ออกแบบและทดสอบรางพาราโบลาแบบผสมที่ไม่ต้องใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์

นางสาวปวีณา แดงโนรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน (สหสาขาวิชา)
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

DESIGN AND TESTING OF COMPOUND PARABOLIC TROUGHS WITHOUT SOLAR TRACKING SYSTEM

MISS PAWEENA DANGNOREE

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Energy Technology and Management
(Interdisciplinary Program)
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 2013
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ออกแบบและทดสอบรางพาราโบลาแบบผสมที่ไม่ต้องใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์
โดย	นางสาวปวีณา แดงโนรี
สาขาวิชา	เทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.อมร เพชรสม)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ)

.... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.อุริช อัชชโคสิต)

ปวีณา แดงโนรี : ออกแบบและทดสอบรางพาราโบลาแบบผสมที่ไม่ต้องใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์ (DESIGN AND TESTING OF COMPOUND PARABOLIC TROUGHS WITHOUT SOLAR TRACKING SYSTEM) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.วิทยา ยงเจริญ,91 หน้า.

แผงรับแสงอาทิตย์รางพาราโบลาแบบผสม ได้รับความสนใจอย่างมากในอุตสาหกรรมที่ใช้กระบวนการทำความร้อนหรือระบบการทำความเย็นที่ต้องการอุณหภูมิใช้งานมากกว่า 100 องศาเซลเซียส รางพาราโบลาแบบผสมออกแบบโดยใช้โปรแกรม Mathematica 7.0 ออกแบบโดยหาเงื่อนไขที่เหมาะสมเชิงแสง อาศัยการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ โดยศึกษาสมการพาราโบลา $y = ax^2$ ให้ค่า a เท่ากับ 4,9,16 เลือกสมการ $y = 9x^2$ ไปออกแบบปรับความกว้าง(W) โดยปรับเป็น 3 ค่า คือ 0.05 ,0.10 ,0.15 เลือกความกว้าง(W)เท่ากับ 0.15 นำไปปรับมุมจากแนวระดับ ปรับเป็น 5,10,15 องศา ซึ่งรางรับแสงที่ปรับมุม 15 องศาจากแนวระดับ ทำมุมรับรังสีได้ 80 องศา

สร้างโมเดลรางพาราโบลาแบบผสมที่ปรับมุม 15 องศาจากแนวระดับเพื่อทดสอบประสิทธิภาพเชิงแสงเทียบกับประสิทธิภาพจากการออกแบบ โดยในการทดลองใช้หลอดฮาโลเจนขนาด 50 วัตต์ ให้แสงสว่างแทนแสงจากดวงอาทิตย์ ผลจากการทดสอบมีความสอดคล้องกับการออกแบบ ซึ่งจากการทดสอบรางรับแสงมีประสิทธิภาพสูงสุดเฉลี่ย 67.68% นำเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการออกแบบมาสร้างเป็นรางรับแสงจริงซึ่งมีขนาดกว้าง 1 เมตร ยาว 1.9 เมตร นำไปทดสอบกับระบบเพื่อดูประสิทธิภาพเชิงกล ผลการทดสอบได้ประสิทธิภาพรวมเฉลี่ย 26.02% หลอดฮีตไปป์ทำอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 105.31 องศา ความเข้มแสงเฉลี่ยทุกช่วงเวลา 550.44 วัตต์ต่อตารางเมตร ข้อดีของแผงรับแสงอาทิตย์ที่ออกแบบนี้คือสามารถทำอุณหภูมิได้สูงกว่าแผงรับแสงแบบแผ่นราบหรือแบบท่อแก้ว ดังนั้นแผงรับแสงอาทิตย์นี้จึงมีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานในที่อยู่อาศัย หรือในกระบวนการทำความร้อนของโรงงานอุตสาหกรรม

สาขาวิชา เทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน ลายมือชื่อนิสิต..

ปีการศึกษา 2556 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์............................

5287637820 : MAJOR ENERGY TECHNOLOGY AND MANAGEMENT

KEY WORDS : CPC / Non-Tracking / Diffuse Solar Irradiation

PAWEENA DANGNOREE : DESIGN AND TESTING OF COMPOUND PARABOLIC TROUGHS WITHOUT SOLAR TRACKING SYSTEM ADVISOR : ASSOC.PROF. WITHAYA YONGCHAREON, Ph.D., 91 pp.

The CPC solar concentrator are of great interest for industrial heating processes or cooling application, at temperature more than 100 degrees Celsius. The CPC are designed by mathematica 7.0 program, find the appropriate criteria of optical and geometric analysis. This design is created from parabolic equation, $y = ax^2$,give a = 4,9,16.choose equation $y = 9x^2$ and then adjust the width(W) = 0.05,0.10,0.15, choose width(W) = 0.15 and adjust the angle from horizontal of 15 degrees that make 80 degree radiation angle.

Create a model for Optical efficiency test compare with design efficiency . In the test using a halogen bulb 50 watts instead of sunlight. The test results are consistent with the design, average overall efficiency is 67.68%. Apply appropriate terms from design create compound parabolic troughs. The design completed have size width 1 m and length 1.9 m. And then test mechanical efficiency, average overall efficiency is 26.02%. The maximum temperature of heat pipe is 105.31 degrees Celsius, average overall intensity radiation is 550.44 w/m^2. This collector yields higher temperatures than flat plate solar collector So therefore suitable for using in residential house or industrial heating processes.

Field of Study: Energy Technology and Management Student’s Signature.............................

Academic Year: 2011 Advisor’s Signature..............................

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี เนื่องจากได้รับคำแนะนำและสนับสนุนจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รศ.ดร.วิทยา ยงเจริญ และดร.วัฒนา รติสมิทธ์ ซึ่งคอยให้คำชี้แนะในกระบวนการทำงานวิจัย ตลอดจนสนับสนุนข้อมูลในด้านต่างๆ นอกจากนี้ผู้วิจัย ยังต้องขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ คณะอาจารย์และเจ้าหน้าที่สถาบันวิจัยพลังงานจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้คอยช่วยเหลือตลอดจนแนะนำแนวทางแก้ปัญหาต่างๆ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ขอขอบคุณครอบครัว พี่ๆและเพื่อนๆ ที่ให้การสนับสนุนและกำลังใจที่ดีตลอดมา รวมถึงคุณณรงค์ อมรพิทักษ์พันธ์ บริษัท AMP METAL WORKS ประเทศไทยจำกัดที่ช่วยเหลือในการสร้างแผงรับแสงพาราโบลาแบบผสมในครั้งนี้ โอกาสนี้ผู้วิจัยยังได้รับทุนสนับสนุนจากสถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยซึ่งได้มอบทุนอุดหนุนการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา และคณะบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่มอบทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต ครั้งที่ 1 ประจำปี 2555 อีกด้วย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูงที่มีส่วนช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงมาได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย............ ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ............ จ

กิตติกรรมประกาศ............ ฉ

สารบัญ............ ช

สารบัญตาราง............ ญ

สารบัญรูป............ ฎ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ............ ฒ

บทที่ 1 บทนำ............ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา............ 1

1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา............ 1

1.3 ขอบเขตของการศึกษา............ 1

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา............ 2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ............ 2

1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์............ 3

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง............ 4

2.1 พลังงานแสงอาทิตย์, รังสีจากดวงอาทิตย์, ระบบติดตามดวงอาทิตย์............ 4

2.2 ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย............ 7

2.3 เทคโนโลยีเกี่ยวกับการนำพลังงานแสงอาทิตย์ไปใช้ประโยชน์............ 9

2.3.1 ระบบรางพาราโบลา............ 10

2.3.2 ระบบหอคอย............ 10

2.3.3 ระบบจานพาราโบลา............ 11

2.3.4 เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตความร้อน............ 12

.

หน้า

2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสะท้อนแสงบนผิวโค้ง........................... 18
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.. 19
บทที่ 3 แนวคิดและการออกแบบ.. **23**
3.1 แนวคิดที่ใช้ในการออกแบบ.. 23
3.2 การออกแบบแผงรับแสง.. 24
3.2.1 ภาพจำลองการสะท้อนแสงและการรวมแสงทางคณิตศาสตร์................ 25
3.2.2 การออกแบบแผงรับแสงโดยใช้เงื่อนไขการปรับมุมมององศาที่แตกต่าง... 36
3.2.3 แนวในการวางแผ่นดูดซับแสงในท่อแก้วสุญญากาศแบบฮีตไปป์.......... 41
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการต่อเข้ากับระบบเพื่อหาประสิทธิภาพของแผงรับแสงที่ออกแบบ.. 42
3.3.1 แผงรับแสงที่ออกแบบ.. 43
3.3.2 ระบบถ่ายเทความร้อน.. 43
3.3.3 หลอดแก้วฮีตไปป์... 44
3.3.4 ของไหลที่ใช้ในระบบ.. 45
3.3.5 ปั๊มน้ำมันร้อน.. 46
3.3.6 ตัวตรวจวัดอุณหภูมิ... 47
3.3.7 Variable Frequency Drive(VFD).. 47
3.3.8 เครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าแบบบันทึกได้(Data Logger).......................... 48
3.3.9 เซลล์แสงอาทิตย์... 48
3.3.10 มัลติมิเตอร์แบบดิจิตอล... 49
3.3.11หลอดไฟแบบฮาโลเจน.. 49
3.3.12 ลักซ์มิเตอร์แบบดิจิตอล... 50
บทที่ 4 การหาประสิทธิภาพของแผงรับแสงที่ออกแบบ................................ **51**
4.1 แบบจำลองทางกายภาพของแผงรับแสง... 51
4.2 ทดสอบประสิทธิภาพของแผงรับแสงรางพาราโบลาที่ออกแบบ...................... 52
4.2.1 ทดสอบประสิทธิภาพของรางพาราโบลาที่ออกแบบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ 52
4.2.2 ทดสอบประสิทธิภาพของรางพาราโบลาที่ออกแบบเชิงกลน์............... 60

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ... 66
5.1 สรุปผลการศึกษา.. 66
5.2 ข้อเสนอแนะ.. 68
รายการอ้างอิง.. 69
ภาคผนวก... 70
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณหาประสิทธิภาพใช้ข้อมูล
วันที่ 7-10 ธันวาคม2554... 71
ภาคผนวก ข ข้อมูลดิบ ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม
และอุณหภูมิน้ำมัน.. 75
ภาคผนวก ค อุปกรณ์และโปรแกรมที่อ้างอิงถึงในงานวิจัย………………………... 80
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.. 91

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 แสดงชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์…………………………………………………. 13
ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ และประสิทธิภาพของแผงที่ประกอบจากเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิด…………………………………... 14
ตารางที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการออกแบบรางรับแสงแบบรางพาราโบลาจากสมการ $y = 4x^2$ มาเป็นรางรับแสงแบบรางพาราโบลาผสม(CPC)……………………………….. 26
ตารางที่ 3.2 แสดงขั้นตอนการออกแบบรางรับแสงแบบรางพาราโบลาจากสมการ $y = 9x^2$ มาเป็นรางรับแสงแบบรางพาราโบลาผสม(CPC)……………………………….. 28
ตารางที่ 3.3 แสดงขั้นตอนการออกแบบรางรับแสงแบบรางพาราโบลาจากสมการ $y = 16x^2$ มาเป็นรางรับแสงแบบรางพาราโบลาผสม(CPC)……………………………….. 29
ตารางที่ 3.4 แสดงการหาประสิทธิภาพอย่างง่ายของแผงรับแสงที่ออกแบบจากสมการ $y = 4x^2$, $y = 9x^2$, $y = 16x^2$…………………………………………………... 31
ตารางที่ 3.5 แสดงการปรับมุมของรางพาราโบลาเข้าหากัน……………........................... 36
ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติของน้ำมัน Thermoil 32.. 46
ตารางที่ 3.7 เปรียบเทียบคุณสมบัติของเซนเซอร์แบบเทอร์โมคอปเปิลและอาร์ทีดี …………..... 47
ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบแนวแสงที่เกิดจากการทดลองเมื่อใช้หลอดฮาโลเจน 1 หลอด และ 2 หลอดในการทดลอง…………………………..………………. 57

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงอัตราส่วนและปริมาณของแสงอาทิตย์ในชั้นบรรยากาศโลก........................ 4
รูปที่ 2.2 แสดงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงรังสีดวงอาทิตย์เมื่อเข้าสู่บรรยากาศโลก
และพื้น โลก เทียบกับรังสีเหนือบรรยากาศ.. 5
รูปที่ 2.3 การแบ่งเส้นศูนย์สูตรของโลก... 5
รูปที่ 2.4 สเปกตรัมรังสีอาทิตย์.. 6
รูปที่ 2.5 แสดงความแตกต่างระหว่างรังสีรวมของการวัดแบบพื้นราบกับระบบติดตามดวง
อาทิตย์ในวันที่ท้องฟ้าโปร่ง ที่ละติจูด 50 องศา... 6
รูปที่ 2.6 แผนที่แสดงศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทยปี พ.ศ. 2542................... 7
รูปที่ 2.7 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณรังสีของแสงอาทิตย์ในประเทศต่างๆกับประเทศไทย... 8
รูปที่ 2.8 แสดงค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยรายเดือน โดยเฉลี่ยทุกพื้นที่ทั่วประเทศไทย... 9
รูปที่ 2.9 รูปแบบและหลักการทำงานของระบบแบบรางพาราโบลา..................................... 10
รูปที่ 2.10 แสดงรูปแบบและหลักการทำงานของระบบแบบหอคอย................................ 11
รูปที่ 2.11 แสดงรูปแบบและหลักการทำงานของระบบแบบจานพาราโบลา..............................11
รูปที่ 2.12 แสดงแผงรับแสงอาทิตย์ชนิดแบบแผ่นเรียบ(ซ้าย)และแบบหลอดแก้วสุญญากาศ
(ขวา).. 12
รูปที่ 2.13 แสดงระบบผลิตน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์แบบผสมผสาน..12
รูปที่ 2.14 แสดงหลักการทำงานทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์..15
รูปที่ 2.15 กราฟกระแสและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์(I-V Curve)........................... 16
รูปที่ 2.16 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของค่ารังสีดวงอาทิตย์กับค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้า.... 17
รูปที่ 2.17 กราฟกระแสและแรงดันที่อุณหภูมิและความเข้มแสงค่าต่างๆ........................... 17
รูปที่ 2.18 แสดงการสะท้อนแสงบนผิวพาราโบลา.. 18
รูปที่ 2.19 แสดงการรับแสงของแผงรับแสงอาทิตย์ที่ออกแบบ(ด้านซ้าย) กับแผงรับแสงแบบ
รางพาราโบลาทั่วไป(ด้านขวา).. 19

หน้า

รูปที่ 2.20 แสดงเปอร์เซ็นต์ในการรับแสงของแผงรับแสงอาทิตย์ที่ออกแบบไว้(ด้านซ้าย)กับแผงรับแสงแบบท่อแก้วสุญญากาศ(ด้านขวา) โดยระยะห่างระหว่างท่อแก้ว 7 ซม. โดยอ้างอิงจากผลิตภัณฑ์แผงรับแสงอาทิตย์... 19
รูปที่ 2.21 แสดงการสะท้อนของรังสีตกกระทบในทิศทางต่างๆของแผงรับแสงอาทิตย์ที่ออกแบบไว้สามารถรับรังสีที่ทำมุมได้ในช่วง 60 องศา (ด้านซ้าย) กับแผงรับแสงแบบรางพาราโบลาทั่วไป(ด้านขวา).. 20
รูปที่ 2.22 แสดงต้นแบบแผงรับแสงแบบรางพาราโบลาที่ไม่ต้องใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์(แผงรับแสงที่ออกแบบ)…………………………………………………………… 21
รูปที่ 2.23 แสดงชุดหุงต้มพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์…………………………........... 21
รูปที่ 3.1 แสดงการปรับมุมเข้าหากันของรางพาราโบลาแบบผสม(CPC)……………………… 25
รูปที่ 3.2 แสดงการปรับมุมที่อ้างอิงถึงในการออกแบบ………………………………………… 25
รูปที่ 3.3 แผงรับแสงที่ออกแบบโดยที่กำหนดค่า a=4 สมการพาราโบลา $y = 4x^2$…………… 26
รูปที่ 3.4 แผงรับแสงที่ออกแบบจากรูปที่ 3.3 มาปรับเข้าหากันเพื่อให้ได้แผงรับแสงรางพาราโบลาแบบผสม(CPC)... 27
รูปที่ 3.5 แผงรับแสงที่ออกแบบโดยที่กำหนดค่า a=9 สมการพาราโบลา $y = 9x^2$.................... 27
รูปที่ 3.6 แผงรับแสงที่ออกแบบจากรูปที่ 3.5 มาปรับเข้าหากันเพื่อให้ได้แผงรับแสงรางพาราโบลาแบบผสม(CPC)……………………………………………………… 28
รูปที่ 3.7 แผงรับแสงที่ออกแบบโดยที่กำหนดค่า a=16 สมการพาราโบลา $y = 16x^2$................ 29
รูปที่ 3.8 แผงรับแสงที่ออกแบบจากรูปที่ 3.7 มาปรับเข้าหากันเพื่อให้ได้แผงรับแสงรางพาราโบลาแบบผสม(CPC).. 30
รูปที่ 3.9 แสดงจุดที่แสงตกกระทบรางพาราโบลาแบบผสมแล้วสะท้อนเข้าหลอดรับแสงของรางพาราโบลาสมการ $y = 4x^2$………………………………………………… 32
รูปที่ 3.10 แสดงแสงที่ตกกระทบแผงรับแสงรางพาราโบลา(บน) และแผงรับแสงรางพาราโบลาแบบผสม(ล่าง) เมื่อกำหนด w = 0.05... 33
รูปที่ 3.11 แสดงแสงที่ตกกระทบแผงรับแสงรางพาราโบลา(บน) และแผงรับแสงรางพาราโบลาแบบผสม(ล่าง) เมื่อกำหนด w = 0.10…………………………………………….. 34
รูปที่ 3.12 แสดงแสงที่ตกกระทบแผงรับแสงรางพาราโบลา(บน) และแผงรับแสงรางพาราโบลาแบบผสม(ล่าง) เมื่อกำหนด w = 0.15.. 35

หน้า

รูปที่ 3.13 แสดงแบบจำลองที่สร้างตามการออกแบบให้มีมุมหุบ 5 องศา โดยใช้วัสดุ
อะลูมิเนียมในการขึ้นโครงร่าง... 38
รูปที่ 3.14 แสดงแบบจำลองที่สร้างตามการออกแบบให้มีมุมหุบ 10 องศา โดยใช้วัสดุ
อะลูมิเนียมในการขึ้นโครงร่าง... 39
รูปที่ 3.15 แสดงแบบจำลองที่สร้างตามการออกแบบให้มีมุมหุบ 15 องศา โดยใช้วัสดุ
อะลูมิเนียมในการขึ้นโครงร่าง... 40
รูปที่ 3.16 แสดงการวางแผ่นดูดซับแสงในท่อแก้วสุญญากาศแบบฮีตไปป์............................ 41
รูปที่ 3.17 แสดงแผงผังของระบบ(ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของแผงรับแสง).................. 42
รูปที่ 3.18 แสดงระบบที่ต่อใช้งานจริง ตามแผนผัง... 42
รูปที่ 3.19 แผงรับแสงแบบรางพาราโบลาแบบผสม(CPC) ที่เสร็จสมบูรณ์ ซึ่งมาจากการ
ออกแบบสมการพาราโบลา $y = 9x^2$, ความกว้าง(W = 0.15) โดยปรับมุมจากพื้น
ระดับ 15 องศา.. 43
รูปที่3.20 แสดงชุดท่อทองแดงซึ่งจะเป็นตัวถ่ายเทความร้อนไปยังน้ำมันในระบบ.............. 44
รูปที่ 3.21 แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับหลอดแก้วฮีตไปป์ที่ใช้งาน................................ 44
รูปที่ 3.22 แสดงวัฏจักรการหมุนเวียนภายในของฮีทไปป์... 44
รูปที่ 3.23 แสดงการพาความร้อนเข้าไปยังหลอดแก้ว(ซ้าย) หลอดแก้วฮีตไปป์ที่ใช้ในงานวิจัย
(ขวา)... 45
รูปที่3.24 ปั้มน้ำมันร้อนยี่ห้อ มิซูบิชิ รุ่น SF-JR....................................... 46
รูปที่ 3.25 ตัวตรวจวัดอุณหภูมิ หรือเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง.................................. 46
รูปที่ 3.26 Variable Frequency Drive (VFD) ยี่ห้อ SIEMENS รุ่น SED2....................... 48
รูปที่ 3.27 Data Logger ยี่ห้อ Hioki รุ่น LR8400-2.. 47
รูปที่ 3.28 แผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลอง... 48
รูปที่ 3.29 มัลติมิเตอร์แบบดิจิตอล.. 49
รูปที่ 3.30 หลอดฮาโลเจน... 48
รูปที่ 3.31 ลักซ์มิเตอร์แบบดิจิตอล (Digital Lux Meter).. 50
รูปที่ 4.1 แสดงการสะท้อนแสงของแบบจำลองทางกายภาพรางพาราโบลาแบบผสมอย่าง
ง่าย(ขวา) และภาพจำลองทางคณิตศาสตร์(ซ้าย)...................................... 51

หน้า

รูปที่ 4.2 แสดงทิศทางการปรับมุมของหลอดไฟฮาโลเจนที่ใช้ในการทดลองหาประสิทธิภาพ
เชิงแสง.. 52
รูปที่ 4.3 แสดงรูปแบบการทดลอง.. 53
รูปที่ 4.4 แสดงตัวอย่างทิศทางแสงของหลอดฮาโลเจนเมื่อทำมุม 45 องศากับแผงรับแสง....... 54
รูปที่ 4.5 แสดงตัวอย่างทิศทางแสงของหลอดฮาโลเจนเมื่อทำมุม 90 องศากับแผงรับแสง....... 54
รูปที่ 4.6 แสดงแบบจำลองรูปแผงรับแสงออกแบบปรับมุม 10 องศา เพื่อใช้ในการทดลอง....... 55
รูปที่ 4.7 แสดงแบบจำลองรูปแผงรับแสงออกแบบปรับมุม 15 องศา เพื่อใช้ในการทดลอง....... 55
รูปที่ 4.8 แสดงการต่อสายไฟจากแผงโซล่าเซลล์เพื่อใช้วัดค่ากระแสและแรงดันในการทดลอง... 55
รูปที่ 4.9 แสดงแนวของแสงที่เกิดจากการทดลองจริง.. 56
รูปที่ 4.10 แสดงตัวอย่างการทดลองจริง... 56
รูปที่ 4.11 แสดงการวางแผ่นโซล่าเซลล์ในแบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ทดลอง..................... 57
รูปที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ได้จากแผงโซล่าเซลล์กับกำลังไฟฟ้าที่ได้จากราง
พาราโบลาแบบผสมที่ปรับมุม 15 องศา.. 58
รูปที่ 4.13 แสดงประสิทธิภาพของแผงรับแสงที่ออกแบบปรับมุม 15 องศาจากแนวระดับ
เมื่อทดลองโดยใช้หลอดฮาโลเจน 1 หลอด ณ ช่วงเวลา ต่างๆ......................... 58
รูปที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผงรับแสงที่ออกแบบปรับมุม 15 องศาจาก
การทดลองและการออกแบบ.. 59
รูปที่ 4.15 ความเข้มแสงเฉลี่ยในวันที่ 7-10 ธันวาคม 2554 61
รูปที่ 4.16 อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยในวันที่ 7-10 ธันวาคม 2554.................................. 61
รูปที่ 4.17 อุณหภูมิของหลอดรับแสงเฉลี่ย(หลอดที่1)ในวันที่ 7-10 ธันวาคม 2554............... 62
รูปที่ 4.18 อุณหภูมิของหลอดรับแสงเฉลี่ย (หลอดที่2)ในวันที่ 7-10 ธันวาคม 2554.............. 62
รูปที่ 4.19 อุณหภูมิของหลอดรับแสงเฉลี่ย (หลอดที่3)ในวันที่ 7-10 ธันวาคม 2554.............. 63
รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบอุณหภูมิของหลอดรับแสงเฉลี่ยทั้ง 3 หลอดในวันที่ 7-10 ธันวาคม 2554.63
รูปที่ 4.21 อุณหภูมิของหลอดรับแสงเฉลี่ยรวมทั้ง 3 หลอดในวันที่ 7-10 ธันวาคม 2554..........64
รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของหลอดรับแสงและอุณหภูมิเฉลี่ยของสิ่งแวดล้อม
รวมทั้ง 3 หลอดในวันที่ 7-10 ธันวาคม 2554..64
รูปที่ 4.23 ประสิทธิภาพเฉลี่ยของแผงรับแสงจากการเก็บข้อมูลในวันที่ 7-10 ธันวาคม 2554... 65
รูปที่ 4.24 ประสิทธิภาพของแผงรับแสงเฉลี่ยเมื่อ plot ค่าทุกๆ 30 นาที.......................... 66

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$\dot{m}$	=	อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)
C_p	=	ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (J/kg-K)
T_{in}	=	อุณหภูมิน้ำเข้าแผง (^{o}C)
T_{out}	=	อุณหภูมิน้ำออกจากแผง (^{o}C)
A_p	=	พื้นที่แผง PV/T (m^2)
G	=	ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ (W/m^2)
P	=	กำลังไฟฟ้า(w)
I	=	กระแสไฟฟ้า (A)
V	=	แรงดันไฟฟ้า (V)
t	=	เวลา (hr)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานแสงอาทิตย์จัดเป็นพลังงานหมุนเวียนที่สะอาดไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ในประเทศไทยมีการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ในการผลิตไฟฟ้าและพลังงานความร้อน เทคโนโลยีที่นำมาใช้มีหลายประเภท เทคโนโลยีแบบรางพาราโบลา(Parabolic Trough) นั้นจัดอยู่ในประเภทของเทคโนโลยีConcentrating Solar Power(CSP)ซึ่งก็คือการผลิตไฟฟ้าด้วยระบบรวมแสงอาทิตย์ การใช้ประโยชน์จากเทคโนโลยี แบบรางพาราโบลา(Parabolic Trough) นั้นยังไม่ค่อยเห็นผลเป็นรูปธรรมเท่าที่ควรในประประเทศไทย ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมเชิงแสงและความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาแบบผสมที่ไม่ต้องอาศัยระบบติดตามดวงอาทิตย์ อุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้จากแผงที่ออกแบบ 105 องศา อันเหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศคือมีแดดจัดและภูมิประเทศอยู่ในเขตศูนย์สูตรซึ่งมีความชื้นสูงในอากาศ เมื่อมีความชื้นในอากาศก็จะส่งผลให้รังสีของดวงอาทิตย์ที่ส่องลงมาเกิดเป็นรังสีกระจายมากกว่ารังสีตรง แผงรับแสงที่ออกแบบมีมุมในการรับแสง 80 องศาเพื่อให้รองรับกับสภาพภูมิอากาศและภูมิประเทศ

โดยงานวิจัยมุ่งเน้นศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมเชิงแสงและความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาแบบผสม(CPC)[5-7]ที่ไม่ต้องอาศัยระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่สามารถทำอุณหภูมิสูงกว่าผลิตภัณฑ์แผงรับแสงอาทิตย์ที่มีอยู่ทั่วไป การออกแบบโดยไม่ต้องอาศัยระบบติดตามดวงอาทิตย์ก็เพื่อลดปัญหาในเรื่องดูแลรักษา ความเสื่อมของอุปกรณ์ นอกจากนี้อาจนำไปประยุกต์ใช้งานในการทำความร้อนในโรงงานอุตสาหกรรมหรือหน่วยทำความเย็น

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1) เพื่อออกแบบและทดสอบรางพาราโบลาแบบผสม(CPC)ที่ไม่ต้องอาศัยระบบติดตามดวงอาทิตย์ และมีคุณสมบัติในการรับรังสีกระจายได้ดี
2) สร้างต้นแบบแผงรับแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาแบบผสม(CPC)ที่ไม่ต้องอาศัยระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่สามารถทำอุณหภูมิสูงกว่าผลิตภัณฑ์แผงรับแสงอาทิตย์ที่มีอยู่ทั่วไป

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1) ออกแบบแผงรับแสงอาทิตย์โดยใช้ท่อแก้วสุญญากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ความยาว 2 เมตร 16 เซนติเมตร
2) ออกแบบแผงรับแสงอาทิตย์จากสมการพาราโบลา $y = ax^2$ เมื่อ a เป็นค่าคงที่ โดยกำหนดค่า a=4,9,16 เพื่อให้มีสมบัติในการรับรังสีตรงและรังสีกระจายได้ดี

3) เมื่อได้สมการพาราโบลาจากในข้อสอง ออกแบบศึกษาหาความกว้างของรางโดยปรับค่า w = 0.05,0.10,0.15
4) นำสมการพาราโบลาในข้อสอง ปรับความกว้างตามข้อสาม มาปรับมุมเข้าหากันเพื่อให้ได้รูปแบบรางพาราโบลาแบบผสม(Compound Parabolic Concentrator : CPC)

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา

องค์ประกอบของการศึกษาประกอบไปด้วย

1. ศึกษาข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและทฤษฎีที่เกี่ยวกับแสงอาทิตย์ เทคโนโลยีของแผงรับแสงอาทิตย์ในรูปแบบต่างๆ การรวมแสงและการสะท้อนแสงของรางพาราโบลา
2. ศึกษาโปรแกรมและเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบ ซึ่งโปรแกรมที่ใช้ก็คือ Wolfram Mathematica โดยมีการประยุกต์ใช้สมการทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบ
3. ทำการออกแบบโดยเน้นรางพาราโบลาแบบผสมที่สามารถรับรังสีกระจายได้ดีในทุกช่วงเวลา เงื่อนไขในการออกแบบ ศึกษาความกว้างของราง มุมกวาดในการรับรังสี เพื่อหาความเหมาะสมในการใช้งานจริง โดยผลการออกแบบจะแสดงเป็นภาพจำลองทางคณิตศาสตร์
4. วิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์จากเงื่อนไขในการออกแบบเบื้องต้น โดยหาประสิทธิภาพในเชิงแสง และทำการทดสอบกับระบบจริงเพื่อหาประสิทธิภาพในเชิงกลดูความสอดคล้องของการออกแบบ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ได้ต้นแบบแผงรับแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาแบบผสมที่ไม่ต้องอาศัยระบบติดตามดวงอาทิตย์ ซึ่งสามารถทำอุณหภูมิได้สูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่มีอยู่เดิม

2) ได้ต้นแบบแผงรับแสงอาทิตย์ที่มีคุณสมบัติในการรับรังสีกระจายได้ดีซึ่งเหมาะกับสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยที่มีปริมาณรังสีกระจายในระดับสูง

3) สามารถนำแผงรับแสงที่ออกแบบไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการทำความร้อนของหม้อน้ำในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ หรือใช้สำหรับหน่วยทำความเย็น

4) สามารถนำแผงรับแสงที่ออกแบบใหม่ไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีด้านพลังงานแสงอาทิตย์ให้เหมาะสมกับประเทศไทย

1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

โครงสร้างวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบไปด้วย 5 บทหลักคือ บทนำ ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง แนวคิดและการออกแบบ การหาประสิทธิภาพของแผงรับแสงที่ออกแบบ สรุปผลของการศึกษาและข้อเสนอแนะ

ในบทแรกจะกล่าวถึง ประวัติความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา ขอบเขตของการศึกษา ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ โครงสร้างของวิทยานิพนธ์ บทที่สอง กล่าวถึงแนวคิดและทฤษฎี ศักยภาพของพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการนำพลังงานแสงอาทิตย์ไปใช้ประโยชน์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสะท้อนแสงบนผิวโค้ง งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง บทที่สาม อธิบายถึงแนวคิดที่ใช้ในการออกแบบ อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย การออกแบบ บทที่สี่ อธิบายการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ และบทสุดท้ายคือบทที่ห้า จะกล่าวสรุปผลการศึกษาที่ได้จากงานวิจัย ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาสำหรับงานวิจัย

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

2.1.1พลังงานแสงอาทิตย์

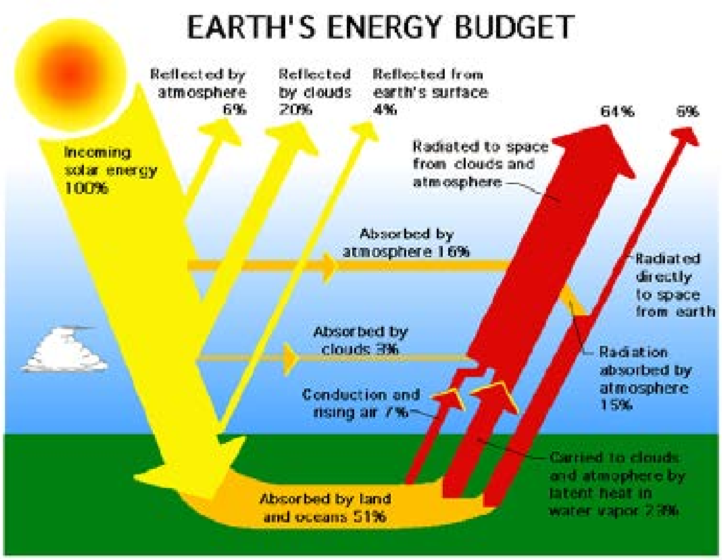
แสงอาทิตย์เคลื่อนที่มาสู่โลก ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งสามารถมารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (visible light) และไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เมื่อเคลื่อนที่เข้าสู่ชั้นบรรยากาศของโลกซึ่งประกอบไปด้วยอะตอมของก๊าซ ไอน้ำ เมฆ และฝุ่นละอองต่างๆ เมื่อเคลื่อนที่เข้ามาก็จะเกิดการชนกับสิ่งเหล่านี้ ทำให้เกิดการกระจัดกระจายของแสง บางส่วนจะถูกชั้นบรรยากาศและเมฆดูดซับไว้ บางส่วนก็จะสะท้อนกลับสู่อวกาศ คิดเป็นปริมาณแสงอาทิตย์ที่เคลื่อนสู่ผิวโลก ประมาณร้อยละ 51 สะท้อนกลับสู่บรรยากาศร้อยละ 30

จากข้อมูลดังกล่าว สามารถนำมาจำแนกแสงอาทิตย์ที่ผ่านชั้นบรรยากาศของโลกได้ 3 ประเภทคือ

