนไขต่างๆ ภายใต้สภาพพื้นที่ของจังหวัดปทุมธานี เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนด้วยเซลล์แสงอาทิตย์

4.1 ผลการประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อน

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการผลิตน้ำร้อนด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ต่างชนิด ความเข้มแสงในช่วง 600-850 w/m^2 บันทึกข้อมูล น้ำเข้า น้ำออกจากแผง อุณหภูมิแวดล้อมและค่าความเข้มแสง



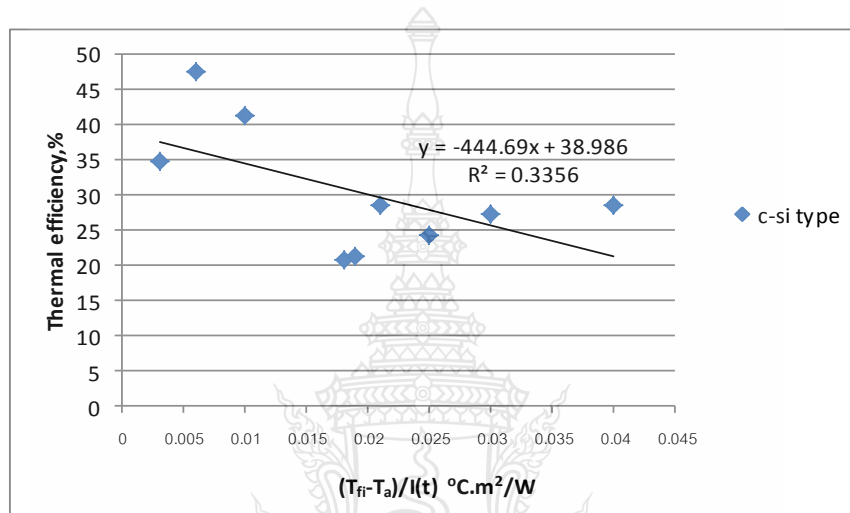
(a)



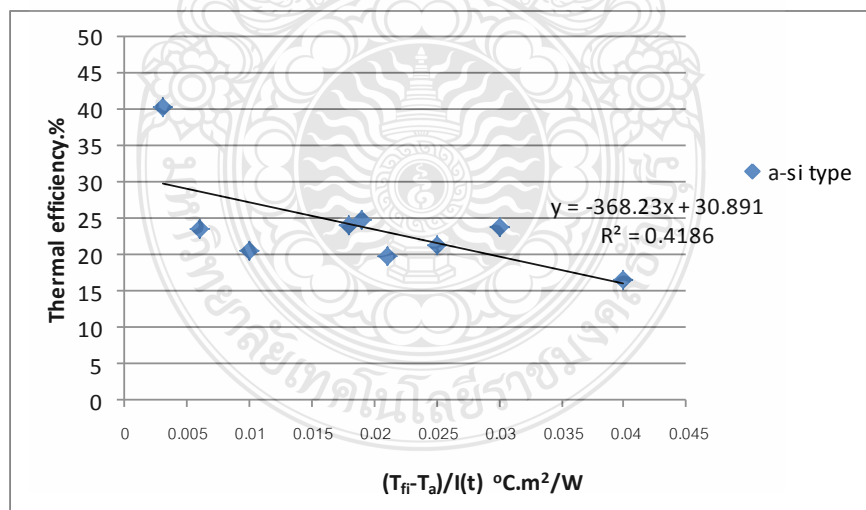
(b)

รูปที่ 4.1 : (a) ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก (b) ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสที่อัตราการไหล 0.01 kg/s

ผลการทดลองตามรูปที่ 4.1 (a) แสดงประสิทธิภาพทางความร้อนของแผงเซลล์แบบผลึกจากการทดสอบพบว่า มีประสิทธิภาพทางความร้อนร้อยละ 35.07 ส่วนแผงเซลล์แบบอะมอร์ฟัสตามรูปที่ 4.1 (b) มีประสิทธิภาพทางความร้อน ร้อยละ 28.27 ที่อัตราการไหล 0.01 kg/s และความเข้มแสงเดียวกัน ณ วันที่ทำการทดสอบ จากกราฟดังกล่าวเมื่อเปรียบเทียบระหว่างแผงเซลล์ต่างชนิดพบว่าแบบผลึกมีประสิทธิภาพมากกว่าแบบอะมอร์ฟัส โดยมีความแตกต่างคิดเป็นร้อยละ 6.8



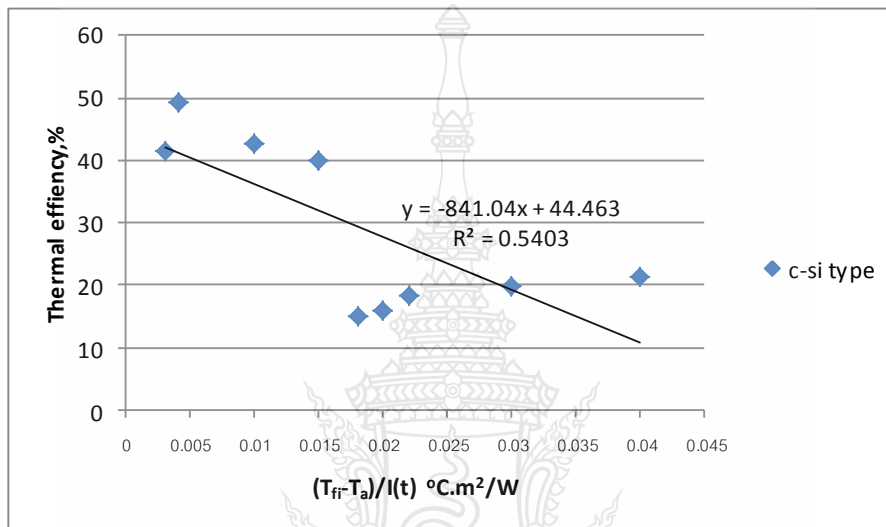
(c)



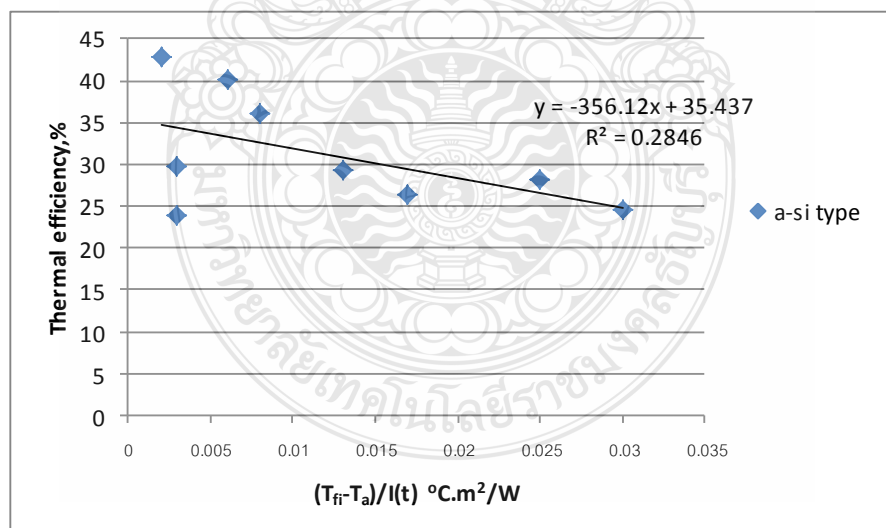
(d)

รูปที่ 4.2 : (c) ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก (d) ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสที่อัตราการไหล 0.02 kg/s

ผลการทดลองตามรูปที่ 4.2 (c) แสดงประสิทธิภาพทางความร้อนของแผงเซลล์แบบผลึกจากการทดสอบพบว่า มีประสิทธิภาพทางความร้อนร้อยละ 38.98 ส่วนแผงเซลล์แบบอะมอร์ฟัสตามรูปที่ 4.2 (d) มีประสิทธิภาพทางความร้อน ร้อยละ 30.89 ที่อัตราการไหล 0.01 kg/s และความเข้มแสงเดียวกัน ณ วันที่ทำการทดสอบ จากกราฟดังกล่าวเมื่อเปรียบเทียบระหว่างแผงเซลล์ต่างชนิดพบว่าแบบผลึกมีประสิทธิภาพมากกว่าแบบอะมอร์ฟัส โดยมีความแตกต่างคิดเป็นร้อยละ 8.09



(e)



(f)

รูปที่ 4.3 : (e) ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก (f) ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสที่อัตราการไหล 0.03 kg/s

ผลการทดลองตามรูปที่ 4.3 (c) แสดงประสิทธิภาพทางความร้อนของแผงเซลล์แบบผลึกจากการทดสอบพบว่า มีประสิทธิภาพทางความร้อนร้อยละ 44.46 ส่วนแผงเซลล์แบบอะมอร์ฟัสตามรูปที่ 4.3 (d) มีประสิทธิภาพทางความร้อน ร้อยละ 35.43 ที่อัตราการไหล 0.03 kg/s และความเข้มแสงเดียวกัน ณ วันที่ทำการทดสอบ จากกราฟดังกล่าวเมื่อเปรียบเทียบระหว่างแผงเซลล์ต่างชนิดพบว่าแบบผลึกมีประสิทธิภาพมากกว่าแบบอะมอร์ฟัส โดยมีความแตกต่างคิดเป็นร้อยละ 6.8

