

การออกแบบ สร้าง และประเมินสมรรถนะของตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลา 2 ขั้นตอน



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
พฤษภาคม 2558

การออกแบบ สร้าง และประเมินสมรรถนะของตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลา 2 ขั้นตอน



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
พฤศจิกายน 2558
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การออกแบบ สร้าง และประเมินสมรรถนะของตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลา 2 ขั้นตอน



บทคัดย่อ
ของ
กฤษฎางค์ สุกระมูล

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
พฤษภาคม 2558

กฤษฎางค์ ศุกระมูล (2558). การออกแบบ สร้าง และประเมินสมรรถนะของตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลา 2 ขั้นตอน. ปรินูญานินพนธ์ ปร.ด. (วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ:บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม:

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยานิชกุล, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัญญา คังตระกูล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงการทดลองในการสร้างตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบจานพาราโบลาสองขั้นตอนเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการออกแบบตัวรวมรังสีอาทิตย์ที่สูงขึ้น ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกนได้ถูกติดตั้งเพื่อหมุนจานให้ตั้งฉากกับดวงอาทิตย์เพื่อรับรังสีตรงได้เต็มที่ จากการทดลองโดยใช้น้ำเป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อน ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสามารถทำได้สูงสุด 64.765 % และมีค่าเฉลี่ย 42.54 % ประสิทธิภาพเชิงแสงเป็น 85.5 % และอัตราส่วนการรวมรังสีเชิงเรขาคณิตรวม 254.918 สมรรถนะของตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบจานพาราโบลาสองขั้นตอนแสดงได้มีประสิทธิภาพเฉลี่ย 42.54 % ซึ่งมีค่าสูงกว่าแบบหนึ่งขั้นตอนที่มีประสิทธิภาพเฉลี่ย 17.97 % สามารถทำให้น้ำมีความร้อนค่อนข้างสูงระดับอุณหภูมิใกล้ 101.5 °C ซึ่งเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้กับพลังงานแสงอาทิตย์ต่อไป การทดลองตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบ 2 ขั้นตอนกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดระดับห้องปฏิบัติการ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสมรรถนะของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นในขณะที่ใช้เครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ แรงบิดกำลังเพลลา, ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก, ความเร็ว, และอุณหภูมิเครื่องทำความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อมีความเข้มของรังสีจำลองเพิ่มขึ้น แรงบิดสูงสุดของเครื่องยนต์ กำลังเพลลา ตัวเลขบีลของเครื่องยนต์ และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของฮีตเตอร์เพิ่มขึ้น ที่จุดโฟกัสความเข้มของแสงอาทิตย์จำลองมีค่า 8,890.53 W/m² เมื่อความร้อนป้อนเข้าเครื่องยนต์เป็น 602.3 J/s และแหล่งความร้อนมีประสิทธิภาพ 6.775 % เครื่องยนต์สร้างแรงบิดสูงสุด 0.0774 N.m ที่ 39.85 รอบต่อนาที กำลังเพลลาสูงสุด 0.359 W ที่ 55.6 รอบต่อนาทีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตกำลังได้ 0.27 W และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกสูงสุด 0.2503 % โดยประมาณ ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบเป็น 0.00574 % อุณหภูมิด้านร้อนมีค่า 655 K อุณหภูมิด้านเย็นมีค่า 306 K และตัวเลขบีลมีค่า 0.000487 วิธีการวิเคราะห์โดยใช้ Schmidt analysis ในการคำนวณกำลังของเครื่องยนต์มีแนวโน้มเดียวกันกับผลที่ได้จากการทดลองซึ่งมีค่าประมาณ 0.359 วัตต์ ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของน้ำในแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลผ่านต่อเนื่องและแคลอริมิเตอร์แบบขดสปริงแบบกันหอย อุณหภูมิของน้ำจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ที่โฟกัสมายังแคลอริมิเตอร์ เมื่อรังสีอาทิตย์มีค่าสูงขึ้น อุณหภูมิของน้ำที่ไหลผ่านแคลอริมิเตอร์นี้จะสูงขึ้นตามความเข้มรังสีอาทิตย์ เมื่อเพิ่มขดกันหอยภายในจะเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนได้สูงขึ้นทำให้แคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอยมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบน้ำไหลต่อเนื่อง โดยจะแสดงได้จากตัวเลขนัสเซลน์มเบอร์ที่เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : ตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบจานพาราโบลาสองขั้นตอน/แคลอริมิเตอร์/เครื่องยนต์สเตอร์ลิง

DESIGN, CONSTRUCTION AND PERFORMANCE EVALUATION OF A TWO-STAGE
CONCENTRATION PARABOLIC DISH



Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Doctor of Philosophy Degree in Mechanical Engineering
at Srinakharinwirot University

November 2015

Krissadang Sookramoon. (2015). *Design, construction and performance evaluation of a two-stage concentration parabolic dish*. Doctoral thesis, Ph.D. (MechanicalEngineering).

Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee:

Asst.Prof.Dr.Pracha Bunyawachakul, Asst.Prof.Bancha Kongtragool.

In the present work, an experimental study of a 2-stage concentration parabolic dish has been performed towards achieving an efficient design of a parabolic dish solar concentrator. Two – axis sun tracking system (battery powered) has been mounted to track 2-stage PDC allowing to the direction of the sun for receiving the direct solar radiation. Water was used as a working fluid. The experimental results shown that the maximum thermal efficiency was 64.765 %, the optical efficiency was 85.5 %, and the total geometrical concentration was 254.918. The performance of a 2-stage concentrator leads to further improvement of the efficiency, at an average of 42.54 % compared to the 1-stage parabolic dish concentrator, 17.97 % approximately. It was also found that the receiver can achieve during operation due to the relatively high water temperature of 101.5 °C. The prototype is useful for the applications of solar energy. The performance test of a laboratory-scaled single-acting gamma-configuration Stirling engine, by using a solar simulator made of twenty-four units of 1500 W tungsten lamp with a 2-stage parabolic dish concentrator. The experimental results indicated that when the heat input into the concentrator was 8890.93 W, into the engine of 602.3 W, and the thermal efficiency of solar-gamma Stirling engine is 6.775 %. The engine produces a maximum torque of 0.0774 N m at 39.85 rpm, and a maximum shaft power of 0.359 W at 55.6 RPM. The generated power is 0.27 W with the maximum brake thermal efficiency of 0.2503 %. The overall efficiency of the system is 0.00574 %. The hot-space and cold-space temperature was 655, and 306 K, respectively. The approximate Beale number was 0.000487. The engine power analyzed by using the Schmidt analysis is agree with the experimentally investigated, which is 0.359 W. The relationship of water temperature between flowing calorimeter and spiral calorimeter showed that water temperature increases with increasing of solar intensity. When adding spiral coil in the calorimeter, would enhance higher heat transfer efficiency of calorimeter as shown in the increasing of Nusselt number.

Keywords: 2-stage concentration parabolic dish, Calorimeter, Stirling engine

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย
จาก
สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน



ประกาศคุณูปการ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยานิชกุล, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัญชา คังตระกูล ผู้ควบคุมการทำปริญญานิพนธ์ที่ให้โอกาสในการทำวิจัย เรื่องการออกแบบสร้าง และประเมินสมรรถนะของตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลา 2 ชั้นตอน พร้อมทั้งให้ความรู้และคำแนะนำ คำปรึกษา ให้แนวคิด และช่วยแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นในการทำปริญญานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ ที่เอื้อเพื่อห้องปฏิบัติการ สถานที่และอุปกรณ์ในการทดสอบครั้งนี้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ที่ให้ทุนการศึกษา ระดับปริญญาเอกของผู้วิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ และกรรมการสอบปริญญานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้ความรู้และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ในระหว่างการทำนิพนธ์เป็นอย่างดี

ท้ายสุดผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดาที่ได้อบรมสั่งสอนและให้กำลังใจตลอดจนสนับสนุนการศึกษาและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง และขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ และความร่วมมือในการทำวิจัยเป็นอย่างดีในการทำวิจัยนี้

กฤษฎางค์ สุกระมล

ปริญญานิพนธ์
เรื่อง
การออกแบบ สร้าง และประเมินสมรรถนะของตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลา 2 ขั้นตอน
ของ
กฤษฎางค์ ศุกระมูล

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....รักษาราชการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ดุขฎิ โยเหลา)

วันที่ เดือน พ.ศ. 2558

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ คณะกรรมการสอบปากเปล่า

..... ที่ปรึกษาหลัก ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยวานิชกุล) (รองศาสตราจารย์ ดร.วรรณุช แจ่งสว่าง)

..... ที่ปรึกษาร่วม กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัญชา คังตระกูล) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยวานิชกุล)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัญชา คังตระกูล)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.มนัส แป้งใส)

The thesis titled
“Title Design, Construction and Performance Evaluation of a Two-
Stage Concentration Parabolic Dish”

By
Krissadang Sookramoon

Has been approved by the Graduate School as partial fulfillment of the requirements for the
Mechanical Engineering of Srinakharinwirot University.

..... Acting Dean of Graduate School
(Associate Professor Dr. Dusadee Yolao)

Date Month 2015

Thesis

Committee Oral Defense Committee

..... Major-advisorChair

(Asst.Prof.Dr.Pracha Bunyawanichakul)

(Assoc.Prof.Dr.Woranuch Jaengsawang)

.....Co-advisorCommittee

(Asst.Prof.Dr.Bancha Kongtrakool)

(Asst.Prof.Dr.Pracha Bunyawanichakul)

.....Committee

(Asst.Prof.Dr.Bancha Kongtragool)

.....Committee

(Dr.Manat Paengsai)

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	3
ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
งานวิจัยเกี่ยวกับตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลาในประเทศ.....	5
งานวิจัยเกี่ยวกับตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลาในต่างประเทศ.....	7
งานวิจัยเกี่ยวกับตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบจานพาราโบลาในประเทศ.....	8
งานวิจัยเกี่ยวกับตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบจานพาราโบลาในต่างประเทศ.....	11
งานวิจัยเกี่ยวกับพื้นผิวสะท้อนรังสีอาทิตย์	13
งานวิจัยเกี่ยวกับตัวดูดซับรังสีอาทิตย์	14
การศึกษาวิจัยของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงกับตัวรวมรังสีอาทิตย์ในประเทศ.....	15
เครื่องยนต์สเตอร์ลิงกับตัวรวมรังสีอาทิตย์ในต่างประเทศ	18
งานวิจัยเกี่ยวกับตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบสองขั้นตอนในต่างประเทศ	19
งานวิจัยเกี่ยวกับระบบติดตามดวงอาทิตย์ในประเทศ	23
งานวิจัยเกี่ยวกับระบบติดตามดวงอาทิตย์ในต่างประเทศ	25
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	31
ตัวรวมรังสีอาทิตย์	31
ประสิทธิภาพทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรวมรังสี.....	35
สมรรถนะเชิงแสงของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรวมรังสี.....	37
พื้นผิวรับและสะท้อนรังสีอาทิตย์.....	38
ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเกรเดียนต์(Temperature gradient) กับรีเจนเนอเรเตอร์	38
ตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลา 1 ขั้นตอน.....	39
ตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลา 2 ขั้นตอน.....	40

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2 (ต่อ)	
เทคโนโลยีการใช้ตัวรวมรังสีแบบสองชั้นตอนในปัจจุบัน.....	42
การวิเคราะห์ตัวรวมรังสีอาทิตย์โดยวิธีเส้นแนวรังสีอาทิตย์.....	44
การประยุกต์ใช้งานตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลา.....	45
เทคโนโลยีของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแสงอาทิตย์ในต่างประเทศ.....	46
ระบบติดตามดวงอาทิตย์และระบบควบคุม.....	48
ตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนระนาบแนวนอน.....	49
การออกแบบชุดควบคุมของระบบติดตามดวงอาทิตย์เคลื่อนที่ แบบ 2 แกน.....	53
3 วิธีดำเนินการวิจัย	58
อุปกรณ์สำหรับดำเนินงานวิจัย	59
การดำเนินงานวิจัย	68
แผนภาพการดำเนินการวิจัย	78
4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย	79
การออกแบบตัวรวมรังสีแบบสองชั้นตอน	80
ผลการทดลองประสิทธิภาพของตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบพาราโบลาสอง ชั้นตอนกับดวงอาทิตย์จริง	87
การทดสอบหาค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์จำลองจากเครื่องจำลองรังสี อาทิตย์ที่ตกกระทบจานพาราโบลา.....	91
การทดสอบหาค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์จำลองจากเครื่องจำลองรังสี อาทิตย์ตรงจุดโฟกัสของจานพาราโบลา.....	92
การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดย ใช้เครื่องจำลองรังสีอาทิตย์และจานพาราโบลาแบบสองชั้นตอน.....	94
การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดย ใช้ดวงอาทิตย์จริงและจานพาราโบลาแบบสองชั้นตอน.....	103
5 การวิเคราะห์ผลศาสตร์การไหลของของไหลทำงาน	114
วิธีการดำเนินงาน.....	114

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5 (ต่อ)	
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	116
ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	120
6 สรุปและข้อเสนอแนะ	138
สรุป	138
ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	139
บรรณานุกรม	141
ภาคผนวก	151
ภาคผนวก ก. ผลงานเผยแพร่จากปริญญานิพนธ์.....	152
ภาคผนวก ข. อภิธานศัพท์	220
ภาคผนวก ค. ตัวอย่างการคำนวณ	224
ภาคผนวก ง. ตารางบันทึกผลการทดสอบ	233
ภาคผนวก จ. ภาพถ่ายแสดงขนาดของอุปกรณ์	249
ภาคผนวก ฉ. เขียนแบบอุปกรณ์	255
ประวัติย่อผู้วิจัย	260

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 ตารางสรุปการสำรวจเอกสารงานวิจัย.....	27
2 อุณหภูมิที่สามารถทำได้ของตัวรับรังสีแบบต่าง ๆ.....	36
3 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบต่าง ๆ อัตราส่วนการรวมรังสี และอุณหภูมิสูงสุดที่ได้.....	37
4 ตัวแปรในการออกแบบและผลที่ได้จากการใช้โปรแกรมแคชเกรน แอนเทนนา.....	81
5 ค่าความเข้มรังสีจากเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ 24 ตำแหน่ง.....	91
6 ค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์จำลองจากเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ตรงจุดโฟกัส.....	93
7 รายละเอียดของเครื่องยนต์สเตอลิงพลังงานแสงอาทิตย์และตัวรวมรังสีแบบสอง ชั้นตอน.....	94
8 ความเข้มรังสีจริงที่แผ่นดูดซับรังสีที่ระยะต่าง ๆ กัน.....	97
9 สมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องยนต์สเตอลิง.....	99
10 สมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องยนต์สเตอลิง: 24 x 1500 W Halogen Lamp with 2-stage PDC.....	100
11 ข้อมูลรายละเอียดของเครื่องยนต์สเตอลิงพลังงานแสงอาทิตย์.....	103
12 ข้อมูลรายละเอียดการออกแบบตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบจานพาราโบลา 2 ชั้นตอน.....	103
13 การทดลองตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบจานพาราโบลา 2 ชั้นตอน.....	110
14 สมรรถนะของจานพาราโบลาและเครื่องยนต์สเตอลิง.....	112
15 การตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอลิง.....	113
16 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองด้วยการคำนวณพลศาสตร์ของการ ไหล.....	130
17 การคำนวณประสิทธิภาพของแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่องและแบบชดกัน หอย.....	132
18 แสดงค่า Nusselt number ของแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลผ่านต่อเนื่อง (simple calorimeter) และแคลอริมิเตอร์แบบชดกันหอย (spiral calorimeter) ที่อัตรา การไหลของน้ำผ่านแคลอริมิเตอร์เป็น 0.33 m/s.....	133
19 แสดงค่า Nusselt number ของแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลผ่านต่อเนื่อง (simple calorimeter) และแคลอริมิเตอร์แบบชดกันหอย (spiral calorimeter) ที่อัตรา การไหลของน้ำผ่านแคลอริมิเตอร์เป็น 0.66 m/s.....	134
20 แสดงค่า Nusselt number ของแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลผ่านต่อเนื่อง (simple calorimeter) และแคลอริมิเตอร์แบบชดกันหอย (spiral calorimeter) ที่อัตรา การไหลของน้ำผ่านแคลอริมิเตอร์เป็น 1.32 m/s.....	135

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 เทคโนโลยีการใช้ความร้อนจากดวงอาทิตย์โดยใช้อุปกรณ์รวมแสง.....	2
2 เครื่องยนต์ไอน้ำใช้ความร้อนจากงานพาราโบลาของมุไซในกรุงปารีสปี ค.ศ.1878 น้ำได้รับความร้อนที่จุดโฟกัสของตัวรวมรังสีแบบงานพาราโบลา.....	31
3 ตัวรวมรังสีอาทิตย์พาราโบลาแบบรวมแสง.....	33
4 แผนภาพดวงอาทิตย์กับตัวรวมรังสีที่ T_s ระยะห่าง R จากตัวรวมรังสีมี Aperture A_a และ Receiver Area A_r	33
5 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมที่ขอบงานพาราโบลา กับขนาดโฟกัสต่อเส้นผ่าน ศูนย์กลาง.....	34
6 แสดงอัตราส่วนการรวมรังสีและอุณหภูมิของตัวรับรังสีอาทิตย์	35
7 ตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลา.....	38
8 ตัวรวมรังสีอาทิตย์งานพาราโบลา.....	39
9 รูปทรงของตัวรวมรังสีแบบพาราโบลา-ไฮเปอร์โบลาสำหรับตัวรวมรังสีแบบสอง ชั้นตอน.....	41
10 การดัดแปลงช่องของตัวรับพลังงานสำหรับงานพาราโบลา.....	43
11 ตัวรวมรังสีชั้นตอนที่สองใน 3 รูปแบบ.....	43
12 แผนภูมิแสดงระบบผลิตไฟฟ้าแบบงานพาราโบลาร่วมกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง.....	45
13 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงพลังแสงอาทิตย์ของ John Ericsson.....	45
14 หลักการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าแบบงานพาราโบลาร่วมกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง..	46
15 สมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ Vanguard 1	47
16 แสดงระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งพัฒนาโดย Boeing/SES.....	47
17 แสดงภาพเครื่องยนต์สเตอร์ลิง Kockums 4-95.....	48
18 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงพลังแสงอาทิตย์ที่ใช้การรวมรังสีสองครั้ง.....	48
19 ส่วนเคลื่อนที่แนวอัลติจูดและแนวอะซิมูท.....	49
20 แสดงตำแหน่งของดวงอาทิตย์ในระนาบแนวนอน.....	50
21 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมดวงอาทิตย์กับโลก.....	51
22 นิยามของมุม Altitude และ Azimuth ของดวงอาทิตย์.....	51
23 แผนภูมิแสดงการทำงานของชุดขับเคลื่อนงานพาราโบลา 2 ชั้นตอนแบบ 2 แกน.	54

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
23 แผนภูมิแสดงการทำงานของชุดขับเคลื่อนงานพาราโบลา 2 ขั้นตอน.....	54
24 ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	55
25 ระบบควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์.....	55
26 มอเตอร์ควบคุมการเคลื่อนที่แนวอะซิมุท.....	56
27 มอเตอร์ควบคุมการเคลื่อนที่แนวอัลติจูด.....	56
28 ภาพวงจรที่ Simulator.....	57
29 ชุดเซ็นเซอร์ LDR.....	57
30 ต้นแบบตัวรวมรังสีแบบงานพาราโบลา 2 ขั้นตอนที่ติดตั้งบนระบบติดตามดวงอาทิตย์.....	58
31 ต้นแบบตัวรวมรังสีแบบงานพาราโบลา 2 ขั้นตอนที่สร้างขึ้น.....	59
32 งานพาราโบลา 2 ขั้นตอนที่ประกอบด้วยงานพาราโบลารายใหญ่และเล็ก.....	59
33 ระบบติดตามดวงอาทิตย์ของตัวรวมรังสีแบบงานพาราโบลา 2 ขั้นตอนที่สร้างขึ้น.....	60
34 แคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลผ่านต่อเนื่อง.....	60
35 แคลอริมิเตอร์แบบกันหอยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน.....	61
36 อุปกรณ์การหาอัตราการไหลของน้ำ.....	62
37 เครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ทำจากหลอดฮาโลเจนไส้ทังสเตนจำนวน 24 หลอด.....	62
38 K-type thermocouple.....	63
39 Data logger Graphtec Midi Logger 20 channel และคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ค.....	63
40 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดห้องปฏิบัติการ 0.35 W.....	64
41 ไพรานอมิเตอร์ยี่ห้อ Kipp & Sonnen.....	64
42 วงแหวนบังเงา ไพรานอมิเตอร์ และ โวลท์มิเตอร์.....	65
43 ชุดวัดกำลังของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง.....	65
44 ก้อนมวลสำหรับถ่วงน้ำหนักขณะใส่ภาระให้กับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง.....	66
45 อุปกรณ์วัดกำลังของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง.....	66
46 เครื่องวัดความเร็วลม.....	67
47 เครื่องมือวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์.....	67
48 แผนภาพแสดงการเก็บข้อมูลจากการทดลองจากดวงอาทิตย์จริงและเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์.....	69
49 แสดงการเก็บข้อมูลจากการทดลองกับดวงอาทิตย์จริง.....	71

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
50 แสดงการเก็บข้อมูลจากการทดลองกับเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์.....	71
51 แผนภาพแสดงแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลผ่านต่อเนื่องแบบก้นหอยที่ออกแบบขึ้น.....	72
52 การทดสอบหาค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์จำลองจากเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ตรงจุดโฟกัสของจานพาราโบลา.....	74
53 แผนภาพแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบสองชั้นตอนกับเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์.....	76
54 แผนภาพแสดงตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบจานพาราโบลา 2 ชั้นตอน ชุดจำลองรังสีอาทิตย์และถังจ่ายน้ำ.....	76
55 ภาพแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบสองชั้นตอนกับเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์และเครื่องยนต์สเตอร์ลิง.....	77
56 การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้ดวงอาทิตย์จริงและจานพาราโบลาแบบสองชั้นตอน.....	78
57 แสดงรูปทรงแคชชีเกรน.....	79
58 ATMOS Ray-Trace with Focus Spot.....	82
59 ตัวรวมรังสีสองชั้นตอนรูปทรงแคชชีเกรน-เกรกรอเรียน.....	83
60 สถานที่ที่ใช้ทำการทดลองตำแหน่ง 14.134°N , 100.611°E	84
61 ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกน.....	85
62 วงจรอิเล็กทรอนิกส์ของระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกน.....	86
63 มอเตอร์ขนาด 24 VDC 250W มีอัตราทดเกียร์ 1:5 ที่ 600 rpm สำหรับหมุนจานในแนว elevation และ มอเตอร์ขนาด 12 VDC 110 rpm สำหรับหมุนจานในแนว azimuth.....	86
64 Time variation of Insolation on May 12, 2014.....	87
65 Time variation of Energy and efficiency on May 12, 2014.....	88
66 Time variation of Insolation on May 14, 2014.....	88
67 Time variation of Energy and efficiency on May 14, 2014.....	88
68 Time variation of Insolation on May 15, 2014.....	89
69 Time variation of Energy and efficiency on May 15, 2014.....	89

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
70 Energy and efficiency comparisons between 1-st on May 12 and 2-st on May 16, 2014.....	90
71 Solar azimuth measurement results of 3 selected days.....	90
72 การทดสอบหาค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์จำลอง.....	92
73 การทดสอบหาค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์จำลองจากเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ตรงจุดโฟกัสของจานพาราโบลา.....	92
74 แผนผังแสดงเครื่องยนต์สโตลิงพลังงานแสงอาทิตย์แบบแกมมา.....	94
75 แผนภาพแสดงเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์กับตัวรวมรังสี.....	95
76 การทดลองแคลอริมิเตอร์กับเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์.....	95
77 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง.....	96
78 ผลจากการทดลองความเข้มรังสีที่ใช้แคลอริมิเตอร์เป็นอุปกรณ์วัดความร้อน.....	98
79 ผลจากการทดลองแหล่งกำเนิดความร้อน.....	98
80 Heat-up และ start-up curves ที่ความเข้มเฉลี่ย 4663.52 W/m^2	99
81 กราฟสมรรถนะของเครื่องยนต์โดยใช้เครื่องจำลองรังสีที่ความเข้มเฉลี่ย 4663.52 W/m^2	100
82 กราฟสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ความเข้มเฉลี่ย 4663.52 W/m^2	100
83 การวิเคราะห์ Schmidth analysis โดยใช้โปรแกรมของ Jean-pierre Van Dormael.....	101
84 การคำนวณ PV โดยใช้โปรแกรมของ Jean-pierre Van Dormael.....	102
85 เครื่องยนต์สโตลิงพลังงานแสงอาทิตย์.....	103
86 แผนผังแสดงการทดลองหาค่าความร้อนป้อนเข้า.....	104
87 การทดลองแคลอริมิเตอร์กับจานพาราโบลา 2 ขั้นตอน.....	104
88 แคลอริมิเตอร์สำหรับการทดสอบความร้อนป้อนเข้าเครื่องยนต์และเครื่องบันทึกข้อมูล.....	105
89 เครื่องวัดอุณหภูมิ.....	105
90 ลักษณะของตัวรวมรังสีแบบสองขั้นตอนขณะเตรียมการทดลอง.....	106
91 วงแหวนบังเงาและเครื่องวัดมุมซินิธ.....	106
92 เครื่องมือวัดกำลังเครื่องยนต์และกำลังไฟฟ้า.....	106
93 เครื่องมือวัดกำลังกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของเครื่องยนต์.....	107

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
94 ผลจากการทดลองแหล่งกำเนิดความร้อนโดยใช้แคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลผ่าน ต่อเนื่อง.....	110
95 ผลการทดลองเครื่องยนต์สเตอิลิงพลังงานแสงอาทิตย์แบบแกมมา.....	111
96 ผลการผลิตไฟฟ้าจากเครื่องยนต์สเตอิลิงและจานพาราโบลา.....	112
97 การเขียนแบบแคลอริมิเตอร์.....	120
98 การแบ่งอิลิเมนต์ย่อยของแคลอริมิเตอร์.....	121
99 การกำหนดเมฆของแคลอริมิเตอร์.....	121
100 การกระจายอุณหภูมิ ที่อัตราการไหล 0.0665 kg/s ภาพซ้ายแคลอริมิเตอร์แบบน้ำ ไหลต่อเนื่องภาพขวาแบบขดกันหอย.....	124
101 การกระจายความเร็ว ที่อัตราการไหล 0.0665 kg/s ภาพซ้ายแคลอริมิเตอร์แบบ น้ำไหลต่อเนื่องภาพขวาแบบขดกันหอย.....	125
102 การกระจายอุณหภูมิ ที่อัตราการไหล 0.133 kg/s ภาพซ้ายแคลอริมิเตอร์แบบน้ำ ไหลต่อเนื่องภาพขวาแบบขดกันหอย.....	126
103 การกระจายความเร็ว ที่อัตราการไหล 0.133 kg/s ภาพซ้ายแคลอริมิเตอร์แบบน้ำ ไหลต่อเนื่องภาพขวาแบบขดกันหอย.....	127
104 การกระจายอุณหภูมิ ที่อัตราการไหล 0.266 kg/s ภาพซ้ายแคลอริมิเตอร์แบบน้ำ ไหลต่อเนื่องภาพขวาแบบขดกันหอย.....	128
105 การกระจายความเร็ว ที่อัตราการไหล 0.266 kg/s ภาพซ้ายแคลอริมิเตอร์แบบน้ำ ไหลต่อเนื่องภาพขวาแบบขดกันหอย.....	129
106 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า Nusselt number กับ Reynolds number ของน้ำ ที่ไหลผ่านแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่องที่ความเร็ว 0.33 m/s.....	133
107 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า Nusselt number กับ Reynolds number ของน้ำ ที่ไหลผ่านแคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอยที่ความเร็ว 0.33 m/s.....	134
108 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า Nusselt number กับ Reynolds number ของน้ำ ที่ไหลผ่านแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่องที่ความเร็ว 0.66 m/s.....	134
109 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า Nusselt number กับ Reynolds number ของน้ำ ที่ไหลผ่านแคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอยที่ความเร็ว 0.66 m/s.....	135

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
110 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า Nusselt number กับ Reynolds number ของน้ำ ที่ไหลผ่านแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่องที่ความเร็ว 1.32 m/s.....	135
111 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า Nusselt number กับ Reynolds number ของน้ำ ที่ไหลผ่านแคลอริมิเตอร์แบบขัดกันหอยที่ความเร็ว 1.32 m/s.....	136



บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่าจำนวนประชากรบนโลกนี้มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง ชีวิตทุกชีวิตต้องพึ่งพาพลังงานในการดำเนินชีวิตหรือกิจกรรมต่างๆ การดำรงชีวิตประจำวันหรือการประกอบอาชีพ ดังนั้นพลังงานเป็นสิ่งจำเป็นในกระบวนการดำรงชีวิตของมนุษย์ ทำให้มีการใช้พลังงานมากขึ้นและส่งผลกระทบต่อพลังงานจากแหล่งต่างๆ มีจำนวนลดลงเรื่อยๆ เช่นทรัพยากรพลังงานบรรพชีวินที่มีปริมาณจำกัดและในปัจจุบันมีปริมาณลดลงอย่างต่อเนื่องจนเป็นสิ่งที่ขาดแคลนและจะหมดสิ้นไปในอนาคตอันใกล้

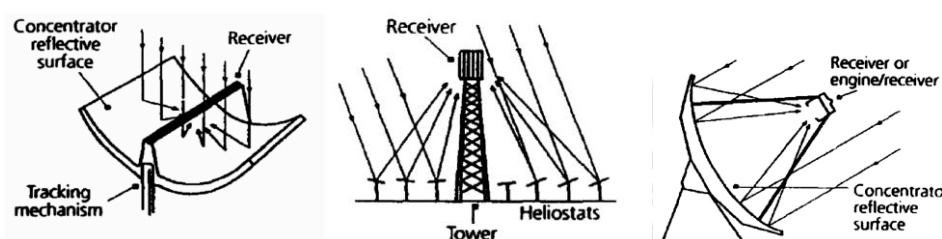
การแสวงหาแหล่งพลังงานทดแทนพลังงานบรรพชีวินจึงเป็นสิ่งที่ควรจะต้องให้ความสนใจ นอกจากนี้การใช้พลังงานบรรพชีวินโดยมีการเผาไหม้นั้นยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งมลพิษจากไอเสียของเครื่องยนต์สันดาปภายในที่ใช้กับยานยนต์และเครื่องต้นกำลังของโรงไฟฟ้าพลังความร้อน

รัฐบาลไทย มีนโยบายด้านเศรษฐกิจซึ่งกำหนดนโยบายพลังงานไว้ว่าเพื่อพัฒนาพลังงานให้ประเทศไทยสามารถพึ่งตนเองได้มากขึ้นโดยจัดหาพลังงานให้เพียงพอมีเสถียรภาพด้วยการเร่งสำรวจและพัฒนาแหล่งพลังงานประเภทต่างๆ ทั้งภายในประเทศและต่างประเทศและเร่งให้มีการเจรจากับประเทศเพื่อนบ้านในระดับรัฐบาลเพื่อร่วมพัฒนาแหล่งพลังงานวางแผนพัฒนาไฟฟ้าให้มีการกระจายชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้เพื่อลดความเสี่ยงด้านการจัดหาความผันผวนทางด้านราคาและลดต้นทุนการผลิตส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนที่มีศักยภาพโดยเฉพาะโครงการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กและโครงการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากรวมทั้งศึกษาความเหมาะสมในการพัฒนาพลังงานทางเลือกอื่นๆ มาใช้ประโยชน์ในการผลิตไฟฟ้าจึงมีการสนับสนุนการวิจัยในระดับมหาวิทยาลัยต่างๆ ของประเทศไทยโดยเฉพาะงานวิจัยที่เกี่ยวกับพลังงานแสงอาทิตย์

ดวงอาทิตย์เป็นดาวฤกษ์ที่เป็นศูนย์กลางของระบบสุริยะและเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญของโลกพลังงานแสงอาทิตย์ที่ส่งมายังชั้นบรรยากาศนอกสุดของโลกจะมีความเข้มสูงถึง 1,370 วัตต์ต่อตารางเมตร และเมื่อตกมายังพื้นโลกจะลดลงมีค่าประมาณ 800-1,000 วัตต์ต่อตารางเมตรหรือร้อยละ 70 ซึ่งมีค่ามากพอที่จะใช้ประโยชน์จากพลังงานความร้อนดวงอาทิตย์ได้รูปแบบของการใช้ประโยชน์จากพลังงานของดวงอาทิตย์ได้แก่ การใช้ตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบจานพาราโบลาพร้อมกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเพื่อผลิตพลังงานกลหรือพลังงานไฟฟ้า

เทคโนโลยีพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ในประเทศไทยยังเป็นเทคโนโลยีที่ยังไม่ได้รับการพัฒนามากนัก ส่วนใหญ่เป็นการใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์โดยตรงในการตากแห้งผลผลิตทางการเกษตรเปรียบเทียบกับต่างประเทศที่มีการพัฒนาเทคโนโลยีด้านความร้อนจากดวง

อาทิตย์ในรูปแบบต่าง ๆ มากมาย เช่นการพัฒนาเทคโนโลยีหลอดสุญญากาศในอุตสาหกรรมเครื่องทำน้ำร้อนหรือเทคโนโลยีการใช้ความร้อนจากดวงอาทิตย์โดยใช้อุปกรณ์รวมแสง (Concentrating Solar Technology) ซึ่งปัจจุบันมีการพัฒนาเทคโนโลยีให้มีความหลากหลายเหมาะสมกับการใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ มากมายและถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นโดยเฉพาะการพัฒนาการใช้ความร้อนจากดวงอาทิตย์โดยใช้อุปกรณ์รวมแสงเพื่อการผลิตไฟฟ้า (Concentrating Solar Power Plant) ซึ่งปัจจุบันเทคโนโลยีนี้มีการใช้งานใน 3 รูปแบบ คือการใช้รางพาราโบลาในการรวมแสงเพื่อผลิตไฟฟ้า (Parabolic Trough) หอคอยรวมแสงเพื่อผลิตไฟฟ้า (Power Tower) และเทคโนโลยีจานรวมแสง (Parabolic Dish Power Plant)



ภาพประกอบ 1 เทคโนโลยีการใช้ความร้อนจากดวงอาทิตย์โดยใช้อุปกรณ์รวมแสง
ที่มา: S.A. Kalogirou. (2004).

เนื่องจากการใช้จานรวมแสงอาทิตย์ร่วมกับเครื่องยนต์สันดาปภายนอกเป็นการใช้พลังงานหมุนเวียนจึงเป็นประโยชน์ต่อการแก้วิกฤตพลังงานและสิ่งแวดล้อมในอนาคต และเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องยนต์สันดาปภายนอกชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถใช้เชื้อเพลิงแทบทุกรูปแบบได้ไม่จำกัดรวมทั้งพลังงานแสงอาทิตย์ และสามารถทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ได้ง่ายกว่าเครื่องยนต์สันดาปภายในทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้พลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงจะไม่ก่อให้เกิดมลพิษใดๆ และการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานกลโดยใช้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงนั้นมีขั้นตอนในการเปลี่ยนรูปพลังงานน้อยกว่าการใช้วัฏจักรแรงดัน (Rankine cycle) ที่ใช้ในโรงไฟฟ้าพลังความร้อนทั่วไปจึงทำให้มีการสูญเสียในระบบน้อยและระบบมีประสิทธิภาพสูงและเมื่อมีระบบติดตามดวงอาทิตย์และระบบควบคุมจะทำให้จานรวมแสงอาทิตย์สามารถเคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ได้อย่างแม่นยำทำให้ประสิทธิภาพของระบบสูงขึ้น 25-45 % โดยขึ้นกับวัน เวลา และฤดูกาลด้วย

จากเหตุผลดังที่กล่าวมาผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบพาราโบลา 2 ขั้นตอนโดยมีระบบติดตามดวงอาทิตย์เพื่อศึกษาพลังงานความร้อนที่ทำได้ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายเช่น ในการผลิตกำลังกลของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ระบบผลิตไอน้ำ เครื่องอุ่นอากาศ เครื่องทำความเย็น ระบบทำความร้อนและความเย็นในอวกาศ เครื่องกลั่นน้ำทะเล เตาสังอาทิตย์ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในงานอุตสาหกรรมและกระบวนการทางเคมี โดยตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบพาราโบลา 2 ขั้นตอนที่ใช้ผลิตความร้อนที่จะพัฒนาขึ้นนี้จะไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมเนื่องจากสามารถใช้พลังงานหมุนเวียนจากดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงาน

ป้อนเข้า ผลลัพธ์ที่ได้นอกจากจะมีส่วนช่วยในการอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นปัญหาหลักของโลกในปัจจุบันแล้วยังเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาทางด้านพลังงานทางเลือกอีกด้วยด้วยเหตุนี้จึงมุ่งความสนใจไปที่การออกแบบตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบพาราโบลา 2 ชั้นตอน เพื่อหารูปทรงทางเรขาคณิตที่เหมาะสมของจานพาราโบลา และแสงอาทิตย์ที่ให้ความเข้มข้นของรังสีดวงอาทิตย์สูงที่สุดโดยวัสดุที่ใช้ผลิตมีราคาต่ำ หาได้ง่ายในประเทศ มีความเหมาะสมและคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ อีกทั้งยังเหมาะกับการใช้งานในประเทศไทยและสามารถพัฒนาไปสู่การผลิตพลังงานอย่างยั่งยืนจากแหล่งพลังงานทดแทน โดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์ อาจมีการถ่ายทอดเทคโนโลยีดังกล่าวนี้ไปสู่ภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมในอนาคต

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ตั้งวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยไว้ดังนี้

- 1) ออกแบบ สร้างและทดสอบสมรรถนะของต้นแบบตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบจานพาราโบลา 2 ชั้นตอน โดยใช้วัสดุที่มีในประเทศ (ชั้นตอนที่ 1 มีขนาดพื้นที่ประมาณ 2.2 ตารางเมตร ชั้นตอนที่ 2 มีขนาดพื้นที่ประมาณ 0.3 ตารางเมตร)
- 2) เป็นการศึกษาทางด้านการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการโดยทำการทวนสอบกับการจำลองเชิงตัวเลข แสดงในบทที่ 4
- 3) พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับตัวรับรังสีของตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบจานพาราโบลา 2 ชั้นตอน ทำการจำลองเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของการไหลและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง แสดงในบทที่ 5

ขอบเขตของโครงการวิจัย

เพื่อออกแบบ พัฒนาและประเมินสมรรถนะของต้นแบบตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบจานพาราโบลา 2 ชั้นตอนที่มีระบบติดตามดวงอาทิตย์ช่วงอุณหภูมิปานกลาง (ไม่เกิน 400°C) ในสภาวะของภูมิอากาศเขตร้อนของประเทศไทย ทำการทดลองในอำเภอลองหลวง จังหวัดปทุมธานี โดยนำไปประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนให้กับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดกำลัง 0.35 W ปริมาตรคูด 0.394 cc

ประโยชน์และผลที่คาดว่าจะได้รับ

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยคาดว่าประโยชน์ที่จะได้รับจากการครั้งนี้ไว้ดังนี้

- 1) ได้ข้อมูลในรูปของพารามิเตอร์ในการออกแบบ ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นจากงานวิจัยเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบจานพาราโบลา 2 ชั้นตอน และเป็นการสนับสนุนให้มีการวิเคราะห์ หาตัวแปรที่มีผลในการใช้งานจริงเพื่อความถูกต้องเหมาะสมในการออกแบบสร้างอุปกรณ์

2) สามารถพิสูจน์ยืนยันการใช้งานได้และความคุ้มค่าในการเปลี่ยนรูปพลังงานจากรังสีอาทิตย์ผ่านตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบสองขั้นตอนเป็นพลังงานความร้อนถ่ายเทให้กับของไหลทำงานได้แก่น้ำและอากาศ

3) ได้องค์ความรู้ใหม่ในเรื่องของตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบจานพาราโบลา 2 ขั้นตอนที่สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาไปสู่การใช้พลังงานทดแทนที่ยั่งยืนในอนาคต

4) ได้ตัวรวมรังสีอาทิตย์ 2 ขั้นตอน แบบใหม่ที่สามารถทำอุณหภูมิได้สูงขึ้นได้ พลังงานความร้อนมากขึ้น มีขนาดกะทัดรัด ราคาไม่แพง ทำจากวัสดุที่มีในประเทศ มีข้อได้เปรียบด้านพลังงานที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับตัวรวมรังสีแบบ 1 ขั้นตอนและสามารถนำผลจากการวิจัยที่ได้ไปใช้ในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้มีขนาดที่เหมาะสมกับตัวรวมรังสีอาทิตย์มีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงขึ้น



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

1. การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.1 งานวิจัยเกี่ยวกับตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลาในประเทศ

เฉลิมพล แก้วพะเนาว์ (Kaewpanao C. 1981). จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ได้ทำการวิจัยและทดลองสร้างชุดบังคับตัวรับแสงแบบรางพาราโบลา โดยวางรางพาราโบลาอยู่ในทิศเหนือได้ และให้หมุนเคลื่อนที่จากทิศตะวันออกไปทิศตะวันตก ผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจ

สมภพ ปัญญาสมพรรค์ (Panyasompan S. 1999). ได้ทำวิทยานิพนธ์เพื่อพัฒนาออกแบบและสร้างหม้อหุงข้าวพลังงานแสงอาทิตย์ โดยศึกษาสมรรถนะต่างๆ ที่เหมาะสม และศึกษาความเป็นไปได้ในการหุงข้าวด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย โดยศึกษาเปรียบเทียบหม้อหุงข้าวพลังงานแสงอาทิตย์ 3 แบบ แบบแรกเป็นแบบแผ่นสะท้อนรังสีแผ่นเดียว แบบที่สองเป็นแบบแผ่นสะท้อนรังสีแผ่นคู่ และแบบที่สามเป็นแบบรางพาราโบลา โดยกล่องสะสมความร้อนมีขนาดเท่ากับ 30x60x15 ลูกบาศก์เซนติเมตร สมรรถนะของหม้อหุงข้าวพลังงานแสงอาทิตย์สามารถหุงข้าวได้ 500 กรัม ในอัตราส่วนของข้าว 1 ส่วนต่อน้ำ 3 ส่วน โดยทำการทดสอบ 2 ช่วงเวลา คือ เวลา 9.00-12.00 นาฬิกา และเวลา 12.00-15.00 นาฬิกา ผลการวิจัยพบว่าหม้อหุงข้าวพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นสะท้อนรังสีแผ่นคู่ให้อุณหภูมิสูงที่สุด รองลงมาเป็นแบบแผ่นสะท้อนรังสีแผ่นเดียว โดยใช้เวลาที่ใช้ในการหุงข้าว 2-3 ชั่วโมง ข้าวก็สุก ส่วนแบบรางพาราโบายังมีการสูญเสียความร้อนมากจึงต้องพัฒนาต่อไป จากการศึกษาความเป็นไปได้พบว่า ประเทศไทยมีศักยภาพที่ดีมีปริมาณรังสีอาทิตย์เพียงพอ จึงสามารถที่จะหุงข้าวด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จากหม้อหุงข้าวพลังงานแสงอาทิตย์ประกอบกับข้าวที่หุงด้วยหม้อหุงข้าวพลังงานแสงอาทิตย์มีลักษณะคล้ายการหุงด้วยหม้อหุงข้าวแบบอื่น สามารถรับประทานได้ และใช้เวลาในการหุงไม่นานจนเกินไป ในการสร้างหม้อหุงข้าวพลังงานแสงอาทิตย์ใช้เงินทุนประมาณ 1,000 บาท

นพวรรณ เสมวิมล (Samwimol N. 2000). ได้ประเมินเทคโนโลยีเครื่องทำนํ้าร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลารวมแสง ซึ่งเป็นเทคโนโลยีต้นแบบจากประเทศเยอรมัน วิธีที่นำมาใช้ในการประเมินครั้งนี้คือเทคนิคการวิจัยแบบเดลฟายน์ ซึ่งใช้ในการรวบรวมความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 13 ท่าน ผลที่ได้พบว่า ประเด็นที่มีความสำคัญที่สุด คือ อุณหภูมิความร้อนที่ได้ และประเด็นสำคัญที่รองลงมา คือ ระบบการติดตามแสงอาทิตย์ ราคา ความสะดวกในการใช้งาน ลักษณะการสะท้อนแสง-รวมแสง การบำรุงรักษา และขนาด-น้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้นี้

นำไปใช้เป็นแนวทางการทดลอง ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิของน้ำร้อนที่ได้ขึ้นกับค่าความเข้มข้นรังสีตรงเป็นหลักและการเคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ของรางรับแสง โดยจะให้ค่าประสิทธิภาพในการทำงานสูงที่สุด เมื่อทำการปรับรางรับแสงให้เคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ทุกๆ 5-10 นาที สำหรับวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส (Clear day) จะได้ค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 19% และสามารถต้มน้ำเดือดได้ถึง 24 ลิตรต่อวัน

มนูญ พิรุวรรณ (Pituwan M. 2000). ได้ทำวิทยานิพนธ์เรื่องการออกแบบและทดสอบแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดรวมแสงด้วยแผงพาราโบลา โดยมีหลักการพื้นฐานในการสะท้อนรังสีตรงจากดวงอาทิตย์ในระบบสองมิติ พิกัด x-y ไปที่จุดรวมรังสี พลังงานที่ได้ในแนวรวมรังสีจะถ่ายเทผ่านผนังท่อไปสู่น้ำมันทำความร้อนที่บรรจุอยู่ งานวิจัยนี้ได้นำวัสดุที่อยู่ในประเทศมาสร้างระบบโดยใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ผิวมัน กว้าง 1200 มม. ยาว 2400 มม. ขึ้นรูปเป็นแผงสะท้อนรังสียาว 2400 มม. กว้าง 992 มม. มีรัศมีวงกลม 573 มม. และเป็นตำแหน่งเดียวกันกับ ท่อรวมรังสีที่ทำจากท่อเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 48 มม. ภายใน 40 มม. ยาว 2,920 มม. สำหรับถ่ายเทความร้อนจากน้ำมันไปสู่ น้ำ ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ จากการเก็บข้อมูลในช่วงเดือนพฤศจิกายน 2543-กุมภาพันธ์ 2544 ที่อัตราการไหลของน้ำมันต่างๆกัน 5 ค่า คือ 0.295, 0.345, 0.415, 0.515, และ 0.685 กิโลกรัมต่อนาที เวลา 10.30-14.00 น. พบว่าพลังงานสูงสุดที่สร้างได้ 388.72 W ที่อัตราการไหลของน้ำมัน 0.415 กิโลกรัมต่อนาที โดยพลังงานตกกระทบบนแผงสูงสุด(กรมอุตุนิยมวิทยา) 880 วัตต์ต่อตารางเมตร ประสิทธิภาพสูงสุด 25.2% และ 21.9 % โดยเฉลี่ย อุณหภูมิน้ำมันสูงสุด 65.7 องศาเซลเซียส ขณะที่อุณหภูมิผิวท่อรวมรังสีด้านนอกเท่ากับ 75.8 องศาเซลเซียส ความยาวที่เหมาะสมของแผงสะท้อนรังสีประมาณ 1800 มม.

ปองพล รุ่งรัตน์รัชชัย (Ruengrattawachai P. 2002). ได้ทำการออกแบบสร้างและทดลองเกี่ยวกับตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา เพื่อการศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลในการทดสอบประสิทธิภาพและศึกษาความเป็นไปได้ของการนำความร้อนมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการรูปอาหาร ชุดทดลองที่สร้างขึ้นเป็นรางรับแสงแบบพาราโบลา ทำด้วยแผ่นเหล็กไร้สนิม ผิวมันวาว ขนาดพื้นที่รับแสง 2.98 ตารางเมตร มีระยะโฟกัส 50 เซนติเมตร ที่ระยะโฟกัสมีท่อสีดำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มิลลิเมตร เคลือบด้วยสีดำ วางทับกับระยะโฟกัสไปตลอดแนวรับแสง ใช้ น้ำมัน ASAE1051 เป็นสารทำงาน เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนจากรางรับแสง ติดตั้งชุดบังคับติดตามดวงอาทิตย์สำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่ของรางรับแสง ทำการทดลองโดยการนำชุดทดลองออกไปรับแสงอาทิตย์ โดยตั้งเครื่องแนวเหนือ-ใต้ ทำการปรับค่าอัตราการไหลของน้ำมัน 0.03-0.045 และ 0.06 กิโลกรัมต่อวินาที และทดลองแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำที่อัตราการไหล 0.05 ลิตรต่อนาที จากการทดลองวิเคราะห์ผลพบว่า สามารถทำอุณหภูมิน้ำมันได้สูงสุด 79.9 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.06 กิโลกรัมต่อวินาที คิดเป็นพลังงานสะสม 8,930.053 จูล สามารถอุ่นน้ำให้มีอุณหภูมิ

แตกต่างกันสูงสุดได้ 6.1 องศาเซลเซียส โดยมีค่าเฉลี่ยของความแตกต่าง 2.28 องศาเซลเซียส ที่อัตราการใช้ของน้ำมัน 0.045 กิโลกรัมต่อวินาที

ชมพูนุท พรธรรษา (Hansa C. 2009). ได้ทำวิทยานิพนธ์เรื่อง การศึกษาและทดสอบสมรรถนะตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลาโดยใช้แสงอาทิตย์จำลองและแสงอาทิตย์จริงโดยออกแบบและสร้างตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลาตัวดูดซับรังสีอาทิตย์แบบแท่งอลูมิเนียมตันและแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลผ่านต่อเนื่องวัสดุพื้นผิวที่ใช้สะท้อนรังสีอาทิตย์คือแผ่นอลูมิเนียมและอลูมิเนียมฟลอยด์เพื่อให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับการรับและสะท้อนรังสีอาทิตย์อุณหภูมิได้จากตัวดูดซับรังสีอาทิตย์พลังงานความร้อนและความเข้มรังสีอาทิตย์ของตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลาผลจากการทดลองพบว่าค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ได้จากแคลอริมิเตอร์ที่สร้างขึ้นสามารถวัดได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากไพรานอมิเตอร์พื้นผิวรับและสะท้อนรังสีอาทิตย์ชนิดอลูมิเนียมฟลอยด์ สามารถให้พลังงานความร้อนได้มากกว่าพื้นผิวรับและสะท้อนรังสีอาทิตย์ชนิดแผ่นอลูมิเนียมและพลังงานที่ตัวดูดซับรังสีเมื่อใช้แผ่นสะท้อนรังสีเป็นอลูมิเนียมฟลอยด์ มีค่าเป็น 2.7 เท่าของพลังงานที่ตัวดูดซับรังสีได้เมื่อไม่มีพื้นผิวสะท้อนรังสีอาทิตย์

ประกอบ สุวรรณ และ ชีรภัทร หลิมบุญเรือง (Suwanna P. & Limboonrueng T. 2011). ในปี พ.ศ. 2554 ได้ทำวิจัยเรื่อง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการออกแบบตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา โดยมีรางพาราโบลารวมแสงไปที่จุดโฟกัส มีช่องไหลดูดซับความร้อนรับพลังงานไปใช้งาน ปัจจัยที่ส่งผลต่อการทำงานของตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา คือ การสะท้อนรังสีอาทิตย์ ความแม่นยำของแบบจำลองการเดินทางของดวงอาทิตย์ การถ่ายเทความร้อนให้กับของไหล ระบบควบคุมกลไกขับเคลื่อนรางพาราโบลา และความเร็วลม สมการการออกแบบรางพาราโบลาโดยนำเสนอการวิเคราะห์ฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกเพื่อให้ออกแบบและหาขนาดที่เหมาะสมของรางพาราโบลา โดยออกแบบสร้างและทดสอบตัวรับรังสีที่มีระยะโฟกัส 300 มิลลิเมตร ความยาว 1.52 เมตร จำนวน 3 ชั้น ใช้การหมุนเวียนน้ำ 3 ลิตรต่อนาที ผ่านท่อสุญญากาศที่ตำแหน่งของจุดโฟกัสของราง ผลการทดสอบพบว่าระบบสร้างความร้อนได้เฉลี่ย 4,180 กิโลจูล ในช่วงการทดสอบ 5 ชั่วโมง

1.2 งานวิจัยเกี่ยวกับตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลาในต่างประเทศ

โทมัสและโทมัสซาติสเอ (Thomas, A. & Thomas, Satish A. 1994). ได้ทำการหาค่าการสูญเสียความร้อนที่ตัวรับพลังงานของแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 31.8 มม. ทดลองโดยเปลี่ยนค่าตัวแปรหลักคือ อุณหภูมิบรรยากาศครั้งละ 5 °C อุณหภูมิที่ตัวรับพลังงานครั้งละ 10 °C ความเร็วลมครั้งละ 2 m/s ผลที่ได้รับคืออุณหภูมิของตัวรับพลังงานสูงขึ้น การสูญเสียความร้อนก็จะสูงขึ้น อุณหภูมิบรรยากาศสูงขึ้น การสูญเสียความร้อนก็จะลดลงและถ้าความเร็วลมมากขึ้น การสูญเสียความร้อนก็จะมากขึ้นด้วย

ยี ซินชิและคณะ (Xinshi, Ge, et al. 1996). ได้ทำการสร้างแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดรวมแสง แบบพาราโบลา มีขนาดกว้าง 4 ม. ยาว 5 ม. สำหรับให้ความร้อนและพลังงานไฟฟ้า จากนั้นได้ทดลองหาปริมาณ ความร้อนที่แผงสามารถรับได้โดยที่อุณหภูมิของของไหลสูงกว่า 220 °C ระบบนี้ควรนำไปใช้ในพื้นที่ที่ขาดแคลนแหล่งพลังงานแต่มีพลังงานแสงอาทิตย์ในปริมาณมาก

ปูนิตา ตานิจา และคณะ (Punita Taneja; et al. 1997). ได้ศึกษาคุณลักษณะการรวมรังสีของตัวรวมรังสีแบบสองชั้นตอน : ผลของความคลาดเคลื่อนของผิวกระจกเงาบนตัวรวมรังสีปฐภูมิคุณลักษณะการรวมรังสีของตัวรวมรังสีแบบสองชั้นตอนเชิงเส้นที่มีระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบพาราโบลาเป็นตัวรวมรังสีปฐภูมิและตัวรวมรังสีแบบผสมเป็นตัวรวมรังสีชั้นที่สองปรับได้ตามฤดูกาลมีตัวดูดซับพลังงานแผ่นเรียบตามแนวนอนได้ถูกศึกษาโดยใช้วิธีเทคนิคการลากเส้นแสงแบบมอนติคาร์โลต์ ผลของการกระจายแบบสุ่มของความคลาดเคลื่อนของผิวกระจกเงาปฐภูมิในคุณลักษณะการรวมรังสีของตัวรวมรังสีชั้นที่สองได้ถูกศึกษา

อาร์ เบเดอร์ และคณะ (R Bader; et al. 2009). ได้ศึกษาการออกแบบเชิงแสงของตัวรวมรังสีแบบพาราโบลา 2 ชั้นตอน โดยใช้พื้นฐานของโครงสร้างของนิวแมติกโพลีเมอร์ เป็นการสร้างตัวรวมรังสีแบบพาราโบลาโดยใช้กระจกเงา นิวแมติกโพลีเมอร์ยึดบนโครงสร้างคอนกรีต ตัวรวมรังสีชั้นตอนที่สองยึดกับท่อทรงกระบอกของชั้นตอนแรก ทำการออกแบบโดยหาค่าที่เหมาะสมใช้หาค่าฟลักซ์รังสีอาทิตย์สูงสุดที่ทำได้ เทคนิคการลากเส้นแสงแบบมอนติคาร์โลต์ถูกนำมาใช้ในการหาผลการสะท้อนรังสีของผิว (ความคลาดเคลื่อน) และลำแสงที่เกิดขึ้นจากสมรรถนะของระบบตัวรวมรังสีที่ประกอบด้วยชั้นตอนที่หนึ่งและชั้นตอนที่สอง ผลการศึกษาเชิงตัวเลขสอดคล้องกับค่าที่วัดได้ในภาคสนาม ต้นแบบมีขนาดยาว 49.4 เมตร กว้าง 7.9 เมตร โดยมีระบบติดตามดวงอาทิตย์ อัตราส่วนการรวมรังสีเชิงทฤษฎีสูงสุด 151 เท่าของดวงอาทิตย์ การวัดที่ตัวรวมรังสีชั้นตอนที่สองแบบแบนได้ 55 เท่าของดวงอาทิตย์

1.3 งานวิจัยเกี่ยวกับตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบจานพาราโบลาในประเทศ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า (KMITT.1978). ได้ออกแบบสร้างเตาหุงต้มพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้ตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลา ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 เมตร ความยาวโฟกัส 0.65 เมตร แผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์ทำจากแผ่นสแตนเลสขัดมัน โดยตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูจำนวน 15 แผ่นยึดติดกับโครงอลูมิเนียม จากผลการทดลองปรากฏว่าให้อุณหภูมิสูงสุดที่กลางเป้าประมาณ 400 °C และมีอุณหภูมิโดยเฉลี่ย ประมาณ 200-300 °C สามารถประกอบอาหารได้

อากาศ เสนิงส์ ณ อยุธยา และคณะ (Saneevong Na Ayuttaya A; et al. 2005). ได้นำเสนองานวิจัยเรื่องการประเมินค่าพลังงานความร้อนของจานพาราโบลาในการประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 1 วันที่ 11-13 พฤษภาคม 2548 โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ ซิตี้ จอมเทียน จังหวัดชลบุรี โดยสร้างและประเมินค่าพลังงานความร้อนของระบบรวมแสงอาทิตย์ด้วยจานพาราโบลา ศึกษาถึงการกระจายอุณหภูมิบนแผ่นเหล็กวงกลมสำหรับดูดซับพลังงานความร้อน

และคำนวณหาค่าพลังงานที่ได้รับจากการรวมแสงอาทิตย์ที่ระยะห่างระหว่างจุดรวมแสงกับจานพาราโบลาสามระยะระบบจานรวมแสงนี้ประกอบด้วย 3 ส่วนสำคัญได้แก่จานรวมแสงพาราโบลา, ระบบติดตามดวงอาทิตย์อย่างง่ายด้วยมือและแผ่นเหล็กดูดซับพลังงานความร้อนจากการรวมแสงชุดจานพาราโบลานี้ประกอบด้วยจานรวมแสงพาราโบลาย่อยจำนวนห้าใบแต่ละใบมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 เซนติเมตรความยาวโฟกัส 170 เซนติเมตรบุผิวด้วยแถบแผ่นสะท้อนแสงชนิดอลูมิเนียมอะโนไดซ์โดยมีพื้นที่รับแสงรวมทั้งห้าใบเท่ากับ 0.98 ตารางเมตรผลการประเมินค่าพลังงานความร้อนทั้งหมดจากแผ่นจานรวมแสงที่รับได้ในสภาวะที่ไม่มีการป้องกันการพาและการแผ่รังสีความร้อนพบว่าการกระจายอุณหภูมิบนแผ่นรวมแสงทั้งสามระยะรวมแสงยังคงลักษณะเป็นเส้นโค้งระฆังคว่ำและที่ระยะโฟกัส 170 เซนติเมตรได้ค่าประสิทธิภาพเชิงแสงเฉลี่ยตลอดวันของระบบนี้เท่ากับ 35.04 % โดยที่อุณหภูมิสูงสุดที่ทำได้จุดกึ่งกลางแผ่นดูดซับความร้อนเท่ากับ 187 องศาเซลเซียส

ศักรินทร์ วีรณศิริ (Veeratanasil S. 2007). นักศึกษาภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น ได้สร้างผิวสะท้อนแสงสำหรับเตาสूरียะอุณหภูมิสูง โดยได้สร้างเตาสूरียะอุณหภูมิสูงที่มีระบบรวมแสงเป็นผิวโค้งพาราโบลาแบบนอกแกน ความยาวโฟกัส 280 เซนติเมตร โดยใช้กระจกเงาราบทรงหกเหลี่ยมด้านเท่า ยาวด้านละ 13.8 เซนติเมตรเป็นตัวสะท้อนแสง ในการติดตั้งกระจกบนผิวโค้งเพื่อสะท้อนแสงไปยังจุดโฟกัส จะใช้แสงจากฮีเลียม นีออนเลเซอร์ เป็นต้นกำเนิด กระจกแต่ละแผ่นสามารถเคลื่อนที่ได้รอบทิศทางโดยใช้ลูกปืนติดไว้ที่ด้านหลัง และวางบนแหวนโลหะทำให้ปรับมุมสะท้อนได้ การยึดติดวัสดุต่างๆกับผิวโค้งได้ใช้กาวยาง ที่สามารถทนต่อแสงแดด, ความร้อน และความชื้น อุณหภูมิทำงานของเตาที่คาดหวังอยู่ในช่วง 600-650 °C

ภควัต โอวาท (Ovat P. 2008). ได้ทำวิทยานิพนธ์เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองหุงข้าวด้วยจานรวมแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดยออกแบบสร้างจานรวมแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 เซนติเมตร โดยใช้แผ่นสะท้อนแสงเป็นสแตนเลสชนิดขัดมันเงา เพื่อรวมรังสีจากดวงอาทิตย์ให้รวมกันที่จุดโฟกัสจนทำให้มีอุณหภูมิ ณ จุดดังกล่าวสูงขึ้น นำความร้อนที่ได้จากการรวมรังสีดวงอาทิตย์มาทดลองประกอบอาหาร พร้อมทั้งศึกษาความเหมาะสมและความเป็นไปได้ในการประกอบอาหารด้วยจานรวมแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา ทำการทดลองเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับเวลาในช่วง 9.00 น. ถึง 15.00 น. คืออุณหภูมิที่อยู่ในหม้อสะสมความร้อนซึ่งถูกวางอยู่ ณ จุดโฟกัสของจานรวมแสงอาทิตย์แบบพาราโบลากับอุณหภูมิอากาศแวดล้อม พร้อมทั้งเก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย เช่น ความเร็วลม , ความชื้นสัมพัทธ์, ความเข้มแสงอาทิตย์ ซึ่งลักษณะของการทำการทดลองในครั้งนี้แบ่งออกเป็น 4 กรณี คือ กรณีที่ 1 การทดลองโดยไม่มีการประกอบอาหาร กรณีที่ 2 ทดลองหุงข้าว 350 กรัม ต่อน้ำ 525 มิลลิลิตร กรณีที่ 3 ทอดไข่ดาว 3 ฟองกับน้ำมันพืช 10 กรัม และกรณีที่ 4 อบเนื้อไก่ 150 กรัม สำหรับกรณีที่ 2 – 4 แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงเช้าตั้งแต่เวลา 9.00 น. จนถึงอาหารสุก และช่วงบ่ายตั้งแต่