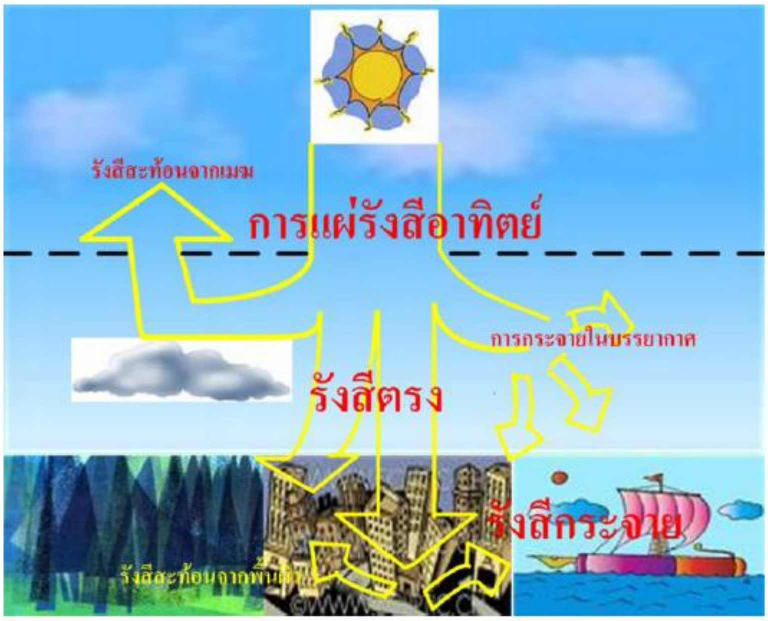
1.รังสีตรง(direct radiation หรือ beam radiation) เป็นรังสีที่มีความเข้มของแสงสูง เนื่องจากไม่ผ่านการชนกับอนุภาคต่างๆในชั้นบรรยากาศ เป็นรังสีที่เหมาะกับอุปกรณ์ที่ต้องรวมแสง(concentrator)

2.รังสีกระจาย(diffuse radiation หรือ scattered radiation) ค่าความเข้มของแสงจะน้อยกว่ารังสีตรงมาก เนื่องจากเกิดการชนกับอนุภาคต่างๆในชั้นบรรยากาศ เหมาะกับอุปกรณ์ที่ไม่ต้องการความเข้มแสงสูง เช่น ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น

3.รังสีรวม(Global solar radiation) ผลรวมของรังสีตรงและรังสีกระจาย

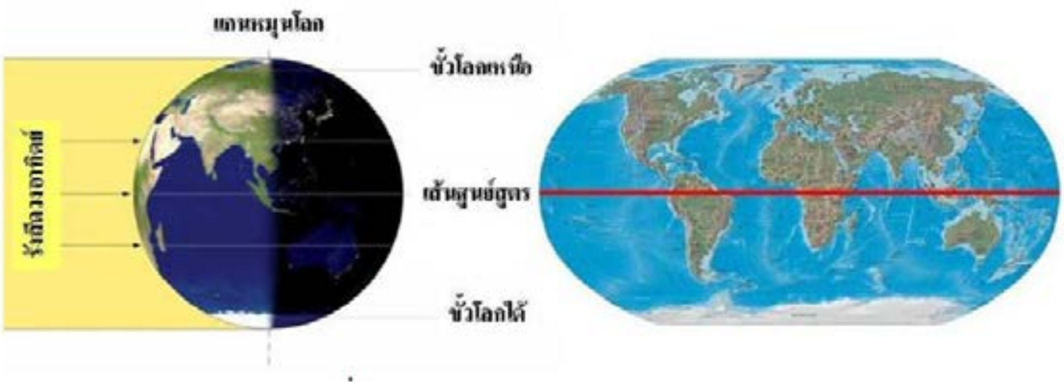


รูปที่ 2.1 แสดงอัตราส่วนและปริมาณของแสงอาทิตย์ในชั้นบรรยากาศโลก



รูปที่ 2.2 แสดงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงรังสีดวงอาทิตย์เมื่อเข้าสู่บรรยากาศโลกและพื้นโลกเทียบกับรังสีเหนือบรรยากาศ(ข้อมูลจากกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน)[1]

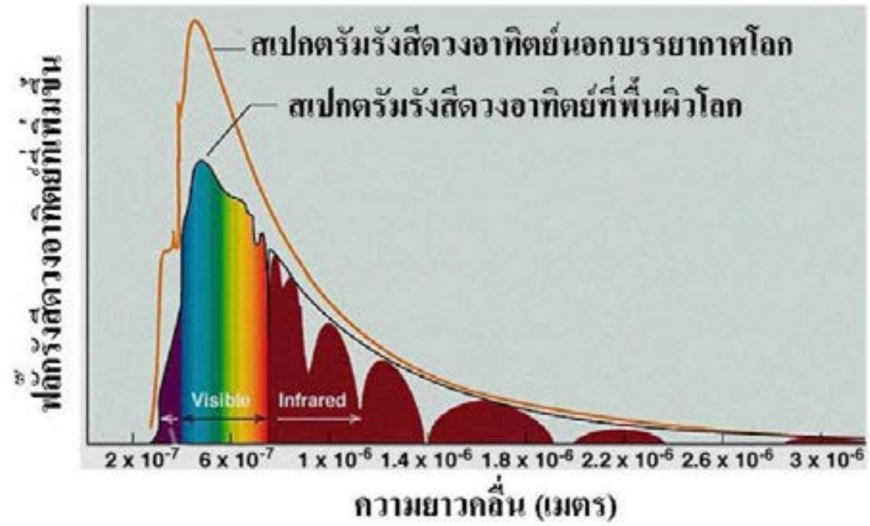
รังสีจากดวงอาทิตย์ที่นำมาใช้ประโยชน์สามารถทราบค่าในรูปความเข้มรังสีอาทิตย์หน่วยเป็นวัตต์/ตารางเมตร รวมถึงตำแหน่งบนพื้นโลกรังสีอาทิตย์ประกอบด้วยสเปกตรัมในช่วงความคลื่น 0.3 ถึง 3 ไมโครเมตร แสงอาทิตย์แต่ละชนิดสามารถตอบสนองต่อสเปกตรัมได้แตกต่างกัน ดังนั้นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าต่างกัน ดังนั้นในการออกระบบ การใช้งานและการบำรุงรักษาจึงมีความจำเป็นต้องทราบเกี่ยวกับค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ในพื้นที่นั้น



รูปที่ 2.3 การแบ่งเส้นศูนย์สูตรของโลก (ข้อมูลจากกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน)[1]

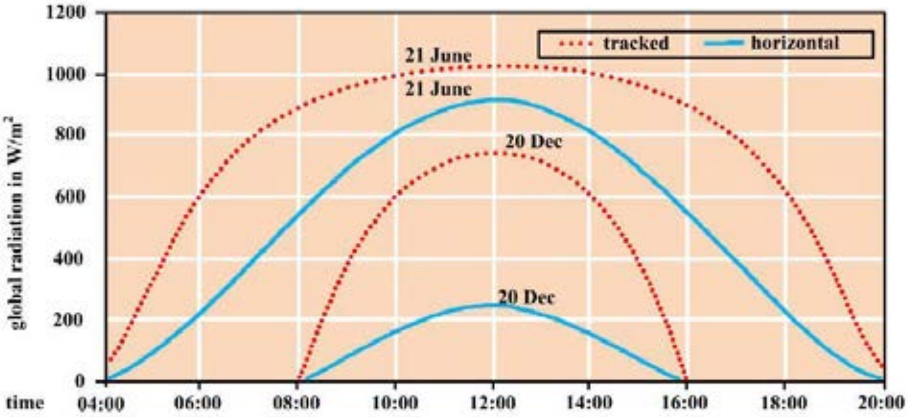
รังสีอาทิตย์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แสดงในรูปของสเปกตรัม ที่พื้นผิวโลกมีความเข้มรังสีน้อยกว่านอกชั้นบรรยากาศ เนื่องจากพอรังสีอาทิตย์ผ่านชั้นบรรยากาศโลกจะเกิดการดูดกลืน

กระจายแสง และสะท้อนแสง สเปกตรัมรังสีอาทิตย์ประกอบด้วย อัตราไวโอเลตซึ่งมีความยาวคลื่นน้อยกว่า 380 นาโนเมตร แสงขาวหรือแสงที่มองเห็นด้วยตาเปล่ามีความยาวคลื่น 380-700 นาโนเมตร และอินฟราเรดมีความยาวคลื่นมากกว่า 700 นาโนเมตร แยกเป็น 7 สีเรียงลำดับจากความยาวคลื่นน้อยไปหามาก ดังนี้ ม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง แสด และแดง



รูปที่ 2.4 สเปกตรัมรังสีอาทิตย์(ข้อมูลจากกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน)[2]

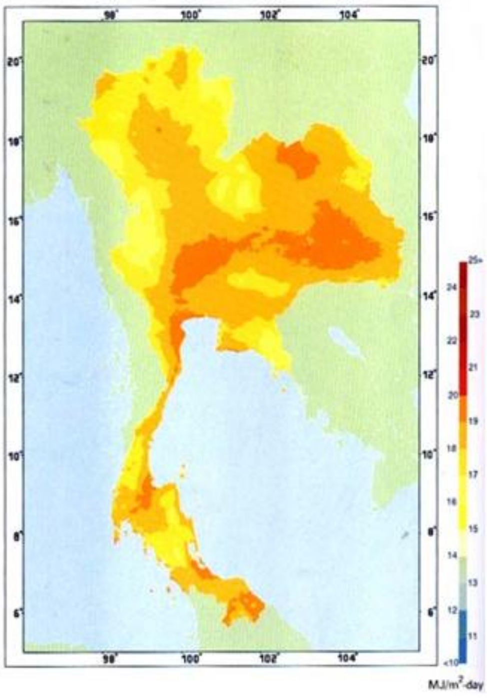
ระบบติดตามดวงอาทิตย์ เป็นเทคนิคที่นำมาใช้เพื่อให้อุปกรณ์รับแสงได้รับรังสีตรงเพิ่มมากขึ้น ตลอดทั้งวัน ในรูปที่(2.5) แสดงผลในฤดูร้อนเมื่อมีระบบติดตามดวงอาทิตย์ รับรังสีตรงได้เพิ่มขึ้น 50%เทียบกับการวัดแบบพื้นราบ สำหรับในประเทศไทยนั้น มีประมาณรังสีกระจายค่อนข้างมาก ดังนั้นการใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์ อาจไม่ได้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้ระบบมากนัก



รูปที่ 2.5 แสดงความแตกต่างระหว่างรังสีรวมของการวัดแบบพื้นราบกับระบบติดตามดวงอาทิตย์ในวันที่ท้องฟ้าโปร่ง ที่ละติจูด 50 องศา (ข้อมูลจากกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน)[1]

2.2 ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร[3] ได้ทำแผนที่แสดงศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย(พ.ศ. 2542) พบว่าการกระจายความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ตามบริเวณต่างๆในแต่ละเดือนของประเทศ ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ และลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ เดือนที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดอยู่ระหว่างเดือนเมษายน และ พฤษภาคม โดยมีค่าอยู่ในช่วง 20 ถึง 24 MJ/m^2 – day พลังงานแสงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีพบว่าสูงสุดอยู่ที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือซึ่งมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 19 ถึง 20 MJ/m^2 – day จากการคำนวณรังสีรวมของดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ทั่วประเทศพบว่ามีค่า 18.2 MJ/m^2 – day ซึ่งจากผลนี้แสดงให้เห็นว่าประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง(ดังรูปที่ 2.6)



รูปที่ 2.6 แผนที่แสดงศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทยปี พ.ศ. 2542[3]

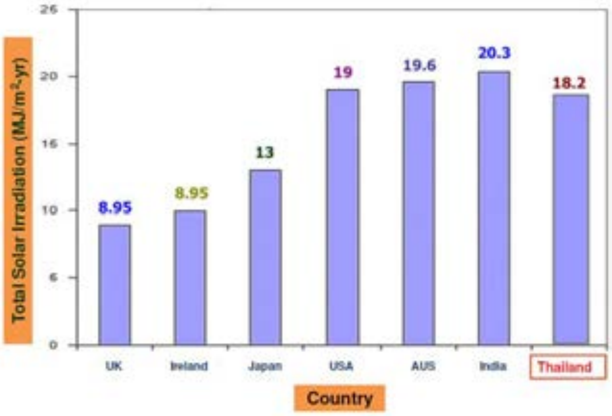
เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ซึ่งเป็นการวัดรังสีรวมของความเข้มแสง เรียกว่าไพราโนมิเตอร์ (Pyranometer) ปัจจุบันที่กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานใช้มี 2 ชนิดคือ

1) ไพราโนมิเตอร์ที่ใช้ Thermomechanical Sensor หรือ แบบ Bimetallic ซึ่งมี Sensor เป็นแถบโลหะ 2 แถบ โดยมีแถบหนึ่งเป็นสีขาว แถบนึงเป็นสีดำ หลักการทำงานก็คือ เมื่อแสงตกกระทบแถบสีดำจะดูดกลืนและขยายตัวได้มากกว่าแถบสีขาว แรงที่เกิดจากการขยายตัวจะไปขยับปากกาให้ทำการบันทึกข้อมูลลงบนกระดาษกราฟ

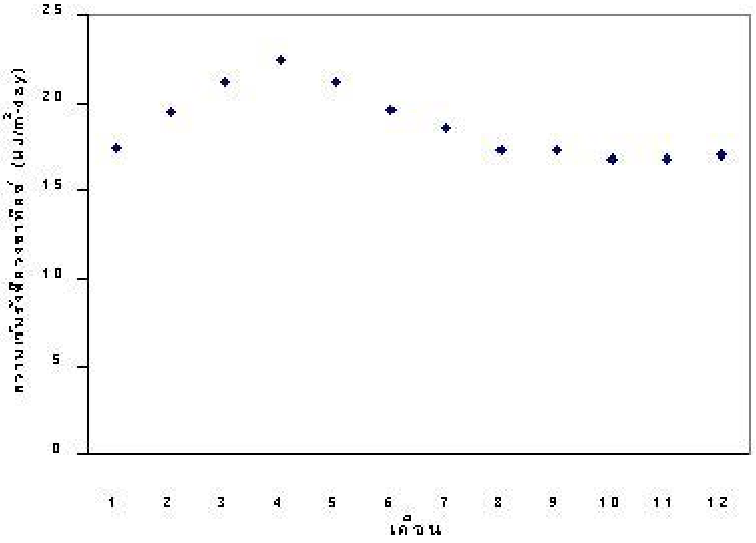
2) ไพราโนมิเตอร์ที่ใช้ Thermoelectric Sensor หรือแบบ Thermopile ซึ่งมี sensor ทำด้วยโลหะ 2 ชนิดเชื่อมปลายทั้งสองติดกัน ปลายข้างหนึ่งทำหน้าที่เป็น hot junction ส่วนอีกข้างทำหน้าที่เป็น cold junction เมื่อแสงตกกระทบก็จะเกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของทั้งสอง junction ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า(electromotive force) สามารถนำไปคำนวณความเข้มแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบได้

ปัจจุบัน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานมีสถานีวัดความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ 37 สถานีทั่วประเทศไทย โดยที่ในกรุงเทพฯตั้งอยู่ที่กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน โดยค่าพลังงานแสงอาทิตย์คิดจากรังสีรวมของดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ทั่วประเทศมีค่าเท่ากับ 18.2 MJ/m^2- day(ประมาณ 5 kWh)/m^2 –day

เมื่อเปรียบเทียบการรับรังสีของแสงในประเทศไทยกับประเทศ อังกฤษ,ไอซ์แลนด์,ญี่ปุ่น, สหรัฐอเมริกา,ออสเตรียและอินเดีย รังสีที่ประเทศไทยรับได้มีปริมาณไม่ต่างกับสหรัฐอเมริกา หรืออีกหลายๆประเทศ แต่ในทางกลับกันประเทศไทยนำประโยชน์ที่ได้จากพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ได้น้อยมาก สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากประเทศไทยตั้งอยู่บริเวณเขตศูนย์สูตรรังสีที่ได้รับจากดวงอาทิตย์จึงมีการกระจายแสงมาก



รูปที่ 2.7 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณรังสีของแสงอาทิตย์ในประเทศต่างๆกับประเทศไทย[3]



รูปที่ 2.8 แสดงค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยรายเดือน โดยเฉลี่ยทุกพื้นที่ทั่วประเทศไทย[1]

2.3 เทคโนโลยีเกี่ยวกับการนำพลังงานแสงอาทิตย์ไปใช้ประโยชน์

สำนักพัฒนาพลังงานแสงอาทิตย์ กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน[1] ได้จำแนกเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ตามประโยชน์ที่จะได้รับออกเป็น 2 รูปแบบ คือ

1. เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า
2. เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตความร้อน

เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า จำแนกออกเป็น 2 แบบคือ

1. เทคโนโลยีผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์

1.1 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV stand alone system) คือ ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระได้รับการออกแบบสำหรับใช้งานในพื้นที่ชนบทที่ไม่มีระบบจำหน่ายไฟฟ้าจาก National grid

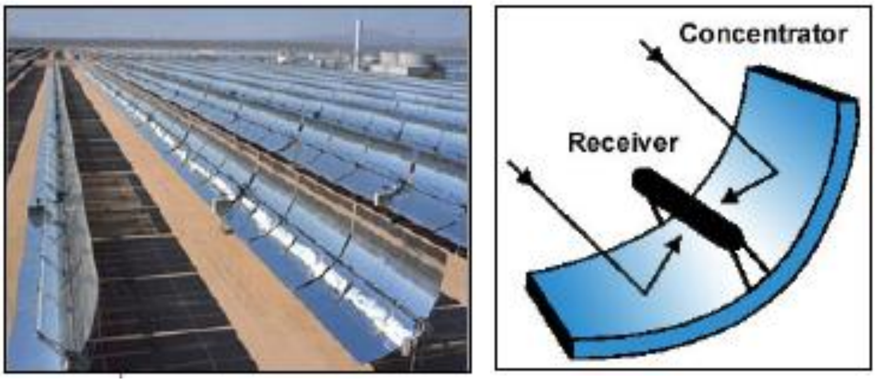
1.2 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย (PV Grid connected system) คือ ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกออกแบบสำหรับผลิตไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์เปลี่ยนกระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่ระบบจำหน่ายไฟฟ้า

1.3 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (PV Hybrid system) คือ ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกออกแบบสำหรับทำงานร่วมกับอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าอื่น ๆ เช่น ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลมและเครื่องยนต์ดีเซล ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลมและไฟฟ้าพลังน้ำ เป็นต้น

2. เทคโนโลยีผลิตไฟฟ้าด้วยระบบรวมแสงอาทิตย์ (Concentrating Solar Power) เทคโนโลยีนี้จะทำการรวมแสงไว้ที่วัตถุรับแสงโดยใช้กระจกหรือวัสดุสะท้อนแสงและหมุนตามดวงอาทิตย์เพื่อสะท้อนแสงและส่งไปยังตัวรับแสงซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงาน แบ่งออกเป็น 3 แบบคือ

2.3.1 แบบรางพาราโบลา Parabolic Troughs

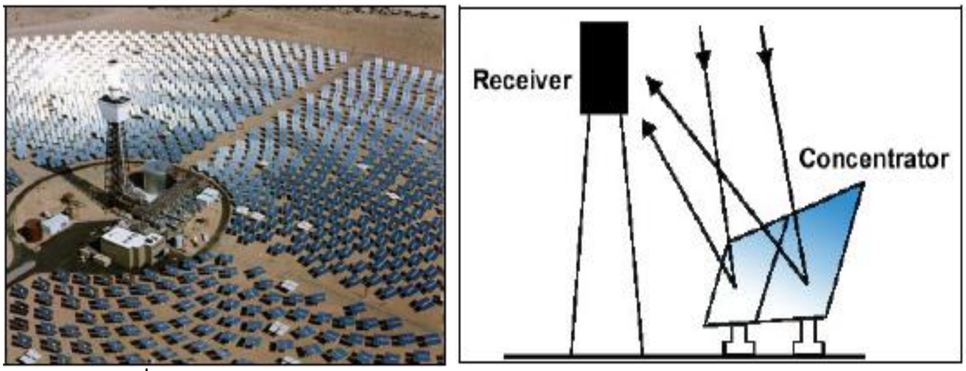
ประกอบด้วยตัวรับแสงที่มีลักษณะเป็นรางยาวโค้งแบบมิติเดียวที่ติดตั้งไว้บนระบบหมุนตามดวงอาทิตย์แกนเดียว (Single-axis tracking system) ทำหน้าที่รวมพลังงานแสงอาทิตย์สะท้อนไปยังท่อที่ตั้งขนานกับแนวรางรวมแสงเพื่อถ่ายเทความร้อนให้กับของเหลวที่ไหลหมุนเวียนผ่านท่อโดยการแลกเปลี่ยนความร้อน ความร้อนเมื่อถูกถ่ายเทให้ของเหลวทำงาน (โดยปกติจะเป็นน้ำ) จะกลายเป็นไอน้ำไปขับเคลื่อนกังหันไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ไอน้ำที่ผลิตจาก parabolic troughs plants โดยทั่วไปจะต้องมีแหล่งความร้อนจากก๊าซธรรมชาติเพื่อเสริมให้เป็นไอดง (superheater) ดังรูปที่ 2.9



รูปที่2.9 รูปแบบและหลักการทำงานของระบบแบบรางพาราโบลา[4]

2.3.2 แบบหอคอย (Central Receivers หรือ Power Tower)

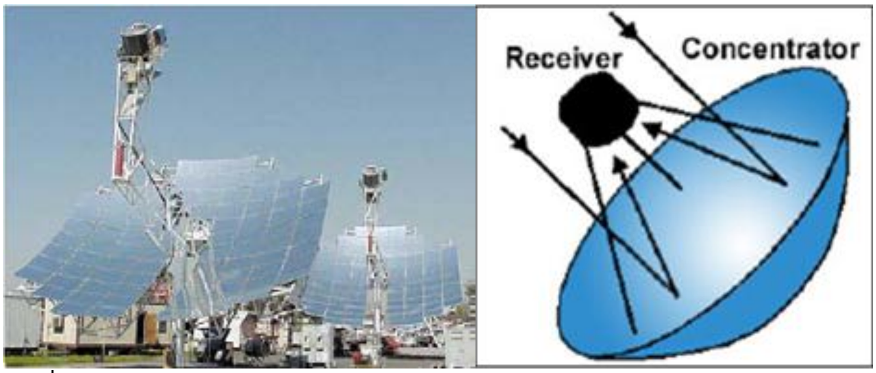
ประกอบด้วยตัวรับความร้อนที่ติดตั้งอยู่กับที่ตั้งอยู่บนหอคอยที่ล้อมรอบด้วยแผงกระจกขนาดใหญ่เป็นจำนวนมากที่เรียกกันว่า เฮลิโอสแตท จะหมุนตามดวงอาทิตย์และสะท้อนรังสีไปยังตัวรับความร้อน ซึ่งภายในบรรจุของเหลวทำงานทำหน้าที่ดูดซับพลังงานความร้อนไว้ ของเหลวที่ดูดซับพลังงานความร้อนที่รับมาจากตัวรับความร้อนจะส่งต่อไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกังหันหรือนำที่ไปเก็บไว้ในถังเก็บกักเพื่อนำมาใช้งานต่อไป (ดังรูปที่ 2.10)



รูปที่ 2.10 แสดงรูปแบบและหลักการทำงานของระบบแบบหอคอย[4]

2.3.3 แบบจานพาราโบลา (Parabolic Dishes)

ประกอบด้วยตัวรวมแสงลักษณะเป็นจานรูปทรงพาราโบลา ซึ่งมีจุดศูนย์รวมแสงเพื่อใช้สะท้อนพลังงานแสงอาทิตย์ไปยังตัวรับความร้อนที่ตั้งอยู่บนจานพาราโบลา จะใช้แผงสะท้อนที่มีลักษณะโค้งเป็นจำนวนมากซึ่งทำด้วยกระจกหรือฟิล์มบาง (Laminatedfilm) ตัวรวมแสงเหล่านี้จะตั้งอยู่บนโครงสร้างซึ่งใช้ระบบหมุนตามดวงอาทิตย์สองแกน (Two-axis tracking system) เพื่อรวมแสงให้เป็นจุดเดียวไปรวมอยู่บนตัวรับความร้อน ความร้อนที่ได้สามารถใช้ประโยชน์ได้โดยตรงกับ Cycle heat engine ซึ่งติดตั้งอยู่บนตัวรับความร้อน หรือนำความร้อนที่ได้ไปทำให้ของเหลวร้อนก่อนแล้วนำไปใช้กับ Central engine ระบบตัวรวมความร้อนแบบเน้นเป็นจุดศูนย์กลาง(parabolicdishes) มีประสิทธิภาพการแปลงเป็นความร้อนได้สูงกว่าชนิดตัวรวมแบบรางพาราโบลา (parabolic troughs) เนื่องจากสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิที่สูงกว่า(ดังรูปที่ 2.11)



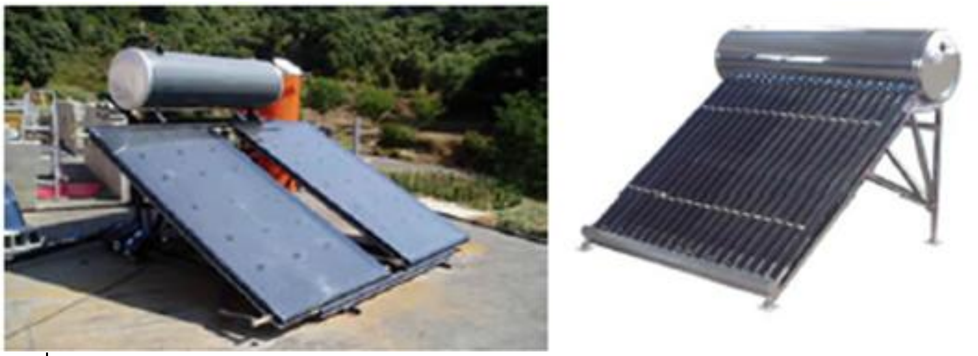
รูปที่ 2.11 แสดงรูปแบบและหลักการทำงานของระบบแบบจานพาราโบลา[4]

2.3.4 เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตความร้อน

ปัจจุบันมีการใช้งานใน 2 ลักษณะ คือ

2.3.4.1 เทคโนโลยีอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Collector)

ระบบนี้จะประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ ถังเก็บน้ำร้อนและแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์ ซึ่งปัจจุบันมีจำหน่ายในท้องตลาด 2 ชนิด คือ ชนิดแผ่นเรียบ (Flat Plate Collector) และชนิดหลอดแก้วสุญญากาศ (Evaccuum Tube Collector) ซึ่งส่วนใหญ่นำไปใช้ประโยชน์ในการทำน้ำอุ่นทำอุณหภูมิได้โดยประมาณ 60-90 องศาเซลเซียส (ดังรูปที่ 2.12)



รูปที่ 2.12 แสดงแผงรับแสงอาทิตย์ชนิดแบบแผ่นเรียบ (ซ้าย) และแบบหลอดแก้วสุญญากาศ(ขวา)[4]

2.3.4.2 ระบบผลิตน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสาน

เป็นการนำเทคโนโลยีการผลิตน้ำร้อนจากแสงอาทิตย์มาผสมผสานกับความร้อนเหลือทิ้ง เช่น ความร้อนเหลือทิ้งจากการระบายความร้อนของเครื่องปรับอากาศ จากหม้อต้มน้ำ หรือ จากปล่องท่อไอเสีย เป็นต้น โดยนำมาผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) เพื่อลดขนาดพื้นที่แผงรับรังสีความร้อน และเป็นการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างคุ้มค่า (ดังรูปที่ 2.13)

รูปที่ 2.13 แสดงระบบผลิตน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์แบบผสมผสาน[4]

2.3.5 เซลล์แสงอาทิตย์

Solar Cell หรือ PV มีชื่อเรียกหลายอย่าง เซลล์แสงอาทิตย์ เซลล์สุริยะ หรือเซลล์ Phatovoltaic ซึ่งแยกออกเป็นคำว่า Photo ที่หมายถึงแสง และคำว่า Volt ที่หมายถึง แรงดันไฟฟ้า ซึ่งรวมแล้วมีความหมายว่า กระบวนการผลิตไฟฟ้าจากการตกกระทบของแสง บนวัตถุที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง

ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์ แบ่งเป็น 3 ชนิด ตามวัสดุที่ใช้คือ

ตารางที่2.1 แสดงชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์[15]

Single Crystalline Silicon Solar Cell	PolyCrystalline Solar Cell	Amorphous Silicon Solar Cell

1. เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอน ชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystalline Silicon Solar Cell) หรือ Monocrystalline Silicon Solar Cell และชนิดผลึกรวม (Polycrystalline Silicon Solar Cell) ลักษณะเป็นแผ่นซิลิคอนแข็งและบางมาก

2. เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากอะมอร์ฟัสซิลิคอน(Amorphous Silicon Solar Cell) ลักษณะเป็นฟิล์มบางเพียง 0.5 ไมครอน น้ำหนักเบามาก ประสิทธิภาพเพียง 5-10%

3. เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำอื่นๆ เช่น แกลเลียม อาร์เซไนด์ แคดเมียม เทลเลอไรด์ และ คอปเปอร์ อินเดียม ไดเซเลไนด์ เป็นต้น มีทั้งชนิดผลึกเดี่ยว(Single Crystalline) และผนึกรวม(Polycrystalline) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากแกลเลียมเดี่ยว อาร์เซไนด์ ทำให้ประสิทธิภาพสูงถึง 20-25%

เซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิดมีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่2.2

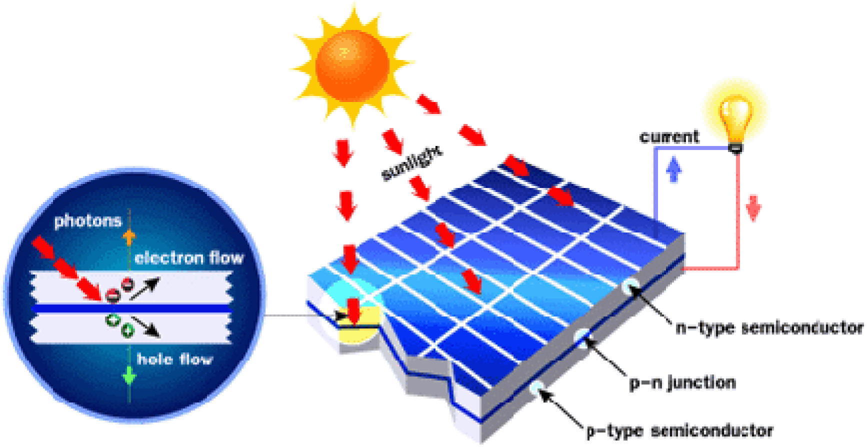
ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ และประสิทธิภาพของแผงที่ประกอบจากเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิด [17]

ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์	ประสิทธิภาพของเซลล์(%)	ประสิทธิภาพของแผง(%)
ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว	15-24	10-14
ซิลิคอนแบบผลึกโพลี	10-17	9-12
ซิลิคอนแบบฟิล์มบาง	8-13	6-9
แบบสารประกอบ		
GaAs/InP	18-30	NA
CdS/CdTe	10-15	
$CuInSe_2$	10-15	

โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์[15]

โครงสร้างที่นิยมมากที่สุด ได้แก่ รอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำที่ราคาถูกที่สุดและมีมากที่สุดบนโลก คือ ซิลิคอน จึงถูกนำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ โดยนำซิลิคอนมาถลุง และผ่านขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ จนกระทั่งทำให้เป็นผลึก จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการแพร่ซึมสารเจือปนเพื่อสร้างรอยต่อพีเอ็น โดยเมื่อเติมสารเจือฟอสฟอรัส จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (เพราะนำไฟฟ้าด้วยอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบ) และเมื่อเติมสารเจือโบรอน จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (เพราะนำไฟฟ้าด้วยโฮลซึ่งมีประจุบวก) ดังนั้น เมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็นมาต่อกัน จะเกิดรอยต่อพีเอ็นขึ้น โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน อาจมีรูปร่างเป็นแผ่นวงกลมหรือสี่เหลี่ยมจัตุรัส ความหนา 200-400 ไมครอน (0.2-0.4 มม.) ผิวด้านรับแสงจะมีชั้นแพร่ซึมที่มีการนำไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าด้านหน้าที่รับแสงจะมีลักษณะคล้ายก้างปลาเพื่อให้ได้พื้นที่รับแสงมากที่สุด ส่วนขั้วไฟฟ้าด้านหลังเป็นขั้วโลหะเต็มพื้นผิว

หลักการทำงานทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์[15]



รูปที่2.14 แสดงหลักการทำงานทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์[15]

เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ จะสร้างพาหะนำไฟฟ้าประจุลบและบวก ได้แก่ อิเล็กตรอน และโฮล (ฐานจะใช้สารกึ่งตัวนำชนิดพี ขั้วไฟฟ้าด้านหลังจึงเป็นขั้วบวก ด้านรับแสงใช้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นขั้วไฟฟ้าจึงเป็นขั้วลบ) ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรงที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง เมื่อต่อให้ครบวงจรไฟฟ้าจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลขึ้น

<u>ตัวอย่าง</u>

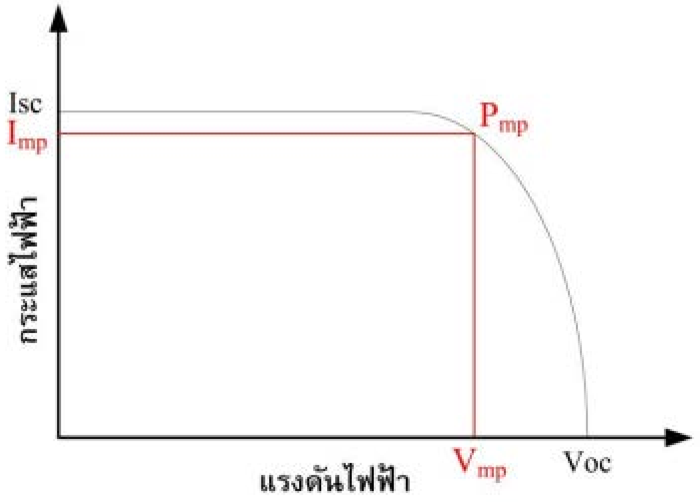
เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว จะให้กระแสไฟฟ้าประมาณ 2-3 แอมแปร์ และให้แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดประมาณ 0.6 โวลต์ เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่มากนัก ดังนั้นเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้ามากเพียงพอสำหรับใช้งาน จึงมีการนำเซลล์แสงอาทิตย์หลายๆ เซลล์มาต่อกันเป็น เรียกว่า **แผงเซลล์แสงอาทิตย์** (Solar Modules) ลักษณะการต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นอยู่ว่าต้องการกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้า

- การต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบขนาน จะทำให้ได้กระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น
- การต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรม จะทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น

สมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

กระแสและแรงดันไฟฟ้า

เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าเป็นกระแสตรง โดยที่กระแสไฟฟ้ากับแรงดันที่ผลิตได้ขึ้นกับความเข้มรังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิแผงเซลล์ ตามรูป 2.15 แสดงกราฟกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อต่อกับโหลดที่แปรค่าตั้งแต่สภาวะลัดวงจร (Short circuit) ถึงสภาวะวงจรเปิด (Open circuit) ตัดแกนตั้งที่แรงดันเป็นศูนย์ จะได้ค่ากระแสที่สภาวะลัดวงจร (Short circuit current: I_{sc}) ส่วนจุดตัดแกนนอนที่กระแสเท่ากับศูนย์จะได้ค่าแรงดันขณะวงจรเปิด (Open circuit voltage: V_{oc}) เมื่อนำค่ากระแสคูณกับแรงดันก็จะได้กำลังของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งต้องมีจุดเดียวเป็นค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเรียกว่า กำลังไฟฟ้าที่จุดสูงสุด (Power at maximum point) ส่วนกระแสกับแรงดันที่จุดนี้เรียกว่ากระแสที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด(Current at maximum power point: I_{MP}) แรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Voltage at maximum power point: V_{MP})ตามลำดับ