จากการทดลองตามมาตรฐาน ASHRAE Standard 93-97 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจะได้ออกมาในรูปแบบการถดถอยเชิงเส้น เมื่อทำการคำนวณและพล็อตกราฟผลการทดลอง ดังรูปที่กล่าวมาข้างต้น เราสามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุด โดยกำหนดให้ $U_L = 0$ ซึ่งหมายถึงว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่มีการสูญเสียความร้อนไปยังอากาศแวดล้อมประสิทธิภาพสูงสุดจะมีค่าเท่ากับ $\eta_{\max} = F_R(\tau\alpha)_c$ ซึ่งหมายความว่าประสิทธิภาพสูงสุดจะขึ้นอยู่กับค่าการดูดกลืนรังสีและค่าตัวประกอบประสิทธิภาพการนำความร้อนไปใช้งาน (F_R) ผลการทดสอบหาประสิทธิภาพสูงสุดของแผงผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบผลึก คิดเป็นร้อยละ 44.46 ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.03 kg/s ส่วนแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสมีประสิทธิภาพสูงสุด คิดเป็นร้อยละ 35.43 ที่อัตราการไหล 0.03 kg/s และกำหนดให้ประสิทธิภาพสูงสุดคือค่าทางทฤษฎี

4.2 ผลการประเมินประสิทธิภาพเชิงไฟฟ้า

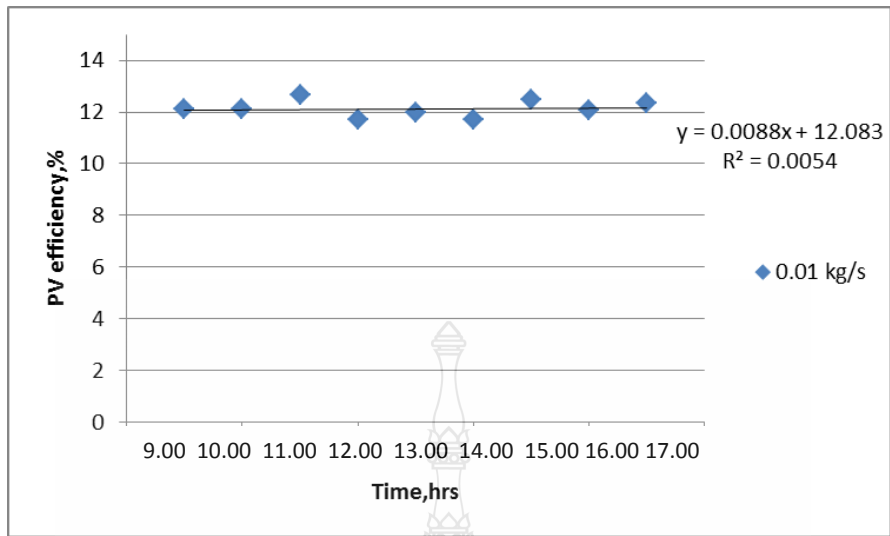
สำหรับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางไฟฟ้า เราจะเลือกใช้ความเข้มแสงรายวันตามแต่ละวันที่ทำการทดสอบ และความเข้มแสงที่สูงจะให้ผลต่อการวิเคราะห์ชัดเจนมากขึ้น โดยคำนวณประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ได้จากสมการ $\eta_e = \frac{P_m}{P_i \cdot A}$

โดยที่ η_e คือ ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า, %

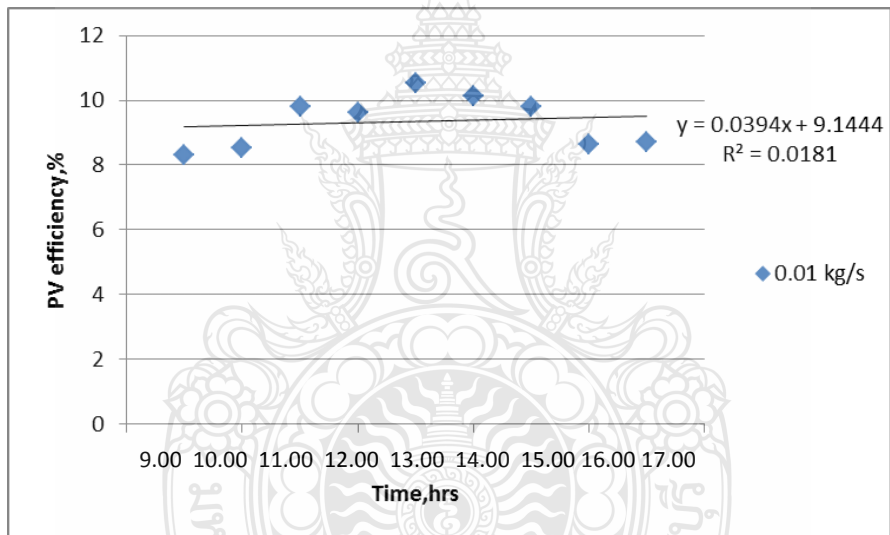
P_m คือ กำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้, Watts

P_i คือ ความเข้มแสงที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับ, W/m^2

A คือ พื้นที่รับแสงอาทิตย์ได้รับ, m^2



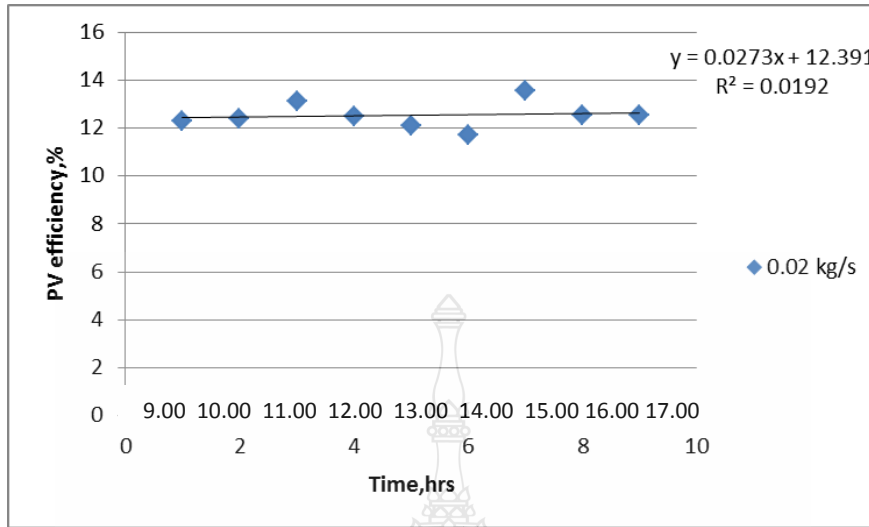
(a)



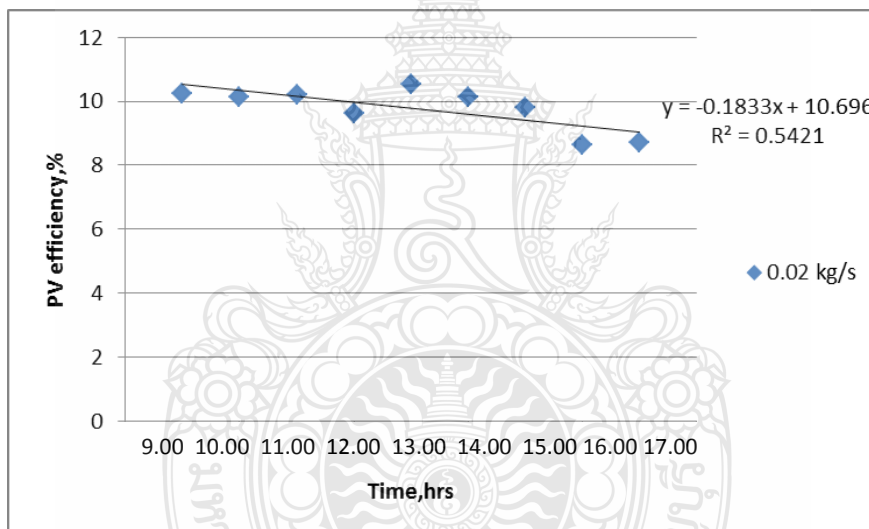
(b)

รูปที่ 4.4 : (a) ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก (b) ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสที่อัตราการไหล 0.01 kg/s

ผลการทดลองตามรูปที่ 4.4 (a) แสดงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แบบผลึกจากการทดสอบพบว่ามีประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ร้อยละ 12.08 ส่วนแผงเซลล์แบบอะมอร์ฟัสตามรูปที่ 4.2 (b) มีประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ร้อยละ 9.14 ที่อัตราการไหล 0.01 kg/s และความเข้มแสงเดียวกัน ณ วันที่ทำการทดสอบ จากกราฟดังกล่าวเมื่อเปรียบเทียบระหว่างแผงเซลล์ต่างชนิดพบว่าแบบผลึกมีประสิทธิภาพมากกว่าแบบอะมอร์ฟัส โดยมีความแตกต่างคิดเป็นร้อยละ 2.94