เวลา 12.00 น. จนถึงอาหารสุก ผลการทดลองในกรณีที่ 1 ตลอดทั้ง 4 วัน พบว่าจานพาราโบลาสามารถทำให้อุณหภูมิภายในหม้อสะสมความร้อนสูงถึง 155.3 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 105.9 องศาเซลเซียส ในกรณีที่ 2 ตลอดทั้ง 3 ช่วงเช้าที่ข้าวสุกใช้เวลาประมาณ 130 – 155 นาที อุณหภูมิเฉลี่ยภายในหม้อสะสมความร้อนเท่ากับ 78.3 องศาเซลเซียส ช่วงบ่ายใช้เวลาที่ข้าวสุก 65 – 115 นาที อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 77.2 องศาเซลเซียส ในกรณีที่ 3 ตลอดทั้ง 2 วันช่วงเช้าไขดาวสุกใช้เวลาประมาณ 20 นาที อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 76.2 องศาเซลเซียส ช่วงบ่ายไขดาวสุกใช้เวลาประมาณ 20 นาที อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 85.3 องศา ในกรณีที่ 4 ช่วงเช้าเนื้อไก่สุกใช้เวลาประมาณ 30 นาที อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 81.55 องศาเซลเซียส ช่วงบ่ายระยะเวลาที่เนื้อไก่สุกประมาณ 20 นาที อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 85.15 องศาเซลเซียส

โสภณ โกวิทอิสริยะ (Kovitissara S. 2010). ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพจานรวมแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา ค่าความร้อนที่ได้จากจานรวมแสงอาทิตย์แบบพาราโบลารายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.45 เมตรรวมพื้นที่สะท้อนแสง 4.712 ตารางเมตรโดยใช้แผ่นอลูมิเนียมเป็นตัวสะท้อนเพื่อรวมรังสีตรงจากดวงอาทิตย์ให้รวมกันที่จุดโฟกัสจนทำให้มีอุณหภูมิ ณ จุดดังกล่าวสูงขึ้น การนำความร้อนที่ได้จากรวมรังสีดวงอาทิตย์มาใช้ในการวิจัยนี้โดยการนำมาทดสอบกับน้ำที่ไหลเข้าออกจากนั้นนำอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นไปคำนวณหาค่าความร้อนค่าความร้อนที่ได้จะนำไปเป็นข้อมูลเพื่อใช้เลือกและทดสอบกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงต่อไปในการศึกษาทดลองเปรียบเทียบอุณหภูมิหน้าที่เปลี่ยนแปลงไปบริเวณจุดโฟกัสได้ทำการทดสอบจำนวน 9 ครั้งครั้งละ 1 นาทีพร้อมทั้งเก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องประกอบด้วยเช่นความเข้มแสงอาทิตย์อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมผลการทดลองพบว่าค่าเฉลี่ยความร้อนที่จานพาราโบลาให้ออกมามีค่าเฉลี่ย 2,434.40 W จากความเข้มรังสีตรงที่ได้รับมีค่าเฉลี่ย 3,168.66 W เมื่อคิดเป็นประสิทธิภาพได้เท่ากับ 76.83%

คมสัน สุคันธวิช และทวีวัฒน์ สุภารส (Sukantavanich K; &Suparos T. 2011). ได้ทำการวิเคราะห์สมรรถนะเครื่องรับรังสีอาทิตย์รวมแสงแบบจานพาราโบลา โดยออกแบบสร้างและวิเคราะห์สมรรถนะเครื่องรับพลังงานแสงอาทิตย์รวมแสงแบบจานพาราโบลา โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของดิสก์เท่ากับ 1.5 เมตรพื้นที่ผิวที่ใช้รับแสง 1.95 m² ผิวหน้าเคลือบด้วยอลูมิเนียมพอยล์เพื่อใช้ในการสะท้อนรังสีความร้อนระบบใช้น้ำเป็นสารแลกเปลี่ยนความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่อัตราการไหลที่ 0.5 ลิตร/นาที, 0.7 ลิตร/นาทีและ 1 ลิตร/นาทีจากการทดลองเครื่องรับพลังงานแสงอาทิตย์รวมแสงแบบจานพาราโบลา พบว่าเมื่อวางรับรังสีอาทิตย์แบบจานพาราโบลา ปรับมุมทุกๆ 15 องศาต่อชั่วโมงโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.2 เปอร์เซ็นต์เพื่อติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ทำให้การรวมแสงอาทิตย์ไปยังอุปกรณ์รับพลังงานความร้อน (Receiver) มีค่าคงที่สม่ำเสมอค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่จะมีค่ามากที่สุดอยู่ในช่วงเวลา 11.30-13.30 นาฬิกาโดยที่อัตราการไหลของน้ำ 0.5 ลิตร/นาทีระบบประสิทธิภาพสูงสุด 42 เปอร์เซ็นต์ที่ความเข้มแสงอาทิตย์สูงสุดเท่ากับ 785.8 W/m²

ศักดิ์เดช สังคพัฒน์ และ บุญรอด อาสาสะนา (Sangkapat S; &Assana B. 2011). ได้สร้างเตาแสงอาทิตย์แบบผสมพร้อมด้วยระบบติดตามดวงอาทิตย์โดยได้สร้างและทดสอบการทำงานของเตาแสงอาทิตย์แบบผสมพร้อมด้วยระบบติดตามดวงอาทิตย์โดยมีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน ได้แก่ โครงขาตั้งเตาแสงอาทิตย์และส่วนเสริมที่ทำให้เตาทำงานได้ในทุกสภาวะอากาศซึ่งประกอบด้วยแผ่นกระจกใสเลื่อนได้สำหรับปิด-เปิดเตาระบบติดตามดวงอาทิตย์และระบบพลังงานเสริมโดยใช้แก๊ส LPG เตานี้มีพื้นที่รองรับแสงอาทิตย์ในแนวตั้งจากประมาณ 0.7 m² การทดสอบการทำงานของเตาทำโดยการเปรียบเทียบอัตราพลังงานความร้อนของเตาแสงอาทิตย์เมื่อเตาเคลื่อนที่ตามแสงอาทิตย์กับเตาอยู่หนึ่งที่ตำแหน่ง 12.00 นาฬิกาและทดสอบโดยหาอัตราพลังงานความร้อนและประสิทธิภาพของเตาแสงอาทิตย์และเปรียบเทียบช่วงเวลาที่ทำให้น้ำมวล 400 gเดือดเมื่อนำไปต้มโดยใช้แก๊ส LPG อย่างเดียวกับการใช้แก๊ส LPG ร่วมกับเตาแสงอาทิตย์จะให้อัตราพลังงานความร้อนมากกว่าเตาที่อยู่หนึ่งประสิทธิภาพของเตาประมาณ 21% เมื่อนำไปใช้ร่วมกับแก๊ส LPG พบว่าในการต้มน้ำมวล 400 g จนเดือดสามารถประหยัดแก๊สได้ถึงที่ทดสอบได้ถึง 31%

1.4 งานวิจัยเกี่ยวกับตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบจานพาราโบลาในต่างประเทศ

ดับบลิว อาดัมส์ (W. Adams.1878). แห่งบอมเบย์ได้เขียนบทความการประกอบอาหารด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ลงใน Scientific American ซึ่ง Adams ได้ใช้จานรูปทรงกรวยแปดเหลี่ยมใช้กระจกเป็นผิวสะท้อนรังสีกลับมาสู่เป้าตรงกลาง ซึ่งเป็นรูปทรงกระบอกความร้อนที่ได้สามารถใช้ในการประกอบอาหาร ได้เป็นอย่างดี หลังจากนั้นหลายปีการพัฒนาพลังงานแสงอาทิตย์ไม่ได้รับความสนใจ จนกระทั่งกลางปี ค.ศ. 1930 Abbot ได้คิดสิ่งประดิษฐ์เพื่อใช้รับพลังงานแสงอาทิตย์ขึ้นซึ่งเรียกว่า เฟลชบอยเลอร์(Flash boiler) มีลักษณะเป็นรูปจานสะท้อนแสง เพื่อรวมพลังงานแสงอาทิตย์ไว้ใช้ในการประกอบอาหาร แต่ได้สร้างขึ้นจริงในปี ค.ศ. 1847 ที่มหาวิทยาลัยอริโซนา

เอเดล เอ็มเอ และคณะ (Adel M.A; et al.1985). จากประเทศ ซาอุดีอาระเบีย ได้ทำการประดิษฐ์ Arafa cookers โดยตัวรับแสงรังสีอาทิตย์มีฉนวนล้อมรอบภายในมีหม้อ Pyrex เคลือบเทฟลอน ในส่วนของแผ่นสะท้อนรังสีเป็นแบบพาราโบลา แผ่นรางพาราโบลาคือเป็นตัวรวมรังสีอาทิตย์ไปยังตัวรวมรังสีอาทิตย์ จากการทดลองผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจ

ลีโอนาร์ด ดี แจฟฟี (Leonard D.Jaffie. 1989). ทำวิจัยเรื่องการพัฒนาและทดสอบตัวรวมรังสีแบบจานเชิงความร้อนโดยตัวรวมรังสีส่วนใหญ่จะออกแบบเพื่อนำไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้จานพาราโบลาตามวัฏจักรแรงคิน เครื่องยนต์เบรย์ตันหรือเครื่องยนต์สเตอร์ลิงถูกใช้เพื่อลดค่าใช้จ่าย การวัดสมรรถนะของจานเช่นประสิทธิภาพเชิงแสงอยู่ระหว่าง 0.32-0.86 ที่อัตราส่วนการรวมรังสี 500 และประสิทธิภาพ 0.09-0.85 ที่อัตราส่วนการรวมรังสีเป็น 3000 มีข้อผิดพลาดบางประการที่พบ การทดสอบจะได้ข้อมูลการทำงานของตัวรวมรังสีโดยสามารถพัฒนาตัวรวมรังสีที่มีสมรรถนะสูงขึ้นและลดค่าบำรุงรักษา

อาร์โดมานากิ และคณะ (R. Domanaki; et al. 1994). ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเอารังสีอาทิตย์มาใช้ในการประกอบอาหาร ณ ช่วงเวลาที่มีแดด โดยออกแบบและทำการทดลองหาประสิทธิภาพของเตาหุงต้มพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้ประมาณ 82 เปอร์เซ็นต์ แผ่นสะท้อนรังสีที่ใช้จะเป็นแผ่นพาราโบลา โดยแต่ละแผ่นจะวางในตำแหน่งมุมที่แตกต่างกัน ซึ่งจะทำหน้าที่รับรังสีโดยตรงจากดวงอาทิตย์

เออาร์อีไอ คิวเดอนิ และคณะ (A.R.El.Quederni; et al. 2009). ได้ทำวิจัยเรื่องการศึกษาเชิงการทดลองของตัวรวมรังสีแบบพาราโบลา โดยสร้างจานพาราโบลาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.2 เมตร ที่ผิวเคลือบวัสดุสะท้อนแสง และยึดแผ่นรับพลังงานที่จุดโฟกัส การหมุนจานใช้แม่แรงยกแบบกึ่งอัตโนมัติ 2 ตัว ทำการวัดค่าพลังรังสีและการกระจายอุณหภูมิบนตัวรับรังสีผลการทดลองได้อธิบายปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์

ฮัสเน็ต เอ และคณะ (Hasnet A; et al. 2011). ได้ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับการออกแบบเชิงความร้อนของตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบจานพาราโบลา โดยจานพาราโบลามีลักษณะที่ไม่เป็นระนาบ มีผิวสะท้อนที่มีค่าการสะท้อนแสง 0.7 มีระยะโฟกัส 1 เมตร มีตัวรับรังสีแบบแผ่นราบทาสีดำ โดยศึกษาทางทฤษฎี ในการศึกษาเชิงแสง และสมรรถนะทางความร้อนเช่นอุณหภูมิช่วงขณะ (T_{ps}) อุณหภูมิน้ำ (T_w) อุณหภูมิของแผ่นรับรังสี (T_p) ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (X_c) ประสิทธิภาพเชิงแสง (X_o) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวกับน้ำ (U) อัตราส่วนการรวมรังสีเชิงเรขาคณิต (C) และสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม (U_2) ตัวรวมรังสีถูกวางในแนวที่มีแสงขนานที่ตกลงบนช่องรับแสง และสะท้อนไปที่จุดโฟกัส โดยได้เสนอการวิเคราะห์การออกแบบทางความร้อนของระบบ ผลที่ได้เป็นการคำนวณเชิงตัวเลขแสดงในรูปกราฟ

ฮัสสันเนน กานี ฮามิด และ เฮเดอร์ เอซิส นามิ (Hassanain; & Hayder.2011). ได้ทำวิจัยเรื่อง การศึกษาเชิงการทดลองสำหรับการปรับปรุงการผลิตของระบบตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลา โดยอุปกรณ์ในการทดลองประกอบด้วยจานดาวเทียมสี่เหลี่ยมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร ลึก 0.17 เมตร ผิวจานปูด้วยแผ่นอลูมิเนียมสะท้อนแสงและมีตัวรับพลังงานแบบจานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.22 เมตร ลึก 0.07 เมตร วางไว้ที่จุดโฟกัส ตัวจานมีระบบติดตามดวงอาทิตย์ซึ่งใช้ระบบหมุนจานของจานดาวเทียมสี่เหลี่ยม วิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องควบแน่นที่ทดสอบในสภาวะของเมืองนาจาฟ ในช่วงวันที่ 13/03/2010-25/04/2010 ผลการทดลองได้แสดงว่าปริมาณน้ำที่กลั่นได้ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงอาทิตย์ และความถูกต้องของโฟกัสของระบบ การผลิตไอน้ำของระบบอยู่ในช่วง 6.9-15.3 ลิตร/วัน โดยอากาศใช้ควบแน่นไอน้ำที่ตัวรับด้านขาออก (ทำความเย็นให้อากาศ) และประสิทธิภาพการผลิตน้ำสูงขึ้นเป็น 28-33.5 % เมื่อน้ำขาเข้าใช้ควบแน่นเป็นไอน้ำ (ทำความเย็นให้น้ำ)

รียาร์ด อาบู มาโลฟ และคณะ (Riyad Abu-Malouh; et al. 2011). ได้ทำวิจัยเรื่องการออกแบบ สร้างและศึกษาการทำงานของเตาแสงอาทิตย์ทรงกลมโดยใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบอัตโนมัติ โดยศึกษาผลของระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกนกับเตาแสงอาทิตย์จานรับแสง

ที่สร้างขึ้นจะรวมรังสีอาทิตย์ไปยังกระเพาะที่จุดโฟกัสของจาน จานสามารถหมุนตามดวงอาทิตย์โดยใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกน ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในกระเพาะทำได้สูงกว่า 93 องศาเซลเซียส ในวันที่อุณหภูมิอากาศประมาณ 32 องศาเซลเซียส อุณหภูมินี้เหมาะสมกับการหุงต้มอาหารและโดยใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกน

มีนาคิชันดาราม เออร์กุมาราน และ วิลเลียมคริสตัจ (Meenakshisundaram A. & William Christaj 2012). ได้ศึกษาวิจัยเรื่องการวิเคราะห์เชิงการทดลองของจานรวมรังสีที่ไม่มีระบบติดตามดวงอาทิตย์ใช้ผลิตไอน้ำโดยทำการออกแบบ พัฒนา และศึกษาสมรรถนะในการผลิตไอน้ำจากจานพาราโบลาของจานรวมรังสีอาทิตย์ที่ไม่มีระบบติดตามดวงอาทิตย์ สมรรถนะของตัวรวมรังสีหาได้จากการทดลองและใช้น้ำเป็นสารถ่ายเทความร้อน จานพาราโบลาปูด้วยแผ่นอลูมิเนียมพอยล์ โดยหาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสี ผลการทดลองจะได้ข้อมูลของการพัฒนาการผลิตไอน้ำในห้องถื่น

อิบราฮิม เลเดน โมฮัมเมด (Ibrahim Laden Mohammed. 2012). ได้ทำวิจัยเรื่องการออกแบบและพัฒนาจานพาราโบลาสำหรับทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยพัฒนาจานพาราโบลาผลิตน้ำร้อนใช้ในประเทศ อุณหภูมิประมาณ 100°C มีเครื่องทำความร้อนผลิตน้ำร้อนได้ 40 ลิตรต่อวัน สำหรับใช้กับครอบครัว 4 คน สมมติว่าแต่ละคนต้องการน้ำ 10 ลิตร/วัน ระบบต้องการการติดตามดวงอาทิตย์อย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ โดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบอัตโนมัติ จากการทดลองพบว่าสมรรถนะโดยรวมน่าพอใจ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่า 52-65% และประสิทธิภาพที่ได้สูงกว่าที่ออกแบบไว้ที่ 50% ข้อดีของการใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์คือลดการจ้างแรงงานในการควบคุมการทำงานของระบบ

1.5 งานวิจัยเกี่ยวกับพื้นผิวสะท้อนรังสีอาทิตย์

ปราโมทย์ อุนห์ไวทยะ (Aunhavitaya P. 1978). ได้ศึกษาคุณสมบัติของผิวสะท้อนแสงชนิดต่างๆและความคงทนต่อดินฟ้าอากาศ พบว่าแผ่นสะท้อนแสงอลูมิเนียมโหนดซ์เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่จะนำไปใช้ทำอุปกรณ์รวมแสงอาทิตย์ วัสดุนี้มีสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงดี คล้ายกระจกเงา น้ำหนักเบา ราคาไม่แพงและทำด้วยเทคโนโลยีในประเทศไทยได้

อนุสร ศรีสรวล (Sreesual A. 2002). ได้ทำวิทยานิพนธ์เพื่อศึกษาวัสดุผิวเคลือบสะท้อนความร้อนที่เตรียมได้ จากการบดผสม อนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ สารเพิ่มเนื้อ และสารยึด ในสัดส่วนต่างๆ กัน ด้วยการใช้หม้อบด (Ball mill) สารยัดที่ใช้ในการเตรียมวัสดุผิวเคลือบสะท้อนความร้อนแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ สารยัดที่มีส่วนผสมของอะคริลิเรซินกับน้ำยางสังเคราะห์ และสารสารยัดที่มีส่วนผสมของอะคริลิเรซินกับน้ำยางธรรมชาติ ประเด็นสำคัญในการศึกษานี้คือการศึกษาดัชนีที่มีผลต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ ได้แก่ สัดส่วนสารยัด ชนิดของผงสีหรือสารเพิ่มเนื้อที่ใช้ปริมาณ ไททาเนียมไดออกไซด์ ความเข้มข้นโดยปริมาตรของผงสี (% PVC) และความหนาผิวเคลือบ โดยทำการพ่นผิวเคลือบสะท้อนความร้อนที่เตรียมได้จากสูตรผสมต่างๆ ลงบนแผ่นโลหะ ที่ความหนาต่างๆ แล้วนำไปวัดค่าการสะท้อนรังสีด้วยเครื่อง UV-VIS-NIR

Recording Spectrophotometer ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าค่าการสะท้อนรังสีขึ้นกับชนิดของผงสี ปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ และความหนาผิวเคลือบ แต่ไม่ขึ้นกับสัดส่วนสารยึด โดยที่ปริมาณ ไททาเนียมไดออกไซด์ และความหนาผิวเคลือบที่เพิ่มขึ้นจะให้ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้น จนถึงจุดอิ่มตัวค่าหนึ่ง ซึ่งค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงสุดจากการวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 94.8% นอกจากนี้ผลการศึกษายังพบว่า สารเคลือบจากน้ำยางสังเคราะห์ และสารเคลือบจากน้ำยางธรรมชาติให้ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ %PVC เดียวกันมีค่าใกล้เคียงกัน รวมทั้งสมบัติทางกายภาพและทางกลของผิวเคลือบที่ได้ก็ไม่แตกต่างกันในระดับที่มีนัยสำคัญ นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ศึกษาอิทธิพลของแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ โดยทำการทดสอบในสภาวะแวดล้อมปกติตามมาตรฐาน ASTM G 7 และกรณีเร่งสภาวะด้วยการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตสลับกับการควบแน่นของไอน้ำตามมาตรฐาน ASTM G 53 ผลการศึกษาพบว่า ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบมีค่าลดลงใน อัตราที่สูงมากในช่วงต้นของการทดสอบ และเริ่มน้อยลง จนกระทั่งค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์มีค่าคงที่ เมื่อระยะเวลาในการทดสอบนานขึ้น การศึกษาในส่วนสุดท้ายของการวิจัยนี้ ได้แก่ การทดสอบความสามารถในการลดความร้อน โดยอาศัยผลการวัดเปรียบเทียบอุณหภูมิใต้หลังคาแบบจำลอง ของกรณีที่หลังคาเคลือบและไม่เคลือบด้วยผิวเคลือบสะท้อนความร้อน ผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิหลังคาที่เคลือบด้วยสารเคลือบความร้อนมีค่าต่ำกว่า อุณหภูมิของหลังคาที่ไม่ได้เคลือบสารเคลือบสะท้อนความร้อนสูงสุดถึง 13 องศาเซลเซียส

ศักรินทร์ วีรณศิริ (Veerawattanasil S. 2007). ได้สร้างเตาสุริยะอุณหภูมิสูงที่มีระบบรวมแสงเป็นผิวโค้งพาราโบลาแบบนอกแกน ความยาวโฟกัส 280 เซนติเมตร โดยใช้กระจกเงาราบทรงหกเหลี่ยมด้านเท่า ยาวด้านละ 7.1 เซนติเมตร เป็นตัวสะท้อนแสง ในการติดกระจกบนผิวโค้งเพื่อสะท้อนแสงไปยังจุดโฟกัส ได้ใช้แสงจากปากกาเลเซอร์เป็นต้นกำเนิด กระจกแต่ละแผ่นสามารถเคลื่อนที่ได้รอบทิศทางโดยใช้ลูกปืนติดไว้ที่ด้านหลัง วางบนแหวนโลหะทำให้ปรับมุมสะท้อนได้ การยดติดวัตถุต่างๆ กับผิวโค้งได้ใช้กาวยางพิเศษที่สามารถทนต่อแสงแดด ความร้อน และความชื้น จากการทดสอบพบว่า ภาพของแสงสะท้อนจะตกบนฉากที่ตำแหน่งโฟกัสของตัวรวมแสงอาทิตย์ ซึ่งมีพลังงานประมาณ 98% ของทั้งหมดอยู่ในบริเวณพื้นที่รูปวงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 28 เซนติเมตร และตัวรวมแสงอาทิตย์ที่ความยาวโฟกัสจริงที่วัดได้ 287 เซนติเมตร อุณหภูมิที่วัดได้จากตัวรับแสง ณ ตำแหน่งโฟกัส มีค่าสูงสุด 657 องศาเซลเซียส และมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีกระแสลมแรงหรือปริมาณของแสงที่ตกบนตัวรวมแสงลดลง

1.6 งานวิจัยเกี่ยวกับตัวดูดซับรังสีอาทิตย์

เลิศศักดิ์ เหมยากร (Hemyakorn L. 1981). ได้ทำวิทยานิพนธ์เรื่องถึงสะสมความร้อนสำหรับเตาแสงอาทิตย์ เพื่อนำไปประกอบอาหารได้ทั้งกลางวันและกลางคืนหรือเวลาที่ไม่มีแดด มีถึงสะสมความร้อนแบบแผ่นราบเทียบกับถึงสะสมความร้อนของเตาแสงอาทิตย์แบบจานพาราโบลา ขนาดของจานรับแสงมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.3 เมตร มีพื้นที่รับแสง 1.327 ตารางเมตร วางรับแสงใน

ทิศทางตั้งฉากกับดวงอาทิตย์ตลอดเวลา ภายในถึงสะสมมีปริมาณสารทำงานสะสมความร้อน 9 กิโลกรัม ถึงสะสมความร้อนแขวนอยู่เหนือจานรับแสงด้วยความสูงห่างจากจุดกึ่งกลางของจานรับแสงประมาณ 650 มิลลิเมตร ถึงสะสมความร้อนหุ้มฉนวนหนา 50 มิลลิเมตร ผลการทดลองพบว่าถึงสะสมความร้อนของเตาแสงอาทิตย์แบบจานพาราโบลาให้ผลดีกว่าถึงสะสมความร้อนแบบแผ่นราบมาก ทั้งอุณหภูมิ ปริมาณความร้อน และประสิทธิภาพของระบบ สำหรับสารทำงานระหว่างน้ำมันพืชกับน้ำมันหล่อลื่น น้ำมันหล่อลื่นให้อุณหภูมิสะสม พลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์สูงกว่าน้ำมันพืชในถึงสะสมความร้อนของจานพาราโบลา

พฤภา หอมยก (Homyok P. 2007). ได้ศึกษาการพัฒนาและสร้างเครื่องมือวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ โดยใช้หลักการวัดปริมาณความร้อน และการทดลองวัดค่าความเข้มรังสีอาทิตย์โดยใช้เครื่องมือวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้โดยใช้ไพรานอมิเตอร์ ผลการทดลองพบว่า ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์จำลองที่วัดได้โดยใช้ไพรานอมิเตอร์ที่ระยะ 22 เซนติเมตร วัดค่าความเข้มแสงได้ 1842.77 W/m^2 และที่ระยะ 94 เซนติเมตร วัดได้ 160.61 W/m^2 และใช้เครื่องมือวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ที่พัฒนาวัดค่าความเข้มแสงได้ $1,879.78 \text{ W/m}^2$ และที่ระยะ 94 เซนติเมตร วัดได้ 175.35 W/m^2 ที่ระยะ 22 เซนติเมตรมีค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 2.01 ที่ระยะ 94 เซนติเมตร มีค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 9.81 ได้ค่าความเข้มแสงใกล้เคียงกันอย่างยอมรับได้ และเมื่อนำเครื่องมือวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ที่พัฒนาวัดความเข้มรังสีอาทิตย์กับตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบพาราโบลาด้วยวิธีการวัดปริมาณความร้อน สามารถวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ได้

นันทศักดิ์ ศักดิโฆษิต (Sakkosit N. 2008). ได้ทำวิทยานิพนธ์เรื่องการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงแสงและความร้อนของตัวรวมรังสีแบบรางพาราโบลาที่มีตัวรับรังสีสองชุด โดยตัวรับรังสีหลักติดตั้งที่ตำแหน่งโฟกัส และตัวรับรังสีตัวที่สองอยู่ต่ำกว่าจุดโฟกัส ขนาดของตัวรวมรังสีนี้มีความยาวส่วนโค้ง 1.2 เมตร ความยาวราง 2 เมตร ตัวรวมรังสีหลักทำจากท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มิลลิเมตร ฟันสีดำด้าน ตัวรวมรังสีตัวที่สอง ทำจากอลูมิเนียม ขนาด 12.5×225 ตารางมิลลิเมตร ปรับ W/F จาก 1.55-3.54 ใช้อัตราการไหลของน้ำในตัวรับรังสี 0.108-0.870 LPM ไม่หมุนเวียนน้ำในตัวรับรังสีตัวที่สองผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพเชิงแสงและเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อ W/F เพิ่มขึ้นโดยมีค่าสูงสุดที่ $W/F = 3.54$ มีค่า Re ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองกับผลการทดลอง ในช่วงระยะการไหล 2m มีค่าน้อยกว่า 3.27 % ตัวรวมรังสีตัวที่สองช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบได้ รูปทรงแผ่นบางเป็นรูปทรงที่เหมาะสมควรติดตั้งไว้ใกล้กับจุดโฟกัส

1.7 การศึกษาวิจัยของเครื่องยนต์สเตอลิงกับตัวรวมรังสีอาทิตย์ในประเทศ

วัลปีตา (Walpita. 1983). นักศึกษาของสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) ได้ทำโครงการศึกษาพิเศษเฉพาะด้าน โดยได้ศึกษาการออกแบบตัวรับพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar receiver) สำหรับเครื่องยนต์สเตอลิงพลังแสงอาทิตย์โดยเสนอการออกแบบเป็นท่อเหล็กกล้าขนาด

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 3.175 mm ขดเป็นรูปก้นหอย (Spiral) ในรายงานได้แสดงการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์สู่สารทำงานและการคำนวณหาพื้นที่การถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมที่สุด แต่อย่างไรก็ตาม ไม่พบว่าได้มีการสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงพลังแสงอาทิตย์ในเวลาต่อมา

บัณฑิต ลิ้มมีโชคชัยและคณะ (Linmeechokchai; et al. 2005). ได้ทำวิจัยเรื่องศักยภาพของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงผลิตไฟฟ้าแสงอาทิตย์ในประเทศไทย โดยจากการศึกษาพบว่าประเทศไทยได้รับรังสีอาทิตย์เฉลี่ยต่อวัน $18.2 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ มีรังสีตรงเป็นส่วนมากจึงสามารถใช้ประโยชน์รังสีอาทิตย์ในรูปพลังงานความร้อนได้ดี ทำการสำรวจสถานภาพทางเทคโนโลยีของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงพลังงานแสงอาทิตย์ในต่างประเทศ และสรุปผลการประเมินศักยภาพของเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศในประเทศไทย โดยจำลองสภาพการใช้งานในประเทศไทยจากข้อมูลอุตุนิยมวิทยาแบ่งตามภูมิภาคในไทย ในต่างประเทศเทคโนโลยีนี้ยังไม่มีความคืบหน้า อยู่ในช่วงการเริ่มการพัฒนาในเชิงพาณิชย์และยังไม่ถึงจุดอิ่มตัวเช่นเทคโนโลยีอื่นๆ ระบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงพลังงานแสงอาทิตย์ประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญ 4 ส่วนคือ จานรวมรังสีอาทิตย์ ระบบติดตามดวงอาทิตย์ ชุดรับและแลกเปลี่ยนความร้อน และเครื่องยนต์สเตอร์ลิงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีความยืดหยุ่นในการใช้งานสามารถตั้งอยู่ในท้องถิ่นที่ไกลจากสายส่งไฟฟ้า สามารถนำหลายชุดมาต่อรวมกันให้กำลังได้ถึง 10 MWe ซึ่งเพียงพอกับการเชื่อมโยงสายส่งกำลัง จากการจำลองสภาพการทำงานของเครื่องยนต์ในประเทศไทยพบว่าระบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงผลิตไฟฟ้าแสงอาทิตย์ขนาด 25 kW และขนาด 10 kW ให้ประสิทธิภาพเฉลี่ย 17.7% ต่อปี และ 13.6% ต่อปี ตามลำดับ

บัญชา คังตระกูล (Kongtragool B. 2007). ได้ทำวิทยานิพนธ์เรื่องการประเมินสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงความแตกต่างอุณหภูมิต่ำที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ โดยออกแบบสร้างและทดสอบและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบ LTD ในการทดสอบได้ใช้เครื่องจำลองรังสีอาทิตย์และตัวรวมรังสีเป็นตัวให้และรับความร้อน ได้ทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์โดยใช้อากาศเป็นสารทำงาน สมรรถนะของเครื่องยนต์วัดจาก แรงบิดสูงสุด กำลังเพลลา และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก การทดสอบเครื่องยนต์กับตัวรวมรังสีอาทิตย์และแสงอาทิตย์จริง กำลังของเครื่องยนต์และประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะแปรตามความเข้มของรังสีอาทิตย์ที่เครื่องยนต์ได้รับ

สุรวุฒิ สนิทวงศ์ และ สิรินุช จินดารักษา (Snitwong S; &Chindaraksa S. 2007). ได้ทำวิจัยเรื่องการออกแบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงกับจานพาราโบลา (Dish Stirling engine) ใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ขนาดเล็กมีขนาด 500W ในประเทศไทย โดยพบว่าประเทศไทยมีค่าความเข้มรังสีเฉลี่ย 550 W/m^2 ในการใช้งานเครื่องยนต์สเตอร์ลิงในทางปฏิบัติไม่ต้องการรังสีสูงถึง 1000 W/m^2 การทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงกับจานพาราโบลาต้องการค่ารังสีปานกลาง แต่ระบบต้องออกแบบให้มีสภาวะเหมาะสมเช่นเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจาน ใช้พลังงานในการหมุนจานต่ำ ลดความผิดในลูกสูบและความเสียดทานเชิงกล ความสำคัญของงานวิจัยนี้คือ ออกแบบจานกับ

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 500 W ระบบอิสระที่สามารถทำงานได้ในความเข้มรังสีอาทิตย์ต่ำ ในสภาวะภูมิอากาศของประเทศไทย

ปัญญา คังตระกูล และสมชาย วงศ์วิเศษ (Kongtragool B; &Wongvises S. 2008). ได้เสนอผลการทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบใช้ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ขนาดเล็กเป็นต้นกำลังขับเคลื่อนกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบจานพาราโบลาเป็นแหล่งให้พลังงาน ผลจากการทดสอบพบว่ากำลังที่ได้และประสิทธิภาพจะเพิ่มมากขึ้นตามค่าความเข้มของรังสีตรงที่ชานกับแกนของจานพาราโบลา

ปัญญา คังตระกูล และ กฤษฏาภรณ์ สุกระมล (Kongtragool B; &Sookramoon K. 2012). ได้ทำวิจัยเรื่องสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ใช้เครื่องจำลองรังสีอาทิตย์เป็นแหล่งความร้อนโดยนำเสนอสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแกมมาที่ใช้ลูกสูบกำลังทำงานด้านเดียวในขนาดระดับห้องปฏิบัติการโดยทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ด้วยเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ซึ่งสร้างจากหลอดฮาโลเจนขนาด 500 W จำนวน 1 หลอดเป็นแหล่งให้ความร้อนผลการทดสอบเครื่องยนต์ด้วยไดนาโมมิเตอร์แบบเชือกพบว่าเครื่องยนต์ที่สร้างขึ้นนี้สามารถผลิตแรงบิดสูงสุด 0.07 Nm ที่ 46 rpm, ผลิตกำลังเพลาส่งสูงสุด 0.4 W ที่ 73 rpm, และมีประสิทธิภาพความร้อนเพลาส่ง 0.1% ที่ 73 rpm โดยประมาณด้วยพลังงานความร้อนป้อนเข้าเครื่องยนต์ 397.4 J/s ทำให้อุณหภูมิของสารทำงานในช่องร้อนเป็น 62 °C และอุณหภูมิของสารทำงานในช่องเย็นเป็น 55 °C โดยประมาณ

ปัญญา คังตระกูล และ กฤษฏาภรณ์ สุกระมล (Kongtragool B; & Sookramoon K. 2012). ได้ทำวิจัยเรื่องสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ใช้เครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ร่วมกับตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบจานพาราโบลาเป็นแหล่งความร้อนโดยนำเสนอสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแกมมาที่ใช้ลูกสูบกำลังทำงานด้านเดียวในขนาดระดับห้องปฏิบัติการโดยทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ด้วยเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ซึ่งสร้างจากหลอดฮาโลเจนขนาด 1500 W จำนวน 24 หลอดร่วมกับตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบจานพาราโบลาเป็นแหล่งให้ความร้อนผลการทดสอบเครื่องยนต์โดยใช้เครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ร่วมกับตัวรวมรังสีอาทิตย์พบว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่สร้างขึ้นนี้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ประมาณ 0.1855 W ที่ 78.4 rpm และมีประสิทธิภาพความร้อนเพลาส่งประมาณ 0.0898% ที่ 78.4 rpm โดยใช้พลังงานความร้อนป้อนเข้าเครื่องยนต์ 206.5 J/s ทำให้อุณหภูมิของสารทำงานในช่องร้อนเป็น 62 °C และอุณหภูมิของสารทำงานในช่องเย็นเป็น 55 °C โดยประมาณ

ปัญญา คังตระกูลและ สมมาตร ศรีประเทือง (Kongtragool B; &Sripratueng S. 2012). ได้ทำวิจัยเรื่องการพัฒนาเครื่องยนต์สเตอร์ลิงพลังงานแสงอาทิตย์ในขนาดระดับห้องปฏิบัติการ โดยได้ออกแบบและสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงรูปแบบแกมมาที่ใช้ลูกสูบกำลังทำงานด้านเดียวที่มีขนาดอยู่ในระดับห้องปฏิบัติการจำนวน 1 เครื่องและได้ทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นการศึกษาในเชิงการทดลองโดยใช้หลอดฮาโลเจนขนาด 1500 W เป็นเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ผลการทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่สร้างขึ้นนี้โดยใช้ค่าความร้อนที่ป้อนเข้าสู่เครื่องยนต์จริง 518.28

W หรือที่อุณหภูมิการทำงานในช่องร้อนเป็น 154 °C พบว่าเครื่องยนต์เครื่องนี้สามารถผลิตแรงบิดสูงสุดได้ประมาณ 0.57 Nm ที่ 32.2rpm, ผลิตกำลังเพลาส่งสูงสุดได้ประมาณ 2.7 W ที่ 95 rpm, และมีประสิทธิภาพความร้อนเพลาร้อนประมาณ 0.52% ที่ 95 rpm

1.8 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงกับตัวรวมรังสีอาทิตย์ในต่างประเทศ

บริแฮน อ้างโดยแดเนียล (Breihan, cited by Daniels 1964). ได้ออกแบบสร้างเครื่องยนต์สเตอร์ลิงผลิตกำลัง 15 W โดยใช้จานพาราโบลาขนาด 1.8 เมตร ปูพื้นด้วยกระจกแก้วโมเสกยึดกับเปลือกพลาสติก แต่มีปัญหาเรื่องการสั่นสะเทือนเชิงกล เครื่องยนต์มีขนาดความกว้างกระบอกสูบ 100 มม. ระยะชัก 37.5 มม. และรังสีอาทิตย์ 75% ถูกรวมมาที่กรวยดำ ทำหน้าที่เป็นหัวสูบลำความร้อนของลูกสูบเคลื่อนย้าย การใช้ท่อความร้อนที่ส่งผ่านความร้อนไปยังเครื่องยนต์ที่ตั้งอยู่กับพื้นจะช่วยลดปัญหาการสั่นของเครื่องลงได้

พอนส์ และฟอกซ์ (Pons; & Fox. 1976). ศึกษาการใช้ระบบท่อความร้อนในการเดินเครื่องยนต์สเตอร์ลิงพลังงานแสงอาทิตย์ แนะนำแนวคิดระบบสะสมความร้อน แม้ว่าแนวคิดนี้จะมีข้อดีหลายประการแต่ได้เพิ่มความซับซ้อนที่ยากต่อการนำไปใช้ในพื้นที่ห่างไกลความเจริญได้

ฮอลแลนด์ (Holland. 1979). ชี้ให้เห็นว่าการทำสมดุลเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบสูบเดียวทำได้ยากและอาจแก้ไขโดยใช้กลไกที่ซับซ้อน เช่นกลไกฟิลลิปคอมบิค ปัญหาการสั่นสะเทือนเป็นปัญหาสำคัญของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ซึ่งปกติจะยึดติดบนโครงสร้างน้ำหนักเบาบนจานพาราโบลา และการสั่นของจานอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนเชิงแสงของจาน

ลีโบวิทซ์ และฮันเซท (Leibowitz; & Hanseth 1982). แนะนำความเป็นไปได้ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงทำงานด้วยแก๊สที่อุณหภูมิสูงที่ได้ปรับปรุงการทำงานด้วยเทคโนโลยีที่ซับซ้อน แต่ในประเทศกำลังพัฒนาที่ห่างไกลความเจริญยังไม่ได้ประโยชน์จากเทคโนโลยีนี้

บราวน์ และคณะ (Brown; et al. 1983). รายงานการทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ขับเคลื่อนโดยสนามเฮลิโอสแตท 550 ชิ้น ในระยะสั้นได้กำลัง 18.8 kW ผลิตไฟฟ้าแบบกริดในแอตแลนตา จอร์เจีย ประสิทธิภาพของระบบอยู่ระหว่าง 22-25 % แม้โรงไฟฟ้าชนิดนี้จะมีประสิทธิภาพสูงแต่ก็ยังมีขีดจำกัด โดยมีขนาดใหญ่และใช้กับพื้นที่ที่มีการพัฒนาโดยเทคนิคนี้เท่านั้น เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ใช้กำลังจากตัวรวมรังสีอาทิตย์ยังคงเป็นที่สนใจของนักวิจัยในช่วงกำลัง 35-100 kW ในพื้นที่ห่างไกลมีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงและในปี 1983 มาริออต ได้รายงานประสิทธิภาพรวมเป็น 29 % ก่อนจะหักค่าการสูญเสียและ 26 % หลังหักค่าการสูญเสียแล้ว สำหรับเครื่องยนต์ขนาด 26.5 kW ที่ทำงานร่วมกับจานพาราโบลา

เซลคักและโบวเยอร์ (Selcuk; & Bowyer 1985). ยืนยันว่าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีประสิทธิภาพ 32.5% ที่อุณหภูมิของไหลทำงานประมาณ 700 °C

การออกแบบตัวสะท้อนแสงในเชิงเศรษฐศาสตร์ให้ทนต่อลมและดินฟ้าอากาศเป็นเรื่องสำคัญของเทคโนโลยีนี้ โดยเลเจ็ทได้ศึกษาจากพาราโบลาที่ซับซ้อนในอุโมงค์ลมขณะมีภาระบนจาน แม้คกลอน 1987 รายงานว่าภาระบนจานจากลมจะสูงกว่าที่ทำนายไว้

บริษัทสเลช (Schlaich Co.Ltd. 1987). ได้พัฒนาจานขนาด 17 เมตร โดยใช้แผ่นเยื่อเหล็กที่ขึ้นรูปโดยใช้สูญญากาศเพื่อเป็นผิวสะท้อน ในปี 1987 ต้นแบบจานสองชั้นได้สร้างขึ้นเพื่อใช้กับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาด 50 kW ทดสอบที่เมืองรียาร์ด

อาเหม็ดและคณะ (Ahmed; et al. 1990). ได้รายงานการเดินเครื่องยนต์สเตอร์ลิง 50 kW พลังงานแสงอาทิตย์ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้จานพาราโบลาที่ทำจากเหล็ก และใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นสารทำงาน มีปัญหาที่ระบบติดตามดวงอาทิตย์มีความคลาดเคลื่อนจากการออกแบบและยากในการสตาร์ทเครื่องในฤดูหนาว ซึ่งเกิดจากการเลือกส่วนประกอบในการควบคุมที่ไม่เหมาะสม

ไซลด์และคณะ (Child; et al. 1990). ได้เสนอหลักการหาค่าประสิทธิภาพด้านราคาของเทคโนโลยีการกลั่นน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ โดยรวมเทคโนโลยีการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์รุ่นใหม่ ที่พัฒนาขึ้น ระบบเครื่องสูบน้ำด้วยไฮดรอลิก และเทคโนโลยีการนำพลังงานกลับคืนสำหรับการกลั่นน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ ตัวรวมรังสีแบบจาน-เครื่องยนต์สเตอร์ลิงและหน่วยทางไฟฟ้ามีประสิทธิภาพรวม 22% สำหรับการเดินเครื่อง 10 ชั่วโมง/วัน

ออดี้และคณะ (Audy; et al. 1999). รายงานระบบพลังงานพลวัตพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงสำหรับสถานีอวกาศ แบบจำลองทางทฤษฎีสำหรับวงโคจร 4 วง ได้ถูกพัฒนาขึ้น ผลการจำลองถูกเปรียบเทียบกับกำลังพลวัตของเครื่องยนต์กังหันก๊าซวัฏจักรเบรย์ตันจากพฤติกรรมที่ไม่คงตัว ซับซ้อนของวัฏจักรเบรย์ตัน หรือ วัฏจักรสเตอร์ลิงอาจทำให้ง่ายขึ้นโดยใช้การทำสมดุลพลังงานสำหรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

1.9 งานวิจัยเกี่ยวกับตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบสองชั้นตอนในต่างประเทศ

คานปาล ทีซีและคณะ (Kanpal,T.C. et al. 1980). ทำการวิจัยเรื่องสมรรถนะของตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบสองชั้นตอน โดยศึกษารูปทรงในการรวมรังสี การจำแนกตัวรวมรังสีแบบสองชั้นตอน ประกอบด้วยรางพาราโบลาและ ตัวเก็บรังสีแบบพาราโบลาแบบผสม (Compound parabolic collector, CPC) ในชั้นตอนที่สองโดยศึกษาเชิงสมรรถนะของความร้อน

ดีเฟอร์แมน และเจเอ็ม กอร์ดอน (D.Feurmann; & J.M.Gordon 1991). ได้ทำการวิเคราะห์ตัวรวมรังสีแบบสองชั้นตอนโดยใช้ตัวสะท้อนแสงแบบเฟรชเนลเชิงเส้นโดยติดตั้งเข้ากับระบบขนาด 220 kW ตัวรวมรังสีประกอบด้วยตัวสะท้อนแบบเฟรชเนลเชิงเส้นมีกระจกเงาโค้งและชั้นตอนที่สองเป็นแบบ CPC ไม่มีภาพ โดยมีเป้ารับเป็นท่อทรงกระบอก การออกแบบเพื่อใช้ในตัวรวมรังสีชั้นตอนที่สองได้ถูกประเมิน การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์รวมถึงการลากเส้นลำแสงของตัวสะท้อนชั้นตอนที่หนึ่ง วิเคราะห์ความไวของพลังงานขาออกจากตัวรวมรังสี ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงแสง รูปทรง ระบบติดตามดวงอาทิตย์และการใช้กระจกเงาทรงโค้งในชั้นปฐมภูมิ ตัวรวมรังสีทุติย

ภูมิทำจากเพชรเนลมีราคาไม่แพงเทียบกับตัวรับรังสีแบบรังพาราโบลาแต่จะได้พลังงานน้อยกว่าเพียง 1/4 เท่าโดยความแตกต่างจะกำจัดโดยใช้ตัวสะท้อนรังสีแบบ CPC ที่มีคุณภาพสูง

เอ็มคอรารเลส เปอร์เรียรา และคณะ (Collares-Pereira M.; et al.1991). ได้ศึกษาแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีตัวรวมแสงแบบรังพาราโบลาแบบมีตัวรวมแสง 2 ตัว และมีมุมขอบเริ่มที่ 80-120 องศา ซึ่งจะช่วยลดการสูญเสียทางความร้อนและสามารถทำให้อุณหภูมิของไหลที่ใช้งานสูงถึง 500 °C อุณหภูมิดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในโรงไฟฟ้าได้ โดยแบบที่มีตัวรวมแสง 2 ตัวจะมีค่าอัตราส่วนการรวมแสงเป็นสองเท่าของแบบปกติ

โรเบิร์ต พี ฟรีดแมนและคณะ (Robert P.Fried 1993). การออกแบบเชิงแสงของตัวรวมรังสีพาราโบลาแบบสองขั้นตอนความเข้มฟลักซ์สูงแบบใหม่ โดยใช้จานพาราโบลาซึ่งสามารถทำได้ใกล้เคียง 90% ของขีดจำกัดทางอุณหพลศาสตร์โดยมีขนาดกะทัดรัด(มุมรับรังสีประมาณ 45 °) จากการเปรียบเทียบกับตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลากับตัวรวมรังสีแบบผสมขั้นตอนที่สองที่มุมรับรังสี $\leq 5\%$ ของขีดจำกัดทางอุณหพลศาสตร์ตัวรวมรังสีขั้นตอนที่สองนี้จะได้รับลำแสงที่ขอบจากตัวรวมรังสีปฐมภูมิและมีการสะท้อนน้อยกว่าหนึ่งครั้งในการวางเป้ารับรังสีจากจุดโฟกัสของจานพาราโบลาตามแกนของตัวรับรังสีตรงไปยังตัวสะท้อนปฐมภูมิ และสร้างตัวรวมรังสีขั้นตอนที่สองระหว่างเป้ารับรังสีและตัวรวมรังสีปฐมภูมิ ตัวรวมรังสีขั้นตอนที่สองแบบ Tailored edge-ray นี้จะสร้างความเป็นไปได้ในการทำให้มีขนาดกะทัดรัด ความเข้มฟลักซ์สูงสำหรับใช้กับเตาแสงอาทิตย์และหรือระบบจานพาราโบลาในเชิงการค้า

เอจิยา (Ajiya.1995). ได้ทำวิจัยเรื่องการออกแบบและสร้างเตาแสงอาทิตย์แบบจานพาราโบลา โดยออกแบบและสร้างที่มหาวิทยาลัยไมดุงูรี ในจิเรีย การออกแบบใช้หลักการของ การรวมแสงแบบจุดโดยใช้กระจกเงาจัดรัสเล็ก ๆ ยึดติดบนจานพาราโบลาเพื่อเป็นผิวสะท้อนและมีระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบง่ายด้วยมือจากทิศตะวันออกไปทิศตะวันตก แผ่นเรียบสีดำถูกวางไว้ที่จุดโฟกัสเพื่อเป็นตัวดูดซับพลังงาน ซึ่งภาชนะประกอบอาหารจะถูกวางไว้ตรงนี้ โดยใช้วัสดุที่หาได้ง่ายในห้องถิ่น จากการทดสอบพบว่า เตาแสงอาทิตย์แบบพาราโบลามีประสิทธิภาพ 30% ในสภาพแวดล้อมของเมืองไมดุงูรี

พาโบล บีเนซและคณะ (Pablo Benitez; et al.1997). ได้ศึกษาประสิทธิภาพการไม่สัมผัสของตัวรวมรังสีแบบสองขั้นตอนสำหรับตัวดูดซับพลังงานแบบท่อ โดยทำการออกแบบตัวรวมรังสีแบบกระจกเงา 2 ขั้นตอนแบบใหม่สำหรับตัวดูดซับพลังงานแบบท่อ ตัวรวมรังสีนี้มีระยะห่างระหว่างกระจกเงาขั้นตอนที่สองและตัวดูดซับพลังงานและยังได้รับการรวมรังสีที่ใกล้เคียงขีดจำกัดทางอุณหพลศาสตร์ซึ่งจะมีประสิทธิภาพการเก็บพลังงานที่สูง คุณลักษณะนี้ทำให้ตัวรวมรังสีนี้เป็นหนึ่งและทำให้การออกแบบตัวรวมรังสีขั้นตอนที่สองมีตำแหน่งที่อยู่ด้านนอกท่อ Evacuated tube ตัวรวมรังสีนี้ได้รับค่าฟลักซ์ในการรวมรังสี $\pm 0.73^\circ$ ของ 91% ของขีดจำกัดทางอุณหพลศาสตร์มีประสิทธิภาพการเก็บพลังงาน 96.8% และตัวรวมรังสีอีกตัวหนึ่งที่ออกแบบมีประสิทธิภาพ 92.5 % ค่าเหล่านี้ถูกรายงานว่าเป็นค่าที่สูงที่สุดในการใช้งานของตัวรวมรังสีที่ผ่านมาช่องว่างระหว่างตัวดูด

ขับพลังงานและกระจกเงาชั้นที่สองเป็น 6.8 และ 10.5 เท่าของรัศมีของตัวดูดขับพลังงานสำหรับตัวรวมรังสีแต่ละตัว ยิ่งไปกว่านั้นมุมขอบของตัวรับรังสีชั้นปฐมภูมิเป็น 98.8 และ 104.4° ในแต่ละกรณี ซึ่งน่าสนใจสำหรับเสถียรภาพทางกลของตัวรับรังสี

เอ ทิมินเจอร์ และคณะ (A Timinger; et al. 2000). ได้ทำวิจัยเรื่องการหาค่าที่เหมาะสมของตัวรวมรังสีแบบสองชั้นตอน สำหรับระบบตัวรับแบบรวมศูนย์กลาง โดยออกแบบตัวรับรังสีแบบสองชั้นตอนที่มีรูปร่างไม่ปกติ เพื่อเพิ่มอัตราส่วนการรวมรังสีจากการแผ่รังสีสำหรับสนามแบบเฮลิโอสแตท (Helio-stat) โดยแบ่งเป็นส่วนย่อยจัดเรียงในแต่ละด้าน สำหรับเฮลิโอสแตทโดยทั่วไปจะไม่มีทิศทางในแกนสมมาตรเพื่อกระจายรังสีที่ทางเข้าของตัวรวมรังสีชั้นที่สองซึ่งตัวรวมรังสีแบบนี้จะสามารถเพิ่มอัตราส่วนการรวมรังสีเมื่อเปรียบเทียบกับแบบสมมาตรแบบเดิม จากการวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมที่สุดแสดงผลที่ดีที่สุดของตัวรวมรังสีที่มีทางเข้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและออกที่ Aperture (ด้านรับรังสี) ค่า CR เพิ่มขึ้นเป็น 2.3 ที่ประสิทธิภาพเชิงแสง 90% ถ้ารูปทรงของทางออกใกล้เคียงกับวงกลม จะทำให้ค่า CR เข้าใกล้ 1.3 ดังนั้นตัวรวมรังสีที่มีรูปทรงหลายเหลี่ยมจะให้สมรรถนะที่ดีกว่าแบบวงรีเรียบแบบเดิม

ซิดดิง เอ โอเมอร์ และเดวิด จี อินฟิลด์ (Sidding A.Omer; & David G. Infield. 2000). ได้ทำวิจัยเรื่องการออกแบบและวิเคราะห์เชิงความร้อนสำหรับความร้อนร่วมและการผลิตไฟฟ้าแบบเทอร์โมอิเล็กทริก โดยวิเคราะห์การออกแบบและหาสมรรถนะเชิงความร้อนของตัวรวมรังสี 2 ชั้นตอน ที่เหมาะสมกับระบบความร้อนร่วมและการผลิตไฟฟ้าทำจากเทอร์โมอิเล็กทริก ตัวรวมรังสีที่ประกอบด้วยชั้นปฐมภูมิเป็นแบบรางพาราโบลาและชั้นทุติยภูมิเป็นแบบ CPC ยึดติดที่จุดโฟกัสของชั้นปฐมภูมิ ชุดเทอร์โมอิเล็กทริกยึดติดกับแผ่นดูดขับพลังงานที่จุดโฟกัสของตัวรวมรังสีชั้นทุติยภูมิ มีท่อทำความเย็นติดอยู่ด้านเย็นของชุดเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อแยกความร้อนทิ้งและรักษาอุณหภูมิที่ข้ามอุปกรณ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานอุปกรณ์นี้มีระบบติดตามดวงอาทิตย์เพื่อรักษาอุณหภูมิให้เหมาะสมกับชุดเทอร์โมอิเล็กทริกและลดค่าการสูญเสียความร้อน บทบาทของตัวรวมรังสีชั้นทุติยภูมิคือจำกัดการสูญเสียความร้อนจากแผ่นดูดขับพลังงาน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการรวมรังสีอาทิตย์โดยตัวรวมรังสีชั้นตอนที่สองคือ CPC จะลดค่าการพาความร้อนจากอากาศและเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของตัวรวมรังสีอาทิตย์ได้

เคเอส เรดดี และเซนฮิล คูมาร์ (K.S. Reddy; & N. Sendhil Kumar 2009). ได้ทำวิจัยเรื่องการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนที่ผิวจากการดัดแปลงช่องรับของตัวรับรังสีแบบจานพาราโบลาที่มีการรวมรังสี 2 ชั้นตอน โดยทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับจานรับรังสีที่ดัดแปลงช่องรับเป็นรูปกรวย CPC และ แบบทรมเปต แบบจำลอง 3 มิติ ถูกใช้ประเมินค่าการสูญเสียความร้อนจากการพาและแผ่รังสีความร้อนของตัวรับในมุมเอียงและอุณหภูมิทำงานต่างๆกัน ตัวสะท้อนรังสีเมื่อดัดแปลงช่องรับสำหรับการรวมรังสีชั้นที่สอง การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนจะลดลง 29.23, 19.81, และ 19.16% ตามลำดับ ตัวรับแบบทรมเปตจะมีตัวรับที่มีตัวสะท้อนแบบทรมเปตโดยมีประสิทธิภาพดีกว่าเมื่อเทียบกับแบบอื่น

มาร์ค ชมิทซ์ และคณะ (Mark Schmitz A. et al. 2006). ได้ประเมินศักยภาพในการปรับปรุงด้านรับรังสีแบบหลายตัวในระบบรับรังสีแบบศูนย์กลางโดยใช้ตัวรวมรังสีแบบสองขั้นตอน เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบตัวรับรังสีแบบศูนย์กลาง CRS (Central receiver system) สำหรับใช้กับกังหันแก๊ส ซึ่งปริมาตรเชิงความดันของตัวรับจะต้องเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดี การประยุกต์ใช้ในวัฏจักรกังหันแก๊สจึงถูกสาธิตขึ้น ซึ่งข้อเสียของระบบคือจำเป็นต้องใช้ตัวรวมรังสีแบบสองขั้นตอน เมื่อรังสีอาทิตย์ถูกรวมโดยกระจกแก้วเล็กๆที่ตัวรับซึ่งจะนำไปสู่การจำกัดมุมมองภาพของกรวยซึ่งหมายความว่าต้องมีเฮลิโอสแตทรอบๆหอคอยโดยมีรูปทรงเป็นวงรี ผลจากการแบ่งขอบเขตของกรวยกับระนาบที่พื้นจะถูกใช้กับระบบเล็กๆค่าใช้จ่ายของหอคอยจะต่ำ การเรียงตัวของเฮลิโอสแตทจะคล้ายๆกันโดยมีหรือไม่มีตัวรวมรังสีขั้นตอนที่สอง สำหรับระบบใหญ่ซึ่งมีประสิทธิภาพลดต้นทุนราคาสูงกว่า ราคาของหอคอยมีนัยสำคัญ การสูญเสียจากบรรยากาศมากกว่ามุมโคไซน์ การวางตัวของสนามในแนวทิศเหนือจะเพิ่มราคาสูงขึ้น ในงานวิจัยนี้จะสาธิตการเพิ่มกำลังในการใช้ตัวรับรังสีในทิศเหนือ 6 ชั้น เพื่อใช้ในสนามเฮลิโอสแตท

เอนเจล กาเซีย บอเทลลา และคณะ (Ángel García-Botella; et al. 2009). ได้ศึกษาวิธีการทางสนามสำหรับการออกแบบตัวรวมรังสี โดยศึกษาความเข้มของเวกเตอร์เชิงเรขาคณิตกับเวกเตอร์ของแสงโดยการออกแบบตัวรวมรังสีในรูปแบบของทฤษฎีสันนาม เริ่มจากความสมมาตรของตัวรวมรังสีในระบบพิกัดที่แตกต่างกัน ตัวรวมรังสีในพิกัดของวงรีทรงกระบอกเป็นตัวรวมรังสีแบบสมมาตรโดยการหมุนและเลื่อนตำแหน่ง จากความสมมาตร ได้ศึกษาสนามของแสงที่ผลิตขึ้นจากจานวงรีและจานไฮเพอร์โบล่าจะได้ตัวรวมรังสีแบบสามมิติ แบบไม่สมมาตรในอุดมคติขึ้นโดยใช้ทฤษฎีสันนามจะได้เส้นสนามขึ้นสูงโดยการศึกษาสนามของแสงที่ได้จากรูปทรงลิ้ม 2 มิติ ซึ่งจะใช้กำหนดตัวรวมรังสีขึ้นสูงเป็นตัวรวมรังสีแบบไฮเพอร์พาราโบล่าซึ่งมีรูปทรงเป็นไฮเพอร์โบล่าประกอบกับพาราโบล่าที่เอียงซึ่งขีดจำกัดของจุดโฟกัสที่ไม่จำกัดของไฮเพอร์โบล่า (Hyperbolic collector, HPC) แบบสามมิติ จะเข้าถึงขีดจำกัดทางเทอร์โมไดนามิกส์ของตัวรวมรังสี

อาร์ บาเดอร์ และคณะ (R Bader; et al. 2009). ได้ทำการออกแบบเชิงแสงของตัวรวมรังสีแบบรางพาราโบล่า 2 ขั้นตอน โดยใช้พื้นฐานของนิวแมติกส์โพลีเมอร์ ทำการสร้างตัวรวมรังสีแบบรางพาราโบล่าโดยใช้กระจกเงามีนิวแมติกส์โพลีเมอร์ยึดบนโครงสร้างคอนกรีต มีตัวรวมรังสีขั้นตอนที่สองยึดกับท่อทรงกระบอกของขั้นตอนที่หนึ่ง ทำการออกแบบที่เหมาะสมหาค่าพลาซมัลลัสสูงที่สุดที่ได้ ใช้เทคนิคการลากลำแสงแบบมอนติคาร์โล หาผลการสะท้อนของผิว (ความคลาดเคลื่อน) หาโครงสร้างลำแสงที่เกิดขึ้น สมรรถนะของระบบตัวรวมรังสีที่ประกอบด้วยขั้นตอนที่หนึ่งและสอง ผลการศึกษาเชิงตัวเลขสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดลองที่ความยาวต้นแบบขนาด 49.4 เมตร และกว้าง 7.9 เมตร โดยมีระบบติดตามดวงอาทิตย์ อัตราส่วนการรวมแสงทางทฤษฎีสูงสุด 151 sun การวัดที่ตัวสะท้อนขั้นตอนที่สองแบบแบนได้ 55 sun

วาย เจ ไต และคณะ (Y J Dai; et al. 2009). ได้ศึกษาและพัฒนาตัวรวมรังสีแบบสองขั้นตอนโดยใช้เฟรชเนลเลนส์และจานสะท้อนรังสีเพื่อให้แสงสว่างตามธรรมชาติและประยุกต์ใช้งาน

พลังงานแสงอาทิตย์ที่มีอัตราส่วนการรวมรังสีสูง ตัวรวมรังสีทั้ง 3 แบบได้แก่เฟรชเนลเลนส์ เลนส์ หนูน และจานพาราโบลาได้ถูกพิจารณาและนำมารวมกันในหลายๆทางเพื่อสร้างตัวรวมรังสีอาทิตย์ โดยแบ่งระบบการรวมรังสีเป็นแบบตัวสะท้อนสองชั้นตอนที่จะทำให้ได้ประสิทธิภาพเชิงแสงสูงกว่า การหักเหแสง 2 ชั้นตอนโดยต้องการระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่แม่นยำ การวิเคราะห์และเปรียบเทียบตัวเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ และกระบวนการส่งผ่านถูกสร้างเพื่อใช้งานเครื่องมือตัวรวมรังสีแบบจุด ดังนั้นจึงได้สร้างและทดสอบตัวรวมรังสี 2 ชั้นตอนในกระบวนการกระจายรังสีแบบใช้เฟรชเนลเลนส์