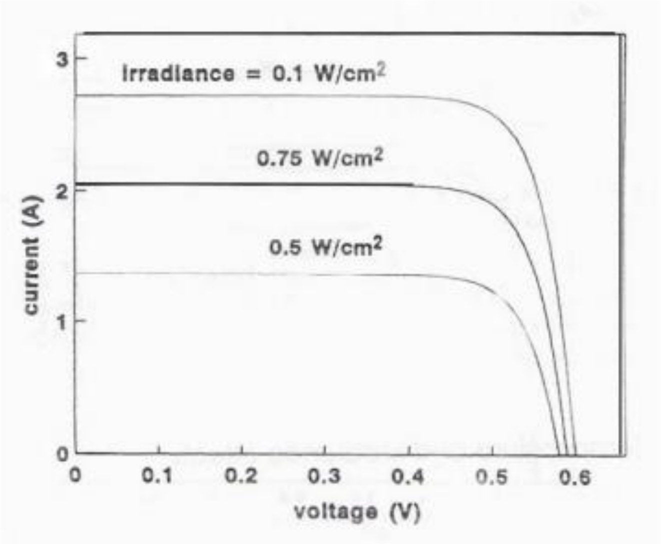
2.15 กราฟกระแสและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์(I-V Curve)[16]

$$I_{sc} = I_{sc}(STC)*G$$

เมื่อ I_{sc} คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่สภาวะปกติ

I_{sc}(STC) คือ ค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขมาตรฐาน

G หรือ irradiance คือ ค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่สภาวะใดๆมีหน่วยเป็น วัตต์ต่อตารางเมตร(W/m^2)



รูปที่ 2.16 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของค่ารังสีดวงอาทิตย์กับค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้า [17]

ผลกระทบจากความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิ

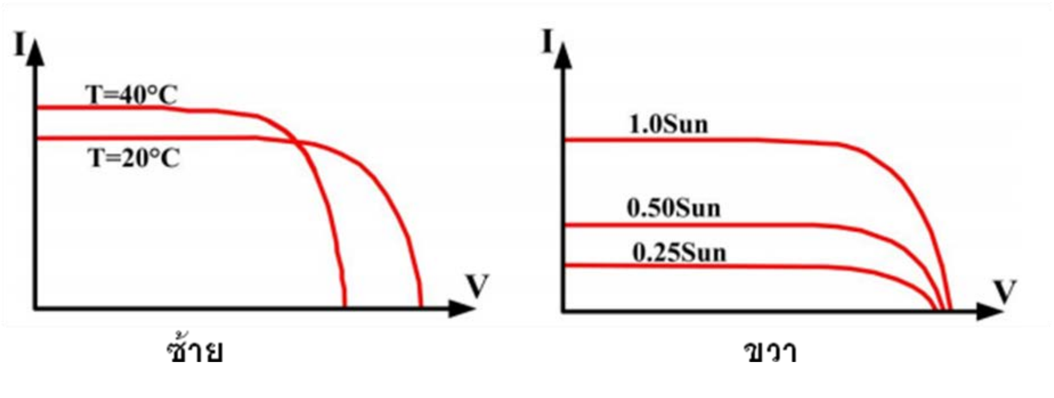
ค่ากำลังไฟฟ้า(P) ในหน่วยวัตต์ (W) ที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ หาค่าได้จาก

$$P = VI$$

และค่าพลังงานไฟฟ้า(E) ซึ่งหมายถึงปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ได้ในช่วงเวลาหนึ่ง(t) สามารถหาค่าได้จาก

$$E = Pt$$

เซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่สภาวะแวดล้อมต่างๆจะได้กราฟ I-V Curve ที่ระดับต่างๆดังแสดงตามรูปที่ 2.17

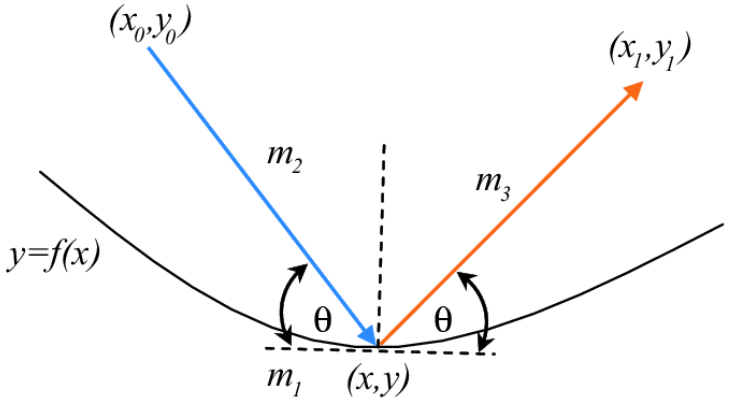


รูปที่ 2.17 กราฟกระแสและแรงดันที่อุณหภูมิและความเข้มแสงค่าต่างๆ[16]

จากรูปที่ 2.17 ด้านซ้ายเป็นกรณีที่ความเข้มรังสีอาทิตย์คงที่แต่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น มีผลทำให้แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง แต่กระแสไฟฟ้าลัดวงจรกลับมีค่าสูงขึ้น แต่ในรูปด้านขวา เมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นโดยที่อุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงจะทำให้กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นและแรงดันวงจรเปิดมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย

2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสะท้อนแสงบันผิวโค้ง [5-7]

เมื่อพิจารณาที่ผิวโค้งจะมีสมการคือ $y = f(x)$ บนระนาบ xy โดยที่มุมตกกระทบ θ มีค่าเท่ากับมุมสะท้อน ที่เส้นโค้งสัมผัส $y = f(x)$ ที่จุด (x,y) ใดๆ ความชันของเส้นสัมผัสที่จุด (x,y) เป็น $m_1 = df(x)/dx$, ความชันของเส้นรังสีตกกระทบเป็น m_2 และความชันของเส้นรังสีสะท้อนเป็น m_3 (ดังรูปที่ 2.17)



รูปที่2.18 แสดงการสะท้อนแสงบนผิวพาราโบลา

จากความสัมพันธ์ โดยหลักการของตรีโกณมิติ [7] จะได้ว่า

$$\tan\theta = \frac{m_1 - m_2}{1 + m_1 m_2} = \frac{m_3 - m_1}{1 + m_1 m_3},$$

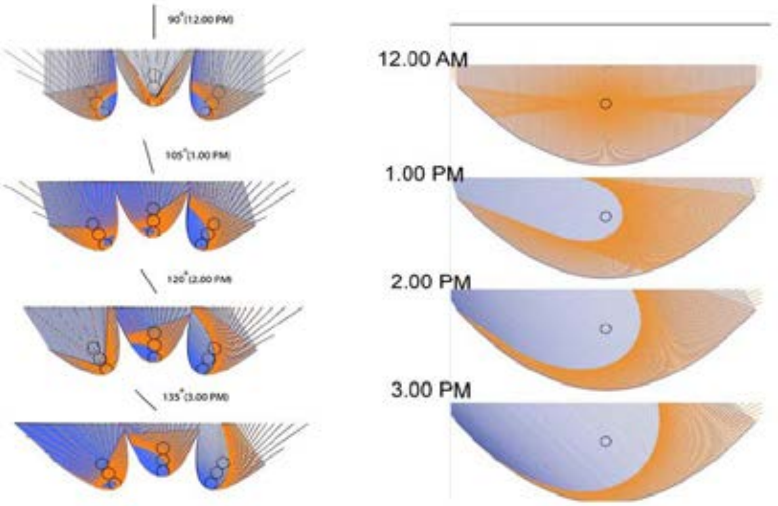
ดังนั้นความชันของรังสีสะท้อนเป็น

$$m_3 = \frac{m_2 - m_1\left(2 + m_1 m_2\right)}{m_1^2 - 2m_1 m_2 - 1}.$$

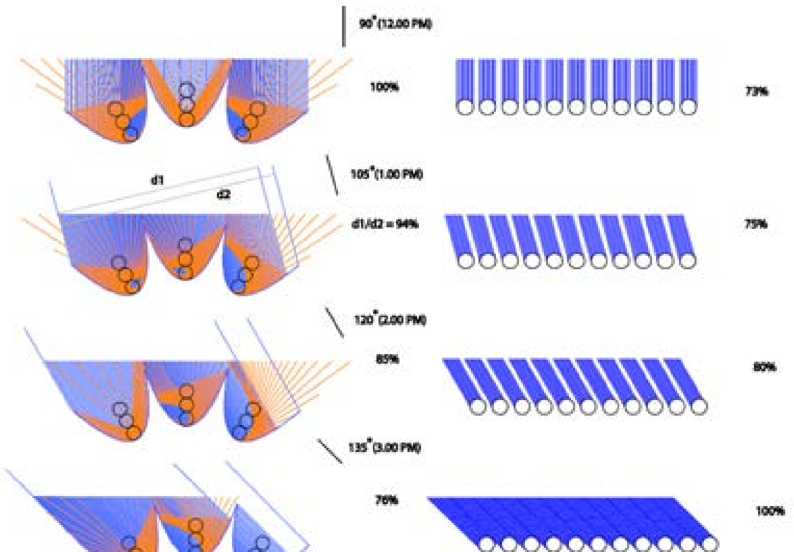
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1) ดร.วัฒนา รติสมิทธ์[8]ได้ทำการศึกษาแผงรับแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาที่ไม่ต้องใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์ ซึ่งจุดเด่นของงานวิจัยดังกล่าว คือ

1. ไม่ต้องใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์ เนื่องจากแผงรับแสงที่ถูกออกแบบนี้สามารถรวมแสงอาทิตย์ได้ทุกช่วงเวลา ตั้งแต่ประมาณ 9.00 – 15.00 น . ซึ่งแผงรับแสงที่ออกแบบใหม่นี้จะรับแสงได้ไม่ต่ำกว่า 76% (ดังรูปที่2.15)



รูปที่ 2.19 แสดงการรับแสงของแผงรับแสงอาทิตย์ที่ออกแบบ(ด้านซ้าย) กับแผงรับแสงแบบรางพาราโบลาทั่วไป(ด้านขวา)

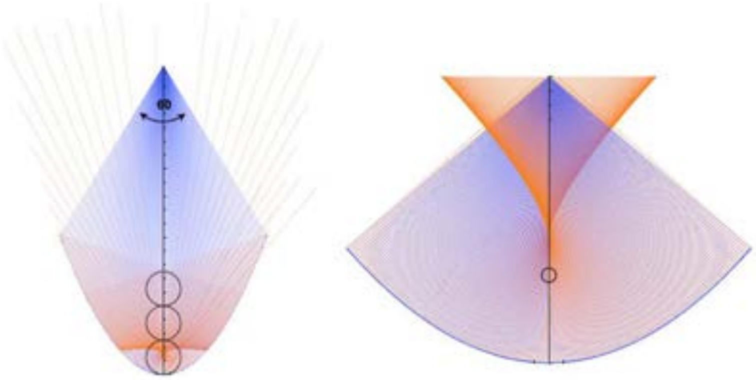


รูปที่ 2.20 แสดงเปอร์เซ็นต์ในการรับแสงของแผงรับแสงอาทิตย์ที่ออกแบบไว้(ด้านซ้าย)กับแผงรับแสงแบบท่อแก้วสุญญากาศ(ด้านขวา) โดยระยะห่างระหว่างท่อแก้ว 7 ซม. โดยอ้างอิงจากผลิตภัณฑ์แผงรับแสงอาทิตย์

จากรูปพบว่า แผงรับแสงที่ออกแบบไว้ (ด้านซ้าย) จะรับแสงได้ 100% ในช่วงเที่ยงและลดลงตามลำดับซึ่งสัมพันธ์กับธรรมชาติของแสงอาทิตย์ที่มีปริมาณรังสีสูงในช่วงเที่ยงและลดลงตามเวลา ส่วนแผงรับแสงแบบท่อแก้วถึงแม้จะรับแสงได้ทุกช่วงเวลา แต่ก็สูญเสียปริมาณรังสีประมาณ 25% ในช่วงเที่ยง ซึ่งเกิดจากช่องว่างระหว่างท่อแก้ว

2. มีคุณสมบัติในการรับรังสีกระจายได้ดี

โดยสามารถรับรังสีตกกระทบที่ทำมุมได้กว้างถึง 60 องศา โดยที่รางพาราโบลาทั่วไปรับมุมกวาดได้เพียง 5 องศา ซึ่งทำให้ไม่สามารถรับรังสีกระจายได้ ทั้งนี้ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบเพิ่มโดยเพิ่มจำนวนท่อรับรังสีในแนวตั้ง ทำให้รับรังสีกระจายได้ซึ่งเหมาะอย่างยิ่งกับสภาพภูมิอากาศร้อนชื้นของประเทศไทย(ดังรูปที่2.21)



รูปที่2.21 แสดงการสะท้อนของรังสีตกกระทบในทิศทางต่างๆของแผงรับแสงอาทิตย์ที่ออกแบบไว้สามารถรับรังสีที่ทำมุมได้ในช่วง 60 องศา (ด้านซ้าย) กับแผงรับแสงแบบรางพาราโบลาทั่วไป (ด้านขวา)

3. สามารถทำอุณหภูมิสูงกว่าผลิตภัณฑ์แผงรับแสงที่มีอยู่ในปัจจุบัน
4. ไม่มีชิ้นส่วนเคลื่อนไหวในระบบ จึงตัดภาระในการซ่อมบำรุงรักษาระบบ และยืดอายุการใช้งานให้ยาวนานขึ้น
5. ประหยัดเนื้อที่ในการวางแผงรับแสง โดยทั่วไปรางพาราโบลาที่มีระบบติดตามดวงอาทิตย์จะต้องวางแผงรับแสงห่างกันเพื่อไม่ให้เกิดการบังกันจึงเปลืองพื้นที่ในการใช้งานแต่แผงรับแสงที่ออกแบบสามารถวางติดกันได้โดยไม่บังแสงกัน และมีอุณหภูมิความร้อนที่สูงกว่าจึงใช้จำนวนแผงได้น้อยกว่า เป็นการประหยัดเนื้อที่ได้อย่างดี

รูปที่2.22 แสดงต้นแบบแผงรับแสงแบบรางพาราโบลาที่ไม่ต้องใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์ (แผงรับแสงที่ออกแบบ)

จากแผงรับแสงแบบรางพาราโบลาที่ออกแบบได้มีการประยุกต์ใช้งานสำหรับหุงต้ม ซึ่งชุดหุงต้มพลังงานแสงอาทิตย์ประกอบไปด้วย แผงสะท้อนแสงแบบรางพาราโบลาสามรางที่ทำมุมในทิศทางต่างกัน มีท่อแก้วสุญญากาศ 3 ท่อวางอยู่ในแนวแกนของแต่ละราง ภายในหลอดแก้วจะมีท่อทองแดงที่มีน้ำมันบรรจุอยู่ หลักการทำงานก็คือ ความร้อนจากแสงอาทิตย์ถ่ายเทให้กับน้ำมัน เมื่อน้ำมันได้รับพลังงานความร้อนก็จะลอยตัวสูงขึ้นไปยังถังน้ำมัน ซึ่งทำหน้าที่คล้ายกับ hot plate ที่ห่อหุ้มหม้อต้มน้ำสเตนเลสไว้ และความร้อนจากน้ำมันก็จะถ่ายเทให้แก่หม้อน้ำ เมื่อน้ำมันเย็นลงก็จะไหลกลับสู่แผงรับแสงซึ่งเป็นการไหลเวียนตามธรรมชาติไม่ต้องติดตั้งปั้ม เมื่อทดสอบสมรรถนะของชุดหุงต้มพลังงานแสงอาทิตย์พบว่า อุณหภูมิภายในหลอดแก้วสูง 145 องศา ภายในเวลา 1 ชั่วโมง แล้วเมื่อต่อเข้ากับถังน้ำมัน 14 ลิตร อุณหภูมิสูงสุดที่ 110 องศา ที่ความเข้มแสงสูงสุด 800 W/m^2 ทั้งนี้ผู้วิจัยยังได้มีการสาธิตการต้มไข่สุกภายในเวลา 15 -20 นาที,ต้มบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปภายในเวลา 3 นาที งานวิจัยดังกล่าวผู้วิจัยยังได้เสนอแนวทางประยุกต์การใช้งาน เช่น ใช้ต้มน้ำดื่มในพื้นที่ห่างไกลที่ไฟฟ้าเข้าไม่ถึง , ตามชนบท ,ใช้ในอุตสาหกรรมครัวเรือนที่ต้องการน้ำเดือดที่สะอาด ,ใช้ทำความร้อนของหม้อน้ำในโรงงานอุตสาหกรรม หรือใช้ทำความเย็น เป็นต้น

รูปที่ 2.23 แสดงชุดหุงต้มพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์

2) มนูญ พิธุวรรณ[9] การออกแบบและทดสอบแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดรวมแสงด้วยแผงพาราโบลิค โดยแผงรังพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดรวมแสง(รังสี)ด้วยแผงพาราโบลิคใช้หลักการ

พื้นฐาน โดยอาศัยการสะท้อนรังสีดวงอาทิตย์ไปยังจุดรวมรังสีซึ่งเป็นการสะท้อนในระบบสองมิติ พลังงานที่ได้ในแนวรวมรังสีจะถ่ายเทผ่านผนังท่อไปสู้น้ำมันนำความร้อนที่บรรจุอยู่ภายในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะนำวัสดุภายในประเทศมาสร้างระบบโดยใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ผิวมัน กว้าง 1200 มิลลิเมตร ยาว 2400 มิลลิเมตร เมื่อขึ้นรูปเป็นแผงสะท้อนรังสีแล้วจะมีความยาว 2400 มิลลิเมตร กว้าง 992 มิลลิเมตร มีรัศมี 573 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งท่อรวมรังสีในที่นี้ใช้ท่อเหล็กกล้าไร้ตะเข็บ ทำการทดสอบแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ที่ออกแบบที่อัตราไหลของน้ำมันต่างกัน 5 ค่า พบว่าพลังงานสูงสุดที่แผงสร้างได้ 388.72 W ที่อัตราไหลน้ำมัน 0.415 $kg.min^{-1}$ พลังงานตกกระทบบนแผงสูงสุด(กรมอุตุนิยมวิทยา) 880 $W.m^{2}$ ประสิทธิภาพเฉลี่ย 21.9%

3) กิตติ สถาพรประสาธน์[10] การศึกษาตัวรับแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลิคที่ติดตั้งอุปกรณ์ติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาโดยอาศัยการทดลองเพื่อหาอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านตัวรับแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลิคที่ติดตั้งอุปกรณ์ติดตามการเคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ ใช้พื้นที่รับแสงขนาด 0.7*1.2 m^{2} ท่อรวมรับแสงทำด้วยทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร ผลที่ได้จากการทดลองนำไปเปรียบเทียบกบกรณีตัวรับแสงไม่เคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์พบว่า รางรับแสงที่เคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ให้ประสิทธิภาพสูงสุดของระบบที่ 39.58% ความร้อนเฉลี่ยที่ได้รับจากการถ่ายเทความร้อนจากดวงอาทิตย์เท่ากับ 72.5 วัตต์ ส่วนในกรณีรางรับแสงอยู่กับที่ ประสิทธิภาพสูงสุดของระบบจะอยู่ที่ 24.60% ความร้อนเฉลี่ยที่ได้รับจากการถ่ายเทความร้อนจากดวงอาทิตย์เท่ากับ 55.54 วัตต์ ดังนั้นการใช้ตัวรับแสงแบบเคลื่อนที่ติดตามดวงอาทิตย์ประสิทธิภาพของระบบจะเพิ่มขึ้น 14.98% เมื่อเทียบกับรางรับแสงที่อยู่กับที่

บทที่ 3
แนวคิดและการออกแบบ

3.1 แนวคิดที่ใช้ในการออกแบบ

จากการศึกษาพบว่าการนำเทคโนโลยีแบบรางพาราโบลา(Parabolic Trough) มาใช้ประโยชน์ให้ได้ประสิทธิภาพสูงนั้น หากนำเข้าเทคโนโลยีจากต่างประเทศคงไม่ก่อให้เกิดประสิทธิภาพเท่าที่ควรตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ดังนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีและสร้างต้นแบบแผงรับแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา(Parabolic Trough)ให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของประเทศไทยเองจึงน่าจะก่อให้เกิดประโยชน์และประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งาน แผงรับแสงแบบพาราโบลา(Parabolic Trough) จากต่างประเทศนั้นส่วนใหญ่เป็นระบบที่เคลื่อนไหวตามแนวแสงของดวงอาทิตย์เมื่อนำมาใช้งานมักก่อให้เกิดปัญหาในการเรื่องการดูแลรักษาตลอดจนความเสื่อมของอุปกรณ์ ดังนั้นเพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าวแผงรับแสงแบบพาราโบลา(Parabolic Trough) ที่ได้มีการออกแบบจะเป็นระบบที่ไม่ติดตามดวงอาทิตย์ โดยเน้นการออกแบบให้มีประสิทธิภาพเทียบเคียงระบบที่ต้องติดตามดวงอาทิตย์และเพื่อความเหมาะสมกับลักษณะของแสงที่รับได้ในประเทศไทย ซึ่งเป็นรังสีกระจายในปริมาณสูงตามที่ได้กล่าวมา จึงเน้นการออกแบบให้รับรังสีกระจายได้ดี แผงรับแสงแบบรางพาราโบลาที่ออกแบบนั้นจัดเป็นประเภทแผงรับแสงแบบรางพาราโบลาแบบผสม (Compound Parabolic Concentrator : CPC) จากการศึกษาพบว่า แผงรับแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาเป็นแผงรวมแสงที่ให้อุณหภูมิสูง จึงนิยมใช้กับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยรวมแสงของรางพาราโบลาไปยังท่อรับแสงที่อยู่ในแนวเส้นโฟกัส ที่มีระบบติดตามดวงอาทิตย์เพื่อให้สามารถรับพลังงานได้ตลอดทั้งวัน สามารถใช้งานได้เกิดประสิทธิภาพสูงในประเทศที่มีปริมาณของรังสีตรงสูง แต่แผงรับแสงแบบรางพาราโบลาดังกล่าวก็มีข้อจำกัด คือ จำเป็นต้องมีระบบติดตามดวงอาทิตย์จึงจะสามารถรวมแสงได้ตลอดทั้งวัน และรับรังสีกระจายได้น้อย ซึ่งในประเทศไทยมีสัดส่วนปริมาณรังสีกระจายต่อรังสีรวมค่อนข้างสูง ทั้งนี้ในการนำระบบติดตามดวงอาทิตย์มาใช้ในระบบขนาดเล็กอาจก่อให้เกิดปัญหาในทางปฏิบัติหลายประการ เช่น ทำให้ระบบมีราคาสูง เมื่อชิ้นส่วนงานมีการเคลื่อนไหวตลอดเวลา อาจจะชำรุดได้ง่าย จึงจำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาอย่างต่อเนื่อง จึงเป็นแนวคิดให้เกิดการศึกษาต้นแบบแผงรับแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาที่ไม่ใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์

3.2 การออกแบบแผงรับแสง

จุดเด่นของงานออกแบบคือ แผงรับแสงแบบรางพาราโบลาผสม (CPC) ที่ไม่ต้องอาศัยระบบติดตามดวงอาทิตย์ โดยศึกษาเพื่อหาเงื่อนไขแผงรับแสงที่มีประสิทธิภาพสูงในเชิงแสงและเชิงกลน์เพื่อนำไปใช้งานจริง

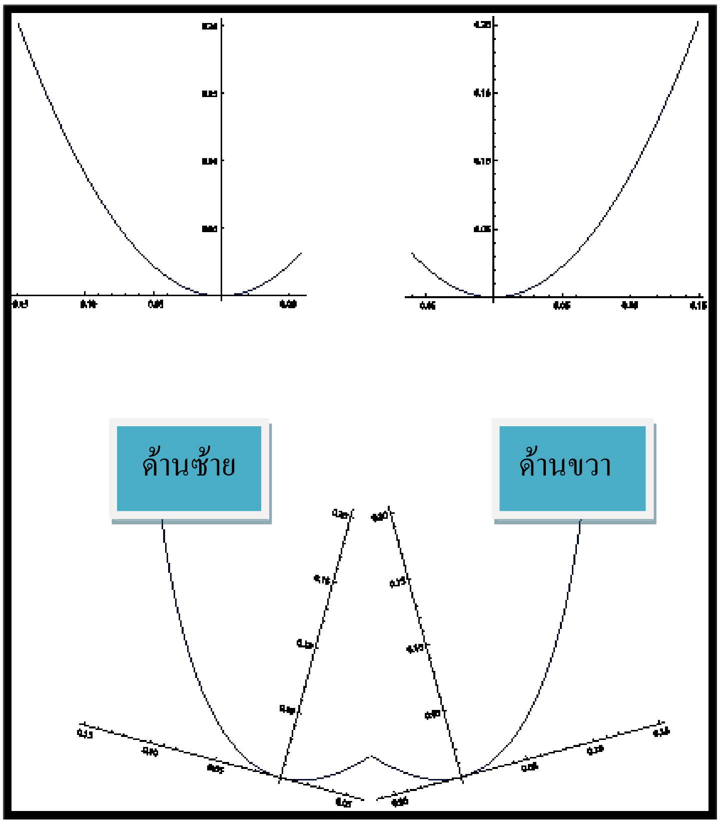
ต้นแบบแผงรับแสงจะประกอบไปด้วย แผงรับแสงแบบรางพาราโบลาผสมประกอบติดกัน จำนวน 3 ราง ในแต่ละรางมีท่อรับแสงอาทิตย์เป็นท่อแก้วแบบฮีตไปป์ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ความยาว 2 เมตร 16 เซนติเมตร วางอยู่ตรงกลาง

ตัวแปรในการออกแบบได้แก่

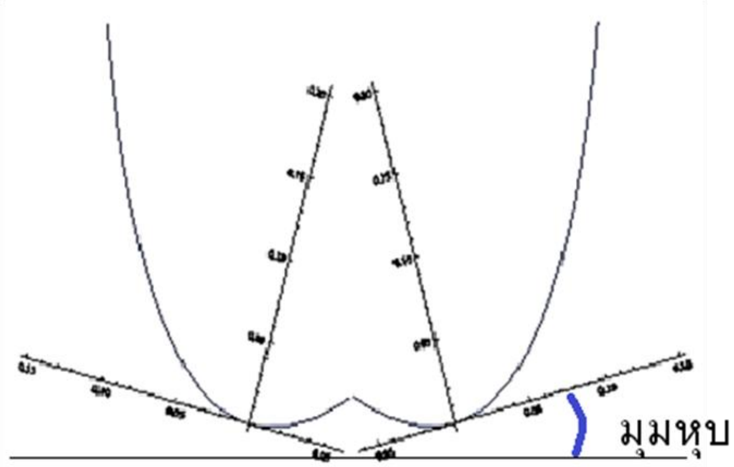
1) ขนาดของราง คือ ความกว้าง
2) มุมในการรับรังสีดวงอาทิตย์(มุมกวาด)และมุมที่ทำกับแนวระดับ(มุมหุบ)

ออกแบบโดยใช้โปรแกรมประยุกต์ทางคณิตศาสตร์(Wolfram Mathematica 7.0) โดยอาศัยการสะท้อนแสงและการรวมแสงของรางพาราโบลาเป็นหลักในการออกแบบ โดยโปรแกรมสามารถกำหนดจำนวนเส้นแสงที่ตกกระทบ ทิศทางของแสงที่ตกกระทบในมุมต่างๆ เพื่อศึกษาหารูปแบบที่เหมาะสมของรางรับแสงแบบพาราโบลาแบบผสม ในการออกแบบโดยใช้โปรแกรมจะกำหนดเส้นของแสงที่ตกกระทบลงมาเป็น 100 เส้น เพื่อในตอนคิดหาประสิทธิภาพของแผงจะได้เทียบเป็นเปอร์เซ็นได้

3.2.1.ภาพจำลองการสะท้อนแสงและการรวมแสงทางคณิตศาสตร์ของรางพาราโบลาแบบผสม



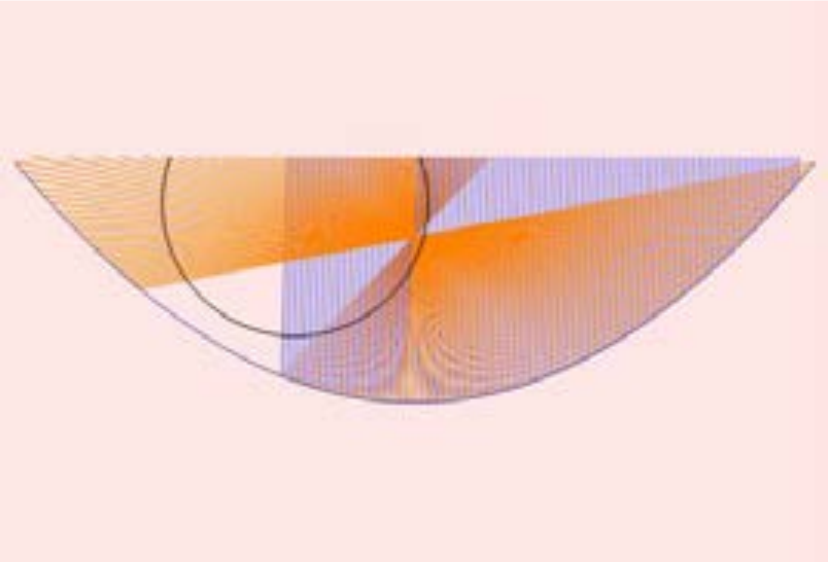
รูปที่3.1 แสดงการปรับมุมเข้าหากันของรางพาราโบลาแบบผสม(CPC) ในการออกแบบแต่ละครั้งจะต้องนำรางพาราโบลาแบบปกติดังแสดงในรูปด้านซ้ายและด้านขวา มาปรับเข้าหากันตามรูปด้านล่าง โดยในการปรับจะกำหนดมุมที่เท่ากันทั้งในด้านซ้ายและด้านขวาซึ่งเรียกว่ามุมหุบ



รูปที่3.2 แสดงการปรับมุมที่อ้างอิงถึงในการออกแบบ

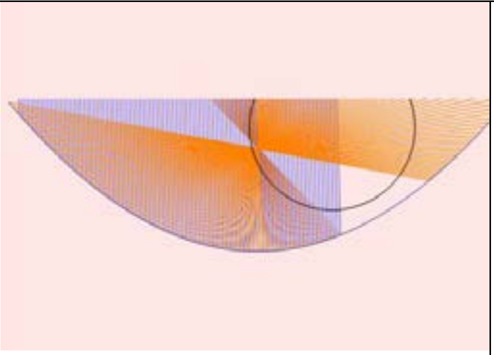
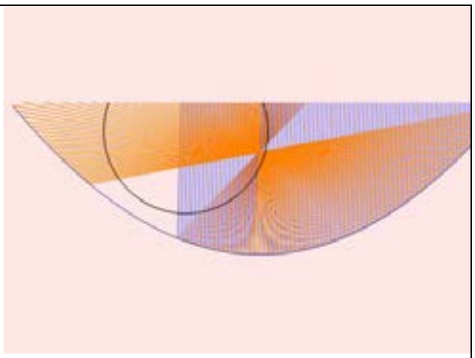
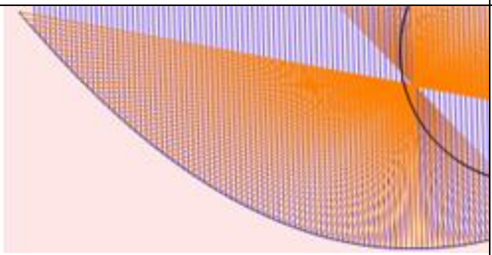
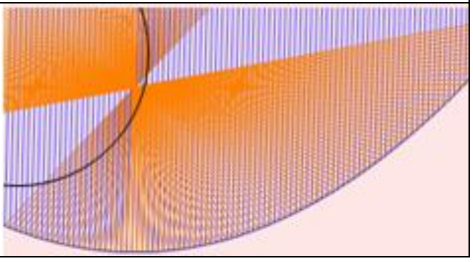
จากสมการพาราโบลา y = ax^2 โดยที่a เป็นค่าคงที่ใดๆ โดยกำหนดค่าa= 4,9,16 ตามลำดับและกำหนดให้แสงตรงกระทบยังรางพาราโบลาทำมุม(θ) 89.9 องศา กำหนดให้เส้นแสงที่ตกกระทบแผง (d) จำนวน 99 เส้น

เมื่อ a=4 fix θ=89.9 d=99,w=0.15

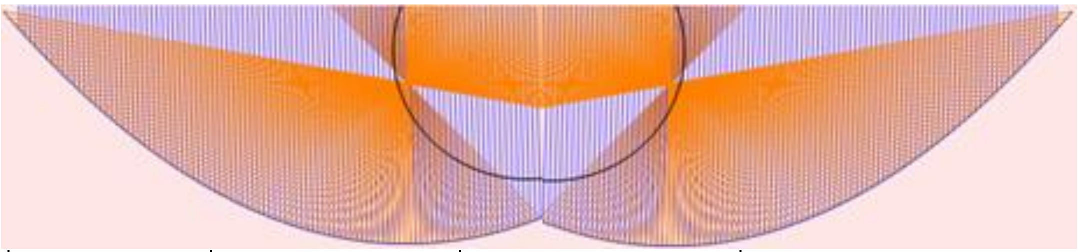


รูปที่ 3.3 แผงรับแสงที่ออกแบบโดยที่กำหนดค่า a=4 สมการพาราโบลา $y = 4x^2$ แสงสีฟ้าคือรังสีจากดวงอาทิตย์ แสงสีส้มคือการสะท้อนแสงครั้งที่ 1 วงกลมสีดำแทนหลอดรับแสง

ตารางที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการออกแบบรางรับแสงแบบรางพาราโบลาจากสมการ $y = 4x^2$ มาเป็นรางรับแสงแบบรางพาราโบลาผสม(CPC)

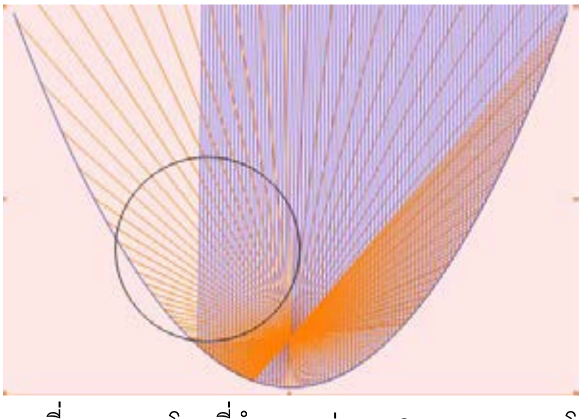
1.		
2.		