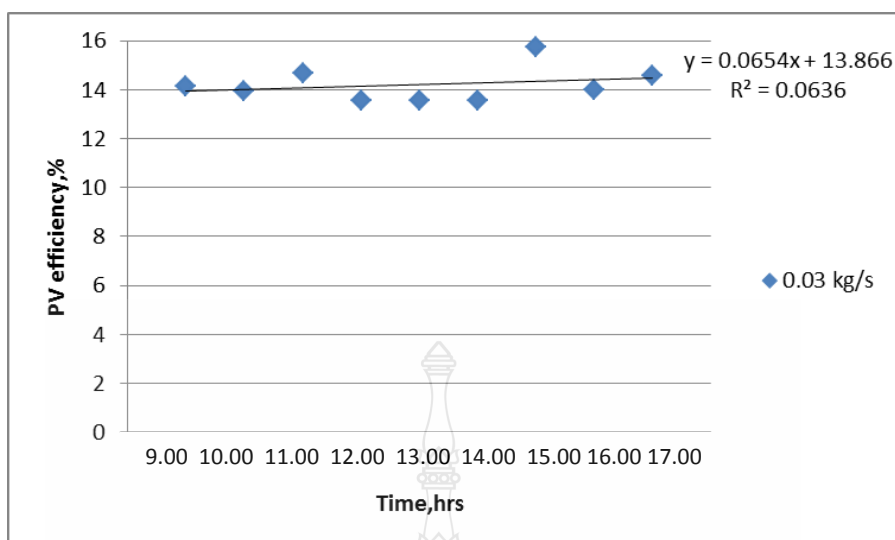
(c)



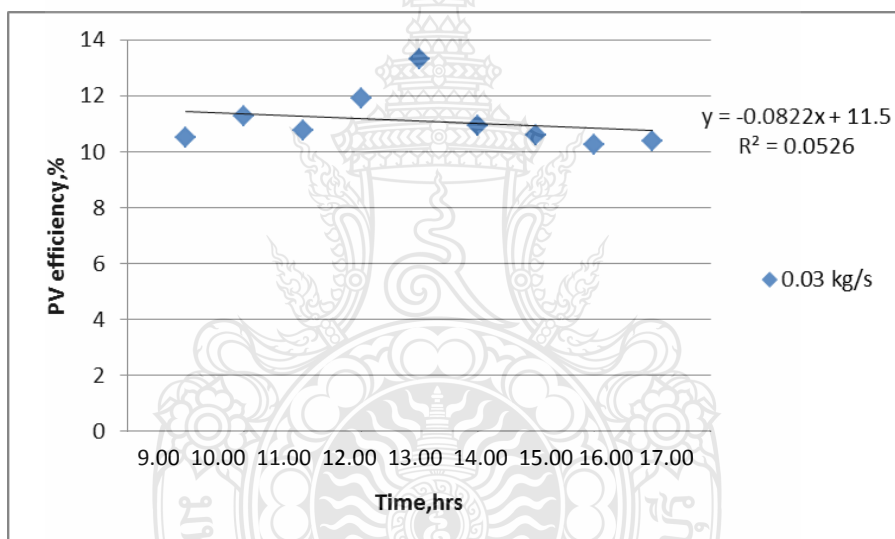
(d)

รูปที่ 4.5 : (c) ประสิทธิภาพเชิงไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก (d) ประสิทธิภาพเชิงไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสที่อัตราการไหล 0.02 kg/s

ผลการทดลองตามรูปที่ 4.5 (c) แสดงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แบบผลึกจากการทดสอบพบว่ามีประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ร้อยละ 12.39 ส่วนแผงเซลล์แบบอะมอร์ฟัสตามรูปที่ 4.5 (d) มีประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ร้อยละ 10.69 ที่อัตราการไหล 0.02 kg/s และความเข้มแสงเดียวกัน ณ วันที่ทำการทดสอบ จากกราฟดังกล่าวเมื่อเปรียบเทียบระหว่างแผงเซลล์ต่างชนิดพบว่าแบบผลึกมีประสิทธิภาพมากกว่าแบบอะมอร์ฟัส โดยมีผลแตกต่างคิดเป็นร้อยละ 1.7



(e)



(f)

รูปที่ 4.6 : (e) ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก (f) ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสที่อัตราการไหล 0.03 kg/s

ผลการทดลองตามรูปที่ 4.6 (e) แสดงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แบบผลึกจากการทดสอบพบว่ามีประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ร้อยละ 13.86 ส่วนแผงเซลล์แบบอะมอร์ฟัสตามรูปที่ 4.6 (f) มีประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ร้อยละ 11.50 ที่อัตราการไหล 0.03 kg/s และความเข้มแสงเดียวกัน ณ วันที่ทำการทดสอบ จากกราฟดังกล่าวเมื่อเปรียบเทียบระหว่างแผงเซลล์ต่างชนิดพบว่าแบบผลึกมีประสิทธิภาพมากกว่าแบบอะมอร์ฟัส โดยมีผลแตกต่างกันคิดเป็นร้อยละ 2.36

จากการทดลองทั้ง 3 อัตราการไหล ได้แก่ 0.01, 0.02 และ 0.03 kg/s กับเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 2 แบบ ได้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีอัตราการไหลเพิ่มขึ้น ระบบสามารถลดความร้อนของแผงได้ดีขึ้น ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกมีประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ร้อยละ 13.86 ที่อัตราการไหล 0.03 kg/s ส่วนเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ร้อยละ 11.50 ที่อัตราการไหล 0.03 kg/s เช่นเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่อัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อประสิทธิภาพทางไฟฟ้า อัตราการไหลที่มากกว่าจุดนี้ อาจจะไม่ได้ช่วยให้ระบบลดความร้อนได้มากขึ้นแต่จะสิ้นเปลืองน้ำ เนื่องจากการไหลมีความเร็วมากเกินไป และจากการสังเกต บางช่วงมีประสิทธิผลลดลงอย่างเฉียบพลันเกิดจากการที่แสงจากดวงอาทิตย์ถูกบดบังด้วยก้อนเมฆ จึงทำให้ความเข้มแสงลดลงทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกระแสไฟฟ้าได้น้อย



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกพบว่าแผงชนิดดังกล่าว มีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าสูงสุด ร้อยละ 15.08 ที่อัตราการไหล 0.03 kg/s และมีประสิทธิภาพการผลิตน้ำร้อนสูงสุด ร้อยละ 41.10 ที่อัตราการไหล 0.03 kg/s เมื่อทำการทดลองที่ความเข้มแสงเฉลี่ยประมาณ 800 w/m^2 ส่วนเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสพบว่า มีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าสูงสุด ร้อยละ 8.81 ที่อัตราการไหล 0.03 kg/s และมีประสิทธิภาพการผลิตน้ำร้อนสูงสุด ร้อยละ 31.89 ที่อัตราการไหล 0.03 kg/s

จากผลการทดลองดังกล่าวสรุปได้ว่าหากนำเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกและแบบอะมอร์ฟัสมาใช้ในการผลิตไฟฟ้า สภาวะที่มีผลต่อการผลิตไฟฟ้า คือ ต้องปรับอัตราการไหลให้อยู่ในช่วง 0.03 kg/s จะทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าดีที่สุด ถ้าหากให้เกิดประสิทธิภาพการผลิตน้ำร้อนควรปรับอัตราการไหล 0.03 kg/s เนื่องจากมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันทั้งสองแบบ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ดูแลทำความสะอาดบริเวณกระจกของชุดรับรังสีดวงอาทิตย์เป็นระยะๆ
2. ควรมีการถ่ายน้ำในระบบทิ้งเป็นประจำเพื่อระบายสิ่งสกปรก ตะกอน อื่นๆ ออกจากระบบ เพื่อป้องกันการอุดตันของระบบ

5.3 ปัญหาและอุปสรรค

เนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการทดสอบ จึงต้องรอวันที่อากาศดีท้องฟ้าแจ่มใส ความเข้มแสงสูงจึงสามารถทำการทดลองหาค่าประสิทธิภาพของแผงรับรังสีได้

บรรณานุกรม

- [1]ชาย ชิวเกตุ และชนานันท์ บัวเขียว, การผลิตไฟฟ้าโดยแสงอาทิตย์ (Online) 2543,
Available:<http://www.eppo.go.th/vrs/VRS49-09-Solar.html> (15 สิงหาคม 2557).
- [2]บริษัท ลีโอนิกส์ จำกัด, ความรู้เกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์ (Online) 2002, Available:
http://www.leonics.co.th/html/th/aboutpower/solar_knowledge.php (5 กุมภาพันธ์ 2557).
- [3]มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, เอกสารประกอบการอบรมหลักสูตร เทคนิคการ
ประยุกต์ใช้เซลล์แสงอาทิตย์สำหรับผู้ออกแบบระบบ, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและ
อนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, กรุงเทพฯ. พฤษภาคม 2552.
- [4]สมชัย หิรัญวโรดม, เอกสารประกอบการสอนรายวิชา ระบบโฟโตโวลตาอิกและการประยุกต์ใช้
งาน,ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ธัญบุรี, ปทุมธานี. 2548.
- [5]เอก อี้อะการ, วิวัฒน์ วิมิชัย และชูรัศมิ์ วิจิตรภินเรศ, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์
แสงอาทิตย์สำหรับแบบจำลองแหล่งจ่ายไฟจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกต้อง, วิศวสาร
ลาดกระบัง ปีที่ 23 ฉบับที่ 3, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ลาดกระบัง กรุงเทพฯ. กันยายน 2549. หน้า 18-23.
- [6]เดชนิตธร อิ่มปรีดา และวันชัย ทรัพย์สิงห์, แผนเซลล์แสงอาทิตย์จำลองด้วยโปรแกรม
Matlab/Simulink แบบทันเวลา, การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทน
สู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 4, มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง, ลำปาง. พฤศจิกายน 2554.
หน้า 37-44.
- [7]บุญยัง ปลั่งกลาง, ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี. 2553.
- [8] S.R. Wenham, M.A. Green, M.E. Watt, **Applied Photovoltaics**, Centre for Photovoltaic
Devices and Systems, UNSW
- [9] ธนารัฐ สิงหา, “การทำน้ำร้อนโดยการใช้พลังงานแสงอาทิตย์”, วารสารโลกพลังงาน,ปีที่ 4
ฉบับที่ 10,2554,หน้า 30-38
- [10] Jack P. Holman, 1997. Heat transfer, Southern Methodist University, U.S.A., Eighth
Edition, McGraw-Hill. Inc, New York, pp 1-30