โดมินิก กรูกซ์และเบนจามิน สโปนาเกล (Dominic Groulx; & Benjamin Sponagle 2010). ได้วิเคราะห์การลากเส้นลำแสงของตัวรวมรังสีแบบสองชั้นตอนโดยใช้กระจกเงาพาราโบลา (LIFE) โดยศึกษาผลของความยาวโฟกัสของกระจกเงาชั้นตอนที่สองระยะห่างระหว่างกระจกเงาชั้นตอนที่สองและเป้ารับ และการผิดตำแหน่งจากดวงอาทิตย์ ความยาวโฟกัสของกระจกชั้นที่สองจะหาค่าพลักซ์พลังงานแสงอาทิตย์สูงสุดที่ได้รับบนเป้ารับ ระยะโฟกัสที่เหมาะสมเป็น 157.9 นิ้ว ค่าพลักซ์สูงสุด $1.2 \times 10^4 \text{ MW/m}^2$ เทียบกับค่าพลักซ์ 1680 MW/m^2 สำหรับค่าเริ่มของ LIFE มีความยาวโฟกัส 158.8125 นิ้ว ตัวรวมรังสีจะรวมพลังงานของรังสีอาทิตย์ไปที่เป้ารับและตัวรวมรังสีชั้นที่สองที่มีความยาวโฟกัสที่ทำการศึกษทำให้เกิดตำแหน่งที่เป้าขนาด 11 cm การเยื้องศูนย์มีค่า $\pm 0.2^\circ$ ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของตัวรวมรังสีเป็นศูนย์

มาริโอ และคณะ (Maurizio Carlini; et al. 2011). ได้ศึกษาแบบจำลองเชิงแสงของตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบสี่เหลี่ยมโดยเป็นการออกแบบเชิงแสงของตัวรวมรังสีโฟโตโวลตาอิกซึ่งประกอบด้วยกระจกเงาสี่เหลี่ยมแบบสี่เหลี่ยมสองบานรูปทรงสี่เหลี่ยมของอุปกรณ์นี้มีพื้นฐานมาจากกล้องโทรทรรศน์แบบแคซิเกรน และทำการออกแบบเพื่อเพิ่มตัวประกอบของพื้นที่รับรังสีและให้รูปทรงที่ง่ายต่อการสร้างชิ้นงานตัวเก็บรังสีนี้ถูกจำลองและหาค่าที่เหมาะสมโดยวิธีการลากเส้นลำแสงเพื่อให้ได้อัตราส่วนการรวมรังสี เป็น 1000 ด้านบนของเซลล์สุริยะซึ่งวางไว้ด้านหลังของกระจกเงาชั้นตอนที่หนึ่งเพื่อให้การระบายความร้อนเป็นแบบเรียบง่าย ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบธรรมดาที่เป็นอิสระสามารถประกอบรวมกันเป็นโมดูลและเป็นแถวซึ่งจะผลิตกำลังได้ในระดับที่ต้องการ

1.9 งานวิจัยเกี่ยวกับระบบติดตามดวงอาทิตย์ในประเทศ

อนุชา ดีผาง และคณะ (Anucha; et al. 2005). ทำวิจัยเรื่องเครื่องติดตามดวงอาทิตย์แบบ 2 แกนคือแนวอัลติจูด (Altitude) และแนวอะซิมุท (Azimuth) โดยใช้หลักการบังเงาของฉากกัน มีโฟโตทรานสมิสเตอร์เป็นตัวตรวจจับรังสีตรงดวงอาทิตย์ความสูงของฉากกันเป็นตัวกำหนดความไวหรือช่วงเวลาในการติดตามจากการทดสอบพบว่าเครื่องติดตามดวงอาทิตย์มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 2.5 องศาหากคิดอัตราการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์เฉลี่ยที่ 15 องศาต่อชั่วโมงก็แสดงว่าเครื่องติดตามดวงอาทิตย์มีการคลาดเคลื่อนตามดวงอาทิตย์โดยเฉลี่ยทุก 10 นาทีที่มีค่าใน

การทำงานของระบบประมาณ 37 องศาที่ความไวในการเข้าหาจุดทำงาน 0.3 วินาที นอกจากนี้ยังพบว่าในช่วงเวลาที่แดดแรงจัดความคลาดเคลื่อนก็จะลดลงและในทางตรงข้ามเมื่อแสงแดดเริ่มอ่อนลงความคลาดเคลื่อนจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น

วัชร จิตต์ชื้อ และคณะ (Chitsue W; et al. 2008). จัดทำชุดขับเคลื่อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบ 2 แกนโดยทำการออกแบบชุดขับเคลื่อนแผงเซลล์สุริยะแบบควบคุมด้วยการคำนวณองศาตามระยะเวลามาตรฐานของการโคจรของดวงอาทิตย์เป็นสูตรคำนวณโดยสั่งการให้มีการเปลี่ยนองศาแผงเซลล์ไปเป็นระยะทุกๆ 36 วินาทีที่ได้จากการคำนวณแล้วทำการเปรียบเทียบกับแบบเคลื่อนที่แกนเดียวและแบบติดอยู่กับที่

กฤตภาส เกษรา ณ อยุธยาและคณะ (Kritpas; et al. 2009). ได้ออกแบบและสร้างระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์สุริยะ โดยการคำนวณมุมที่ตั้งของดวงอาทิตย์เทียบกับตำแหน่งที่อยู่บนพื้นโลกซึ่งมุมของดวงอาทิตย์นั้นเมื่อเทียบกับผู้สังเกตบนพื้นโลกจะใช้อยู่ 2 แกนหลักคือ มุมอะซิมุท (Azimuth) และมุมอัลติจูด (Altitude) การทำงานของระบบคือการนำตำแหน่งสถานที่ ลำดับวันที่ใน 1 ปี (1-365) เวลา แล้วนำมาใส่ในสมการคำนวณเพื่อหาตำแหน่งของมุมอัลติจูดและมุมอะซิมุทและใช้คอมพิวเตอร์ในการประมวลผล เพื่อส่งไปยังชุดควบคุมสแต็ปมอเตอร์และชุดควบคุมจะส่งสัญญาณไปยังมอเตอร์เพื่อขับแผงไปยังมุมที่คำนวณผลการทดลองเปรียบเทียบพลังงานที่ออกมาจากแผงเซลล์สุริยะแบบ 10 W ซึ่งติดตั้งอยู่กับที่และติดตั้งแบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ ผลการทดลองหลัง จากเก็บค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโดยใช้ตัวความต้านทานกระแสไฟฟ้าขนาด 37 โอห์มเป็นภาระงานในระบบ ของทั้งสองแบบที่จ่ายออกมาแล้วนำไปคำนวณเป็น กำลังไฟฟ้าทุกช่วงเวลาจะเห็นได้ว่าในช่วงเวลา ตั้งแต่ 9.00 น. ถึง 11.00 น. แบบตั้งอยู่กับที่จ่ายกำลังไฟฟ้าออกมา 7.28 W แบบติดตามตำแหน่งจ่ายกำลังไฟฟ้าออกมา 8.25 W ซึ่งมากกว่าแบบตั้งอยู่กับที่ 11.75 % ช่วง เวลา 11.30 น. ถึง 12.30 น. แบบตั้งอยู่กับที่จ่ายกำลังไฟฟ้าออกมา 4.56 W แบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์จ่ายกำลังไฟฟ้าออกมา 4.72 W ซึ่งมากกว่าแบบตั้งอยู่กับที่ 3.40 % ช่วง 13.00 น. ถึง 15.00 น. แบบตั้งอยู่กับที่จ่ายกำลังไฟฟ้าออกมา 6.67 W แบบติดตามตำแหน่งจ่ายกำลังไฟฟ้าออกมา 7.60 W ซึ่งมากกว่าแบบตั้งอยู่กับที่ 12.29 % โดยรวมแล้วเครื่องติดตามตำแหน่งแบบ 2 แกนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้แผงเซลล์สุริยะได้ 9.89 %

รัตนพงศ์ เสาศิลา (Rattanapong. 2009). ได้ทำวิทยานิพนธ์เรื่องการพัฒนาการเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยแผงเซลล์สุริยะที่มีการควบคุมการเคลื่อนที่แบบ 2 แกนด้วยหลักการความโน้มถ่วงสูงสุดโดยเปรียบเทียบพลังงานแสงที่ได้กับแผงเซลล์สุริยะซึ่งอยู่กับที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบพลศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นแบบมีระดับชั้นความเสรีอันดับที่ 2 ถูกใช้เพื่อจำลองการทำงานของชุดควบคุมการเคลื่อนที่แบบ 2 แกนและพบว่าสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของเซลล์สุริยะได้อย่างโน้มถ่วงตามเงื่อนไขขอบเขตเวลาและตำแหน่งที่กำหนดในการทดสอบชุดการเคลื่อนที่กับแผงเซลล์สุริยะขนาด 6 W 12 VDC มีการควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยการวัดระดับความ

เข้มแสงที่ตกกระทบเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมของเซลล์สุริยะทุกๆ ชั่วโมง ระหว่างเวลา 08.00-17.00 น. พบว่าค่าพลังงานที่ผลิตจากแผงเซลล์สุริยะที่เคลื่อนที่สามารถผลิตพลังงานได้มากกว่าแผงเซลล์สุริยะที่อยู่กับที่ 79.01 % (0.02 kW-h) โดยไม่รวมพลังงานในส่วนที่ใช้สำหรับขับเคลื่อนชุดควบคุมการเคลื่อนที่

สิทธิกร จอณเณลิมชัย และคณะ (Sittikorn; et al. 2010). ได้พัฒนาระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบ 2 แกนโดยการคำนวณมุมที่ตั้งของดวงอาทิตย์เทียบกับตำแหน่งที่อยู่บนพื้นโลกซึ่งมุมของดวงอาทิตย์นั้นเมื่อเทียบกับผู้สังเกตบนพื้นโลกจะใช้อยู่ 2 แกนหลักคือมุมอะซิมุทและมุมอัลติจูดหลักในการทำงานของระบบคือการนำตำแหน่งสถานที่ลำดับวันที่ใน 1 ปี (1-365) เวลาแล้วนำมาใส่ในสมการคำนวณเพื่อหาตำแหน่งของมุมอัลติจูดและมุมอะซิมุทโดยใช้ภาษา C++ ในการเขียนโปรแกรมและใช้คอมพิวเตอร์ในการประมวลผลเพื่อส่งไปยังชุดควบคุมสแต็ปมอเตอร์และชุดควบคุมจะส่งสัญญาณไปยังมอเตอร์เพื่อขับเคลื่อนไปยังมุมที่คำนวณได้จากการทดลองในวันที่ 19-20 มีนาคม 2554 ทำการทดลองในช่วงเวลา 13.30-15.30 น. โดยการป้อนข้อมูลเวลาเข้าไปในโปรแกรมและทำการสังเกตเงาที่เกิดขึ้นจากการนำแท่งเหล็กวางตั้งฉากกับแผ่นรับแสงอาทิตย์เมื่อเกิดเงาขึ้นก็แสดงถึงความไม่แม่นยำของตัวเครื่องนำเงาที่เกิดขึ้นมาคำนวณออกมาเป็นค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อนำเงาที่เกิดไปคำนวณค่าหาความคลาดเคลื่อนจะได้อยู่ที่ประมาณ 4.8% ปัญหาที่พบจากการวิจัยคือเกิดเงาขึ้นเล็กน้อยหรือเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นนั่นเอง

1.10 งานวิจัยเกี่ยวกับระบบติดตามดวงอาทิตย์ในต่างประเทศ

เฮลวา และคณะ (Helwa; et al. 2000). ศึกษาการเก็บพลังงานแสงอาทิตย์จากระบบติดตามดวงอาทิตย์ต่างๆ กันโดยคำนวณพลังงานแสงอาทิตย์ที่เก็บได้โดยใช้เครื่องมือตรวจวัดรังสีอาทิตย์รวม รังสีกระจายโดยวัดบนพื้นระดับ การทดลองประกอบด้วย 1.ไม่มีระบบติดตามดวงอาทิตย์แผ่นรับเอียงทำมุม 408 องศาจากทิศใต้ 2. มีระบบติดตามดวงอาทิตย์แกนเดียวมุมเอียง 338 องศา 3. มีระบบติดตามดวงอาทิตย์ วางในแนวเหนือใต้มีมุมเอียง 68 องศาและมีระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกน 4. แกนเดียวแนวตั้งและอื่นๆ ในแนวแกนนอน โดยพัฒนาสูตรสำหรับการแผ่รังสี 3 แบบและเขียนโปรแกรมภาษาเบสิกใช้คำนวณและเก็บข้อมูลการแผ่รังสีในแต่ละวันของแต่ละระบบ การเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณและการทดลองจริงแสดงให้เห็นค่าเฉลี่ยรายปีสำหรับความแตกต่างค่ากำลังสองเฉลี่ยของชั่วโมง(RMSD) เป็น 5.36, 9.07, 7.92 และ 5.98 สำหรับแบบอยู่กับที่ แบบติดตามแนวตั้ง แกนติดตามดวงอาทิตย์แบบเอียง และตามลำดับ ค่าทั้งหมดอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

บรูแนต และคณะ (Brunatte; et al. 1996). ศึกษาตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบสองชั้นตอนกับระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบแกนเดียวในรอบแกนเหนือ-ใต้ ครึ่งมุมขอบของตัวรวมรังสีชั้นตอนที่ 1 ถูกเลือกให้เท่ากับมุมเอียงสูงสุดของดวงอาทิตย์คือ 23.58° โดยทดสอบระบบในหลายสภาวะการคำนวณตามทฤษฎีสำหรับค่าตัวประกอบการรวมรังสีของการติดตามในแนว ตะวันออก-

ตะวันตก และเหนือ-ใต้ สรุปว่าจากหลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์ ตัวประกอบการรวมรังสีจะเพิ่มขึ้นจากปัจจัย 3 ส่วน สำหรับต้นแบบนี้มีประสิทธิภาพการรวมแสง 77.5 % วัดได้จากรังสีปกติ

บินโกลและคณะ (Bingol; et al. 2006). ได้ทำการทดสอบไมโครคอนโทรลเลอร์กับระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบ 2 แกน โดยใช้ตัวต้านทางเชิงแสงเป็นตัวตรวจจับแสง ใช้สเตปมอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ระบบเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์และ RS 232 เพื่อสังเกตการณ์ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ผลึกคริสตัลที่มีความถี่ 4 MHz ใช้เป็นเครื่องกำเนิดสัญญาณนาฬิกาสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ มุมของแผงรับรังสีอยู่กับที่ที่ 508 การทดลองสำหรับแผงเก็บรังสี 2 แผง อยู่กับที่และเคลื่อนที่ อุณหภูมิของแผงกับเวลาถูกวัดในช่วง 1 นาที เก็บข้อมูล 50 ค่า มุมของแผงในช่วงเกือบจะเป็น 5.28 สังเกตความแตกต่างระหว่างแผงอยู่กับที่และแผงเคลื่อนที่ ผลการทดลองแสดงว่าแผงเคลื่อนที่ที่มีระบบติดตามดวงอาทิตย์สามารถเก็บความหนาแน่นของแสงได้มากกว่าแผงที่อยู่กับที่

โกยูนชู และคณะ (Koyuncu; et al.1991). ประเมินระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบ 2 แกน ใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ควบคุม มีลิมิตสวิตช์ 2 ตัว กำหนดตำแหน่งมุมสูงสุดในแนวตะวันออกและตะวันตกและจำกัดการเคลื่อนที่ของแผงโดยเชื่อมต่อกับไมโครโปรเซสเซอร์ ผลการทดสอบแสดงความยาวนานของระนาบของแผงที่เก็บพลังงานสูงสุดจากดวงอาทิตย์ที่ได้รับ

ซอก บี และคณะ (Zogbi; et al.1984). ได้ออกแบบและสร้างระบบติดตามดวงอาทิตย์ 2 แกนต้นทุ่นต่ำ (แนวยกระดับและแนวนอน) โดยระบบใช้แผงอิเล็กทรอนิกส์แบบดั้งเดิม มีเซนเซอร์จับแสง 4 ตัวในแต่ละด้านของจาน ระบบติดตามดวงอาทิตย์ประกอบด้วยตัวขยายสัญญาณ และอุปกรณ์เปรียบเทียบสัญญาณที่ได้รับจากเซนเซอร์แต่ละคู่เพื่อสั่งมอเตอร์ 2 ตัว สำหรับการหมุนในแต่ละแกน ระบบมีวงจรควบคุมให้หมุนกลับในแนวตะวันออกและรอคำสั่งในตอนกลางคืนและหมุนกลับในทิศตะวันออกสำหรับตอนเช้า ถ้าสัญญาณด้านออกจากเซนเซอร์ 1 ตัวมากกว่าค่าเริ่มต้นมอเตอร์จะถูกกระตุ้นโดยเครื่องขยายสัญญาณ จนกว่าสัญญาณที่คลาดเคลื่อนจะลดลงจนน้อยกว่าค่าเริ่มต้น เวลาที่ตรงกันเป็น 15 วินาทีจึงสรุปว่าต้นแบบที่สร้างขึ้นทำงานได้ประสบผลสำเร็จภายใต้ความเข้มแสงหลายค่า

พาลาฟราส และคณะ (Palavras; et al. 2006). พัฒนาตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลา โดยมีกลไกระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบ 2 แกน ช่องรับแสงของจานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.58 เมตร และมีจุดโฟกัส 1.02 เมตร ระบบติดตามดวงอาทิตย์มีวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งประมวลผลสัญญาณจากเซนเซอร์แบบโพโตรีซิสแตนท์และสัญญาณขาออกไปยังรีเลย์เพื่อกระตุ้นจานด้วยวงจรขนาดกำลังขับ 5 V เมื่อเซนเซอร์ไม่สมดุลความต้านทานจะต่างกันและรีเลย์จะให้กำลังไฟ 24 V ภาระสำหรับมอเตอร์ขับเคลื่อนกระแสตรงภาระสูง การตรวจวัดแสดงค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนประมาณ $163 \text{ W/m}^2\text{K}$ และในบริเวณจุดโฟกัสอุณหภูมิทำได้สูงถึง 300°C

ตาราง 1 ตารางสรุปการสำรวจเอกสารงานวิจัย

นักวิจัย	ลักษณะงานที่ศึกษา	การศึกษาและผลที่ได้รับ
(Kanpal,T.C. et al. 1980). คานपाल ทีซีและคณะ	สมรรถนะของตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบสองชั้นตอน โดยศึกษารูปทรงในการรวมรังสี การจำแนกตัวรวมรังสีแบบสองชั้นตอน ประกอบด้วยรางพาราโบลาและ CPC ในชั้นตอนที่สอง	สมรรถนะทางความร้อน
(D.Feurmann;&J.M. Gordon 1991). ดีเฟอร์แมนและเจเอ็มกอร์ดอน	วิเคราะห์ตัวรวมรังสีแบบสองชั้นตอนโดยใช้ตัวสะท้อนแสงแบบเฟรชเนลเชิงเส้นโดยติดตั้งเข้ากับระบบขนาด 220 kW ตัวรวมรังสีประกอบด้วยตัวสะท้อนแบบเฟรชเนลเชิงเส้นมีกระจกเงาโค้งและชั้นตอนที่สองเป็นแบบ CPC ไม่มีภาพ โดยมีเป้ารับเป็นท่อทรงกระบอก	จำลองด้วยคอมพิวเตอร์รวมถึงการลากเส้นลำแสงของตัวสะท้อนชั้นตอนที่หนึ่ง วิเคราะห์ความไวของพลังงานขาออกจากตัวรวมรังสี ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงแสง รูปทรง ระบบติดตามดวงอาทิตย์และการใช้กระจกเงาทรงโค้งในชั้นปฐมภูมิ ตัวรวมรังสีทุติยภูมิทำจากเฟรชเนล
(Collares-Pereia M.; et al.1991). เอ็มคอราเรสเปร์เรีย และคณะ	ศึกษาแผ่พลังงานแสงอาทิตย์ที่มีตัวรวมแสงแบบรางพาราโบลาแบบมีตัวรวมแสง 2 ตัว และมีมุมขอบเริ่มที่ 80-120 องศา	ลดการสูญเสียทางความร้อนลงได้และสามารถทำให้อุณหภูมิของไหลที่ใช้งานสูงถึง 500°C นำไปใช้ในโรงไฟฟ้าได้ โดยแบบที่มีตัวรวมแสง 2 ตัวจะมีค่าอัตราส่วนการรวมแสงเป็น 2 เท่าของแบบปกติ

ตาราง 1 (ต่อ)

นักวิจัย	ลักษณะงานที่ศึกษา	การศึกษาและผลที่ได้รับ
(Robert P. Fried 1993). โรเบิร์ต พี ฟรีดแมนและ คณะ	ออกแบบเชิงแสงของตัวรวม รังสีพาราโบลาแบบสองขั้นตอน ความเข้มฟลักซ์สูงแบบใหม่ โดยใช้ จานพาราโบลาซึ่งสามารถทำได้ ใกล้เคียง 90% ของขีดจำกัดทางอุณห พลศาสตร์มีขนาดกะทัดรัด(มุมรับ รังสีประมาณ 45 °)	มีขนาดกะทัดรัด ความเข้ม ฟลักซ์สูงสำหรับ ใช้กับเตาแสงอาทิตย์และ หรือระบบจานพาราโบลาใน เชิงการค้า ตัวรวมรังสี ขั้นตอนที่สองเป็นแบบ tailored edge-ray
(Ajiya.1995). เอจียา	ออกแบบและสร้างเตา แสงอาทิตย์แบบจานพาราโบลา แผ่นเรียบสีดำถูกวางไว้ที่จุดโฟกัส เพื่อเป็นตัวดูดซับพลังงาน	เตาแสงอาทิตย์แบบ พาราโบลาที่มีประสิทธิภาพ 30% ในสภาพแวดล้อมของ เมืองไมดุงูรี
(Pablo Benitez; etal.1997). พาโบลบีเนซ และคณะ	ประสิทธิภาพการไม่สัมผัส ของตัวรวมรังสีแบบสองขั้นตอน สำหรับตัวดูดซับพลังงานแบบท่อ โดยทำการออกแบบตัวรวมรังสีแบบ กระจกเงา 2 ขั้นตอนแบบใหม่ สำหรับตัวดูดซับพลังงานแบบท่อ	ได้รับค่าฟลักซ์ใน การรวมรังสี $\pm 0.73^\circ$ ของ 91% ของขีดจำกัดทางอุณห พลศาสตร์มีประสิทธิภาพ การเก็บพลังงาน 96.8% และตัวรวมรังสีอีกตัวหนึ่งที่ ออกแบบมีประสิทธิภาพ 92.5% มุมขอบของ ตัวรับรังสีชั้นปฐมภูมิเป็น 98.8 องศาและ 104.4 องศา

ตาราง 1 (ต่อ)

นักวิจัย	ลักษณะงานที่ศึกษา	การศึกษาและผลที่ได้รับ
(SiddingA.Omer.& David G. Infield. ซิดดิง เอ โอเมอร์ และเดวิด จี อินฟิลด์ 2000).	ออกแบบและวิเคราะห์เชิงความร้อนสำหรับความร้อนร่วมและการผลิตไฟฟ้าแบบเทอร์โมอิเล็กทริกหาสมรรถนะเชิงความร้อนของตัวรวมรังสี 2 ขั้นตอน ที่เหมาะสมกับระบบความร้อนร่วมและการผลิตไฟฟ้าทำจากเทอร์โมอิเล็กทริก ตัวรวมรังสีที่ประกอบด้วยชั้นปฐมภูมิเป็นแบบรางพาราโบลาและชั้นทุติยภูมิเป็นแบบ CPC ยึดติดที่จุดโฟกัสของชั้นปฐมภูมิชุดเทอร์โมอิเล็กทริกยึดติดกับแผ่นดูดซับพลังงานที่จุดโฟกัสของตัวรวมรังสีชั้นทุติยภูมิ	สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการรวมรังสีอาทิตย์โดยตัวรวมรังสีขั้นตอนที่สองคือ CPC จะลดค่าการพาความร้อนจากอากาศและเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของตัวรวมรังสีอาทิตย์ได้
(K. S. Reddy. & N. Sendhil Kumar 2009). เคเอส เรดดี และเซ็นฮิล कुमार	การสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนที่ผิวจากการดัดแปลงช่องรับของตัวรับรังสีแบบจานพาราโบลาที่มีการรวมรังสี 2 ขั้นตอนวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับจานรับรังสีที่ดัดแปลงช่องรับเป็นรูปกรวย CPC และ แบบทรมเปต	ตัวสะท้อนรังสีเมื่อดัดแปลงช่องรับสำหรับการรวมรังสีขั้นตอนที่สอง การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนจะลดลง 29.23, 19.81, และ 19.16% ตามลำดับ ตัวรับที่มีตัวสะท้อนแบบทรมเปตมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบอื่น
(R Bader; et al.2009). อาร์ บาเดอร์ และคณะ	ออกแบบเชิงแสงของตัวรวมรังสีแบบรางพาราโบลา 2 ขั้นตอนโดยใช้พื้นฐานของนิวแมติกส์โพลิเมอร์	ความยาวต้นแบบขนาด 49.4 เมตร และกว้าง 7.9 เมตร มีระบบติดตามดวงอาทิตย์ อัตราส่วนการรวมแสงทางทฤษฎีสูงสุด 151 Sun การวัดที่ตัวสะท้อนขั้นตอนที่สองได้ 55 Sun

ตาราง 1 (ต่อ)

นักวิจัย	ลักษณะงานที่ศึกษา	การศึกษาและผลที่ได้รับ
(Y J Dai; et al. 2009). วาย เจ ไต และคณะ	ศึกษาและพัฒนาตัวรวมรังสีแบบสองชั้นตอนโดยใช้เฟรชเนลเลนส์และจานสะท้อนรังสีเพื่อให้แสงสว่างตามธรรมชาติระบบมีติดตามดวงอาทิตย์ที่แม่นยำ	ตัวสะท้อนสองชั้นตอนมีประสิทธิภาพเชิงแสงสูงกว่าการหักเหแสง 2 ชั้นตอน ต้องการระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่แม่นยำ มีการวิเคราะห์เปรียบเทียบตัวเก็บพลังงานแสงอาทิตย์
(Dominic Groulx & Benjamin Sponagle 2010). โดมินิกกรูกซ์และเบนจามินสโปนาเกล	วิเคราะห์การลากเส้นลำแสงของตัวรวมรังสีแบบสองชั้นตอนโดยใช้กระจกเงารูปทรงพาราโบลา (บริษัท LIFE)	ระยะโฟกัสที่เหมาะสมเป็น 157.9 นิ้ว มีค่าฟลักซ์สูงสุด $1.2 \times 10^4 \text{ MW/m}^2$ เทียบกับค่าฟลักซ์ 1680 MW/m^2 เกิดตำแหน่งที่เข้าขนาด 11 cm การเยื้องศูนย์มีค่า $\pm 0.2^\circ$
Maurizio Carlini; et al. 2011). มารีโซและคณะ	ศึกษาแบบจำลองเชิงแสงของตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบสี่เหลี่ยมโดยเป็นการออกแบบเชิงแสงของตัวรวมรังสีโฟโตโวลตาอิกประกอบด้วยกระจกเงาสะท้อนแสงแบบสี่เหลี่ยมสองบานรูปทรงฐานของอุปกรณ์นี้มีพื้นฐานมาจากกล้องโทรทรรศน์แบบแคซีเกรน	หาค่าที่เหมาะสมโดยวิธีการลากเส้นลำแสงเพื่อให้ได้อัตราส่วนการรวมรังสีเป็น 1000

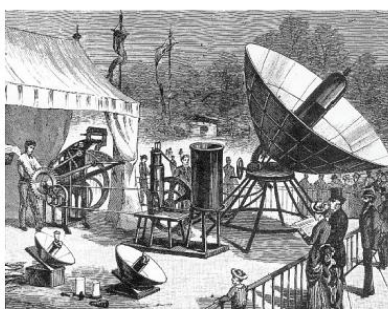
จากการทบทวนวรรณกรรมและตรวจเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาเรื่องตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบพาราโบลา 2 ชั้นตอนดังตารางที่สรุปสาระสำคัญพบว่ายังไม่มีงานวิจัยที่เป็นการออกแบบ สร้างและทดสอบสมรรถนะเชิงความร้อนและสมรรถนะเชิงแสงของต้นแบบตัวรวมรังสีอาทิตย์จานพาราโบลาแบบ 2 ชั้นตอนที่สามารถเพิ่มพลังงานให้มากขึ้นกว่าแบบหนึ่งชั้นตอนโดยใช้วัสดุที่มีในประเทศในเชิงการตลาด ดังนั้นการศึกษาวิจัยตัวรวมรังสีแบบสองชั้นตอนที่ใช้จานพาราโบลาเพื่อผลิตพลังงานความร้อนจึงเป็นประเด็นสำคัญในการศึกษาโดยวัดค่าพลังงานในรูปของความร้อนที่ส่งให้กับของไหลถ่ายเทความร้อนได้แก่น้ำโดยใช้แคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลผ่านต่อเนื่อง

เป็นตัววัด และอากาศโดยใช้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดเล็กเป็นตัววัดการเปลี่ยนรูปพลังงานความร้อนเป็นพลังงานกลและพลังงานไฟฟ้าต่อไป

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ตัวรวมรังสีอาทิตย์ (Solar Concentrator)

การใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตความร้อน สามารถสืบย้อนกลับไปถึงครั้งอาคิมมีดีสได้ใช้กระจกเงาในการสะท้อนแสงไปยังศัตรูเมื่อ 212 ปีก่อนคริสตกาล โดยสามารถเผาไหม้ใบเรือได้ระยะไกลหลายร้อยฟุต เมื่อ ค.ศ.1774 เมื่ออองต์วาลาวัชเยได้สร้างเลนส์รวมแสงขนาดใหญ่ที่ใช้รวมแสงอาทิตย์ไปยังจุดโฟกัสจนสามารถเผาวัตถุได้ที่อุณหภูมิใกล้เคียง 1700°C ต่อมาในปี ค.ศ.1878 ตัวเก็บรังสีแบบพาราโบลาได้รวมรังสีอาทิตย์แล้วให้ความร้อนกับหม้อไอน้ำสำหรับขับเคลื่อนเครื่องยนต์ขนาดเล็กสำหรับแท่นพิมพ์ พลังงานกลทั้งหมดนำไปขับเคลื่อนพิมพ์โดยมีถังจ่ายน้ำให้กับระบบ ต่อมาการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตกำลังจากการรวมแสงอาทิตย์ได้มีขนาดใหญ่ขึ้นเช่นการใช้รางพาราโบลาและระบบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงกับจานพาราโบลา



ภาพประกอบ 2 เครื่องยนต์ไอน้ำใช้ความร้อนจากจานพาราโบลาของมูโซในกรุงปารีสปี ค.ศ.1878
น้ำได้รับความร้อนที่จุดโฟกัสของตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลา
ที่มา: <http://landartgenerator.org/blagi/archives/2004>.

การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้โดยตรง ได้แก่การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ในทางความร้อนแต่เนื่องจากความเข้มข้นรังสีอาทิตย์ของพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกลงบนผิวโลกมีค่าไม่สูงมากนักประมาณ $800\text{--}1000\text{ W/m}^2$ ดังนั้นถ้าต้องการนำพลังงานแสงอาทิตย์ในรูปของความร้อนมาใช้ประโยชน์โดยตรงให้ได้พลังงานสูงสุดจำเป็นต้องมีอุปกรณ์สำหรับรับหรือรวมพลังงานแสงอาทิตย์เรียกอุปกรณ์นี้ว่าตัวรวมรังสีอาทิตย์ (Solar Concentrator) ซึ่งทำหน้าที่รับพลังงานแสงอาทิตย์และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนเพื่อให้ได้อุณหภูมิความร้อนจากความเข้มข้นรังสีอาทิตย์ที่สูงตัวรวมรังสีอาทิตย์ทำหน้าที่รับพลังงานแสงอาทิตย์เมื่อได้รับแสงอาทิตย์ที่ผิวของตัวดูดซับรังสีอาทิตย์จะดูดกลืนพลังงานแสงและเปลี่ยนเป็นพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานความร้อนพลังงานความร้อนจะสะสมอยู่ที่เนื้อวัตถุทำให้อุณหภูมิของวัตถุนั้นสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิของวัตถุสูงกว่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมจะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากวัตถุนั้นไปยังสิ่งแวดล้อมโดยจะหยุด

ถ่ายเทความร้อนเมื่ออุณหภูมิของวัตถุเท่ากับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมซึ่งเรียกภาวะนี้ว่า “สภาวะคงตัว”

พลังงานความร้อนจากตัวรวมรังสีอาทิตย์ที่นำไปใช้ประโยชน์สามารถคำนวณได้จากสมการพื้นฐานคือ

พลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์ = พลังงานความร้อนที่ได้รับ – พลังงานความร้อนที่สูญเสีย

$$\text{Solar energy input } q_s = I_N A_O \quad (2-1)$$

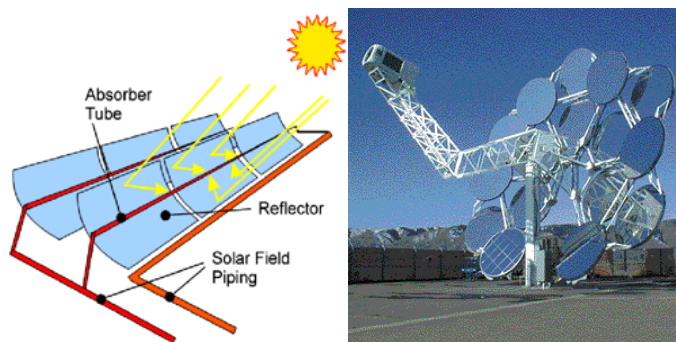
$$\text{Absorbed energy } q_a = \alpha I_N C_a A_f \quad (2-2)$$

$$\begin{aligned} q_{in} &= \alpha I_N C_a A_f - \epsilon \sigma A_H (T_H^4 - T_A^4) - h_H A_H (T_H - T_A) \\ &= U_H A_H (T_H - T_3) \end{aligned} \quad (2-3)$$

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวรวมรังสีอาทิตย์

$$\begin{aligned} &= \frac{\text{พลังงานความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์}}{\text{พลังงานความร้อนที่ตกกระทบบนตัวรวมรังสี}} \\ \eta_{th} &= \frac{q_{in}}{q_s} \end{aligned} \quad (2-4)$$

ตัวรวมรังสีอาทิตย์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบไม่รวมแสง (Non – Focusing Solar Collector) เช่นตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ (Flat Plate Solar Collector) และตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบรวมแสง (Focusing Solar Concentrator) เช่นตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบห่อรับแสงกลางตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบจานพาราโบลาและตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลา ตัวรวมรังสีอาทิตย์พาราโบลาแบบรวมแสง (Parabolic Solar Concentrator) ตัวรวมรังสีอาทิตย์พาราโบลาแบบรวมแสง (Parabolic Solar Concentrator) เป็นตัวรวมรังสีที่เพิ่มความเข้มข้นรังสีอาทิตย์ที่ตกลงบนพื้นผิวรับและสะท้อนรังสีอาทิตย์ได้มากกว่าหนึ่งเท่าของความเข้มข้นรังสีอาทิตย์ปกติทำให้อุณหภูมิของของไหลที่ใช้งานมีอุณหภูมิสูงทำได้โดยใช้วัสดุที่มีพื้นผิวรับและสะท้อนรังสีอาทิตย์ได้ดีมาขึ้นรูปเป็นจานหรือเป็นรางรวมรังสีอาทิตย์โดยแสงจะสะท้อนตกไปรวมกันที่ตัวดูดซับรับรังสีอาทิตย์ (Receiver หรือ Absorber) ซึ่งตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลาจะให้การรวมรังสีอาทิตย์แบบเส้น ส่วนตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบจานพาราโบลาจะให้การรวมรังสีอาทิตย์เป็นจุด สำหรับตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบรวมแสงเป็นเส้นจะทำความเข้มข้นรังสีอาทิตย์รวมที่ได้มีค่าประมาณ 230 เท่าของแสงอาทิตย์ปกติโดยอุณหภูมิของของไหลทำงานที่ผลิตได้มีค่าประมาณ 200-300 องศาเซลเซียสและสำหรับตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบรวมแสงเป็นจุดจะทำความเข้มข้นรังสีอาทิตย์รวมที่ได้มีค่าประมาณ 50,000 เท่าของแสงอาทิตย์ปกติโดยอุณหภูมิของของไหลทำงานที่ผลิตได้มีค่าประมาณ 500- 2,000 องศาเซลเซียส



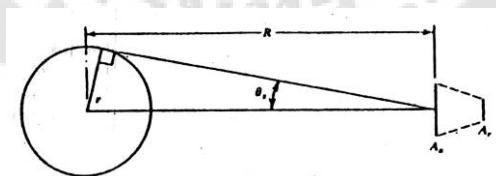
ภาพประกอบ 3 ตัวรวมรังสีอาทิตย์พาราโบลาแบบรวมแสง
ที่มา: www.climatetechwiki.org.

อัตราส่วนการรวมรังสี

เป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ของจานรับรังสีทั้งหมด (Aperture area) ต่อพื้นที่ของตัวดูดซับรังสี (Receiver area) ยิ่งพื้นที่ตัวดูดซับรังสียิ่งเล็กก็จะได้อัตราส่วนการรวมรังสีที่สูง
สมการอัตราส่วนการรวมรังสี คือ

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (2-5)$$

พิจารณาตัวรวมรังสีแบบจานกลม ซึ่งมีพื้นที่ช่องรับแสง A_a และพื้นที่ตัวรับรังสี A_r หันเข้าหาดวงอาทิตย์ซึ่งมีรัศมี r และห่างจากดวงอาทิตย์เป็นระยะ R ดังแสดงในดังภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 4 แผนภาพดวงอาทิตย์กับตัวรวมรังสีที่ T_s ระยะห่าง R จากตัวรวมรังสีมี Aperture A_a และ Receiver Area A_r

ที่มา: http://mte.kmutt.ac.th/elearning/Solar%20Energy/HTML/unit_04.htm.

โดย θ_s คือครึ่งมุม (Half-Angle) ที่รองรับดวงอาทิตย์ดังภาพประกอบ 4 แผนภาพของดวงอาทิตย์ที่อุณหภูมิ T_s และระยะห่าง R จากตัวรวมรังสีที่มีพื้นที่ช่องรับแสง A_a และพื้นที่ตัวรับรังสี A_r แม้ว่าดวงอาทิตย์จะไม่เป็นวัตถุดำ แต่เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ จะสมมติให้ดวงอาทิตย์เป็นวัตถุดำที่อุณหภูมิ T_s

$$Q_{s \rightarrow r} = A_a \frac{r^2}{R^2} \sigma T_s^4 \quad (2-6)$$

ตัวรับรังสีแบบสมบูรณ์ (เช่น วัตถุดำ) จะปลดปล่อยพลังงานออกมาเท่ากับ $A_r T_r^4$ และสัดส่วนพลังงาน E_{r-s} จะแผ่ไปยังดวงอาทิตย์

$$Q_{r \rightarrow s} = A_r \sigma T_r^4 E_{r-s} \quad (2-7)$$

เมื่อ T_r และ T_s มีค่าเท่ากัน จากกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ $Q_{s \rightarrow r}$ จะมีค่าเท่ากับ $Q_{r \rightarrow s}$ ดังนั้นจากสมการ (2-6) และ (2-7)

เขียนได้ว่า

$$\frac{A_a}{A_r} = \frac{R^2}{r^2} E_{r-s} \quad (2-8)$$

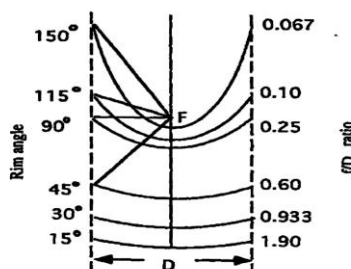
และเมื่อค่าสูงสุดของ E_{r-s} เท่ากับ 1 อัตราส่วนการรวมรังสีสูงสุดสำหรับตัวรวมรังสีแบบกลม คือ

$$\left(\frac{A_a}{A_r} \right)_{\text{circular,max}} = \frac{R^2}{r^2} = \frac{1}{\sin^2 \theta_s} \quad (2-9)$$

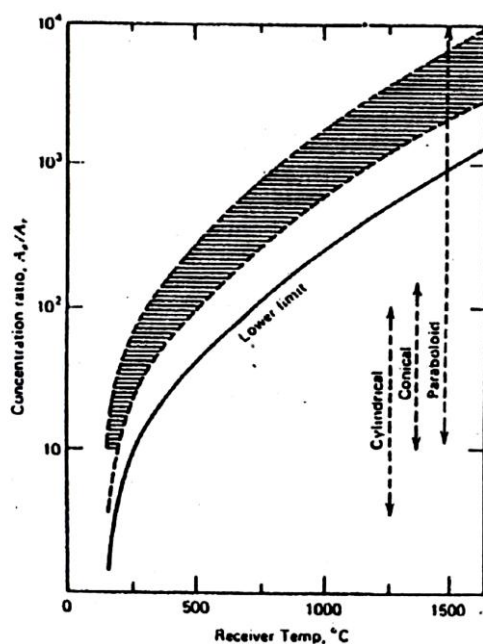
ในทำนองเดียวกัน ถ้าเป็นตัวรวมรังสีแบบเชิงเส้น จะได้

$$\left(\frac{A_a}{A_r} \right)_{\text{linear,max}} = \frac{1}{\sin \theta_s} \quad (2-10)$$

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีค่าอัตราส่วนการรวมรังสีสูงๆ มีความละเอียดเชิงแสงและมีระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่ดีจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้มีการถ่ายเทพลังงานเพิ่มขึ้น มุมที่ขอบจานพาราโบลาจะสัมพันธ์กับขนาดโฟกัสต่อเส้นผ่านศูนย์กลางดังภาพประกอบที่ 5 ภาพประกอบที่ 6 แสดงช่วงอัตราส่วนการรวมรังสีและชนิดของตัวรวมรังสีที่ให้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน



ภาพประกอบ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมที่ขอบจานพาราโบลา กับขนาดโฟกัสต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง
ที่มา: http://mte.kmutt.ac.th/elearning/Solar%20Energy/HTML/unit_04.htm.



ภาพประกอบ 6 แสดงอัตราส่วนการรวมรังสีและอุณหภูมิของตัวรับรังสีอาทิตย์
ที่มา: http://mte.kmutt.ac.th/elearning/Solar%20Energy/HTML/unit_04.htm.

2.2 ประสิทธิภาพทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรวมรังสี (Thermal Performance of Concentrating Collector)

การวิเคราะห์ทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรวมรังสีมีสมการที่เหมาะสมสำหรับแฟกเตอร์ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสี F สมประสิทธิภาพการสูญเสียความร้อน U_L และแฟกเตอร์การดึงความร้อนมาใช้ F_R ถ้าทราบค่า F_R และ U_L ตัวอย่างการคำนวณค่าสมประสิทธิภาพการสูญเสียความร้อน U_L จะประกอบด้วยเทอมของการพาและการแผ่รังสีจากผิวท่อและการนำความร้อนผ่านโครงสร้างของท่อ ดังสมการ

$$U_L = h_w + h_r + U_{\text{cond}} \quad (2-11)$$

สมประสิทธิภาพการแผ่รังสีความร้อนสามารถคำนวณได้จาก

$$h_r = 4\sigma\epsilon\bar{T}^3 \quad (2-12)$$

เมื่อ $\bar{T}$ เป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของการแผ่รังสี และ ϵ เป็นค่าการแผ่รังสีของผิวดูดกลืน สำหรับค่า U_L จะคิดบนพื้นที่ของตัวดูดกลืน A_r ดังนี้

$$U_L = \left[\frac{A_r}{(h_w + h_{r,c-a}) A_c} + \frac{1}{h_{r,r-c}} \right]^{-1} \quad (2-13)$$

และอุณหภูมิของท่อหุ้ม คือ

$$T_c = \frac{A_r h_{r,r-c} T_r + A_c (h_{r,c-a} + h_w) T_a}{A_r h_{r,r-c} + A_c (h_{r,c-a} + h_w)} \quad (2-14)$$

อุณหภูมิที่สามารถทำได้ของตัวรับรังสีแบบต่างๆ แสดงได้ดังตาราง 2 โดยจะพบว่าอัตราส่วนการรวมรังสี และอุณหภูมิแปรตามความสามารถในการเคลื่อนที่ของตัวรับรังสี

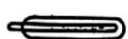
ตาราง 2 อุณหภูมิที่สามารถทำได้ของตัวรับรังสีแบบต่างๆ

Motion	Collector type	Absorber type	Concentration ratio	Temperature range (°C)
Stationary	Flat plate collector (FPC)	Flat	1	30-80
	Evacuated tube collector (ETC)	Flat	1	50-200
	Compound parabolic collector (CPC)	Tubular	1-5	60-240
Single-axis tracking	Compound parabolic collector (CPC)	Tubular	5-15	60-300
	Linear Fresnel reflector (LFR)	Tubular	10-40	60-250
	Parabolic trough collector (PTC)	Tubular	15-45	60-300
	Cylindrical trough collector (CTC)	Tubular	10-50	60-300
Two-axes tracking	Parabolic dish reflector (PDR)	Point	100-1000	100-500
	Heliostat field collector (HFC)	Point	100-1500	150-2000

ที่มา: จารุวัฒน์ เจริญจิต. (2555).

ในการปรับปรุงตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบต่างๆ เช่นเพิ่มอัตราส่วนการรวมรังสี (Concentration ratio) ให้รังสีรวมกันอยู่ในแนวท่อความร้อนหรือโฟกัสเป็นจุดรวมแสง เพื่อเพิ่มความเข้มของรังสีอาทิตย์ในพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนจะส่งผลให้อุณหภูมิของสารทำงานสูงขึ้นตามอัตราส่วนดังกล่าว และการติดตั้งระบบการติดตามดวงอาทิตย์แบบแกนเดียว E-W และแบบสองแกน E-W, N-S จะทำให้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์สามารถรวมแสงอาทิตย์ให้ตั้งฉากกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ได้ตลอดเวลา ไม่แปรเปลี่ยนตามมุมของดวงอาทิตย์ส่งผลให้อุณหภูมิของสารทำงานสูงขึ้นดังรายละเอียดในตาราง 3

ตาราง 3 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบต่าง ๆ อัตราส่วนการรวมรังสี และอุณหภูมิสูงสุดที่ได้

		Collector Type		Concentration Ratio, C1 for Direct Insolation	Indicative Temperature Obtained T (K)	
		Name	Schematic Diagram			
Motion	Stationary	Non-convecting Solar Pond		Flat Absorbers	$C \leq 1$	$300 < T < 360$
		Flat-plate Absorber			$C \leq 1$	$300 < T < 350$
		Evacuated Envelope			$C \leq 1$	$320 < T < 460$
	Solar Tracking	Single Axis	Compound Parabolic Reflector	Tubular Absorbers	$1 \leq C \leq 5$	$340 < T < 510$
			Parabolic Reflector		$5 \leq C \leq 15$	$340 < T < 560$
			Fresnel Refractor		$15 < C < 40$	$340 < T < 560$
		Cylindrical Refractor	$10 < C < 40$		$340 < T < 540$	
		Parabolic Dish Reflector	$10 < C < 50$		$340 < T < 540$	
		Spherical Bowl Reflector	$100 < C < 1000$		$340 < T < 1200$	
		Heliostat Field	$100 < C < 300$		$340 < T < 1000$	

ที่มา: จารุวัฒน์ เจริญจิต. (2555).

2.3 สมรรถนะเชิงแสงของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรวมรังสี

สมการสำหรับคำนวณค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกลืนต่อหน่วยพื้นที่ของช่องรับแสงที่ไม่ถูกเงาบัง (S) ดังนี้

$$S = I_b \rho (\gamma \tau \alpha)_n K_{\gamma \tau \alpha} \quad (2-15)$$

I_b คัดเฉพาะรังสีตรงอย่างเดียวสำหรับตัวรวมรังสีทั้งหมด ยกเว้นตัวรวมรังสีที่มีอัตราส่วนการรวมรังสีต่ำมาก (ประมาณ 10 หรือน้อยกว่า) ρ หมายถึงค่าการสะท้อนของตัวรวมรังสี

แฟกเตอร์การรับรังสี (Intercept Factor, γ) คือ สัดส่วนของรังสีอาทิตย์ที่สะท้อนออกไป ตัวอย่างหนึ่งของรูปแบบรังสีอาทิตย์ในระนาบรวมรังสีของตัวรวมรังสีแบบเชิงเส้นถ้าตัวรับรังสีขยายจาก A ไป B แฟกเตอร์การรับรังสีจะเป็น

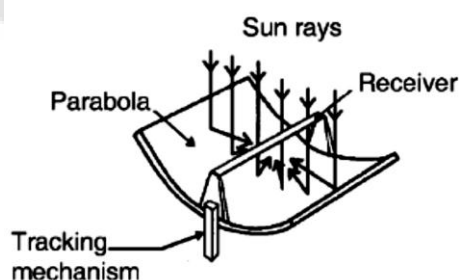
$$\gamma = \frac{\int_A^B I(y) dy}{\int_{-\infty}^{\infty} I(y) dy} \quad (2-16)$$

2.4 พื้นผิวรับและสะท้อนรังสีอาทิตย์

ในการสร้างตัวรวมรังสีสิ่งแรกที่จะต้องพิจารณาคือวัสดุที่จะใช้เป็นวัสดุสะท้อนรังสีพื้นผิวรับและสะท้อนรังสีอาทิตย์ของตัวรวมรังสีอาทิตย์พาราโบลาแบบรวมแสงจะต้องมีความสามารถในการรับรังสีอาทิตย์ได้ดีเพื่อจะสะท้อนรังสีอาทิตย์ไปรวมกันที่จุดโฟกัสบนตัวดูดซับรังสีอาทิตย์ได้ ดังนั้นจึงต้องใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติในการสะท้อนรังสีอาทิตย์ได้ดีมาเคลือบโดยส่วนใหญ่พื้นผิวที่สามารถสะท้อนรังสีอาทิตย์ได้ดีจะต้องเคลือบด้วยวัสดุผิวมันวาวน้ำหนักเบา ผิวสะท้อนแสงที่นำมาใช้ทดลองตามหน่วยงานต่างๆ ได้แก่ กระดาษเงาที่เคลือบด้วยโลหะเงิน (Back Silvered Glass) โดยมีค่าการสะท้อนแสงโดยตรงประมาณ 84-88% นอกจากนี้ยังมีกระดาษเงาที่สร้างสำหรับใช้สะท้อนแสงอาทิตย์โดยตรงอีก 2 ชนิดได้แก่ Laminated Glass Reflector และ White Glass Reflector ซึ่งให้ค่าการสะท้อนประมาณ 90 % และผิวสะท้อนแสงอื่นๆ เช่น Aluminized Teflon ค่าการสะท้อนประมาณ 80% ผิวสะท้อนส่วนใหญ่ควรเป็นกระดาษเงาหรือโลหะขัดมันตัวรวมรังสีอาทิตย์พาราโบลาแบบรวมแสงแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลา (Parabolic Trough Solar Concentrator) และตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบจานพาราโบลา (Parabolic Dish Solar Concentrator)

2.5 ตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลา

ตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลาเป็นตัวรวมรังสีอาทิตย์ที่เพิ่มความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกลงบนตัวดูดซับรังสีอาทิตย์ได้มากกว่าหนึ่งเท่าของความเข้มรังสีอาทิตย์ปกติทำให้อุณหภูมิของของไหลที่ใช้งานมีอุณหภูมิสูงทำได้โดยใช้วัสดุที่มีพื้นผิวสะท้อนรังสีอาทิตย์ได้ดีมาขึ้นรูปเป็นรางพาราโบลาแสงอาทิตย์จะตกกระทบและสะท้อนไปรวมกันที่ตัวดูดซับรังสีอาทิตย์ซึ่งจะได้ภาพสะท้อน (Image) บนตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลาดังแสดงในภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 7 ตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลา

ที่มา: <http://ec.europa.eu/research/energy/print.cfm?file.>

ตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลาจะทำให้ความเข้มรังสีอาทิตย์รวมที่ได้สูงประมาณ 230 เท่าของแสงอาทิตย์ปกติโดยอุณหภูมิของของไหลทำงานที่ผลิตได้มีค่าประมาณ 200 – 300 องศาเซลเซียส

2.6 ตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลา 1 ขั้นตอน

จานพาราโบลา (parabolic dish reflector) คืออุปกรณ์สะท้อน ที่ใช้สะสมหรือรวบรวมพลังงาน เช่น แสง เสียง หรือคลื่นวิทยุ รูปร่างของมันคล้ายกับพาราโบลอยด์กลม (circular paraboloid) จานสะท้อนแบบพาราโบลาสามารถมีรูปร่างเป็นคลื่นระนาบตามแนวแกน ไปจนถึงคลื่นทรงกลมที่ม้วนวนเข้าสู่จุดโฟกัสจานสะท้อนแบบพาราโบลาใช้ในการรวบรวมพลังงานจากที่ไกลๆ (เช่นคลื่นเสียง หรือแสงจากดาวฤกษ์) และนำพลังงานนั้นรวมเข้าไปสู่จุดโฟกัสเมื่อนำหลักการสะท้อนมาดำเนินกลับทาง จานสะท้อนแบบพาราโบลาก็อาจนำมาใช้ส่งพลังงานจากจุดกำเนิดที่อยู่ ที่โฟกัสและส่งออกเป็นลำพลังงานแบบขนานก็ได้เช่นสปอตไลท์ และ ไฟหน้าของรถยนต์ตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลาเป็นตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบรวมแสงเป็นจุดจะทำให้ความเข้มข้นที่ตัวรับแสงสูงประมาณ 50,000 เท่าของแสงอาทิตย์ปกติโดยอุณหภูมิของของไหลทำงานที่ผลิตได้มีค่าประมาณ 500 – 2,000 องศาเซลเซียสดังภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 ตัวรวมรังสีอาทิตย์จานพาราโบลา

ที่มา: <http://www.alibaba.com/product-detail/SolarBeam-Concentrator.>

ตัวเก็บรังสีแบบนี้มักจะมีรูปทรงเป็นจานพาราโบลาขนาดใหญ่โดยจะต้องมีระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกนเพื่อรักษาความเข้มของลำแสงให้อยู่ที่จุดโฟกัสตลอดเวลา ตัวดูดซับพลังงานหรือตัวรับ จะติดตั้งอยู่ที่จุดโฟกัสเพื่อเก็บพลังงานจากการแผ่รังสีเป็นพลังงานความร้อน สาเหตุที่ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากระบบของของไหลถ่ายเทความร้อนที่เชื่อมต่อกับตัวดูดซับพลังงานจากหลายจานเพื่อนำพลังงานความร้อนไปยังระบบผลิตไฟฟ้าที่ศูนย์กลาง การออกแบบทำให้ไม่สะดวกในการใช้งานต้องการท่อและระบบเครื่องสูบลูกทำงานที่อุณหภูมิสูงมาก และมีการสูญเสียความร้อนจากการขนถ่ายพลังงานได้ ระบบที่เหมาะสมในปัจจุบันคือใช้เครื่องยนต์ความร้อนติดตั้งที่ใกล้กับจุดโฟกัสของจานพาราโบลา เครื่องยนต์ความร้อนจะดูดซับพลังงานความร้อนจากตัวดูดซับรังสีและนำพลังงานมาผลิตพลังงานกลโดยจะติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อแปลงเป็นกระแสไฟฟ้าอีกต่อหนึ่ง ความร้อน

ทั้งของระบบจะปล่อยความร้อนส่วนเกินออกจากระบบ ต้องมีระบบควบคุมที่เหมาะสมกับการทำงานของเครื่องยนต์ความร้อน ข้อดีของการออกแบบนี้คือ ตัวสะท้อนรังสี ตัวเก็บรังสีและเครื่องยนต์จะสามารถทำงานเป็นหน่วยย่อยที่อิสระหรืออาจใช้เชื้อเพลิงแบบผสมก็ได้แต่ไม่สามารถใช้กับวิธีการเก็บสะสมความร้อนได้

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงมักจะถูกนำมาใช้กับจานพาราโบลาแม้ว่าเครื่องยนต์กังหันแก๊สสามารถนำมาใช้(วัฏจักรเบรย์ตัน) หรือวัฏจักรร่วมแรงคิน-เบรย์ตัน สมรรถนะเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจะดีที่อุณหภูมิต่ำกว่า 950 °C ที่อัตราส่วนการรวมรังสีสูงๆตัวเก็บรังสีแบบจานพาราโบลาจะมีความสามารถที่ดีในการรวมพลังงานเพื่อใช้กับโฟโตโวลตาอิกด้วยโดยใช้เซลล์โฟโตโวลตาอิกที่มีสมรรถนะสูงๆโดยจะได้ 100 เท่าของรังสีอาทิตย์ได้ค่าฟลักซ์รังสีที่สูงรวมอยู่ที่จุดโฟกัสที่พื้นที่เล็กๆ เซลล์จะผลิตพลังงานเพียงพอเหมาะสมกับการลงทุน

จากการวิเคราะห์ตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบพาราโบลาเชิงเส้นสองมิตินี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับตัวรวมรังสีอาทิตย์ที่มีตัวสะท้อนแสงเป็นแบบพาราโบลาสามมิติ (Paraboloid) มุมขอบ ϕ_r และรัศมีความโค้ง r เหมือนกับการณตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบเชิงเส้นการกระจายของแสงที่เกิดขึ้นในตัวรวมรังสีอาทิตย์ทรงพาราโบลาสามารถนำมาใช้ได้โดยปราศจากความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของตัวรวมรังสีอาทิตย์ สำหรับตัวรับรังสีทรงกลม (ยอมให้มีผลของการเกิดเงาที่น้อยที่สุด) จะได้

$$C_{\max} = \frac{\sin^2 \phi_r}{4 \sin^2(0.267 + \frac{\phi_r}{2})} - 1 \quad (2-17)$$

สำหรับตัวรับรังสีแบบแผ่นราบ

$$C_{\max} = \frac{\sin^2 \phi_r \cos^2(\phi_r + 0.267 + \frac{\phi_r}{2})}{4 \sin^2(0.267 + \frac{\phi_r}{2})} - 1 \quad (2-18)$$

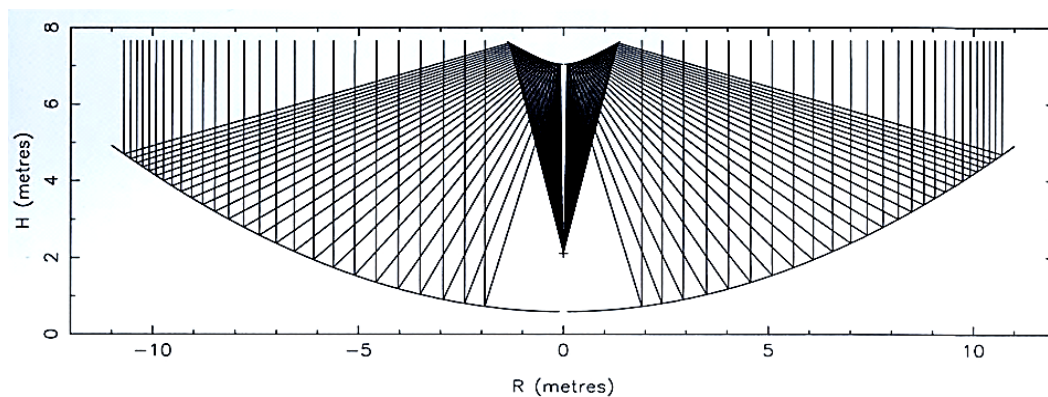
พลังงานที่ดูดกลืนสำหรับตัวรวมรังสีอาทิตย์ทรงพาราโบลาขึ้นกับสมบัติเช่นเดียวกับตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบพาราโบลาเชิงเส้นและกรณีพื้นที่ช่องรับแสงที่ไม่ถูกเงาบัง คือ

$$S = I_{b,a} \rho(\gamma\alpha)_n K_{\gamma\alpha} \quad (2-19)$$

2.7 ตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลา 2 ขั้นตอน

ประกอบด้วยตัวรวมแสงปฐมภูมิมีลักษณะเป็นจานรูปทรง Parabolic ที่มีจุดศูนย์กลางรวมแสงเพื่อสะท้อนพลังงานแสงอาทิตย์ไปยังตัวรวมรังสีขั้นที่ 2 ซึ่งมีรูปทรงเป็นไฮเปอร์โบลาหรือเอลลิปส์แล้วสะท้อนกลับไปให้ตัวรับความร้อนเช่นเครื่องยนต์สเตอร์ลิง Parabolic dishes จะใช้แผง

สะท้อนที่มีลักษณะโค้งเป็นจำนวนมากซึ่งทำด้วยวัสดุผิวมันวาวหรือฟิล์มบาง (Laminated film) ตัวรวมแสงเหล่านี้จะตั้งอยู่บนโครงสร้างซึ่งใช้ระบบหมุนตามดวงอาทิตย์สองแกน (Two-axis tracking system) เพื่อรวมแสงให้เป็นจุดเดียวไปรวมอยู่ที่ตัวรวมรังสีขั้นที่สองแล้วสะท้อนกลับไปที่ตัวรับ ความร้อนความร้อนที่ได้สามารถใช้ประโยชน์ได้โดยตรงกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงซึ่งติดตั้งอยู่บนตัวรับ ความร้อนหรือนำความร้อนที่ได้ไปทำให้อ่างความร้อนก่อนแล้วนำไปใช้กับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงระบบ ตัวรวมความร้อนแบบเน้นเป็นจุดศูนย์กลางจึงมีประสิทธิภาพการแปลงเป็นความร้อนได้สูงกว่าชนิด ขั้นตอนเดียวเนื่องจากสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิที่สูงกว่าโดยมีรูปทรงดังภาพประกอบ 9



ภาพประกอบ 9 รูปทรงของตัวรวมรังสีแบบพาราโบลา-ไฮเปอร์โบลาสำหรับตัวรวมรังสีแบบสอง ขั้นตอน

ที่มา: <http://www.alibaba.com/product-detail/SolarBeam-Concentrator.>

ค่าอัตราส่วนความเข้มรังสีสำหรับตัวรวมรังสีขั้นตอนที่หนึ่ง

$$C_{1,\max} = \frac{\cos^2 \theta \sin^2 \theta}{\sin^2(\theta_i)} \quad (2-20)$$