จากตารางที่ 3.1 ขั้นตอนที่ 1. คือการออกแบบรางรับพาราโบลาจากสมการ $y = 4x^2$ การคอนเวิร์สรูปที่ได้ในทิศทางตรงกันข้าม แล้วตัดรางในส่วนที่แสงไม่ตกกระทบรางออกในขั้นที่ 2 (เส้นสีฟ้าคือเส้นที่ใช้แทนเส้นที่แสงตกกระทบราง)



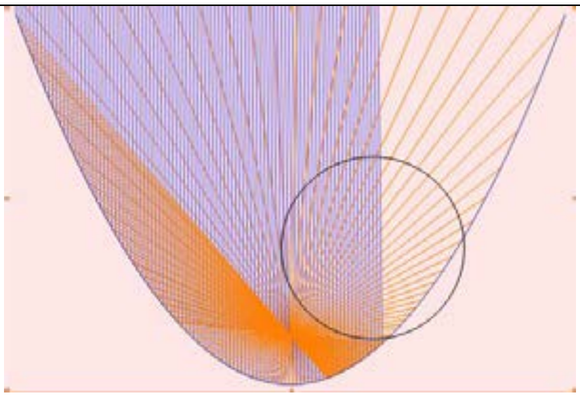
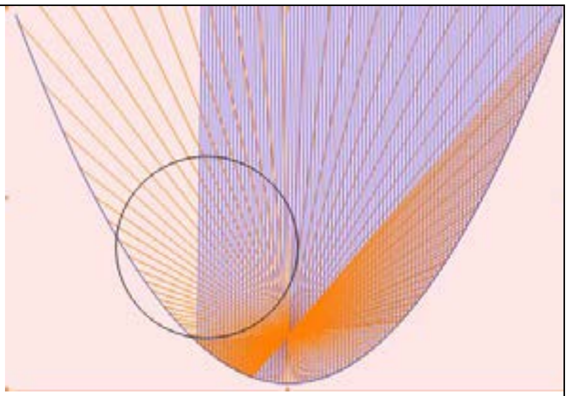
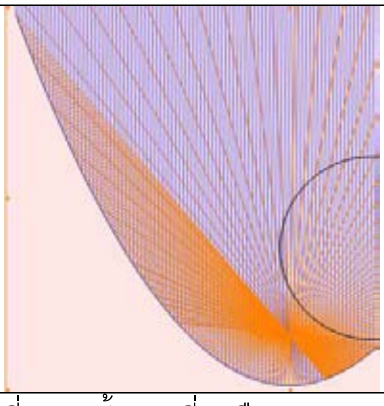
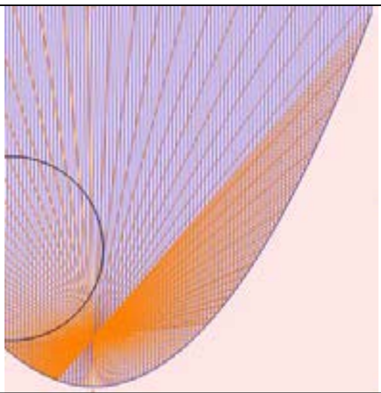
รูปที่ 3.4 แผงรับแสงที่ออกแบบจากตารางที่ 3.1 มาปรับเข้าหากันเพื่อให้ได้แผงรับแสงรางพาราโบลาแบบผสม(CPC)

เมื่อa=9 θ=89.9 d=99,w=0.15

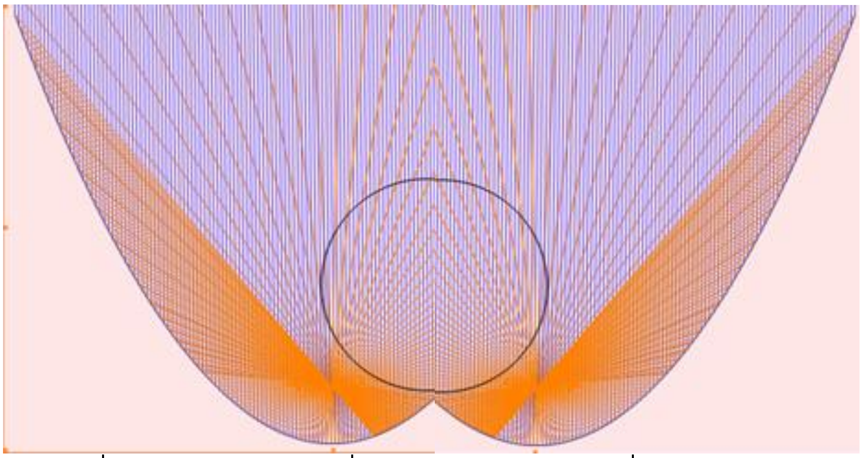


รูปที่ 3.5 แผงรับแสงที่ออกแบบโดยที่กำหนดค่า a=9 สมการพาราโบลา $y = 9x^2$ แสงสีฟ้าคือรังสีจากดวงอาทิตย์ แสงสีส้มคือการสะท้อนแสงครั้งที่ 1 วงกลมสีดำแทนหลอดรับแสง

ตารางที่ 3.2 แสดงขั้นตอนการออกแบบรางรับแสงแบบรางพาราโบลาจากสมการ y = $9x^2$ มาเป็นรางรับแสงแบบรางพาราโบลาผสม(CPC)

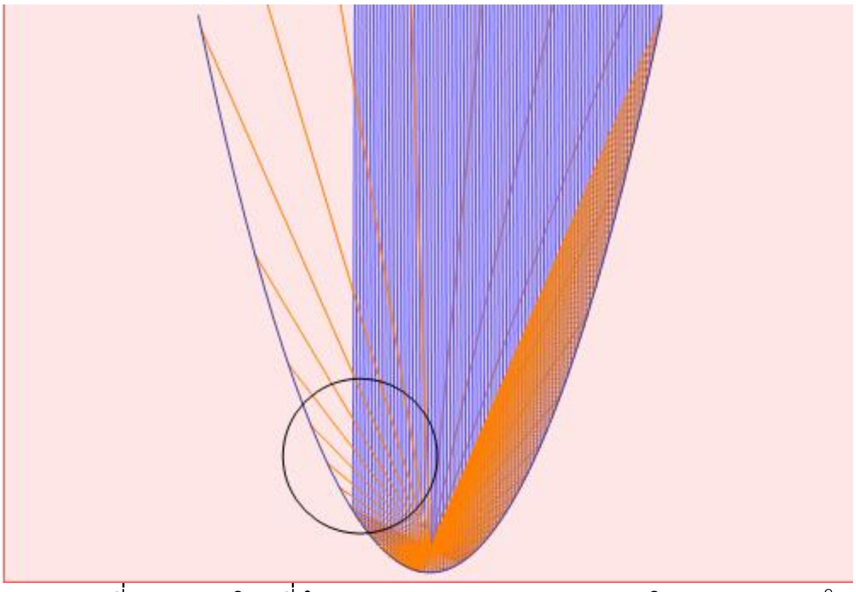
1.		
2.		

จากตารางที่ 3.2 ขั้นตอนที่ 1 คือการออกแบบรางรับพาราโบลาจากสมการ y = $4x^2$ การคอนเวิร์สรูปที่ได้ในทิศทางตรงกันข้าม แล้วตัดรางในส่วนที่แสงไม่ตกกระทบรางออกในขั้นที่ 2 (เส้นสีฟ้าคือเส้นที่ใช้แทนเส้นที่แสงตกกระทบราง)



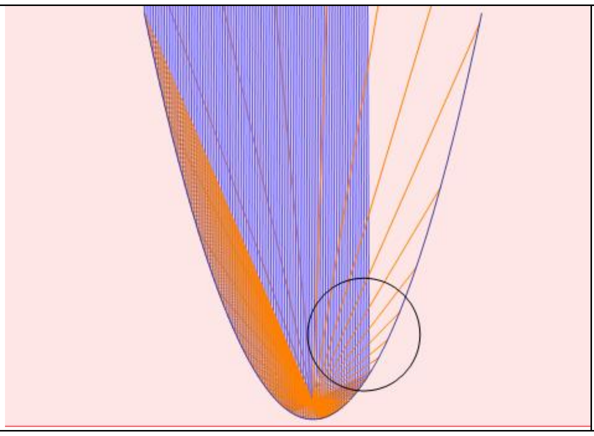
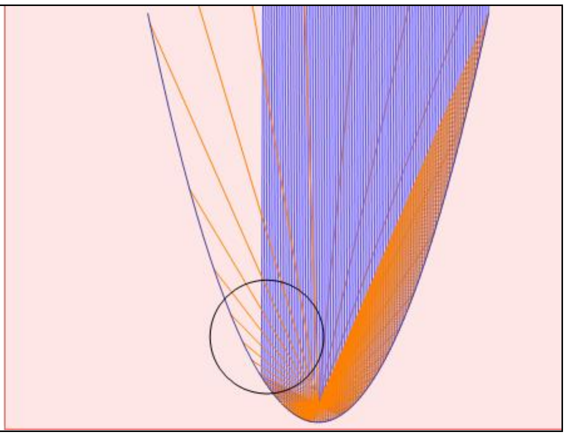
รูปที่ 3.6 แผงรับแสงที่ออกแบบจากตารางที่ 3.2 มาปรับเข้าหากันเพื่อให้ได้แผงรับแสงรางพาราโบลาแบบผสม(CPC)

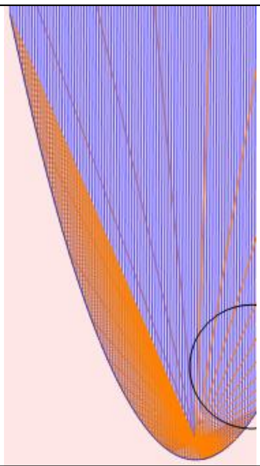
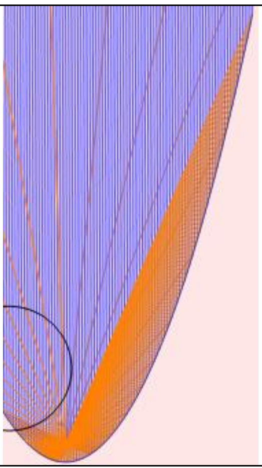
เมื่อ a=16 θ=89.9 d=99,w=0.15

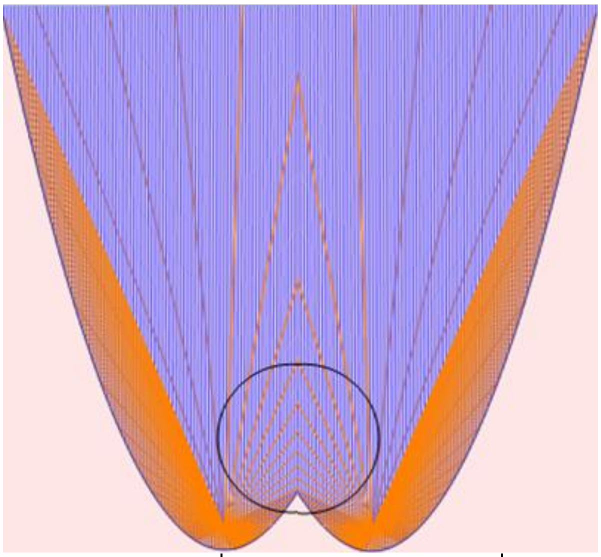


รูปที่ 3.7 แผงรับแสงที่ออกแบบโดยที่กำหนดค่า a=16 สมการพาราโบลา $y = 16x^2$ แสงสีฟ้าคือรังสีจากดวงอาทิตย์ แสงสีส้มคือการสะท้อนแสงครั้งที่ 1 วงกลมสีดำแทนหลอดรับแสง

ตารางที่ 3.3 แสดงขั้นตอนการออกแบบรางรับแสงแบบรางพาราโบลาจากสมการ $y = 16x^2$ มาเป็นรางรับแสงแบบรางพาราโบลาผสม(CPC)

1.		

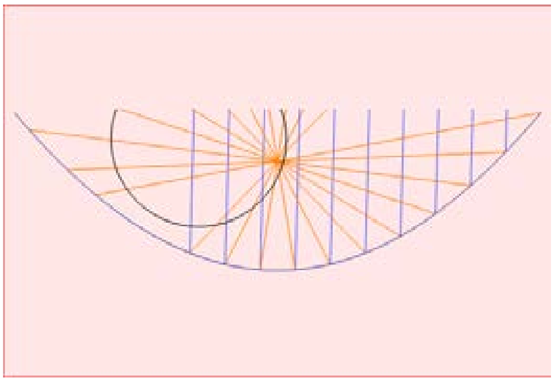
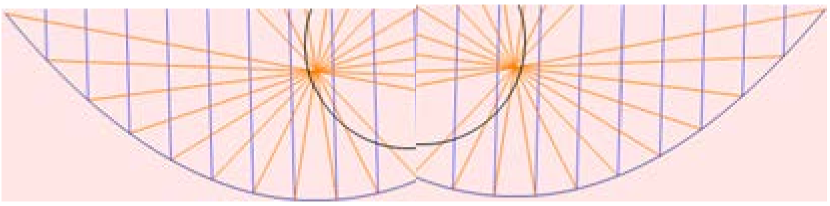
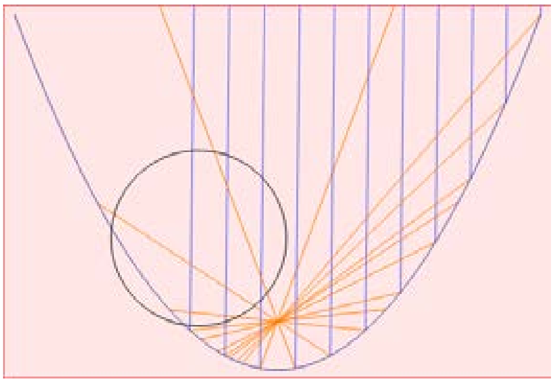
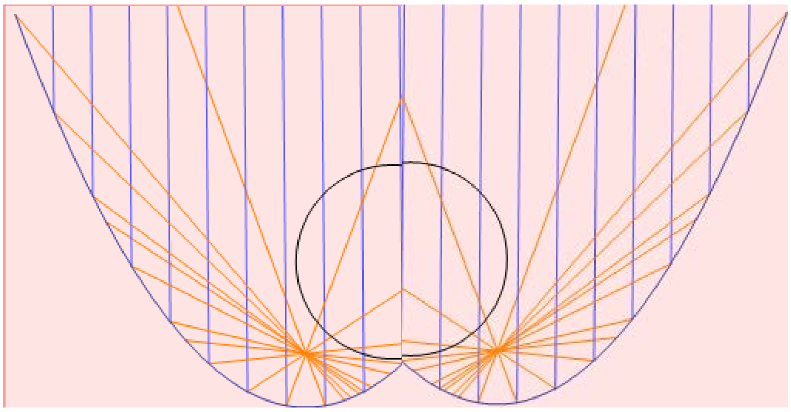
2.		

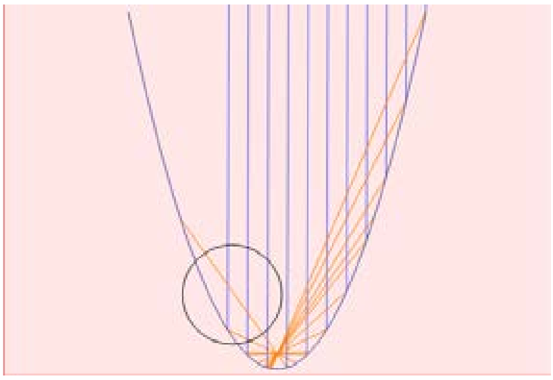
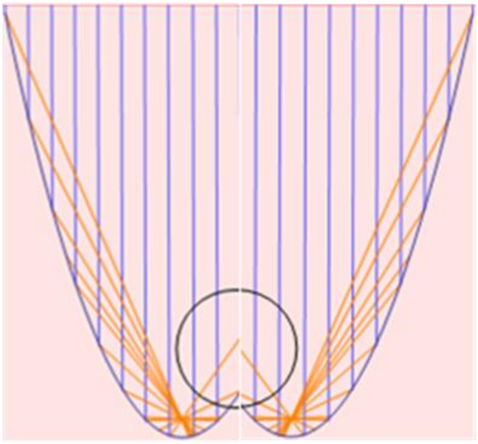


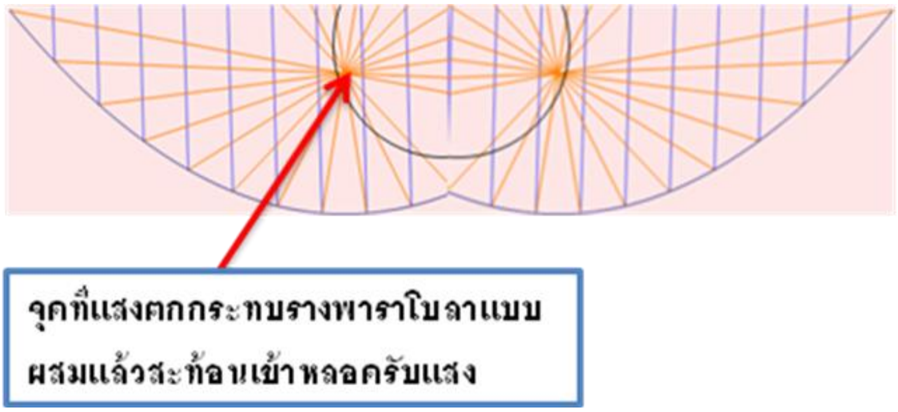
รูปที่ 3.8 แผงรับแสงที่ออกแบบจากตารางที่ 3.3 มาปรับเข้าหากันเพื่อให้ได้แผงรับแสงรางพาราโบลาแบบผสม(CPC)

หาประสิทธิภาพของแผงรับแสงที่ออกแบบจากสมการพาราโบลาทั้ง 3 สมการเพื่อนำไปเปรียบเทียบแล้วเลือกไปใช้ในการออกแบบ โดยการลดเส้น d=10 แล้วนับจำนวนเส้นแสงที่เข้าหลอดโดยเทียบว่าถ้าเส้นแสงเข้าหลอดรับแสงทั้ง 10 เส้นคิดเป็น 100% หากเส้นแสงเข้าหลอดแก้วน้อยกว่า 10 เส้นก็คิดหาประสิทธิภาพโดยการเทียบบัญญัติไตรยางศ์(ประสิทธิภาพที่ได้เป็นประสิทธิภาพรวมทุกช่วงเวลา)

ตารางที่ 3.4 แสดงการหาประสิทธิภาพอย่างง่ายของแผงรับแสงที่ออกแบบจากสมการ $y = 4x^2$, $y = 9x^2$, $y = 16x^2$

A=4 θ=89.9 d=10,w=0.15	 	ประสิทธิภาพ 100%
A=9 θ=89.9 d=10,w=0.15	 	ประสิทธิภาพ 30%

A=16 θ=89.9 d=10,w=0.15	 	ประสิทธิภาพ 20%

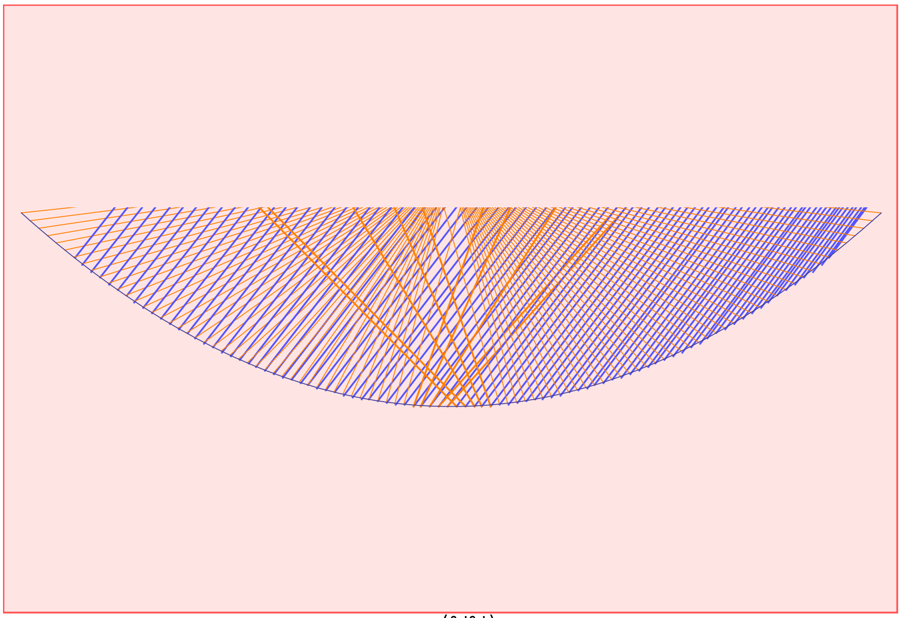


รูปที่ 3.9 แสดงจุดที่แสงตกกระทบรางพาราโบลาแบบผสมแล้วสะท้อนเข้าหลอดรับแสง ของรางพาราโบลาสมการ $y = 4x^2$

จากตาราง3.4 เลือกสมการ $y = 9x^2$ ซึ่งมีประสิทธิภาพเท่ากับ 30% มาออกแบบ แม้ว่าในสมการ $y = 4x^2$ จะให้ประสิทธิภาพสูงถึง 100% แต่ในการออกแบบจะต้องมีการนำไปปรับมุมเพื่อหามุมกวาดที่มากที่สุดในการรับรังสีกระจาย จากรูปที่ 3.7 ในสมการ $4x^2$ นั้นจุดที่แสงตกกระทบอยู่ริมหลอดรับแสง หากเลือกแผงรับแสงจากสมการนี้ไปออกแบบต่อในการปรับมุม จุดที่แสงตกกระทบอาจจะหลุดออกจากหลอดรับแสงซึ่งอาจจะทำให้แผงรับแสงผลิตความร้อนได้น้อยลง จึงเลือกราง

พาราโบลาจากสมการ $y = 9x^2$ ซึ่งมีประสิทธิภาพเท่ากับ 30% ซึ่งมากกว่ารางพาราโบลาจากสมการ $y = 16x^2$ ที่มีประสิทธิภาพเพียง 20%ไปทำการศึกษาต่อโดยปรับค่า w = 0.05, 0.10, 0.15 เพื่อดูมุมกวาด หรือมุมในการรับรังสีกระจาย

1. เมื่อ W = 0.05 สมการ $y = 9x^2$

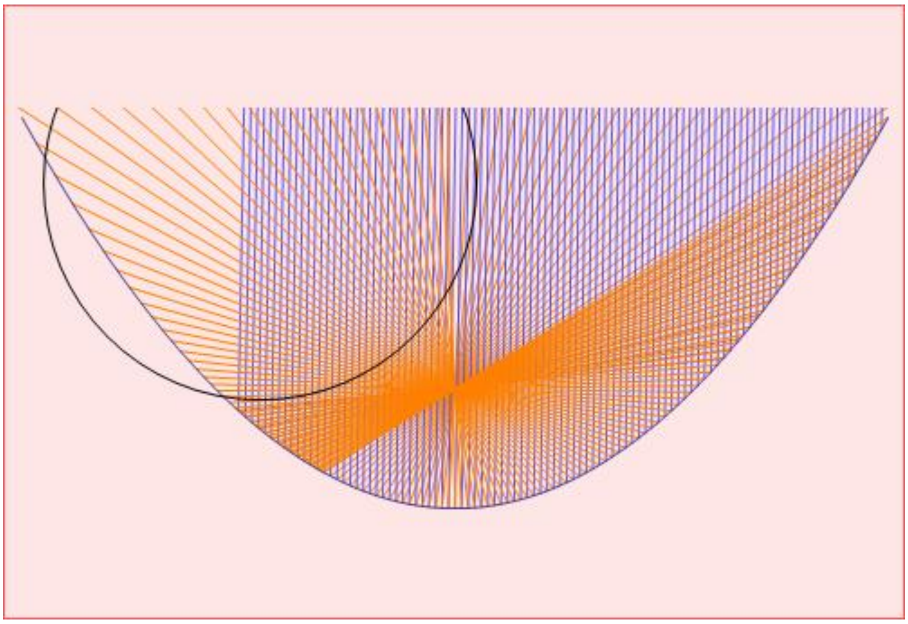


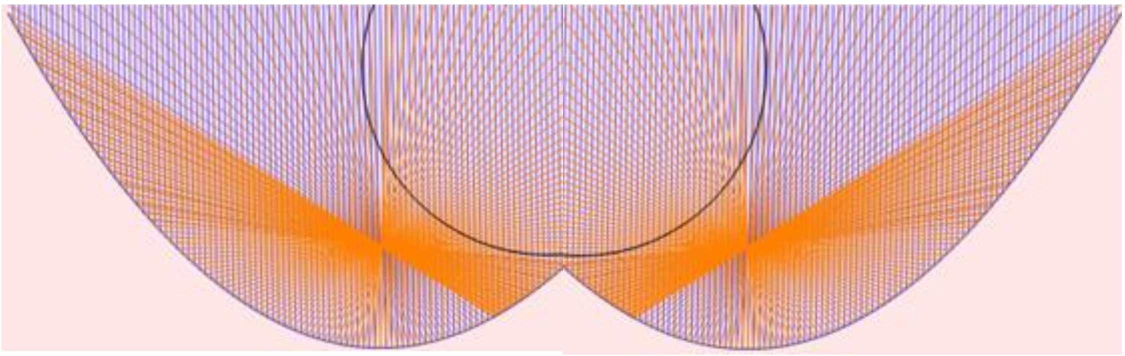
(บน)

(ล่าง)

รูปที่ 3.10 แสดงแสงที่ตกกระทบแผงรับแสงรางพาราโบลา(บน) และแผงรับแสงรางพาราโบลาแบบผสม(ล่าง) เมื่อกำหนด w = 0.05

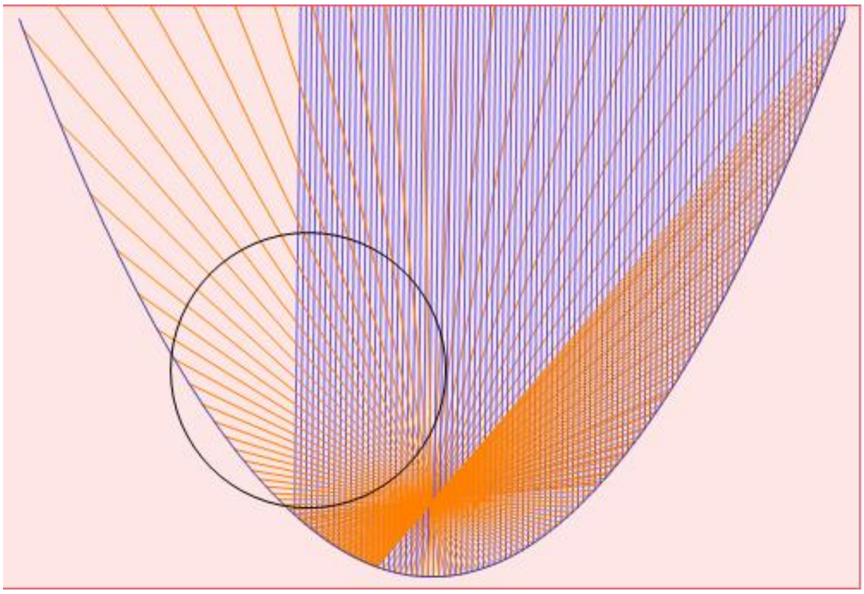
2. เมื่อ W = 0.10 สมการ $y = 9x^2$

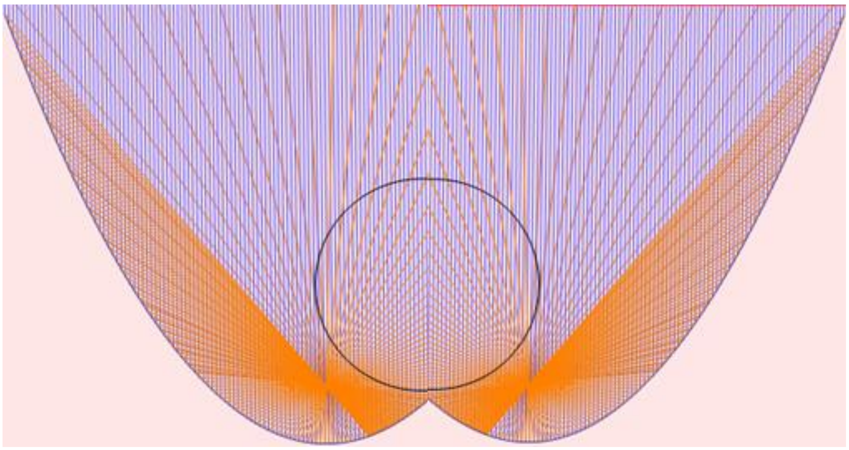




รูปที่ 3.11 แสดงแสงที่ตกกระทบแผงรับแสงรางพาราโบลา(บน) และแผงรับแสงรางพาราโบลาแบบผสม(ล่าง) เมื่อกำหนด w = 0.10

3. เมื่อ W = 0.15 สมการ $y = 9x^2$



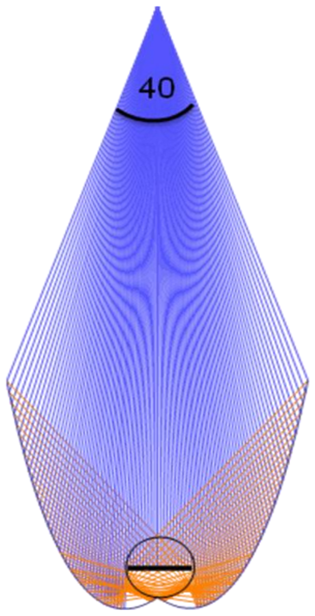
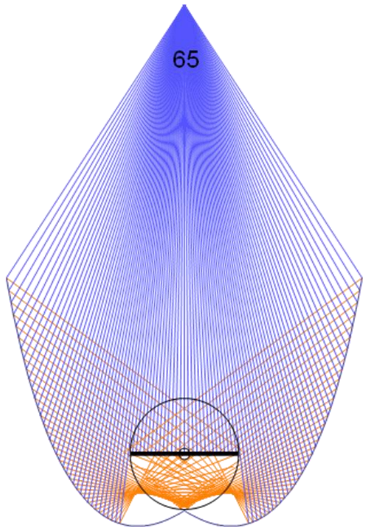


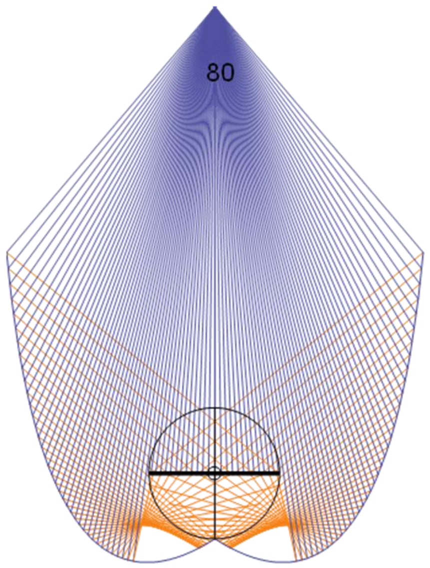
รูปที่ 3.12 แสดงแสงที่ตกกระทบแผงรับแสงรางพาราโบลา(บน) และแผงรับแสงรางพาราโบลาแบบผสม(ล่าง) เมื่อกำหนด w = 0.15

<u>3.2.2 การออกแบบแผงรับแสงโดยใช้เงื่อนไขการปรับมุมองศาที่แตกต่างกัน</u>

ออกแบบโดยมีการปรับมุมแตกต่างกัน คือ 5 องศา , 10 องศา, 15 องศา การปรับมุมในการออกแบบนี้จะเทียบกับแนวระดับ (การปรับมุมอธิบายไว้ในรูปที่ 3.2) โดยที่เส้นสีน้ำเงิน สีส้ม สีเขียว และสีเหลือง แสดงการสะท้อนครั้งที่ 1,2,3 ตามลำดับ โดยที่วงกลมคือตำแหน่งของหลอดแก้วสุญญากาศ ทุกๆหนึ่งชั่วโมงแสงอาทิตย์จะทำมุมเปลี่ยนไป 15 องศา

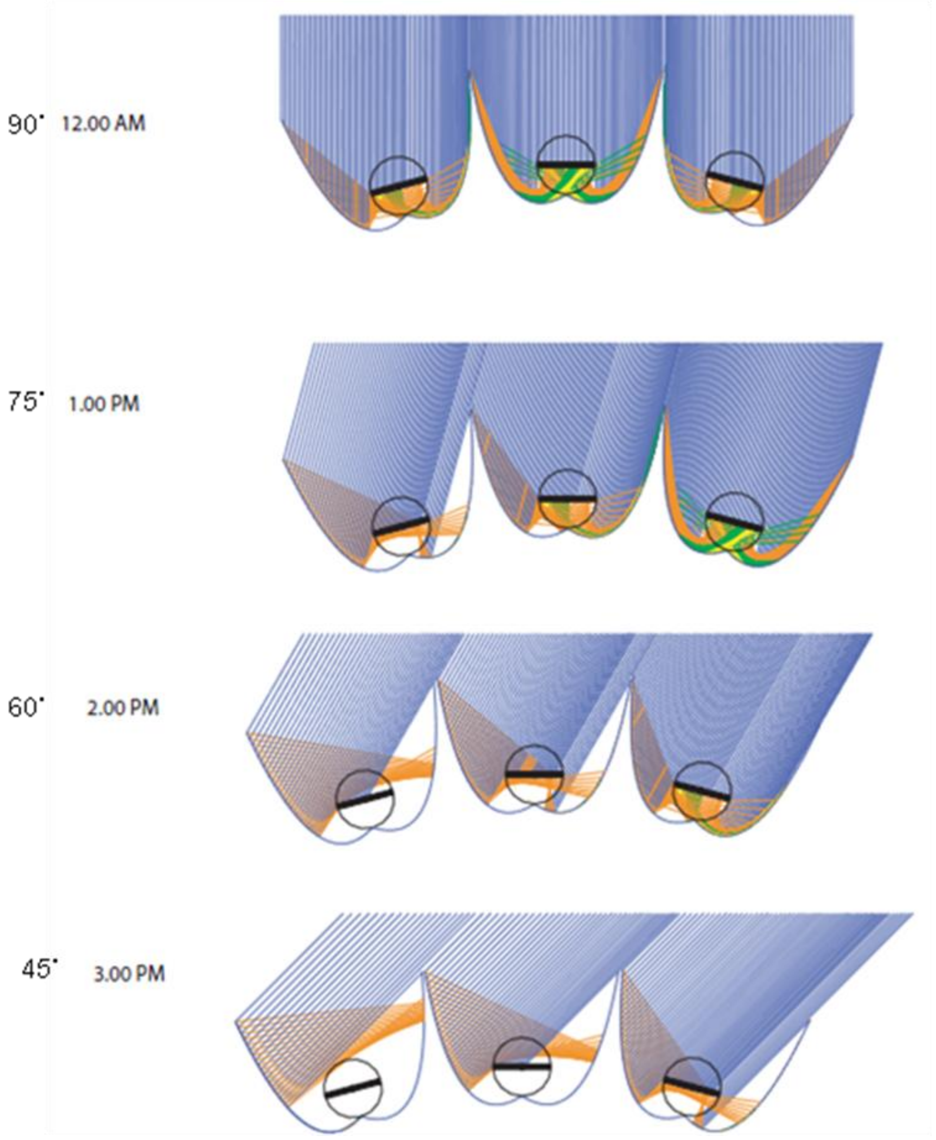
ตาราง3.5 แสดงการปรับมุมของรางพาราโบลาเข้าหากัน