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [11]การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ (Online) 2004,
Available: http://www.egat.co.th/re/solarcell_technology.htm (2 กุมภาพันธ์ 2557).
- [12]สำนักงานพัฒนาพลังงานแสงอาทิตย์ กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน,
ไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์(Online), Available http://www.ces.kmutt.ac.th/pv_text/Designer_CH1toCH2.pdf
- [13] Ashrea Standard 93-77., Method of Testing to Determine The Thermal Performance of Solar Collectors. New York: The America Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 1978.
- [14]นิคม ผึ้งคำ ,การเพิ่มสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยระบบหล่อเย็น.วิทยานิพนธ์
ปริญญาโทบริหารศึกษิต.มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- [15]สุพัฒน์ ทองหนู้อย, บุญยฤทธิ์ ประสาทแก้ว, สถาพร ทองวิก. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสม
ต่อการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทย การประชุมวิชาการ
สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 15, 2-4 เมษายน 2556
โรงแรมกรุงศรีริเวอร์ จ. อโยธยา
- [16]A. D. Jones and C. P. Underwood, A thermal model for photovoltaic systems,
Solar Energy, 70 (2001), 349–359.
- [17]T. T. Chow, Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit
dynamic model, Solar Energy, 75 (2003), 143–152.
- [18]H. A. Zondag, D. W. de Vries, W. G. J. van Helden, R. J. C. van Zolingen, and A. A. van
Steenhoven, The yield of different combined PV-thermal collector designs, Solar
Energy, 74 (2003), 253–269.
- [19]จจจิตร หิรัญธนาภ. กระบวนการพลังงานแสงอาทิตย์ในรูปความร้อน. คณะพลังงานและวัสดุ
สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2541
- [20]รุ่งทิวี ผดากาล สุรัชย์ รดาตาร,การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อน
วิศวกรรมสาร มก.ฉบับที่ 70 ปีที่ 22 หน้า 96-109
- [21]Swapnil Dubey, Andrew A.O.Tay ,Testing of two different types of photovoltaic–thermal
(PVT) modules with heat flow pattern under tropical climatic conditions

- [22]Swapnil Dubey,Andrew A.O.Tay , Experimental Study of the Performance of Two Different Types of Photovoltaic Thermal (PVT) Modules under Singapore ClimaticConditions
- [23]อเนก ทอนสูงเนิน , การศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบจากการบังเงาบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบโฟโตโวลตาอิก,วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต.มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- [24]กานูพงศ์ ศิริกุล,การทดสอบวิเคราะห์ระบบระบายความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าด้วยแผ่นเพลเทียร์,วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต.มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



ภาคผนวก ก

เอกสารข้อมูลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์



Kaneka

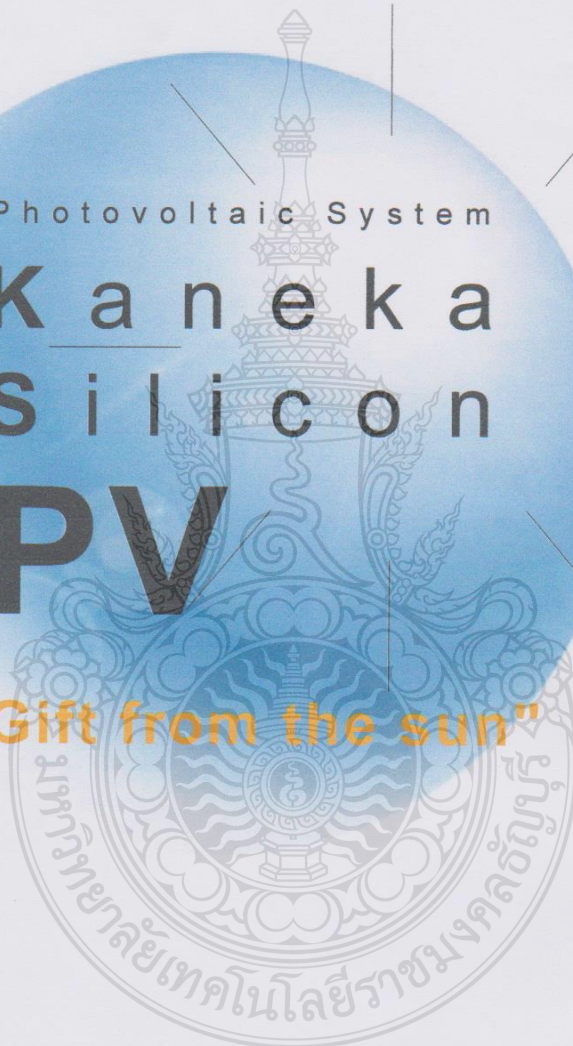
Photovoltaic System

K a n e k a

S i l i c o n

PV

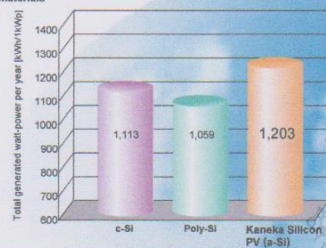
"Gift from the sun"



Greater actually generated watt-power compared to crystalline silicon PV modules.

Kaneka's amorphous silicon (a-Si) has superior light absorption. Compared to mono-crystalline (c-Si) or polycrystalline (poly-Si), it generates considerably more power. Another advantage is that the single junction a-Si layer can be made extremely thin, use less material and energy thereby enabling high productivity for mass production.

- Comparison of generated watt-power (total) per year among various materials



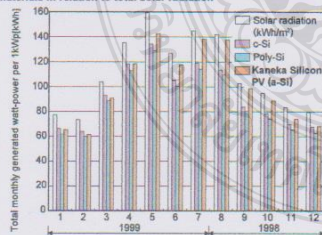
The total solar radiation per year is 1,323kWh/m². Source: "NEDO/Ritsumeikan University Demographic Module Field Test and Operational Analysis" presented at the International PV SEC-11, Sapporo, Hokkaido, Japan, 1999. Installation location: Kusatsu, Shiga Prefecture, Japan Slope angle: 13.3 degree.
* NEDO : New Energy and Industrial Technology Development Organization

Thin-film Silicon PV Modules — Powered by Limitless Solar Energy

Superior performance under high-temperature during summer makes a real difference in actual generated watt-power.

The c-Si PV modules lose some power-generating capability by rises in temperatures. But a-Si PV modules have been higher power generation capability during extreme summer. The a-Si PV modules can deliver maximum performance during summer afternoons, contributing to the peak-cut effect for electricity consumption due to the intensive use of air-conditioners at homes and offices.

- Comparison of total generated watt-power per month among various materials in relation to total solar radiation

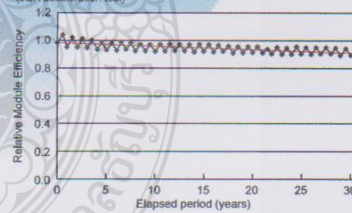


Kaneka Silicon PV's generated watt-power is about the same as that of other crystalline silicon PVs during the winter months, but in summer, the Kaneka Silicon PV generates significantly more power compared to other crystalline

Stable power output over long periods for outstanding reliability.

The a-Si PV module maintains initial energy conversion efficiency (after full stabilization) over long periods, attesting to its outstanding reliability.

- Long-term reliability data for module efficiency after stabilization (JQA acceleration test)



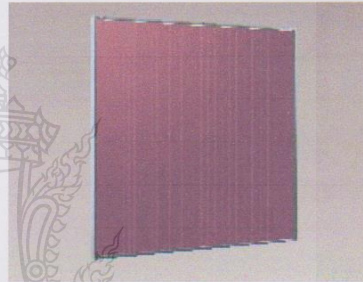
Long-term reliability data for module efficiency after stabilization

Note 1: Data measured by JQA (Japan Quality Assurance Organization) using Kaneka's a-Si PV module as part of a research project subcontracted by NEDO.

Note 2: The acceleration test was performed to evaluate reliability almost over a 30-year period by considering seasonal variations of solar radiation and temperatures.

silicon PVs Source: "NEDO/Ritsumeikan University Demographic Module Field Test and Operational Analysis" presented at the International PV SEC-11, Sapporo, Hokkaido, Japan, 1999. Installation location: Kusatsu, Shiga Prefecture, Japan Slope angle: 13.3 degree. "NEDO/Ritsumeikan University Demographic Module Field Test and Operational Analysis" presented at the International PV SEC-11,

Standard PV modules - For industrial or roof top applications



Long-term (25 years) power output warranty. Certifications and Qualifications

Standard PV module will maintain more than 80% of minimum rated power for 25 years (based on data from silicon PV modules installed over a month under conditions of 25°C, A.M. 1.5 and 100m W/cm²).