ค่าอัตราส่วนความเข้มรังสีสำหรับตัวรวมรังสีขั้นตอนที่สอง

$$C_{2,\max} = \frac{n^2}{\sin^2(\theta_i)} \quad (2-21)$$

เมื่อ θ เป็นมุมที่ขอบของจานพาราโบลาดังนั้นจะได้

$$C_{2\text{-stage},\max} = C_1 \cdot C_2 = \frac{n^2 \cos 2\theta}{\sin^2(\theta_i)} \quad (2-22)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างจุดโฟกัสกับเส้นผ่านศูนย์กลางของจานพาราโบลา และมุมที่ขอบ θ มีดังนี้

อัตราส่วนโฟกัส
$$f = \frac{F}{D}$$

มุมที่ขอบของจานพาราโบลา

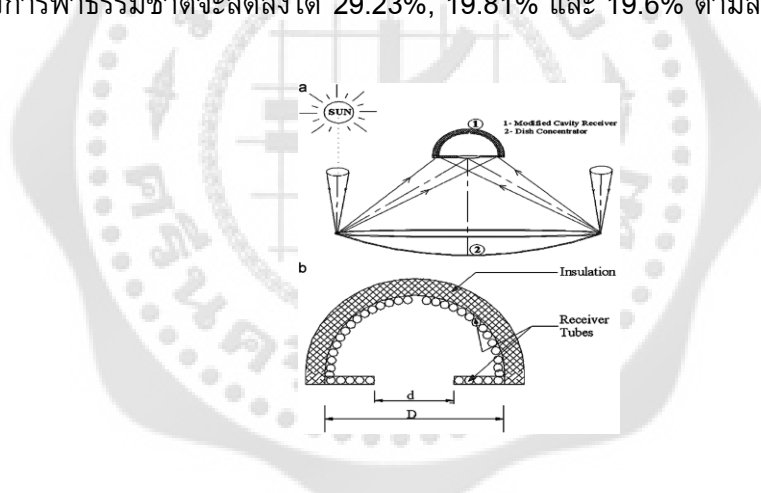
$$\theta = \tan^{-1} 1 / \left(\frac{1}{2f} - \frac{1}{8f} \right) \quad (2-23)$$

จานพาราโบลาปฐมภูมิมีอัตราส่วนโฟกัส $F/D > 1$ ในกรณีที่ตัวรวมรังสีขั้นทุติยภูมิได้รับตัวประกอบความเข้มสูง ตัวรวมรังสี 2 ชั้นตอนนี้สามารถทำได้สูงเกิน 80-90% ของขีดจำกัดทางอุณหพลศาสตร์

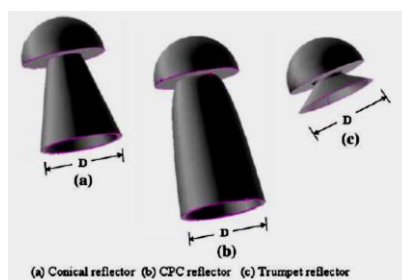
2.8 เทคโนโลยีการใช้ตัวรวมรังสีแบบสองชั้นตอนในปัจจุบัน

พลังงานจากแสงอาทิตย์สามารถเก็บและปลดปล่อยได้โดยอุปกรณ์ที่เรียกว่าตัวรวมรังสีอาทิตย์ หลักการของอุปกรณ์นี้เป็นหน่วยเก็บสะสมเชิงแสงซึ่งเก็บพลังงานจากการแผ่รังสีอาทิตย์และรวบรวมกำลังไปที่พื้นที่เล็กๆซึ่งนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายอาทิเช่น การส่องสว่างในที่ร่มผ่านไปยังใยแก้วนำแสง ระบบผสมผสานการประยุกต์โฟโตโวลตาอิกกับความร้อน การประยุกต์ใช้งานอื่นๆในโฟโตโวลตาอิกกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยจะช่วยลดค่าใช้จ่ายของเซลล์สุริยะที่มีราคาแพง อุปกรณ์เหล่านี้ได้ถูกศึกษา พัฒนาและหาค่าที่เหมาะสม ในการปรับปรุงประสิทธิภาพทำให้มีขนาดกะทัดรัด และง่ายในการสร้าง การใช้รูปทรงในเชิงแสง รูปทรงของกระจกเงาสองชั้นตอนได้ถูกออกแบบเพื่อให้ได้ผลที่ต้องการ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีรูปทรงแบบกล้องโทรทรรศน์แคซิเกรนได้ถูกศึกษาการเก็บพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อนำไปใช้ในการเก็บพลังงานในระบบเคมีสำหรับตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบสองชั้นตอนได้ถูกออกแบบให้มีสมรรถนะสูงในการเก็บรังสีโดยใช้เทคนิคการออกแบบเชิงแสง และหาค่าที่เหมาะสมสำหรับความเข้มรังสีที่สูงที่สุดที่จุดเดียวกับประสิทธิภาพที่สูงของตัวรวมรังสี จากงานวิจัยของมาริโซและคณะ (Marizzo; et al. 2010) ได้ทำการดัดแปลงกล้องโทรทรรศน์แบบแคซิเกรนโดยเปลี่ยนกระจกเงาชั้นตอนที่สองเป็นรูปทรงไฮเปอร์โบลา ซึ่งทำให้เกิดช่องว่างขนาดใหญ่ระหว่างกระจกเงาชั้นตอนที่สองกับตัวดูดซับพลังงานและจำกัดมุมขาออกเพื่อให้ประสิทธิภาพสูงตัวรวมรังสีที่มีผิวสะท้อนรังสีทรงกลมสองอันได้ถูกหาค่าที่เหมาะสมเพื่อให้ได้อัตราส่วนการรวมรังสีที่สูง จากงานวิจัยของมาริโซและคณะ ได้ศึกษาตัวรวมรังสีสองชั้นตอนขนาดเล็กเพื่อให้ได้ค่าอัตราส่วนการรวมรังสีสูงสุดที่เป็นไปได้ในกรณีที่ยังมีความคลาดเคลื่อนในเชิงแสงของตัวรวมรังสีที่ยังคงมีอยู่ การผสมผสานที่ดีที่สุดระหว่างกระจกเงาคือพาราโบลาและอิลิปส์โดยทั่วไปพบว่ารูปทรงของตัวรวมรังสีสองชั้นตอนจะเป็นพื้นฐานในการพัฒนาโมดูลที่มีประสิทธิภาพสูง ประสิทธิภาพของระบบประกอบด้วยหน่วยย่อยหลายหน่วยที่ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นได้แก่หน่วยย่อยทรงสี่เหลี่ยมที่ลดการสูญเสียในการประกอบ การใช้รูปทรงนี้ได้ถูกประเมินการรวมรังสีโฟโตโวลตาอิกขั้นสูง การออกแบบใช้พื้นฐานของระบบจานพาราโบลา หน่วยเก็บรังสีเป็นจานพาราโบลาขนาดเล็กซึ่งรวมรังสีอาทิตย์ไปยังเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งใช้ควบคู่กับเซลล์สุริยะ การหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบเชิงแสงของหน่วยเก็บรังสีที่มีขนาดใหญ่ขึ้นโดยประกอบด้วยกระจกเงาทรงสี่เหลี่ยมสองบาน การออกแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ได้เซตค่าพารามิเตอร์

4 ตัวแปร และโมดูลนี้ได้หาค่าที่เหมาะสมโดยใช้โปรแกรมซีแมกซ์ คุณภาพเชิงแสงในการออกแบบขั้นสุดท้าย ถูกประเมินโดยแผนผังแบบจุด โดยจำแนกโดยมุมมอง รูปทรงนี้ทำให้ได้ค่าตัวประกอบในการเติมและทำให้การสร้างความเย็นยิ่งยวด โครงสร้างที่ลดการรวมระหว่างขอบรอยต่อ ยิ่งไปกว่านั้นผลที่ได้ตามมาคือการลดน้ำหนักอุปกรณ์ทำให้ต้องการพลังงานน้อยที่ใช้ในการขับเคลื่อนระบบติดตามดวงอาทิตย์เรดดีและคูร์มา (K.S.Reddy,N.S.Kumar., 2008). ได้เสนอการรวมการสูญเสียความร้อนทั้งการพาความร้อนในการไหลแบบราบเรียบและการแผ่รังสีที่ผิวจากตัวดูดซับพลังงานได้ถูกคำนวณจากแบบจำลอง ช่องของตัวรับพลังงานดังภาพประกอบที่ 10 มีรูปครึ่งวงกลมโดยมีพื้นที่รับรังสีขนาดเล็กที่จุดโฟกัสของจาน ตัวรับพลังงานจะกลวง (มีช่องอากาศ) และผิวด้านในปูด้วยท่อดูดซับพลังงาน (ท่อทำจากวัสดุฉนวน) และได้ตีพิมพ์ผลงานอื่นอีกคือการวิเคราะห์เชิงตัวเลขในปี 2009 (K.Reddy, N.Sendhil Kumar., 2009). โดยแบบจำลอง 3 มิติ ถูกใช้ประเมินการสูญเสียความร้อนจากตัวรับรังสีที่มุมเอียงของจานต่างๆกันและที่อุณหภูมิทำงานในหลายๆค่า แบบจำลองจะใช้ประเมินความร้อนสูญเสียที่ลดลงผ่านตัวรวมรังสีขั้นตอนที่สองในระบบ เช่นตัวเก็บรังสีแบบกรวย CPC และแบบ Trumpet ซึ่งใช้เปรียบเทียบกันในการเป็นตัวรวมรังสีขั้นตอนที่สองโดยการสูญเสียความร้อนแบบการพาธรรมชาติจะลดลงได้ 29.23%, 19.81% และ 19.6% ตามลำดับ



ภาพประกอบ 10 การดัดแปลงช่องของตัวรับพลังงานสำหรับจานพาราโบลา
ที่มา: K.S.Reddy, N.S.Kumar. (2008).



ภาพประกอบ 11 ตัวรวมรังสีขั้นตอนที่สองใน 3 รูปแบบ
ที่มา: K.Reddy, N.Sendhil Kumar. (2009).

2.9 การวิเคราะห์ตัวรวมรังสีอาทิตย์โดยวิธีเส้นแนวรังสีอาทิตย์

การวิเคราะห์โดยวิธีเส้นแนวรังสีอาทิตย์ (Ray-Trace Methods) เป็นกระบวนการตามแนวรังสีอาทิตย์ของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบจำนวนมากที่ผ่านระบบเชิงแสง (เซตของผิวการหักเหและการสะท้อน) เพื่อหากระบวนการกระจายตัวของรังสีอาทิตย์บนผิวที่พิจารณา เส้นแนวรังสีอาทิตย์ในระบบตัวรวมรังสีอาทิตย์มีลักษณะเป็นเวกเตอร์ สำหรับผิวสะท้อนจะต้องหาทิศทางและจุดตัดของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบกับผิวสะท้อน การตั้งฉากของรังสีอาทิตย์กับผิวสามารถหาได้จากรูปทรงและทิศทางของรังสีสะท้อนตามหลักการที่ว่ามุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน

การปรับปรุงมุมตกกระทบและการสมดุลพลังงาน

Gaul & Rabi (1980) ได้แสดงตัวอย่างของการวัดมุมตกกระทบที่ได้ปรับปรุงแล้วซึ่งเป็นฟังก์ชันของ θ Rabi (1985) ได้ให้ตัวอย่างค่าการปรับแก้ผลกระทบจากปลาย (End Effect Correction) สำหรับตัวรับรังสีที่มีความยาว l เท่ากับความยาวของตัวสะท้อนแสงแบบสมมาตร

$$\kappa(\theta) = 1 - \frac{f}{l} \left(1 + \frac{a^2}{48f^2} \right) \tan \theta \quad (2-24)$$

$$K(\theta) = 1 - 6.74 \times 10^{-5} \theta^2 + 1.64 \times 10^{-6} \theta^3 - 2.51 \times 10^{-8} \theta^4 \quad (2-25)$$

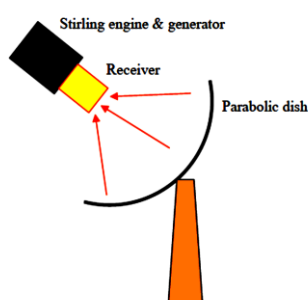
ตัวรวมรังสีทั้ง 3 แบบที่ถูกใช้ในปัจจุบันเพื่อเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อน ได้แก่ตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลา รางพาราโบลา และหอคอยรวมแสง 2 แบบแรกจะทำอุณหภูมิได้ระหว่าง 350-400 °C แบบหอคอยรวมแสงจะทำได้สูงกว่า 1000 °C ซึ่งต้องใช้อุปกรณ์การควบคุมกระจกเงาด้วยคอมพิวเตอร์ ทำให้มีราคาสูงที่สุดในจำนวน 3 ระบบ

ในปัจจุบันมีการออกแบบตัวรวมรังสี 2 ขั้นตอน ซึ่งได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้ได้ความร้อนและการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ดีขึ้นในบางครั้งก็ถึงขีดจำกัดทางเทอร์โมไดนามิกส์ บางครั้งก็ใช้กระจกเงาทรงพาราโบลารวมรังสีอาทิตย์กับอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งแบบนี้จะได้ค่าความเข้มรังสีที่บริเวณจุดโฟกัสที่สูงขึ้น บริษัทลูเนนเบิร์ก โนวา สโกเทีย ได้ออกแบบรูปทรงเรขาคณิตของตัวรวมรังสีเพื่อใช้ในการหลอมละลายโลหะในเตาหลอมเพื่อลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล โดยได้รับสิทธิบัตรสำหรับรูปทรงแบบใหม่นี้ ระบบจะมีความเหมาะสมทำอุณหภูมิได้สูงกว่า 1000 °C

โดยความเรียบง่ายรังสีอาทิตย์จะรวมไปใกล้กับพื้นเพื่อใช้หลอมโลหะ ในปี 2008 ได้ว่าจ้างห้องปฏิบัติการวิศวกรรมความร้อนหลายสถานะ (LAMTE) วิเคราะห์ความร้อน โครงสร้าง และลักษณะเชิงแสงของตัวรวมรังสีที่สร้างขึ้น วิธีเส้นแนวรังสีอาทิตย์ถูกใช้เป็นเครื่องมือสำหรับศึกษาตัวรวมรังสีอาทิตย์ ซึ่งถูกใช้กับตัวรวมแสงแบบวางอยู่กับที่ และตัวรวมแสงแบบพาราโบลา และกระจกเงาไฮเปอร์โบลา อย่างไรก็ตามวิธีเส้นแนวรังสีอาทิตย์ก็ยังไม่ถูกใช้ศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงสำหรับตัวรวมรังสีแบบสองขั้นตอน

2.10 การประยุกต์ใช้งานตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลา

การใช้ตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบจานพาราโบลาร่วมกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงในอดีตที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาระบบผลิตไฟฟ้าแบบจานพาราโบลาร่วมกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงหลายระบบ อย่างไรก็ตามลักษณะการทำงานและองค์ประกอบของระบบดังกล่าวก็มีลักษณะคล้ายคลึงกัน กล่าวคือระบบจะประกอบด้วยตัวสะท้อนรังสีดวงอาทิตย์แบบจานพาราโบลาซึ่งมีระบบขับเคลื่อนตามดวงอาทิตย์แบบ 2 แกนตัวรับรังสี (Receiver) และเครื่องยนต์สเตอร์ลิงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งติดตั้งที่จุดโฟกัสของจานพาราโบลาดังแผนภูมิในดั่งภาพประกอบ 12



ภาพประกอบ 12 แผนภูมิแสดงระบบผลิตไฟฟ้าแบบจานพาราโบลาร่วมกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง
ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน และ
ห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. (2549).

เมื่อรังสีดวงอาทิตย์ตกกระทบบนตัวสะท้อนรังสีแบบจานพาราโบลาก็จะถูกสะท้อนไปรวมกันที่ตัวรับรังสีที่จุดโฟกัสและการถ่ายเทความร้อนให้กับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงความร้อนที่ได้จะไปขับเคลื่อนเครื่องยนต์สเตอร์ลิงให้ทำงานเพื่อให้กำลังกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงพลังแสงอาทิตย์คือระบบที่ประกอบด้วยเครื่องยนต์สเตอร์ลิงกับตัวรวมรังสีอาทิตย์ การทำให้ตัวรวมรังสีอาทิตย์ป้อนความร้อนเข้าที่ฝากระบอกสูบเคลื่อนย้ายโดยตรงจะทำให้ได้ระบบที่มีความซับซ้อนน้อยที่สุด เครื่องยนต์สเตอร์ลิงพลังแสงอาทิตย์แสดงอยู่ดังภาพประกอบ 13



ภาพประกอบ 13 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงพลังแสงอาทิตย์ของ John Ericsson
ที่มา: Rizzo, J.G. (1997).

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงพลังแสงอาทิตย์เครื่องแรกที่ประดิษฐ์ขึ้นโดย John Ericsson ในปี ค.ศ. 1864 ดังภาพประกอบ 13 รังสีอาทิตย์ที่เข้ามาสู่ตัวรวมรังสีอาทิตย์จะสะท้อนพุ่งไปรวมกันที่กระบอกสูบเคลื่อนย้าย ความร้อนที่ได้จากการรวมรังสีจะถ่ายเทเข้าไปสู่สารทำงาน เกิดการทำงานตามวัฏจักรสเตอร์ลิงดังที่กล่าวมาแล้ว

การผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลาที่ทำงานร่วมกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงดังภาพประกอบ 14 ระบบผลิตไฟฟ้าแบบนี้จะใช้หลักการแปลงพลังงานจากรังสีดวงอาทิตย์ให้เป็นความร้อน แล้วแปลงพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานกลเพื่อนำไปผลิตไฟฟ้า โดยระบบประกอบด้วยจานรวมแสงแบบพาราโบลาและเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (Stirling Engine) กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยตัวรวมแสงแบบจานพาราโบลาอาจมีผิวสะท้อนเป็นผิวต่อเนื่องหรือประกอบด้วยแผ่นสะท้อนแสงหลายชั้น ซึ่งประกอบกันเป็นผิวโครงพาราโบลาและมีเครื่องยนต์สเตอร์ลิงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าวางอยู่ที่จุดโฟกัสของจานพาราโบลาโดยจานดังกล่าวต้องมีระบบขับเคลื่อนแบบ 2 แกน ตามดวงอาทิตย์ตลอดเวลาทั้งวัน โดยทั่วไประบบจานพาราโบลาร่วมกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง 1 ชุด จะมีกำลังการผลิต 25-40 kW แต่ละชุดสามารถทำงานโดยอิสระ ถ้าต้องการกำลังไฟฟ้ามกก็ติดตั้งจำนวนหลายชุดคล้ายกับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์สุริยะ

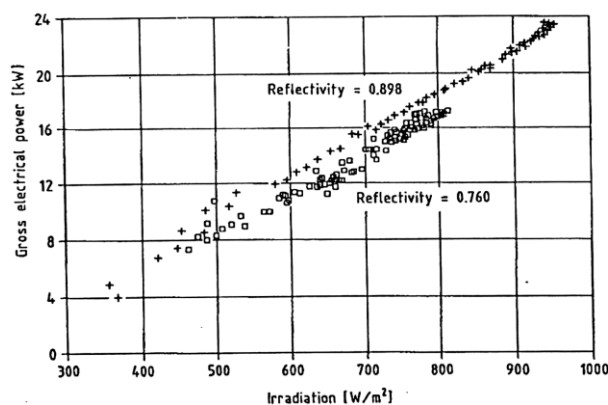


ภาพประกอบ 14 หลักการทำงานระบบผลิตไฟฟ้าแบบจานพาราโบลาร่วมกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง
ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน และ
ห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. (2549).

2.11 เทคโนโลยีของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงพลังงานแสงอาทิตย์ในต่างประเทศ

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ Vanguard 1 ระบบผลิตไฟฟ้านี้ตั้งอยู่ที่เมือง Rancho Mirage รัฐแคลิฟอร์เนียประเทศสหรัฐอเมริกาเริ่มใช้งานเมื่อปี ค.ศ. 1984 โดยประกอบด้วยจานพาราโบลาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.7 เมตรมีพื้นที่รับแสง 86.7 ตารางเมตร และที่โฟกัสติดตั้งเครื่องยนต์สเตอร์ลิงและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระบบผลิตไฟฟ้านี้มีกำลังการผลิต 25 kWe โดยได้ดำเนินการทดสอบใช้งานในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ ค.ศ. 1984 จนถึงเดือนมิถุนายน ค.ศ.

1985 ผลการทดสอบพบว่าโรงไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูงถึง 30% ซึ่งสูงที่สุดในบรรดาโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งหมดสมรรถนะของโรงไฟฟ้างดกล่าวแสดงไว้ในภาพประกอบ 15



ภาพประกอบ 15 สมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ Vanguard 1

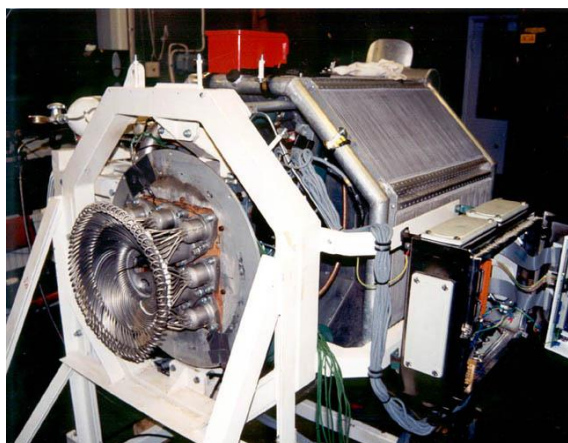
ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน และห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. (2549).

ระบบผลิตไฟฟ้าแบบจานพาราโบลาที่พัฒนาโดยบริษัท Boeing และ Stirling Energy System (SES) ระบบผลิตไฟฟ้านี้จําแนกสะท้อนแสงแต่ละชุดประกอบด้วยแผ่นสะท้อนแสงย่อยๆ 82 แผ่นมีพื้นที่รวมประมาณ 87.7 m^2 ทำด้วยกระจกหนา 0.7 mm ซึ่งมีสัมประสิทธิ์การสะท้อน 0.91 มีระบบควบคุมการหมุนของจานตามดวงอาทิตย์แบบอัตโนมัติใช้เครื่องยนต์สเตอลิง Kockums 4 - 95 แบบ 4 สูบทำงานที่อุณหภูมิ 720°C ระบบดังกล่าวให้กำลังไฟฟ้า 25 kW ที่ความเข้มรังสีตรง 1000 W/m^2 โดยมีประสิทธิภาพสูงสุด 29.4% ลักษณะของระบบแสดงดังภาพประกอบ 16-17



ภาพประกอบ 16 แสดงระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งพัฒนาโดย Boeing/SES

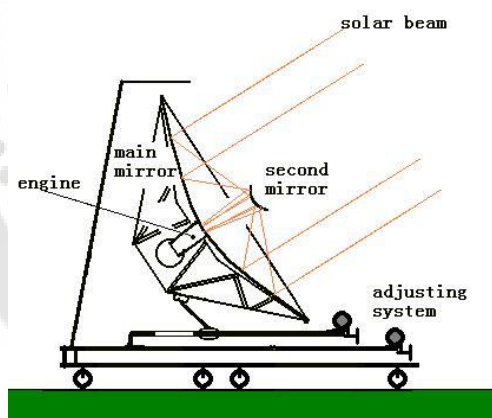
ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน และห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. (2549).



ภาพประกอบ 17 แสดงภาพเครื่องยนต์สเตอร์ลิง Kockums 4-95

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน และห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. (2549).

ในกรณีที่ต้องการอุณหภูมิสูงมากจะการใช้การรวมรังสีสองครั้ง (Two-stage concentration) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 18



ภาพประกอบ 18 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงพลังแสงอาทิตย์ที่ใช้การรวมรังสีสองครั้ง
ที่มา: Rizzo, J.G. (1997).

2.12 ระบบติดตามดวงอาทิตย์และระบบควบคุม

ระบบติดตามดวงอาทิตย์และระบบควบคุม (Solar Tracking and Control System) เนื่องประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงพลังงานแสงอาทิตย์ รังสีตกกระทบหรือความเข้มรังสีตรงของดวงอาทิตย์มีความสำคัญมาก ดังนั้น การทำให้จานพาราโบลา เคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์เพื่อรวมรังสีอาทิตย์ที่มีความเข้มสูงจึงเป็นเรื่องที่มีความสำคัญและสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าได้มากกว่า 25-45% ซึ่งขึ้นอยู่กับช่วงเวลาและฤดูกาล

โครงสร้างทางกลของระบบติดตามดวงอาทิตย์ หมายถึงอุปกรณ์ที่ประกอบขึ้นเป็นระบบของเครื่องติดตามดวงอาทิตย์ประกอบไปด้วยส่วนเคลื่อนที่แนวอัลติจูดและแนวอะซิมุทที่มีรายละเอียดดังภาพประกอบ 19



ภาพประกอบ 19 ส่วนเคลื่อนที่แนวอัลติจูดและแนวอะซิมุท

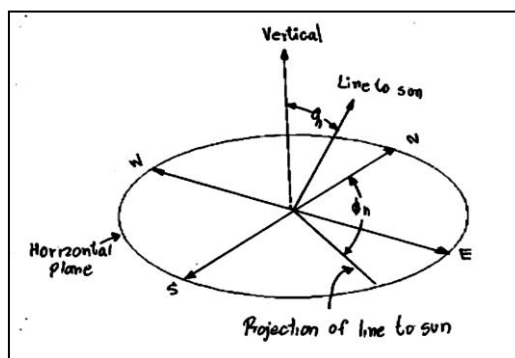
ที่มา: <http://archive.azcentral.com/business/articles/20120405bankrupt>.

2.12.1 ส่วนเคลื่อนที่แนวอัลติจูด ประกอบไปด้วยตั้บลูกปืนพร้อมแกนหมุนโดยมีเหล็กพับฉากสำหรับติดตั้งตัวเซ็นเซอร์ตำแหน่งของดวงอาทิตย์และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ใช้มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนโดยมีฟันเฟืองอัตราทด ใส่ที่แกนหมุนและเพลลาของมอเตอร์ เพื่อควบคุมแกนของอะติจูด สามารถเอียงได้ 0-180 องศา

2.12.2 ส่วนเคลื่อนที่แนวอะซิมุท ประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นท่อโลหะกลมใส่ตั้บลูกปืนที่หัว-ท้ายพร้อมแกนหมุนใช้มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนโดยมีฟันเฟืองอัตราทดใส่ที่แกนหมุนและเพลลาของมอเตอร์ทำงานโดยเป็นตัวควบคุม มอเตอร์โดยมอเตอร์ควบคุมแกนของมุมอะซิมุทซึ่งสามารถหมุนรอบตัวเองได้ถึง 360 องศา นอกจากนั้นแล้ว แผงวงจรนี้เป็นตัวควบคุมการจ่ายไฟให้กับมอเตอร์

2.13 ตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนระนาบแนวนอน

ณ จุดใด ๆ บนโลกและ ณ เวลาใด ๆ ก็ตาม เส้นจะลากไปยังศูนย์กลางของดวงอาทิตย์ ดังภาพประกอบ 20 บนเส้นนี้อาจจะระบุได้กับมุมของครึ่งซีกโลก (θ_h, ϕ_h) ซึ่ง θ_h = มุมระหว่างเส้นที่ดวงอาทิตย์กับเส้นแนวตั้ง และ ϕ_h = มุมระหว่างโปรเจกชันของเส้นที่ลากไปยังดวงอาทิตย์ในระนาบแนวนอนกับเส้นที่ลากไปยังระนาบแนวนอน



ภาพประกอบ 20 แสดงตำแหน่งของดวงอาทิตย์ในระนาบแนวนอน
ที่มา: กฤตภาส เกษรา ณ อยุธยา และคณะ (2552).

จากตำแหน่งของจุด ๆ หนึ่งบนโลกที่ใช้ในการมองดวงอาทิตย์ที่ปรากฏบนท้องฟ้าทำให้สามารถสังเกตการโคจรของดวงอาทิตย์รอบโลกบนระนาบในแนวระดับได้ ระบบนี้เรียกว่า Ptolemaic system ในงานด้านพลังแสงอาทิตย์มักจะจำเป็นต้องคำนวณหาตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้าเทียบกับผู้สังเกตการณ์ ซึ่งจะหาได้ดังต่อไปนี้

2.13.1 มุมระหว่างดวงอาทิตย์กับโลก

มุมพื้นฐานที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดวงอาทิตย์กับโลกมีอยู่ 3 มุม คือ

L เป็นเส้นรุ้ง (Latitude) ของตำแหน่งสังเกตการณ์ ใช้เส้นศูนย์สูตร (Equator) เป็นเส้นแบ่ง ทางซีกโลกเหนือมีค่าเป็นบวก ทางซีกโลกใต้มีค่าเป็นลบ ดังนั้น $-90^{\circ} \leq L \leq 90^{\circ}$

δ เป็น Declination angle มุมนี้แสดงตำแหน่งเชิงมุมของดวงอาทิตย์ที่เวลาเที่ยงสุริยะ (Solar noon) เมื่อเทียบกับระนาบของเส้นศูนย์สูตร ดังนั้น $-23.45^{\circ} \leq \delta \leq 23.45^{\circ}$

ω เป็นมุมชั่วโมง (Hour angle) คือการเคลื่อนที่เชิงมุมของดวงอาทิตย์ ไปทางตะวันออกหรือทางตะวันตกของเส้นแนวเหนือ-ใต้ (Meridian) ที่จุดสังเกตการณ์ เนื่องจากการหมุนของโลกในอัตรา 360° ต่อ 24 ชั่วโมง หรือ 15° ต่อชั่วโมง ช่วงเช้ามีค่าเป็นลบ ช่วงบ่ายมีค่าเป็นบวก

มุม Declination angle จะคำนวณได้จาก

$$\delta = 23.45 \sin \left(365 \times \frac{248+n}{365} \right) \quad (2-26)$$

เมื่อ n = เป็นวันที่ของปี ($0 \leq n \leq 365$)

ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสุริยะเหล่านี้แสดงไว้ในภาพประกอบ 21

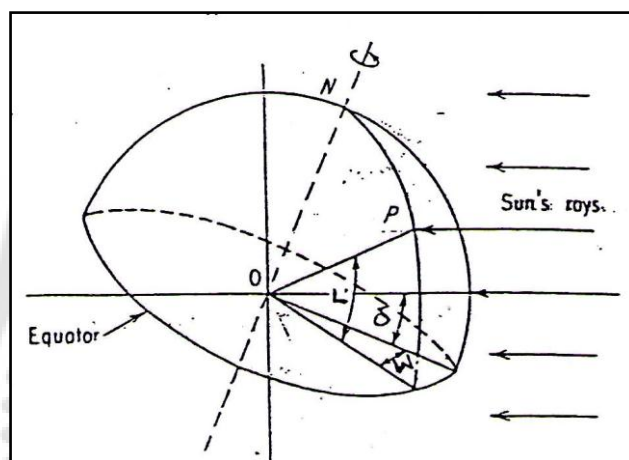
2.13.2 มุมสุริยะ (Solar Angles)

มุมต่อไปนี้เป็นความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้ากับผู้สังเกตการณ์ที่ตำแหน่ง

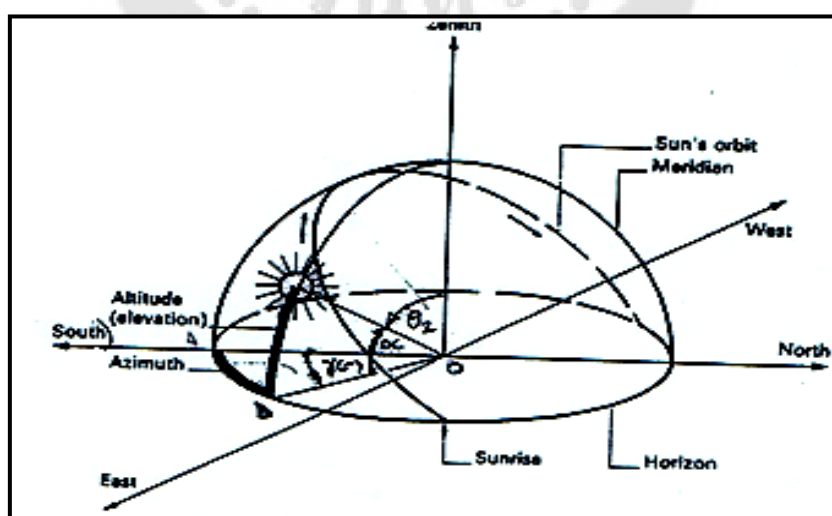
θ_z เป็นมุมจอมฟ้า (Zenith angle) มุมระหว่างรังสีอาทิตย์ที่แผ่บนพื้นราบ ณ ตำแหน่งนั้นกับ Zenith (ตำแหน่งเหนือศีรษะของผู้สังเกตการณ์) ฉายลงสู่จุดนั้น มุมนี้คือมุมตกกระทบ (Incidence angle) บนพื้นราบ

γ เป็นมุม Azimuth angle คือมุมที่บ่ายเบี่ยงระหว่างเส้นฉายของรังสีอาทิตย์บนระนาบที่อยู่ในแนวระดับกับเส้นแนวเหนือใต้ที่จุดสังเกตการณ์กับเส้นแนวเหนือ-ใต้ที่ผ่านทิศใต้ที่แท้จริง วัดไปทางทิศตะวันออกมีค่าเป็นลบ วัดไปทางทิศทางทิศตะวันตกมีค่าเป็นบวก ดังนั้น

$$-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$$



ภาพประกอบ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมดวงอาทิตย์กับโลก
ที่มา: กฤตภาส เกษรา ณ อยุธยา และคณะ (2552).



ภาพประกอบ 22 นิยามของมุม Altitude และ Azimuth ของดวงอาทิตย์
ที่มา: กฤตภาส เกษรา ณ อยุธยา และคณะ (2552).

α เป็นมุมระดับความสูง (Altitude angle) ในระนาบฉายของรังสีแสงอาทิตย์กับตำแหน่งของผู้สังเกตการณ์ฉายบนพื้นราบ ดังนั้น $\alpha + \theta_z = 90^\circ$

ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสุริยะเหล่านี้แสดงไว้ในภาพประกอบ 22

โดยทั่วไป ที่มุมชั่วโมงใด ๆ มุมหนึ่ง เราสามารถกำหนดตำแหน่งของดวงอาทิตย์เทียบกับผู้สังเกตการณ์ได้ด้วยมุมเพียงสองมุม คือ อาจจะเป็นมุม Zenith หรือ Altitude กับมุม Azimuth ของดวงอาทิตย์ ณ มุมชั่วโมงใด ๆ

ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสุริยะที่กล่าวมาแล้ว คือ สำหรับมุม Zenith θ_z ของตำแหน่งดวงอาทิตย์

$$\cos \theta_z = \sin \alpha = \cos \delta \cos \omega \cos L + \sin \delta \sin L \quad (2-27)$$

ด้วยเหตุนี้ความยาวนานของวัน D_L (เป็นชั่วโมง) จะหาได้จาก

$$D_L = \left(\frac{2}{15} \right) \cos^{-1}(-\tan \delta \tan L) \quad (2-28)$$

ω คือมุมของแต่ละชั่วโมง หาได้จาก

$$\omega = 15(st-12) \quad (2-29)$$

เมื่อ st = เวลามาตรฐานท้องถิ่น

สามารถใช้สมการ ในการทำนายมุมชั่วโมงเวลาอาทิตย์ขึ้น (หรือเวลาอาทิตย์ตก) ω_s คือ เมื่อ $\sin \alpha = 0$, จะได้

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \delta \tan L) \quad (2-30)$$

α คือ มุมระดับความสูง (Altitude angle) ในระนาบฉายของรังสีแสงอาทิตย์กับตำแหน่งของผู้สังเกตการณ์ฉายบนพื้นราบ โดยที่ $\alpha + \theta_z = 90^\circ$ หาได้จาก

$$\sin \alpha = \sin L \sin \delta + \cos L \cos \delta \cos \omega \quad (2-31)$$

γ เป็นมุม Azimuth angle คือมุมที่ปายเบนระหว่างเส้นฉายของรังสีอาทิตย์บนระนาบที่อยู่ในแนวระดับกับเส้นแนวเหนือใต้ที่จุดสังเกตการณ์กับเส้นแนวเหนือ-ใต้ หาได้จาก

$$\sin \gamma = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha} \quad (2-32)$$

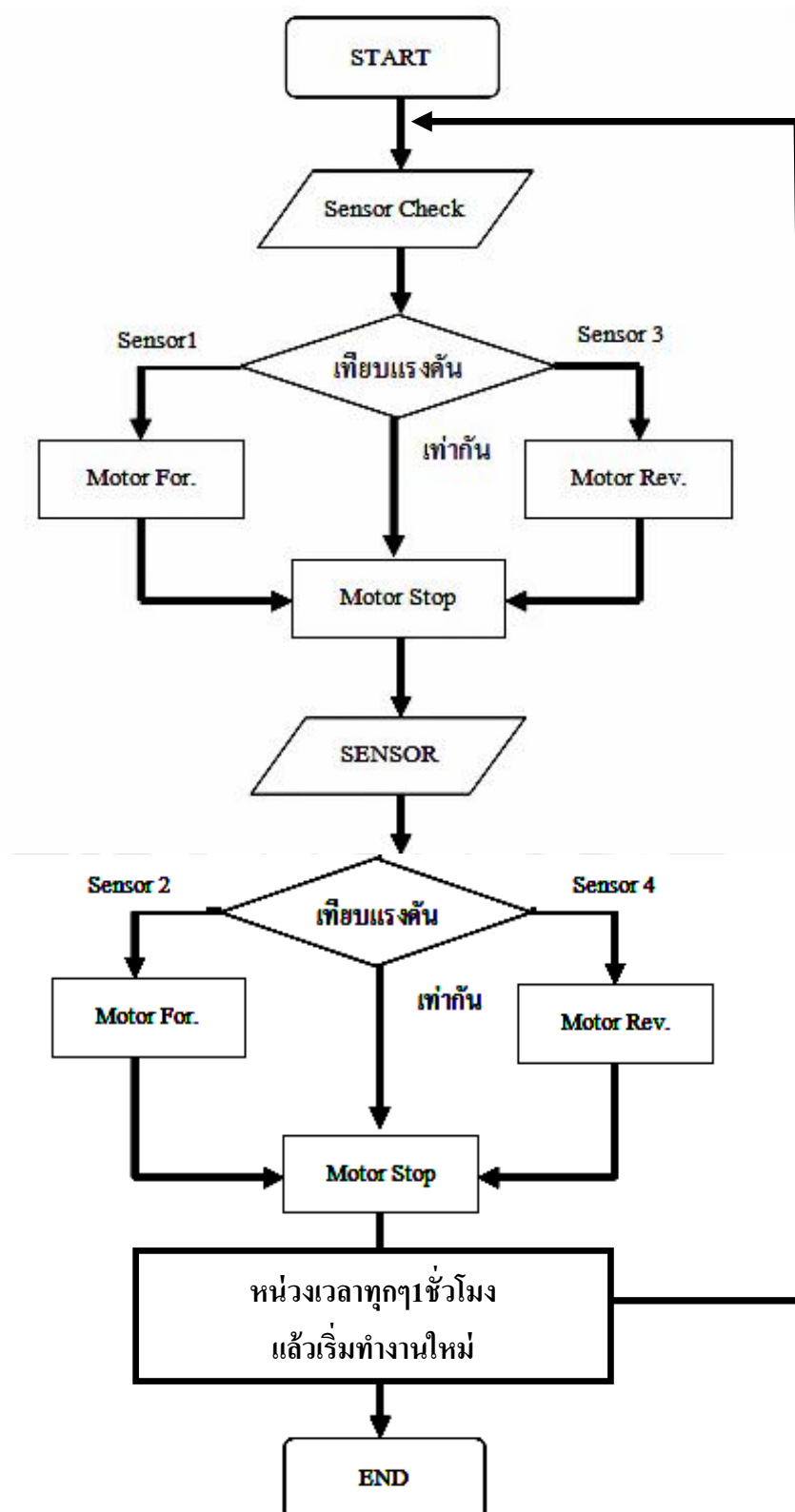
2.14 การออกแบบชุดควบคุมของระบบติดตามดวงอาทิตย์เคลื่อนที่แบบ 2 แกน

ออกแบบวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์จำนวน 2 ตัว ซึ่งใช้กระแสไฟฟ้าที่ได้จากแหล่งจ่ายภายนอกเป็นตัวควบคุมโปรแกรมภาคไมโครคอนโทรลเลอร์ อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบเคลื่อนที่ติดตามดวงอาทิตย์โดยจะทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์เซ็นเซอร์ตรวจจับแสง LDR (Light Dependent Resistor) แล้วเปลี่ยนเป็นคำสั่งเพื่อควบคุมมอเตอร์ให้หมุนจนพาราโบลาให้ตั้งฉากกับดวงอาทิตย์ทั้งวันโดยจะตรวจวัดความแตกต่างของแสงโดยจะทำหน้าที่ต่างกันคือ เซ็นเซอร์ LDR ตัวที่ 1 และตัวที่ 2 จะเป็นตัวสั่งงานมอเตอร์ในแกนอะซิมุท และส่วนเซ็นเซอร์ LDR ตัวที่ 3 และ 4 เป็นตัวสั่งงานมอเตอร์ในแกนอัลติจูดโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 16F877A โดยใช้ภาษา C ในการเขียนโปรแกรมควบคุมระบบเคลื่อนที่ติดตามดวงอาทิตย์การทดสอบกระทำโดยนำเครื่องติดตามดวงอาทิตย์มาทดสอบการติดตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์อย่างต่อเนื่องตลอดวัน

มอเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกลโดยใช้หลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งแบ่งแยกมอเตอร์ออกเป็นสองส่วนคือ แกนด้านล่าง (อะซิมุท) จะเป็นตัวควบคุมตำแหน่งของจานพาราโบลาหมุนรอบตัวใช้มอเตอร์กระแสไฟฟ้าแรงดันขนาด 12 VDC ความเร็ว 110 RPM จะล็อกแกนเมื่อไม่จ่ายไฟและรับน้ำหนักได้ 0-25 kg-cm ส่วนแกนที่สองเป็นแกนอัลติจูดใช้มอเตอร์ 24 VDC 250W เป็นแบบขาตั้งพื้นมีชุดเกียร์ทดภายใน อัตราทด 1:5 / 600 RPM มีความยาวเฉพาะมอเตอร์ 7 cm เส้นผ่าศูนย์กลาง 10 cm ชุดเฟืองทดมีขนาด 9 x 3 cm

ภาคขับมอเตอร์ จะมีโปรแกรม 2 ชุดในแต่ละชุดควบคุมแต่ละแกน สามารถปรับความเร็วรอบมอเตอร์ช้าหรือเร็ว และชุดควบคุมมอเตอร์เดินหน้าหรือถอยหลัง มีไฟเลี้ยงวงจรขนาด 12-24 VDC ใช้ได้กับมอเตอร์ดีซีทุกชนิด ที่มีกระแสไม่เกิน 5 – 30 Ampere และใช้ได้กับมอเตอร์ตั้งแต่ 12 – 24 Volt DC. ให้แรงบิดสูง

การออกแบบระบบติดตามดวงอาทิตย์แสดงในแผนภูมิแสดงการทำงานของชุดขับเคลื่อนจานพาราโบลา 2 ขั้นตอนแบบ 2 แกนแสดงดังภาพประกอบ 23

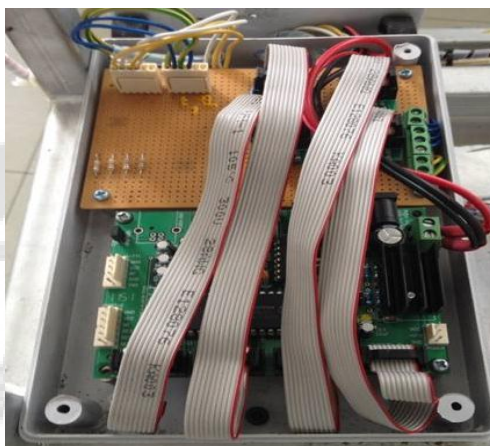


ภาพประกอบ 23 แผนภูมิแสดงการทำงานของชุดขับเคลื่อนจานพาราโบลา 2 ขั้นตอนแบบ 2 แกน

ระบบติดตามดวงอาทิตย์เคลื่อนที่แบบ 2 แกนประกอบไปด้วยอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

2.14.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์

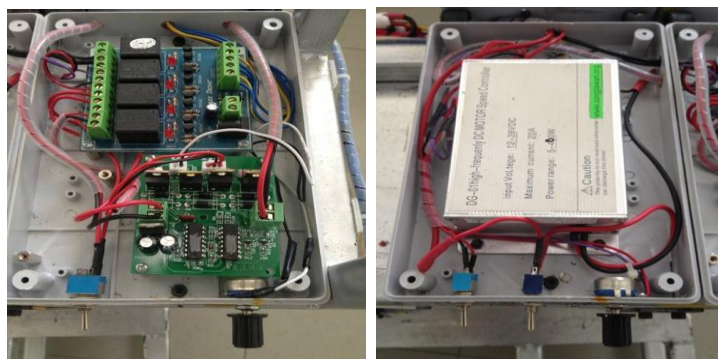
อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบเคลื่อนที่ติดตามดวงอาทิตย์โดยจะทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์เซ็นเซอร์ตรวจจับแสง LDR (Light Dependent Resistor) แล้วเปลี่ยนเป็นคำสั่งเพื่อควบคุมมอเตอร์ให้หมุนจนพาราโบลาให้ตั้งฉากกับดวงอาทิตย์ทุกวัน โดยไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 16F877A โดยใช้ภาษา C ในการเขียนโปรแกรมควบคุมระบบเคลื่อนที่ติดตามดวงอาทิตย์ ดังภาพประกอบ 24



ภาพประกอบ 24 ไมโครคอนโทรลเลอร์

2.14.2 ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์

ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ ดังภาพประกอบ 25 จะมี 2 โปรแกรมในแต่ละชุดของแต่ละแกน คือสามารถปรับความเร็วรอบมอเตอร์ช้าหรือเร็ว และชุดควบคุมมอเตอร์เดินหน้าหรือถอยหลัง ไฟเลี้ยงวงจร 12-24 VDC ใช้ได้กับมอเตอร์ดีซีทุกชนิด ที่มีกระแสไม่เกิน 5-30 A ใช้ได้กับมอเตอร์ตั้งแต่ 12-24 VDC ให้แรงบิดสูง



ภาพประกอบ 25 ระบบควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์

2.14.3 มอเตอร์ (Motor)

อุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกลโดยใช้หลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งทางทีมงานได้ออกแบบและแยกมอเตอร์ออกเป็นสองส่วนด้วยกันคือ แกนด้านบนจะเป็นตัว Control ของเราของตัวงานพาราโบลา และเรากำหนดให้เป็นแกน X ซึ่งใช้มอเตอร์กระแส 12 VDC ความเร็ว 110 RPM (ขนาดเพลา 10 mm) จะล็อกแกนเมื่อไม่จ่ายไฟ และรับน้ำหนักได้ 0-25 kg-cm ลักษณะมอเตอร์แสดงดังภาพประกอบ 26



ภาพประกอบ 26 มอเตอร์ควบคุมการเคลื่อนที่แนวอะซิมุท

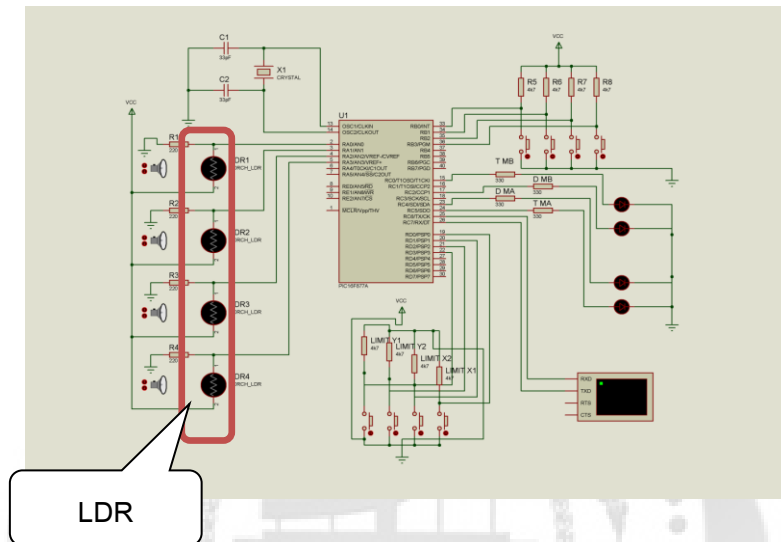
ส่วนแกนที่สอง เป็นแกนกำหนดเป็นแกน Y เป็นมอเตอร์ 24 VDC 250W แบบขาตั้งพื้นมีชุดเกียร์ทดภายใน อัตราทด 1:5 / 600 RPM มีความยาวเฉพาะมอเตอร์ 7 cm เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm ขนาด Gear Box : 9 x 3 cm ลักษณะมอเตอร์แสดงดังภาพประกอบ 27



ภาพประกอบ 27 มอเตอร์ควบคุมการเคลื่อนที่แนวอัลติจูด

2.14.4 การทำงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์

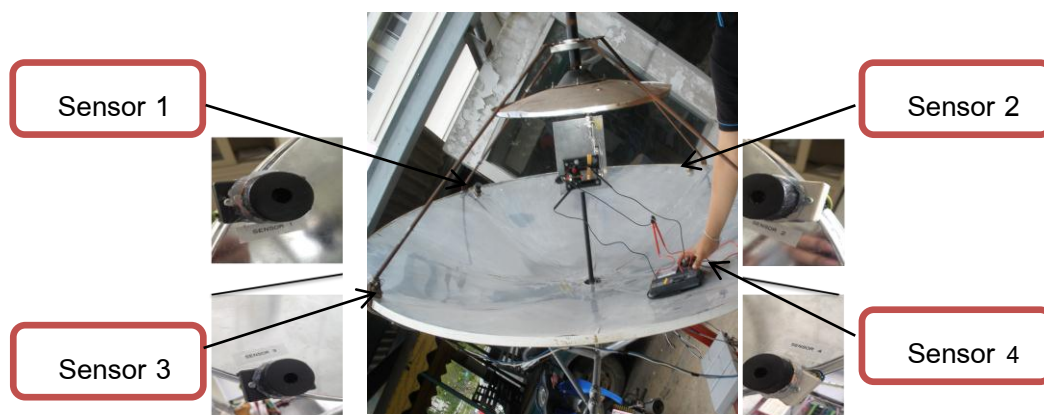
ในการออกแบบระบบเคลื่อนที่ติดตามดวงอาทิตย์ จะใช้เซ็นเซอร์ตรวจจับแสง LDR ในการติดตามแสง โดยเซ็นเซอร์ LDR จะตรวจจับแสงและรับค่าของแสง จากนั้นนำค่าแสงที่ได้ส่งเข้าไปยังภาคไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งจะมีการเปรียบเทียบแรงดันที่เข้าไปยังภาคไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อสั่งให้จานพลาโบลหมุนตามไปยังตำแหน่งที่มีแสงมากในทิศนั้น



ภาพประกอบ 28 ภาพวงจรที่ Simulator

2.14.5 เซ็นเซอร์ LDR

เริ่มจากชุดอุปกรณ์เซ็นเซอร์เป็นตัวตรวจจับแสงอาทิตย์ (LDR : Light Dependent Resistor) โดยจะตรวจจับความแตกต่างของแสงโดยจะทำหน้าที่ต่างกันคือ เซ็นเซอร์ LDR ตัวที่ 1 และตัวที่ 2 จะเป็นตัวสั่งงานมอเตอร์ แกน y และส่วนเซ็นเซอร์ LDR ตัวที่ 3 และ 4 เป็นตัวสั่งงานมอเตอร์แกน x ดังภาพประกอบ 29

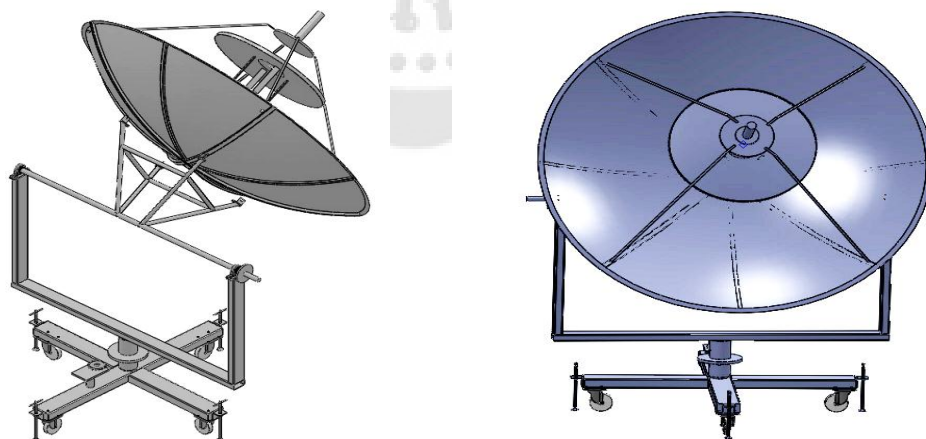


ภาพประกอบ 29 ชุดเซ็นเซอร์ LDR

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ต้นแบบตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลา 2 ชั้นตอน แสดงดังภาพประกอบ 30 ตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลา 2 ชั้นตอน ประกอบด้วยจานพาราโบลาชั้นตอนที่ 1 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.68 m ทำจากโครงของจานรับสัญญาณดาวเทียม ปลูกด้วยแผ่นสังกะสีแล้วฉาบเรียบด้วยสีโป๊วรถยนต์ จากนั้นปลูกด้วยแผ่นอลูมิเนียมสะท้อนแสงเต็มพื้นที่ ตัวรวมรังสีชั้นตอนที่ 2 เป็นจานรับสัญญาณดาวเทียมขนาดเล็ก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.605×0.655 m จานพาราโบลาทั้งสองชั้นตอนประกอบกันเข้าเป็นระบบตัวรวมรังสีแบบ 2 ชั้นตอนวางอยู่บนโครงรับทำจากเหล็กกล่อง ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกนคือ แกนอะซิมูท และแกนอัลติจูด ขับโดยมอเตอร์กระแสตรง ขนาด 120 W และ 500 W ตามลำดับ ควบคุมการหมุนจานด้วยกล่องคอนโทรลเลอร์ และมีเซนเซอร์วัดความเข้มแสงแดด ติดตั้งอยู่ที่ขอบจานด้านล่างจำนวน 4 ตัวที่มุมทั้ง 4 ของจาน ที่จุดโฟกัสของระบบทำเป็นโคมสำหรับยึดตัวรับรังสีอาทิตย์ที่ระบบได้รวมแสงแล้วถ่ายเทความร้อนให้กับตัวรับรังสีอาทิตย์ ตัวรับรังสีอาทิตย์ประกอบด้วย แคลอริมิเตอร์อย่างง่ายทำจากทองแดงหุ้มฉนวนกันความร้อนโดยรอบเปิดเฉพาะด้านที่รับรังสีอาทิตย์ แคลอริมิเตอร์แบบบังคับให้น้ำหมุนวนเป็นเกลียวทำจากทองแดงหุ้มฉนวนกันความร้อนโดยรอบเปิดเฉพาะด้านที่รับรังสีอาทิตย์ และเครื่องย่นตีสเตอลิงขนาด 0.35 W ใช้สำหรับการทดสอบดังภาพประกอบ 30



ภาพประกอบ 30 ต้นแบบตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลา 2 ชั้นตอนที่ติดตั้งบนระบบติดตามดวงอาทิตย์

1. อุปกรณ์สำหรับดำเนินงานวิจัย

1.1 ตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบจานพาราโบลา 2 ขั้นตอนที่ออกแบบและสร้างขึ้นดังภาพประกอบ 31-32 ติดตั้งระบบจ่ายน้ำให้แก่แคลอริมิเตอร์ประกอบด้วยถังเก็บน้ำ, อุปกรณ์ควบคุมระดับน้ำ, ระบบท่อและวาล์ว, และโครงสร้างรองรับอุปกรณ์



ภาพประกอบ 31 ต้นแบบตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลา 2 ขั้นตอนที่สร้างขึ้น



ภาพประกอบ 32 จานพาราโบลา 2 ขั้นตอนที่ประกอบด้วยจานพาราโบลาขนาดใหญ่และเล็ก



ภาพประกอบ 33 ระบบติดตามดวงอาทิตย์ของตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลา 2 ขั้นตอนที่สร้างขึ้น

1.2 ชุดวัดความเข้มของรังสีจากเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์และตัวรวมรังสีอาทิตย์ ได้แก่ แคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลผ่านต่อเนื่อง (Flowing calorimeter/ Simple calorimeter) ดัง ภาพประกอบ 34



ภาพประกอบ 34 แคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลผ่านต่อเนื่อง

1.3 ชุดวัดความร้อนที่ป้อนเข้าประกอบด้วย แคลอริมิเตอร์แบบก้นหอย (Spiral calorimeter) ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลภายใน 3 จุด และที่ผิวรับความร้อน 3 จุดเป็นระยะ 0 mm, 23 mm และ 43 mm จากจุดศูนย์กลางดังภาพประกอบ 35



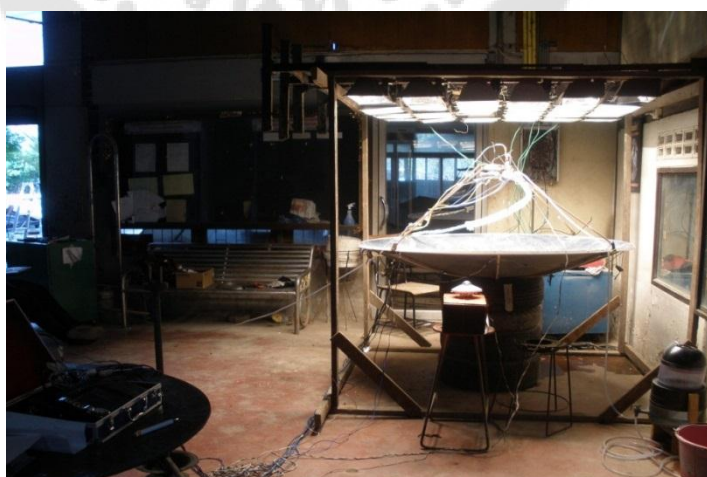
ภาพประกอบ 35 แคลอริมิเตอร์แบบก้นหอยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน

1.4 ตาชั่งอิเล็กทรอนิกส์สำหรับชั่งมวลของน้ำที่ไหลผ่าน (TANITA KD-162 500-1000 g ค่าความละเอียด ± 0.1 %) บีกเกอร์สำหรับวัดปริมาตรน้ำ (ขนาด 200 ml) และนาฬิกาจับเวลา (EXTECH Heat watch HW 30 ค่าความละเอียด ± 5 seconds/day) ดังภาพประกอบ 36 ใช้หาอัตราการไหลของน้ำ



ภาพประกอบ 36 อุปกรณ์การหาอัตราการไหลของน้ำ

1.5 ระบบให้ความร้อนด้วยเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ประกอบด้วยหลอดฮาโลเจนไส้ทังสเตน (Tungsten halogen lamp) ขนาด 1500 W จำนวน 24 หลอดและโครงสร้าง สายไฟ และชุดแมกเนติกเบรกเกอร์ดังภาพประกอบ 37



ภาพประกอบ 37 เครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ทำจากหลอดฮาโลเจนไส้ทังสเตนจำนวน 24 หลอด

1.6 ชุดวัดอุณหภูมิของแคลอริมิเตอร์ ประกอบด้วย K-type thermocouple รุ่น GK-03 ช่วงการวัดอุณหภูมิ -50-250 °C สำหรับวัดอุณหภูมิน้ำภายในและอุณหภูมิที่สายยางน้ำเข้า-ออกจากแคลอริมิเตอร์ ที่ผิวของแคลอริมิเตอร์ ประกอบด้วย K-type thermocouple รุ่น LK-01 ช่วงการวัดอุณหภูมิ -50-450 °C (ค่าความละเอียด ± 0.01 %) ดังภาพประกอบ 38



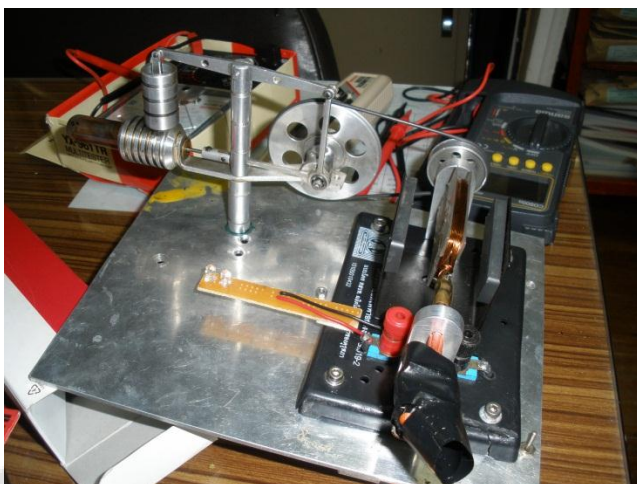
ภาพประกอบ 38 K-type thermocouple

1.7 Data logger ยี่ห้อ Graphtec Midi Logger 20 channel และโปรแกรมสำหรับ Data logger สำหรับบันทึกข้อมูลจุดที่วัดอุณหภูมิ คอมพิวเตอร์แบบโน้ตบุคสำหรับการเก็บบันทึกข้อมูลต่างๆจากเครื่องมือวัดอิเล็กทรอนิกส์ดังภาพประกอบ 39



ภาพประกอบ 39 Data logger Graphtec Midi Logger 20 channel และคอมพิวเตอร์โน้ตบุค

1.8 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดเล็กห้องปฏิบัติการกำลัง 0.35 W แสดงดังภาพประกอบ 40



ภาพประกอบ 40 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดเล็กห้องปฏิบัติการ 0.35 W

เครื่องมือวัดในงานวิจัย

1. ไพรานอมิเตอร์ยี่ห้อ Kipp & Zonnen รุ่น CM 11 มีค่าคงที่ในการสอบเทียบ 5.26×10^{-6} V/(W/m²) ช่วงการวัด 0-1400 W/m² ความละเอียด $\pm 2\%$ (0.35-1.5 μ m) ดังภาพประกอบ 41