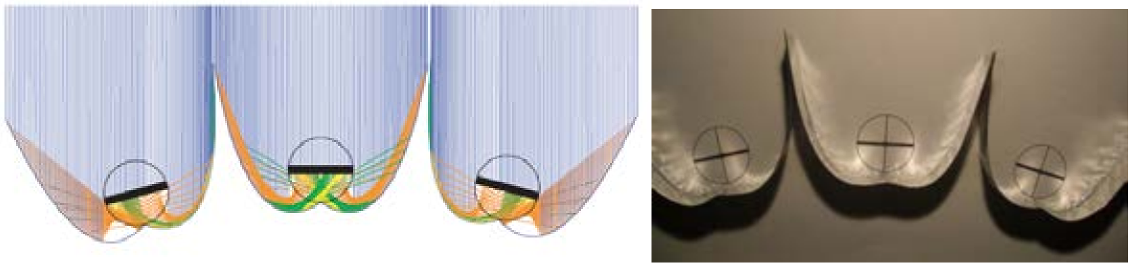
การปรับมุมของรางพาราโบลาเข้าหากัน	
5 องศา สามารถรับมุมกวาดได้ 40 องศา	
10 องศา สามารถรับมุมกวาดได้ 65 องศา	

15 องศา สามารถรับมุมกวาดได้ 80 องศา	

แสดงการรับแสงของแผงรับแสงอาทิตย์ที่ออกแบบในช่วงเวลาต่าง ๆ

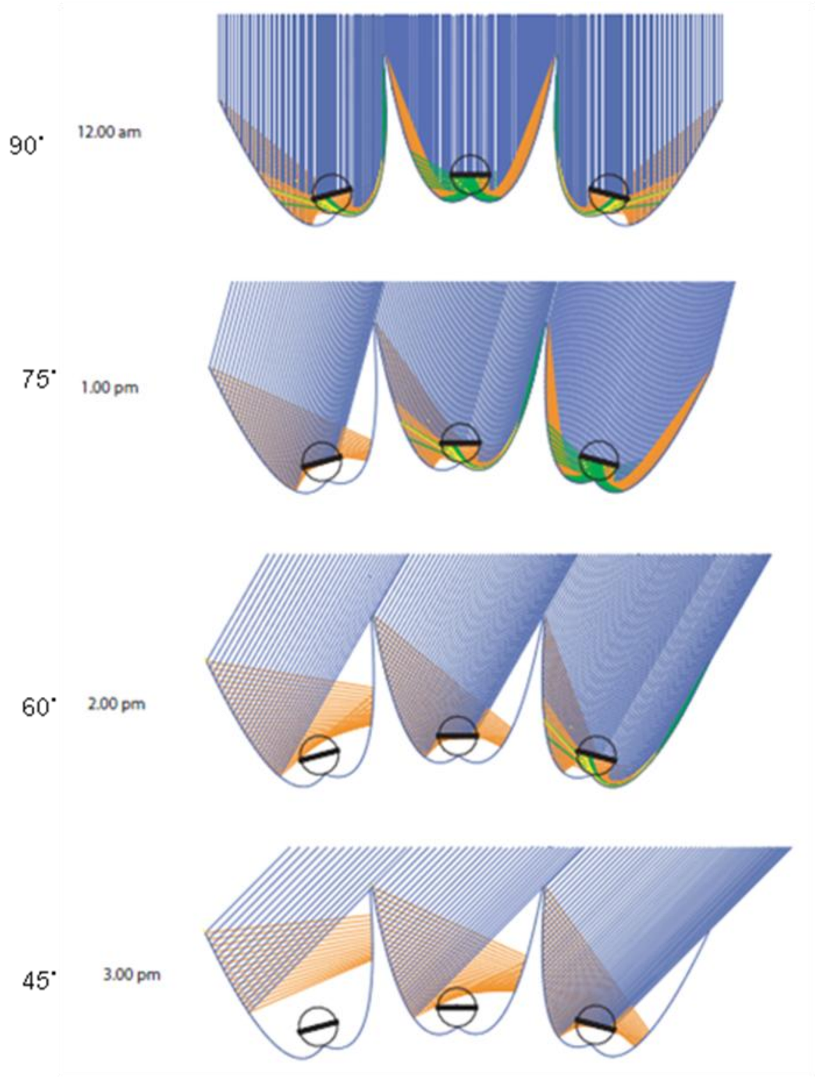
แบบที่ 1 ออกแบบให้มีการปรับมุมเข้ากัน(มุมหุบ) 5 องศา

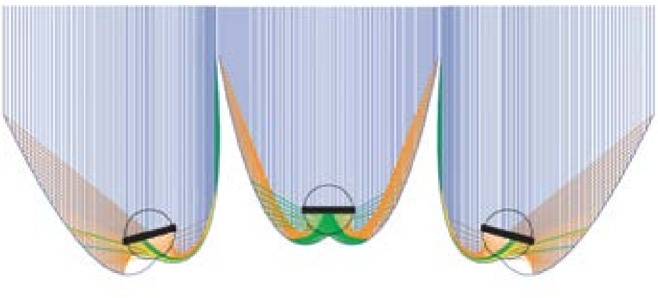




รูปที่3.13 แสดงแบบจำลองที่สร้างตามการออกแบบให้มีมุมหุบ 5 องศา โดยใช้วัสดุอะลูมิเนียมในการขึ้นโครงร่าง

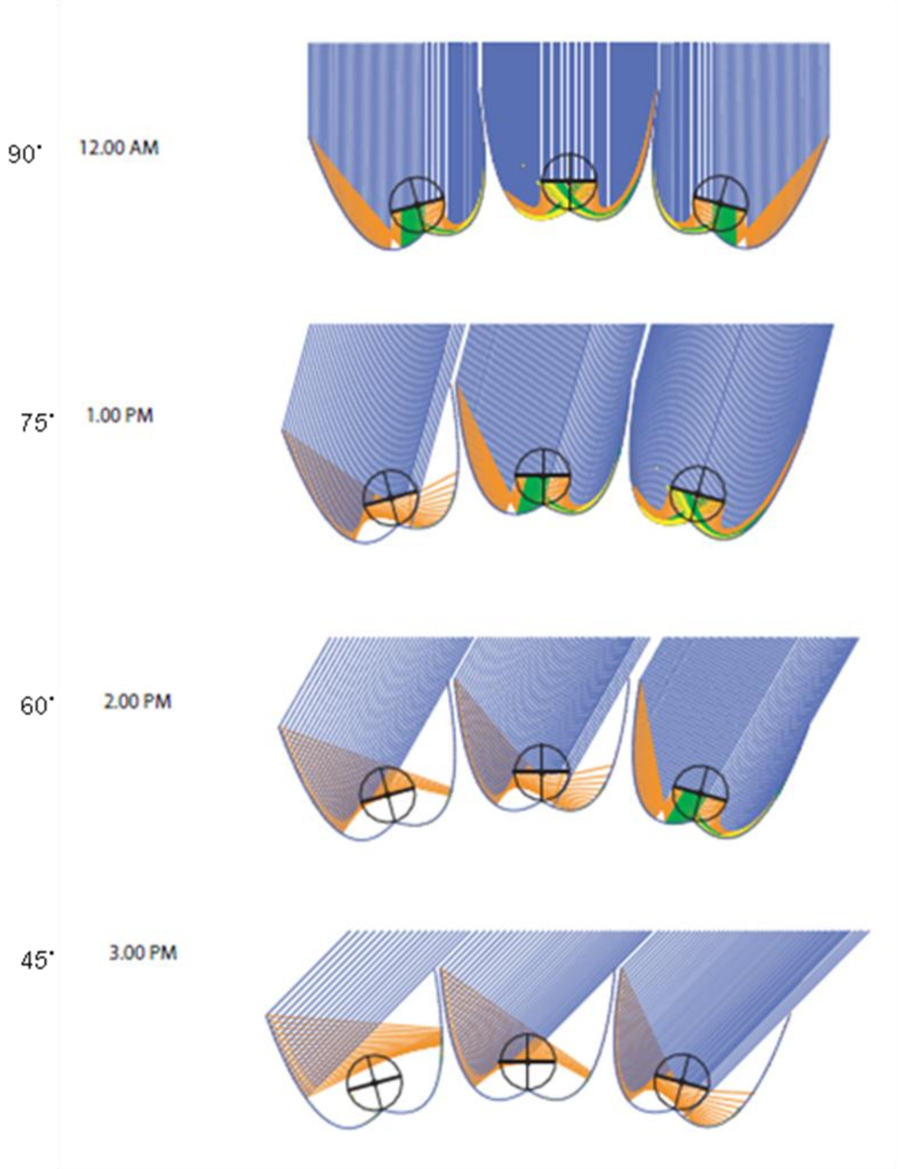
<u>แบบที่ 2</u> ออกแบบให้มีการปรับมุมเข้าหากัน(มุมหุบ) 10 องศา

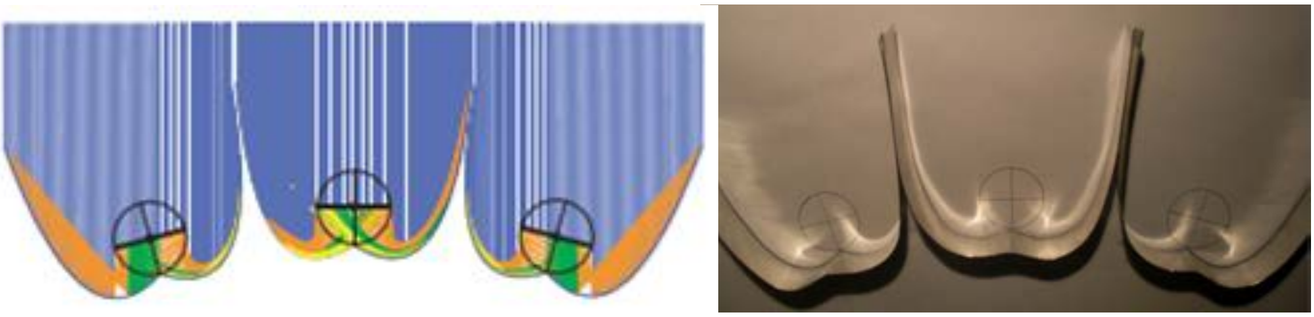




รูปที่3.14 แสดงแบบจำลองที่สร้างตามการออกแบบให้มีมุมหุบ 10 องศา โดยใช้วัสดุอะลูมิเนียมในการขึ้นโครงร่าง

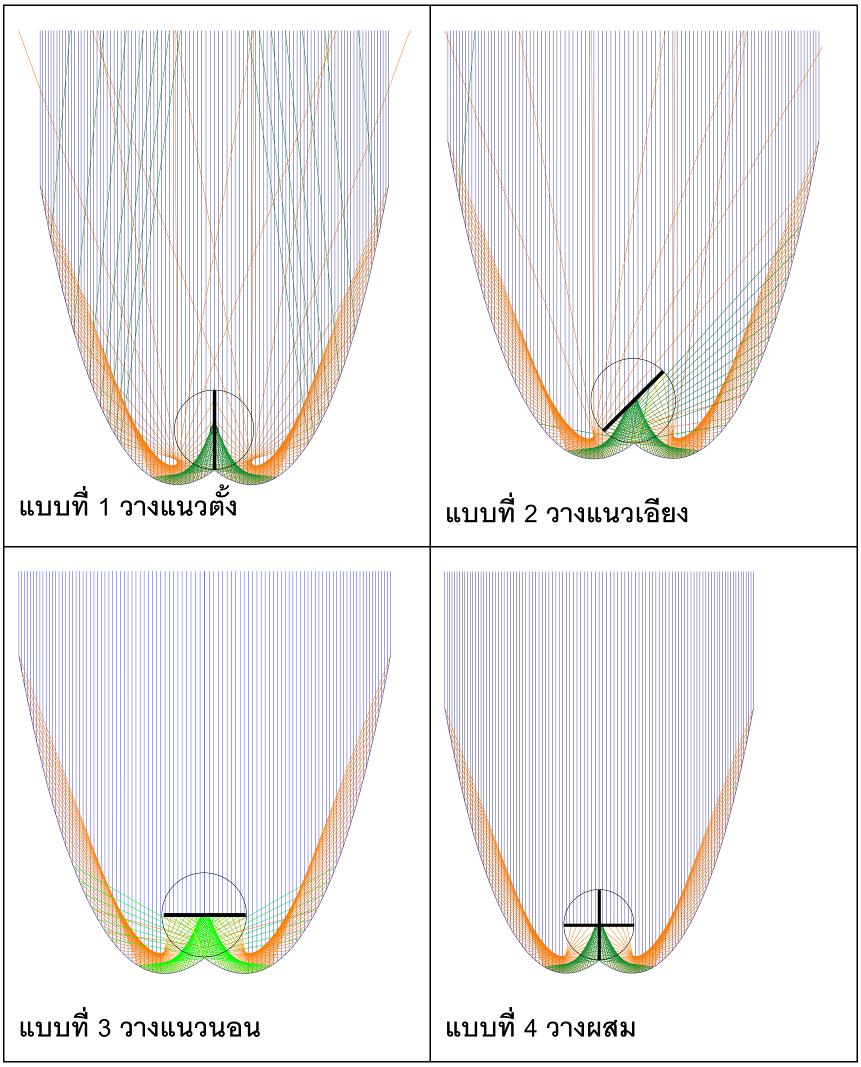
<u>แบบที่ 3</u> ออกแบบให้มีการปรับมุมเข้าหากัน(มุมหุบ) 15 องศา





รูปที่3.15 แสดงแบบจำลองที่สร้างตามการออกแบบให้มีมุมหุบ 15 องศา โดยใช้วัสดุอะลูมิเนียมในการขึ้นโครงร่าง

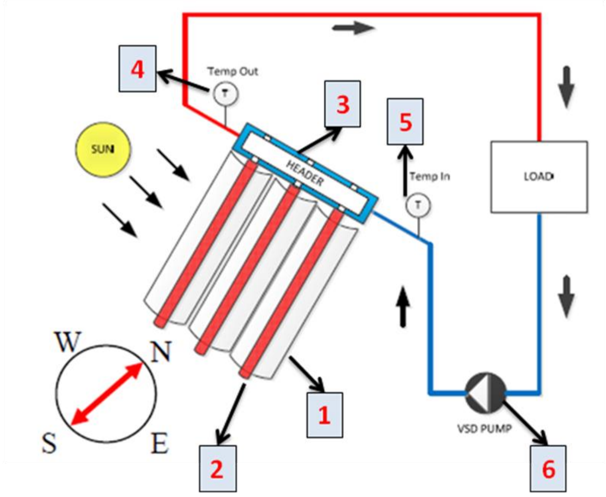
3.2.3 แนวในการวางแผ่นดูดซับแสงในท่อแก้วสุญญากาศแบบฮีตไปป



รูปที่3.16 แสดงการวางแผ่นดูดซับแสงในท่อแก้วสุญญากาศแบบฮีตไปป์

จากรูปที่3.16 จะพบว่า ในการวางแผ่นดูดซับแสงทั้ง 4 แบบนั้น การวางในแบบที่ 4 จะเกิดประสิทธิภาพสูงสุด รองลงมาคือแบบที่ 3,2,1 ตามลำดับ แต่ในปัจจุบันยังไม่มีการวางแผ่นดูดซับแสงแบบผสม จึงเลือกการวางแผ่นดูดซับแสงตามแบบที่ 3 มาใช้ในงานวิจัย

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการต่อเข้ากับระบบเพื่อหาประสิทธิภาพรวมของแผงรับแสงที่ออกแบบ



รูปที่3.17 แสดงแผงผังของระบบ(ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของแผงรับแสง)

คำอธิบายจากภาพที่ 3.17

1.รางรับแสงแบบพาราโบลาแบบผสม(CPC)

2. หลอดแก้วแบบฮีตไปป์

3.ทองแดงที่ถ่ายเทความร้อนสู่ระบบ

4.จุดวัดอุณหภูมิขาออกรางรับแสงอาทิตย์

5.จุดวัดอุณหภูมิขาเข้ารางรับแสงอาทิตย์

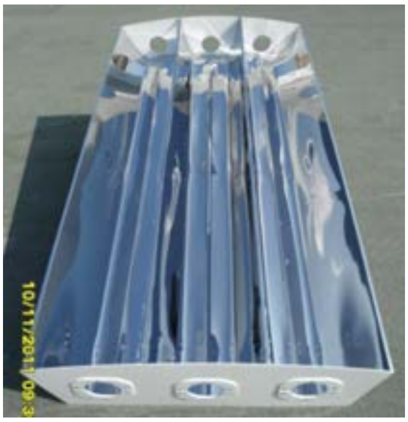
6.ปั้มน้ำมันร้อน

รูปที่3.18 แสดงระบบที่ต่อใช้งานจริง ตามแผนผัง

จากแผนผังของระบบทดสอบ เมื่อแสงตกกระทบแผงรับแสงที่ออกแบบก็จะเกิดการสะท้อนแสงไปยังหลอดแก้วสุญญากาศแบบฮีตไปป์ ทำให้เกิดความร้อนผ่านไปยังฮีตไปป์ และถ่ายเทความร้อนไปยังท่อทองแดง ทำให้เกิดน้ำมันร้อนไหลเวียนอยู่ในระบบ ตามขั้นตอนดังนี้

1) ประกอบอุปกรณ์ต่าง ๆ เข้าด้วยกันตามภาพที่ 3.17
2) เติมน้ำมันเข้าไปในระบบจนเต็ม (16 ลิตร)
3) ทำการทดสอบที่เวลา 9.00 – 15.00 นาฬิกา
4) เปิดปั้มโดยกำหนดอัตราการไหลไว้ที่ 5.0 ลิตรต่อนาที
5) เก็บข้อมูลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม อุณหภูมิน้ำมันก่อนเข้ารางรับแสงอาทิตย์ อุณหภูมิน้ำมันหลังออกจากรางรับแสงอาทิตย์ ความเข้มแสงอาทิตย์ โดยเก็บข้อมูลเป็นเวลา 4 วัน
6) นำข้อมูล อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม อุณหภูมิน้ำมันก่อนเข้ารางรับแสงอาทิตย์ อุณหภูมิน้ำมันหลังออกจากรางรับแสงอาทิตย์ ความเข้มแสงอาทิตย์ มาคำนวณหาประสิทธิภาพของรางรับแสงอาทิตย์

3.3.1 แผงรับแสงที่ออกแบบ



รูปที่ 3.19 แผงรับแสงแบบรางพาราโบลาแบบผสม(CPC) ที่เสร็จสมบูรณ์ ซึ่งมาจากการออกแบบสมการพาราโบลา $y = 9x^2$, ความกว้าง(W = 0.15) โดยปรับมุมจากพื้นระดับ 15 องศา(ขวา)

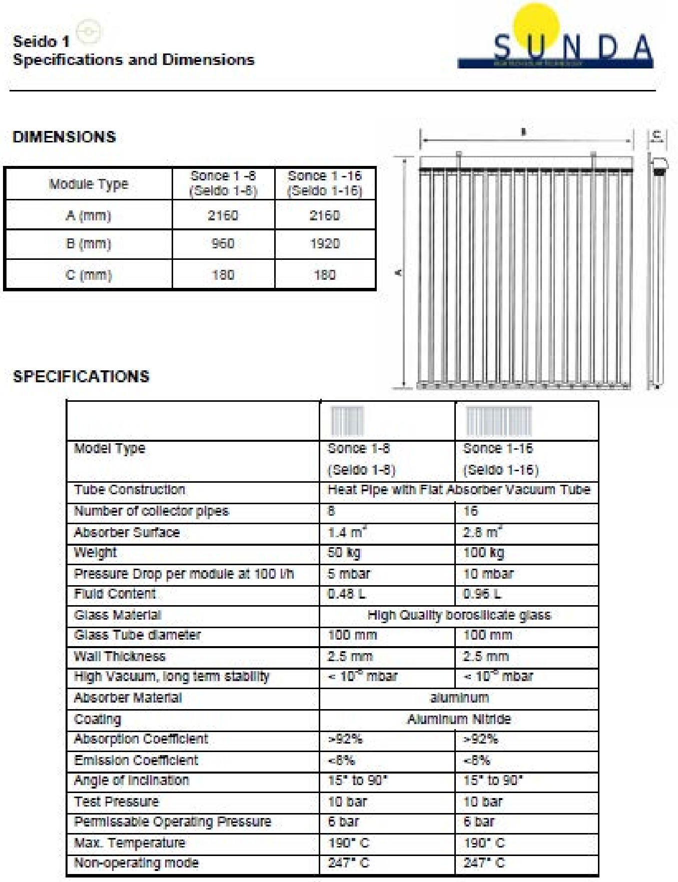
3.3.2 ระบบการถ่ายเทความร้อน

ใช้ท่อทองแดงเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีการถ่ายเทความร้อนได้ดี โดยท่อทองแดงที่นำมาใช้งานจะประกอบอยู่ติดกับด้านปลายของหลอดฮีตไปป์ ภายใต้กล่องปิดมิดชิด ดังที่แสดงในภาพ(3.20)

รูปที่3.20 แสดงชุดท่อทองแดงซึ่งจะเป็นตัวถ่ายเทความร้อนไปยังน้ำมันในระบบ

3.3.3 หลอดแก้วฮีตไปป์

เป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์แล้วส่งต่อไปยังท่อทองแดงที่ต่ออยู่ด้านปลาย โดยทำการติดตั้งหลอดในรางพาราโบลาสามราง หนึ่งรางต่อหนึ่งหลอด หลอดแก้วฮีตไปป์ในการทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ความยาว 2.16 เมตร



Seido 1
Specifications and Dimensions

SUNDA

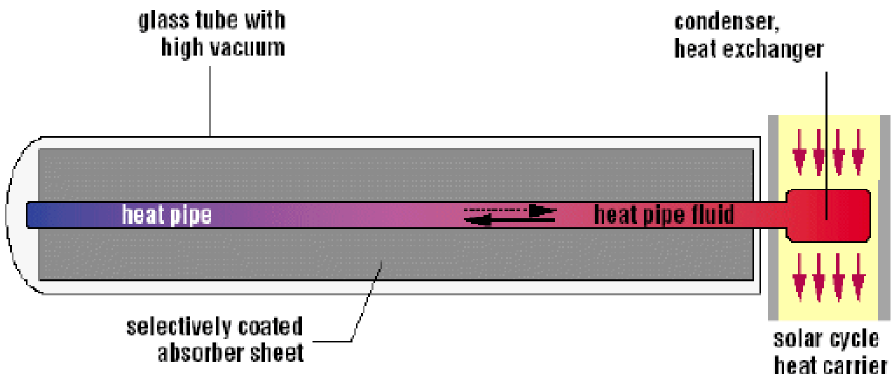
DIMENSIONS

Module Type	Sonce 1 -8 (Seido 1-8)	Sonce 1 -16 (Seido 1-16)
A (mm)	2160	2160
B (mm)	960	1920
C (mm)	180	180

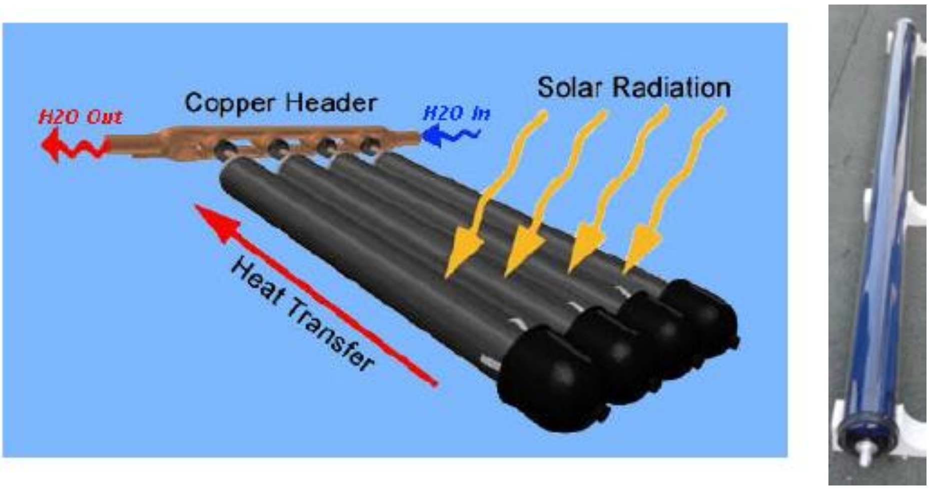
SPECIFICATIONS

Model Type	Sonce 1-8 (Seido 1-8)	Sonce 1-16 (Seido 1-16)
Tube Construction	Heat Pipe with Flat Absorber Vacuum Tube	
Number of collector pipes	8	16
Absorber Surface	1.4 m^2	2.8 m^2
Weight	50 kg	100 kg
Pressure Drop per module at 100 l/h	5 mbar	10 mbar
Fluid Content	0.48 L	0.96 L
Glass Material	High Quality borosilicate glass	
Glass Tube diameter	100 mm	100 mm
Wall Thickness	2.5 mm	2.5 mm
High Vacuum, long term stability	< 10[illegible] mbar	< 10[illegible] mbar
Absorber Material	aluminum	
Coating	Aluminum Nitride	
Absorption Coefficient	>92%	>92%
Emission Coefficient	<8%	<8%
Angle of Inclination	15° to 90°	15° to 90°
Test Pressure	10 bar	10 bar
Permissable Operating Pressure	6 bar	6 bar
Max. Temperature	190° C	190° C
Non-operating mode	247° C	247° C

รูปที่ 3.21 แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับหลอดแก้วฮีตไปป์ที่ใช้งาน (ที่มา Canadian Solar Technologies Inc.)[11]



รูปที่ 3.22 แสดงวัฏจักรการหมุนเวียนภายในของฮีทไปป์



รูปที่ 3.23 แสดงการพาความร้อนเข้าไปยังหลอดแก้ว(ซ้าย) หลอดแก้วฮีตไปป์ที่ใช้ในงานวิจัย(ขวา)

3.3.4 ของไหลที่ใช้ในระบบ

ใช้น้ำมัน Thermoil 32 เป็นน้ำมันที่ใช้ในระบบถ่ายเทความร้อน สามารถต้านทานการรวมตัวกับออกซิเจนได้ดี ไม่สลายตัวที่อุณหภูมิสูง อายุการใช้งานยาวนาน มีความหนืดต่ำ ถ่ายเทความร้อนได้ดี นอกจากนี้ยังมีความดันไอต่ำเพื่อลดการระเหย

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติของน้ำมัน Thermoil 32[12]

คุณสมบัติ	Esso Thermoil 32
ความถ่วงจำเพาะ (15 °C, kg/l)	0.872
จุดวาบไฟ (°C)	204
ความหนืด (40 °C), cSt	32
ความหนืด (100°C), cSt	5.3
อุณหภูมิใช้งานสูงสุด (°C)	
- ระบบเปิด	185
- ระบบปิด	285
ความจุความร้อน (kJ/kg°C)	
- 100 °C	2.17
- 200 °C	2.53
อุณหภูมิต่ำสุดที่จะเปิดปั๊มเวียนน้ำมัน (°C)	-20
การขยายตัว (ต่อ °C)	0.00079
อุณหภูมิที่ติดไฟได้เอง (°C)	-

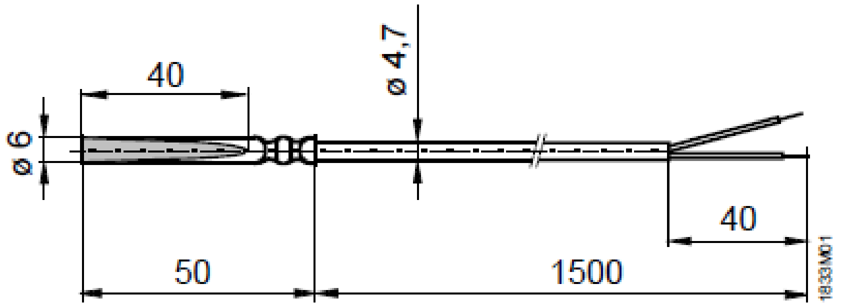
3.3.5 ปั๊มน้ำมันร้อน

ใช้ปั๊มขนาด 746 วัตต์ (W) ซึ่งเป็นปั๊มสำหรับน้ำมันและทนอุณหภูมิสูง เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการหมุนเวียนของน้ำมันในระบบหลังจากรับความร้อนโดยตรงกับท่อทองแดง ปั๊มสามารถทำงานที่ความถี่ไฟฟ้าได้มากสุดที่ 50 เฮิรตซ์ (Hz) นำมาใช้สำหรับปรับอัตราการไหลของน้ำมันในระบบ

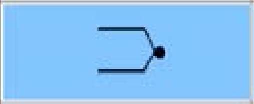
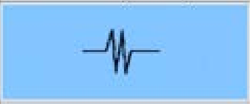
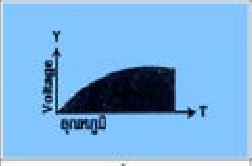
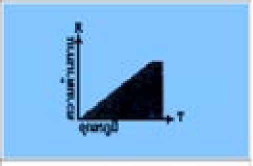
รูปที่3.24 ปั๊มน้ำมันร้อนยี่ห้อ มิซูบิชิ รุ่น SF-JR

3.3.6 ตัวตรวจวัดอุณหภูมิ

ใช้ระบบ RTD (Resistance Temperature Detectors) เป็นตัวตรวจวัดอุณหภูมิ โดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน ซึ่งมีความแม่นยำมากกว่า Therrmo couple ซึ่งในการทดลองใช้เซ็นเซอร์รุ่น SIEMENS QAP21.2 (ดังรูปที่3.20)



รูปที 3.25 ตัวตรวจวัดอุณหภูมิ หรือเซ็นเซอร์ทีใช้ในการทดลอง [13-14]

หัววัด	เทอร์มอคัปเปิล	อาร์ทีดี (Pt100)
สัญญลักษณ์		
ลักษณะกราฟเอาต์พุต		
ข้อดี	• ไม่ต้องใช้ไฟเลี้ยง • ง่าย • ไม่แพง • ใช้งานได้หลากหลาย • ช่วงการวัดอุณหภูมิกว้าง	• เสถียรภาพสูง • เที่ยงตรงที่สุด • มีความเป็นลิเนียร์มากกว่า เทอร์มอคัปเปิล
ข้อเสีย	• ไม่มีลักษณะเส้นตรง • แรงดันต่ำ • ไม่ค่อยเสถียร • ความไวต่ำสุด	• แพง • ต้องการไฟเลี้ยง • มีความร้อนเกิดขึ้นที่ตัวมันเอง
ช่วงการวัดมากที่สุด	-270 ถึง 1820 °C	-250 ถึง 600 °C
Repeatability	1.1 °C ถึง 8.25 °C	0.0275 °C ถึง 0.055 °C

ตารางที่ 3.7 เปรียบเทียบคุณสมบัติของเซนเซอร์แบบเทอร์โมคอปเปิลและอาร์ทีดี[13-14]

3.3.7 Variable Frequency Drive (VFD)

เป็นตัวควบคุมอัตราการไหลของปั้ม โดยผู้ใช้สามารถปรับความถี่และแรงดันไฟฟ้า เพื่อให้อัตราการไหลมีค่าตามที่ต้องการ

รูปที่ 3.26 Variable Frequency Drive (VFD) ยี่ห้อ SIEMENS รุ่น SED2

3.3.8 เครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าแบบบันทึกได้ (Data Logger)

เป็นเครื่องเก็บบันทึกข้อมูลโดยอัตโนมัติ ซึ่งในการทดลองจะใช้ในการบันทึกความเข้มแสง ของไฟรานอมิเตอร์ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม อุณหภูมิในระบบจาก Sensor สามารถเลือกความถี่ในการบันทึกข้อมูลได้

รูปที่ 3.27 Data Logger ยี่ห้อ Hioki รุ่น LR8400-2

3.3.9 เซลล์แสงอาทิตย์

รูปที่ 3.28 แผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลอง

ใช้ในการทดลองหาประสิทธิภาพของแผงรับแสงที่ออกแบบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจะใช้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนหลายผลึก(Polycrystalline) ขนาดความยาว 8 เซนติเมตร กว้าง 6 เซนติเมตร 6 Volt 100 MAH และ 0.6 วัตต์

3.3.10 มัลติมิเตอร์แบบดิจิตอล

อุปกรณ์ใช้สำหรับวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นแบบตัวเลขแสดงบนหน้าปัดแสดงผล

รูปที่ 3.29 มัลติมิเตอร์แบบดิจิตอล

3.3.11 หลอดไฟแบบฮาโลเจน (Halogen Lamp)

รูปที่ 3.30 หลอดฮาโลเจน

เป็นหลอดที่อาศัยการกำเนิดแสงจากความร้อน โดยให้กระแสไหลผ่านไส้หลอดที่ทำด้วยทังสเตนจนร้อน แล้วเปล่งแสงออกมา เช่นเดียวกับหลอด incandescent ต่างกันตรงที่มีการบรรจุสารตระกูลฮาโลเจน ได้แก่ ไอโอดีน คลอรีน โบรมีน เพื่อป้องกันการระเหิดของไส้หลอด จะทำงานที่อุณหภูมิสูงประมาณ 3000 องศาเคลวิน ปัจจุบันหลอดฮาโลเจนจะมีการเคลือบสารพิษเรียกว่า Dichroic Film ที่จานสะท้อนแสง ทำให้ความร้อนส่วนใหญ่ ประมาณ 60% กระจายออกทางด้านหลังหลอด[18]

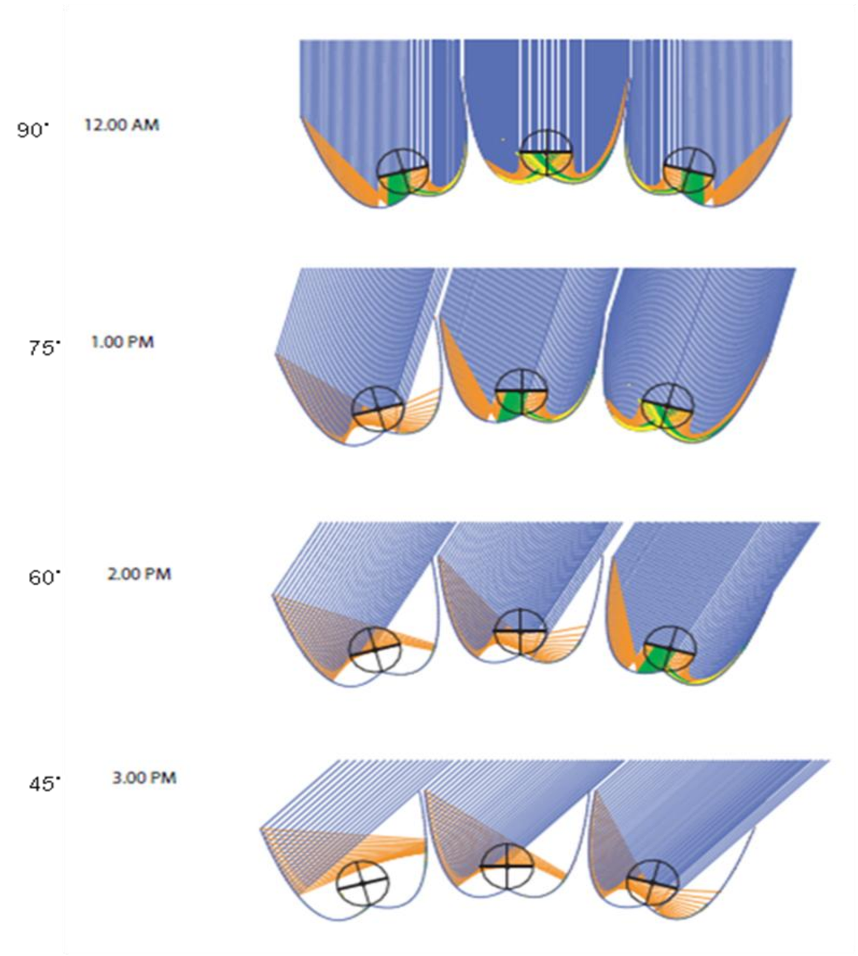
3.3.12 ลักซ์มิเตอร์แบบดิจิตอล(Digital Lux Meter)