- IEC61646
- Safety class II equipment
- CE mark



● Specifications

Model	Standard PV modules		
	LSU	CJA	GPA
Nominal power (W)	58	58	64
Open circuit voltage (V)	84	65	92
Short circuit current (A)	1.1	1.12	1.17
Voltage in mpp (V)	65	83	68
Current in mpp (A)	0.89	0.82	0.94
Max. system voltage (V)	500	500	530
Dimensions (mm.)	920 x 920 x 40	920 x 920 x 40	990 x 960 x 40
Weight (kg)	12.5	12.9	13.7
Equipment	MC connectors Bypass diode Double insulated cable	MC connectors Bypass diode Double insulated cable	MC connectors Bypass diode Double insulated cable
Certifications and Qualifications	IEC61646 Safety class II equipment CE mark	IEC61646 Safety class II equipment CE mark	IEC61646 Safety class II equipment CE mark

- Data listed above are standard values measured using the JIS testing method but are not guaranteed values.
- The PV system's power-generating capacity is represented by the total of individual PV module power outputs calculated based on the JIS Standards. Power output under actual usage conditions can vary depending on the level of solar radiation, installation conditions (directions, angles and ambient conditions), regional climates and temperatures.
- Specifications subject to change without notice.
- JIS : Japanese Industrial Standards.

Photovoltaic System

Kaneka Silicon PV

Kaneka's photovoltaic systems installed roofs of houses and buildings can generate clean energy and reduce CO₂ emissions.

To Power the Future

Environmental pollution and energy shortages are now of global concern. More interest is focusing on photovoltaic (PV) power generation, which can use an unlimited source of clean energy - the sun. Kaneka decided to begin research into thin film silicon PV modules at an early stage. This has allowed the company to assume a leading position in the industry over the past 20 years. Kaneka's accumulated expertise now makes it possible to offer next-generation energy all over the world through its advanced PV systems that empower individuals to take a proactive environmental role in their daily lives.

Less material & Shorter EPT

Amorphous silicon module is more environmentally friendly than crystalline silicon module.

Less silicon material

Thin-film silicon PV module requires less silicon material.

- The thickness of a-Si cell is 0.3 μm, which is one six hundredth (1/600) of that of crystalline silicon cell (approximately 200 μm).
- The a-Si cell is directly deposited onto the glass substrate and is appropriate for mass-production.

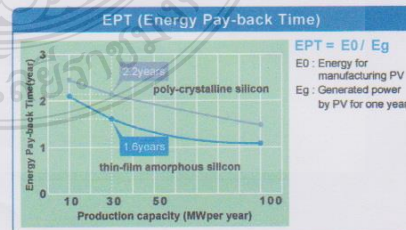
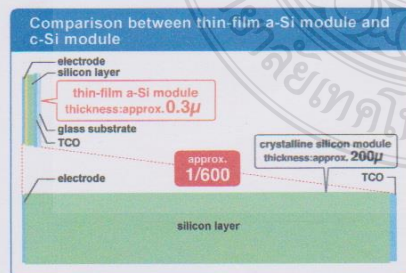
Shorter EPT (Energy Pay-back Time)

EPT is the term in which the PV module can pay-back the energy used in manufacturing by its power generation.

EPT of a-Si PV is 1.6 years, which is about half a year shorter than that of crystalline silicon PV (2.2 years).

EPT is the very important index to evaluate the environmental effect.

Reference : PVTEC (Photovoltaic Power Generation Technology Research Association) 1996 Research for evaluation of photovoltaic power generation.



P.KAN.BRO.PVM.064 Rev.2.10/2006

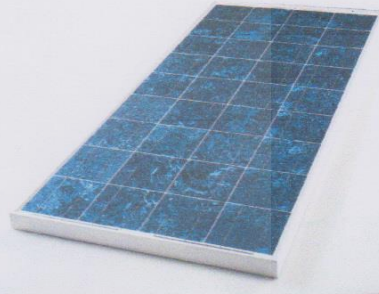
Renewable Energy: Photovoltaic Modules



120 Watts and 125 Watts Excellent designed Multi (Poly) - crystalline PV module

High consistency and reliability of Ekarat Solar's 120/125 Watts PV modules versatility for users and solar system designer to suit a needed application. A village solar systems, residential roof, solar home unit, telecommunication station, and battery-charge station as well as stand-alone and grid connected systems are recommended and commonly used with these 120/125 Watts modules.

High efficiency module, more than 12%, is a result of solar cell's superior power out put, which has been developed by our solar cell partnership. Moreover, other component materials are also selected to comply with international standards such as IEC 61215 and Safety Standard IEC 61730. These create a customer's confidence ensured with a manufacturing based 20 years limited warranty.



- Low iron tempered glass allows a high light transmission rate with a great robustness.
- EVA encapsulate sheet, back-sheet, and clear anodized aluminum frame are technically equipped to protect the module against all weather condition.
- Junction box with IP65 to ensure water proof and prolong lifetime operation.
- Special cable with connectors is offered as option for easy interconnection in grid-connected systems as well as stand-alone systems.
- Bypass diode included in promptly provided junction box is to prevent the power dropped by partial shading.

Electrical Characteristics

Model No.	ES2120	ES2125
Maximum power (Pmax)	120 W	125 W
Power tolerance	± 3%	± 3%
No. of connected cells	36	36
Voltage of Pmax (Vmp)	17.48 V	17 V
Current at Pmax (Imp)	6.98 A	7.36 A
Short - Circuit current (Isc)	7.57 A	7.64 A
Open - Circuit voltage (Voc)	22.37 V	21.5 V
Temperature Coefficient of Voc	-0.0816 V / °C	-0.0816 V / °C
Temperature Coefficient of Isc	+1.6 mA / °C	+1.6 mA / °C
Temperature Coefficient of power	-0.3750 % / °C	-0.3750 % / °C
Maximum series fuse rating	15 A	15 A
Maximum voltage system	1000 V	1000 V

CONTACT US: Ekarat Solar Co., Ltd.

9/291 U.M. Tower 28th Fl., Ramkhamhaeng Rd., Suanluang, Bangkok 10250 Thailand
 Tel. +66 2 719 8777 Fax. +66 2 719 8760
 e-mail info@ekarat-solar.com Web site www.ekarat-solar.com

Specifications subject to technical changes
 © Ekarat Solar Co., Ltd.

BQ-S-025-0-02/03/53-1/2

Renewable Energy: Photovoltaic Modules



Mechanical Characteristics

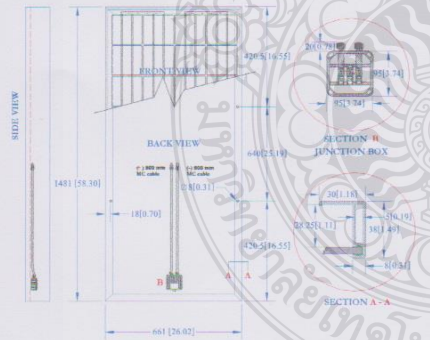
Dimension	1481 x 661 x 38 mm.
Weight	11.2 kg.
Dimension tolerance	± 1 mm.
Junction Box	Degree of protection: IP65 and compatibility with 2.5 - 4.0 mm cross section cable size.
Diode	Silicon or Schottky By - pass diode for every 18 cells connection.
Frame	Anodized Aluminum.
Construction structure	Front: High light transmission tempered glass with 3.20 mm thickness; Back: Weather proof back sheet material. Laminated Material: EVA.

Qualification and testing

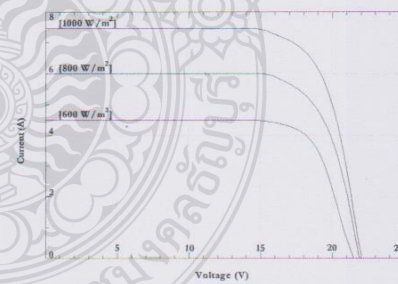
ISO 9001 for quality management system.
IEC 61215 : Crystalline silicon terrestrial PV modules— Design qualification and type approval.
IEC 61730 : PV module safety qualification. To ensure a safety for users and installing operator of our products.
TIS 1843 : Thailand Industrial Standard equivalents to IEC 61215.
CE mark : European Conformity.



Module drawing diagram



IV - curves Irradiance 1,000 W/m², 800 W/m², and 600 W/m²



Model: 120W/125W

These data represent the performance of typical modules as measured at their out put terminals, and do not include the effect of such additional equipment as diodes or cables. The data are based on measurements made in accordance with ASTM E1036-85 corrected to SRC (Standard Reporting Conditions, also known as STC or Standard Test Conditions), which are:

- Illumination of 1kW/m² (1sun) at spectral distribution of AM1.5 (ASTME892-87 global spectral irradiance);
- Cell temperature of 25°C.

CONTACT US: Ekarat Solar Co., Ltd.

9/291 U.M. Tower 28th Fl., Ramkhamhaeng Rd., Suanluang, Bangkok 10250 Thailand
 Tel. +66 2 719 8777 Fax. +66 2 719 8760
 e-mail info@ekarat-solar.com Web site www.ekarat-solar.com

Specifications subject to technical changes
 © Ekarat Solar Co., Ltd.