ภาพประกอบ 41 ไพรานอมิเตอร์ยี่ห้อ Kipp & Zonnen

2. ชุดวัดความเข้มรังสีอาทิตย์รวม (Global intensity) และรังสีกระจาย (Diffuse intensity) ประกอบด้วย Pyranometer สองเครื่องกับวงแหวนเงา (Shading ring) และชุดวัดมุม solar zenith วงแหวนบังเงา ไพรานอมิเตอร์ และ โวลท์มิเตอร์ดังภาพประกอบ 42



ภาพประกอบ 42 วงแหวนบังเงา ไพรานอมิเตอร์ และ โวลท์มิเตอร์

3. ชุดวัดกำลังของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงประกอบด้วย ตาซึ่งสปริง รอก เชือก และจานใส่ก้อนน้ำหนักเพื่อเพิ่มภาระแก่เครื่องยนต์ดังภาพประกอบ 43



ภาพประกอบ 43 ชุดวัดกำลังของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

4. ก้อนมวลสำหรับถ่วงน้ำหนักขณะใส่ภาระให้กับเครื่องยนต์สเตอลิงดังภาพประกอบ 44



ภาพประกอบ 44 ก้อนมวล (1-3 g) สำหรับถ่วงน้ำหนักขณะใส่ภาระให้กับเครื่องยนต์สเตอลิง

5. อุปกรณ์วัดกำลังของเครื่องยนต์สเตอลิงได้แก่ มัลติมิเตอร์ยี่ห้อ Sunwa YX-961 พิสัย 0-2.5 V ความละเอียด $\times 3\%$ F.S. อินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ ยี่ห้อ AZ พิสัย $-20-420\text{ }^{\circ}\text{C}$ ความละเอียด $\pm 0.4\%$ of reading $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ แทคโคมิเตอร์ยี่ห้อ Nicety TC 802 พิสัย 2.5-99999 RPM ความละเอียด $\pm 0.05\% + 1\text{ digit}$ ดังภาพประกอบ 45



ภาพประกอบ 45 อุปกรณ์วัดกำลังของเครื่องยนต์สเตอลิง

6. เครื่องมือวัดความเร็วลม (Anemometer) ชนิดทดลอง ยี่ห้อ KIMO LV 101 พิสัย -0.8-3 m/s ความละเอียด ± 3 of reading ± 0.1 m/s รูปภาพประกอบ 46



ภาพประกอบ 46 เครื่องวัดความเร็วลม

7. เครื่องมือวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ยี่ห้อ Extech พิสัยการวัดความชื้นสัมพัทธ์ 1-99 % พิสัยการวัดอุณหภูมิ -10-50 °C ความละเอียด ± 5 seconds/day รูปภาพประกอบ 47



ภาพประกอบ 47 เครื่องมือวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

2. การดำเนินงานวิจัย

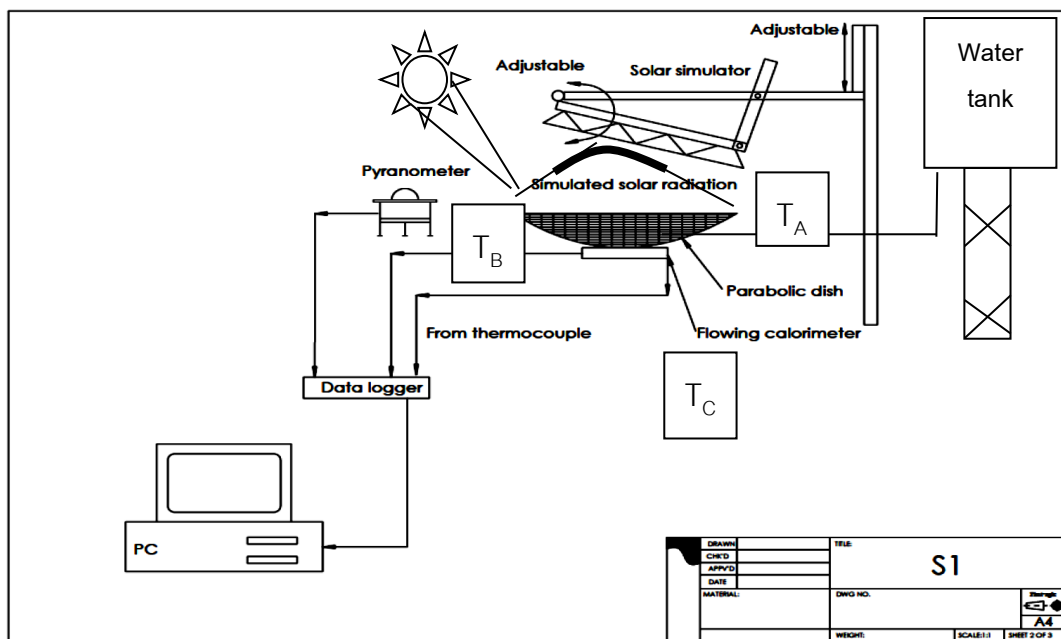
ขั้นตอนการทดสอบสมรรถนะของตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบสองขั้นตอน แบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนหลักดังต่อไปนี้

2.1 ขั้นตอนการทดลองประสิทธิภาพของตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบพาราโบลาสองขั้นตอนกับดวงอาทิตย์จริง และเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์โดยใช้แคลอริมิเตอร์ดูดซับพลังงาน 2 แบบ

1. นำจานพาราโบลาแบบสองขั้นตอนมารับความร้อนจากดวงอาทิตย์จริง
2. ติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ T_A, T_B, T_C วัดความเร็วลม v ดังภาพประกอบ 48
3. นำแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่องไปตั้งบนขาตั้งตรงจุด Focus ของ

Concentrator

4. ปลอยน้ำจากถังไหลเข้าแคลอริมิเตอร์
5. ต่อสายเทอร์โมคัปเปิ้ลที่วัดอุณหภูมิน้ำเข้า (T_A) น้ำออกจากแคลอริมิเตอร์ (T_B) วัดอุณหภูมิแวดล้อมและอุณหภูมิตัวรับรังสีเข้ากับเทอร์โมมิเตอร์แบบดิจิตอลบันทึกค่าไว้
6. เริ่มเปิดระบบติดตามดวงอาทิตย์ซึ่งจานรวมรังสีจะหันติดตามดวงอาทิตย์จับเวลา (Time1) บันทึกค่าของอุณหภูมิน้ำเข้าและน้ำออกไปเรื่อยๆพร้อมกับบันทึกค่าความเข้มรังสีตรงของแสงอาทิตย์
7. ในการเก็บข้อมูลเริ่มบันทึกเริ่มต้นการทำงาน T_A, T_B, T_C เก็บค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ด้วยไพราโนมิเตอร์ผ่านดาตาล็อกเกอร์ และจับเวลา โดยบันทึกข้อมูลทุก 1 นาทีจนถึง 382°C เมื่อเครื่องเริ่มทำงานให้เริ่มนาฬิกาที่ 0 จับเวลา โดยบันทึกทุก 1 นาทีจนจบการทดลอง (เวลา 11.00-14.00 น.) เลือกเฉพาะวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสและไม่มีเมฆ ใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์
8. ยุติระบบติดตามดวงอาทิตย์
9. วัดอัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนที่ใช้ในการรับความร้อน (โดยเริ่มต้องหาปริมาตรของน้ำที่ไหลผ่านตั้งแต่เวลา Time_1 จนถึงเวลา Time_2 มีน้ำไหลคิดเป็นน้ำหนักเท่าไร (โดยนำปริมาตรของน้ำที่ไหลผ่านทั้งหมดไปชั่ง)
10. คำนวณหาพลังงานที่ตัวดูดซับพลังงานได้รับจากจานพาราโบลาแบบสองขั้นตอน เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีอาทิตย์ (Intensity, I) และ เวลา (Time of day) หรือ อุณหภูมิ/ความร้อน (Temperature, T/Heat , Q) และ เวลา (Time of day) จะได้สมการเชิงเส้นก็สามารถทราบพลังงานที่จานพาราโบลาแบบสองขั้นตอนทำได้ในเวลาต่างๆและความเข้มรังสีต่างๆ



ภาพประกอบ 48 แผนภาพแสดงการเก็บข้อมูลจากการทดลองดวงอาทิตย์จริงและเครื่องจำลองรังสี

11. คำนวณหาประสิทธิภาพความร้อนของตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลา 2 ขั้นตอน และประเมินสมรรถนะของตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลาสองขั้นตอน

สมรรถนะของตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลาสองขั้นตอน สามารถประเมินได้จาก ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนชั่วขณะและประสิทธิภาพของระบบที่เกิดจากรังสีตรงหลากหลายค่า ค่า อุณหภูมิอากาศแวดล้อม และอุณหภูมิของน้ำขาออกจากตัวดูดซับพลังงาน คำนวณค่าอัตราส่วนการรวมรังสีได้จากพื้นที่รับแสงของจานต่อพื้นที่ของตัวดูดซับพลังงานจะได้อัตราส่วนการรวมรังสีของ จานพาราโบลาขั้นตอนที่ 1 เป็นดังสมการ

$$C_{1\text{-stage PDC}} = A_{\text{main dish}}/A_{\text{reciever}} = 127.459$$

สำหรับตัวรวมรังสีรูปทรงพาราโบลอยด์ขั้นตอนที่สองค่าอัตราส่วนการรวมรังสีคำนวณได้โดยวิธี เดียวกันค่าอัตราส่วนการรวมรังสีมีค่าเป็น $C_{\text{secondary}} = 2x$ โดยที่อัตราส่วนการรวมรังสีของระบบ เป็นผลจากอัตราส่วนการรวมรังสีของขั้นตอนที่หนึ่งและขั้นตอนที่สองสามารถคำนวณได้เป็น

$$C_{2\text{-stage PDC}} = 254.918X$$

ค่ารังสีตรงที่ตกกระทบบนระนาบสามารถคำนวณได้จาก

$$I_{b,n} = (I_{t,h} - I_{d,h})/\cos \theta_z$$

เมื่อ $I_{t,h}$ = ค่ารังสีรวมบนพื้นระดับมีหน่วยเป็น W/m^2 $I_{d,h}$ = ค่ารังสีกระจายบนพื้นระดับ มีหน่วยเป็น W/m^2 θ_z = ค่ามุมซิมิทของดวงอาทิตย์ในหน่วยองศา

พลังงานที่เข้ามาทั้งหมด Q_{in} สามารถคำนวณได้จากการวัดค่ารังสีตรง I_{bn} พื้นที่ของจานพาราโบลาสองขั้นตอน และค่าการสะท้อนของผิววัสดุที่ใช้ปูลงบนจานในขั้นตอนที่หนึ่งและสอง

$$Q_{in} = \rho_{main} \rho_{sub} I_{bn} A_{2-stage}$$

ค่าพลังงานที่ดูดซับ $Q_{absorbed}$ สามารถคำนวณได้จากการวัดผลต่างของอุณหภูมิของน้ำที่เข้าและออกจากแคลอริมิเตอร์ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (4187 J/kg.K) และอัตราการไหล $\dot{m}_{water}$ ดังสมการ

$$Q_{absorbed} = \dot{m}_{water} c_p (T_{out} - T_{in})$$

ประสิทธิภาพของตัวรวมรังสีอาทิตย์ (E_{con}) คำนวณได้จากสมการ

$$E_{con} = \frac{\dot{m}_{water} C_p (T_{out} - T_{in})}{I_b A_a}$$

เมื่อ A_a คือพื้นที่ของช่องรับรังสีของจานพาราโบลา (m^2)

ประสิทธิภาพเชิงแสงของจานพาราโบลาแบบสองขั้นตอนนี้สามารถคำนวณได้จากผลคูณของค่าการสะท้อนรังสีของผิวสะท้อนรังสีของแต่ละขั้นตอน ซึ่งค่าการสะท้อนรังสีของแผ่นอลูมิเนียมพอยล์ (ρ_{main}) มีค่า 0.8 และค่าการสะท้อนรังสีของแผ่นโคมไฟสะท้อนแสง (ρ_{sub}) มีค่า 0.95 ดังสมการ

$$\eta_o = \rho_{main} \times \rho_{sub}$$

$$= 0.90 \times 0.95 = 0.855$$

12. ทำตามขั้นตอนที่ 1-11 โดยใช้เครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ (หลอดไฟฮาโลเจน 24 ดวง) ไม่ต้องใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์ (ทดลองเวลาใดก็ได้) ภายในอาคาร

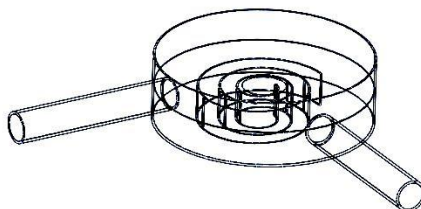
13. ทำตามขั้นตอนที่ 1-12 โดยเปลี่ยนแคลอริมิเตอร์จากแบบไหลต่อเนื่องเป็นแบบขาดกันหอย



ภาพประกอบ 49 แสดงการเก็บข้อมูลจากการทดลองกับดวงอาทิตย์จริง



ภาพประกอบ 50 แสดงการเก็บข้อมูลจากการทดลองกับเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์



ภาพประกอบ 51 แผนภาพแสดงแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลผ่านต่อเนื่องแบบก้นหอยที่ออกแบบขึ้น

2.2 การทดสอบหาค่าความเข้มข้นของรังสีอาทิตย์จำลองจากเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ที่เข้าสู่จานพาราโบลา

เครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ที่ใช้ในการวิจัยสร้างจากหลอดฮาโลเจนขนาด 1500 W จำนวน 24 หลอดค่าความเข้มข้นของรังสีอาทิตย์จำลองที่เข้าสู่จานพาราโบลาจะเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการคำนวณหาอัตราส่วนการรวมรังสี (Concentration ratio) ของตัวรวมรังสีอาทิตย์การทดสอบหาค่าความเข้มข้นของรังสีอาทิตย์จำลองจากเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ที่เข้าสู่จานพาราโบลามีขั้นตอนดังนี้

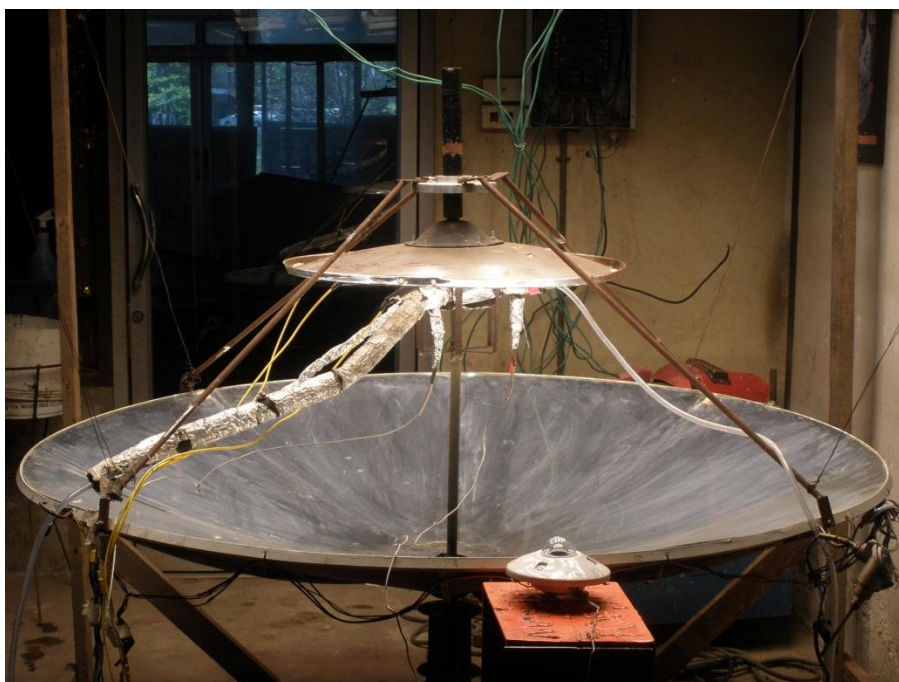
1. นำ Pyranometer ไปวางไว้ในตำแหน่งที่อยู่ห่างจากเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์เป็นระยะทางที่เหมาะสมโดยให้แนวแกนของ Pyranometer ขนานกับแนวรังสีที่ออกมาจากเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์
2. ต่อสายสัญญาณจาก Pyranometer เข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger)
3. เปิดไฟฟ้าเข้าสู่หลอดฮาโลเจนของเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์
4. สังเกตค่าความเข้มรังสีที่เครื่องวัดจดบันทึกค่าความเข้มรังสีเมื่อค่าความเข้มรังสีที่อ่านได้ไม่เปลี่ยนแปลงแล้ว
5. ย้าย Pyranometer ไปสู่ตำแหน่งอื่นแล้วทำซ้ำข้อที่ 4 จนครบ 24 ตำแหน่งเพื่อหาค่าเฉลี่ยของค่าความเข้มของรังสีจากเครื่องจำลองรังสีทั้งหมด

2.3 การทดสอบหาค่าความเข้มข้นของรังสีอาทิตย์จำลองจากเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ตรงจุด

โฟกัสของจานพาราโบลา

ค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์จำลองที่ได้จากการรวมรังสี (Concentrated simulated intensity) ตรงจุดโฟกัสจะเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการคำนวณหาค่าความร้อนที่ถ่ายเทให้กับตัวรับรังสีอาทิตย์ซึ่งจะเป็นความร้อนที่ป้อนให้แก่สารทำงานที่อยู่ภายในเครื่องยนต์อีกทอดหนึ่งการทดสอบหาค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์จำลองจากเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ตรงจุดโฟกัสของจานพาราโบลา มีขั้นตอนนี้

1. นำแคลอรีมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่องไปตั้งบนขาตั้งตรงจุดโฟกัสของตัวรวมรังสีอาทิตย์ซึ่งเป็นจานพาราโบลาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.68 m โดยตัวรวมรังสีอาทิตย์นี้ อยู่ใต้เครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ซึ่งสร้างจากหลอดฮาโลเจนขนาด 1500 W จำนวน 24 หลอดและให้ตัวรวมรังสีอาทิตย์อยู่ห่างจากเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์เท่ากับระยะที่จะใช้ในการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์
2. ต่อก่อน้ำจากระบบน้ำหมุนเวียนเข้าและออกจากแคลอรีมิเตอร์
3. ต่อสายเทอร์โมคัปเปิ้ลที่วัดอุณหภูมิน้ำเข้าและออกจากแคลอรีมิเตอร์เข้ากับอินดิเคเตอร์
4. เปิดไฟฟ้าให้หลอดฮาโลเจนเมื่อสังเกตค่าของอุณหภูมิน้ำเข้าและออกจากแคลอรีมิเตอร์ค่อนข้างคงที่ซึ่งแสดงว่าเป็นสภาวะคงตัวแล้วจึงจดบันทึกค่าของอุณหภูมิ
5. ปิดหลอดฮาโลเจน
6. วัดอัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนที่ใช้ในการรับความร้อนที่แคลอรีมิเตอร์
7. ปลอ่ยให้เย็นแล้วจึงทำการทดลองครั้งต่อไป



ภาพประกอบ 52 การทดสอบหาค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์จำลองจากเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ตรงจุดโฟกัสของจานพาราโบลา

2.4 การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้เครื่องจำลองรังสีอาทิตย์และจานพาราโบลาแบบสองชั้นตอน

การทดสอบนี้จะทำหลังจากที่ทราบค่าความร้อนป้อนเข้าจากรังสีอาทิตย์จำลองตรงจุดโฟกัสแล้วทำการทดสอบสมรรถนะจะทำการทดสอบหาค่ากำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเท่านั้นเพราะว่าการทดสอบหาค่ากำลังเพลาดโดยใช้ไดนาโมมิเตอร์แบบเชือกรัด (Rope brake dynamometer) ภายใต้แสงอาทิตย์จำลองที่มีความเข้มของรังสีสูงนั้นร้อนมากและทำได้ยากมากหลังจากทราบค่าของความร้อนป้อนเข้าเครื่องยนต์แล้วจากนั้นจึงทดสอบหาสมรรถนะของเครื่องยนต์โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้

1. จัดเตรียมเครื่องยนต์และอุปกรณ์กับเครื่องมือวัดต่างๆให้ครบและพร้อมใช้งาน
2. เปิดน้ำระบายความร้อนให้หมุนเวียนเข้าไปในช่องระบายความร้อนของเครื่องยนต์
3. เปิดไฟฟ้าเข้าเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ต่างๆทั้งหมด
4. เปิดไฟฟ้าให้เข้าหลอดฮาโลเจนบนเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์แล้วจดบันทึกค่าอุณหภูมิของสารทำงาน, อุณหภูมิของน้ำที่ไหลเข้าและออกจากช่องระบายความร้อนทุก 1 นาที

5. เมื่ออุณหภูมิของสารทำงานสูงพอที่จะสตาร์ทเครื่องยนต์ได้แล้วจึงสตาร์ทเครื่องยนต์จากนั้นจดบันทึกความเร็วรอบของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นด้วย

6. เมื่อสังเกตได้ว่าเครื่องยนต์อยู่ในสถานะคงตัวซึ่งอุณหภูมิต่างๆและความเร็วรอบจะมีค่าคงที่จึงเริ่มทดสอบสมรรถนะโดยเริ่มเปิดหลอด LED ของ Load bank เพื่อเป็นการกระตุ้นเครื่องยนต์บันทึกค่าของกระแสไฟฟ้า, แรงดันกระแสไฟฟ้า, และความเร็วรอบทุกครั้งที่จะเพิ่มภาระแก่เครื่องยนต์จนกระทั่งเครื่องยนต์หยุด

7. ปิดไฟฟ้าไม่ให้เข้าหลอดฮาโลเจนบนเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์วัดอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว ความร้อนที่รังสีอาทิตย์จำลองให้แก่แคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่องจะถ่ายเทให้กับน้ำที่ไหลผ่านแคลอริมิเตอร์ทั้งหมดความร้อน (มีหน่วยเป็น J/s) ที่น้ำดูดซับไว้ได้จะคำนวณได้จากสมการ

$$q_{\text{abs}} = m_w c_{p,w} (T_{w,\text{out}} - T_{w,\text{in}})$$

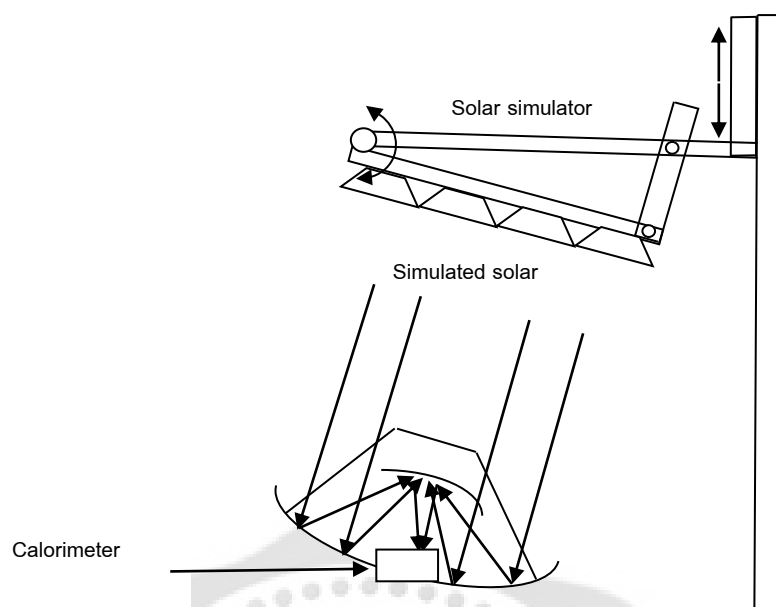
เมื่อ m_w คืออัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านแคลอริมิเตอร์ (kg/s) $c_{p,w}$ คือค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (4187 J/kg K) $T_{w,\text{in}}$ คืออุณหภูมิของน้ำตรงจุดที่เข้าสู่แคลอริมิเตอร์ (°C) และ $T_{w,\text{out}}$ คืออุณหภูมิของน้ำตรงจุดที่ออกจากแคลอริมิเตอร์ (°C) ค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์จำลอง (มีหน่วยเป็น W/m²) จะคำนวณได้จากสมการ

$$I = \frac{q_{\text{abs}}}{A_{\text{abs}}}$$

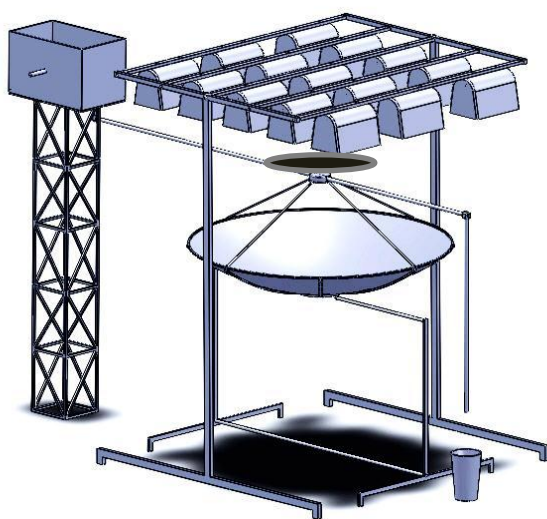
เมื่อ A คือพื้นที่รับรังสีของแคลอริมิเตอร์ (m²) I คือค่าความเข้มของรังสี (มีหน่วยเป็น W/m²) จะสามารถคำนวณได้จากจำนวน mV ที่อ่านได้จาก Pyranometer คือ

$$I = \frac{1000(\text{mV})}{27.66 \mu\text{V}/(\frac{\text{W}}{\text{m}^2})}$$

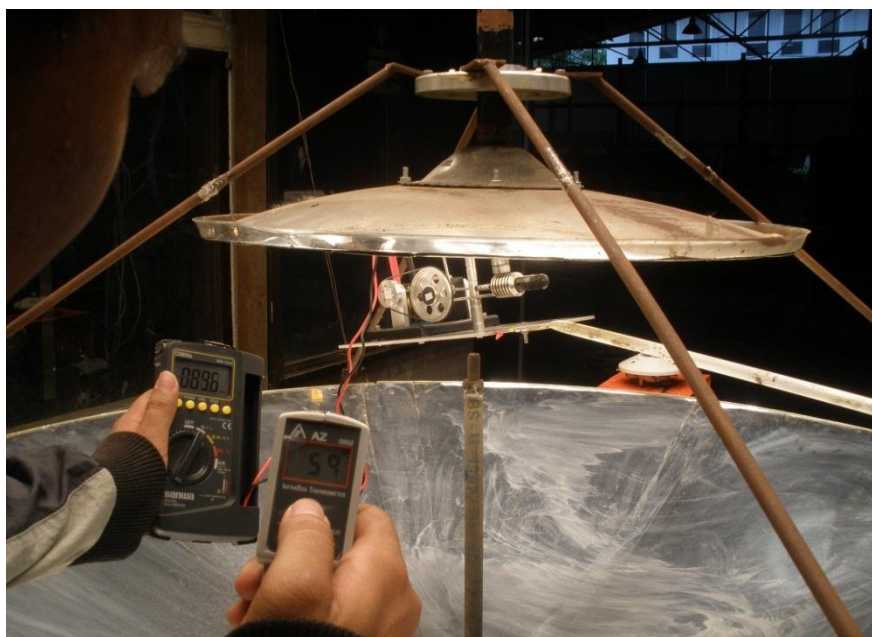
เมื่อ 27.66 $\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$ คือค่าคงที่ในการสอบเทียบของ Pyranometer ผลลัพธ์จากการทดสอบนี้ออกมาในรูปของค่าความเข้มเฉลี่ย 24 ตำแหน่งของรังสีจำลองจากเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ที่เข้าสู่จานพาราโบลา



ภาพประกอบ 53 แผนภาพแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบสองขั้นตอนกับเครื่อง
จำลองรังสีอาทิตย์



ภาพประกอบ 54 แผนภาพแสดงตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบจานพาราโบลา 2 ขั้นตอน ชุดจำลองรังสี
อาทิตย์และถังจ่ายน้ำ

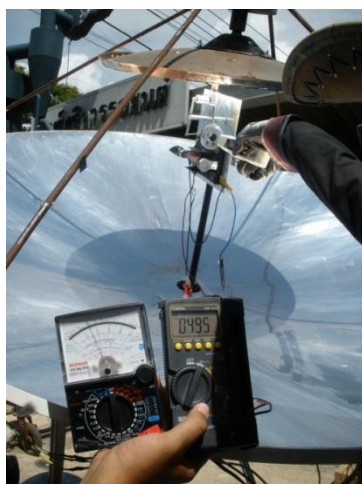


ภาพประกอบ 55 ภาพแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบสองชั้นตอนกับเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์และเครื่องยนต์สแตออลิ่ง

2.5 การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์สแตออลิ่งด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้ดวงอาทิตย์จริงและจานพาราโบลาแบบสองชั้นตอน

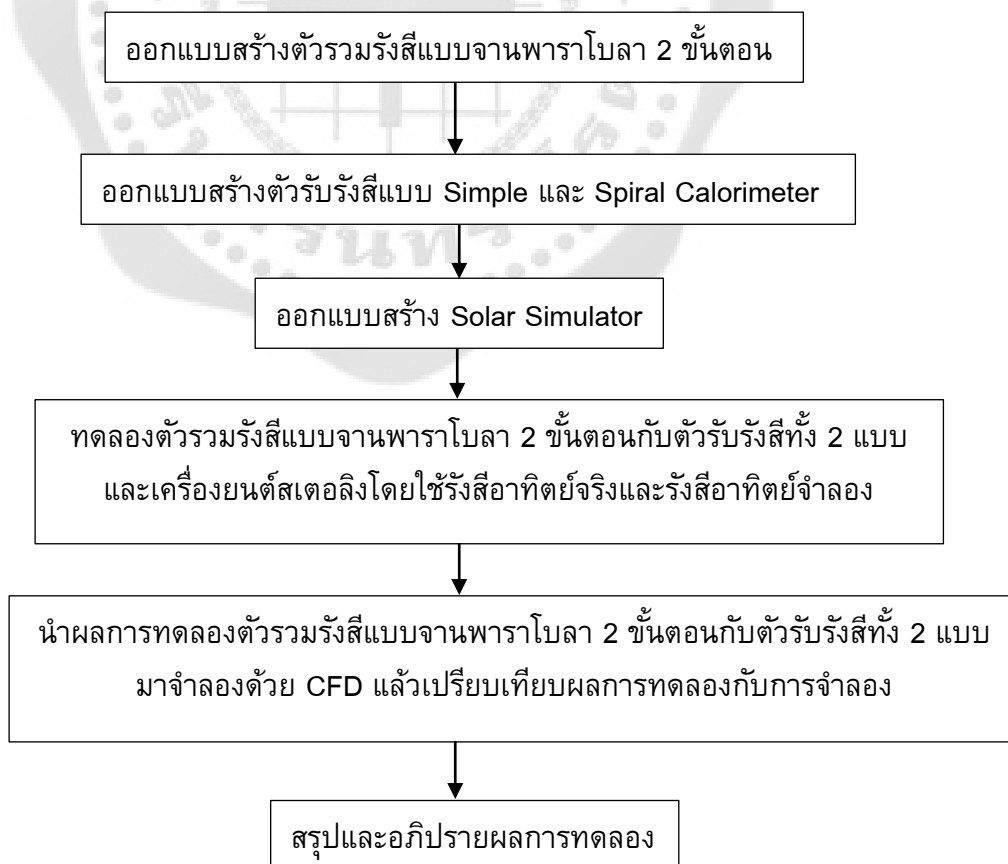
การทดสอบนี้จะทำการทดสอบหาสมรรถนะของเครื่องยนต์โดยมีขั้นตอนการทดสอบภาพประกอบ 56 ดังต่อไปนี้

1. ประกอบเครื่องยนต์สแตออลิ่งกับจานพาราโบลาสองชั้นตอน
2. จัดเตรียมเครื่องยนต์และอุปกรณ์กับเครื่องมือวัดต่างๆให้ครบและพร้อมใช้งาน
3. นำระบบเครื่องยนต์สแตออลิ่งและจานพาราโบลาไปปรับแสงอาทิตย์
4. เปิดสวิตช์ระบบติดตามดวงอาทิตย์ให้ระบบทำงาน ระบบจะหมุนจานพาราโบลาให้ตั้งฉากกับดวงอาทิตย์
5. เมื่ออุณหภูมิของสารทำงานสูงพอที่จะสตาร์ทเครื่องยนต์ได้แล้วจึงสตาร์ทเครื่องยนต์จากนั้นจดบันทึกความเร็วรอบของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นด้วย
6. เมื่อสังเกตได้ว่าเครื่องยนต์อยู่ในสถานะคงตัวซึ่งอุณหภูมิต่างๆและความเร็วรอบจะมีค่าคงที่จึงเริ่มทดสอบสมรรถนะโดยเริ่มเปิดหลอด LED ของ Load bank เพื่อเป็นภาระแก่เครื่องยนต์จดบันทึกค่าของกระแสไฟฟ้า, แรงดันกระแสไฟฟ้า, และความเร็วรอบทุกครั้งที่เพิ่มภาระแก่เครื่องยนต์จนกระทั่งเครื่องยนต์หยุด



ภาพประกอบ 56 การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้ดวงอาทิตย์จริงและจานพาราโบลาแบบสองชั้นตอน

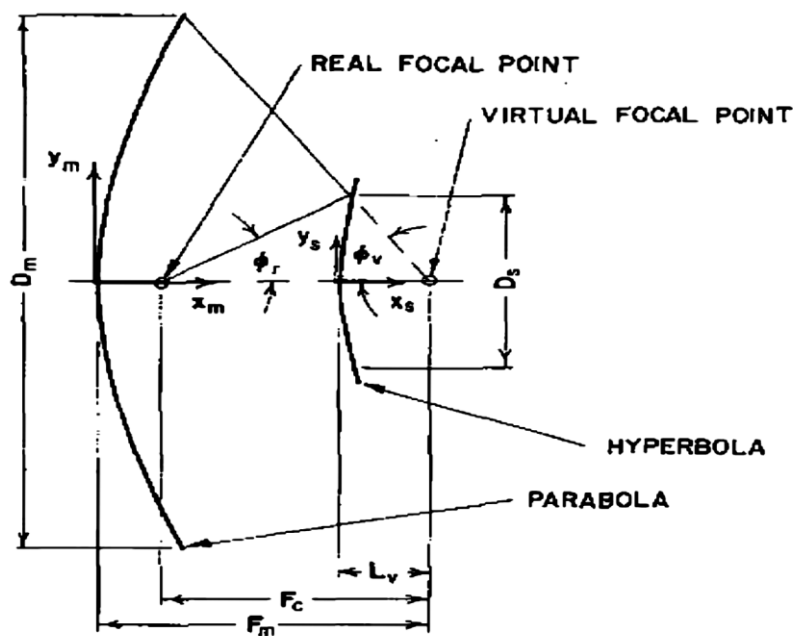
3. แผนภาพการดำเนินการวิจัย



บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย

เนื้อหาในบทนี้แบ่งออกเป็น การออกแบบตัวรวมรังสีและผลการทดลอง 5 การทดลอง หลังจากการศึกษาพารามิเตอร์ในการออกแบบและสร้างตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบสองชั้นตอน การออกแบบตัวรวมรังสีอาทิตย์นี้ ใช้แนวคิดในการออกแบบจากกล้องโทรทรรศน์แบบแคซีเกรน ดัง ภาพประกอบ 57 โดยกำหนดให้ตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบจานพาราโบลาชั้นตอนที่ 1 มีขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 1.68 เมตร และชั้นตอนที่สองมีขนาด 0.652×0.606 เมตร มีพื้นที่รับรังสีรวม 2.216 ตารางเมตร และเมื่อหักพื้นที่ของจานชั้นตอนที่สองพบว่า มีพื้นที่ 1.9064 ตารางเมตร



ภาพประกอบ 57 แสดงรูปทรงแคซีเกรน

ที่มา: Srinivasan Ashwyn. (2009).

1. การออกแบบตัวรวมรังสีแบบสองขั้นตอน

รูปทรงแคชเกรน แสดงดังภาพประกอบ 57 ประกอบด้วยพื้นผิวพาราโบลาสำหรับจานขนาดใหญ่และขนาดเล็ก จุดโฟกัสจุด 1 จาก 2 จุดเป็นจุดโฟกัสจริงของระบบที่ตั้งอยู่ที่กึ่งกลางของตัวรวมรังสีอาทิตย์ และเป็นที่ตั้งของตำแหน่งของตัวดูดซับพลังงาน รูปทรงเรขาคณิตของแคชเกรน แสดงดังภาพประกอบ 57 ประกอบด้วยผิวโค้งของจานหลักและจานรอง โดยจุดโฟกัสของจานรองเป็นจุดโฟกัสของระบบ ตั้งอยู่ที่กึ่งกลางของตัวรวมรังสีอาทิตย์ จุดโฟกัสอีกจุดหนึ่งเป็นจุดโฟกัสของจานหลัก จากการออกแบบตามหลักของแคชเกรนทำให้รังสีที่ตกกระทบบนพื้นผิวของจานทั้งสองพุ่งตรงไปยังจุดโฟกัสหลักและให้ความเข้มข้นรังสีที่สูงกว่าใช้จานหลักเพียงอย่างเดียว

สมการแสดงความสัมพันธ์ของมุมบนจานหลัก

$$\tan \frac{1}{2} \phi_m \pm \sin \beta = \pm \frac{1}{4} \frac{D_m}{F_m} \quad (4-1)$$

เครื่องหมายบวกแสดงว่าเป็นรูปทรงแบบแคชเกรน เครื่องหมายลบแสดงว่าเป็นรูปทรงแบบเกรกรอ เรียนซึ่งส่งผลต่อรูปทรงของจานพาราโบลาที่เป็นจานรองให้มีรูปทรงเป็นเลนส์นูนหรือเลนส์เว้า ในกรณีของจานรองความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการ

$$\frac{\tan \phi_v}{\tan \phi_r} = 2 \frac{F_c}{D_s} \quad (4-2)$$

$$1 - \frac{\sin \frac{1}{2}(\phi_v - \phi_r)}{\sin \frac{1}{2}(\phi_v + \phi_r)} = 2 \frac{L_v}{F_c} \quad (4-3)$$

พิกัดของจานหลักสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$x_m = \frac{y_m^2}{4F_m} \quad (4-4)$$

พิกัดของจานรองสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$x_s = a \left[\sqrt{1 + \left(\frac{y_s}{b} \right)^2} \right] - 1 \quad (4-5)$$

เมื่อระยะเยื้องศูนย์กลางคือ

$$e = \frac{\sin \frac{1}{2}(\phi_v + \phi_r)}{\sin \frac{1}{2}(\phi_v - \phi_r)} \quad (4-6)$$

$$a = \frac{F_c}{2e}$$

$$b = a \sqrt{e^2 - 1}$$

ปริมาณ e , a และ b คือพารามิเตอร์ของจานรอง, e คือระยะเยื้องศูนย์กลาง, a คือระยะแบ่งครึ่งแกนหลัก b คือระยะแบ่งครึ่งแกนรอง

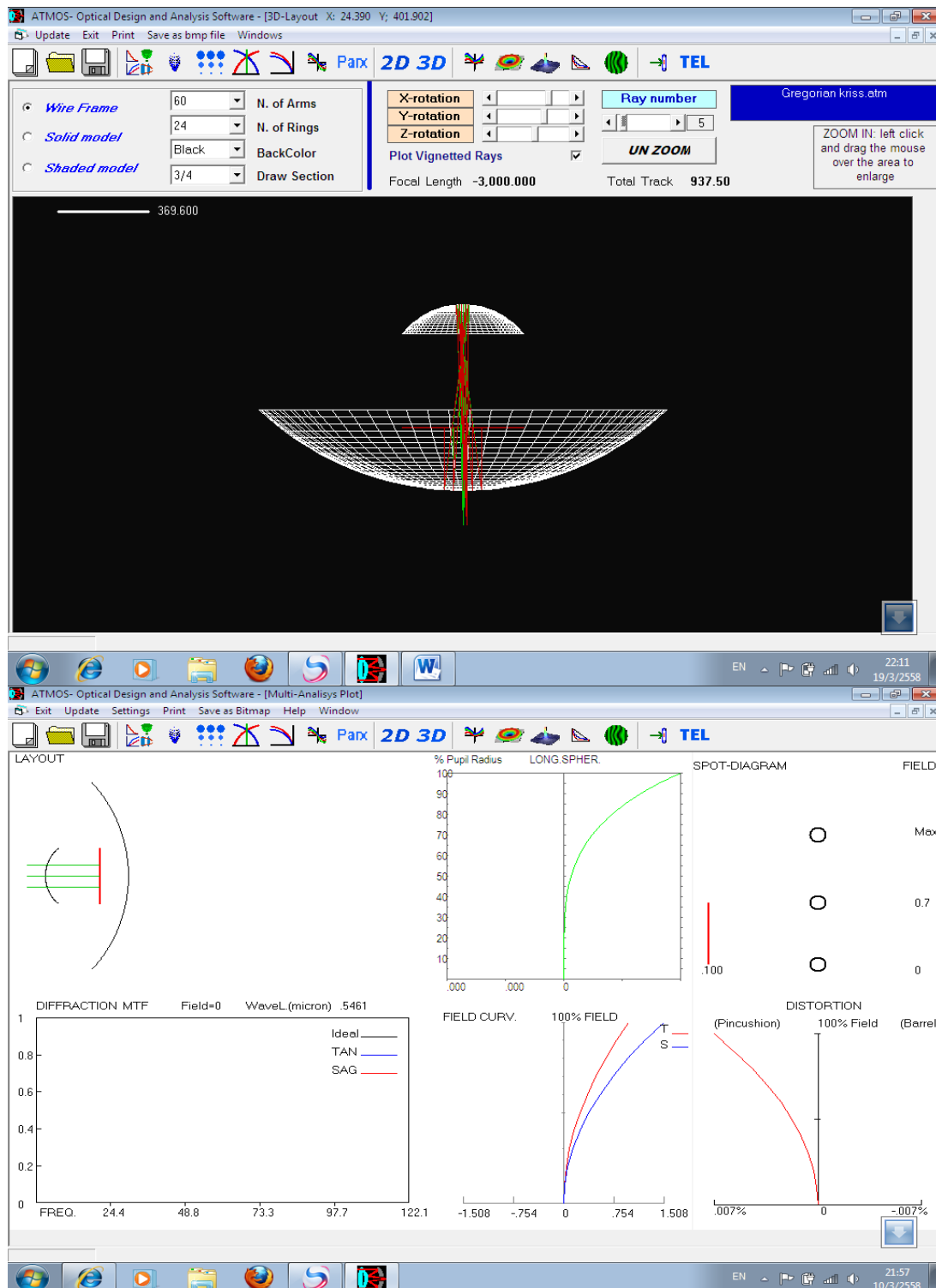
1.1 ตัวแปรในการออกแบบ

ในการออกแบบตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบสองชั้นตอนรูปทรงแคชชีเกรน-เกรกรอเรียนโดยใช้โปรแกรมแคชชีเกรน แอนเทนนาสำหรับการออกแบบจานรับส่งสัญญาณดาวเทียม มีค่าพารามิเตอร์แสดงได้ดังตาราง 4

ตาราง 4 ตัวแปรในการออกแบบและผลที่ได้จากการใช้โปรแกรมแคชชีเกรน แอนเทนนา

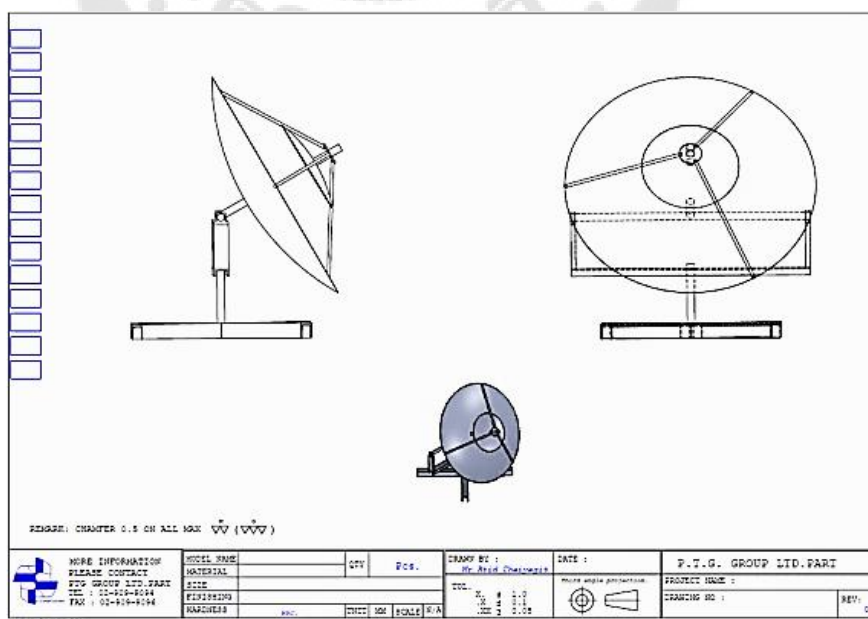
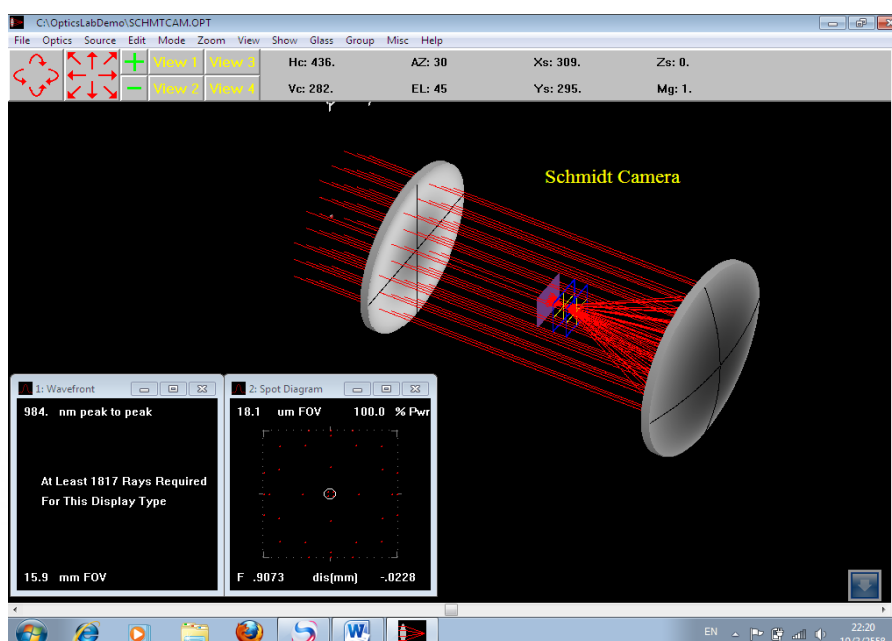
DATA INPUT	RESULTS	DATA INPUT	RESULTS
F_c (mm)	94.00	ϕ_r (rad)	0.5480
D_s Sub ref (mm)	652.00	ϕ_r (deg)	31.4003
D_m main Dish (mm)	1680.00	F_c/F_m = Magnification	2.0145
F_m Focal L Main Dish (mm)	672	F_e equivalent focal length	1494.1817
h Dish Depth (mm)	237.83	F_m/D_m Main Dish	0.4415
ϕ_v (rad)	1.0305	F_c/D_m Equivalent Dish	0.8894
ϕ_v (deg)	59.0424	Eccentricity of sub reflector	2.9714
$1/\tan \phi_v$	1.6382	L_v (mm)	31.1824

ขั้นตอนการออกแบบเริ่มจากการวิเคราะห์รายละเอียดของเส้นลำแสงที่ตกกระทบกับตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบสองชั้นตอนโดยใช้ซอฟต์แวร์ ATMOS Optical Design and Analysis เพื่อใช้ตรวจสอบรูปทรงของจานพาราโบลาแบบสองชั้นตอนที่มีระยะโฟกัสที่เหมาะสมจากด้านหลังของจานหลัก รายละเอียดของเส้นลำแสงแสดงดังภาพประกอบ 57 โดยมีสมมติฐานว่าตัวรวมรังสีมีรูปทรงที่สมบูรณ์และมีผิวสะท้อนรังสีที่มีคุณภาพดี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจุดโฟกัสประมาณได้ว่ามีขนาด 25 มม. แต่เนื่องจากในความเป็นจริงไม่สามารถทำผิวของจานพาราโบลาได้สมบูรณ์แบบ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของจุดโฟกัสจึงมีขนาดที่โตกว่าที่ออกแบบไว้เล็กน้อย ความเข้มของพลังงานที่ตกกระทบแสดงดังภาพประกอบ 57 ระยะโฟกัสของระบบตัวรวมรังสีแบบสองชั้นตอนอยู่ที่ระยะ 7 ซม. ทางด้านหลังของจานรอง



ภาพประกอบ 58 ATMOS Ray-Trace with Focus Spot

จากภาพประกอบ 58 แสดงผิวโค้งของจานรองที่ถูกดัดแปลงจากรูปทรงแบบเดิมที่เป็นเลนส์นูนให้เป็นแบบเลนส์เว้าทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจานรองมีขนาดใหญ่ขึ้น และเรียกว่ารูปทรงแบบเกรกรอเรียน โดยจุดโฟกัสของรูปทรงเกรกรอเรียนมีความยาวโฟกัสสั้นกว่าระยะโฟกัสของจานหลัก เมื่อนำหลักการนี้มาใช้ออกแบบตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลา 2 ชั้นตอน (Optics Lab demo) จะทำให้ตำแหน่งโฟกัสของระบบอยู่ระหว่างจานใหญ่และจานรองดังภาพประกอบ 59



ภาพประกอบ 59 ตัวรวมรังสีสองชั้นตอนรูปทรงแคชชีเกรน-เกรกรอเรียน

สถานที่ทำการทดลองอยู่ที่ อาคารปฏิบัติการเทคโนโลยีเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ตำบล คลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานีตั้งอยู่ที่ ละติจูด 14.134°N ลองจิจูด 100.611°E ดังภาพประกอบ 60



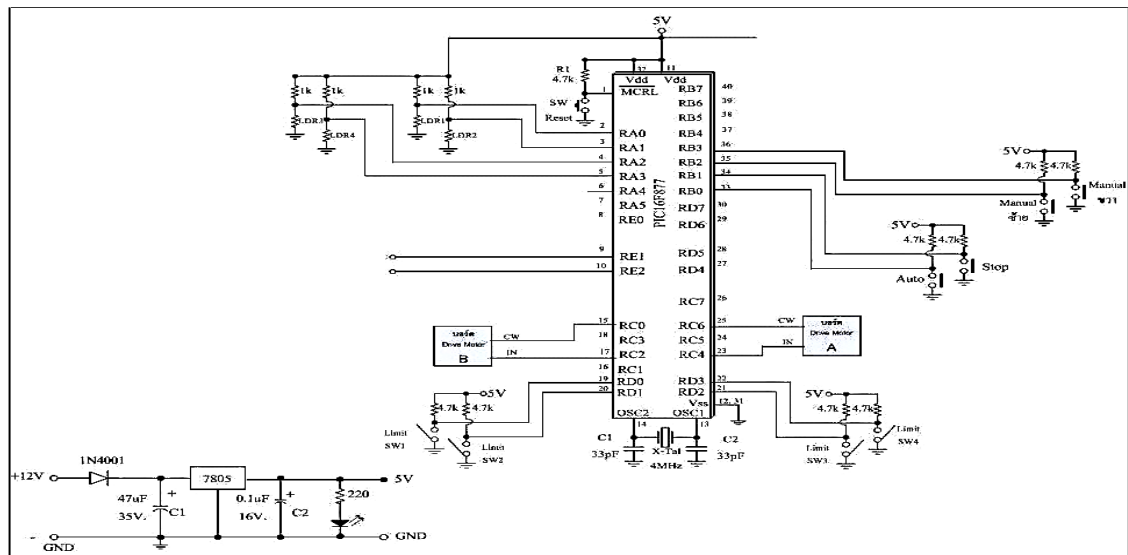
ภาพประกอบ 60 สถานที่ทำการทดลอง ตำแหน่ง 14.134°N , 100.611°E

1.2. ระบบติดตามดวงอาทิตย์

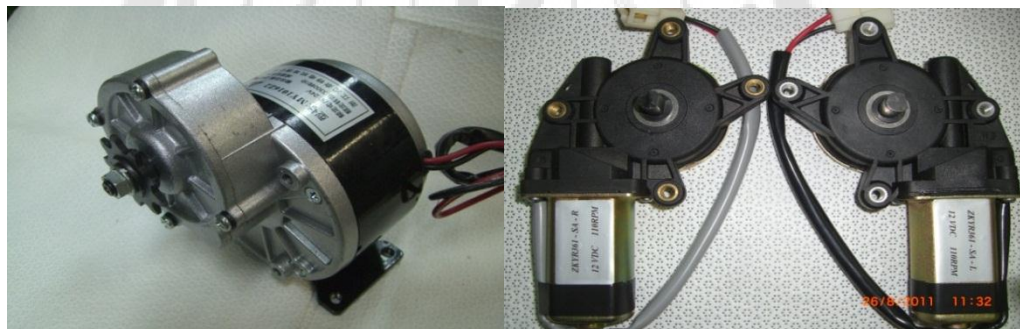
ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกนถูกติดตั้งกับตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบสองขั้นตอน เพื่อให้จานพาราโบลาทำมุมตั้งฉากกับดวงอาทิตย์ตลอดเวลาที่ทำการทดลอง โดยระบบติดตามดวงอาทิตย์ประกอบไปด้วย เซนเซอร์วัดแสง LDR จำนวน 4 ตัว ติดตั้งไว้ที่มุมของจานหลักใช้มอเตอร์ ขนาด 24 VDC 250 W มีอัตราทดเกียร์ 1:5 ที่ 600 rpm สำหรับหมุนจานในแนวอัลติจูด และ มอเตอร์ขนาด 12 VDC 110 rpm สำหรับหมุนจานในแนวอะซิมุท ใช้ไฟกระแสตรงจากแบตเตอรี่ ขนาด 5 A-h และมีกล่องอิเล็กทรอนิกส์ควบคุม แสดงดังภาพประกอบ 61



ภาพประกอบ 61 ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกนกับจานพาราโบลาสอง
ชั้นตอน



ภาพประกอบ 62 วงจรอิเล็กทรอนิกส์ของระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกน



ภาพประกอบ 63 มอเตอร์ขนาด 24 VDC 250W มีอัตราทดเกียร์ 1:5 ที่ 600 rpm สำหรับหมุนจานในแนว Elevation และ มอเตอร์ขนาด 12 VDC 110 rpm สำหรับหมุนจานในแนวมุมอะซิมุท

สำหรับตำแหน่งคงที่ใด ๆ บนผิวโลก ดวงอาทิตย์จะเคลื่อนที่จากทิศตะวันออกไปยังทิศตะวันตก มุมนี้เป็นมุมระหว่างเส้นที่ชี้ไปยังดวงอาทิตย์และทิศใต้ เป็นมุมระหว่างเส้นใต้และภาพฉายของที่นั่งของเส้นดวงอาทิตย์บนระนาบแนวนอน เครื่องหมายในการใช้มุมอะซิมุท เป็นบวก อยู่ทิศตะวันออก เป็นลบเมื่ออยู่ทิศตะวันตก มุมอะซิมุทมีค่าเป็น 0 ที่เวลาเที่ยงวัน เข้าใกล้ -90° เมื่อดวงอาทิตย์ขึ้น และ เข้าใกล้ 90° เมื่อดวงอาทิตย์ตก โดยขึ้นอยู่กับฤดูกาล มุมอะซิมุทสามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$\sin \theta_Z = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cosh} \quad (4-7)$$

มุมความสูงของดวงอาทิตย์ (Altitude angle)

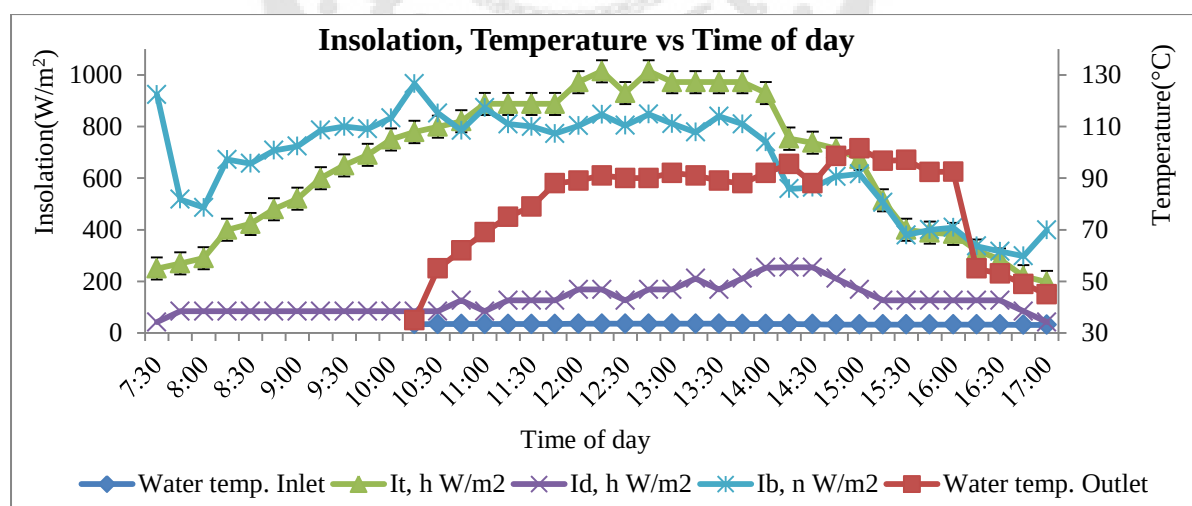
มุมความสูงของดวงอาทิตย์เป็นมุมระหว่างเส้นที่ชี้ไปยังดวงอาทิตย์ และเส้นของฟ้าซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของมุมซีนิธ มุมนี้มีค่าเป็น 0° เมื่อดวงอาทิตย์ขึ้นและตก มุมความสูงของดวงอาทิตย์สามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$\sin \alpha = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (4-8)$$

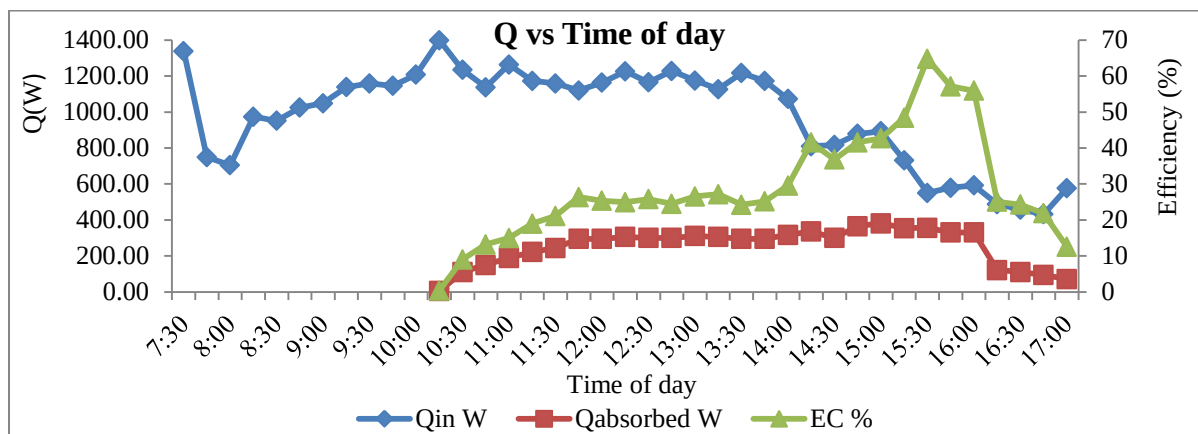
2. ผลการทดสอบประสิทธิภาพของตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบพาราโบลาสองชั้นตอนด้วยดวงอาทิตย์จริง และเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์โดยใช้แคลอริมิเตอร์ดูดซับพลังงาน 2 แบบ

การทดลองดำเนินการในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสไม่มีเมฆ และลมสงบ วันที่ (12, 14 และ 15 พฤษภาคม 2557) โดยไม่คิดค่าการสูญเสียความร้อนจากการพาและแผ่รังสีความร้อนของตัวรับรังสีเนื่องจากมีค่าน้อยมาก

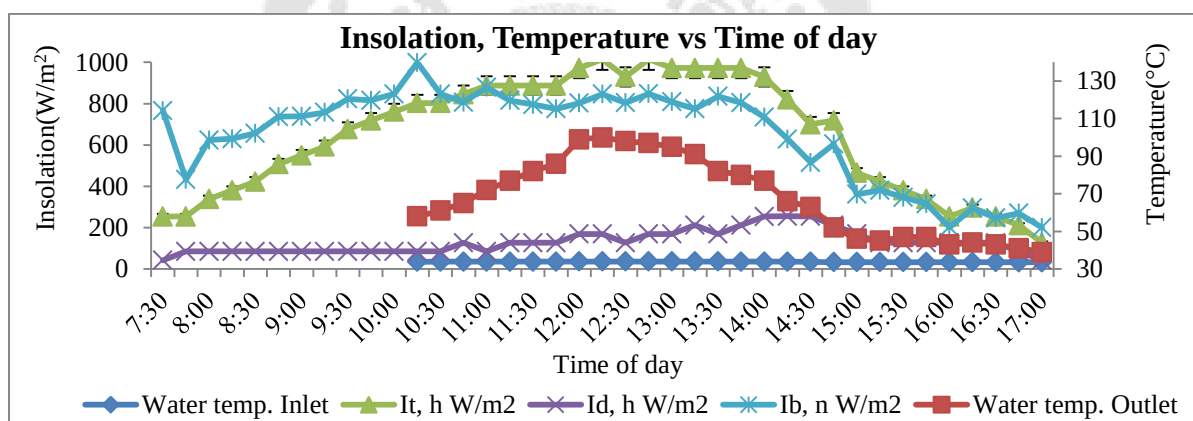
ค่ารังสีตรง รังสีกระจายและรังสีรวมแสดงได้ดังภาพประกอบ 63 จากการทดลองพบว่าค่าพลังงานความร้อนที่ดูดซับเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของผลต่างของอุณหภูมิซึ่งแปรผันจากค่า $92.5-97^\circ\text{C}$ สารตัวกลางสำหรับการแลกเปลี่ยนความร้อนคือน้ำที่ไหลผ่านอุปกรณ์วัดความร้อนแบบแคลอริมิเตอร์ด้วยอัตราการไหล 0.133 kg/s