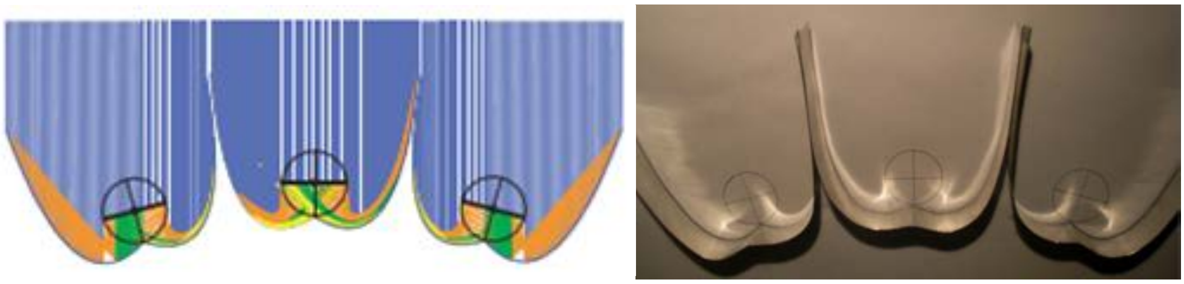
รูปที่ 3.31 ลักซ์มิเตอร์แบบดิจิตอล (Digital Lux Meter)

ลักซ์มิเตอร์เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดความสว่าง การวัดแสงแบบนี้จะต่างไปจากการวัดค่าจริงของพลังงานแสงโดยการสะท้อนของวัตถุ หรือจากต้นกำเนิดแสง ซึ่งค่าที่วัดได้จาก Lux meter จะมีหน่วยเป็น ความสว่าง (ลักซ์ หรือ ลูเมน/ตารางเมตร) ประสิทธิภาพการส่องสว่าง ลูเมนต์ ต่อ วัตต์

บทที่ 4
การหาประสิทธิภาพของแผงรับแสงที่ออกแบบ

4.1 แบบจำลองทางกายภาพของแผงรับแสงที่ใช้ในการออกแบบเพื่อทดสอบระบบ
เป็นแผงรับแสงที่ออกแบบให้มีการปรับมุมเข้าหากัน(มุมหุบ) 15 องศา





รูปที่ 4.1 แสดงการสะท้อนแสงของแบบจำลองทางกายภาพรางพาราโบลาแบบผสมอย่างง่าย(ขวา) และภาพจำลองทางคณิตศาสตร์(ซ้าย)

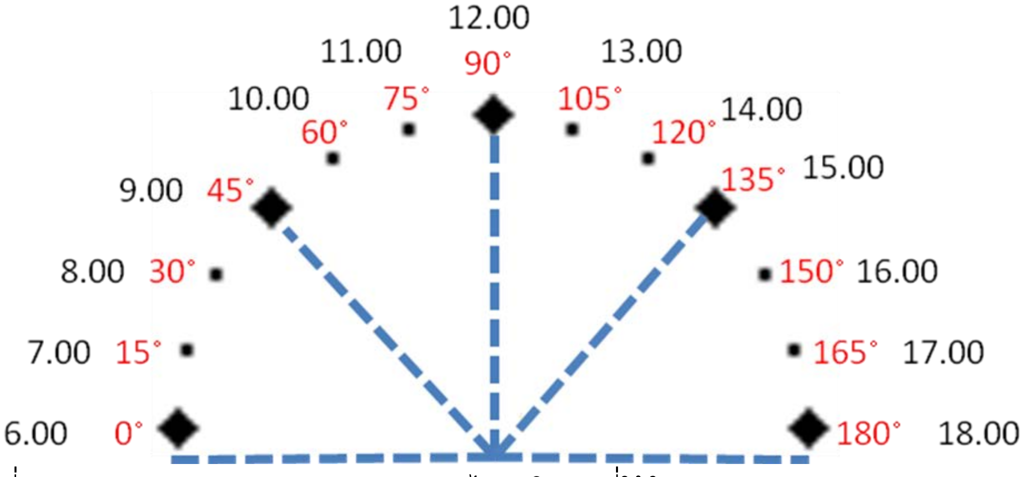
4.2 ทดสอบประสิทธิภาพของแผงรับแสงแบบรางพาราโบลาที่ออกแบบ

4.2.1 ทดสอบประสิทธิภาพของรางพาราโบลาที่ออกแบบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์(ประสิทธิภาพเชิงแสง)

ในการทดสอบประสิทธิภาพเชิงแสงนี้ อุปกรณ์ที่ใช้วัดความเข้มแสงคือ ลักซ์มิเตอร์ เนื่องจากในการทดสอบโมเดลที่สร้างขึ้นเป็นโมเดลขนาดเล็กการใช้ลักซ์มิเตอร์ในการวัดจึงเหมาะสมกว่าการใช้พารานอมิเตอร์ที่มักใช้ทดลองเก็บข้อมูลความเข้มของแสงอาทิตย์จริง

<u>ขั้นตอนการทดลอง</u>

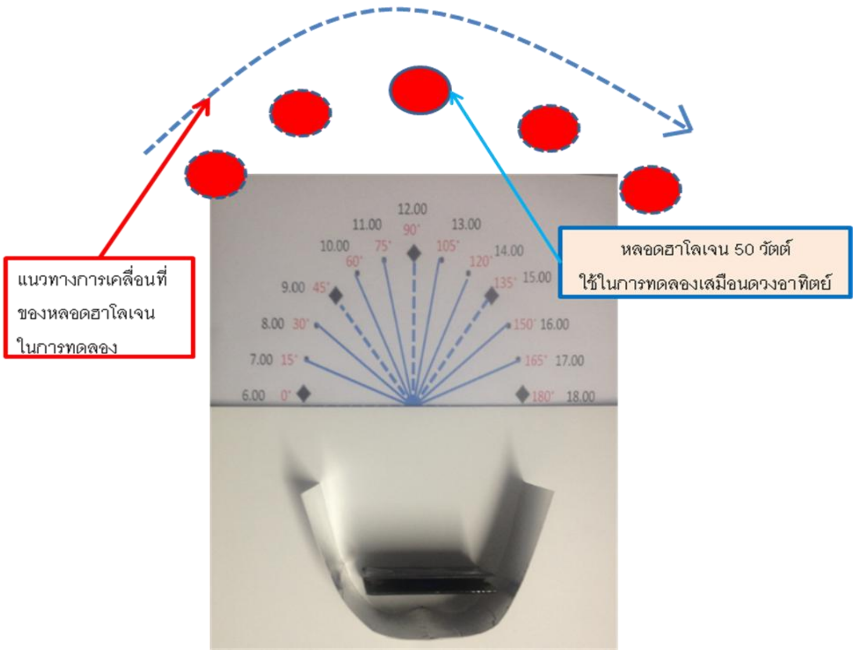
1. ใช้หลอดไฟฮาโลเจน ขนาด 50 วัตต์ แทนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยวางห่างจากแผงโซล่าเซลล์ 1แผ่นซึ่งมี (ขนาดยาว 8 เซนติเมตร กว้าง 6 เซนติเมตร 6 Volt 100 MAH 0.6 วัตต์) ทำการวัดความต้านทาน(V) หน่วยเป็นโวลต์ และกระแสไฟ(I) หน่วยเป็นแอมป์ เพื่อหากำลังไฟฟ้า(P) หน่วยเป็นวัตต์ ในการวัดจะทำการปรับหลอดไฟให้ทำมุมเปลี่ยนไปครั้งละ 15 องศา(ทุก1 ชั่วโมง = 15 องศา) โดยเริ่มทดลองที่ 9.00 น. – 15.00 น.



รูปที่ 4.2 แสดงทิศทางการปรับมุมของหลอดไฟฮาโลเจนที่ใช้ในการทดลองหาประสิทธิภาพเชิงแสง

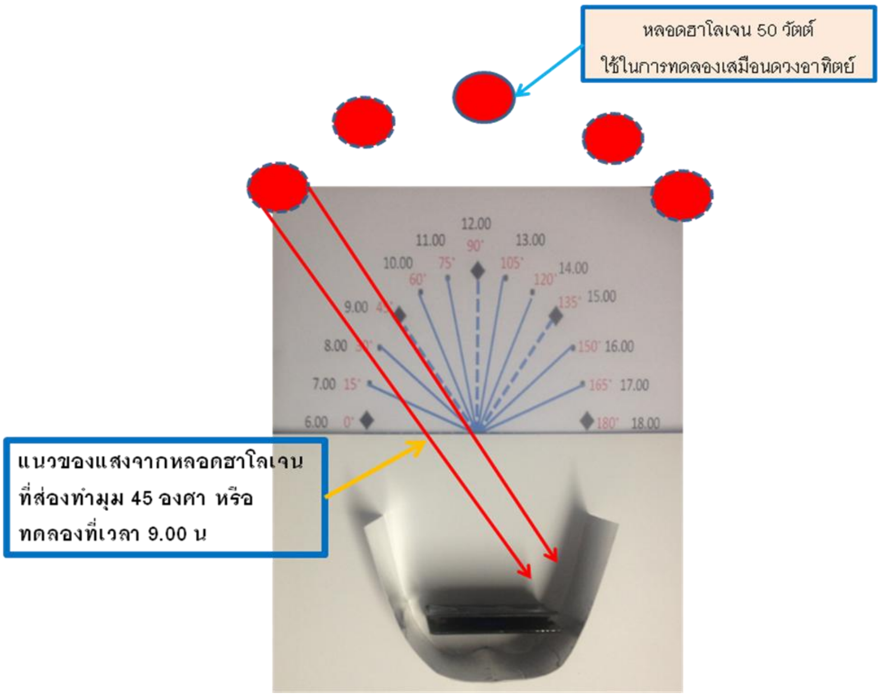
2. สร้างรางรับแสงแบบจำลองขนาดเล็กอย่างง่ายโดยให้รางที่ปรับมุม 15 องศา โดยใช้แผ่นโซล่าเซลล์ทำหน้าที่เสมือนหลอดรับแสง วางอยู่ตำแหน่งแกนกลางของแบบจำลองรางพาราโบลาที่สร้างขึ้น ทำการวัดความต้านทาน(V) หน่วยเป็นโวลต์ และกระแสไฟ(I) หน่วยเป็นแอมป์ เพื่อหากำลังไฟฟ้า(P) หน่วยเป็นวัตต์
3. นำกำลังไฟฟ้า(P) ที่ได้จากข้อ1 และข้อ 3 มาคิดหาประสิทธิภาพเชิงแสง ณ ช่วงเวลาต่างๆ และประสิทธิภาพเชิงแสงโดยรวม

<u>การทดลอง</u>

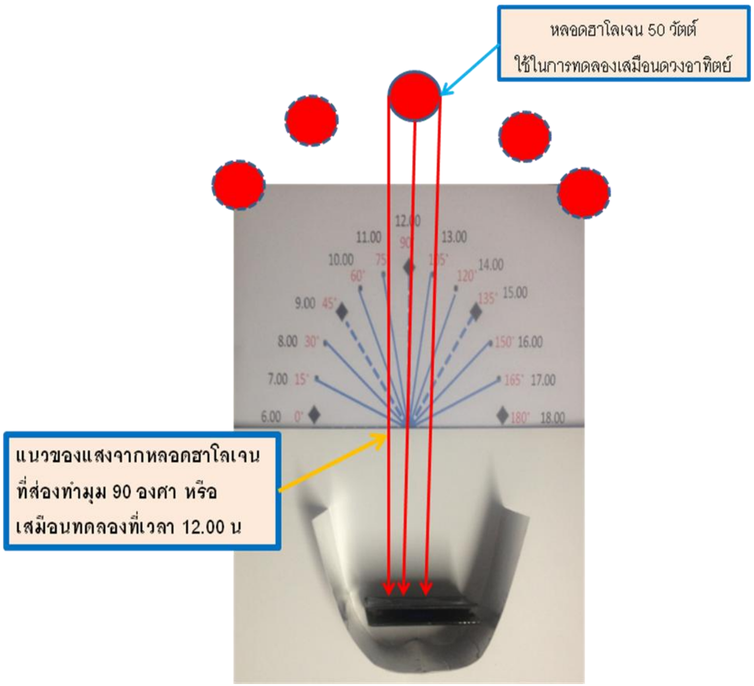


รูปที่ 4.3 แสดงรูปแบบการทดลอง

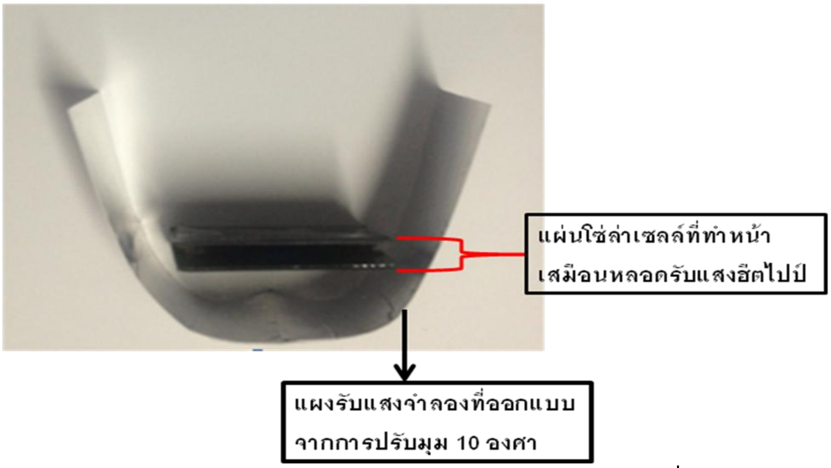
โดยยึดแผงรับแสงที่ออกแบบให้อยู่กับที่ วงกลมสีแดงคือ หลอดฮาโลเจนที่ทดลองโดยปรับมุมตามทิศทางมุมที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.2 เริ่มทดลองตั้งแต่เวลา 9.00 น. แสงจากหลอดฮาโลเจนทำมุม 45 องศากับแผงรับแสงที่ออกแบบ แล้วปรับมุมเพิ่มทีละ 15 องศาไปเรื่อยๆ จนถึงมุมสุดท้ายที่ 150 องศาก็คือเวลา 15.00 น (วัดค่ากระแส และแรงดัน ที่มุม 45,60,75,90,105,120,135 องศา) ในการทดลองแต่ละมุมจะใช้ลักมิเตอร์วัดความสว่างของแสง ณ มุมนั้นไว้ด้วย



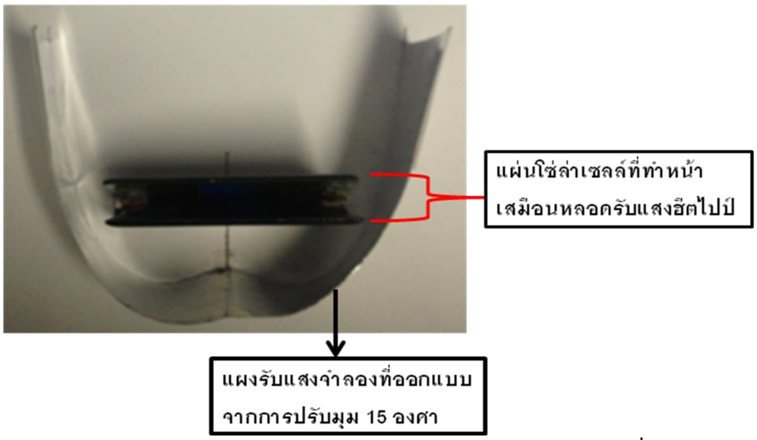
รูปที่ 4.4 แสดงตัวอย่างทิศทางแสงของหลอดฮาโลเจนเมื่อทำมุม 45 องศากับแผงรับแสง



รูปที่ 4.5 แสดงตัวอย่างทิศทางแสงของหลอดฮาโลเจนเมื่อทำมุม 90 องศากับแผงรับแสง

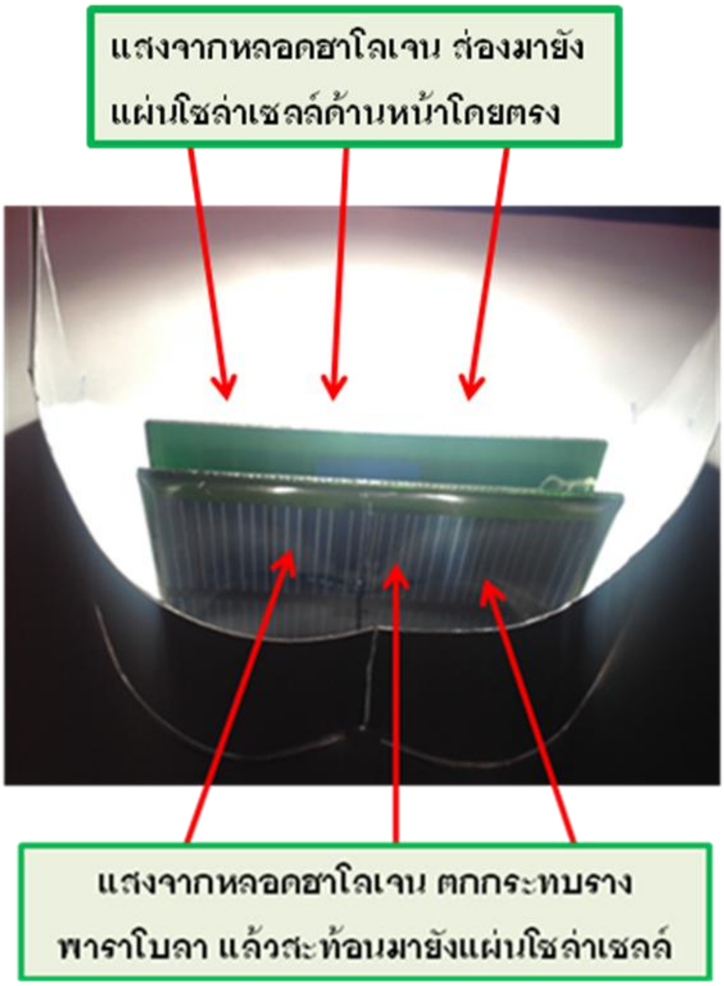


รูปที่ 4.6 แสดงแบบจำลองรูปแผงรับแสงออกแบบปรับมุม 10 องศา เพื่อใช้ในการทดลอง

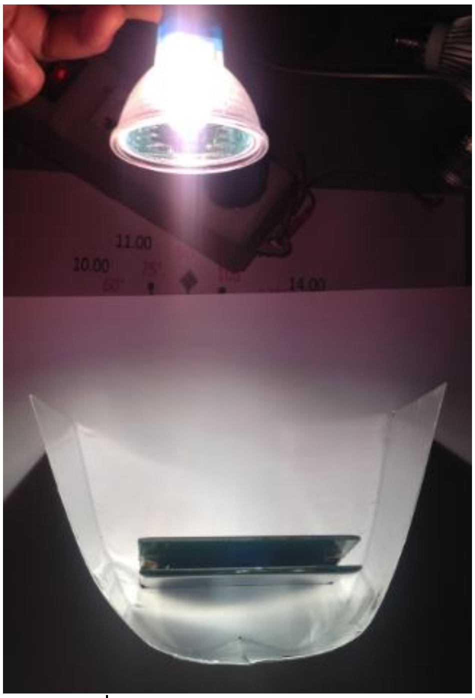


รูปที่ 4.7 แสดงแบบจำลองรูปแผงรับแสงออกแบบปรับมุม 15 องศา เพื่อใช้ในการทดลอง

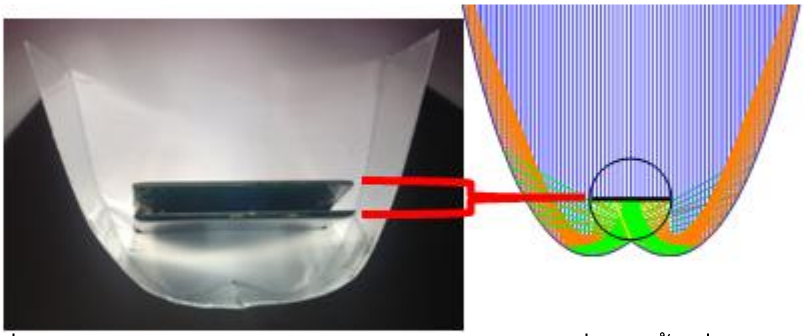
รูปที่ 4.8 แสดงการต่อสายไฟจากแผงโซล่าเซลล์เพื่อใช้วัดค่ากระแสและแรงดันในการทดลอ



รูปที่ 4.9 แสดงแนวของแสงที่เกิดจากการทดลองจริง



รูปที่ 4.10 แสดงตัวอย่างการทดลองจริง



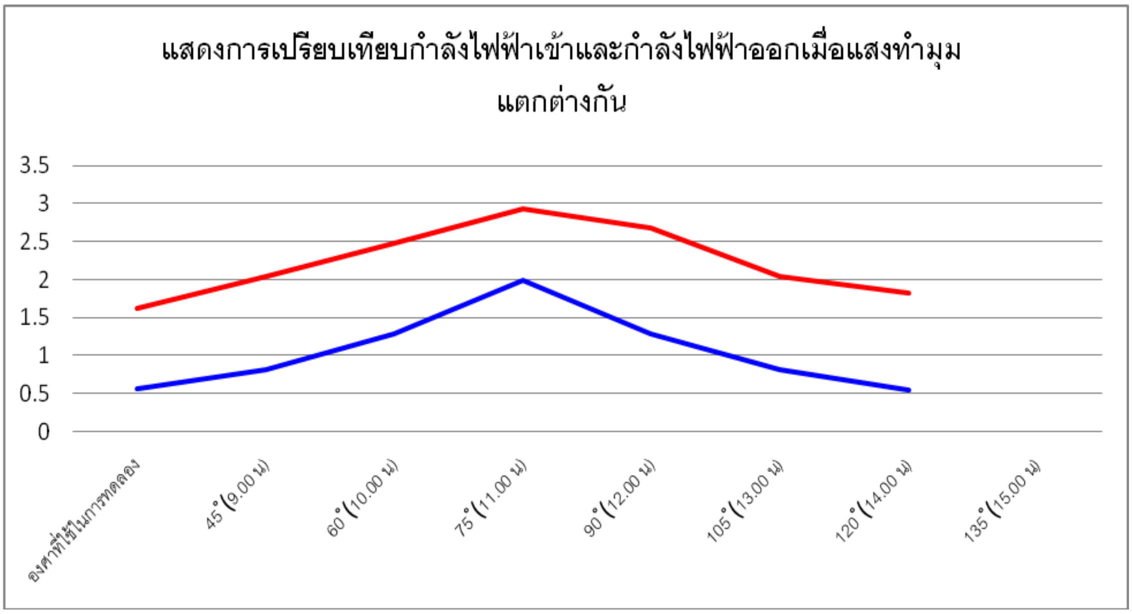
รูปที่ 4.11 แสดงการวางแผ่นโซล่าเซลล์ในแบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ทดลอง

สาเหตุที่เลือกวางแผ่นโซล่าเซลล์แนวนี้ในการทดลองเพื่อให้สอดคล้องกับแนวการวางแผ่นดูดซับแสงในท่อแก้วฮีตไปป์ตามหัวข้อ 3.2.3 ซึ่งเลือกการวางแบบนี้ในการทดสอบประสิทธิภาพเชิงกลของระบบ

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบแนวแสงที่เกิดจากการทดลองเมื่อใช้หลอดฮาโลเจน 1 หลอด

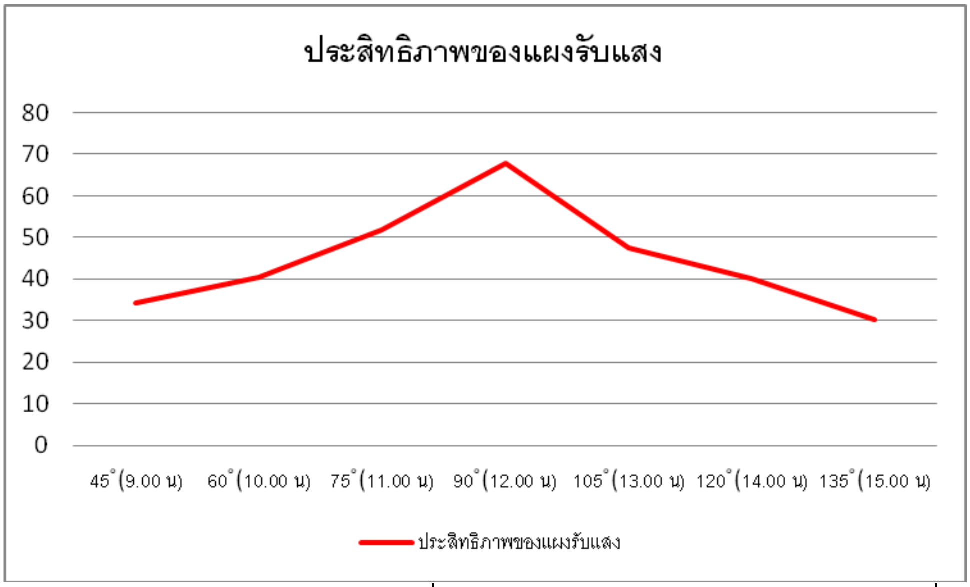
การทดลอง		**ทดลองที่มุม** 45˚ (**เวลา** 9.00)	**ทดลองที่มุม** 90˚ (**เวลา** 12.00)	**ทดลองที่มุม** 150˚ (**เวลา** 16.00)
รางพาราโบลาที่ออกแบบปรับมุม 15 องศา	ใช้หลอดฮาโลเจน 1 หลอด			

ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์หาได้จากสมการ $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$



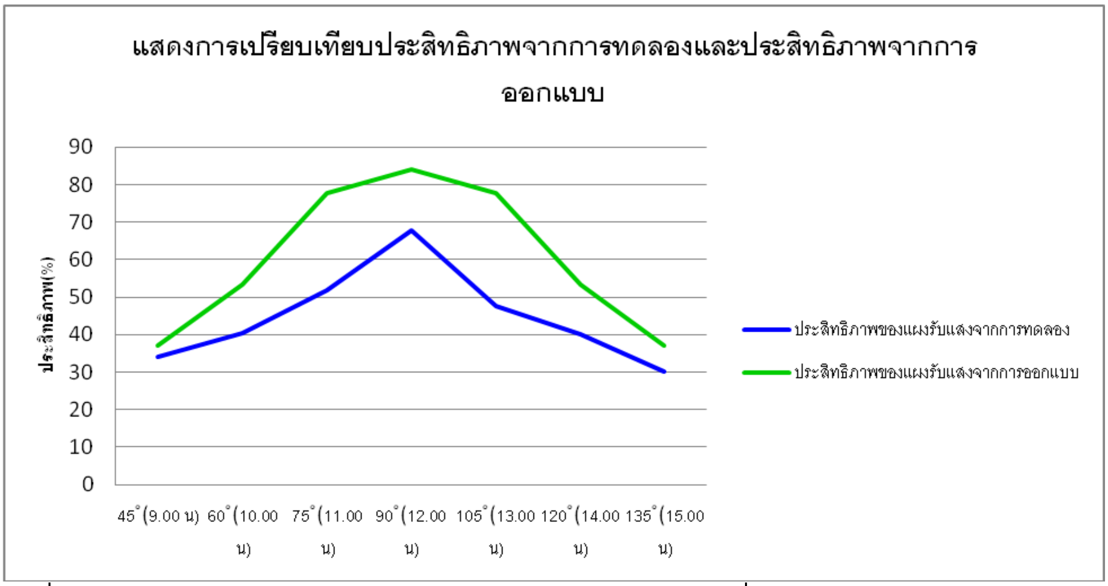
รูปที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ได้จากแผงโซล่าเซลล์กับกำลังไฟฟ้าที่ได้จากรางพาราโบลาแบบผสมที่ปรับมุม 15 องศา ทดลองโดยใช้หลอดฮาโลเจน 1 หลอด ณ ช่วงเวลาต่างๆ

กราฟเส้นสีน้ำเงิน คือ กำลังไฟฟ้าจากรางรับแสงที่ปรับมุมเข้าหากัน 15 องศา กราฟเส้นสีแดง คือ กำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากแผงโซล่าเซลล์ กราฟทั้งสองให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดในช่วงเที่ยงหรือเมื่อแสงทำมุม 90 องศากับแบบจำลอง และค่อยๆลดลงแบบสมมาตรกัน



รูปที่ 4.13 แสดงประสิทธิภาพของแผงรับแสงที่ออกแบบปรับมุม 15 องศาจากแนวระดับ เมื่อทดลองโดยใช้หลอดฮาโลเจน 1 หลอด ณ ช่วงเวลาต่างๆ

จากรูป 4.13 ประสิทธิภาพเฉลี่ยสูงสุด 67.68% เมื่อแสงทำมุม 90 องศา ประสิทธิภาพเฉลี่ยต่ำสุด 30.16% เมื่อแสงทำมุม 135 องศา



รูปที่ 4 .14 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผงรับแสงที่ออกแบบปรับมุม 15 องศาจากการทดลองและการออกแบบ

จากรูป 4.14 ประสิทธิภาพจากการออกแบบจะสูงกว่าประสิทธิภาพจากการทดลอง โดยประสิทธิภาพสูงสุดของการออกแบบเท่ากับ 84.1% ที่เวลา 12.00 น.หรือเมื่อแสงทำมุม 90 องศา ขณะที่ประสิทธิภาพสูงสุดจากการทดลองเท่ากับ 67.68% ที่เวลา 12.00 เช่นกัน ประสิทธิภาพจากการทดลองและการออกแบบแตกต่างกัน 16.42% สาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพของการออกแบบสูงกว่าประสิทธิภาพของการทดลอง มีหลายปัจจัยเป็นองค์ประกอบ ในการสร้างโมเดลสำหรับใช้ทดลอง บริส่วนที่โค้งในโมเดลเกิดรอยย่นของกระดาษสะท้อนแสงทำให้แสงสะท้อนได้ไม่ 100% และในการออกแบบนั้น แสงอาทิตย์เป็นแสงที่ส่องมาในระยะอนันต์ไม่เหมือนในการทดลองที่เราจำกัดระยะของหลอดไฟซึ่งเป็นหลอดฮาโลเจนที่มีความร้อนสูง ตามทฤษฏีของแผ่นโซล่าเซลล์เมื่อความร้อนสูงจะเกิดเป็นความสูญเสีย แผ่นโซล่าเซลล์ที่ทดสอบจึงทำงานได้ประสิทธิภาพที่น้อยลง

4.2.2 ทดสอบประสิทธิภาพรวมของรางพาราโบลาที่ออกแบบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์(ประสิทธิภาพเชิงกล)

การหาประสิทธิภาพของแผงรับแสง โดยการทดลองเก็บข้อมูลในช่วงวันที่ 7-10 ธันวาคม 2554 เนื่องจากรางรับแสงอาทิตย์เป็นแบบพาราโบลาและมีการสูญเสียน้อย จึงใช้สมการนี้ในการหาประสิทธิภาพของรางรับแสงอาทิตย์

$$\eta = \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in}) / I A \tag{4.1}$$

เมื่อ η = ประสิทธิภาพของรางรับแสงอาทิตย์, %

$\dot{m}$ = อัตราการไหลของน้ำมัน, kg/s

C_p = ค่าความร้อนจำเพาะของ ๆ ไหล, kJ/kg ^oC

T_{out} = อุณหภูมิของน้ำมันออกรางรับแสงอาทิตย์, ^oC

T_{in} = อุณหภูมิของน้ำมันเข้ารางรับแสงอาทิตย์, ^oC

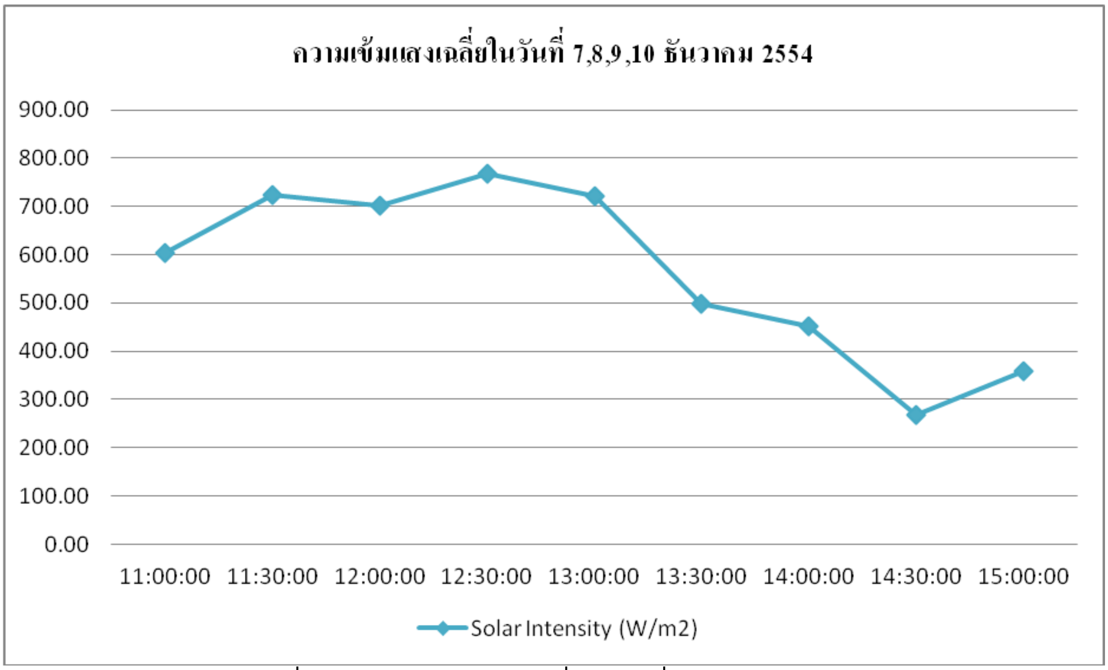
A = พื้นที่ของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์, m^2

= กว้าง (m) x ยาว (m)

I = ค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์, W/m^2

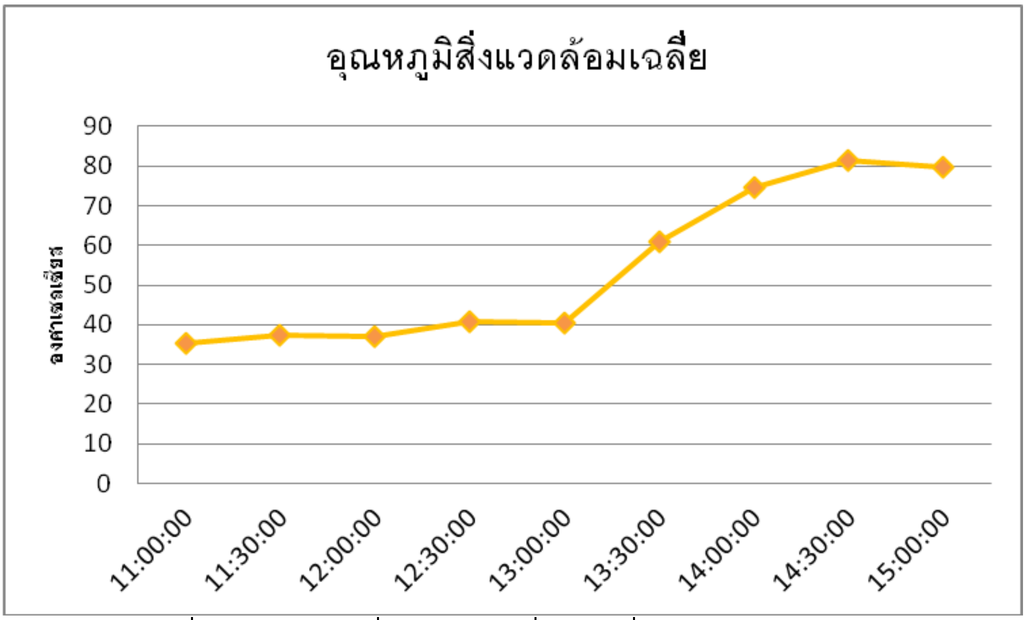
4.3 ผลการทดสอบ

ทดลองด้วยอัตราการไหล 5 ลิตรต่อนาที โดยการปรับค่า VFD ไว้ที่ความถี่ 5 เฮิรตซ์ (Hz) ทดลองเป็นเวลา 4 วันโดยเก็บข้อมูลความเข้มแสง อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและอุณหภูมิน้ำมัน เนื่องจากสภาพอากาศมีเมฆมาก ทำให้ในบางช่วงเวลาความเข้มแสงอาทิตย์ลดน้อยลง