BQ-S-024-0-02/03/53-2/2



ภาคผนวก ข

ผลงานตีพิมพ์



International Conference of TSAE 2014

งานประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย



ระดับชาติ ครั้งที่ 15 และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 7

The 15th TSAE National Conference and
the 7th International Conference
(TSAE 2014)



การประชุมงานวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15 ประจำปี 2557

(ระดับชาติ)

นวัตกรรมการเกษตรยั่งยืน พลิกฟื้นเศรษฐกิจไทย

วันที่ 2 เมษายน - 4 เมษายน 2557 ณ โรงแรมกรุงศรีริเวอร์ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

จัดโดยสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยร่วมกับ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

วันที่ 2 เมษายน 2557 ห้อง กรุงศรีอยุธยา 2	
8.00-9.00	ลงทะเบียนเข้าร่วมงานและรับเอกสารการประชุมวิชาการ
9.00-10.00	กล่าวต้อนรับโดย ผศ.ดร.ศิวกร อ่างทอง คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
	กล่าวรายงานโดย คุณดาเรศร์ กิตติโยภาส นายกสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
	พิธีเปิดการประชุมวิชาการ โดย ฯพณฯ นายอำพล เสนาณรงค์ องคมนตรี
10.00-10.15	พักรับประทานอาหารว่าง
10.15-11.15	บรรยายพิเศษ "Innovative Farming Technologies and Research to Meet Challenges of Agricultural Production" โดย Assoc. Prof. Dr. Hemantha P W Jayasuriya
11.15-12.00	เสวนาวิชาการในหัวข้อ "นวัตกรรมการเกษตรยั่งยืน พลิกฟื้นเศรษฐกิจไทย" โดย นายอัคคพล เสนาณรงค์ ดร.นราวัลย์ สุรังค์สุริยกุล นายศุภกร ลิ้มปนะโชคชัย และ คุณดาเรศร์ กิตติโยภาส
12.00-13.00	พักรับประทานอาหารกลางวัน
13.00-14.15	การนำเสนอผลงานทางวิชาการ
14.15-14.30	พักรับประทานอาหารว่าง
14.30-15.45	การนำเสนอผลงานทางวิชาการ
16.00-17.00	ประชุมประจำปีสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย (ห้องเฟื่องฟ้า)
18.00-21.00	งานเลี้ยงต้อนรับ ณ คันทันแมน
วันที่ 3 เมษายน 2557	
17.00-17.30	พิธีปิดและมอบรางวัลบทความวิจัยดีเด่น
วันที่ 4 เมษายน 2557	
8.00-12.00	ศึกษาดูงาน

วันที่ 3 เมษายน 2557 ห้อง ผกากรอง	
ประธานการเสนอบทความ	ดร. กระจวี ตรีอำนาจรศ มหาวิทยาลัยสุรนารี
9.00-9.15	TRE-11 การทดสอบและประเมินผลเตาแก๊สซีพีเออร์แบบไหลขึ้นกลับทางเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า นฤเบศร์ หนูโสเพ็ชร, ภูษิตฐย์ ปัญญาเทพ, สิทธิชัย วงศ์หน่อ และ วิวัฒน์ คล่องพานิช
9.15-9.30	TRE-12 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพเบื้องต้นของเปลือกร่อนน้ำจากกระบวนการผลิตแอมโมเนีย สำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล พิรุณ ชมศรี และ ชัยยันต์ จันทร์ศิริ
9.30-9.45	TRE-13 การประเมินศักยภาพกากมะเขือเทศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ (กรณีศึกษาจังหวัดหนองคาย) ณัฐจรรย์ จิระคกุล และ ทินิจ จิระคกุล
9.45-10.00	TRE-14 ศึกษาศักยภาพการผลิตต้นเล้าสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ พินิจ จิระคกุล, ทักษิณา ศันสยะวิชัย และ ปรีชา กาเพ็ชร
10.00-10.15	TRE-15 การศึกษาเชิงทดลองการทำงานด้วยถังเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรรูปแบบเปิด ธนาพล สุขชนะ
10.15-10.30	พักรับประทานอาหารว่าง
ประธานการเสนอบทความ	ผศ.ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
10.30-10.45	TRE-16 กรณีศึกษาการเผาไหม้กลับโดยใช้ฮีตเตอร์ สกุลตลา วรณปะเช และ กฤษฎากร บุคตาจันทร์
10.45-11.00	TRE-17 อุปกรณ์วัดความต้านทานด้วยไฟฟ้าแรงดันสูงในการหาความชื้นในยางแผ่นดิบ ปรีดาจรรณ ไชยศรีชลธาร, ชุศักดิ์ ขวประดิษฐ์, อนุชิต จำลิ่งห์, สุภัทร หนูสวัสดิ์ และ กอบชัย ไกรเทพ
11.00-11.15	TRE-18 การทดสอบสมรรถนะใบกังหันลมและการทำนายประสิทธิภาพพลังงานลมของกังหันลมแบบ ซาโวนีเยส ธนาพล สุขชนะ
11.15-11.30	TRE-19 อิทธิพลของพลาสติกจากกากชื้อต่อการดูดซับคุณสมบัติพื้นผิวของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด อัจฉราภรณ์ บุญมา และ วีระศักดิ์ เลิศศิริโยธิน
11.30-11.45	TRE-20 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทย สุพัฒน์ ทองหนูชัย, บุญยฤทธิ ประสาทแก้ว และ สถาพร ทองวิค
11.45-12.00	TRE-21 การถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำและน้ำผสมสารแขวนลอยในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ ท่อชุด สุรศักดิ์ ศเนเร็ว และ สถาพร ทองวิค
12.00-13.00	พักรับประทานอาหารกลางวัน

บทคัดย่อ การประชุมงานวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15
นวัตกรรมเกษตรยั่งยืน พลิกฟื้นเศรษฐกิจไทย

TRE-07	การออกแบบการจำลองระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยใช้ Photovoltaic สำหรับบ้านพักอาศัยและ ทางด้านเกษตรกรรม	105
TRE-08	ศุภพล ตันติรักษ์, ณรงค์ มั่งคั่ง, ทิพวรรณ ปะละไทย และ ณัฐฐ์ กาศยปนนท์ ระบบจำลองการผลิตไฟฟ้าของโซลาร์เซลล์แบบเคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ชนิดสองแกน	106
TRE-09	การออกแบบและพัฒนาระบบกักเก็บพลังงานความร้อนในรูปน้ำแข็งสำหรับการปรับอากาศใน โรงเรือน	107
TRE-10	ธวัชชัย สุขะ และ ดามร บัณชรรัตน์ การศึกษาผลกระทบจากการควบคุมอากาศต่อการเผาไหม้ของเตาเผาขยะขนาดเล็กแบบสาม ชั้นตอน	108
TRE-11	ธนาพล สุขชนะ และ สรวาณี สิริเกษมสุข การทดสอบและประเมินผลเตาแก๊สซีพีเออร์แบบไหลขึ้นกลับทางเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า	109
TRE-12	นฤเบศร์ หนูโสเพ็ชร, ภูชิตธัญย์ ปัญญาเทพ, สิทธิชัย วงศ์หน่อ และ วิวัฒน์ คล่องพานิช การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพเบื้องต้นของเปลือกถั่วลิสงจากกระบวนการผลิตแป้งมัน สำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล	110
TRE-13	พิรุณ ชมศรี และ ชัยยันต์ จันทร์ศิริ การประเมินศักยภาพกากมะเขือเทศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ (กรณีศึกษาจังหวัดหนองคาย)	111
TRE-14	ณัฐจรรย์ จิระคกุล และ พินิจ จิระคกุล ศึกษาศักยภาพการผลิตต้นเล้าสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ	112
TRE-15	พินิจ จิระคกุล, ทักษิณา คັນสยะวิชัย และ ปรีชา กาเพ็ชร การศึกษาเชิงทดลองการนำน้ำอุ่นด้วยเทอร์มิโซฟอนชนิดตรงจระบบเปิด	113
TRE-16	ธนาพล สุขชนะ กรณีศึกษาการเผาไหม้แก๊สโดยใช้ฮีตเตอร์	114
TRE-17	สกุลตลา วรณปะเช และ กฤษฎากร บุคดาจันทร์ อุปกรณ์วัดความต้านทานด้วยไฟฟ้าแรงดันสูงในการหาความชื้นในยางแผ่นดิบ	115
TRE-18	ปรีดาวรรณ ไชยศรีธราธ, ชุศักดิ์ ขวประติษฐ์, อนุชิต ฉ่ำสิงห์, สุภัทร หนูสวัสดิ์ และ กอบชัย ไกรเทพ การทดสอบสมรรถนะใบกังหันลมและการทำนายประสิทธิภาพพลังงานลมของกังหันลมแบบซาโว เนียส	116
TRE-19	ธนาพล สุขชนะ อิทธิพลของพลาสมาจากก๊าซต่อการติดแปรคุณสมบัติพื้นผิวของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด	117
TRE-20	อัจฉราภรณ์ บุญมา และ วีระศักดิ์ เลิศศิริโยธิน ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทย	118
TRE-21	สุพัฒน์ ทองหนูชัย, บุญยฤทธิ ประสาทแก้ว และ สถาพร ทองวิค การถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำและน้ำผสมสารแขวนลอยในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ ท่อขด	119
	สุรศักดิ์ คนเร็ว และ สถาพร ทองวิค	



ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทย
THE STUDY ON OPTIMIZATION CONDITIONS OF PHOTOVOLTAIC AND THERMAL IN THAILAND

สุพัฒน์ ทองหนูชัย*, บุญยฤทธิ์ ประสาทแก้ว, สถาพร ทองวิก

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก อ.
ธัญบุรี จ. ปทุมธานี 12110

ผู้เขียนติดต่อ: สุพัฒน์ ทองหนูชัย อีเมล: iamsupat_ta@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยได้ทำการศึกษาทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ชนิด ได้แก่ แบบผลึก พื้นที่รับแสง 1.96 ตารางเมตร และแบบอะมอร์ฟัส พื้นที่รับแสง 1.69 ตารางเมตร ภายใต้สภาพภูมิอากาศประเทศไทย ติดตั้งและทดสอบ ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ในการทำวิจัยได้ทดลองที่ละเงื่อนไข โดยปรับอัตราการไหลของน้ำ เป็น 0.1, 0.2 และ 0.3 กิโลกรัมต่อวินาที ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า การผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก พบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.3 กิโลกรัมต่อวินาที มีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนสูงสุด ร้อยละ 1.16, 32.36 ตามลำดับ ส่วนเซลล์แสงอาทิตย์ แบบอะมอร์ฟัส ที่อัตราการไหล 0.3 กิโลกรัมต่อวินาที มีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนสูงสุด ร้อยละ 7.40, 9.83 ตามลำดับ

คำสำคัญ : พลังงานแสงอาทิตย์, พลังงานทดแทน, แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนด้วยเซลล์แสงอาทิตย์

Abstract

In this paper, experimental the was optimized the conditions of photovoltaic and thermal (PVT) modules, including of crystal line type effect area 1.96 m^2 and amorphous type effect are 1.69 m^2 under climatic Thailand installed and test at rajamangala university of technology thanyaburi The experiment were test under various condition with flow rate of water at 0.1, 0.2 and 0.3 kg/s The result of this study shown that the suitable optimization of photovoltaic and thermal crystalline type at 0.3 kg/s of water flow rate efficiency in producing electric 1.16 % and thermal 32.36 % Amorphous type at 0.3 kg/s of water flow rate producing electric 7.40 % and thermal 9.83 %

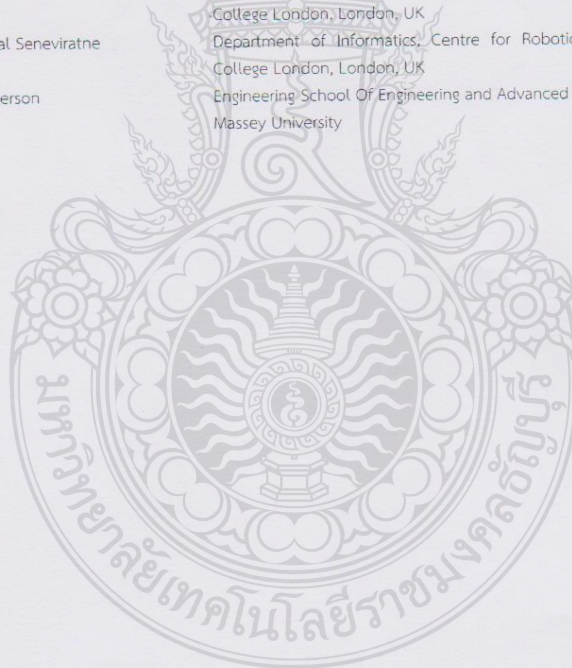
Keywords: solar energy, renewable energy, photovoltaic and thermal (PVT) modules



Innovative Sustainable Agriculture to Revive Thai Economy:
2nd April – 4th April 2014

Scientific Committee

- | | | |
|----|----------------------------------|--|
| 1 | Prof. Athapol Noomhorm | Asian Institute of Technology, Thailand |
| 2 | Dr. George Srzednicki | The University of New South Wales UNSW Sydney |
| 3 | Prof. Vilas M. Salokhe | Kaziranga University, Jorhat, Assam, India |
| 4 | Associate Prof. H P W Jayasuriya | Dept. of Soil, Water and Agricultural Engineering College of Agricultural & Marine Science, Oman |
| 5 | Assistant Prof. Peeyush Soni | Agricultural Systems and Engineering School of Environment, Resources and Development Asian Institute of Technology, Thailand |
| 6 | Prof. Vijaya Raghavan | Professor Department of Bioresource Engineering Faculty of Agricultural and Environmental Sciences Macdonald Campus, McGill University |
| 7 | Associate Prof. Valérie Orsat | Department of Bioresource Engineering Macdonald Campus, McGill University |
| 8 | Dr. Vigneault, Clément | Agriculture and Agricultural Food Canada |
| 9 | Dr. Charlebois, Denis | Agriculture and Agricultural Food Canada |
| 10 | Dr. Hongbin Liu | Department of Informatics, Centre for Robotics Research, King's College London, London, UK |
| 11 | Professor Lakmal Seneviratne | Department of Informatics, Centre for Robotics Research, King's College London, London, UK |
| 12 | A.H.J.(Tony) Peterson | Engineering School Of Engineering and Advanced Technology Massey University |





รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความทั้งระดับชาติและระดับนานาชาติ

ลำดับ	ชื่อ	สกุล	สถานที่ทำงาน
1	ศ.ดร.สมชาติ	โสภณรณฤทธิ์	คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
2	ศ.ดร.ทนงเกียรติ	เกียรติศิริโรจน์	วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
3	ศ.ดร.สุรินทร์	พงศ์ศุภสมิทธิ	วิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
4	รศ.กิตติพงษ์	วุฒิจำนงค์	วิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้
5	รศ.ดร.กรรณชัย	กัลยาศิริ	วิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
6	รศ.ดร.กอบเกียรติ	ผ่องพุมิ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
7	รศ.ดร.กิตติพงษ์	ห้วงรักษ์	คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
8	ศ. ดร. สมชาติ	โสภณรณฤทธิ์	พลังงานสิ่งแวดล้อมมา มหาวิทยาลัยธนบุรี
9	รศ.ดร.กุลกัญญา	ณ. ป้อมเพชร	วิทยาลัยการจัดการ สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
10	รศ.ดร.จาดุพงศ์	วาฤทธิ์	อุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้
11	รศ.ดร.จารุวัตร	เจริญสุข	สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
12	รศ.ดร.จำลอง	ปราบแก้ว	วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
13	รศ.ดร.ชินรักษ์	เอียรพงษ์	สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
14	รศ.ดร.ธัญญา	นิยมภา	วิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
15	รศ.ดร.ประกอบ	กิจไชยา	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
16	รศ.ดร.ประทีปวดี	ศิริศุภลักษณ์	เศรษฐศาสตร์เกษตรและทรัพยากร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
17	รศ.ดร.ปานมนัส	ศิริสมบุรณ์	วิศวกรรมเครื่องกล (เกษตร) สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
18	รศ.ดร.พงษ์เจต	พรหมวงศ์	สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
19	รศ.ดร.รังสิณี	โสธรวิทย์	วิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
20	รศ.ดร.รัตนา	ตั้งวงศ์กิจ	ภาควิชาเกษตรกลวิธาน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
21	รศ.ดร.รุ่งเรือง	กาลศิริศิลป์	วิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี
22	รศ.ดร.วรรณภา	ตั้งเจริญชัย	คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



23	รศ.ดร.วราวุฒิ	ครูส่ง	คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
24	รศ.ดร.วิจิตรา	แดงปรก	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
25	รศ.ดร.วิชัย	ศรีบุญเหลือ	วิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยขอนแก่น
26	รศ.ดร.วินัย	กล้าจริง	วิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรเกษตร สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
27	รศ.ดร.วินิต	ชินสุวรรณ	วิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยขอนแก่น
28	รศ.ดร.วิรัตน์	กระแสดัตร์	วิทยาลัยการจัดการ สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
29	รศ.ดร.วิวัฒน์	หวังเจริญ	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
30	รศ.ดร.วุฒิชัย	นาครักษา	คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
31	รศ.ดร.ศิริจรยา	เครือวิริยะพันธ์	วิทยาลัยการจัดการ สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
32	รศ.ดร.ศิริชัย	เทพา	คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
33	รศ.ดร.สมชาย	จันทร์ขาวนา	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
34	รศ.ดร.สมยศ	เชิญอักษร	วิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
35	รศ.ดร.สีกกรม	เทพหัสติน ณ อยุธยา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
36	รศ.ดร.สุนทร	พูนพิพัฒน์	ปฐพีวิทยา คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
37	รศ.ดร.สุนันทา	กิ่งไพบูลย์	วิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยขอนแก่น
38	รศ.ดร.สุมิตรา	ภูวโรดม	ปฐพีวิทยา คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
39	รศ.ดร.สุวัฒนา	จิตต์ดากกร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
40	รศ.ดร.อดิศร	เสวตวิวัฒน์	คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
41	รศ.ดร.อนุพันธ์	เทอดวงศ์วรกุล	วิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
42	รศ.ดร.อภิศักดิ์	โพธิ์ปิ่น	ปฐพีวิทยา คณะเกษตร สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
43	รศ.ดร.อุสารัตน์	ภักดีสุสุน	ภาควิชาเคมี คณะวิทฯ สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
44	รศ.นงนุช	อังยุริกุล	เศรษฐศาสตร์เกษตรและทรัพยากร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
45	รศ.บพิตร	ตั้งวงศ์กิจ	เกษตรกลวิธาน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
46	รศ.บัณฑิต	หิรัญสถิตย์พร	คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้