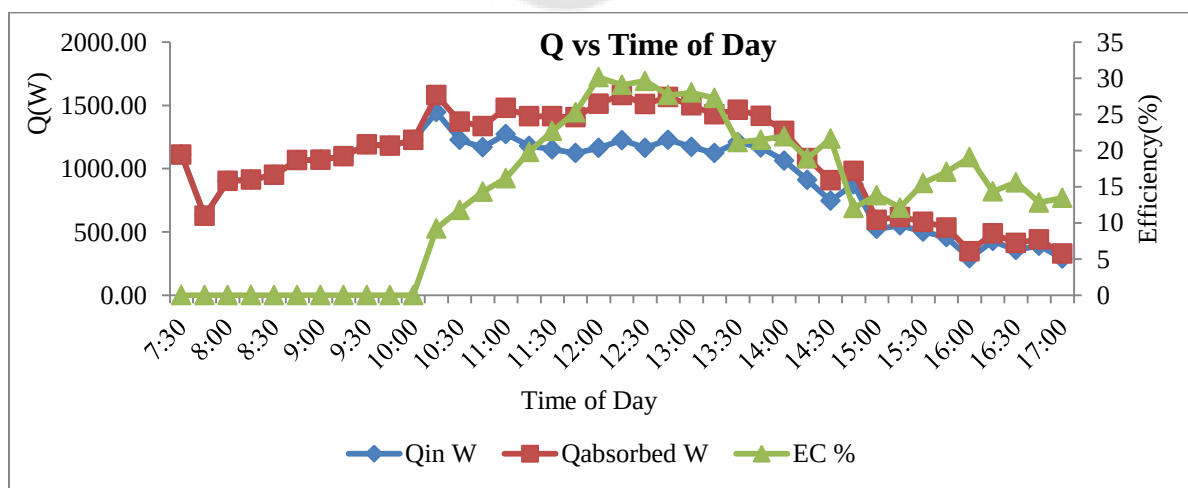
ภาพประกอบ 64 Time variation of Insolation on May 12, 2014



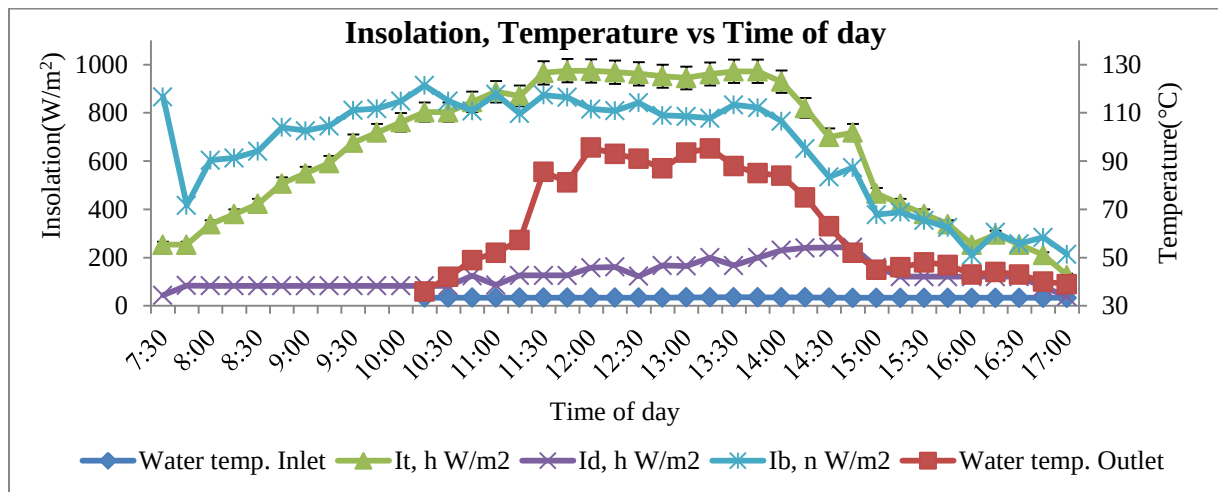
ภาพประกอบ 65 Time variation of Energy and efficiency on May 12, 2014



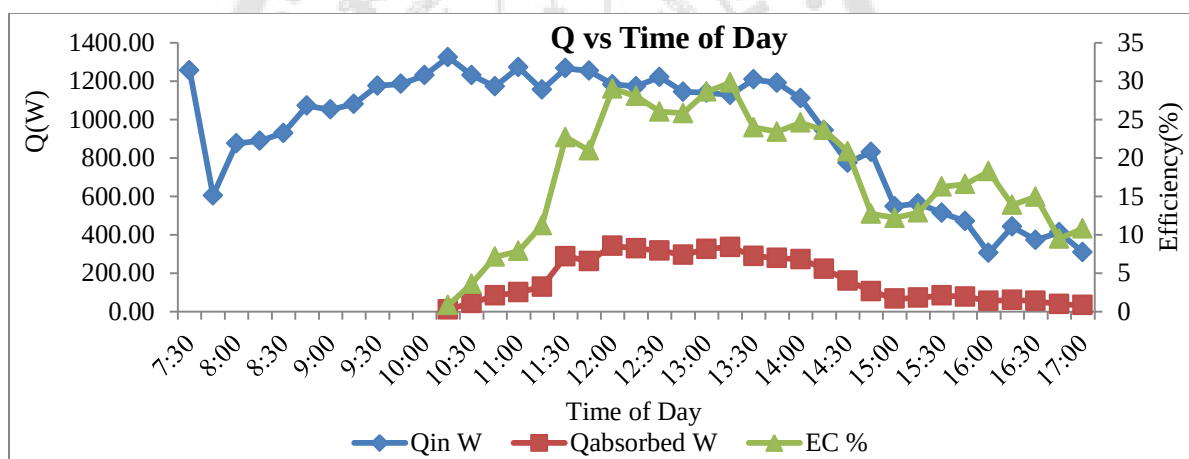
ภาพประกอบ 66 Time variation of Insolation on May 14, 2014



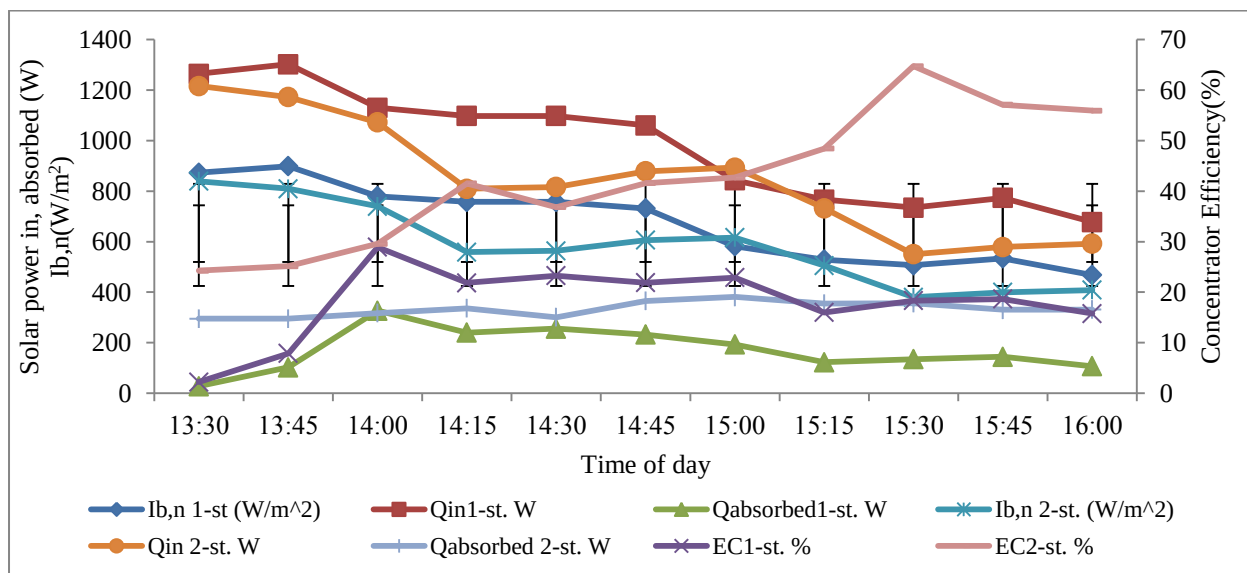
ภาพประกอบ 67 Time variation of Energy and efficiency on May 14, 2014



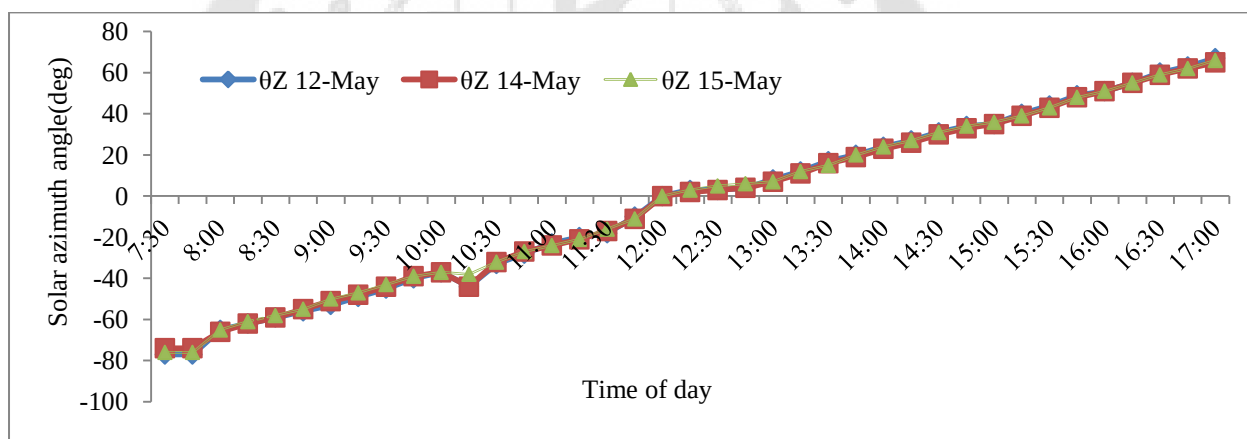
ภาพประกอบ 68 Time variation of Insolation on May 15, 2014



ภาพประกอบ 69 Time variation of Energy and efficiency on May 15, 2014



ภาพประกอบ 70 Energy and efficiency comparisons between 1-st on May 12 and 2-st on May 16, 2014



ภาพประกอบ 71 Solar azimuth measurement results of 3 selected days

ภาพประกอบ 65, 67 และ 69 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนดูดซับ ($Q_{absorbed}$) และรังสีตรงจากดวงอาทิตย์ที่ตัวรวมรังสีได้รับตั้งแต่เวลาเช้าถึงช่วงบ่าย การทดลองดำเนินการจากเวลา 07:30 น. - 17:00 น. พบว่าในช่วงบ่าย ค่าความร้อนดูดซับ ($Q_{absorbed}$) มีค่าสูงกว่าในตอนเช้าและตอนเที่ยง เนื่องจากความจริงที่ว่า การถ่ายเทความร้อนที่มีประสิทธิภาพได้รับอิทธิพลจากความร้อนที่ถูกดูดซับลงไปในน้ำภายในแคลอริมิเตอร์ ภาพประกอบ 65, 67 และ 69 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ค่าความร้อนดูดซับ ($Q_{absorbed}$) เพิ่มขึ้นถ้าสามารถลดการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนและการแผ่รังสีโดยหุ้มแคลอริมิเตอร์ด้วยฉนวนกันความร้อนอย่างหนาซึ่งทำจากยาง ทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนจากผนังของตัวดูดซับพลังงานลงไปในน้ำที่ไหลอยู่ภายใน

เพิ่มขึ้น ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างจานพาราโบลา 2 ชั้นตอน และ 1 ชั้นตอนที่ในช่วงเวลาทดลองเดียวกันของวันที่ 12 พฤษภาคมและ 16 พฤษภาคม ดังแสดงในภาพประกอบ 18 พบว่า PDC 2 ชั้นตอนมีประสิทธิภาพมาก (42.54% โดยเฉลี่ย) กว่า 1 ชั้นตอน PDC (17.97% โดยเฉลี่ย) ค่ามุมอะซิมุทที่วัดได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 3 วันจึงแสดงให้เห็นการทำงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่เชื่อถือได้ดังแสดงในภาพประกอบ 71

สรุปผลการทดลองที่ 1

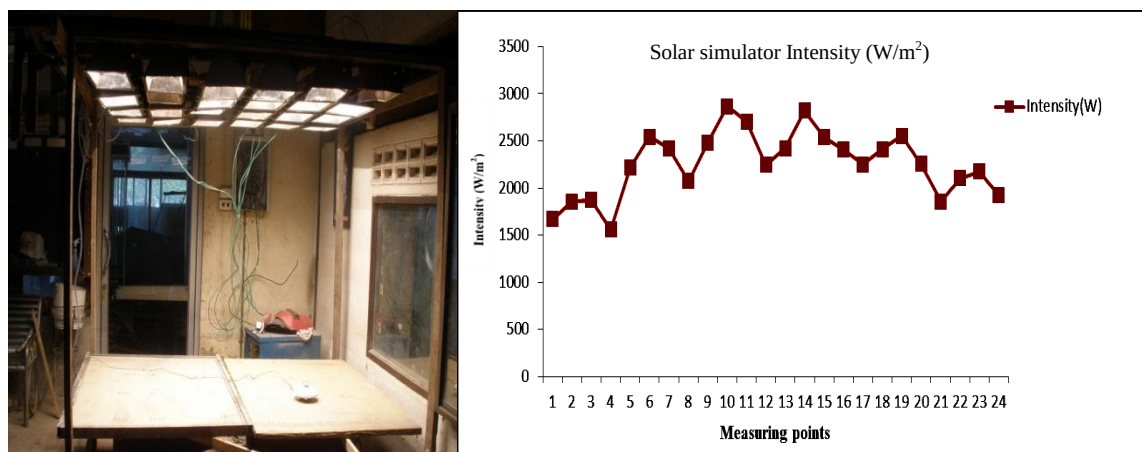
ตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบจานพาราโบลาสองชั้นตอนพร้อมกับระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกนได้ถูกออกแบบสร้างและประเมินประสิทธิภาพการทำงาน จากการทดลองที่ใช้น้ำเป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อนมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุด 64.746 % และมีค่าเฉลี่ย 42.54 % ประสิทธิภาพเชิงแสงเป็น 85.5 % และอัตราส่วนการรวมรังสีเชิงเรขาคณิตรวม 254.918 (มาจากการคำนวณ) สามารถทำให้น้ำมีความร้อนค่อนข้างสูงระดับอุณหภูมิใกล้ 101.5 °C ซึ่งเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้กับการผลิตน้ำร้อนในครัวเรือนหรืออุตสาหกรรม

3. การทดสอบหาค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์จากเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบจานพาราโบลา

เครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ที่ใช้ในการวิจัย สร้างจากหลอดฮาโลเจนขนาด 1500 W จำนวน 24หลอด (24×1.5 kW tungsten halogen lamp Osram Haloline 64740L J R7s) ค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์จำลองที่ตกกระทบจานพาราโบลาเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการคำนวณหาอัตราส่วนการรวมรังสี (Concentration ratio) ของตัวรวมรังสีอาทิตย์การทดสอบหาค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์จำลองจากเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบจานพาราโบลา ดำเนินการเมื่อวันที่ 22 พฤษภาคม 2557 แสดงดังตาราง 5 และภาพประกอบ 72 โดยมีค่าเฉลี่ยของรังสีอาทิตย์จำลองเป็น 2260.833 W/m² ตาราง 5 ค่าความเข้มรังสีจากเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ 24 ตำแหน่ง

Position	column				
row	1	2	3	4	ave.
	1670	1856	1874	1599	1749.750
5	2215	2545	2419	2075	2313.500
9	2484	2865	2706	2246	2575.250
13	2422	2819	2536	2405	2545.500
17	2252	2409	2551	2255	2366.750
21	1855	2106	2174	1922	2014.250
ave.	2149.667	2433.333	2376.667	2083.667	2260.833

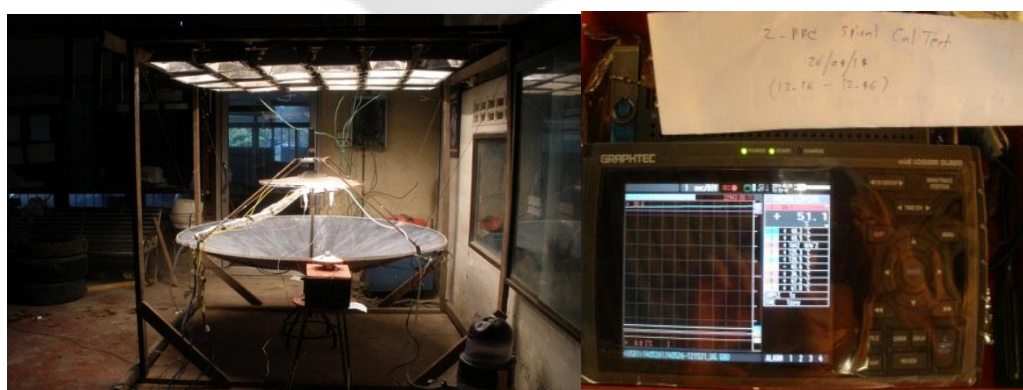
การทดสอบหาค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์จำลองจากเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์โดยกำหนดระยะห่างจากโคมไฟถึงพื้นซึ่งวางไพรานอมิเตอร์ไว้เป็นระยะ 125 cm ดังภาพประกอบ 72



ภาพประกอบ 72 การทดสอบหาค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์จำลอง

4. การทดสอบหาค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์จำลองจากเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ตรงจุดโฟกัสของจานพาราโบลา

ค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์จำลองที่ได้จากการรวมรังสี (Concentrated simulated intensity) ตรงจุดโฟกัสเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการคำนวณหาค่าความร้อนที่ถ่ายเทให้กับตัวรับรังสีอาทิตย์ซึ่งเป็นความร้อนที่ป้อนให้แก่สารทำงานที่อยู่ภายในเครื่องยนต์อีกทอดหนึ่ง การทดลองแสดงดังภาพประกอบ 73



ภาพประกอบ 73 การทดสอบหาค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์จำลองจากเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ตรงจุดโฟกัสของจานพาราโบลา

การทดสอบหาค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์จำลองจากเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ตรงจุดโฟกัส
ของจานพาราโบลาที่มีผลดังนี้

ตาราง 6 ค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์จำลองจากเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ตรงจุดโฟกัส

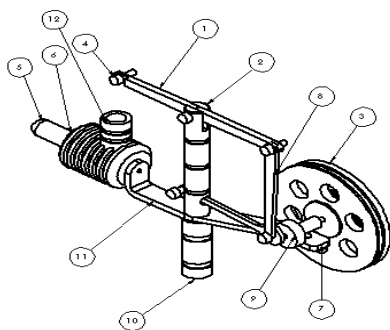
Day		26 May. 2014					Latitude:	VRU	Ambient conditions:		
Start		11:00 a.m.					34	°C DB	26		°C WB
Stop		16:36 p.m.					33	°C DB	24		°C WB
Heat source		24 x 1500 W Halogen lamp			Calorimeter mass		0.437 kg		c _p	385 J/kg K	
Absorber area		0.03142		m ²	Water mass		0.5 kg		c _p	4186 J/kg K	
No.	Distance	Time, s			Water temp., °C			ΔT/Δt	Q _s	I	Qcal
	mm	t ₁	t ₂	Δt	T ₁	T ₂	ΔT	°C/s	W	W/m ²	W
1	1200	0	100	100	35.500	41.800	6.300	0.063	142.458	4534.582	142.531
2	1100	0	100	100	35.500	43.500	8.000	0.080	180.900	5758.200	180.992
3	1000	0	100	100	35.500	45.000	9.500	0.095	214.818	6837.862	214.928
4	900	0	100	100	35.500	50.500	15.000	0.150	339.187	10796.624	339.360
5	800	0	100	100	35.500	55.000	19.500	0.195	440.943	14035.612	441.168
6	700	0	100	100	35.500	58.000	22.500	0.225	508.780	16194.936	509.040
7	648	0	100	100	35.500	59.000	23.500	0.235	531.393	16914.711	531.664
8		0	100	100	35.500	45.500	10.000	0.100	226.125	7197.750	226.240
9		0	100	100	37.600	51.100	13.500	0.135	305.268	9716.962	305.424
10		0	100	100	36.500	60.400	23.900	0.239	540.438	17202.621	540.714
11		0	100	100	36.000	64.400	28.400	0.284	642.194	20441.609	642.522
12		0	100	100	36.000	68.300	32.300	0.323	730.382	23248.731	730.755
13		0	100	100	36.000	69.500	33.500	0.335	757.517	24112.461	757.904
14		0	100	100	36.000	70.300	34.300	0.343	775.607	24688.281	776.003
15		0	100	100	36.000	69.900	33.900	0.339	766.562	24400.371	766.954
16		0	100	100	36.000	69.800	33.800	0.338	764.301	24328.393	764.691
17		0	100	100	36.000	68.800	32.800	0.328	741.688	23608.619	742.067
18		0	100	100	36.000	66.000	30.000	0.300	678.374	21593.249	678.720
19		0	100	100	36.000	67.000	31.000	0.310	700.986	22313.024	701.344
20		0	100	100	36.000	68.000	32.000	0.320	723.598	23032.799	723.968
21	600	0	100	100	36.000	70.000	34.000	0.340	768.823	24472.348	769.216
22	500	0	100	100	36.000	75.000	39.000	0.390	881.886	28071.223	882.336
23	400	0	100	100	36.000	80.000	44.000	0.440	994.948	31670.098	995.456
24	300	0	100	100	36.000	82.000	46.000	0.460	1040.173	33109.648	1040.704
25	200	0	100	100	36.000	88.000	52.000	0.520	1175.847	37428.298	1176.448
26	100	0	100	100	36.000	91.000	55.000	0.550	1243.685	39587.623	1244.320
27	90	0	100	100	36.000	96.000	60.000	0.600	1356.747	43186.497	1357.440

จากผลการทดสอบหาค่าความเข้มจากเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ที่ประกอบด้วยหลอดฮาโลเจนขนาด 1500 W จำนวน 24 ดวง สะท้อนจากพื้นผิวของจานพาราโบลาแบบสองชั้นตอนที่มีพื้นที่รวม 1.9064 ตารางเมตร สามารถคำนวณค่าความร้อนที่น้ำดูดซับไว้ได้ 531.393 J/s ทำให้ได้ค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์จำลองเป็น 16,914.711 W/m² ตรงจุดโฟกัส (ที่ระยะของตัวดูดซับห่างจาก แหล่งกำเนิดความร้อนเป็น 648 mm)

5. การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้เครื่องจำลองรังสีอาทิตย์และจานพาราโบลาแบบสองขั้นตอน

อุปกรณ์ในการทดลองเครื่องยนต์สเตอร์ลิงพลังงานแสงอาทิตย์

แผนผังแสดงเครื่องยนต์สเตอร์ลิงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังภาพประกอบ 1 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบ 1 สูบมีรูปทรงแบบแกมมา นำมาใช้ทดลองกับตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลา 2 ขั้นตอน เนื่องจากเครื่องยนต์มีขนาดเล็กและมีความเร็วต่ำ จึงสามารถใช้เครื่องวัดกำลังเครื่องยนต์แบบเชือกเพื่อวัดแรงบิดของเครื่องยนต์ได้ ล้อช่วยแรงมีขนาด 60 มิลลิเมตรใช้เป็นวงล้อเบรค การะเบรควัดได้โดยใช้ก้อนน้ำหนักขนาดเล็กเพิ่มภาระให้กับเครื่องยนต์แล้วอ่านค่าจากเครื่องชั่งสปริง ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ใช้เครื่องมือวัดรอบแบบแสงมีค่าความแม่นยำ ± 0.1 rpm



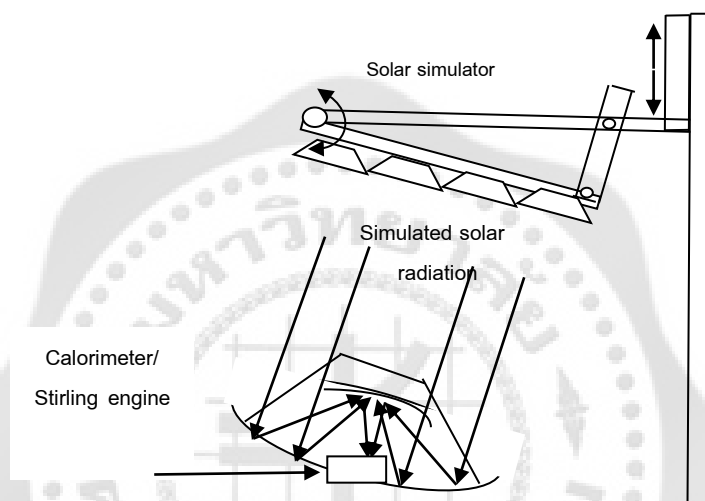
ITEM NO.	PART NAME	QTY.
1	beam	1
2	pivot	1
3	flywheel	1
4	bolt	1
5	hot end rod	1
6	regenerator	1
7	crank	1
8	walking beam	1
9	crank shaft	1
10	column	1
11	mounting bar	1

ภาพประกอบ 74 แผนผังแสดงเครื่องยนต์สเตอร์ลิงพลังงานแสงอาทิตย์แบบแกมมา

ตาราง 7 รายละเอียดของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงพลังงานแสงอาทิตย์และตัวรวมรังสีแบบสองขั้นตอน

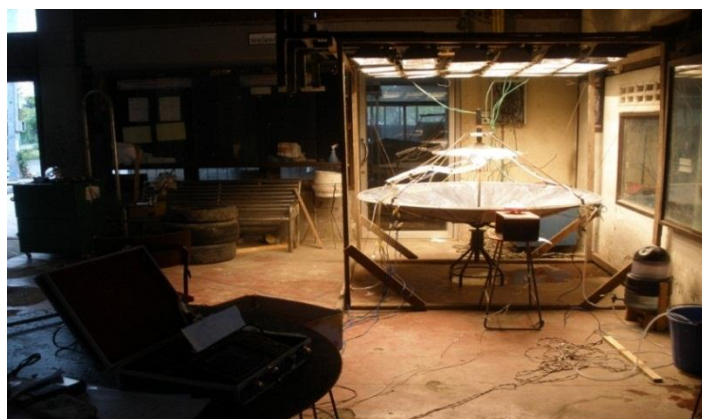
Engine	Type	Size
Stirling engine configuration	Gamma	
Power piston:	bore $\times$ stroke (mm)	12.0 $\times$ 3.0
Swept volume (cc)		0.339
Displacer:	bore $\times$ stroke (mm)	9 $\times$ 6.2
Swept volume (cc)		0.394
Compression ratio		4.94
Phase angle		90°
Concentrator	2-stage PDC	
Dish aperture area (m ²)		1.9064
F ₁ F ₂ (mm)		672,632
A main dish (m ²)		2.216
A sub dish (m ²)		0.3096
CR		254.918
Calorimeter area (m ²)		0.01887
Solar Simulator	Tungsten lamps	24 $\times$ 1500 W

อุปกรณ์การทดลองประกอบด้วย แคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลผ่านต่อเนื่อง เครื่องยนต์สเตอร์ลิง ประกอบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องวัดรังสีอาทิตย์ (CM11 Kipp & Zonnen) และตัวรวมรังสีอาทิตย์ แบบจานพาราโบลา 2 ชั้นตอน ดังภาพประกอบ เครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ (24×1.5 kW Tungsten halogen lamp Osram Haloline 64740L J R7s) ใช้เป็นตัวให้ความร้อนแก่เครื่องยนต์ อุณหภูมิ ด้านร้อนและด้านเย็นถูกวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิลและบันทึกในเครื่องบันทึกข้อมูล (GRAPHTEC midi logger GL-820 model)



ภาพประกอบ 75 แผนภาพแสดงเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์กับตัวรวมรังสี

ภาพประกอบ 76 แสดงการหาค่าความร้อนที่ป้อนเข้าเครื่องยนต์โดยใช้แคลอริมิเตอร์วัดความร้อนที่ดูดซับโดยใช้น้ำเป็นสารทำงาน น้ำไหลมาจากถังเก็บน้ำด้วยอัตราการไหลคงที่ประมาณ 1.33 g/s วัดอัตราการไหลโดยใช้บีกเกอร์และนาฬิกาจับเวลา



ภาพประกอบ 76 การทดลองแคลอริมิเตอร์กับเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์

อากาศเย็นที่ไหลผ่านครีป, T_c , วัดโดยใช้ T-type thermocouples. K-type thermocouples ใช้วัด อุณหภูมิด้านร้อน T_H เครื่องมือวัดอุณหภูมิแสดงดังภาพประกอบ 77



ภาพประกอบ 77 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง

ผลการวัดกำลังของเครื่องยนต์จากการทดลองได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าคำนวณเชิง ทฤษฎีโดยใช้ Schmidt analysis

การหาค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจริงของตัวรวมรังสีอาทิตย์ที่ให้ความร้อนกับเครื่องยนต์ ตัวรวมรังสี อาทิตย์จะสะท้อนรังสีอาทิตย์สองครั้งเพื่อเพิ่มอัตราส่วนความเข้มรังสี ไปยังตัวรับความร้อนของ เครื่องยนต์ Displacer ซึ่งจะอยู่ที่จุดโฟกัส การไหลเวียนของน้ำจากถังเก็บน้ำที่ไหลไปยังดูดซับ ความร้อน (แคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลผ่านต่อเนื่อง) วัดอัตราการไหลของมวลน้ำ อุณหภูมิทางเข้า และทางออกวัดโดยเทอร์โมคัปเปิลแบบ K

การทดลองระบบกับเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์

สำหรับการทดสอบเครื่องยนต์ที่ใช้เครื่องจำลองแสงอาทิตย์, พลังงานแสงอาทิตย์จากเครื่อง จำลองรังสีอาทิตย์ถูกวางไว้เหนือ จานพาราโบลาแบบ 2 ชั้นตอน รังสีจะถูกโฟกัสไปยัง Displacer หรือแผ่นดูดซับรังสี เปิดสวิตช์ไฟฟ้า หัว Displacer ถูกให้ความร้อนขึ้นจนถึงอุณหภูมิการทำงาน เครื่องยนต์จะติดไปจนถึงสภาวะคงตัว เครื่องยนต์ถูกเพิ่มภาระโดยใส่มวลเพิ่มขึ้น เพิ่มน้ำหนักโหลด จนเครื่องยนต์หยุด ความเร็วรอบเครื่องยนต์ค่าแรงจากตาชั่งสปริง และอุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิล จะถูกบันทึกไว้ในเครื่องบันทึกข้อมูล Graphtec Midi logger (แบบ GL820)

ค่าความร้อนป้อนเข้าลูกสูบเคลื่อนย้ายแสดงดังสมการ

$$q_{in} = m_w c_p (T_{w, out} - T_{w, in}) \quad (4-9)$$

เมื่อ m_w = อัตราการไหลของน้ำ kg/s
 c_p = ค่าความจุความร้อนของน้ำ 4.186 kJ/kg K
 $T_{w, out}$ = อุณหภูมิขาออกของน้ำ K
 $T_{w, in}$ = อุณหภูมิขาเข้าของน้ำ K

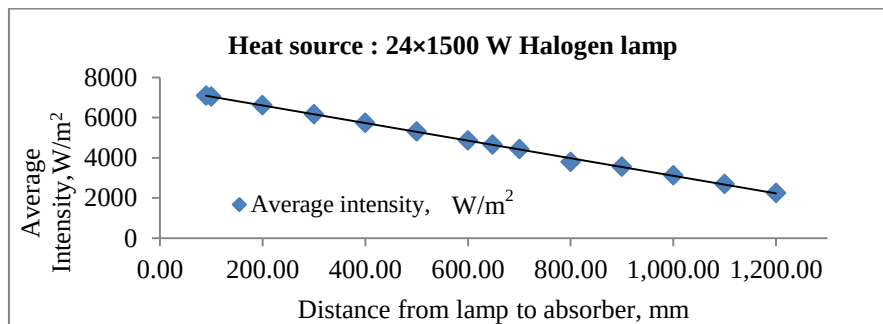
ผลการทดลอง

การทดลองกับเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์: การทดลองความเข้มรังสี

วัตถุประสงค์ของการทดลองนี้คือ เพื่อหาความเข้มรังสีจริงที่แผ่นดูดซับรังสีที่ระยะต่างๆกัน สำหรับนำไปคำนวณหาสมรรถนะของเครื่องยนต์ ผลการทดลองที่ระยะห่างต่างๆกันจากโคมไฟฮาโลเจน ไปยังตัวดูดซับรังสีแสดงดังตาราง 8 จากผลการทดลองพบว่าค่าความเข้มรังสีเฉลี่ยจะลดลงเมื่อระยะห่างของโคมไฟกับตัวดูดซับเพิ่มขึ้น

ตาราง 8 ความเข้มรังสีจริงที่แผ่นดูดซับรังสีที่ระยะต่างๆกัน

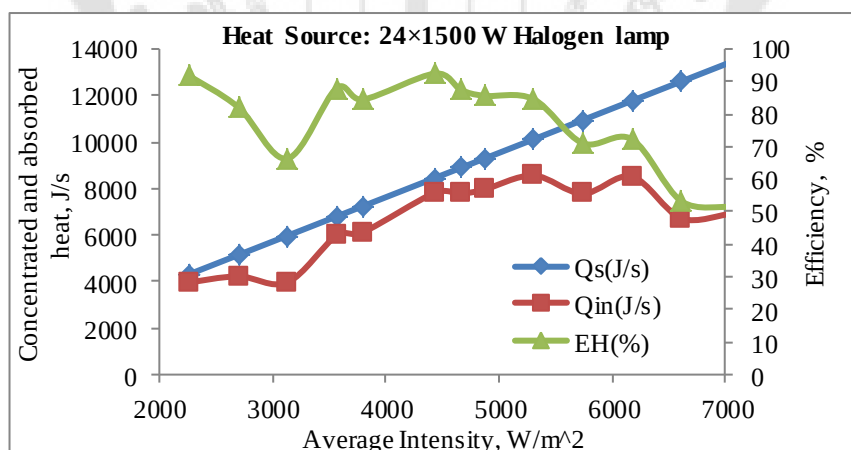
Distance from lamp to absorber, mm	I_s (W/m ²)	Q_s (J/s)	Q_{in} (J/s)	E_H (%)
1200	2259.17	4306.88	142.46	3.307
1100	2697.38	5142.29	180.9	3.518
1000	3129.59	5966.25	214.82	3.600
900	3564.80	6795.93	339.19	4.991
800	3800.00	7244.32	440.94	6.087
700	4435.22	8455.30	508.78	6.017
648	4663.52	8890.53	602.3	6.775
600	4870.43	9284.99	768.82	8.280
500	5305.64	10114.67	881.89	8.719
400	5740.85	10944.36	994.95	9.090
300	6176.06	11774.04	1040.20	8.834
200	6611.27	12603.73	1175.8	9.329
100	7046.48	13433.41	1243.7	9.258
90	7094.00	13524.00	1356.7	10.032



ภาพประกอบ 78 ผลจากการทดลองความเข้มรังสีที่ใช้แคลอริมิเตอร์เป็นอุปกรณ์วัดความร้อน

การทดสอบด้วยเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์: การทดลองแหล่งกำเนิดความร้อน

ความร้อนที่ป้อนเข้าเครื่องยนต์จริง q_{in} จากแสงอาทิตย์จำลองถูกทดลองโดยการใช้น้ำเพื่อดูดซับความร้อนป้อนเข้า ความร้อนที่เกิดขึ้นจริงกับเครื่องยนต์และประสิทธิภาพแหล่งกำเนิดความร้อน ผลที่ได้รับจากความร้อนของจำลองพลังงานแสงอาทิตย์ที่จะแสดงในตาราง 8 การเปลี่ยนแปลงในประสิทธิภาพการใช้แหล่งความร้อนที่มีความเข้มเฉลี่ยของแผ่นดูดซับจะแสดงในภาพประกอบ 79 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพแหล่งความร้อนลดลงเมื่อความเข้มเฉลี่ยเพิ่มขึ้น



ภาพประกอบ 79 ผลจากการทดลองแหล่งกำเนิดความร้อน

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ด้วยเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์

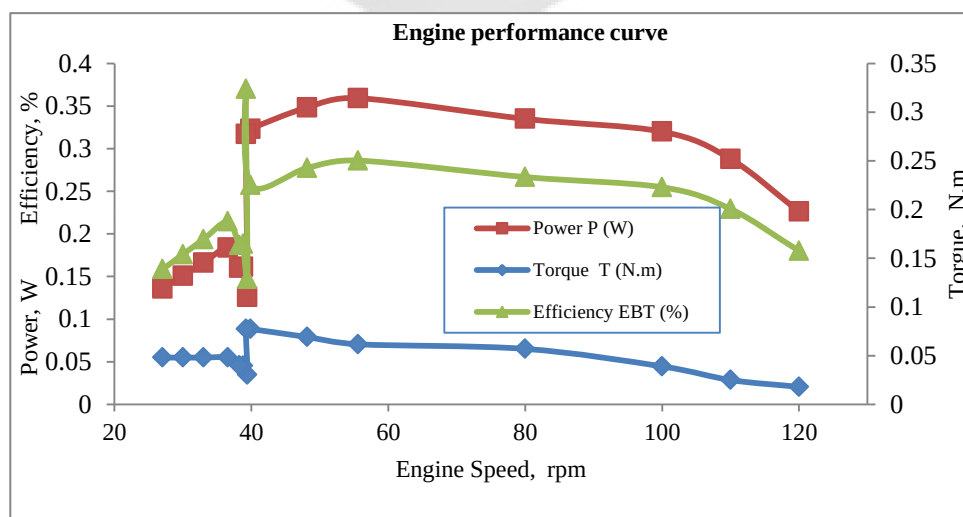
สมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ความเข้มโดยเฉลี่ยของการจำลองที่ค่า 7,094.00, 6,176.06, 4,663.52, 3,564.80 และ 2,259.17 W/m² แสดงในตาราง 9 และภาพประกอบ 79 ภาพประกอบ 80 แสดงการเบี่ยงเบนของแรงบิด ประสิทธิภาพความร้อนเบรกและกำลังเพลลา ที่ค่าความร้อนที่เกิดขึ้น

จริงป้อนเข้าที่ค่าต่างๆกับความเร็รรอบเครื่องยนต์พบว่าสมรรถนะของเครื่องยนต์จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อให้ความร้อนที่สูงขึ้น การเพิ่มขึ้นของแรงบิดเครื่องยนต์ กำลังเพลและประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของฮีตเตอร์ กำลังเพลสูงสุดและอุณหภูมิของฮีตเตอร์ที่ค่าความร้อนต่างๆ ความเข้มรังสีเฉลี่ยจะแสดงในตาราง 9 กำลังเพลและฮีตเตอร์มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามค่าความเข้มเฉลี่ย ดังนั้นกำลังเพลสูงสุดจะมากขึ้นถ้าได้รับจากความเข้มรังสีเฉลี่ยสูงขึ้น ตาราง 9 แสดงให้เห็นถึงการแปรผันของประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก ประสิทธิภาพแหล่งความร้อนกับค่าความเข้มรังสีเฉลี่ย จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกและการเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวม เช่นความเข้มเฉลี่ยเพิ่มขึ้นในขณะที่ประสิทธิภาพแหล่งความร้อนลดลงแต่ค่าความเข้มรังสีเฉลี่ยกลับเพิ่มขึ้น กำลังงานเพลสูงสุดที่ความเข้มรังสีเฉลี่ย $4,663.52 \text{ W/m}^2$ เมื่อพล็อตกับความเร็รรอบของเครื่องยนต์ดังแสดงในภาพประกอบ 80 และ 81 การเพิ่มขึ้นของกำลังงานเพลจะขึ้นกับอุณหภูมิของฮีตเตอร์ ดังนั้นกำลังเพลสูงสุดมากขึ้นได้รับจากฮีตเตอร์ที่มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น ตัวเลขบิลสำหรับการประเมินกำลังของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ทดสอบนี้คือการสร้างแบบจำลองดังต่อไปนี้

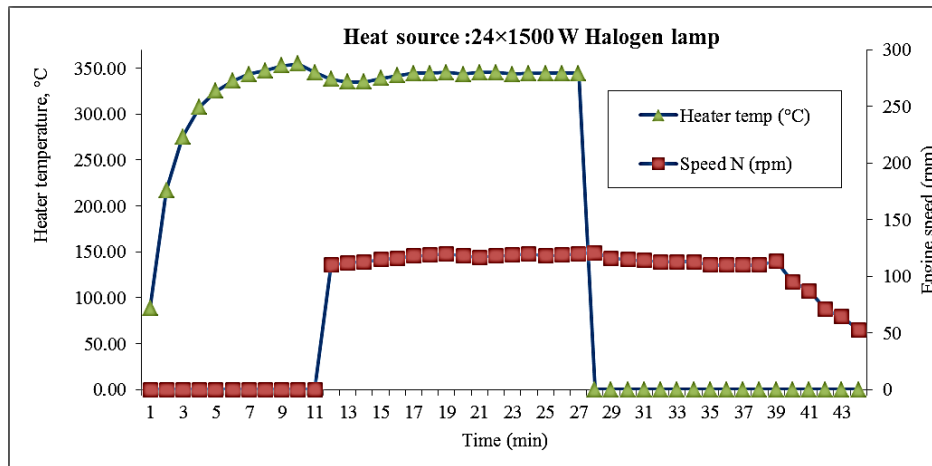
$$N_B = P / 0.000000339 T_{\text{airf}} \quad (4-10)$$

ตาราง 9 สมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

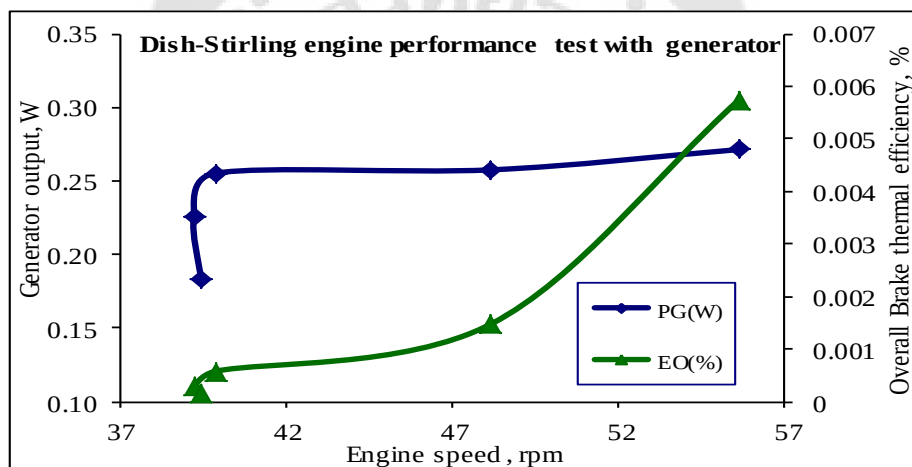
DISTANCE	I_s	Q_s	Q_{IN}	T_H	T_C	N	P_B MAX	E_{BT}	E_H
mm	W/m^2	J/s	J/s	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	rpm	W	%	%
90.00	7094.00	12603.70	1356.74	382.00	33.00	48.20	0.35	0.24	67.14
300.00	6176.06	10944.40	1040.17	325.00	32.00	39.90	0.32	0.23	70.75
648.00	4663.52	8890.53	602.30	314.36	29.28	35.64	0.23	0.23	76.70
900.00	3564.80	6795.93	339.19	200.36	33.00	34.90	0.05	0.07	81.02
1200.00	2259.17	4306.88	142.46	120.10	34.00	33.66	0.05	0.07	86.15



ภาพประกอบ 80 Heat-up และ Start-up curves ที่ความเข้มเฉลี่ย 4663.52 W/m^2



ภาพประกอบ 81 กราฟสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ใช้เครื่องจำลองรังสีที่ความเข้มเฉลี่ย 4663.52 W/m^2



ภาพประกอบ 82 กราฟสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ความเข้มเฉลี่ย 4663.52 W/m^2

ตัวเลขบิลเป็นค่าพารามิเตอร์ที่แสดงคุณลักษณะของสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง จากการทดลองพบว่าตัวเลขบิลมีค่าระหว่าง 0.0000997- 0.000487 ดังตาราง 10

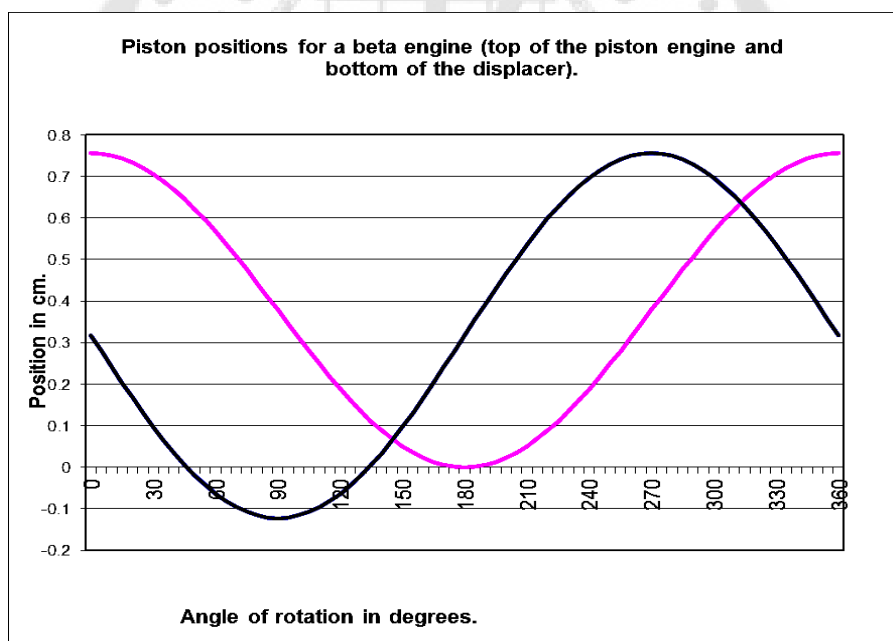
ตาราง 10 สมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง: 24 x 1500 W Halogen lamp with 2-stage PDC

T_H (°C)	P_{MAX} (W)	N (RPM)	F (Hz)	BEALE NO.
382	0.35	48.2	0.803333	0.000487
325	0.32	39.9	0.665	0.000538
314.36	0.23	35.64	0.594	0.000433
200.36	0.05	34.9	0.581667	0.0000962
120.1	0.05	33.66	0.561	0.0000997

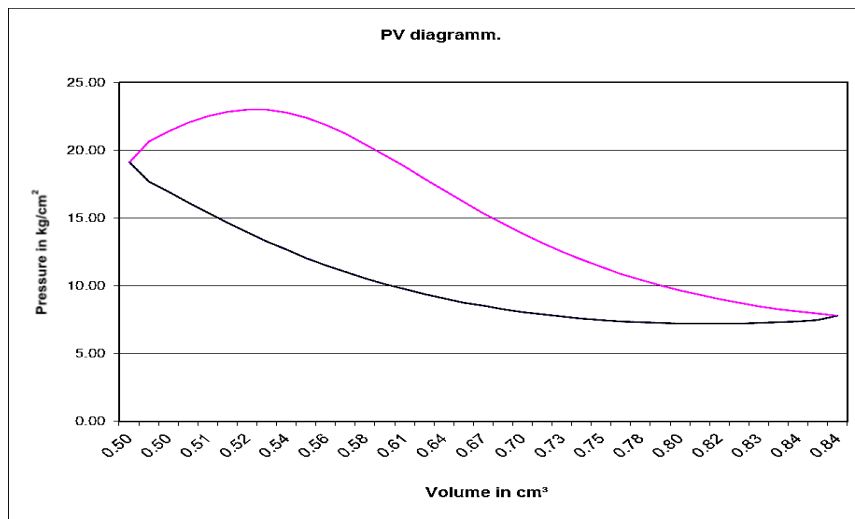
การวิเคราะห์ Schmidt analysis เพื่อหากำลังงานบ่งชี้ต่อรอบของเครื่องยนต์โดยใช้โปรแกรมที่เขียนโดย Jean-Pierre Van Dormael แสดงดังภาพประกอบ 83-84 จากการคำนวณพบว่าปริมาตรกวาดโดยลูกสูบของเครื่องยนต์เป็น 0.339 cm^3 ปริมาตรสูงสุด $V_{\max}$ เป็น 0.839 cm^3 อุณหภูมิฮีตเตอร์ด้านร้อน T_H เป็น $382 \text{ }^\circ\text{C}$ กำลังงานที่คำนวณเป็น 0.35 วัตต์ ความดันเฉลี่ย $1,258,143 \text{ ปาสคาล}$ ความดันสูงสุดคือ $2,257,652 \text{ ปาสคาล}$ และอุณหภูมิเฉลี่ย T_m เป็น 457.92 K ตามลำดับ การคำนวณโดย Schmidt analysis แสดงดังสมการ

$$W_{\text{Schmidt}} = \pi(1-\tau)\rho_m V_D \frac{k_P \sin \alpha}{Y + \sqrt{Y^2 - X^2}} \quad (4-11)$$

ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิฮีตเตอร์ด้านร้อน T_H เป็น $382 \text{ }^\circ\text{C}$ กำลังงานของเครื่องยนต์เป็น 0.35 วัตต์ ที่ความเร็วรอบ 48.2 rpm ซึ่งมีค่าเท่ากับผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณโดย Schmidt analysis



ภาพประกอบ 83 การวิเคราะห์ Schmidt analysis โดยใช้โปรแกรมของ Jean-pierre Van Dormael



ภาพประกอบ 84 การคำนวณ PV โดยใช้โปรแกรมของ Jean-pierre Van Dormael

จากภาพประกอบ 84 กราฟ PV ค่าความดันและปริมาตรจะถูกนำมาคำนวณหาค่าพลังงานขาออกหรืองานที่ทำโดยเครื่องยนต์ได้ เมื่อ x คือปริมาตรของเครื่องยนต์ และค่า y คือค่าความดัน พื้นที่ใต้กราฟจะเป็นพลังงานขาออกต่อรอบของเครื่องยนต์ กำลังงานของเครื่องยนต์หาได้จากผลคูณของพลังงานในวัฏจักรกับความเร็วยของเครื่องยนต์ และหาประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ได้โดยนำค่าความร้อนป้อนเข้าไปหารกำลังขาออกของเครื่องยนต์

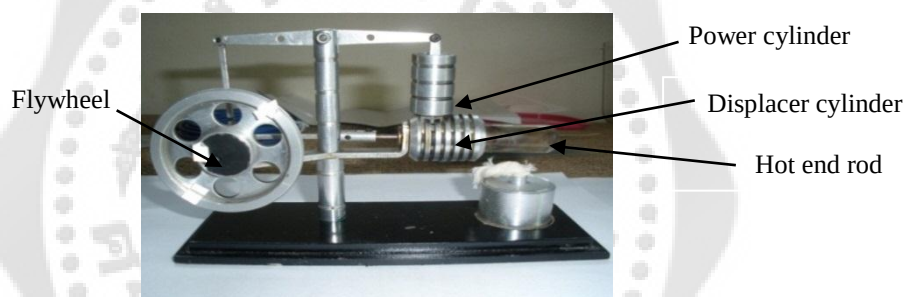
สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสมรรถนะของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นในขณะที่ใช้เครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ แรงบิดกำลังเพลลา, ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก, ความเร็ว, และอุณหภูมิเครื่องทำความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อมีความเข้มของรังสีจำลองเพิ่มขึ้น แรงบิดสูงสุดของเครื่องยนต์ กำลังเพลลา และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกเพิ่มขึ้นมีอุณหภูมิเครื่องทำความร้อนเพิ่มขึ้น ตัวเลขบีลของเครื่องยนต์จะเพิ่มขึ้นเมื่อเครื่องทำความร้อนมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ที่จุดโฟกัสความเข้มของแสงอาทิตย์จำลองมีค่า $8,890.53 \text{ W/m}^2$ เมื่อความร้อนป้อนเข้าเครื่องยนต์เป็น 602.3 J/s และแหล่งความร้อนมีประสิทธิภาพ 6.775% เครื่องยนต์สร้างแรงบิดสูงสุด 0.0774 N.m ที่ 39.85 รอบต่อนาที กำลังเพลลาสูงสุด 0.359 W ที่ 55.6 รอบต่อนาทีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตกำลังได้ 0.27 W และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกสูงสุด 0.2503% โดยประมาณ ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบเป็น 0.00574% อุณหภูมิด้านร้อนมีค่า 655 K อุณหภูมิด้านเย็นมีค่า 306 K และตัวเลขบีลมีค่า 0.000487 วิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ Schmidt analysis ในการคำนวณกำลังของเครื่องยนต์มีแนวโน้มเดียวกันกับผลที่ได้จากการทดลองซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.35 วัตต์ ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์จะเพิ่มขึ้น

ได้โดยใช้แหล่งความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและผลิตเครื่องยนต์ที่มีชิ้นส่วนที่เที่ยงตรงขึ้น หรืออาจใช้ของไหลถ่ายเทความร้อนที่มีคุณสมบัติดีกว่าอากาศเช่น แก๊สไฮโดรเจนหรือฮีเลียม

6. การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้ดวงอาทิตย์จริงและจานพาราโบลาแบบสองขั้นตอน

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงพลังงานแสงอาทิตย์รูปทรงแบบแกมมา 1 ลูก ทำงานด้านเดียวแสดงดังภาพประกอบ 85 รายละเอียดค่าพารามิเตอร์ของเครื่องยนต์แสดงดังตาราง 11 และรายละเอียดค่าพารามิเตอร์ของตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบจานพาราโบลา 2 ขั้นตอนแสดงดังตาราง 12



ภาพประกอบ 85 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงพลังงานแสงอาทิตย์

ตาราง 11 ข้อมูลรายละเอียดของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงพลังงานแสงอาทิตย์

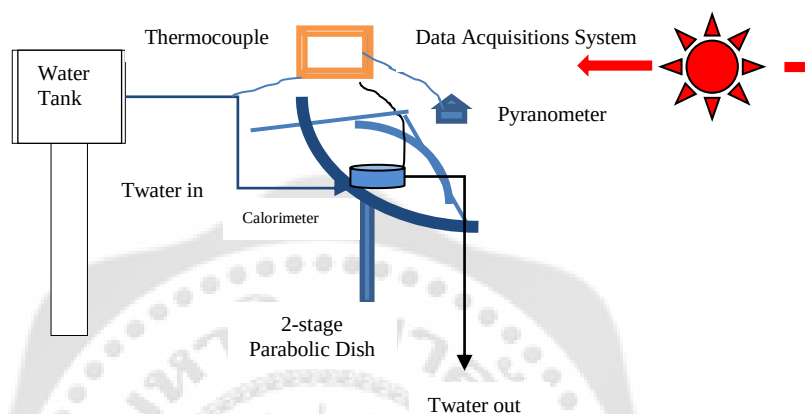
Stirling engine configuration: Gamma		Size
Power piston:	bore $\times$ stroke (mm)	12.0 $\times$ 3.0
Swept volume (cc)		0.339
Displacer:	bore $\times$ stroke (mm)	9 $\times$ 6.2
Swept volume (cc)		0.394
Compression ratio		4.94
Phase angle		90°

ตาราง 12 ข้อมูลรายละเอียดการออกแบบตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบจานพาราโบลา 2 ขั้นตอน

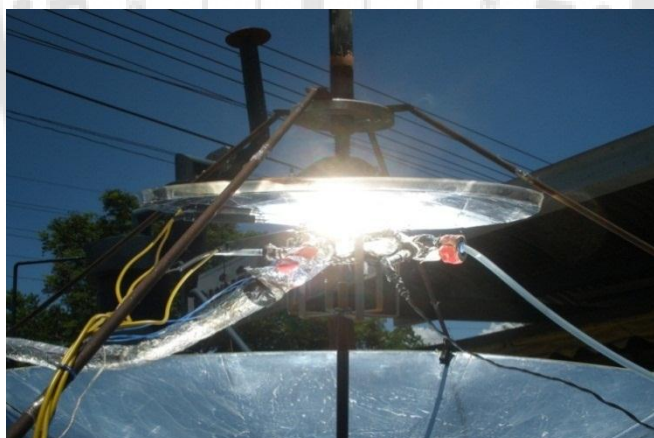
Symbol	Dimension	Symbol	Dimension
A main dish (m ²)	2.216	D _{main} (m)	1.68
A sub dish (m ²)	0.309	d _H (mm)	138
A _H (m ²)	0.014957	F ₁ (mm)	672
A _{2-stage} (m ²)	1.9064	F ₂ (mm)	632
C _{1st.}	127.459	Q _{con in average} (W)	1936.07
C _{2st.}	254.918		

การทดลอง

การทดลองประกอบด้วย แคลอรีมิเตอร์ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงประกอบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องมือวัดรังสีอาทิตย์ เทอร์โมคัปเปิล เครื่องบันทึกข้อมูล และตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบ 2 ขั้นตอน ดังภาพประกอบ 86-87



ภาพประกอบ 86 แผนผังแสดงการทดลองหาค่าความร้อนป้อนเข้า



ภาพประกอบ 87 การทดลองแคลอรีมิเตอร์กับจานพาราโบลา 2 ขั้นตอน

ความร้อนจะถูกส่งออกผ่านครีปไปยังอากาศโดยรอบโดยมีอุณหภูมิด้านเย็น T_c และอุณหภูมิฮีตเตอร์ T_H วัดจากอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ เครื่องวัดอุณหภูมิจะแสดงในภาพประกอบ 89



ภาพประกอบ 88 แคลอริมิเตอร์สำหรับการทดสอบความร้อนป้อนเข้าเครื่องยนต์และเครื่องบันทึกข้อมูล

สำหรับการทดสอบเครื่องยนต์ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จริงอุปกรณ์ในการทดลองมีดังนี้

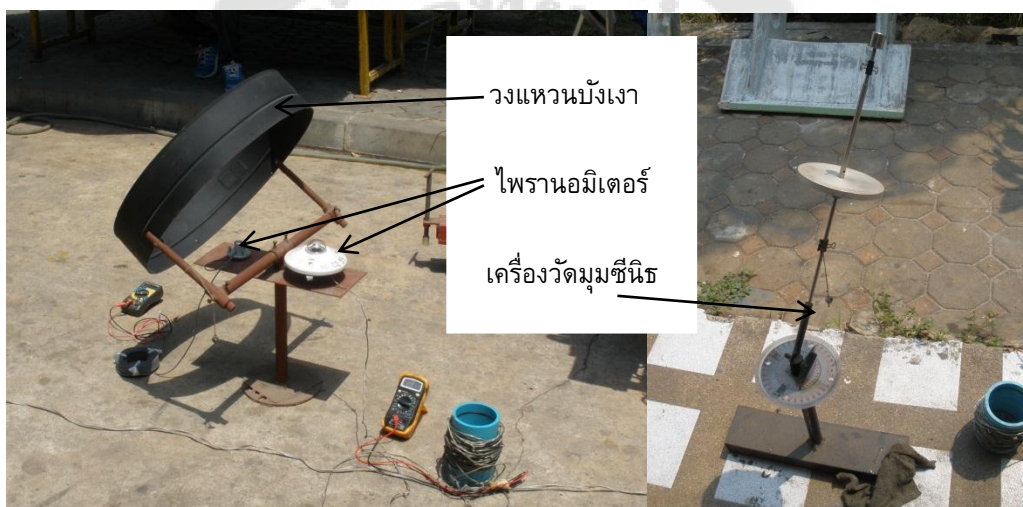
การวัดความร้อนที่กระบอกสูบ Displacer ได้รับจากตัวรวมรังสีทำการวัดโดยใช้เครื่องวัดความร้อนแบบน้ำไหลผ่านต่อเนื่อง แสดงดังภาพประกอบ 87-88 การไหลของน้ำแบบคงที่มาจากถังเก็บน้ำ อัตราการไหลของน้ำวัดโดยใช้บีกเกอร์และนาฬิกาจับเวลา ช่องเติมน้ำและอุณหภูมิที่ออกจะถูกวัดโดยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K และบันทึกไว้ในเครื่องบันทึกข้อมูล รังสีกระจายในแนวระนาบ ($I_{d,h}$) วัดโดยใช้เครื่องวัดรังสีอาทิตย์ (CM 11 Kipp & Zonnen, $5.67 \mu\text{V/W/m}^2$) และวงแหวนบังเงา และวัดมุมซัน การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับเครื่องยนต์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแสดงในภาพประกอบ 89-92 ความเข้มของรังสีอาทิตย์รวมในแนวระนาบ ($I_{t,h}$) ถูกวัดโดยเครื่องวัดรังสีอาทิตย์และบันทึกไว้ในเครื่องบันทึกข้อมูล Graphtec GL820 แสดงดังภาพประกอบ 88 วงแหวนบังเงาและเครื่องวัดมุมซันของดวงอาทิตย์แสดงดังภาพประกอบ 91 เครื่องกำเนิดไฟฟ้างดภาพประกอบ 92-93 ขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์ผ่านทางสายพานยาง หลอดไฟ DC ขนาดเล็กถูกใช้เป็นภาระสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



ภาพประกอบ 89 เครื่องวัดอุณหภูมิ



ภาพประกอบ 90 ลักษณะของตัวรวมรังสีแบบสองชั้นตอนขณะเตรียมการทดลอง



ภาพประกอบ 91 วงแหวนบังเงาและเครื่องวัดมุมซันนิธ



ภาพประกอบ 92 เครื่องมือวัดกำลังเครื่องยนต์และกำลังไฟฟ้า



ภาพประกอบ 93 เครื่องมือวัดกำลังกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของเครื่องยนต์

การทดลองหาค่าความร้อนป้อนเข้าเครื่องยนต์ที่ได้จากตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลา 2 ขั้นตอนนั้นทำโดยการนำแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลผ่านต่อเนื่องไปวางไว้ที่จุดโฟกัสของจานพาราโบลา ที่ตำแหน่งเดียวกันกับ ฮีตเตอร์ของเครื่องยนต์ น้ำจะไหลผ่านแคลอริมิเตอร์ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 138 mm ทำมาจากทองแดง ด้วยอัตราการไหล 1.33 g/s

ค่าความร้อนป้อนเข้าแคลอริมิเตอร์สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$q_{in} = m_w c_p (T_{w, out} - T_{w, in}) \quad (4-11)$$