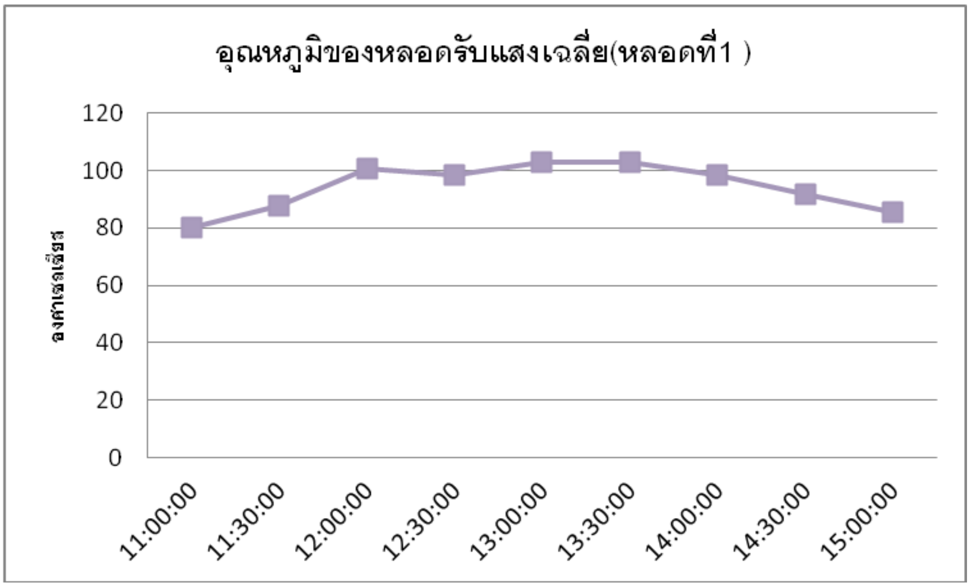
รูปที่ 4.15 ความเข้มแสงเฉลี่ยในวันที่ 7-10 ธันวาคม 2554

ความเข้มของแสงอาทิตย์เฉลี่ยมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 768.28 w/m^2 ซึ่งตรงกับช่วงเวลา 12.30 น. โดยภาพรวมของกราฟ(ภาพที่ 4.15) ความเข้มแสงเพิ่มขึ้นแล้วค่อยๆลดลงตามช่วงเวลาซึ่งถือว่าเป็นไปตามทิศทางของแสง อาจมีบางช่วงเวลาที่แสงอาจลดลงต่ำเนื่องจากสภาพอากาศมีเมฆมาก

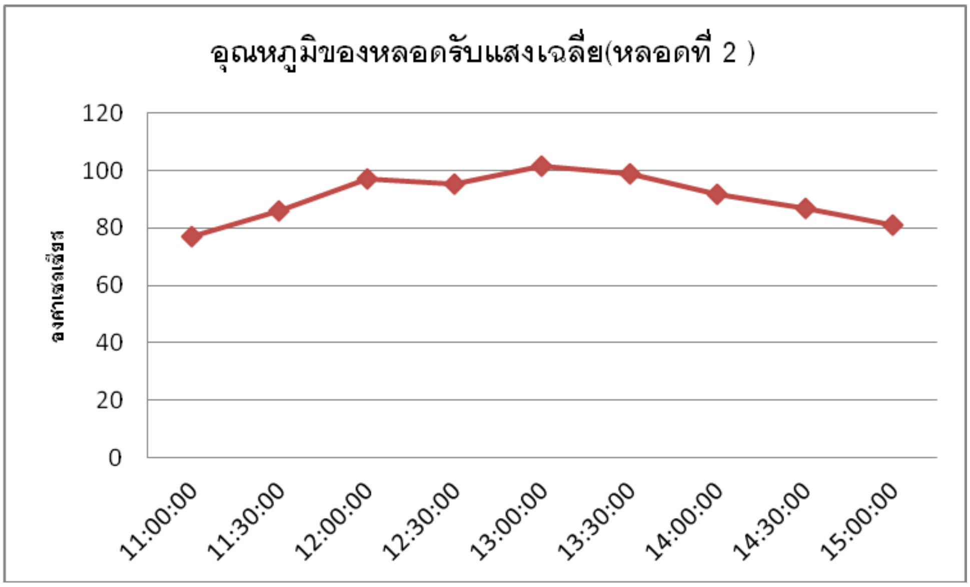


รูปที่ 4.16 อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยในวันที่ 7-10 ธันวาคม 2554

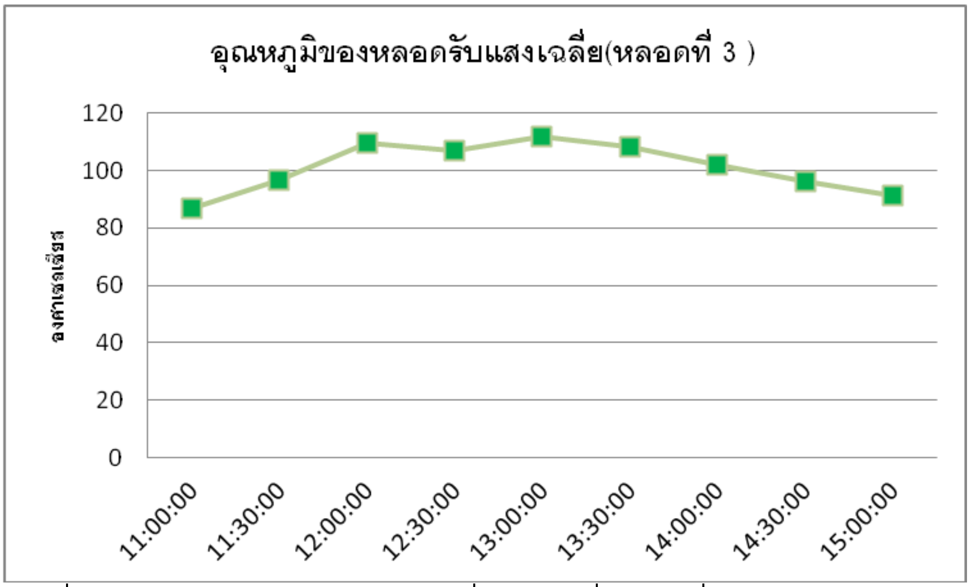
อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยสูงสุดคือ 81.3 องศาเซลเซียส เฉลี่ยต่ำสุดคือ 35.26 องศาเซลเซียส ดังนั้นอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยตั้งแต่เวลา 11.00-15.00 น. ประมาณ 54.13 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.17 อุณหภูมิของหลอดรับแสงเฉลี่ย(หลอดที่1)ในวันที่ 7-10 ธันวาคม 2554 อุณหภูมิของหลอดรับแสงหลอดที่1 เฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 102.63 องศาเซลเซียสในช่วงเวลา 13.30 น. เฉลี่ยต่ำสุด 80.2 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 11.00 น.

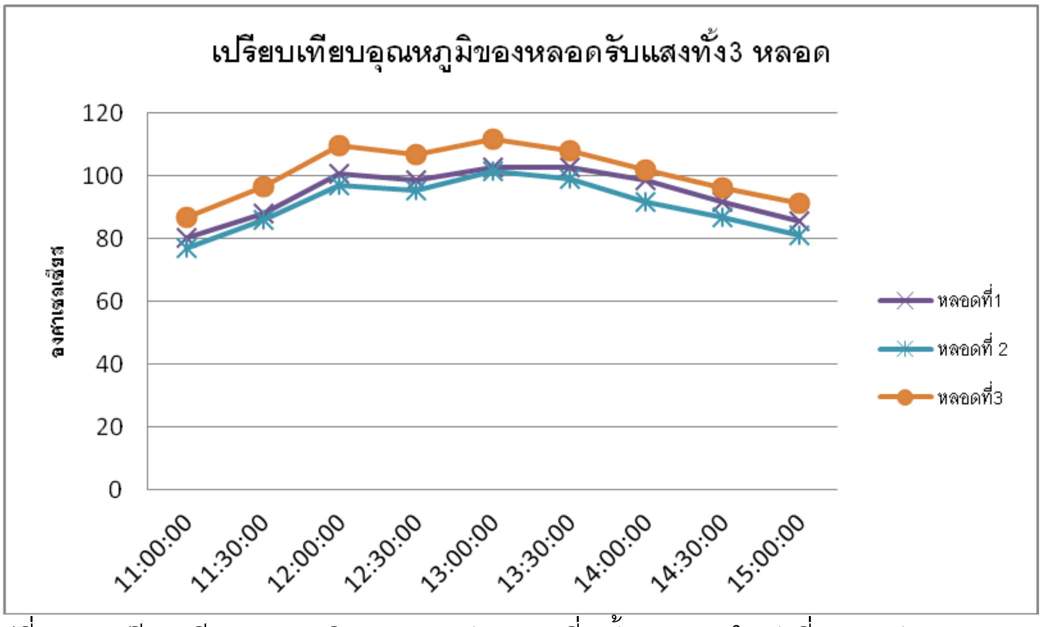


รูปที่ 4.18 อุณหภูมิของหลอดรับแสงเฉลี่ย (หลอดที่2)ในวันที่ 7-10 ธันวาคม 2554 อุณหภูมิของหลอดรับแสงหลอดที่2 เฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 101.57 องศาเซลเซียสในช่วงเวลา 13.00 น. เฉลี่ยต่ำสุด 77.08 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 11.00 น.



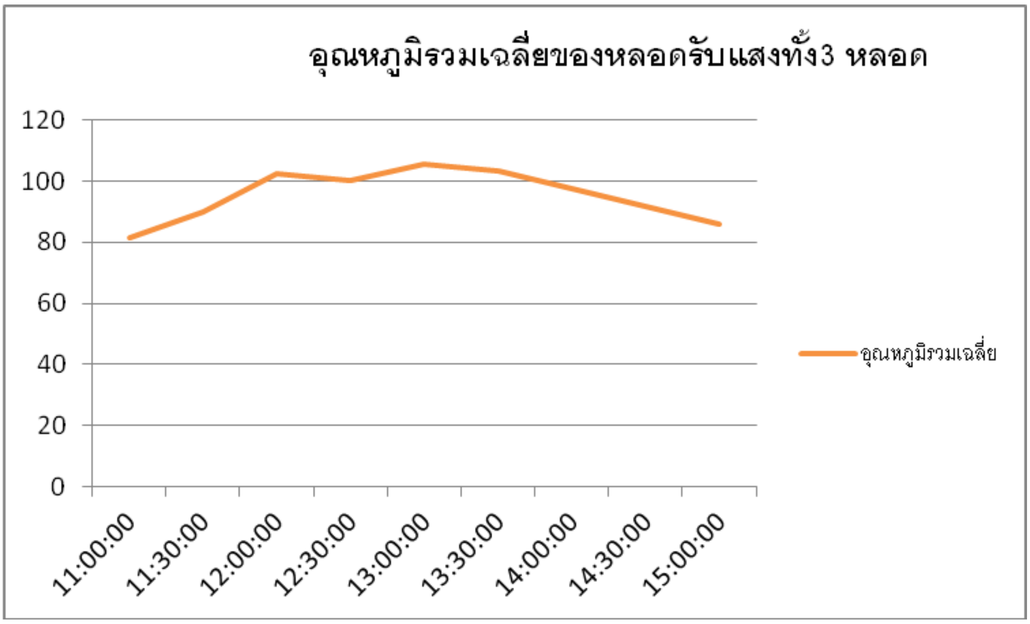
รูปที่ 4.19 อุณหภูมิของหลอดรับแสงเฉลี่ย (หลอดที่3)ในวันที่ 7-10 ธันวาคม 2554

อุณหภูมิของหลอดรับแสงหลอดที่3 เฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 111.71 องศาเซลเซียสในช่วงเวลา 13.00 น. เฉลี่ยต่ำสุด 86.7 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 11.00 น.



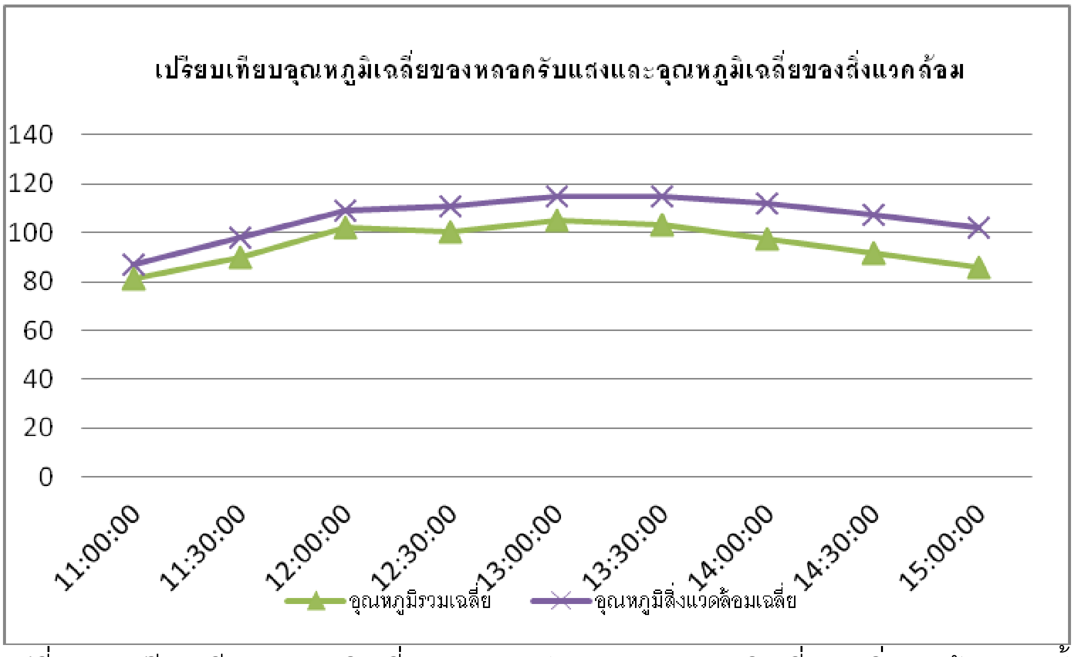
รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบอุณหภูมิของหลอดรับแสงเฉลี่ยทั้ง 3 หลอดในวันที่ 7-10 ธันวาคม 2554

เมื่อนำอุณหภูมิของหลอดรับแสงเฉลี่ยทั้ง 3 หลอดมาเปรียบเทียบกัน ในช่วงเวลา 11.00-15.00 น. หลองรับแสงที่3 ทำอุณหภูมิได้สูงสุด ซึ่งถ้าตามทฤษฏีในการออกแบบในช่วงเวลาเช้าหลอดที่1 น่าจะทำอุณหภูมิได้สูงสุด พอถึงเวลากลางวันก็ควรจะเป็นหลอดที่2 ที่ทำอุณหภูมิได้สูงกว่า และช่วงบ่ายจนถึงเย็นน่าจะเป็นหลอดที่3 ที่ทำอุณหภูมิได้สูงสุด แต่สาเหตุที่ผลของการทดลองออกมาเป็นเช่นนี้ เนื่องมาจากสภาพอากาศ ที่มีเมฆมากในช่วงเช้า และช่วงบ่าย

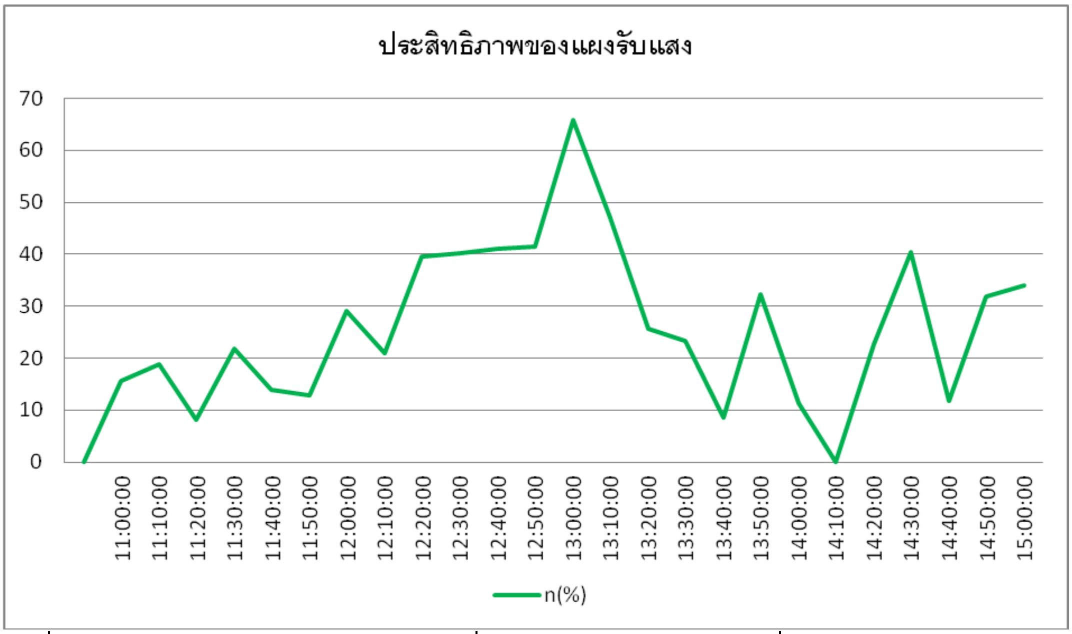


รูปที่ 4.21 อุณหภูมิของหลอดรับแสงเฉลี่ยรวมทั้ง 3 หลอดในวันที่ 7-10 ธันวาคม 2554

อุณหภูมิของหลอดรับแสงรวมเฉลี่ยสูงสุด 105.31 องศาที่เวลา 13.00 น. เฉลี่ยต่ำสุด 81.32 องศาเซลเซียส ที่เวลา 11.00 น.

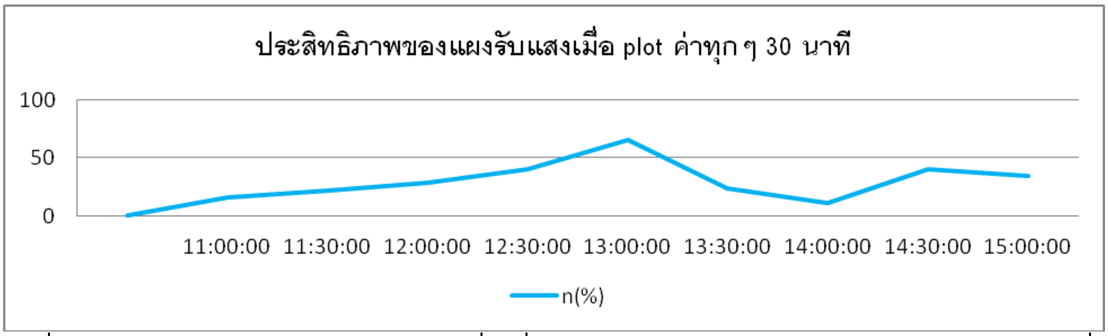


รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของหลอดรับแสงและอุณหภูมิเฉลี่ยของสิ่งแวดล้อมรวมทั้ง 3 หลอดในวันที่ 7-10 ธันวาคม 2554



รูปที่4.23 ประสิทธิภาพของแผงรับแสงเฉลี่ยจากการเก็บข้อมูลในวันที่ 7-10 ธันวาคม 2554

ประสิทธิภาพเฉลี่ยตั้งแต่ช่วงเวลา 11.00-15.00 น. มีค่าประมาณ 26.02% ความแปรปรวนเกิดขึ้นมากสอดคล้องกับความเข้มแสงอาทิตย์ที่มีค่าความแปรปรวนมากเช่นกัน



รูปที่4.24 ประสิทธิภาพของแผงรับแสงเฉลี่ยเมื่อ plot ค่าทุกๆ 30 นาที จากการเก็บข้อมูลในวันที่ 7-10 ธันวาคม 2554

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ ต้องการที่จะออกแบบรางพาราโบลาแบบผสม(CPC)ที่ไม่ต้องอาศัยระบบติดตามดวงอาทิตย์ มีคุณสมบัติในการรับรับสีกระจายได้ดี มีประสิทธิภาพและทำอุณหภูมิได้สูงกว่ารางรับแสงแบบทั่วไป การออกแบบเน้นให้สอดคล้องกับสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย ที่ตั้งอยู่บริเวณเส้นศูนย์สูตรมีความชื้นในอากาศสูงทำให้แสงของดวงอาทิตย์ที่ส่องผ่านชั้นผ่านชั้นบรรยากาศลงมาเกิดเป็นรังสีกระจาย ทั้งนี้งานวิจัยก็มุ่งเน้นศึกษาเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาและส่งเสริมการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยที่จัดว่ามีศักยภาพสูง สามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้อย่างมาก โดยการวิจัยเน้นเรื่องการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการออกแบบ มุมในการรับรังสีกระจาย ขนาดความกว้างของแผง และไม่ใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์ ได้ผลสรุปดังนี้

- จากการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากสมการ $y = ax^2$,โดยที่ a เป็นค่าคงที่ใดๆ ในการศึกษากำหนดค่า a เป็น 3 ค่า คือ 4,9,16 โดยกำหนดความกว้างของแผงไว้ที่ค่าเดียวกันคือ w = 0.15 หาประสิทธิภาพจากการกำหนดค่า a ได้ผลดังนี้

เมื่อ a =4 ประสิทธิภาพเท่ากับ 100%

a =9 ประสิทธิภาพเท่ากับ 30%

a =16 ประสิทธิภาพเท่ากับ 20%

เลือกสมการ $y = 9x^2$ ซึ่งมีประสิทธิภาพเท่ากับ 30% มาออกแบบ แม้ว่าในสมการ $4x^2$ จะให้ประสิทธิภาพสูงถึง 100% แต่ในการออกแบบจะต้องมีการนำไปปรับมุมเพื่อหามุมกวาดที่มากที่สุดในการรับรังสีกระจาย ในสมการ $4x^2$ นั้นจุดที่แสงตกกระทบอยู่ริมหลอดรับแสง หากเลือกแผงรับแสงจากสมการนี้ไปออกแบบต่อ ในการปรับมุม จุดที่แสงตกกระทบอาจจะหลุดออกจากหลอดรับแสงซึ่งอาจจะทำให้แผงรับแสงผลิตความร้อนได้น้อยลง จึงเลือกรางพาราโบลาจากสมการ $y = 9x^2$ ซึ่งมีประสิทธิภาพเท่ากับ 30% ซึ่งมากกว่ารางพาราโบลาจากสมการ $y = 16x^2$ ที่มีประสิทธิภาพเพียง 20% ไปทำการศึกษาต่อโดยปรับค่า w = 0.05, 0.10, 0.15 เพื่อดูมุมกวาด หรือมุมในการรับรังสีกระจาย

- ใช้สมการ $y = 9x^2$ ไปสร้างแบบจำลอง โดยปรับเปลี่ยนความกว้างซึ่งความกว้างมีผลต่อมุมกวาดหรือมุมในการรับรังสีกระจาย ปรับความกว้างตามความเหมาะสม โดยดูขนาดของมุมกวาดในการรับรังสีเป็นหลัก ปรับความกว้าง(W) ได้ผลดังต่อไปนี้

ปรับ w = 0.05 (ปรับมุมเข้าหากัน 5 องศา) ได้มุมกวาดในการรับรังสีกระจายเท่ากับ 40 องศา

w = 0.10 (ปรับมุมเข้าหากัน 10 องศา) ได้มุมกวาดในการรับรังสีกระจายเท่ากับ 65 องศา

w = 0.15 (ปรับมุมเข้าหากัน 15 องศา) ได้มุมกวาดในการรับรังสีกระจายเท่ากับ 80 องศา

- แผงรับแสงแบบรางพาราโบลาแบบผสม(CPC) ที่นำมาออกแบบจึงสร้างจากสมการ $y = 9x^2$ มี w = 0.15 มีมุมกวาดในการรับรังสีกระจายได้ 80 องศา โดยออกแบบให้3 รางวางติดกัน ซึ่งแผงรับแสงจริงมีขนาด กว้าง * ยาว = 1 เมตร * 1.9 เมตร
- ในการทดสอบประสิทธิภาพของแผงแบ่งเป็น 2 แนวทางการศึกษา

แนวทางที่ 1 ทดสอบประสิทธิภาพของแผงรับแสงด้วยเซลล์แสงอาทิตย์(ดังที่ได้แสดงในบทที่ 4)

แนวทางที่ 2 ทดสอบประสิทธิภาพของแผงรับแสงด้วยการต่อเข้ากับระบบ (ดังที่ได้แสดงในบทที่4)

ได้ผลสรุปดังนี้

- ในการทดสอบตามแนวทางที่ 1การทดสอบประสิทธิภาพจากโมเดลที่สร้างขึ้นทดลองโดยใช้หลอดฮาโลเจนแทนแสงจากดวงอาทิตย์พบว่าประสิทธิภาพที่ได้สอดคล้องกับประสิทธิภาพที่ได้จากการออกแบบ โดยประสิทธิภาพเฉลี่ยสูงสุดจากการออกแบบมีค่าเท่ากับ 84.1% ส่วนประสิทธิภาพเฉลี่ยสูงสุดจากการทดสอบโดยเมเดลมีค่าเท่ากับ 67.68% ประสิทธิภาพจากการออกแบบสูงกว่าประสิทธิภาพจากโมเดล 16.42% ถึงแม้ประสิทธิภาพทั้งสองจะไม่เท่ากันแต่จากผลการทดสอบก็สอดคล้องกันในช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ
- ในการทดสอบตามแนวทางที่ 2 ทดสอบประสิทธิภาพของแผงรับแสงด้วยการต่อเข้ากับระบบ ได้ประสิทธิภาพโดยเฉลี่ย 26.02% ซึ่งในการทดสอบประสิทธิภาพด้วยระบบนี้ วัดอุณหภูมิเฉลี่ยของหลอดรับแสงฮีตไปป์ทำอุณหภูมิได้สูงสุด 105.31 องศา ความเข้มแสงเฉลี่ยทุกช่วงเวลา 550.44 วัตต์ต่อตารางเมตร

จากผลการทดสอบหาประสิทธิภาพทั้ง2 แนวทาง ในการทดสอบประสิทธิภาพเชิงแสงให้ประสิทธิภาพสูงกว่า เมื่อนำมาทดสอบประสิทธิภาพเชิงกล เนื่องจากในการทดสอบประสิทธิภาพเชิงแสง โมเดลและอุปกรณ์ประกอบที่ใช้ในการทดสอบเป็นแบบจำลองมีขนาดเล็ก แต่เมื่อพอนำมาสร้างเป็นระบบจริง ระบบมีขนาดใหญ่ขึ้นมาก มีองค์ประกอบต่างๆ ที่ทำให้สูญเสียพลังงานเช่น ความแปรปรวนของสภาพอากาศ เป็นต้น ซึ่งสิ่งเหล่านี้ส่งผลให้ประสิทธิภาพในเชิงกล น้อยกว่าประสิทธิภาพในเชิงแสง ดังนั้นในการนำไปใช้งานจริงหากต้องการให้แผงรับแสงที่ออกแบบมีประสิทธิเป็นไปตามทฤษฎีคงต้องมีการปรับปรุงในส่วนต่างๆ ดังที่จะเสนอไว้ในข้อเสนอแนะ

5.2 ข้อเสนอแนะ

- ในการออกแบบแผงรับแสงรางพาราโบลาแบบผสม(CPC) มีส่วนโค้งที่หักมุม บริเวณใต้หลอดรับแสงแบบฮีตไปป์ ซึ่งในการนำไปขึ้นรูปจริง วัสดุที่ใช้คือแผ่นอลูมิเนียม ซึ่งไม่สามารถโค้งหักมุมได้มากเท่าตามที่ออกแบบ จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพเมื่อนำไปทดสอบกับระบบจริงน้อยกว่าประสิทธิภาพเมื่อคิดตามทฤษฎี
- ระบบที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพตามแนวทางที่ 2 นั้น มีการสูญเสียเกิดขึ้นในหลายจุด ทำให้อุณหภูมิน้ำมันเข้า และอุณหภูมิน้ำมันออก ไม่แตกต่างกันมากจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพออกมาต่ำ ดังนั้นหากต้องการนำความร้อนที่ได้จากแผงไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ควรแก้ไขจุดหลักๆที่ทำให้เกิดการสูญเสีย ซึ่งในที่นี้ผู้วิจัยขอเสนอแนะ ให้เพิ่มการห่อหุ้มท่อทองแดงที่ต่อจากหลอดฮีตไปป์ซึ่งเป็นแหล่งที่เกิดการสูญเสียเนื่องจากความร้อนสะสมบริเวณนี้สูงมาก แต่กลับถ่ายเทให้ระบบได้เพียงเล็กน้อย
- ในการทดสอบระบบถ้าทำในระบบปิดก็จะเกิดความแม่นยำในการทดสอบ เกิดการสูญเสียน้อยลง ได้ทราบประสิทธิภาพของแผงที่แน่นอน เพราะระบบปิดจะตัดปัจจัยที่ทำให้เกิดการสูญเสียอาทิเช่น แรงลม ความแปรปรวนของสภาพอากาศ เป็นต้น
- ในการทดลองหาประสิทธิภาพเชิงแสงควรสร้างโมเดลที่ทดลองด้วยกระดาษสีดำที่มีการดูดกลืนแสง ในการใช้กระดาษสีขาวจะมีการสะท้อนแสงมายังแผ่นโซล่าเซลล์ที่ทดสอบทำให้ผลการทดสอบคลาดเคลื่อนได้

รายการอ้างอิง

[1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.รังสีดวงอาทิตย์.

[2] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. สเปกตัมรังสีดวงอาทิตย์ กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.

[3] กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงานและภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์, กันยายน 2542.

[4] สำนักพัฒนาพลังงานแสงอาทิตย์ กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและและอนุรักษ์พลังงาน. เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์. [ออนไลน์] 2555.แหล่งที่มา: http://www.dede.go.th [6 กุมภาพันธ์ 2555].

[5] Wattana Ratismith, Novel Parabolic Troughs without Solar Tracking System, Proc. Renewable Energy 2010,Pacifico Yokohama, Japan, (2010).

[6] Wattana Ratismith and Urith Archakositt , Parabolic Troughs without Solar Tracking System, Third International Conference on Applied Energy, Perugia,Italy (2011).

[7] CRC Standard Mathematical Table, 25th Ed., CRC Press, Inc., 1978.

[8] วัฒนา รติสมิทธ์.แผงรับแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาที่ไม่ต้องใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์, สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย .

[9] มนูญ พิธุวรรณ.การออกแบบและทดสอบแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดรวมแสงด้วยแผงพาราโบลิค,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2543.

[10] กิตติ สถาพรประสาธน์.การศึกษาตัวรับแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลิคที่ติดตั้งอุปกรณ์ติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ .

[11] ท่อรับแสงแบบฮีตไปป์ [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http:// www.canadiansolar technologies.ca [ธันวาคม 2554].

[12] น้ำมันหล่อลื่นอุตสาหกรรม. น้ำมันถ่ายเทความร้อน. บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด,2554.

[13] มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. ตัวตรวจวัดอุณหภูมิโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน.[ออนไลน์] 2555แหล่งที่มา:http://www.inc. eng.kumtt.ac.th [10 มีนาคม 2555].

[14] Siemens Building Technologies. Cable temperature sensor QAP21.2. [ออนไลน์] 2555.แหล่งที่มา: http://www.cn.siemens.com [10 มีนาคม 2555].

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ตัวอย่างการคำนวนหาประสิทธิภาพ

ตัวอย่างการคำนวณหาประสิทธิภาพของรางรับแสงอาทิตย์

$$\eta = m^{\bullet} C_p\ (T_{out} - T_{in}) / I\ A$$

เมื่อ n = ประสิทธิภาพของรางรับแสงอาทิตย์ ,%

$m^{\bullet}$ = อัตราการไหล, kg/s

= อัตราการไหล (litre/s) x ความถ่วงจำเพาะของน้ำมัน (kg/litre) / 60

C_p = ค่าความร้อนจำเพาะของ ๆ ไหล , J/kg °C

T_{out} = อุณหภูมิของน้ำมันออกรางรับแสงอาทิตย์, °C

T_{in} = อุณหภูมิของน้ำมันเข้ารางรับแสงอาทิตย์, °C

A = พื้นที่ของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์, m^2

= กว้าง (m) x ยาว (m)

I = ค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ย , W/m^2

หาประสิทธิภาพของรางรับแสงอาทิตย์ที่เวลา 12.00 น.