47	รศ.ประกาศรี	สิงห์รัตน์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
48	รศ.พงศ์ศักดิ์	ชลธนสวัสดิ์	ภาควิชาเกษตรกลวิธาน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
49	รศ.พินัย	ทองสวัสดิ์วงศ์	วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
50	รศ.มนตรี	คำชู	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
51	รศ.มานพ	ตันตระบัณฑิตย์	วิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ฉัญบุรี
52	รศ.วิชา	หมั่นทำการ	วิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
53	รศ.สันติ	ทองพ้านัก	วิศวกรรมชลประทาน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
54	รศ.สาทิป	รัตนภาสกร	สาขาวิศวกรรมอาหาร สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
55	รศ.เสมอขวัญ	ตันติกุล	วิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้
56	รศ.อนุตร	จำลองกุล	วิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ฉัญบุรี
57	ผศ. ดร. เฉลิมชัย	ภาวิธนา	วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยขอนแก่น
58	ผศ. ดร. เขาว์	อินทร์ประเสริฐ	วิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
59	ผศ. ดร. ณัฏวิภา	เจียรโนวชิระ	วิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรเกษตร สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
60	ผศ. ดร. ทรงวุฒิ	แสงจันทร์	สาขาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรเกษตร สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
61	ผศ. ดร. ธนารัตน์	ชลิตาพงศ์	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
62	ผศ. ดร. นภาพร	เปี่ยมสง่า	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
63	ผศ. ดร. นวภัทรา	หนูนา	วิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
64	ผศ. ดร. บัญชา	คังตระกูล	คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
65	ผศ. ดร.-พงศ์ธร	โสภานันธุ์	วิศวกรรมชลประทาน มหาวิทยาลัยเกษตร กำแพงแสน
66	ผศ. ดร. พยุงศักดิ์	จุลยูเสน	วิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
67	ผศ. ดร. พอใจ	ถามวกร	คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
68	ผศ. ดร. พิมพ์เพ็ญ	พรเฉลิมพงศ์	วิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
69	ผศ. ดร. มนต์ทิพย์	ข้าชอง	วิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
70	ผศ. ดร. มาฤดี	ผ่องทิพัฒน์พงศ์	สาขาวิศวกรรมอาหาร สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
71	ผศ. ดร. ยุพร	พิชกมุทร	คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
72	ผศ. ดร. รณฤทธิ์	ฤทธิธรม	วิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน



73	ผศ. ดร. วิเชียร	ปลั่งมกมล	วิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยขอนแก่น
74	ผศ. ดร. วีระชัย	อาจหาญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
75	ผศ. ดร. วีระศักดิ์	เลิศสิริโยธิน	วิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสุรนารี
76	ผศ. ดร. ศิวลักษณ์	ปฐวีรัตน์	วิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
77	ผศ. ดร. ศิวะ	อัจฉริยวิริยะ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
78	ผศ. ดร. สนธิสุข	ธีระชัยวุฒิ	คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
79	ผศ. ดร. สมโภชน์	สุดาจันทร์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
80	ผศ. ดร. สุจิตรา	รัตนะมโน	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
81	ผศ. ดร. สุดาภทร์	แคว้นเขามิ่ง	วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
82	ผศ. ดร. สุธยา	พิมพ์พิไล	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
83	ผศ. ดร. สุนัน	ปานสาคร	วิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยอัญบุรี
84	ผศ. ดร. สุนทร	สีบคำ	วิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้
85	ผศ. ดร. สุวรรณิ	จรรยาพูน	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
86	ผศ. ดร. อภิชาติ	โสภาค	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
87	ผศ. ดร. เอกวัล	ลือพร้อมชัย	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
88	ผศ.ดร. กฤษฎาการ	บุตดาจันทร์	คณะเทคโนโลยีการออกแบบและการจัดการอุตสาหกรรม
89	ดร. กันต์กนิษฐ์	ขวัญฤกษ์	สาขาวิศวกรรมอาหาร สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
90	ดร. กัลยาณี	เต็งพงศธร	คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
91	ดร. กิตติชัย	บรรจง	คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
92	ดร. ขวัญตรี	แสงประชาธนารักษ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
93	ผศ.ดร. จตุรงค์	ลังกาพันธ์	วิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล อัญบุรี
94	ดร. จักรมาส	เล้าหวนิช	วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
95	ดร. จิราพร	จงยิ่งเจริญ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
96	ดร. ชลอ	จารุสุทธิรักษ์	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
97	ดร. ชัชวาล	ชัยชนะ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
98	ดร. ชัยยันต์	จันทร์ศิริ	วิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยขอนแก่น
99	ดร. ชูศักดิ์	ชวประดิษฐ์	สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร



100	ดร. โชติพงษ์	กาญจนประโชติ	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
101	ดร. ญาณากร	สุทัศน์มาลี	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
102	ดร. ธีรพงศ์	รัตนเดช	สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร
103	ดร. ดามร	บัณฑิตรัตน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
104	ดร. ธงชัย	พุดทองศิริ	คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
105	ดร. นภัทรพี	เหลือสกุล	คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
106	ดร. นักรบ	นาคประสม	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
107	ดร. บุญเทียม	พันธุ์เพ็ง	คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
108	ดร. ประเทือง	อุษาบริสุทธิ์	วิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
109	ดร. ประมวล	ศรีกาหลง	คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
110	ผศ.ดร. ประสันต์	ชุ่มใจหาญ	วิศวกรรมเครื่องกล (เกษตร) สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
111	ดร. พนิดา	บุษปถุช	เทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
112	ดร. พิไลวรรณ	พระประสิทธิ์	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
113	ดร. พูนพัฒน์	พูนน้อย	วิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้
114	ดร. มนต์ศักดิ์	พิมพ์สาร	สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
115	ดร. ฤทธิชัย	อัศวราชันย์	อุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้
116	ดร. วสุ	อุดมแพทยกุล	สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
117	ดร. วันรัฐ	อับดุลลาฮาซิม	วิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
118	ดร. วิบูลย์	ช่างเรือ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
119	ดร. ศิริศักดิ์	เชิดเกียรติพล	วิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
120	ผศ.ดร. ศุภกิตต์	สายสุนทร	เกษตรกลวิธาน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
121	ดร. สมชาย	คอนเจดีย์	วิศวกรรมชลประทาน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
122	ดร. สมชาย	ชวนอุดม	วิศวกรรมเกษตร วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
123	ดร. สมปราภนา	ฤทธิ์พริ้ง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
124	ดร. สานิตย์ดา	เดี้ยวต้อย	วิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
125	ดร. สุขชาติ	เหลือประเสริฐ	สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
126	ดร. สุพรรณ	ยั้งยืน	วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
127	ดร. ھرรษา	วัฒนานุกิจ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



128	ดร. อนุชิต	ฉ่ำสิงห์	สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร
129	ดร. อภินันท์	วัลภา	วิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
130	นายชาญชัย	โรจนโสโร	86/28 ลาดปลาเค้า 32 จรเข้บัว ลาดพร้าว กรุงเทพฯ
131	นายธีรบรรณ	มันกิจ	กองส่งเสริมวิศวกรรมเกษตร กรมส่งเสริมการเกษตร
132	นายตฤวัต	ทางดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขต ปทุมธานี
133	นายนิทัศน์	ตั้งพินิจกุล	สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร
134	นายบรรจง	วรรณธนะพงษ์	กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และพลังงาน
135	นายวิบูลย์	เทพนท์	สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร
136	นายสมเกียรติ	จตุรงค์ล้ำเลิศ	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
137	นายสุวัฒน์	จันทรมาศ	กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และพลังงาน
138	นายสุภาวิชิต	เสียมพงศ์	สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร
139	นายอัศคพล	เสนาณรงค์	สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร
140	ดร. ทินกร	กัลยานี	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
141	ผศ. วีรัตน์	หวังเขื่อนกลาง	คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
142	ดร. อิศรา	เชาระงำ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
143	ดร. สถาพร	ทองวิค	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
144	รศ. ดร. ประทีป	อุษาบริสุทธิ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
145	ดร. รัตนา	การุญบุญญานันท์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
146	ผศ. ผ่องศรี	ศิวราศักดิ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นายสุพัฒน์ ทองหนูชัย
วันเดือนปีเกิด	20 กันยายน 2523
ที่อยู่	125 หมู่ที่ 2 ตำบลพนมวังค์ อำเภอควนขนุน จังหวัดพัทลุง 93110
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ปี พ.ศ. 2546
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2547 – 2548	บริษัทไทยสแตนเลย์การไฟฟ้า จำกัด (มหาชน) วิศวกรวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์
พ.ศ. 2548 – 2551	วิทยาลัยการอาชีพกันตัง พนักงานราชการ ตำแหน่งครู
พ.ศ. 2552 – ปัจจุบัน	วิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีกระบี่ ข้าราชการครู แผนกวิชาช่างกลเกษตร