$m^{\bullet}$ = 0.07, kg/s

C_p = 2170 J/kg °C

T_{out} = 32.47 °C

T_{in} = 31.41 °C

A = 1.9 m^2

I = 700.66 W/m^2

แทนค่าตัวแปรในสมการ

$$\eta = m^{\bullet} C_p\ (T_{out} - T_{in}) / I\ A$$

$$\eta = (0.07 \times 2{,}170\ (32.47 - 31.41)) / (700.65 \times 1.9)$$

= (151.9 (1.06)) / 1331.23

= 0.1258, 12.58%

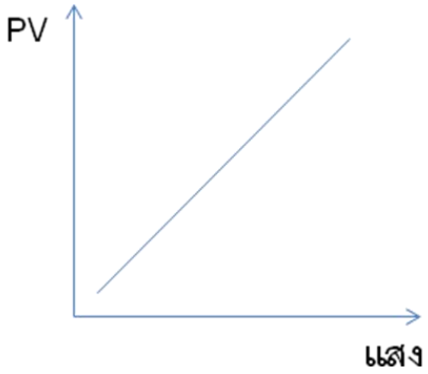
การคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงแสงของแผงรับแสง

$$\eta = \frac{F_{solarcell} * P_{out}}{F_{solar} * P_{in}} = \frac{\text{แสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผง}}{\text{แสงอาทิตย์ที่ตกบนท่อฮีตไปป์}}$$

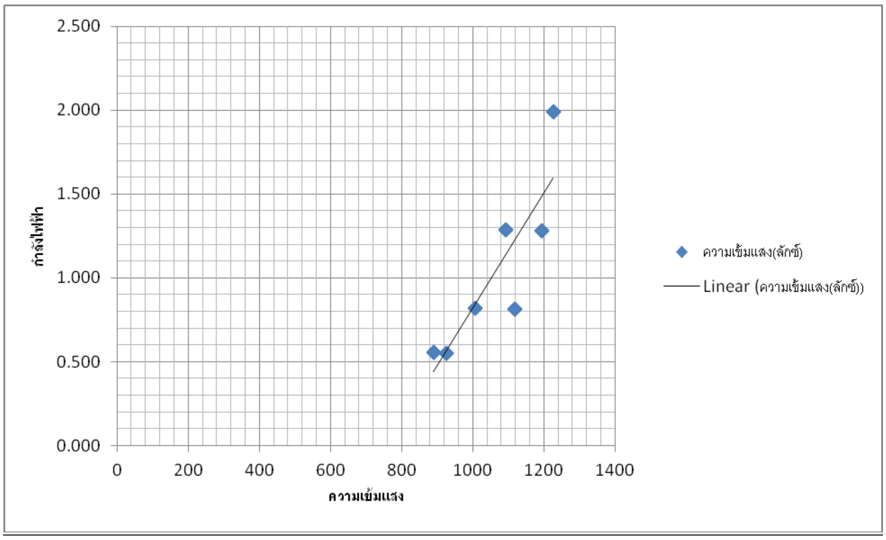
F คือ Factor of Performance

$$F = \frac{PV}{\text{แสง}}$$

PV คือ ขบวนการผลิตไฟฟ้าจากการตกกระทบของแสงบนวัตถุที่มีความสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า



จากข้อมูลการทดลองPlot กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแสงกับกำลังไฟฟ้า



ตัวอย่างการคำนวณหาประสิทธิภาพของโมเดลรางรับแสงอาทิตย์ที่ทำมุม 15 องศากับ แผ่นโซล่าเซลล์ขนาด 8*6 เซนติเมตร

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

n = ประสิทธิภาพของรางรับแสงอาทิตย์ ,%

P_{out} = กำลังไฟฟ้าของแผ่นโซล่าเซลล์เมื่อแสงสะท้อนผ่านรางรับแสงที่มุม 15 องศากับแนวระดับ ,วัตต์(W)

P_{in} = กำลังไฟฟ้าของแผ่นโซล่าเซลล์เมื่อทดลองกับหลอดฮาโลเจน 1 หลอด , วัตต์(W)

I = กระแสไฟฟ้า , แอมป์

V = แรงดันไฟฟ้า ,Volt

โดยที่

$P_{out} = I_{out} * V_{out}$

$P_{in} = I_{in} * V_{in}$

หาประสิทธิภาพของรางรับแสงอาทิตย์ที่เวลา 12.00 น.

$P_{out} = I_{out} * V_{out}$

$= 0.300 * 6.633$

P_{out} = 1.990 วัตต์

$P_{in} = I_{in} * V_{in}$

$= 0.467 * 6.200$

P_{in} = 2.940 วัตต์

แทนค่าในสมการ

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

η =1.990/2.940

= 0.6768, 67.68%

ภาคผนวก ข.

ข้อมูลดิบ ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และอุณหภูมิน้ำมัน
(ใช้ในการหาประสิทธิภาพเชิงกล) และข้อมูลดิบ ค่ากระแส แรงดันไฟฟ้า ความเข้มแสง
(ใช้ในการหาประสิทธิภาพเชิงแสง)

ข้อมูลสำหรับคิดประสิทธิภาพเชิงกล

การทดลองหาประสิทธิภาพของรับแสงด้วยอัตราการไหล 5 ลิตรต่อนาที: หัวข้อที่ 4.2

ตารางที่ 1: ความเข้มแสงเฉลี่ย(หน่วยความเข้มแสง วัตต์ต่อตารางเมตร)

Time	I(ความเข้มแสง)			
	7_12_2011	8_12_2011	9_12_2011	10_12_2011
11:00:00	781.30	356.90	533.40	785.50
11:10:00	528.10	421.40	481.10	795.45
11:20:00	429.85	397.05	485.05	800.35
11:30:00	719.70	325.40	976.10	810.95
11:40:00	881.60	584.80	539.90	809.65
11:50:00	902.60	356.90	834.15	827.40
12:00:00	868.85	429.35	833.40	820.20
12:10:00	873.55	532.45	835.25	827.30
12:20:00	915.00	497.60	837.65	832.70
12:30:00	944.55	523.80	840.80	839.65
12:40:00	914.15	866.70	827.25	823.20
12:50:00	202.50	399.45	825.40	817.95
13:00:00	249.40	320.40	812.90	810.20
13:10:00	147.00	211.35	797.05	797.70
13:20:00	191.65	201.75	781.60	743.10
13:30:00	207.75	202.05	773.70	769.15
13:40:00	198.10	131.65	771.20	623.35
13:50:00	107.00	132.95	521.95	729.90
14:00:00	145.95	173.30	697.80	732.30
14:10:00	189.55	198.75	702.95	698.95
14:20:00	130.30	153.05	673.55	629.50
14:30:00	140.90	139.45	661.05	125.90
14:40:00	82.70	167.30	629.75	588.25
14:50:00	123.75	156.05	590.60	549.85
15:00:00	208.05	204.70	563.80	526.40

ตารางที่ 2: อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

Time	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม			
	7_12_2011	8_12_2011	9_12_2011	10_12_2011
11:00:00	36.80	33.75	32.55	37.95
11:30:00	38.70	32.55	39.40	38.75
12:00:00	34.50	35.85	36.00	41.45
12:30:00	40.05	36.95	39.75	46.45
13:00:00	42.35	35.95	41.65	41.80
13:30:00	35.65	33.95	42.90	131.20
14:00:00	35.90	31.90	44.60	185.35
14:30:00	32.90	32.90	45.40	214.00
15:00:00	33.00	32.65	41.65	211.65

ตารางที่ 3: อุณหภูมิน้ำมันเข้าเฉลี่ย

Time	T in			
	7_12_2011	8_12_2011	9_12_2011	10_12_2011
11:00:00	30.00	31.00	30.60	26.80
11:10:00	29.15	32.55	31.90	28.65
11:20:00	30.30	32.45	31.15	29.80
11:30:00	31.55	33.15	28.25	27.90
11:40:00	35.00	31.25	32.70	31.35
11:50:00	34.20	32.40	30.90	30.40
12:00:00	36.50	32.40	29.95	31.35
12:10:00	31.10	30.00	31.60	32.05
12:20:00	29.10	31.60	30.30	29.95
12:30:00	28.20	32.00	30.80	32.20
12:40:00	29.00	29.30	31.35	35.15
12:50:00	30.40	32.75	32.40	34.05
13:00:00	30.50	33.75	31.10	35.80
13:10:00	28.00	36.05	30.25	35.85
13:20:00	38.20	36.20	31.20	36.05
13:30:00	35.50	33.10	31.25	38.45
13:40:00	37.80	34.65	35.75	35.55
13:50:00	37.15	34.30	35.40	31.80
14:00:00	34.10	34.00	34.60	34.05
14:10:00	35.75	33.30	36.60	35.15
14:20:00	36.60	33.90	36.10	31.00
14:30:00	35.85	33.65	36.90	32.60
14:40:00	34.20	34.40	34.55	35.50
14:50:00	35.25	33.65	34.85	33.55
15:00:00	34.55	34.25	34.35	33.10

ตารางที่ 4: อุณหภูมิน้ำมันออกเฉลี่ย

Time	T out			
	7_12_2011	8_12_2011	9_12_2011	10_12_2011
11:00:00	28.15	33.50	32.65	28.60
11:10:00	28.55	34.30	33.05	31.40
11:20:00	28.70	34.65	30.30	32.10
11:30:00	29.70	35.35	29.25	33.95
11:40:00	34.70	34.40	32.10	33.80
11:50:00	33.55	34.95	29.15	34.75
12:00:00	35.05	34.75	31.50	39.20
12:10:00	31.70	32.90	31.75	36.10
12:20:00	31.80	34.20	32.35	37.25
12:30:00	32.35	34.55	33.50	37.95
12:40:00	34.40	34.15	35.05	38.10
12:50:00	35.40	35.50	33.90	35.95
13:00:00	40.85	36.10	38.90	32.60
13:10:00	36.10	36.20	36.50	32.35
13:20:00	38.20	36.05	36.55	36.75
13:30:00	36.85	35.55	36.25	35.10
13:40:00	36.45	35.45	37.00	36.60
13:50:00	35.95	35.90	35.10	37.45
14:00:00	35.95	35.20	31.80	36.15
14:10:00	36.35	35.25	31.30	36.40
14:20:00	36.15	35.55	33.95	36.25
14:30:00	37.15	35.70	34.65	36.65
14:40:00	35.40	35.25	34.85	35.20
14:50:00	36.05	34.90	34.45	37.30
15:00:00	34.90	34.05	36.10	37.30

ข้อมูลสำหรับคิดประสิทธิภาพเชิงแสง

ตารางที่ 5 ข้อมูลเมื่อทดลองกับแผ่นโซล่าเซลล์

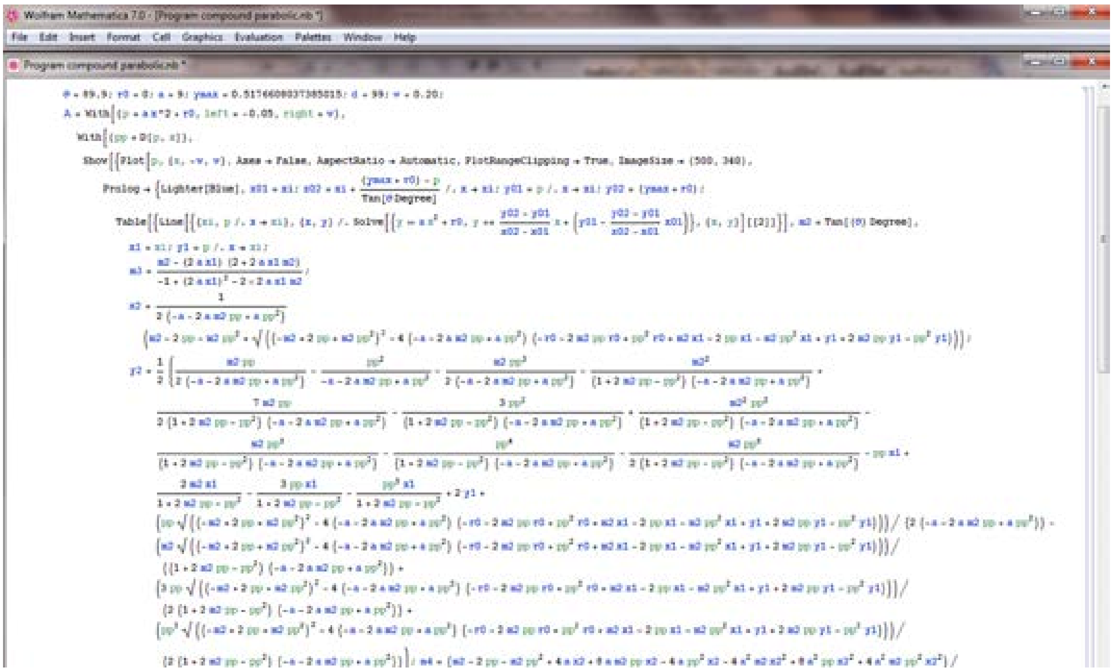
ทดสอบโดยใช้แผงโซล่าเซลล์ขนาด 0.6 วัตต์										
หลอดฮาโลเจน 50 วัตต์ (1 หลอด)										
องศาที่ใช้ในการทดลอง	I			Iin	V			Vin	Pin	ความเข้มแสง(ลักซ์)
45°(9.00 น)	0.2	0.3	0.3	0.267	5.8	6.1	6.1	6.000	1.627	850
60°(10.00 น)	0.3	0.3	0.4	0.333	5.8	6.1	6.1	6.000	2.033	995
75°(11.00 น)	0.4	0.4	0.4	0.400	6.1	6.2	6.2	6.167	2.480	1092
90°(12.00 น)	0.4	0.5	0.5	0.467	6.1	6.2	6.3	6.200	2.940	1254
105°(13.00 น)	0.4	0.5	0.4	0.433	6.1	6.2	6.2	6.167	2.687	1192
120°(14.00 น)	0.3	0.3	0.4	0.333	5.8	6.1	6.1	6.000	2.033	1071
135°(15.00 น)	0.3	0.3	0.3	0.300	5.8	6.1	6.1	6.000	1.830	880

ตารางที่ 6 ข้อมูลเมื่อทดลองกับรางพาราโบลาแบบจำลองที่ปรับมุม 15 องศากับแนวระดับ

แผงรับแสงรางพาราโบลาแบบผสมที่ออกแบบโดยปรับมุม 15 องศา										
หลอดฮาโลเจน 50 วัตต์(1หลอด)										
องศาที่ใช้ในการทดลอง	I			Iout	V			Vout	Pout	ความเข้มแสง(ลักซ์)
45°(9.00 น)	0.08	0.09	0.1	0.090	6.2	6.2	6.1	6.167	0.555	890
60°(10.00 น)	0.09	0.1	0.2	0.130	6.4	6.4	6.1	6.300	0.819	1008
75°(11.00 น)	0.1	0.2	0.3	0.200	6.4	6.7	6.2	6.433	1.287	1092
90°(12.00 น)	0.2	0.3	0.4	0.300	6.6	6.7	6.6	6.633	1.990	1226
105°(13.00 น)	0.1	0.2	0.3	0.200	6.2	6.6	6.4	6.400	1.280	1195
120°(14.00 น)	0.09	0.1	0.2	0.130	6.3	6.3	6.2	6.267	0.815	1119
135°(15.00 น)	0.09	0.08	0.1	0.090	6.1	6.2	6.1	6.133	0.552	925

ภาคผนวก ค
อุปกรณ์และโปรแกรมที่อ้างอิงถึงในงานวิจัย

<u>โปรแกรม Wolfram Mathematica 7.0</u>



<u>ตัวตรวจวัดอุณหภูมิ</u> [11-12]

SIEMENS

1 833

Cable temperature sensor **QAP21.2**

for solar applications

Use

The cable temperature sensor is used for acquiring the water temperature in flat solar panels.

Ordering

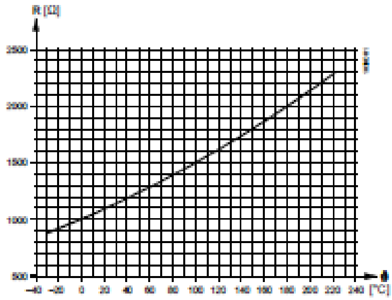
When ordering, please give name and type reference of the sensor.

Function

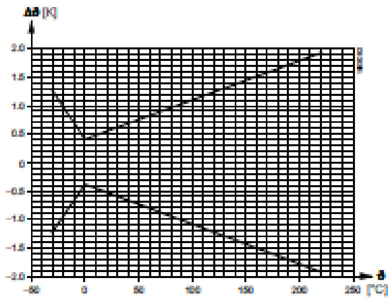
The sensor acquires the medium temperature in the solar panel with its nickel element.
The resistance value of the element changes as a function of the temperature.
It is delivered for further handling by a suitable controller.

Sensing element

Characteristic



Accuracy



Legend

R Resistance value in Ohm

ϑ Temperature in degrees Celsius

Δϑ Temperature differential in Kelvin

Mechanical design

The cable temperature sensor consists of a sleeve (6 mm diameter, 50 mm long), sensing element and connecting cable with ferrules.

The sensing element is accommodated in the sleeve which is flat on one side and to which the connecting cable is attached.

The sensor is not suited for direct immersion in liquid media (without using a protection pocket).

Engineering notes

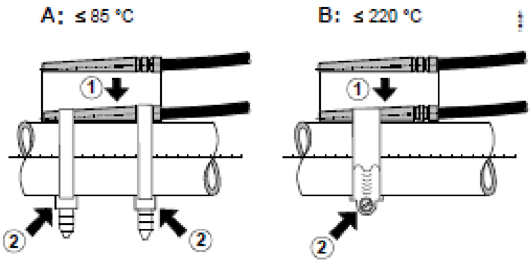
The permissible cable lengths are dependent on the type of controller used. For details, refer to the Data Sheet of the relevant controller.

Mounting notes

The following mounting choices exist:

On pipes

- Up to medium temperatures of 85 °C: with plastic cable tie (supplied by thirds)
- Up to medium temperatures of 220 °C: with stainless steel cable tie (supplied by thirds)



Indirect immersion

With the help of a protection pocket. The inside diameter of the pocket should match the diameter of the sensor's sleeve (e.g. 6.1 mm).

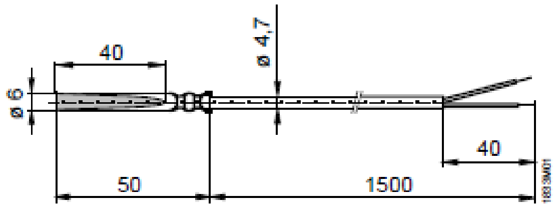
The sensor is supplied complete with Mounting Instructions.

Technical data

Functional data	Measurement range max. (1-2 h/d)	–30 ... +180 °C 220 °C
	Sensing element	LG-Ni 1000
	Time constant t_{63} When fitted to the pipe With protection pocket	 <20 s <30 s
	Measurement accuracy at 0 °C	±0.4 K (refer to "Function")
	Measurement and output	passive
Protective data	Degree of protection	IP 67 to IEC 529
	Safty class	III to EN 60 730
Connections	Mechanically	cable tie or protection pocket (supplied by thirds)
	Electrical connections Connecting cable Cable length Perm. cable length	 2-core, interchangeable, with ferrules approx. 1.5 m refer to "Engineering notes"
Environmental conditions	Ambient temperature Sensor sleeve Connecting cable	 –30 ... +180 °C (220 °C for max. 1-2 h/d) –50 ... +180 °C (220 °C for max. 1-2 h/d)
Materials	Sensor sleeve	stainless steel V4A (1.4571)
	Connecting cable	silicon
	Packaging (minigrip® bag)	PVC
Weight	Including packaging	0.056 kg

Internal diagram

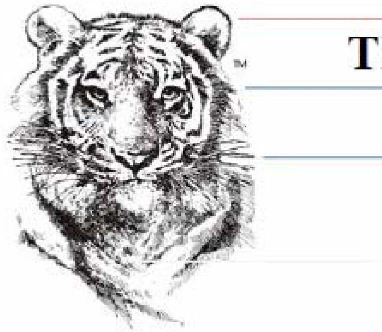
Dimensions (in mm)



ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน [13-14]

Esso Imperial Oil

Product Data Sheet



THERMOIL AND ESSOTHERM

HEAT TRANSFER FLUIDS

January 2009

Esso THERMOIL* and ESSOTHERM* heat transfer fluids are the products of extensive research and development at Imperial Oil's facilities in Sarnia. They are manufactured at either of our plants in Sarnia Ontario or Edmonton Alberta and are available throughout the country through our comprehensive distribution network. Esso THERMOIL and ESSOTHERM offer the following features and benefits:

- Range of viscosity grades for application needs
- Utilize highly refined base stocks and select additive technology for excellent thermal and oxidation stability
- Choice of excellent oxidation control and deposit control technology
- Optimized Flash Point and Volatility to minimize Vapour Pressure at elevated temperatures

Primary Applications

Imperial Oil THERMOIL and ESSOTHERM fluids are recommended in the appropriate grade whenever performance mineral oil heat transfer fluids are indicated. They have documented many years of successful long life service in many industries such as plastics, paint, rubber, paper mill calendars, board plants, roofing, textiles and refineries. Chemical compatibility with other heat transfer fluids should be verified. They are not recommended for addition to systems containing aromatic oils or some synthetics.

Performance Features

Oxidation Stability
A robust oxidation inhibitor additive system provides long service life at elevated bulk system temperatures with associated high "skin" temperatures. Efficient operation is maintained through reduction of oxidation sludge which would impede heat transfer. Many alternate heat transfer fluids have a high sludging tendency with attendant operating problems.

Excellent Thermal Efficiency
Specific Heat and Thermal Conductivity data are provided, documenting the ability of the fluids to absorb and conduct heat, ensuring the function of a true heat transfer fluid.

Volatility Control
Trouble-free operation is provided by reduction of "low boilers" in the fluid as well as minimizing vapour pressure at high temperatures. This reduces any pressure build-

up in systems, which in turn affects efficient operation.

High Thermal Stability

This quality provides long term operation, minimizing "cracking" within the fluid which lowers viscosity and flash point.

Viscosity Selection and High Viscosity Index ensures that the right fluid for a specific application and environment is available. Thus required pour points are available in addition to the right viscosity at operating temperatures providing necessary turbulent flow at operating temperatures.

Versatility

THERMOIL fluids are recommended as premium, high performance, long life, cost effective heat transfer fluids. When systems are subject to contamination or moisture due to cyclical operation, ESSOTHERM fluid is recommended to provide additional deposit formation control technology.

Precautions

THERMOIL and ESSOTHERM heat transfer fluids are manufactured from quality petroleum base stocks, blended with carefully selected additives. As with all petroleum products, good personal hygiene and careful handling should always be practiced. Avoid prolonged contact with the skin, splashing into the eyes, ingestion, or vapour inhalation. Please refer to the Esso Material Safety Data Sheet for further information.

Note: This product is not controlled under Canadian WHMIS legislation

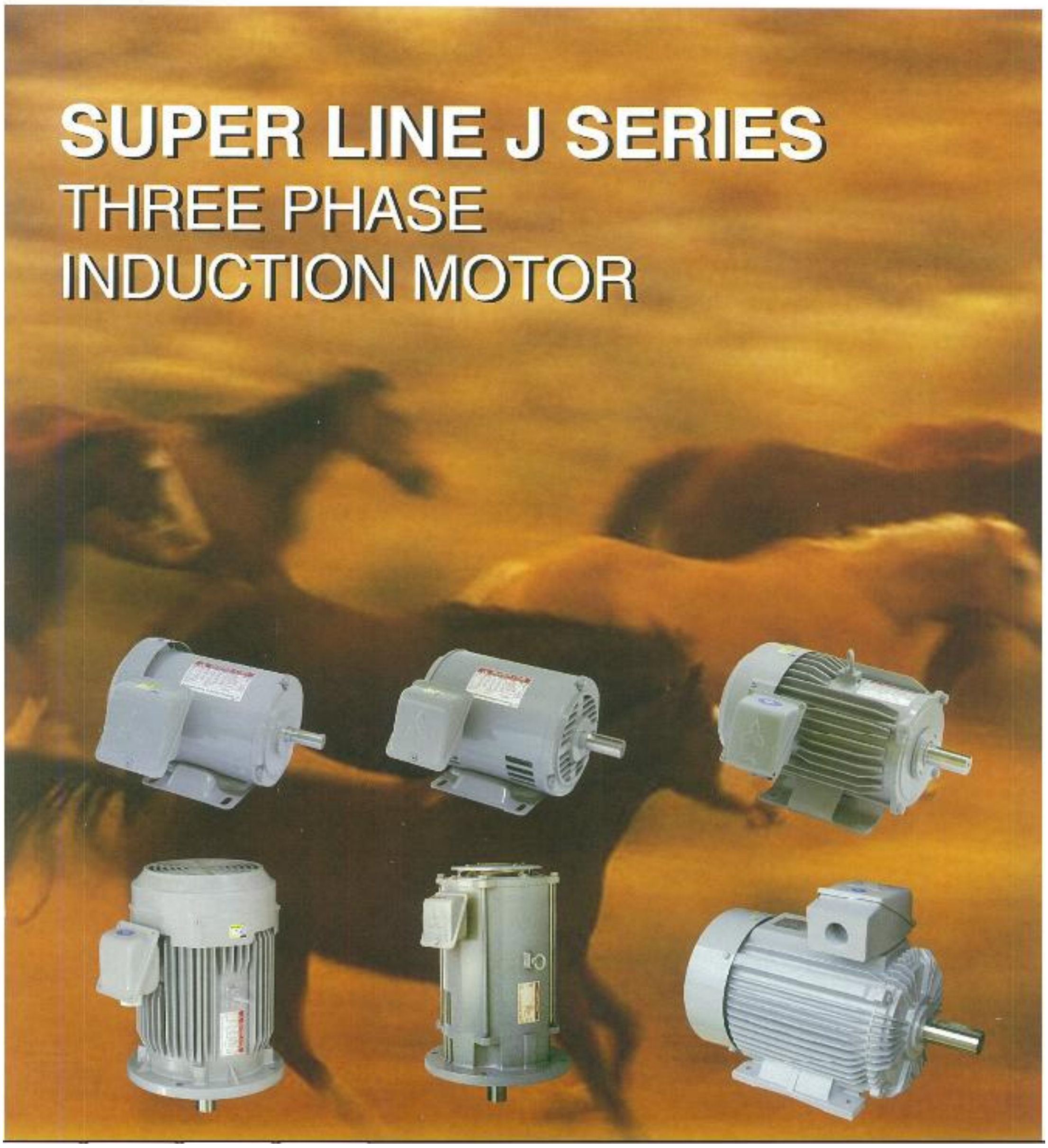
Typical Properties

	Essotherm N 100	Thermoil 32	Thermoil 46	Thermoil 100
Colour, ASTM	2.0	<1.5	<1.5	<3.0
Viscosity, cSt				
@ 40°C	108	32.	46.	100
@ 100°C	11.8	5.31	6.67	10.78
@ 200°C	2.3			
Pour Point, °C	-18	<-24	<-24	<-12
Flash Point, °C	261	204	212	252
Copper Corrosion3hr@100C	1a	1a	1a	1a
Density, kg/m3				
@ 15°C	880.3	872.4	874.1	882.5
@ 38°C	864.1	856.4	857.9	866.5
@ 100°C	819.8	811.8	813.5	822.1
@ 200°C	747.1	738.8	740.5	749.4
@ 260°C	703.1	694.7	696.5	705.5
@ 316°C	662.3	653.8	655.6	664.6
Thermal Conductivity, W/m.K				
@ 38°C	0.130	0.132	0.131	0.130
@ 100°C	0.126	0.127	0.127	0.126
@ 200°C	0.117	0.120	0.120	0.118
@ 260°C	0.113	0.115	0.115	0.114
@ 316°C	0.109	0.111	0.111	0.110
Specific Heat, kJ/kg.K				
@ 38°C	1.93	1.94	1.94	1.93
@ 100°C	2.16	2.17	2.16	2.15
@ 200°C	2.52	2.53	2.53	2.52
@ 260°C	2.73	2.75	2.75	2.73
@ 316°C	2.94	2.95	2.95	2.93
Vapour Pressure, mm Hg				
@ 50°C	1.20×10^{-7}	5.86×10^{-5}	1.32×10^{-6}	1.54×10^{-7}
@ 100°C	1.42×10^{-4}	0.016	5.35×10^{-3}	1.74×10^{-4}
@ 150°C	0.017	0.654	0.300	0.021
@ 200°C	0.472	8.13	4.57	0.552
@ 260°C	6.84	58	38.7	7.77
@ 288°C	16.8	109.0	78.0	18.9
@ 316°C	35.2	181	135	39.1
@ 343°C	63.1	266	207	69.5
Distillation Range, °C				
IBP	372	334	322	349
10%	453	374	376	437
50%	499	417	440	491
90%	560	459	516	542
Maximum Recommended Bulk Oil Temperature, °C				
Open System	225	185	200	225
Closed System	330	285	300	325
Intermittent	315			
Oxidation Test, Rotary Bomb (minutes)	400+	400+	400+	400+
Coefficient of Thermal Expansion (per °C)	0.00079	0.00080	0.00080	0.00079
Maximum Recommended Skin Temperature, °C	350	325	330	350
Minimum Pump Start Up Temperature °C	10	-20	-20	5

The values shown above are representative of current production. Some are controlled by manufacturing and performance specifications while others are not. All may vary within modest ranges.

ปั๊มน้ำมันร้อน

MITSUBISHI ELECTRIC
Changes for the Better



Feature and Benefits

Compact Size and Light Weight
Size and weight reductions have been achieved by the use of steel-plate frame and aluminium brackets in the small-capacity motors.

Highly Reliable Insulation Systems
Class B and F insulation systems are characterized by superior resistance to heat, humidity and chemicals for top-notch reliability.

Full Lineup
We have produced variety types of motors, ranged from 1/4 HP to 125 HP, thus providing a full lineup of motors ideal for any application.

Superlative Characteristics and High Reliability
Based on experience and technology accumulated over many years, along with an exacting quality-control system, each motor is ensured to exhibit only the finest characteristics.
Safety: All the rotating parts and the "live" areas are made sure that it cannot be accidentally touched directly.
Smooth Acceleration: The low moment of inertia of the rotor combined with the motor's high acceleration torque, contributes to smooth starting and stopping.
Low Noise and Vibration Levels: This feature has been achieved due to our highly individualized electrical design, the ample rigidity and the precise machining of the motor frames and brackets, and the exact balancing of the rotor.

Significance of type designations and degrees of protection for three phase motor

SF-JRV

- Mounting Configuration
  - Blank = Foot Mounting
  - V = Vertical Type
  - F = Flange Type
- Frame Material
  - Blank = Cast Iron
  - R = Steel Frame
- Enclosure
  - B = Drip-proof
  - F = Totally Enclosed Fan-Cooled
  - E = Totally Enclosed
- Super Line J Series

Degrees of Protection

IP22
IP44
IP55

- International Protection Standard
- Water Protection
  - 2 = Protection against obliquely falling water droplets (drip-proof)
  - 4 = Protection against splashing (splash-proof)
  - 5 = Protection against water jets (hose-proof)
- Solid Body Protection
  - 2 = Protection against medium-size foreign bodies
  - 4 = Protection against granular foreign bodies
  - 5 = Protection against dust deposits

Motor Section

Remarks: ** Available in IP55 model only.

Standard Specifications

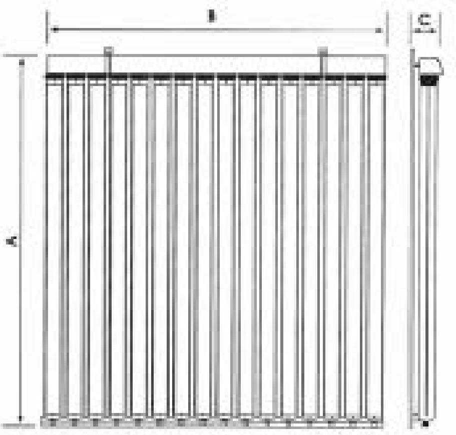
<table>
<tr><th colspan="2">Item</th><th>Specifications</th></tr>
<tr><td colspan="2">Voltage and Frequency</td><td>LT: 10HP and below – 220/380~415V 50Hz, 220/440V 60Hz
HT: 5HP and above = 380~415V 50Hz, 380~440V 60Hz(Suitable for Y - Δ starting)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Enclosure Construction and Degrees of Protection</td><td>
<table>
<tr><th rowspan="2">Degrees of Protection</th><th rowspan="2">Enclosure Construction</th><th colspan="3">Model Name</th><th rowspan="2">Frame No.</th></tr>
<tr><th>Horizontal</th><th>Vertical</th><th>Flange*</th></tr>
<tr><td>IP55</td><td>Totally Enclosed Fan-Cooled Type</td><td>SF-JR
SF-J
SF-J</td><td>SF-JRV
SF-JV
-</td><td>SF-JRF
SF-JF
-</td><td>63M - 132M
160M ~ 180L
200L ~ 250M</td></tr>
<tr><td>IP44</td><td>Totally Enclosed Fan-Cooled Type</td><td>SF-JR</td><td>-</td><td>-</td><td>63M ~ 90L</td></tr>
<tr><td>IP22</td><td>Drip-proof</td><td>SB-JR</td><td>SB-JRV</td><td>-</td><td>80M - 132M</td></tr>
</table>
* Standard vertical-type motor can be used for indoor flange type.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Frame Material</td><td>63M ~ 132M : Steel Plate
160M ~ 250M : Cast Iron</td></tr>
<tr><td colspan="2">Power Transmission System</td><td>Direct-coupled and belt driven, for up to 10HP 2-pole motor and all model 4-pole & 6-pole motor.
Direct-coupled, for 2-pole motor with 15HP and above.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Direction of Rotation</td><td>Counter-Clockwise (CCW) viewed from shaft-end side.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Thermal Class</td><td>IP22 and IP44 : 90L and below Class B
100L and above Class F
IP55 : All models Class F</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Circumstance Condition</td><td>Ambient Temperature</td><td>-20 ~ +40°C</td></tr>
<tr><td>Ambient Humidity</td><td>85% RH or less (for Drip-proof Structure)
95% RH or less (for Totally Enclosed Structure)</td></tr>
<tr><td>Altitude</td><td>Less than 1,000m above sea level</td></tr>
<tr><td>Environment</td><td>No bursting / erosive gas or vapor</td></tr>
<tr><td colspan="2">Connection Type</td><td>
<table>
<tr><th>Degrees of Protection</th><th>Frame No.</th><th>No.of leads</th><th>Connection Type</th></tr>
<tr><td rowspan="2">IP55</td><td>63M ~ 132M</td><td>6</td><td>Terminal Block</td></tr>
<tr><td>160M ~ 250M</td><td>6</td><td>Lead Wire (also suitable for Y - Δ starting)</td></tr>
<tr><td>IP44</td><td>63M ~ 90L</td><td>6</td><td>Lead Wire</td></tr>
<tr><td rowspan="2">IP22</td><td>80M - 90L</td><td>6</td><td>Lead Wire</td></tr>
<tr><td>100L - 132M</td><td>6</td><td>Terminal Block</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td colspan="2">Coating Colour</td><td>Munsell N5.5 (Grey)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Conformed Standard</td><td>IEC 60034-1 & JIS C 4210 (for Horizontal Type), JEC-2137-2000 (for Vertical Type)</td></tr>
</table>

หลอดรับแสงที่นำมาใช้

Seido 1
Specifications and Dimensions

DIMENSIONS

Module Type	Sonce 1 -8 (Seido 1-8)	Sonce 1 -16 (Seido 1-16)
A (mm)	2160	2160
B (mm)	960	1920
C (mm)	180	180



SPECIFICATIONS

Model Type	Sonce 1-8 (Seido 1-8)	Sonce 1-16 (Seido 1-16)
Tube Construction	Heat Pipe with Flat Absorber Vacuum Tube	
Number of collector pipes	8	16
Absorber Surface	1.4 m^2	2.8 m^2
Weight	50 kg	100 kg
Pressure Drop per module at 100 l/h	5 mbar	10 mbar
Fluid Content	0.48 L	0.96 L
Glass Material	High Quality borosilicate glass	
Glass Tube diameter	100 mm	100 mm
Wall Thickness	2.5 mm	2.5 mm
High Vacuum, long term stability	< 10[illegible] mbar	< 10[illegible] mbar
Absorber Material	aluminum	
Coating	Aluminum Nitride	
Absorption Coefficient	>92%	>92%
Emission Coefficient	<8%	<8%
Angle of Inclination	15° to 90°	15° to 90°
Test Pressure	10 bar	10 bar
Permissable Operating Pressure	6 bar	6 bar
Max. Temperature	190° C	190° C
Non-operating mode	247° C	247° C

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวปวีณา แดงโนรี เกิดเมื่อวันที่ 30 มกราคม 2530 จบการศึกษาระดับปริญญาตรีจากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาไฟฟ้ากำลัง เมื่อปีการศึกษา 2551 และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย บัณฑิตวิทยาลัย สาขาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน ในปีการศึกษา 2552