สำหรับการทดสอบเครื่องยนต์ที่ใช้แสงอาทิตย์จริง พลังงานแสงอาทิตย์จากจานพาราโบลาแบบ 2 ขั้นตอนจะถูกโฟกัสไปยัง Displacer หรือแผ่นดูดซับรังสีทำให้หัว Displacer ถูกให้ความร้อนขึ้นจนถึงอุณหภูมิการทำงาน และปล่อยให้เครื่องยนต์ทำงานไปจนถึงสภาวะคงตัว จากนั้นเครื่องยนต์ถูกเพิ่มภาระโดยใส่มวลเพิ่มขึ้น และเพิ่มน้ำหนักไหลจนเครื่องยนต์หยุด ความเร็วรอบเครื่องยนต์ค่าแรงจากตาชั่งสปริง และอุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิลจะถูกบันทึกไว้ในเครื่องบันทึกข้อมูล Graphtec Midi logger (แบบ GL820)

ค่าความเข้มของรังสีบนพื้นระนาบตรงคำนวณได้จากสมการ

$$I_{b,n} = (I_{t,h} - I_{d,h}) / \cos \theta_z \quad (4-12)$$

ตัวดูดซับพลังงานมีพื้นที่ A_H (มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 138 mm) เมื่อความเข้มของรังสีตรงเป็น $I_{b,n}$ ค่าความร้อนจากการรวมรังสีลงบนตัวดูดซับพลังงานคำนวณได้จากสมการ

$$q_A = I_{b,n} A_H \quad (4-13)$$

ความร้อนที่ใช้ประโยชน์เข้าเป็นผลรวมของความร้อนที่น้ำดูดซับไว้ภายในแคลอริมิเตอร์ ซึ่งหาได้จากสมการ

$$q_{in} = m_w c_p \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (4-14)$$

เมื่อ m_w คือมวลของน้ำ (1.5 kg) c_p คือความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (4168 J/kg K) ΔT คือความแตกต่างอุณหภูมิของน้ำ และ Δt คือเวลาที่ทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น

การประเมินสมรรถนะของเครื่องยนต์

สมรรถนะของเครื่องยนต์จากการทดลองแสดงดังตาราง 12 ค่าแรงบิดของเครื่องยนต์คำนวณได้จากสมการ

$$M_t = (S-G) r \quad (4-15)$$

เมื่อ S ค่าแรงที่อ่านได้จากตาชั่งสปริง (N) และ G คือน้ำหนักที่ถ่วง (N), และ r คือรัศมีของวงล้อเบรค

กำลังเพลจริงคำนวณได้จาก

$$P_B = 2\pi M_t n \quad (4-16)$$

เมื่อ n คือความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (rps)

E_{BT} คือค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค คำนวณได้จากสมการ

$$E_{BT} = P_B/q_s \quad (4-17)$$

เมื่อ q_s คือค่าความร้อนจากแหล่งกำเนิดที่ป้อนเข้าเครื่องยนต์

พลังงานความร้อนรวมที่เข้าสู่ตัวรวมรังสีคำนวณได้จาก

$$Q_{con} = R_m \times R_s \times I_{b,n} \times A_{2-stage} \quad (4-18)$$

เมื่อค่า R_m คือค่าการสะท้อนรังสีของจานหลัก และ R_s คือค่าการสะท้อนรังสีของจานรอง $I_{b,n}$ คือค่ารังสีตรงบนระนาบ และ $A_{2-stage}$ คือพื้นที่ช่องรับรังสีทั้งหมดของระบบตัวรวมรังสีแบบ 2 ขั้นตอน

ประสิทธิภาพของตัวรวมรังสีสามารถคำนวณได้จาก ค่าความร้อนใช้ประโยชน์ที่ป้อนเข้าแคลอริมิเตอร์และพลังงานรวมทั้งหมดที่เข้าสู่ตัวรวมรังสีดังสมการ

$$E_{con} = q_{in} / Q_{con}$$

$$E_{con} = q_{in} / R_m \times R_s \times I_{b,n} \times A_{2-stage} \quad (4-19)$$

กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และประสิทธิภาพ

กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้โดยใช้เครื่องยนต์ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ภาระของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ใช้ load bank โวลท์มิเตอร์ และ แอมมิเตอร์เป็นเครื่องมือวัด กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้คำนวณได้จาก

$$P_G = I E \quad (4-20)$$

เมื่อ I (A) และ E (V) คือค่าที่อ่านได้จากมิเตอร์
ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคำนวณได้จาก

$$\eta_{gen} = P_G / P_B \quad (4-21)$$

ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานจากแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการ 4-17, 4-19, 4-21

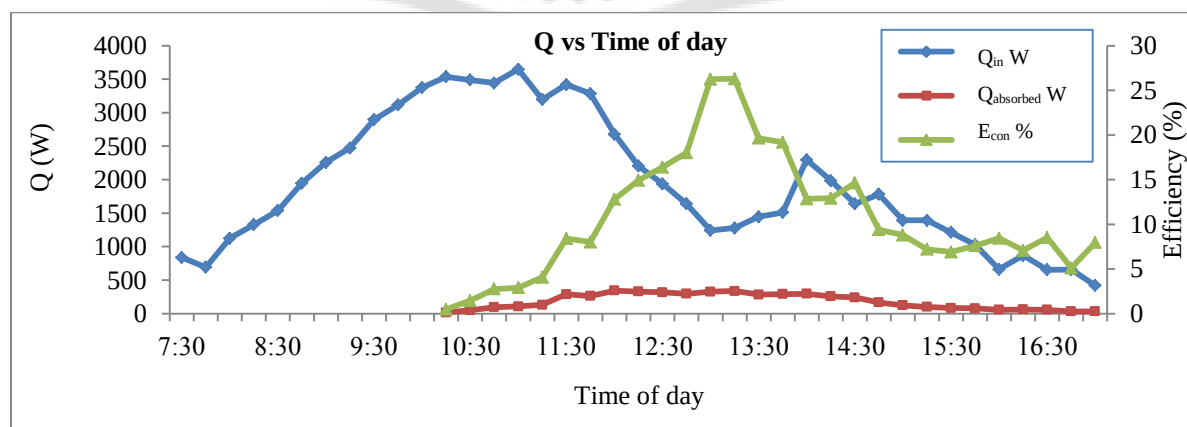
$$\eta_{gross} = E_{BT} E_{con} \eta_{gen} \quad (4-22)$$

ผลการทดลอง

การทดลองตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลา 2 ขั้นตอนกับแคลอริมิเตอร์ ความร้อนที่ป้อนเข้าเครื่องยนต์ q_{in} ทำโดยใช้แคลอริมิเตอร์ ซึ่งเมื่อค่าความร้อนป้อนเข้าสูงจะทำให้พลังงานที่ดูดซับสูงตามไปด้วย ค่าการแปรผันของประสิทธิภาพของแหล่งกำเนิดความร้อนกับค่าความเข้มรังสีที่ตกลงบนตัวรวมรังสีจะแสดงดังตาราง 13 และภาพประกอบ 94 จากภาพจะพบว่า ประสิทธิภาพของตัวรวมรังสีจะสูงสุดที่เวลา 13.00 น. ซึ่งได้ค่าความร้อนดูดซับเกือบจะสูงที่สุด

ตาราง 13 การทดลองตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบจานพาราโบลา 2 ขั้นตอน

No.	Time	Water temp.		θ_z deg.	$I_{t,h}$ W/m ²	$I_{d,h}$ W/m ²	$I_{b,n}$ W/m ²	Q_{in} W	$Q_{absorbed}$ W	Econ %
		Inlet	Outlet							
1.00	7:30			-68.76	253.59	44.00	578.54	838.23		
2.00	7:45			-69.20	253.59	84.00	477.58	691.95		
3.00	8:00			-70.79	338.12	83.00	775.38	1123.42		
4.00	8:15			-71.06	380.39	83.00	916.23	1327.50		
5.00	8:30			-71.33	422.65	83.00	1061.03	1537.29		
6.00	8:45			-71.60	507.19	83.00	1343.85	1947.06		
7.00	9:00			-72.58	549.45	83.00	1558.09	2257.46		
8.00	9:15			-72.66	591.72	83.00	1706.86	2473.01		
9.00	9:30			-72.73	676.25	83.00	1998.31	2895.27		
10.00	9:45			-72.81	718.51	83.00	2150.33	3115.54		
11.00	10:00			-73.09	760.78	83.00	2330.18	3376.11		
12.00	10:15	34.00	37.00	-72.84	803.04	83.00	2440.48	3535.93	16.71	0.47
13.00	10:30	34.00	43.00	-72.60	803.04	83.00	2407.84	3488.64	50.12	1.44
14.00	10:45	34.00	51.00	-72.35	845.31	125.00	2375.68	3442.03	94.66	2.75
15.00	11:00	34.00	53.00	-71.44	887.57	86.00	2518.32	3648.70	105.80	2.90
16.00	11:15	34.00	57.30	-70.29	870.00	126.00	2206.02	3196.22	129.75	4.06
17.00	11:30	34.00	85.60	-69.15	966.00	126.00	2360.06	3419.41	287.33	8.40
18.00	11:45	34.00	81.20	-68.00	975.00	126.00	2266.38	3283.67	262.83	8.00
19.00	12:00	34.00	95.60	-63.80	974.00	158.00	1848.22	2677.82	343.02	12.81
20.00	12:15	34.00	93.00	-57.89	969.00	161.00	1520.09	2202.41	328.54	14.92
21.00	12:30	34.00	91.00	-51.98	946.00	123.00	1336.18	1935.94	317.40	16.40
22.00	12:45	34.00	87.00	-46.07	952.00	167.00	1131.48	1639.37	295.13	18.00
23.00	13:00	35.00	93.50	-24.40	945.00	165.00	856.50	1240.95	325.76	26.25
24.00	13:15	35.00	95.30	-30.31	961.00	200.00	881.49	1277.16	335.78	26.29
25.00	13:30	36.00	87.00	-36.22	972.10	167.00	997.96	1445.90	283.99	19.64
26.00	13:45	35.00	87.00	-42.13	972.10	200.00	1041.10	1508.41	289.56	19.20
27.00	14:00	35.00	88.00	63.80	929.84	230.00	1585.12	2296.62	295.13	12.85
28.00	14:15	35.00	81.00	64.95	820.00	240.00	1369.83	1984.70	256.15	12.91
29.00	14:30	34.00	77.00	66.09	700.00	242.00	1130.02	1637.25	239.45	14.62
30.00	14:45	33.00	63.00	67.24	718.51	243.00	1229.12	1780.83	167.05	9.38
31.00	15:00	33.00	55.00	71.44	464.92	159.00	961.11	1392.52	122.51	8.80
32.00	15:15	33.00	51.00	71.69	422.65	121.00	960.20	1391.20	100.23	7.20
33.00	15:30	33.00	48.00	71.94	380.39	121.00	836.70	1212.27	83.53	6.89
34.00	15:45	33.00	47.00	72.18	338.12	121.00	709.49	1027.95	77.96	7.58
35.00	16:00	33.00	43.00	73.09	253.59	121.00	455.85	660.46	55.68	8.43
36.00	16:15	33.00	44.00	73.01	295.86	121.00	598.41	867.01	61.25	7.06
37.00	16:30	33.00	43.00	72.94	253.59	121.00	451.96	654.83	55.68	8.50
38.00	16:45	33.00	39.00	72.86	211.33	78.00	452.40	655.47	33.41	5.10
39.00	17:00	33.00	39.00	72.58	126.80	40.00	289.93	420.06	33.41	7.95
average		33.89	66.27		646.39	126.38	1336.27	1936.07	180.28	9.31

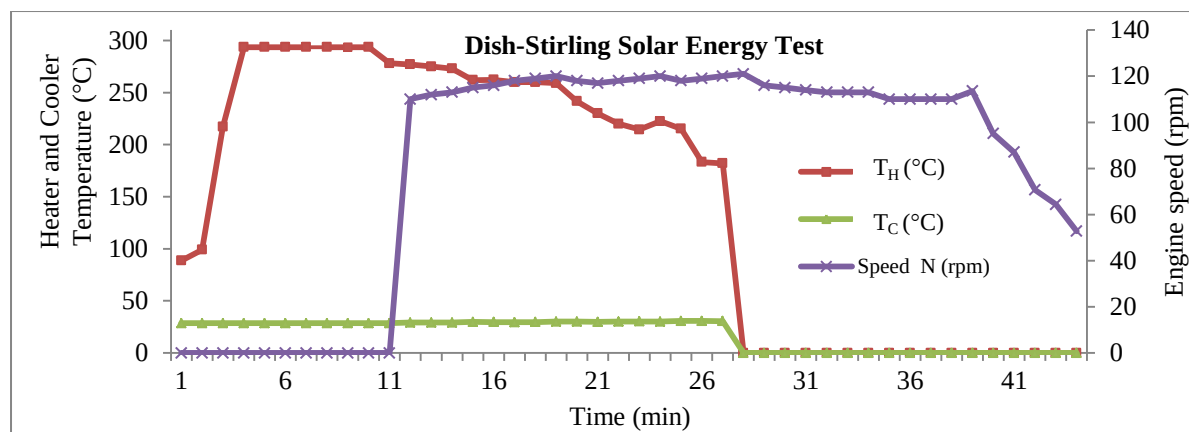


ภาพประกอบ 94 ผลจากการทดลองแหล่งกำเนิดความร้อนโดยใช้แคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลผ่านต่อเนื่อง

ผลจากการทดลองตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบจานพาราโบลา 2 ขั้นตอนดังภาพประกอบ 14 ใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีตรงของดวงอาทิตย์กับประสิทธิภาพของตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบจานพาราโบลา 2 ขั้นตอนโดยคำนวณได้จากสมการ

$$E_C = 35.462 - 1.33 \times 10^{-2} I_{b,n} \quad (4-23)$$

การทดลองเครื่องยนต์สเตอร์ลิงกับจานพาราโบลา 2 ขั้นตอนแสดงดังภาพประกอบ 95



ภาพประกอบ 95 ผลการทดลองเครื่องยนต์สเตอร์ลิงพลังงานแสงอาทิตย์แบบแกมมา

จากผลการทดลอง เครื่องยนต์เริ่มสตาร์ทที่อุณหภูมิเริ่มต้น 250°C และเข้าสู่สภาวะคงตัวระหว่าง $250-260^{\circ}\text{C}$ ทำให้สามารถหาประสิทธิภาพสูงสุดของเครื่องยนต์ได้

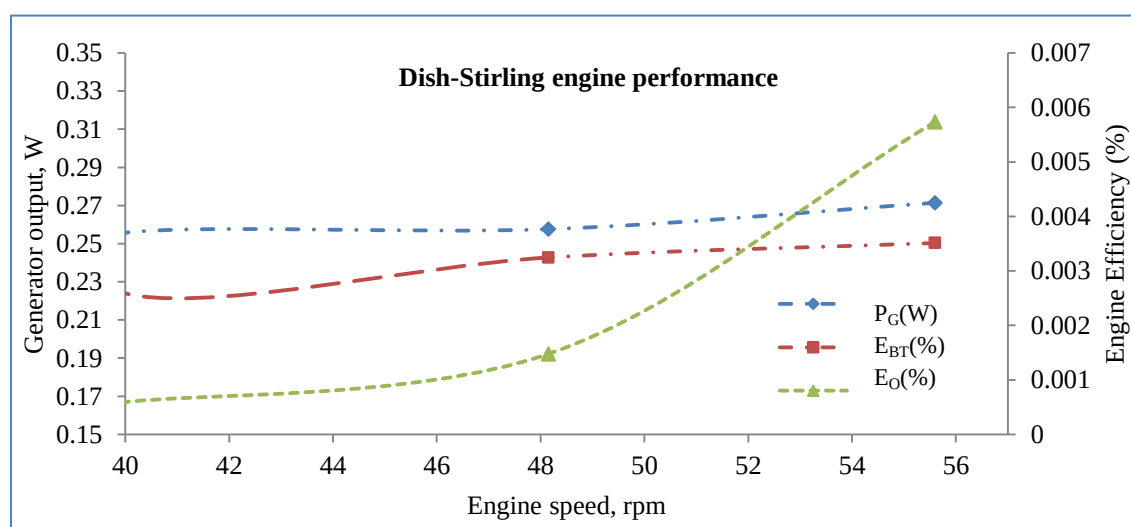
การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์

ทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์โดยวัดความเข้มของแสงอาทิตย์เฉลี่ย $870-961 \text{ W/m}^2$ ดังแสดงในภาพประกอบ 96 แรงบิดของเครื่องยนต์ กำลังงานเพลลาและประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคที่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มของแสงอาทิตย์ที่มีต่อความเร็วรอบเครื่องยนต์ กำลังของเครื่องยนต์มากขึ้นตามความร้อนที่สูงขึ้น การเพิ่มขึ้นของแรงบิดที่เพลลาเครื่องยนต์ พลังงานและประสิทธิภาพความร้อนเบรคแสดงให้เห็นว่ายังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของฮีตเตอร์ ค่าแรงบิดสูงสุด กำลังงานเพลลา และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค สรุปไว้ในตาราง 14 กำลังเพลลาสูงสุดและอุณหภูมิของฮีตเตอร์ที่ความร้อนป้อนเข้าต่างๆ กำลังงานเพลลา และอุณหภูมิของฮีตเตอร์เพิ่มขึ้นเป็นฟังก์ชันของความเข้มรังสีเฉลี่ย ดังนั้นกำลังเพลลาสูงสุดจะเพิ่มมากขึ้นตามค่าเฉลี่ยของความเข้มรังสีที่สูงขึ้น

ภาพประกอบ 96 แสดงให้เห็นถึงการแปรเปลี่ยนของประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค ประสิทธิภาพแหล่งความร้อนและประสิทธิภาพรวมของระบบกับค่าความเข้มรังสีเฉลี่ย จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคและประสิทธิภาพรวมเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มรังสีเฉลี่ยเพิ่มขึ้น

ตาราง 14 สมรรถนะของจานพาราโบลาแบบ 2 ขั้นตอนและเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

N (rpm)	S (kg)	W (kg)	T(N.m)	P(W)	V	A	P _G (W)	E _{BT} (%)	E _O (%)	η_{gen} (%)	E _{con} (%)	η_{gross} (%)
55.600	0.007	0.074	0.062	0.359	1.180	0.230	0.271	0.250	0.006	75.531	14.910	2.819
48.150	0.009	0.084	0.069	0.348	1.120	0.230	0.258	0.243	0.001	73.929	16.390	2.941
39.850	0.010	0.094	0.077	0.323	1.110	0.230	0.255	0.225	0.001	79.021	18.000	3.201
39.200	0.010	0.094	0.077	0.317	0.980	0.230	0.225	0.324	0.000	71.093	26.250	6.040
31.500	0.001	0.034	0.030	0.101	0.870	0.103	0.090	0.128	0.000	89.492	26.290	3.023
Ave.							0.220	0.234	0.002	77.813	20.368	3.710



ภาพประกอบ 96 ผลการผลิตไฟฟ้าจากเครื่องยนต์สเตอร์ลิงและจานพาราโบลาแบบ 2 ขั้นตอน

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบแสดงดังตาราง 14 พลังงานส่งออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเทียบกับความเร็วพบว่ากำลังสูงสุดมีค่า 0.27 W ที่ 55.6 รอบต่อนาที

สรุปผลการทดลอง

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงและจานพาราโบลาแบบ 2 ขั้นตอนระดับห้องปฏิบัติการที่มีระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกนได้ทำการทดลองโดยใช้แสงอาทิตย์จริงและ จานพาราโบลา 2 ขั้นตอนเป็นแหล่งความร้อน ความร้อนเกิดขึ้นจริงที่ป้อนเข้าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงประเมินโดยวิธีวัดพลังงานดูดซับจากแคลอรีมิเตอร์ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดซับความร้อนของเครื่องรับรังสีอาทิตย์และพื้นที่รับแสงรวมของจาน จากการทดลองพบว่าค่าประสิทธิภาพสูงสุดของจานพาราโบลาแบบ 2 ขั้นตอนอยู่ที่ 26.29% ที่เวลาประมาณ 13 นาฬิกา เนื่องจากรังสีดวงอาทิตย์เข้ามาในวันที่ให้รังสีตรงของดวงอาทิตย์มากขึ้นซึ่งเหมาะสมกับการทดลองกับจานพาราโบลา แม้ว่าประสิทธิภาพของระบบที่ไม่สูงดังนั้นการศึกษาครั้งนี้จะมุ่งเน้นส่งเสริม

เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ ข้อมูลนี้สามารถนำมาใช้ประกอบการพิจารณาในการพัฒนาการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากจานพาราโบลาในพื้นที่ห่างไกลในอนาคตอันใกล้

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบมีข้อเสนอแนะดังนี้:

การทดลองจานพาราโบลา 2 ขั้นตอนควรเปลี่ยนวัสดุที่ทำผิวสะท้อนให้มีค่าการสะท้อนสูงขึ้น

ควรขยายขนาดจานหลักและย่อยเพื่อเพิ่มพื้นที่รับแสง จะสามารถเพิ่มความร้อนได้มากขึ้น

การเพิ่มกำลังงานเบรกของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงทำได้โดยเพิ่มขนาดของเครื่องยนต์ขึ้น เพิ่มความร้อนของฮีตเตอร์ของเครื่องยนต์และเพิ่มจำนวนครีประบายความร้อนสำหรับการระบายความร้อน

เงาของจานย่อยจะบังรังสีดวงอาทิตย์ที่เข้าสู่จานหลัก จะทำให้ปลดพื้นที่ของช่องรับแสงในพื้นที่ทั้งหมด ควรออกแบบจานย่อยในรูปแบบอื่น ๆ เช่นรูปทรงไฮเปอร์โบลา

การขยายขนาดของระบบสามารถทำได้หลังจากการศึกษาในรายละเอียดของการสูญเสียความร้อนจากตัวรับของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเช่นการพาความร้อนและการสูญเสียการแผ่รังสี เพื่อลดการสูญเสียความร้อนจะได้รับความร้อนที่ใช้ประโยชน์ได้มากขึ้นซึ่งจะถ่ายเทไปให้เครื่องยนต์

การตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดยใช้โปรแกรมคำนวณของ Jean-pierre Van Dormael กับผลการทดลอง

ตาราง 15 การตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

	T_H (°C)	P_{MAX} (W)
การทดลอง	382	0.350
การคำนวณโดย Schmidt Analysis	382	0.352669
% ความคลาดเคลื่อน	0	0.763 %

จากการตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ใช้ทดสอบนี้พบว่าเมื่อคำนวณด้วยโปรแกรมคำนวณของ Jean-pierre Van Dormael ที่อุณหภูมิของฮีตเตอร์ 382°C เครื่องยนต์มีกำลังสูงสุด 0.352669 W ที่ความถี่ 0.803333 Hz เมื่อเทียบกับผลการทดลอง 0.350 W มีค่าความคลาดเคลื่อน 0.763 % จึงยอมรับได้ที่จะใช้วิธีการคำนวณนี้ในการประเมินกำลังของเครื่องยนต์

บทที่ 5

การวิเคราะห์ผลศาสตร์การไหลของของไหลทำงาน

ในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบสองชั้นตอนนั้น ทำการออกแบบโดยดัดแปลงแบบมาจากเครื่องวัดพลังงานความร้อนสำหรับตัวรวมรังสีอาทิตย์ที่เรียกว่าแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่อง การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับจานพาราโบลา ผู้วิจัยจำเป็นต้องศึกษาพฤติกรรมการกระจายตัวของน้ำร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดัดแปลงจากแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลผ่านต่อเนื่องโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ผลศาสตร์ของการไหล CFD ด้วยโปรแกรมแอนซิส ฟลูเอนท์เมื่อทราบพฤติกรรมการกระจายตัวของน้ำร้อนภายในแล้ว จะทำให้ทราบว่าแผงสะท้อน (Reflector) จากตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลา 2 ชั้นตอน มีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของความร้อนภายในอย่างไร จากการศึกษาพฤติกรรมการไหลและการกระจายของอุณหภูมิภายในแคลอริมิเตอร์ จะได้แนวทางในการออกแบบ รวมถึงได้ทราบวิธีการสร้างแบบจำลองผลศาสตร์ของการไหล การเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างแบบจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในแต่ละกรณีเพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลและการกระจายของอุณหภูมิภายในและที่ผิวของแคลอริมิเตอร์โดยนำผลจากการคำนวณด้วยโปรแกรมไปเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง โดยมีขอบเขตคือ ศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำภายในแคลอริมิเตอร์ 2 แบบคือ แคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่องและแคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอย ภายในปริมาตรควบคุมเพื่อให้ได้ค่าตัวเลข Nusselt number ที่อัตราการไหลต่างกัน 3 ค่าคือ 0.0665 kg/s, 0.133 kg/s และ 0.266 kg/s แล้วเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของแคลอริมิเตอร์ทั้ง 2 แบบ

1. วิธีการดำเนินงาน

1.1 ทำการทดลองแคลอริมิเตอร์ทั้ง 2 แบบกับตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลา 2 ชั้นตอน

1.1 การทดลองประสิทธิภาพของตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบจานพาราโบลาสองชั้นตอนกับดวงอาทิตย์จริง และเครื่องจำลองรังสีอาทิตย์โดยใช้แคลอริมิเตอร์ดูดซับพลังงาน 2 แบบ โดยนำจานพาราโบลาแบบสองชั้นตอนมารับความร้อนจากดวงอาทิตย์จริงแล้วส่งถ่ายพลังงานความร้อนให้กับแคลอริมิเตอร์

1.2 ต่อสายเทอร์โมคัปเปิ้ลที่วัดอุณหภูมิที่ผิวด้านรับรังสีของแคลอริมิเตอร์ (T_1 - T_3) อุณหภูมิภายในของแคลอริมิเตอร์ (T_5 - T_7) อุณหภูมิน้ำเข้า (T_9) น้ำออกจากแคลอริมิเตอร์ (T_{10}) วัดอุณหภูมิแวดล้อม (T_8) ความเข้มข้นรังสีอาทิตย์ I (CH_4) เข้ากับดาตาสล็อกเกอร์

1.3 นำแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่องไปตั้งบนขาตั้งตรงจุด Focus ของ Concentrator ปล่อยน้ำจากถังไหลเข้าแคลอริมิเตอร์

1.4 เริ่มบันทึกค่า อุณหภูมิตามจุดวัดต่างๆ เก็บข้อมูลความเข้มข้นรังสีอาทิตย์และศึกษารายละเอียดของแคลอริมิเตอร์ ทั้งสองแบบจากการทดลองจริง

1.5 เก็บรวบรวมข้อมูลของแคลอริมิเตอร์เพื่อจะนำข้อมูลเหล่านั้นไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จะใช้ในการคำนวณโดยข้อมูลที่ต้องการจะเป็นข้อมูลที่เป็นลักษณะทางกายภาพ เช่น ขนาดของแคลอริมิเตอร์ วัสดุที่ใช้ในการสร้าง ขนาดอุปกรณ์ ตำแหน่งอุปกรณ์ที่อยู่ภายใน แคลอริมิเตอร์ เป็นต้น

1.2 การวิเคราะห์พลศาสตร์ของการไหลด้วยโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์

1.2.1 สร้างแบบจำลองทางกายภาพของแคลอริมิเตอร์

เมื่อได้ข้อมูลทางกายภาพของแคลอริมิเตอร์มาแล้ว จึงนำเอาข้อมูลเหล่านั้นมาสร้างแบบจำลองทางกายภาพที่ใกล้เคียงกับแคลอริมิเตอร์จริงมากที่สุด

1.2.2 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแคลอริมิเตอร์

สำหรับขั้นตอนนี้จะเป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยจะกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง และทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ นั่นคือไม่มีการผิดพลาดหรือมีข้อผิดพลาดที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ในขั้นตอนการทดสอบรันแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้วทำการตรวจสอบอีกครึ่งหนึ่งว่าการกำหนดค่าและสมการที่ใช้ันถูกต้องตรงตามการใช้งานหรือไม่

1.2.3 วิเคราะห์การกระจายของอุณหภูมิภายในแคลอริมิเตอร์ของแต่ละระนาบที่ทำการระบุตำแหน่งไว้

ทดสอบค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะทำการวิเคราะห์ตำแหน่งของอุณหภูมิเพื่อเปรียบเทียบค่าต่างๆของแต่ละระนาบ โดยข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์นั้นจะต้องเป็นพิกัดหรือตำแหน่งเดียวกัน

1.2.4 ทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สรุปและวิเคราะห์ผล

เป็นการสรุปผลของแต่ละกรณีที่ได้ทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เปรียบเทียบกัน ซึ่งแต่ละกรณีอาจมีผลลัพธ์ที่แตกต่างหรือคล้ายคลึงกันก็ได้

แคลอริมิเตอร์

แคลอริมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 2 ชนิด ได้แก่ 1. แคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลผ่านต่อเนื่อง ทำหน้าที่วัดปริมาณความร้อนที่ตัวรวมรังสีผลิตขึ้น ติดตั้งไว้ที่จุดโฟกัสของตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลา สองขั้นตอนทำจากทองแดงหนา 1 มม. ขึ้นรูปเป็นทรงกระบอกโต 138 มม. มีท่อทองแดงสำหรับน้ำเข้าและออก 2 ท่อ ยาว 102 มม. ขนาด ϕ ภายในท่อ 16 มม. วางทำมุม 90° นำแคลอริมิเตอร์ไปเจาะรูด้านข้าง 3 รูเพื่อใส่เทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิ ไว้ด้านในที่ระยะ 0 มม., 23 มม., และ 43 มม. จากจุดศูนย์กลางของแคลอริมิเตอร์ ที่ผิวด้านรับรังสีของแคลอริมิเตอร์ทำท่อสำหรับเสียบเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิ ไว้ที่ระยะ 0 มม., 23 มม., และ 43 มม. จากจุด

ศูนย์กลางของแคลอริมิเตอร์เพื่อให้ตรงกับตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิลด้านใน 2. แคลอริมิเตอร์แบบ ขดกันหอยสร้างแบบเดียวกันกับแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลผ่านต่อเนื่องทุกประการเว้นแต่เพิ่มขดกัน หอยทำจากแผ่นทองแดงหนา 1 มม.ขดเป็นกันหอย 4 ขดมีขนาด ϕ ความโต 14 มม., 30 มม., 50 มม., และ 75 มม. ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลที่ผิวรับรังสีและด้านในจำนวน 6 จุดวัดเช่นเดียวกับแคลอริ มิเตอร์แบบน้ำไหลผ่านต่อเนื่อง แคลอริมิเตอร์ทั้งสองแบบทำการหุ้มฉนวนโดยรอบเพื่อป้องกันการ สูญเสียความร้อนจากการพาธรรมชาติและการแผ่รังสีความร้อน (ทองแดงมีค่าคุณสมบัติ $\rho = 8978 \text{ kg/m}^3$, $C_p = 381 \text{ J/kg.K}$, $k = 387.6 \text{ W/m.K}$)

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การแก้ปัญหาด้านพลศาสตร์ของของไหล

2.1.1 ระบบสมการนาเวียร์-สโตกส์

สมการเชิงอนุพันธ์มวล โมเมนตัม และพลังงานซึ่งได้จากการสร้างสมการขึ้นจาก ความจริงที่ว่า มวลนั้นไม่มีสูญหาย การใช้กฎข้อที่สองของนิวตัน และพลังงานนั้นไม่มีการสูญหาย ตามลำดับ ซึ่งจะก่อให้เกิดระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

สมการเชิงอนุพันธ์มวล

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (5.1)$$

สมการเชิงอนุพันธ์โมเมนตัม

$$\text{แกน X; } \frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \rho f_x \quad (5.2)$$

$$\text{แกน Y; } \frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \rho f_y \quad (5.3)$$

สมการอนุพันธ์เชิงพลังงาน

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \right] + \vec{\nabla} \cdot \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \vec{V} \right] &= \rho Q - \frac{\partial (up)}{\partial x} - \frac{\partial (vp)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \\ &\quad \frac{\partial (u\sigma_x)}{\partial x} + \frac{\partial (v\sigma_y)}{\partial y} + \frac{\partial (v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (u\tau_{yx})}{\partial y} + \rho \vec{f} \cdot \vec{V} \end{aligned} \quad (5.4)$$

จากนั้นทำการสร้างสมการที่ต่อเนื่องอันเป็นผลมาจากการประยุกต์ระเบียบวิธีเชิง ตัวเลขนั้นโดยไม่ต้องกังวลว่าสมการนั้นจะเป็นสมการเชิงอนุพันธ์มวล โมเมนตัม หรือพลังงาน สมการต่อเนื่องที่สร้างขึ้นจะสามารถใช้ได้กับสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยใดๆ ซึ่งจากสมการเชิงอนุพันธ์

มวลสมการเชิงอนุพันธ์โมเมนต์และ สมการอนุพันธ์เชิงพลังงาน ทำให้การสร้างสมการต่างๆ นั้นมีความยุ่งยากลดลง เพิ่มความมั่นใจในความถูกต้อง อย่างไรก็ตามสมการที่กล่าวมานั้นบ่งบอกถึงความยากเป็นอย่างยิ่งที่จะแก้ด้วยการวิเคราะห์โดยวิธีทางคณิตศาสตร์แต่เพียงอย่างเดียวเพื่อหาผลเฉลยแม่นยำ (Exact solution) ซึ่งความยากของสมการเหล่านี้อยู่ในรูปแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear equations) ซึ่งยากที่จะหาผลเฉลยแม่นยำตรงถึงแม้ว่าเงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) และ ลักษณะรูปร่าง (Geometry) ของปัญหานั้นจะง่ายเพียงไรก็ตาม สาเหตุดังกล่าวนี้เอง ทำให้การแก้ปัญหาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากในปัจจุบัน

2.1.2 การไหลแบบปั่นป่วน

สมการมาตรฐาน $k-\epsilon$ พิสูจน์มาจากสมการ RANS และค่าคงที่แบบจำลองต่างๆ การคำนวณ Reynolds stress โดยใช้ความสัมพันธ์ของ Boussinesq

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} = 2\mu_t E_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$

Turbulent viscosity สามารถคำนวณได้จาก

$$\mu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad C_\mu = 0.09$$

$$\text{รูปแบบสมการสำหรับ } k; \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k U) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad } k \right] + 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - \rho \epsilon \quad (5.5)$$

$$\text{รูปแบบสมการสำหรับ } \epsilon; \frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \epsilon U) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \text{grad } \epsilon \right] + C_{1s} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - C_{2s} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5.6)$$

โดยที่ $\sigma_k = 1.00$; $\sigma_\epsilon = 1.30$; $C_{1\epsilon} = 1.44$; $C_{2\epsilon} = 1.92$

2.1.3 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) สำหรับปัญหาที่ทำการศึกษาในกระบวนการแก้ปัญหาในระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยนั้นเงื่อนไขขอบเขตเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่จะก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่แตกต่างกัน

2.1.4 ลักษณะรูปร่าง (Geometry) ของปัญหา รูปแบบของปัญหาด้านกลศาสตร์ของไหลโดยทั่วไปในงานวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ล้วนมีรูปร่างที่ซับซ้อนหากรูปร่างมีการเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้การไหลที่เกิดขึ้นนั้นเปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกันถึงแม้ว่าระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยและเงื่อนไขขอบเขตยังเป็นเช่นเดิม หากองค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่งเปลี่ยนแปลงไปผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นก็จะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

2.2 การถ่ายเทความร้อน

2.2.1 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

การแผ่รังสีความร้อน (Radiation) เป็นการถ่ายเทความร้อนจากที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางและในการเคลื่อนที่ผ่านไปนั้นจะไม่ทำให้วัตถุตัวกลางที่มีความร้อนผ่านไปร้อนขึ้นด้วยเช่น เอมือไปอังข้างเตารีด เราจะรู้สึกร้อน ความร้อนไม่ได้เกิดจากการนำความร้อน เพราะว่าอากาศเป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดี และก็ไม่ได้เกิดจากการพาความร้อน เพราะว่าอากาศร้อนจะลอยสูงขึ้นในแนวตั้ง แต่ความร้อนที่เราได้รับนี้เกิดจากการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$Q_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma A T^4 \quad (5.7)$$

เมื่อ

R = อัตราการแผ่รังสีความร้อนออกจากวัตถุ

A = พื้นที่ผิวของวัตถุ

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ของวัตถุ

σ = ค่าคงตัวสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ (Stefan-Boltzman constant)

$$= 5.6699 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

ε = ค่าการเปล่งรังสี

2.2.2 การถ่ายเทความร้อนภายในแคลอริมิเตอร์

ความร้อนที่ถ่ายเทจากรังสีอาทิตย์สู่น้ำถูกควบคุมด้วยกลไกการถ่ายเทความร้อนหลายรูปแบบดังสมการ

$$Q_T = h_v A (T_v - T_i) \quad (5.8)$$

$$= h_c A (T_v - T_i) + h_r A (T_v - T_i) + u_k A (T_v - T_i)$$

เมื่อ h_c = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาจากก๊าซสู่ผิวของแข็ง

h_r = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีระหว่างวัสดุกับผนังของแคลอริมิเตอร์

u_k = สัมประสิทธิ์รวมของการถ่ายเทความร้อนสู่ผิวหน้าของแคลอริมิเตอร์ โดยการพาและการนำความร้อนผ่านชั้นวัสดุผิวหน้าซึ่งมีการระเหย

T_v , T_i คือค่าอุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิผิวต่อระหว่างอากาศและของแข็ง

2.2.3 การพาความร้อน

การถ่ายเทความร้อนโดยการพา (Convection) เป็นการถ่ายเทความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยมีวัตถุหรือตัวกลางที่ได้รับความร้อนเป็นตัวพาเอาความร้อนนั้นไป การพาความร้อนจะเกิดขึ้นได้ ในสารสองสถานะคือ ของเหลวและก๊าซ เช่น กาต้มน้ำ น้ำตอนล่างที่อยู่ใกล้กับเตาไฟได้รับความร้อนแล้วขยายตัวจึงมีความหนาแน่นน้อย จะลอยขึ้นตอนบน ส่วนที่เย็นซึ่งหนักกว่าจะจมลงมาแทนที่ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำเป็นกระแสนเวียนจนทั่วทั้งภา น้ำจึงร้อนทั่วถึงทั้งหมด เมื่อนำมือไปอังไอน้ำที่พุ่งออกมาจากกาต้มน้ำ จะรู้สึกร้อน เพราะความร้อนจากน้ำในกาได้ติดมากับไอน้ำ เมื่อกระทบมือจึงรู้สึกร้อน ลมช่วยพาความร้อนออกจากร่างกายทำให้รู้สึกร้อนน้อยลงหรือเย็นขึ้น

ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้

$$q_{\text{conv}} = h_m(T_w - T_\infty) \quad (5.9)$$

เมื่อ

T_w = อุณหภูมิของผิว

T_∞ = อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

h_m = ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์

$$Nu_m = \frac{h_m D_e}{k} = c \left(\frac{u_\infty D_e}{\nu} \right)^n \quad (5.10)$$

เมื่อ

u_∞ = อัตราเร็วของอากาศไหลอิสระ

2.2.4 การนำความร้อน

การนำความร้อน (Conduction) คือการส่งผ่านความร้อนจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า มีวัตถุเป็นตัวกลางโดยวัตถุจะอยู่กับที่ แต่ความร้อนจะค่อยๆ แผ่กระจายไปตามเนื้อวัตถุนั้น เช่น เมื่อสัมผัสแก้วน้ำร้อน ตอนแรกๆ จะไม่รู้สึกร้อน แต่จะค่อยๆ ร้อนจนจับไม่ได้

ความสามารถในการนำความร้อนของสารวัดด้วยปริมาณที่เรียกว่าค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) หรือใช้ตัวอักษรย่อว่า k มีหน่วยเป็น $W/m.K$ ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางกายภาพของตัวกลางที่มีความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน อัตราการถ่ายเทความร้อนจึงมีค่าเป็น

$$q_{\text{cond}} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (5.11)$$

สมการที่ (5.10) คือกฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ (Fourier's law of conduction) เครื่องหมายลบที่อยู่ทางขวามือของสมการเป็นผลเนื่องจากกฎข้อที่สองทางเทอร์โมไดนามิกส์ซึ่ง

กำหนดว่านิยามความหมายของค่าการนำความร้อนไหลจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำค่าการนำความร้อน (k) อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางนั้นขึ้นกับหลายปัจจัยเช่นรูปทรง ความหนาและวัสดุที่ใช้ในการทำตัวกลางรวมทั้งความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างตัวกลาง

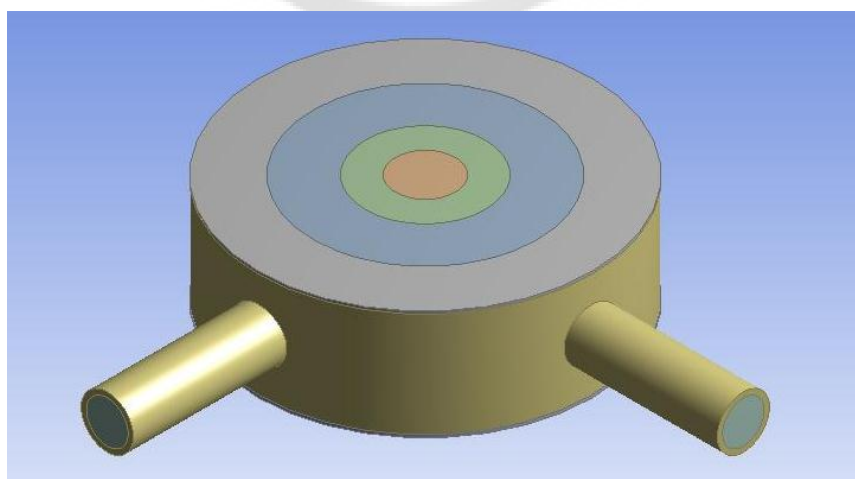
ค่าการนำความร้อน k เป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของวัตถุการนำความร้อนเป็นการถ่ายเทพลังงานจากอนุภาคที่มีพลังงานสูงไปยังอนุภาคที่มีพลังงานต่ำกว่าสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในของเหลว ของแข็งและแก๊สค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิต่ำๆของแก๊สไม่สามารถหาได้จากการวิเคราะห์ดังนั้น ข้อมูลเกี่ยวกับการนำความร้อนส่วนใหญ่ของวัสดุจึงได้มาจากการวัดและการทดสอบโดยทั่วไปแล้ว ค่าการนำความร้อนของวัตถุจะแปรตามอุณหภูมิแต่การนำไปใช้งานในด้านการปฏิบัตินั้นส่วนใหญ่แล้วจะใช้ค่าการนำความร้อนคงที่ที่หาจากอุณหภูมิเฉลี่ยสารที่มีความสามารถในการนำความร้อนสูง เช่น โลหะจะมีค่า k สูง ส่วนสารที่มีความสามารถในการนำความร้อนต่ำ เช่น สารอโลหะก็จะมีค่า k ต่ำ ค่า k จึงเป็นคุณสมบัติประจำตัวของสารที่สำคัญมากในการศึกษาถึงการเคลื่อนที่ของความร้อนในสารนั้นสามารถเปรียบเทียบความสามารถในการนำความร้อนของสารต่างๆโดยการเปรียบเทียบจากค่า k ของสารเหล่านั้นโดยสารที่มีค่า k สูงจะเรียกว่าสารตัวนำ (conductor) และสารที่มีค่า k ต่ำจะเรียกว่าฉนวน (insulator)

3. ขั้นตอนการดำเนินงาน

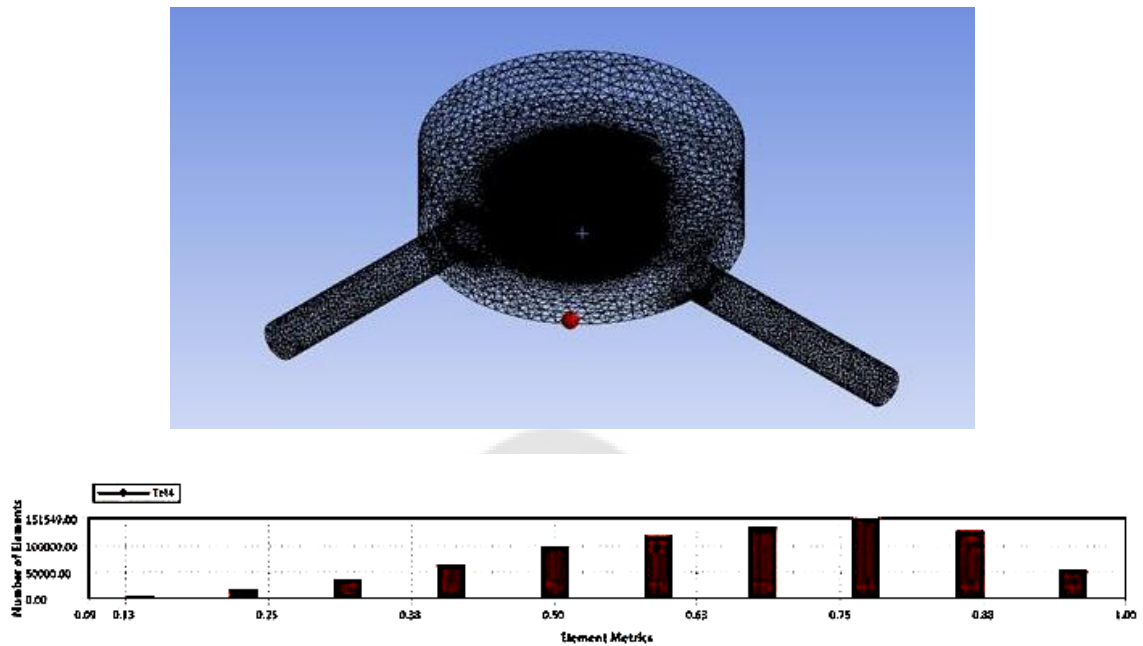
3.1 ลักษณะของแคลอริมิเตอร์

Physical Model

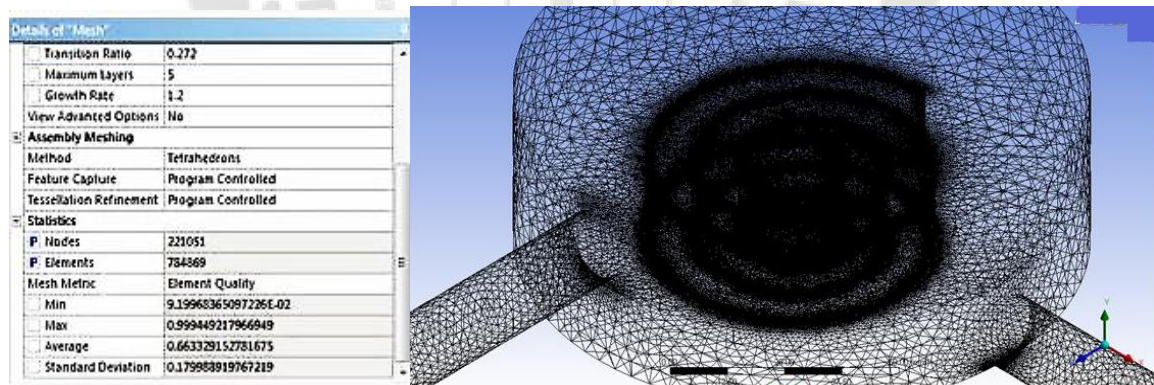
ทำการเขียนแบบแคลอริมิเตอร์แล้วกำหนดเมช ในกรณีของแคลอริมิเตอร์จะกำหนดให้มี 221,521 nodes และ 784,869 elements ดังภาพประกอบ 97-99



ภาพประกอบ 97 การเขียนแบบแคลอริมิเตอร์



ภาพประกอบ 98 การแบ่งอีลิเมนต์ย่อยของแคลอริมิเตอร์



ภาพประกอบ 99 การกำหนดเมชของแคลอริมิเตอร์

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในส่วนของการคำนวณได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการอนุพันธ์มวล สมการนาเวียร์-สโตก (Navier stoke equation) แบบของไหลอัดตัวไม่ได้ สมการพลังงาน และพลังงานจลน์ของการปั่นป่วนแบบ k-ε ในการวิเคราะห์หาค่าต่างๆ ซึ่งมีระบบคำนวณสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ

เงื่อนไขขอบเขตสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในส่วนของแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่องและแคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอย

- ทางเข้า ความเร็วของน้ำสม่ำเสมอทั้งหน้าตัดทางเข้า ที่ $v = 0.33 \text{ m/s}$ 0.66 m/s และ 1.32 m/s กำหนดตามผลการทดลอง

อุณหภูมิน้ำทางเข้า (T_{in}) = อุณหภูมิบรรยากาศที่ทดลอง ($T_{amb} = 34 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

- ทางออก ความดันของอากาศที่ทางออก (P_{out}) = ความดันบรรยากาศ (P_{amb})

- ผนังด้านร้อนของแคลอริมิเตอร์ทั้ง 2 แบบ มีความร้อนเข้าที่มาจากตัวรวมรังสีแบบสองชั้นตอน $T = 199.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$

- วัสดุที่ทำแคลอริมิเตอร์กำหนดเป็น ทองแดง

ขั้นตอนการคำนวณ

1. กำหนดเงื่อนไขขอบเขต และค่าเริ่มต้นในการคำนวณโดยให้มีค่าเท่ากับการทดลอง
 2. กำหนดเงื่อนไขในการคำนวณ เป็นอุณหภูมิและความเร็วขาเข้าของน้ำ 3 ค่าคือ 0.33 m/s 0.66 m/s และ 1.32 m/s อุณหภูมิที่ผิวด้านร้อนของแคลอริมิเตอร์ทั้ง 2 แบบโดยให้มีอุณหภูมิเท่ากันคือ $199.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 3. คำนวณสมการโมเมนตัมเพื่อทำการหาความเร็ว
 4. คำนวณสมการพลังงานเพื่อหาพลังงานรวมจำเพาะ
 5. คำนวณค่าพลังงานจลน์ของการไหลแบบราบเรียบสำหรับแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลผ่านต่อเนื่อง (Simple calorimeter)
 6. คำนวณค่าพลังงานจลน์ของการปั่นป่วน และอัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ของการปั่นป่วน โดยใช้แบบจำลอง $k-\epsilon$ model สำหรับแคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอย (Spiral calorimeter)
 7. ในกรณีค่าความถูกต้องของคำตอบไม่ลู่เข้า (Reverse) ให้กลับไปทำตามขั้นตอนที่ 3-5
- ใหม่ผลการคำนวณที่ลู่เข้าหาคำตอบกระทั่งค่าที่ได้จากการคำนวณถูกต้อง ลู่เข้า (Convergence) ตามค่าที่กำหนดจึงทำการหยุดการคำนวณและแสดงผล

การหาผลเฉลยของสมการควบคุม (Governing equation) ซึ่งอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยซึ่งคู่ควบกันอยู่ ได้ใช้หลักวิธีพื้นฐานของปริมาตรควบคุม ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข โดยแบ่งขอบเขตการคำนวณออกเป็นปริมาตรควบคุมย่อยๆ ทำการอินทิเกรตสมการควบคุมในแต่ละปริมาตรควบคุม พร้อมทั้ง จัดให้อยู่ในรูปของสมการพีชคณิต ทำการดิสครีตสมการควบคุม ซึ่งอยู่ในรูปอินทิกรัล และทำการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ของปริมาตรต่างๆ ในปริมาตรควบคุมย่อยหนึ่งๆ กับปริมาณต่างๆ ในปริมาตรควบคุมย่อยข้างเคียงให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น จากนั้น จึงทำการแก้สมการ เพื่อหาผลเฉลยต่อไปซึ่งระเบียบวิธีดังกล่าวเรียกว่าวิธีการคำนวณแบบปริมาตรสืบเนื่อง (Finite volume method) เป็นการประยุกต์กระบวนการคำนวณทางด้านพลศาสตร์ของไหล (Computational fluid

dynamics) การจำลองการไหลของน้ำภายในแคลอริมิเตอร์ ด้วยโปรแกรม โดยการวิเคราะห์ผลเพื่อหาคำตอบจากสมการ $k - \epsilon$ model ด้วยการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และเงื่อนไขเริ่มต้น ในส่วนของการวิเคราะห์เป็นการไหลของของไหลที่ไหลผ่านแคลอริมิเตอร์ ซึ่งในที่นี้ใช้น้ำเป็นของไหลถ่ายเทความร้อน กำหนดให้อุณหภูมิที่ด้านเข้าแคลอริมิเตอร์มีค่าคงที่ตลอดช่วงการทดสอบ ส่วนอุณหภูมิของน้ำที่ทางออก และอัตราการไหลของน้ำให้มีการแปรเปลี่ยนตามสภาวะการทดลอง เพื่อความสะดวกและใช้เวลาในการคำนวณให้น้อยลงในส่วนของการสร้างเซลล์ของแคลอริมิเตอร์ จะเป็นแบบทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedron cells) ทั้งสองลักษณะดังแสดงในภาพประกอบ 98-99

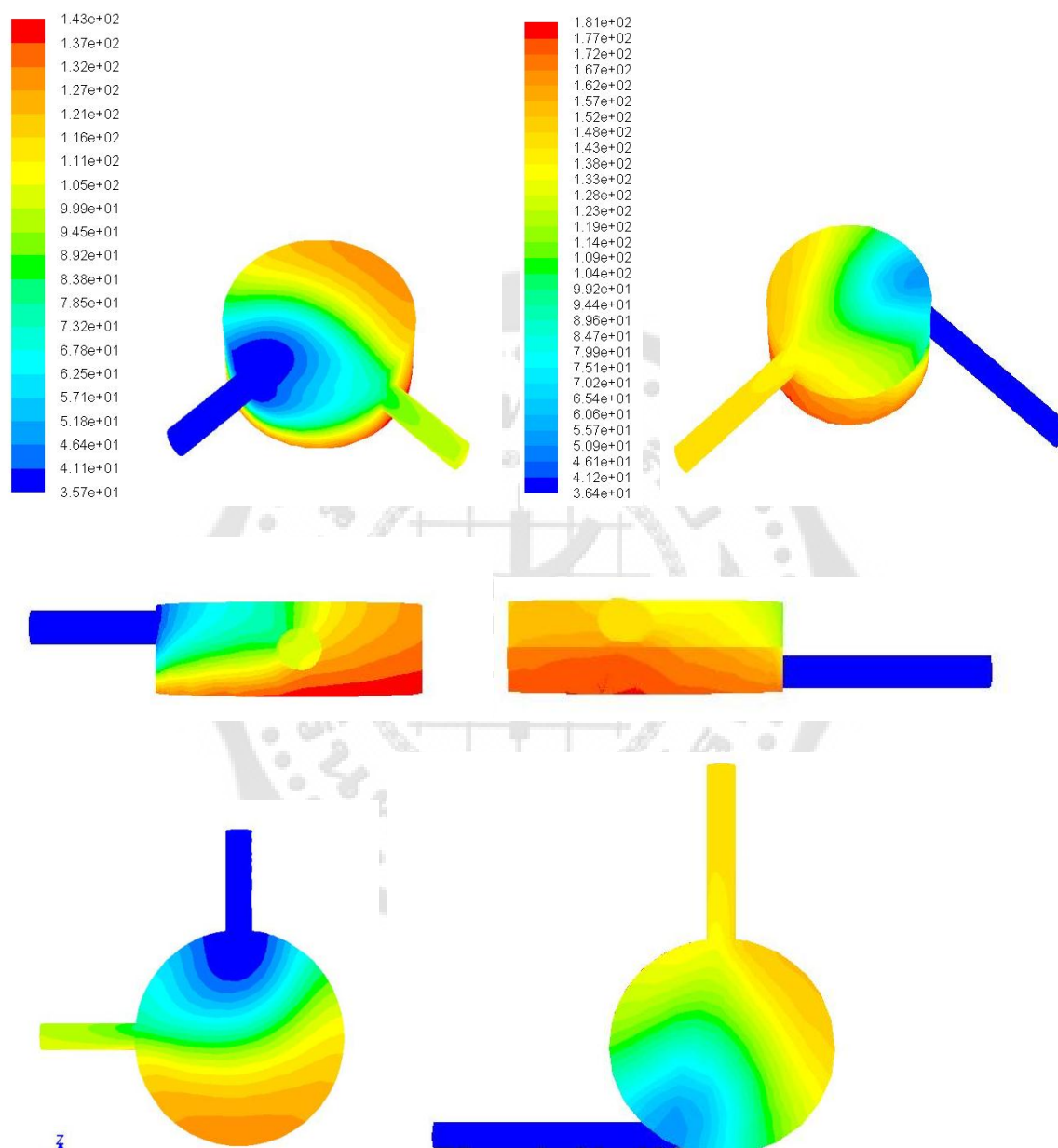
การเปรียบเทียบผล

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้แบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วน คือ ทางด้านการทดลอง ซึ่งได้มีการสร้างแคลอริมิเตอร์ 2 แบบคือ แบบแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่องและแคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอยสำหรับใช้ในการทดลองเก็บข้อมูล แล้วนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาตัวแปรที่ต้องการต่าง ๆ ทางด้านการคำนวณใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของการไหลในการคำนวณ วันที่นำผลการทดลองมาป้อนพารามิเตอร์เข้าโปรแกรมคือวันที่ 14/05/57 สำหรับแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่อง และวันที่ 17/05/57 สำหรับแคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอย เนื่องจากมีความเข้มข้นสีอาทิตย์ใกล้เคียงกัน ผลที่ได้จากทั้งสองส่วนจะถูกบันทึกในรูปแบบของตาราง และนำผลมาแสดงในลักษณะของภาพและกราฟแสดงการเปรียบเทียบของตัวแปรต่างๆ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองและการคำนวณทางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถแสดงอยู่ในรูปตัวแปรต่างๆ ดังนี้

- ภาพแสดงการกระจายอุณหภูมิที่ผิวของแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่องและแคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอยที่อัตราการไหล 0.0665 kg/s
- ภาพแสดงการกระจายอุณหภูมิที่ผิวของแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่องและแคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอยที่อัตราการไหล 0.133 kg/s
- ภาพแสดงการกระจายอุณหภูมิที่ผิวของแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่องและแคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอยที่อัตราการไหล 0.266 kg/s
- แสดงรูปแบบการไหลของน้ำ (เวกเตอร์ความเร็ว) ที่ไหลผ่านแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่องและแคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอยที่อัตราการไหล 0.0665 kg/s
- แสดงรูปแบบการไหลของน้ำ (เวกเตอร์ความเร็ว) ที่ไหลผ่านแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่องและแคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอยที่อัตราการไหล 0.133 kg/s
- แสดงรูปแบบการไหลของน้ำ (เวกเตอร์ความเร็ว) ที่ไหลผ่านแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่องและแคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอยที่อัตราการไหล 0.266 kg/s
- แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรโนลด์ส์นัมเบอร์ (Reynolds number, Re) และค่าตัวเลขนัสเซลล์นัมเบอร์ (Nusselt number, Nu) ของแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่องและแคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอย

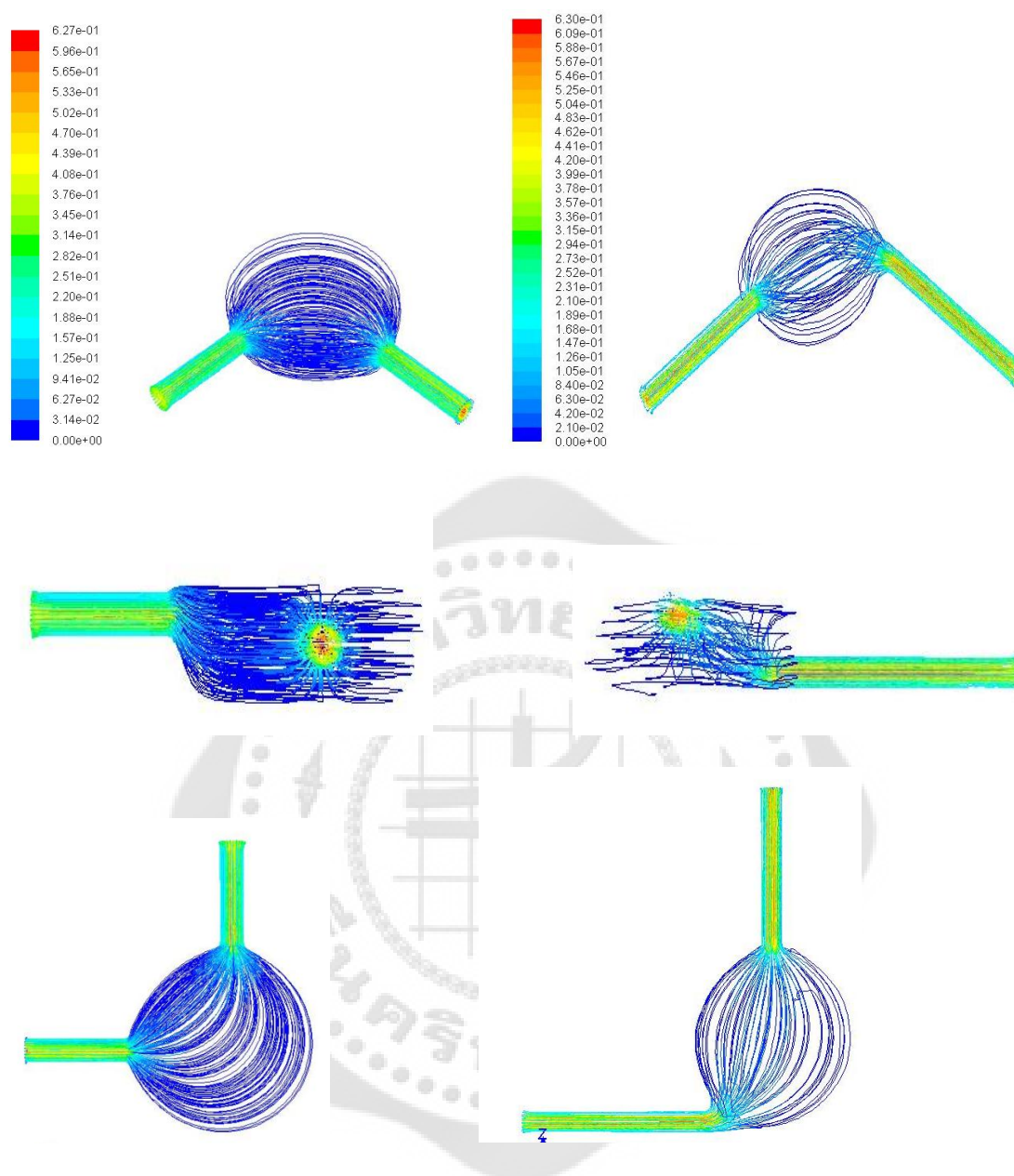
ผลการจำลองด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของการไหล

ทำการจำลองการถ่ายเทความร้อนด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของการไหลที่อัตราการไหล 0.0665 kg/s ในกรณีที่ใช้แคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่องและแคลอริมิเตอร์แบบก้นหอย



ภาพประกอบ 100 การกระจายอุณหภูมิ ที่อัตราการไหล 0.0665 kg/s ภาพซ้ายแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่องภาพขวาแบบขดก้นหอย

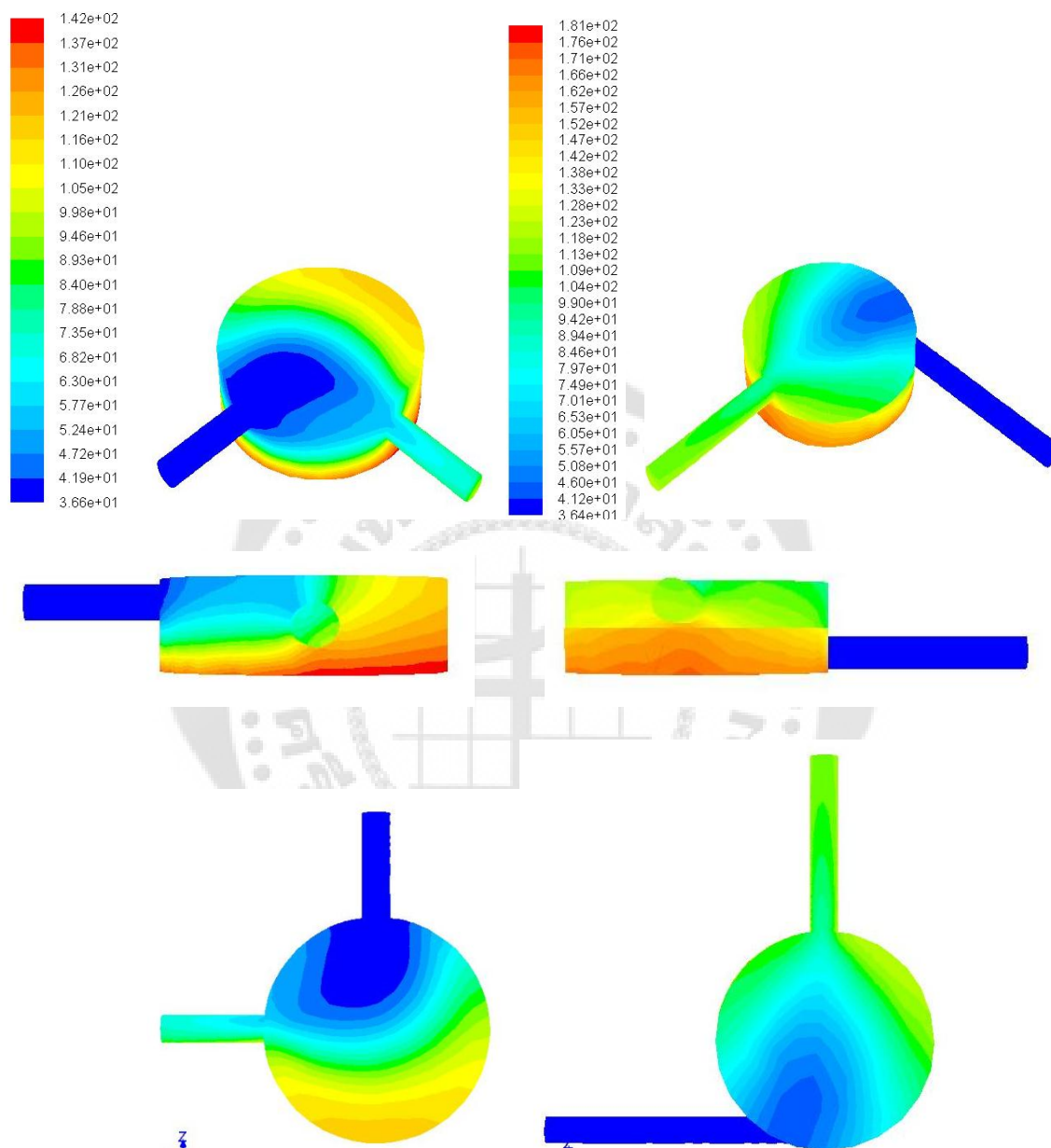
จากภาพประกอบ 100 การกระจายอุณหภูมิของแคลอริมิเตอร์ทั้งสองแบบที่รับความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่รวมรังสีโดยตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลาสองชั้นตอน ความร้อนจากด้านล่างของแคลอริมิเตอร์แบบขดก้นหอยกระจายเต็มพื้นที่มากกว่า



ภาพประกอบ 101 การกระจายความเร็ว ที่อัตราการไหล 0.0665 kg/s ภาพซ้ายแคลอริมิเตอร์แบบ
น้ำไหลต่อเนื่องภาพขวาแบบขดกันหอย

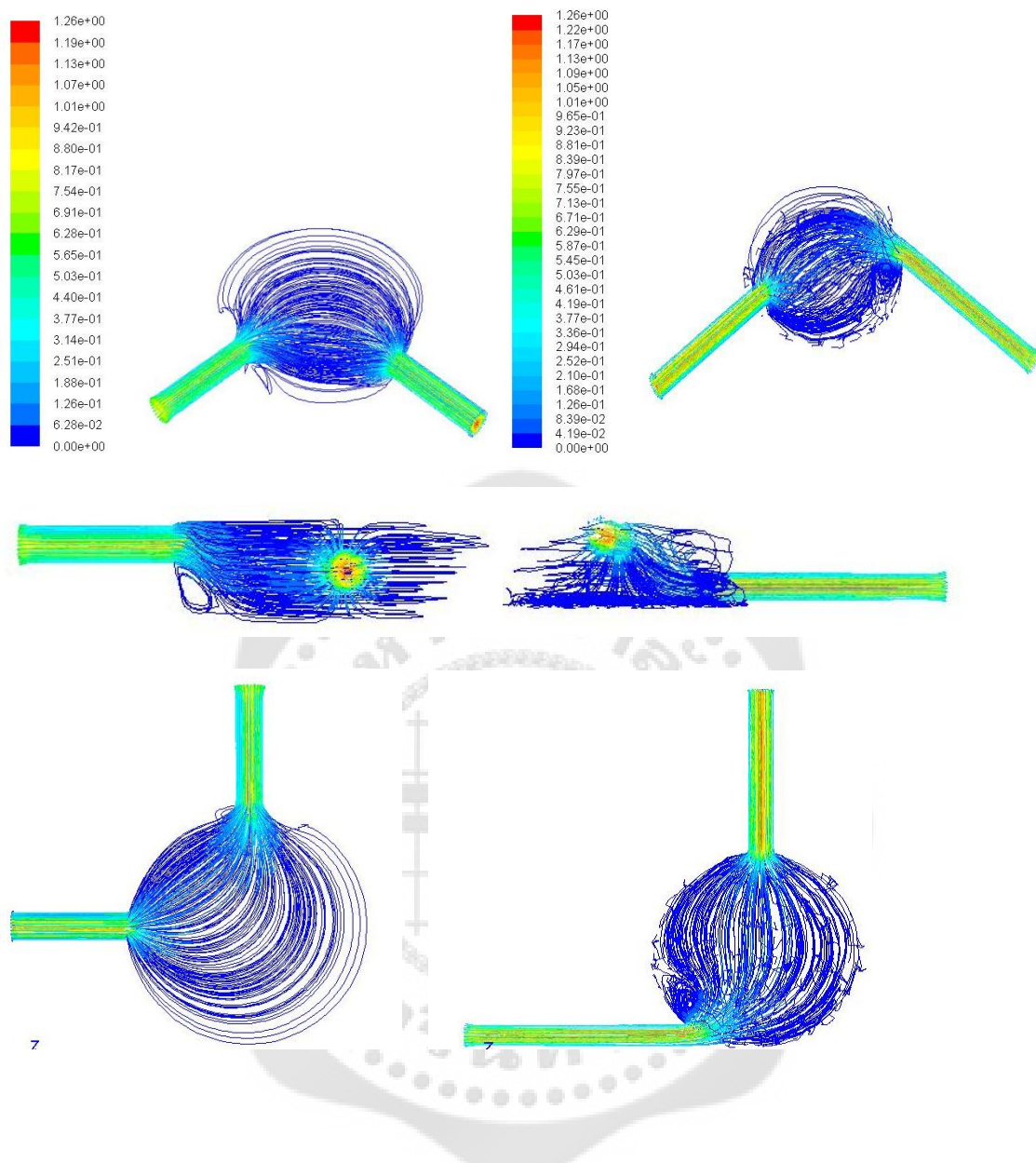
ที่อัตราการไหล 0.0665 kg/s การกระจายความเร็วของแคลอริมิเตอร์ทั้งสองแบบไม่แตกต่างกันมากนักเนื่องจากมีความเร็วของน้ำขาเข้ามีค่าต่ำ โดยความเร็วของน้ำไหลผ่านแคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอยจะมีความเร็วสูงกว่าเล็กน้อย ความเร็วของน้ำจะมีค่าสูงสุดบริเวณกึ่งกลางของท่อด้านออกทั้งสองกรณี

ทำการจำลองการถ่ายเทความร้อนด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของการไหลที่อัตราการไหล 0.133 kg/s ในกรณีที่ใช้แคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่องและแคลอริมิเตอร์แบบก้นหอย



ภาพประกอบ 102 การกระจายอุณหภูมิ ที่อัตราการไหล 0.133 kg/s ภาพซ้ายแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่องภาพขวาแบบก้นหอย

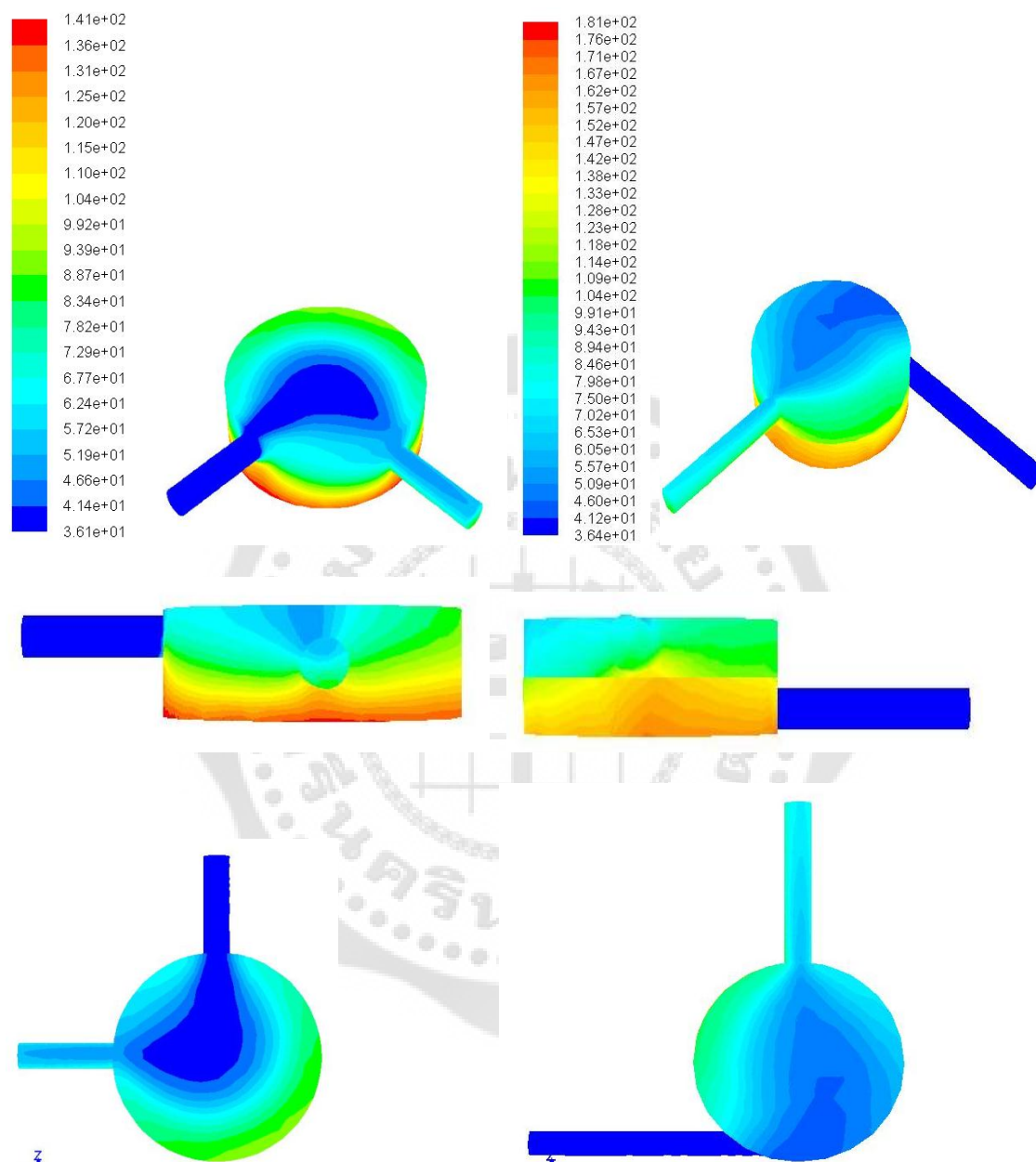
จากภาพประกอบ 102 การกระจายอุณหภูมิของแคลอริมิเตอร์แบบก้นหอยจะทำได้ดีกว่าแบบน้ำไหลต่อเนื่องโดยจะสามารถเพิ่มอุณหภูมิของน้ำขาออกได้สูงกว่า



ภาพประกอบ 103 การกระจายความเร็ว ที่อัตราการไหล 0.133 kg/s ภาพซ้ายแคลอริมิเตอร์แบบ
น้ำไหลต่อเนื่องภาพขวาแบบขดกันหอย

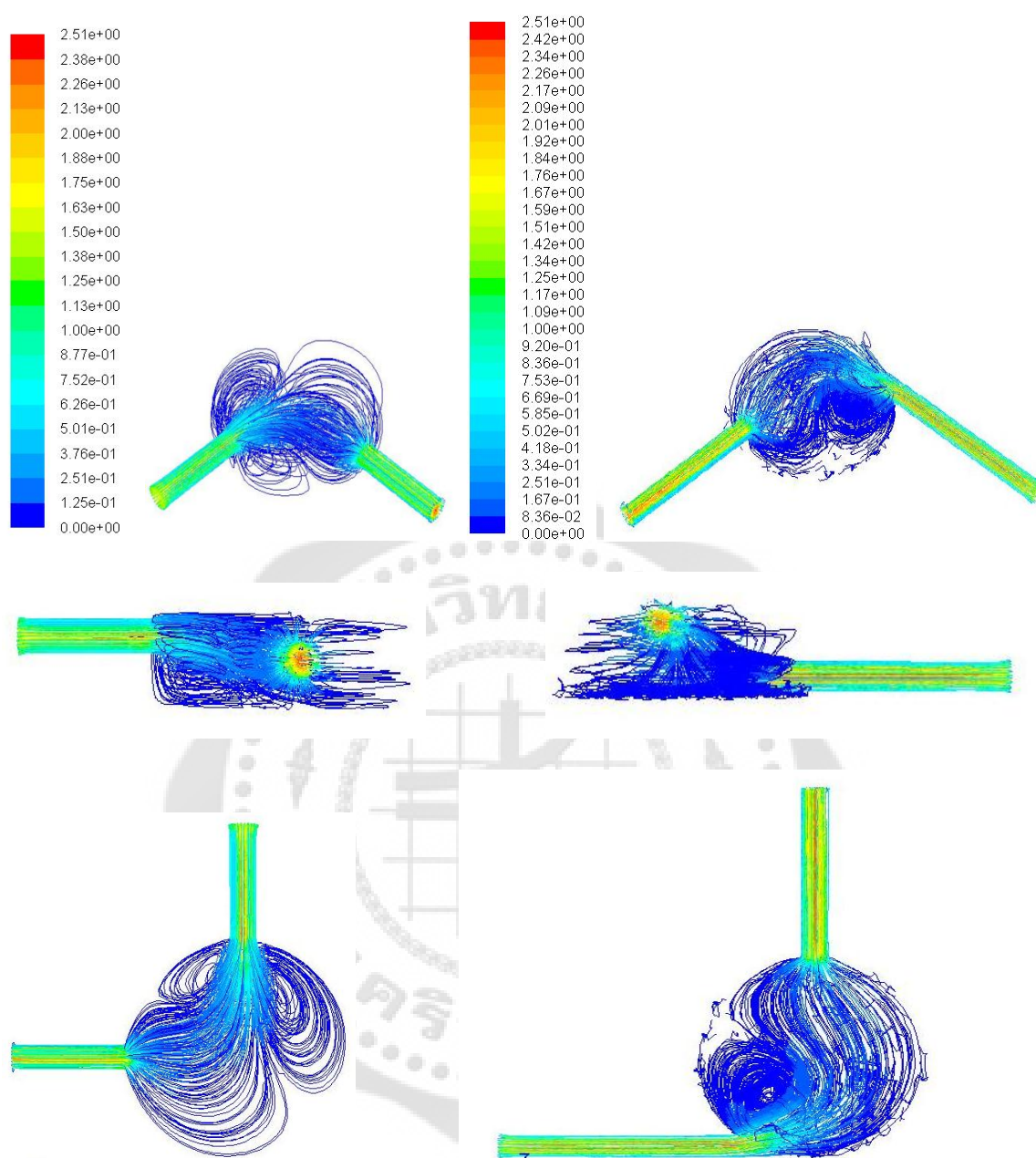
ที่อัตราการไหล 0.133 kg/s การกระจายความเร็วของแคลอริมิเตอร์ทั้งสองแบบ แคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่องเริ่มมีเส้นชั้นความเร็วที่ละเอียดมากขึ้น แคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอยมีความปั่นป่วนเกิดขึ้นบริเวณขดกันหอยด้านล่าง ความเร็วของน้ำจะมีค่าสูงสุดบริเวณกึ่งกลางของท่อด้าน
ออก

ทำการจำลองการถ่ายเทความร้อนด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของการไหลที่อัตราการไหล 0.266 kg/s ในกรณีที่ใช้แคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่องและแคลอริมิเตอร์แบบก้นหอย



ภาพประกอบ 104 การกระจายอุณหภูมิ ที่อัตราการไหล 0.266 kg/s ภาพซ้ายแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่องภาพขวาแบบขดก้นหอย

จากภาพประกอบ 104 การกระจายอุณหภูมิของแคลอริมิเตอร์แบบขดก้นหอยจะทำได้ดีกว่าแบบน้ำไหลต่อเนื่องโดยจะสามารถเพิ่มอุณหภูมิของน้ำขาออกได้สูงกว่า



ภาพประกอบ 105 การกระจายความเร็วที่อัตราการไหล 0.266 kg/s ภาพซ้ายแคลอริมิเตอร์แบบน้ำ
ไหลต่อเนื่องภาพขวาแบบขดกันหอย

ที่อัตราการไหล 0.266 kg/s การกระจายความเร็วของแคลอริมิเตอร์ทั้งสองแบบ แคลอริมิเตอร์แบบ
น้ำไหลต่อเนื่องเริ่มมีความปั่นป่วนในการไหลของน้ำมากขึ้น แคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอยมีความ
ปั่นป่วนของการไหลเกิดขึ้นบริเวณขดกันหอยด้านล่างสูงขึ้น

ข้อมูลเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองด้วยโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของการ
ไหลเมื่อพื้นที่ของแคลอริมิเตอร์เป็น 0.01496 m^2 แสดงได้ดังตาราง 16

ตาราง 16 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองด้วยการคำนวณพลศาสตร์ของการไหล

สภาวะ การ ทดสอบ	แหล่งกำเนิด/ ความเข้ม รังสี	การทดลอง อุณหภูมิ °C			การจำลองด้วย CFD อุณหภูมิ °C			ความคลาดเคลื่อน % Error		
		Tin, ave	Tout, ave	Twall, hot	Tin, ave	Tout, ave	Twall, hot	Tin, ave	Tout, ave	Twall, hot
1. PDC 2+Simple cal	ดวงอาทิตย์ จริง									
14/05/57	849.43 W/m ²									
*10.35 น.- 13.42 น.	V ₁ =0.33 m/s	35.73	98.27	181.48	35.73	102.69	181.48	0	4.30	0
	V ₂ =0.66 m/s	36.63	75.54	183.48	36.63	83.15	183.48	0	9.15	0
	V ₃ =1.32 m/s	36.14	67.42	182.48	36.14	68.30	182.48	0	1.29	0
15/05/57	791.01 W/m ²									
*14.01 น.- 15.11 น.	V ₁ =0.33 m/s	35.41	125.5	201.03	35.41	138.34	201.03	0	9.28	0
	V ₂ =0.66 m/s	37.59	102.8	200.03	37.59	108.44	200.03	0	5.20	0
	V ₃ =1.32 m/s	36.03	80.04	200.04	36.03	85.45	200.04	0	6.33	0
17/05/57	525.21 W/m ²									
*11.00 น.- 13.00 น.	V ₁ =0.33 m/s	34.42	99.54	141.27	34.42	100.83	141.27	0	1.28	0
	V ₂ =0.66 m/s	35.56	80.45	140.28	35.56	81.59	140.28	0	1.40	0
	V ₃ =1.32 m/s	36.63	65.54	142.26	36.63	67.99	142.26	0	3.60	0
2. PDC 2+Spiral cal	ดวงอาทิตย์ จริง									
	586.69 W/m ²									
14/05/57	V ₁ =0.33 m/s	35.35	110.4	137.53	35.35	112.04	137.53	0	1.46	0
*14.13 น.- 15.51 น.	V ₂ =0.66 m/s	39.86	108.3	167.86	39.86	110.29	167.86	0	1.80	0
	V ₃ =1.32 m/s	37.37	88.64	170.48	37.37	92.34	170.48	0	4.01	0

ตาราง 16 (ต่อ) เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองด้วยการคำนวณพลศาสตร์ของการไหล

สภาวะ การ ทดสอบ	แหล่งกำเนิด/ ความเข้ม รังสี	การทดลอง อุณหภูมิ °C			การจำลองด้วย CFD อุณหภูมิ °C			ความคลาดเคลื่อน % Error		
		Tin, ave	Tout, ave	Twall, hot	Tin, ave	Tout, Ave	Twall, hot	Tin, ave	Tout, ave	Twall, hot
2. PDC 2+Spiral cal 15/05/57 *11.14 น.- 13.16 น.	ดวงอาทิตย์ จริง									
17/05/57 *14.01 น.- 15.11 น.	851.4 W/m ²									
3. PDC 2+Simple cal 26/05/57	เครื่องจำลอง รังสีอาทิตย์									
1624.82 W/m ²	V ₁ =0.33 m/s	29.47	79.7	112.59	29.47	81.83	112.59	0	2.60	0
1637.8	V ₂ =0.66 m/s	30.13	78.37	146.83	30.13	80.88	146.83	0	3.10	0
1602.7	V ₃ =1.32 m/s	32.76	64.84	145.66	32.76	66.59	145.66	0	2.63	0
4. PDC 2+Spiral cal 26/05/57	เครื่องจำลอง รังสีอาทิตย์									
1642.54 W/m ²	V ₁ =0.33 m/s	33.03	105.3	131.41	33.03	106.87	131.41	0	1.47	0
1671.92	V ₂ =0.66 m/s	32.16	94.37	146.69	32.16	95.18	146.69	0	0.85	0
1615.04	V ₃ =1.32 m/s	32.05	75.55	152.68	32.05	76.39	152.68	0	1.10	0

จากตาราง 16 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองด้วยโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของการไหลโดยแบ่งสภาวะการทดสอบเป็น 4 สภาวะด้วยกันได้แก่ 1. ตัวรวมรังสีแบบ

สองขั้นตอนกับแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่อง ใช้ดวงอาทิตย์จริงเป็นแหล่งให้ความร้อน 2. ตัวรวมรังสีแบบสองขั้นตอนกับแคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอย ใช้ดวงอาทิตย์จริงเป็นแหล่งให้ความร้อน 3. ตัวรวมรังสีแบบสองขั้นตอนกับแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่อง ใช้เครื่องจำลองรังสีอาทิตย์เป็นแหล่งให้ความร้อนและ 4. ตัวรวมรังสีแบบสองขั้นตอนกับแคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอย ใช้เครื่องจำลองรังสีอาทิตย์เป็นแหล่งให้ความร้อน โดยแต่ละสภาวะทำการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่วัดได้ ได้แก่ อุณหภูมิน้ำเข้า ($T_{in,ave}$) อุณหภูมิน้ำออก ($T_{out,ave}$) อุณหภูมิพื้นผิวด้านร้อนของแคลอริมิเตอร์ ($T_{wall,ave}$) ของแคลอริมิเตอร์ทั้งสองแบบ เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำสูงขึ้นอุณหภูมิด้านนอกของแคลอริมิเตอร์ทั้งสองแบบจะลดลง แคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอยสามารถเพิ่มอุณหภูมิของน้ำด้านนอกได้สูงขึ้นมากกว่าแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่อง

การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิจากการทดลองและจากการคำนวณพบว่าผลการคำนวณสอดคล้องกันกับค่าที่วัดได้จากการทดลองโดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 10 %

เมื่อนำผลจากการทดลองและการคำนวณด้วยโปรแกรมพลศาสตร์การไหลที่มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ใกล้เคียงกันคือ 850 W/m^2 สำหรับแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่อง (Simple calorimeter) ทดลองในวันที่ 14/05/57 กับแคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอย (Spiral calorimeter) ทดลองในวันที่ 17/05/57 ทำการคำนวณประสิทธิภาพของแคลอริมิเตอร์แสดงได้ดังตาราง 17

ตาราง 17 การคำนวณประสิทธิภาพของแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่องและแบบขดกันหอย

1. PDC 2+Simple cal	v (m/s)	ṁ (kg/s)	T _{in}	T _{out,exp.}	T _{out,numerical}	ΔT _{exp.}	ΔT _{numerical}	η _{exp.(%)}	η _{numerical(%)}
		ṁ	°C	°C	°C	°C	°C		
14/05/57									
	V1=0.33 m/s	0.0665	35.73	98.27	102.69	62.54	66.96	10.753	11.513
*10.35-13.42	V2=0.66 m/s	0.133	36.63	75.54	83.15	38.91	46.52	13.380	15.997
849.43 W/m ²	V3=1.32 m/s	0.266	36.14	67.42	68.3	31.28	32.16	21.513	22.118
2. PDC 2+Spiral cal									
17/05/57	V1=0.33 m/s	0.0665	36.4	144.3	146.79	107.9	110.39	18.509	18.936
*14.01-15.11	V2=0.66 m/s	0.133	36.4	115.5	117.32	79.1	80.92	27.138	27.762
851.4 W/m ²	V3=1.32 m/s	0.266	36.4	84.54	90.46	48.14	54.06	33.032	37.094

จากตาราง 17 พบว่าแคลอริมิเตอร์ทั้งสองแบบมีประสิทธิภาพสูงขึ้นตามการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำที่เข้าสู่แคลอริมิเตอร์ แคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่องมีประสิทธิภาพจากการทดลองสูงสุด 21.513 % และจากการคำนวณด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของการไหล 22.118 % ที่อัตราการไหล 0.266 kg/s แคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอยมีประสิทธิภาพจากการทดลองสูงสุด 33.032 % และจากการคำนวณด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของการไหล 37.094 % แคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอยมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบน้ำไหลต่อเนื่อง ที่อัตราการไหล 0.266 kg/s เนื่องจากทำอุณหภูมิด้านนอกได้สูงกว่าอันเป็นผลจากการใส่ขดกันหอยที่จะช่วยเพิ่มความปั่นป่วนของน้ำที่ไหลผ่านบริเวณขดกันหอย การไหลแบบปั่นป่วนนี้ทำให้เกิดการกระจายตัวของความร้อนภายในแคลอริมิเตอร์ได้มากขึ้น

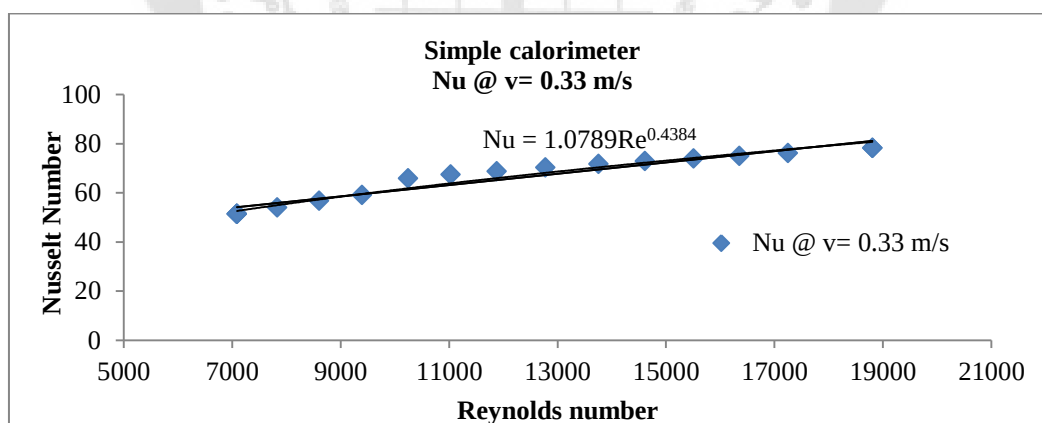
เพราะเกิดการชนกันของโมเลกุลของของไหลทำให้มีการแลกเปลี่ยนพลังงานมากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของแคลอริมิเตอร์สูงขึ้น

ผลของการศึกษาการถ่ายเทความร้อน

ทำการวิเคราะห์ค่า Nusselt number ของการไหลในแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลผ่านต่อเนื่อง (simple calorimeter) และแคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอย (spiral calorimeter) ที่คำนวณได้ตามอัตรา การไหล และเลข Reynolds number ที่เปลี่ยนแปลงแสดงในตารางที่ 18

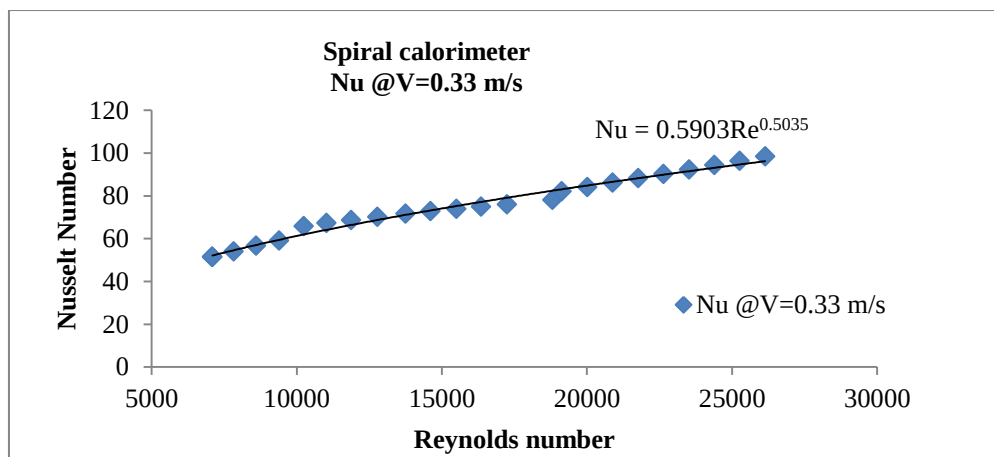
ตาราง 18 แสดงค่า Nusselt number ของ แคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลผ่านต่อเนื่อง (Simple calorimeter) และ แคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอย (Spiral calorimeter) ที่อัตราการไหลของน้ำ ผ่านแคลอริมิเตอร์เป็น 0.0665 kg/s (ความเร็ว 0.33 m/s)

Reynolds number	Nu simple cal	Nu spiral cal	% การเพิ่มขึ้นของ Nu
5000	45.14	46.10	2.07
10000	61.18	62.50	2.12
15000	73.08	74.77	2.27
20000	82.90	86.43	4.08
25000	91.42	96.70	5.46



ภาพประกอบ 106 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า Nusselt number กับ Reynolds number ของ น้ำที่ไหลผ่านแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่องที่ความเร็ว 0.33 m/s

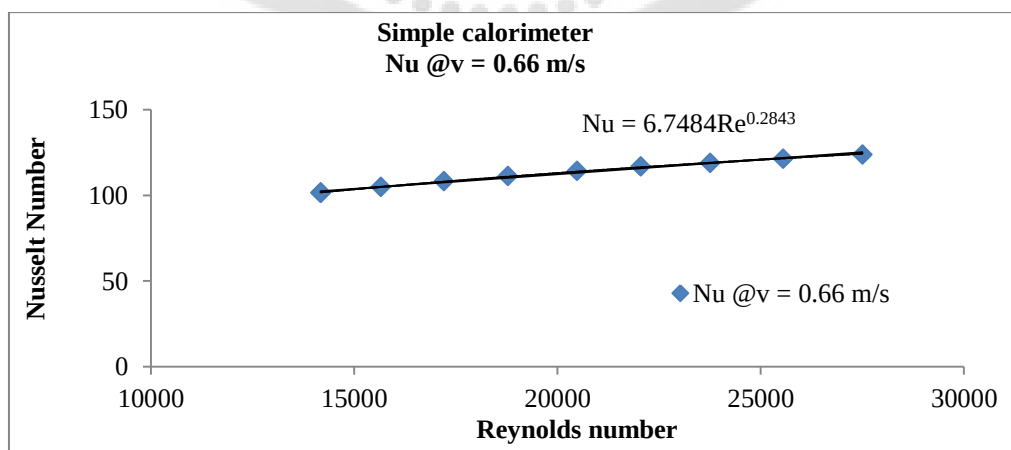
จากตาราง 18 แสดงการคำนวณค่าตัวเลข Nusselt number ของการไหลในแคลอริมิเตอร์ทั้งสอง แบบ ที่ความเร็ว 0.33 m/s โดยพบว่าตัวเลข Nusselt number เพิ่มขึ้นตาม Reynolds number และ Nusselt number ของการไหลในแคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอยมีค่าสูงกว่าแบบน้ำไหลต่อเนื่อง และ % การเพิ่มขึ้นของ Nusselt number ของการไหลในแคลอริมิเตอร์ทั้งสองแบบ ตัวเลข Nusselt number จะเพิ่มขึ้นตาม Reynolds number



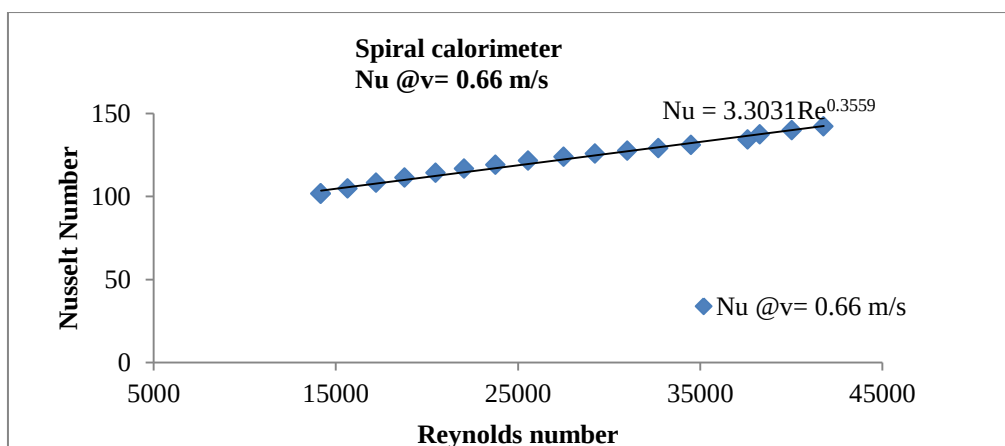
ภาพประกอบ 107 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า Nusselt number กับ Reynolds number ของ น้ำที่ไหลผ่านแคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอยที่ความเร็ว 0.33 m/s

ตาราง 19 แสดงค่า Nusselt number ของ แคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลผ่านต่อเนื่อง (Simple calorimeter) และ แคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอย (Spiral calorimeter) ที่อัตราการไหลของน้ำ ผ่านแคลอริมิเตอร์เป็น 0.133 kg/s (ความเร็ว 0.66 m/s)

Reynolds number	Nu simple cal	Nu spiral cal	% การเพิ่มขึ้นของ Nu
10000	92.56	92.88	0.35
20000	112.72	113.45	0.65
30000	126.49	129.52	2.34
40000	137.27	143.48	4.33
50000	146.26	155.34	5.85



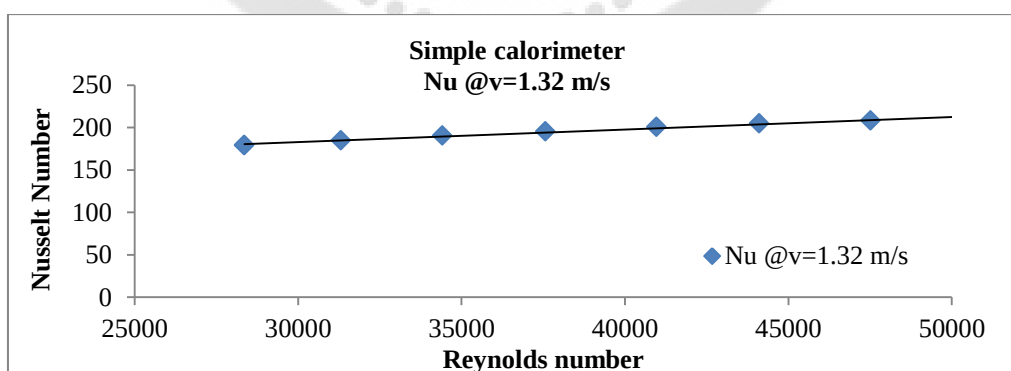
ภาพประกอบ 108 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า Nusselt number กับ Reynolds number ของ น้ำที่ไหลผ่านแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่องที่ความเร็ว 0.66 m/s



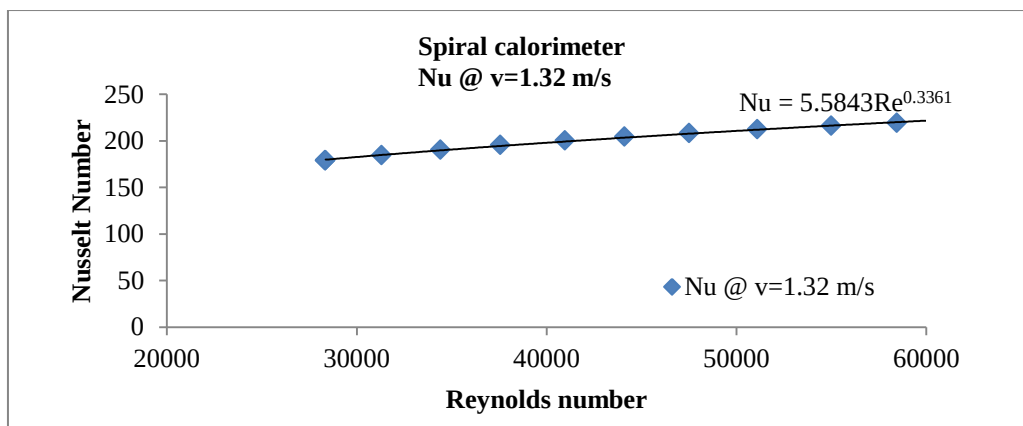
ภาพประกอบ 109 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า Nusselt number กับ Reynolds number ของ น้ำที่ไหลผ่านแคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอยที่ความเร็ว 0.66 m/s

ตาราง 20 แสดงค่า Nusselt number ของ แคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลผ่านต่อเนื่อง (Simple calorimeter) และ แคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอย (Spiral calorimeter) ที่อัตราการไหลของน้ำ ผ่านแคลอริมิเตอร์เป็น 0.266 kg/s (ความเร็ว 1.32 m/s)

Reynolds number	Nu simple cal	Nu spiral cal	% การเพิ่มขึ้นของ Nu
30000	183.18	183.43	0.14
40000	197.84	198.12	0.14
50000	210.01	211.61	0.76
60000	220.51	225.09	2.03
70000	229.80	237.15	3.10



ภาพประกอบ 110 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า Nusselt number กับ Reynolds number ของ น้ำที่ไหลผ่านแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่องที่ความเร็ว 1.32 m/s



ภาพประกอบ 111 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า Nusselt number กับ Reynolds number ของ น้ำที่ไหลผ่านแคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอยที่ความเร็ว 1.32 m/s

จากตาราง 19-20 แสดงการคำนวณหาค่าตัวเลข Nusselt number ของการไหลในแคลอริมิเตอร์ทั้งสองแบบที่ความเร็วของการไหล 0.66 และ 1.32 m/s โดยพบว่าตัวเลข Nusselt number มีค่าเพิ่มขึ้นตามตัวเลข Reynolds number และตัวเลข Nusselt number ของการไหลในแคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอยจะมีค่าสูงกว่าแบบน้ำไหลต่อเนื่อง และ % การเพิ่มขึ้นของตัวเลข Nusselt number ของการไหลในแคลอริมิเตอร์ทั้งสองแบบ ตัวเลข Nusselt number จะเพิ่มขึ้นตามตัวเลข Reynolds number และความเร็วในการไหล

สรุป

การวิเคราะห์พลศาสตร์การไหลของของไหลทำงาน เป็นการนำเสนอผลการศึกษาพฤติกรรมการกระจายตัวของน้ำร้อนภายในแคลอริมิเตอร์เพื่อต้องการทราบว่าพลังงานจากการรวมรังสีของตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลา 2 ชั้นตอนส่งผลต่อการพฤติกรรมการกระจายตัวของความร้อนภายในแคลอริมิเตอร์ทั้งสองแบบอย่างไร โดยแบ่งการวิเคราะห์การกระจายตัวของความร้อนออกเป็น 4 กรณี โดยกรณีที่ 1-2 เป็นแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลผ่านต่อเนื่องและแบบมีขดกันหอยใช้ดวงอาทิตย์จริง กรณีที่ 3-4 เป็นแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลผ่านต่อเนื่องและแบบมีขดกันหอยภายใน ใช้เครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ ทำการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แตกต่างกัน 2 แบบสำหรับแคลอริมิเตอร์ทั้งสองชนิด และใช้ระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics) มาจำลองพฤติกรรมการกระจายตัวของความร้อนของน้ำภายในแคลอริมิเตอร์ แล้วคำนวณประสิทธิภาพของแคลอริมิเตอร์ทั้งสองชนิดเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและการจำลองด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโดยเลือกมาจากการทดลองในวันที่มีค่าความเข้มรังสีใกล้เคียงกัน จากตาราง 16 แสดงการเปรียบเทียบค่าของอุณหภูมิของแต่ละกรณีในต่าง ๆ กรณีที่ 1 แคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลผ่านต่อเนื่องที่อัตราการไหล 0.0665 kg/s ใช้ดวงอาทิตย์จริง มีอุณหภูมิน้ำออกเฉลี่ยอยู่ที่ 98.27 °C ที่อัตราการไหล 0.133 kg/s มีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 75.54

$^{\circ}\text{C}$ ที่อัตราการไหล 0.266 kg/s มีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 67.42°C กรณีที่ 2 แคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอย ที่อัตราการไหล 0.0665 kg/s ใช้ดวงอาทิตย์จริง น้ำอยู่ในสถานะของของผสมระหว่างน้ำและไอน้ำโดยมีอุณหภูมิออกเฉลี่ยอยู่ที่ 144.3°C ทั้งนี้เป็นผลมาจากการใช้อัตราการไหลต่ำและให้ความร้อนป้อนเข้าแคลอริมิเตอร์ในค่าสูง มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ 851.4 W/m^2 (แสดงดังตาราง 17) จึงเกิดความดันสูงในแคลอริมิเตอร์ ที่อัตราการไหล 0.133 kg/s มีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 115.5°C ที่อัตราการไหล 0.266 kg/s มีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 84.54°C กรณีที่ 3 แคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลผ่านต่อเนื่องที่อัตราการไหล 0.0665 kg/s ใช้เครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ มีอุณหภูมิน้ำออกเฉลี่ยอยู่ที่ 79.7°C ที่อัตราการไหล 0.133 kg/s มีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 78.37°C ที่อัตราการไหล 0.266 kg/s มีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 64.84°C กรณีที่ 4 แคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอย ที่อัตราการไหล 0.0665 kg/s ใช้เครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ มีอุณหภูมิน้ำออกเฉลี่ยอยู่ที่ 105.3°C ที่อัตราการไหล 0.133 kg/s มีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 94.37°C ที่อัตราการไหล 0.266 kg/s มีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 75.55°C

พบว่า เมื่อเปรียบเทียบ กรณีที่ 1 กับกรณีที่ 2 ใช้ดวงอาทิตย์จริงเป็นแหล่งให้ความร้อน แคลอริมิเตอร์ขดกันหอยสามารถทำอุณหภูมิของน้ำด้านออกได้สูงกว่าแบบน้ำไหลต่อเนื่อง ทุกอัตราการไหล โดยที่อัตราการไหลสูงกว่าจะทำให้อุณหภูมิด้านออกลดลงทั้งสองกรณี เมื่อเปรียบเทียบ กรณีที่ 3 กับกรณีที่ 4 ใช้เครื่องจำลองรังสีอาทิตย์เป็นแหล่งให้ความร้อน แคลอริมิเตอร์ขดกันหอยสามารถทำอุณหภูมิของน้ำด้านออกได้สูงกว่าแบบน้ำไหลต่อเนื่อง ทุกอัตราการไหล โดยที่อัตราการไหลสูงกว่าจะทำให้อุณหภูมิด้านออกลดลงทั้งสองกรณี ประสิทธิภาพของแคลอริมิเตอร์ที่ทำการสร้างและทดลองจะขึ้นอยู่กับความเข้มรังสีอาทิตย์ที่จานพาราโบลาเข้ามาและรวมรังสีส่งไปยังแคลอริมิเตอร์ ผลต่างของอุณหภูมิของน้ำด้านออกและด้านเข้า และอัตราการไหล ผลจากการทำการทดลองและผลจากการจำลองด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีค่าสอดคล้องกันโดยมีความแตกต่างไม่เกิน 10% จึงอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

การคำนวณหาค่าตัวเลข Nusselt number ของการไหลในแคลอริมิเตอร์ทั้งสองแบบที่อัตราการไหล 0.0665 , 0.133 และ 0.266 kg/s พบว่าตัวเลข Nusselt number เพิ่มขึ้นตาม Reynolds number และ Nusselt number ของการไหลในแคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอยมีค่าสูงกว่าแบบน้ำไหลต่อเนื่อง และ % การเพิ่มขึ้นของ Nusselt number ของการไหลในแคลอริมิเตอร์ทั้งสองแบบเพิ่มขึ้นตาม Reynolds number และความเร็วในการไหล

ดังนั้นเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบแคลอริมิเตอร์สำหรับใช้เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับจานพาราโบลาแบบสองขั้นตอนเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้น โดยสภาวะปกติใช้แคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่องจะมีการกระจายตัวของความร้อนได้ในระดับหนึ่ง และการใช้แคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอยซึ่งทำให้การกระจายตัวของความร้อนดีขึ้น และการกระจายตัวที่ดีขึ้นนี้จึงทำให้สามารถเพิ่มอุณหภูมิของน้ำด้านทางออกได้ ภายใต้เงื่อนไขสภาวะการทำงานเดิม อย่างไรก็ตามการเพิ่มขดกันหอยภายในแคลอริมิเตอร์ก็จะเพิ่มต้นทุนในการสร้างให้สูงขึ้น มีน้ำหนักมากขึ้นและเพิ่มค่า Friction factor และค่าความดันตกคร่อมให้สูงขึ้นด้วย

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

วัตถุประสงค์หลักสำหรับงานวิจัยนี้คือ การออกแบบสร้างและทดสอบสมรรถนะของตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลา สองชั้นตอน เพื่อเป็นแหล่งความร้อนให้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 2 แบบคือ แคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลผ่านต่อเนื่องแบบธรรมดาและแบบขดกันหอย นอกจากนี้ยังนำไปทดสอบการเป็นแหล่งความร้อนให้กับเครื่องยนต์สเตอริงเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า และประเมินประสิทธิภาพรวมของระบบ จากผลการทดลองตามกรณีต่างๆข้างต้นของตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบจานพาราโบลาสองชั้นตอนสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ความสัมพันธ์ของพลังงานที่ได้รับจากตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลาสองชั้นตอน

ตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบจานพาราโบลาสองชั้นตอนติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกนได้ถูกออกแบบสร้างและประเมินประสิทธิภาพการทำงาน โดยใช้น้ำเป็นสารตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสามารถทำได้สูงสุด 64.746 % และมีค่าเฉลี่ย 42.54 % ประสิทธิภาพเชิงแสงเป็น 85.5 % และอัตราส่วนการรวมรังสีเชิงเรขาคณิตรวม 254.918 สามารถทำให้น้ำมีระดับอุณหภูมิใกล้ 101.5 °C ซึ่งเหมาะสมสำหรับการใช้ในครัวเรือน อุตสาหกรรมหรืออื่นๆต่อไป

2. ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของน้ำในแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลผ่านต่อเนื่อง

อุณหภูมิของน้ำจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ที่โฟกัสมายังแคลอริมิเตอร์เมื่อรังสีอาทิตย์มีค่าสูงขึ้นอุณหภูมิของน้ำที่ไหลผ่านแคลอริมิเตอร์นี้จะสูงตามไปด้วย และพบว่าที่ความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ย 849.43 W/m² แคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลผ่านต่อเนื่องมีประสิทธิภาพจากการทดลองสูงสุด 21.513 % เปรียบเทียบกับการคำนวณด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของการไหลที่มีประสิทธิภาพ 22.118 % จึงพบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง 2.73 % ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.266 kg/s

3. ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของน้ำในแคลอริมิเตอร์แบบขดสปริงแบบกันหอย

อุณหภูมิของน้ำจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ที่โฟกัสมายังแคลอริมิเตอร์เมื่อรังสีอาทิตย์มีค่าสูงขึ้นอุณหภูมิของน้ำที่ไหลผ่านแคลอริมิเตอร์นี้จะสูงตาม ที่ความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ย 851.4 W/m² แคลอริมิเตอร์แบบขดกันหอยมีประสิทธิภาพจากการทดลองสูงสุด 33.032 % และจากการคำนวณด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของการไหล 37.094 % ที่อัตราการไหลน้ำ 0.266 kg/s เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับการจำลองด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของการไหลพบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อน 10.95 % ความสัมพันธ์ระหว่างแคลอริมิเตอร์ทั้ง 2 ชนิดนี้ เมื่อเพิ่มขดกันหอยภายใน

จะทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนได้เพิ่มสูงขึ้นจึงสามารถสรุปได้ว่าแคลอริมิเตอร์แบบชดกั้นหอยมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบน้ำไหลต่อเนื่อง โดยสังเกตได้จากค่าตัวเลขนัสเซิลนัมเบอร์ที่เพิ่มขึ้น

4. ความสัมพันธ์ของกำลังที่ได้จากเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดระดับห้องปฏิบัติการโดยได้รับพลังงานจากตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลาสองชั้นตอน ใช้เครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ให้ความร้อน

สมรรถนะของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นในขณะที่ใช้เครื่องจำลองรังสีอาทิตย์ แรงบิดกำลังเพลลา, ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก, ความเร็ว, และอุณหภูมิเครื่องทำความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อมีความเข้มของรังสีจำลองเพิ่มขึ้น แรงบิดสูงสุดของเครื่องยนต์ กำลังเพลลา และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเครื่องทำความร้อนเพิ่มขึ้น ที่จุดโฟกัสความเข้มของแสงอาทิตย์จำลองมีค่า $8,890.53 \text{ W/m}^2$ เมื่อความร้อนป้อนเข้าเครื่องยนต์เป็น 602.3 J/s และแหล่งความร้อนมีประสิทธิภาพ 6.775 % เครื่องยนต์สร้างแรงบิดสูงสุด 0.0774 N.m ที่ 39.85 รอบต่อนาที กำลังเพลลาสูงสุด 0.359 W ที่ 55.6 รอบต่อนาทีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตกำลังได้ 0.27 W และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกสูงสุด 0.2503 % ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบเป็น 0.00574 % อุณหภูมิด้านร้อนมีค่า 655 K อุณหภูมิด้านเย็นมีค่า 306 K และตัวเลขบีลมีค่า 0.000487 วิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ Schmidt analysis ในการคำนวณกำลังของเครื่องยนต์มีแนวโน้มเดียวกันกับผลที่ได้จากการทดลองซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.35 วัตต์

5. ความสัมพันธ์ของกำลังที่ได้จากเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขนาดระดับห้องปฏิบัติการโดยได้รับพลังงานจากตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลาสองชั้นตอน ใช้ดวงอาทิตย์จริงให้ความร้อน

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงและจานพาราโบลาระดับห้องปฏิบัติการที่มีระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกนได้ทำการทดลองโดยใช้แสงอาทิตย์จริงและ จานพาราโบลา 2 ชั้นตอนเป็นแหล่งความร้อน ความร้อนเกิดขึ้นจริงที่ป้อนเข้าเครื่องยนต์สเตอร์ลิงประเมินโดยวิธีวัดพลังงานดูดซับจากแคลอริมิเตอร์ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดซับความร้อนของเครื่องรับรังสีอาทิตย์และพื้นที่รับแสงรวมของจาน จากการทดลองพบว่าจานพาราโบลาแบบ 2 ชั้นตอนที่สร้างขึ้นนี้มีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 26.29 % ที่เวลาประมาณ 13 นาฬิกา เนื่องจากรังสีดวงอาทิตย์เข้ามาในวันที่ให้รังสีตรงของดวงอาทิตย์มากขึ้นซึ่งเหมาะสมกับการทดลองกับจานพาราโบลา

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

จากการทำวิจัยเรื่องตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลาสองชั้นตอนนี้ เป็นการวิจัยที่มีขอบเขตกว้างอยู่ และมีผู้ที่ศึกษาไม่มากนัก จากการสังเกตในขณะทดลองพบสิ่งที่สามารถปรับปรุงกับแผงสะท้อนตัวรับรังสีแบบสองชั้นตอน และเครื่องยนต์สเตอร์ลิงดังนี้

1. เปลี่ยนสารทำงานเป็นชนิดอื่นที่แตกต่างกันออกไปเช่น ใช้น้ำมันอื่นๆมาทดลอง
2. ทดลองที่ความเข้มรังสีอาทิตย์แตกต่างกันในตลอดปี

3. ทำการทดลองที่ใช้ตัวดูดซับพลังงานที่แตกต่างกันทั้งวัสดุเพื่อศึกษาและหาขนาดที่เหมาะสมกับการใช้งานจริง

4. สร้างงานพาราโบลาแบบสองชั้นตอนที่มีขนาดใหญ่กว่างานวิจัยนี้เพื่อให้ได้ปริมาณพลังงานจากรังสีอาทิตย์ที่สูงขึ้น และหาวิธีการในการลดค่าการสูญเสียความร้อน

5. ใช้เครื่องยนต์สเตอร์ลิงหลากหลายรูปแบบและขนาด ที่มีกำลังและสารทำงานที่แตกต่างกันออกไป โดยวางตำแหน่งของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงให้ตรงกับจุดโฟกัสพอดีเพื่อลดการสูญเสียพลังงาน

6. เปลี่ยนพื้นผิวสะท้อนให้มีค่าการสะท้อนรังสีที่สูงขึ้นและมีความทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศได้มากขึ้น

7. ใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่เหมาะสมมากกว่านี้ เช่น เขียนโปรแกรมใน LAB VIEW เพื่อคำนวณตำแหน่งของดวงอาทิตย์ส่งไปยัง โปเทนชิโอมิเตอร์ที่วางอยู่ในแต่ละแกนของตัวรวมรังสี เพื่อให้มีค่าป้อนกลับไปยังตำแหน่งที่ระบบวางอยู่

8. ออกแบบและสร้างตัวรวมรังสีแบบสองชั้นตอนใหม่โดยใช้วัสดุแบบผสมผสาน เพื่อให้มีน้ำหนักเบาและทนทานขึ้น

9. ออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในลักษณะรูปทรงอื่นนอกเหนือจากรูปทรงกระบอก ใช้ฉนวนหุ้มที่มีความต้านทานความร้อนสูงเพื่อลดการสูญเสียความร้อน



บรรณานุกรม

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน ร่วมกับห้องปฏิบัติการวิจัย
พลังงานแสงอาทิตย์ภาควิชาฟิสิกส์คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. (2549).
รายงานการวิจัย ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ระบบความร้อนแบบ
รวมแสงในประเทศไทย : กรุงเทพฯ.
- กฤตภาส เกษรา ณ อยุธยา, ทศพร ยืนยง และ อัจฉริยา เกตุเขียว. (2552). ระบบติดตามตำแหน่ง
ดวงอาทิตย์แบบ 2 แกน. ปรินิพนธ์ วศบ.(วิศวกรรมอุตสาหการ). กรุงเทพฯ: คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- คมสัน สุคันธวิช และ ทวีวัฒน์ สุภารส. (2554). สมรรถนะเครื่องรับรังสีอาทิตย์รวมแสงแบบดิสก์
ในการประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 7.
- จารุวัฒน์ เจริญจิต. (2555). ระบบผลิตน้ำร้อน. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 17 (2555) 2 : 174-181.
- เฉลิมพล แก้วพะเนาว์. (2524). การสร้างชุดบังคับตัวรับแสงแบบรางพาราโบลา.
วิทยานิพนธ์ วศม. (สาขาเทคโนโลยีพลังงาน) กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ชมพูนุท พรรษา. (2552). การศึกษาและทดสอบสมรรถนะตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลา.
วิทยานิพนธ์ วทม. (สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ศึกษา) มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร.
- นพวรรณ เสมวิล. (2543). การประเมินเทคโนโลยีเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อการ
บริโภค แบบรางพาราโบลาครวมแสง. วิทยานิพนธ์ วทม. (สาขาฟิสิกส์) กรุงเทพฯ:
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล.
- นันทนศักดิ์ ศักดิ์โฆษิต (2551). การเพิ่มประสิทธิภาพเชิงแสงและความร้อนของตัวรวมรังสีแบบราง
พาราโบลาที่มีตัวรับรังสีสองชุด. วิทยานิพนธ์ วศม. (พลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ).
กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- บัญญัติ คังตระกูล. (2550). การประเมินสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงความแตกต่างอุณหภูมิตัว
ที่ใช้ พลังงานแสงอาทิตย์. วิทยานิพนธ์ ปรด. (สาขาเทคโนโลยีพลังงาน JGSEE).
กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- บัญญัติ คังตระกูล และ กฤษฏางค์ สุกระมูล (2555). สมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ใช้เครื่อง
จำลองรังสีอาทิตย์เป็นแหล่งความร้อน ในการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย
ครั้งที่ 8 วันที่ 2-4 พฤษภาคม พ.ศ. 2555 จังหวัดมหาสารคาม
- บัญญัติ คังตระกูล และ กฤษฏางค์ สุกระมูล (2555). สมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ใช้เครื่อง
จำลองรังสีอาทิตย์ร่วมกับตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบจานพาราโบลาเป็นแหล่งความร้อนในการ
ประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 26 ตุลาคม 2555
จังหวัดเชียงราย

- บัณฑิต ลิ้มมีโชคชัยและคณะ (2549). ศักยภาพของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงผลิตไฟฟ้าแสงอาทิตย์ในประเทศไทย. ในการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 2 ณ อาคารสุรสมันนาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา 27-29 กรกฎาคม 2549.
- ประกอบ สุวรรณ และ ชีรภัทร หลิมบุญเรือง (2554). แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการออกแบบตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา. ในการประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 2519-21 ตุลาคม 2554 จังหวัดกระบี่.
- ปราโมทย์ อุณหวิทย์. (2521). การศึกษาและพัฒนาวัสดุเพื่อใช้ทางแสงสว่างและแสงอาทิตย์. การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า วันที่ 1 มิถุนายน 2521.
- ปริญญา ศรีสวัสดิ์.(2549). ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ระบบความร้อนแบบรวมแสง กรณีศึกษาสำหรับจังหวัดร้อยเอ็ด. วิทยานิพนธ์ วทม. (สาขาฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ป้องพล รุ่งรัตน์รัชชัย. (2545). การออกแบบระบบเก็บพลังงานความร้อนแบบพาราโบลิคเพื่อทำน้ำร้อนที่อุณหภูมิสูง. วิทยานิพนธ์ วทม. (สาขาเทคโนโลยีพลังงาน) กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- พฤภา หอมยก. (2550). การวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ จากตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบพาราโบลา ด้วยวิธีวัดปริมาณความร้อน. วิทยานิพนธ์ วทม. (สาขาวิทยาศาสตร์ศึกษา). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร.
- ภควัต โอวาท. (2551). การศึกษาเชิงทดลองหุงข้าวด้วยจานรวมแสงอาทิตย์แบบพาราโบลิค. วิทยานิพนธ์ คบ.(โปรแกรมวิทยาศาสตร์ทั่วไป). กรุงเทพฯ: คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี.
- มัญญ พิฐวรณ. (2543). การออกแบบและทดสอบแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดรวมแสงด้วยแผงพาราโบลิค.วิทยานิพนธ์ วทม. (สาขาวิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- รัตนพงศ์ เสาศิลา (2552). การเปรียบเทียบแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเคลื่อนที่แบบ 2 แกนโดยใช้หลักการความโน้มถ่วงที่สุดกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอยู่กับที่. วิทยานิพนธ์ วทม. (สาขาวิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- เลิศศักดิ์ เหมยากร (2524). ถังสะสมความร้อนสำหรับเตาแสงอาทิตย์. วิทยานิพนธ์วทม. (สาขาวิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- วรณูช แจ้งสว่าง. (2551). พลังงานหมุนเวียน. (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- วัชร จิตต์เชื้อ, พิสิฐ วัฒนสินไพศาล และวิทวัส หยกรัตนศักดิ์. (2551). ชุดขับเคลื่อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบ 2 แกน. ปรินูญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์ วศ.บ.(วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ:มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- ศักดิ์เดช สังคพัฒน์ และ บุญรอด อาสาสะนา. (2011). เตาแสงอาทิตย์แบบผสมพร้อมด้วยระบบติดตามดวงอาทิตย์ วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์. ISSN 1513-7805 [2011] Vol. 10 No. 2
- ศักดิ์สมยศ มีกั้วาล และสุภัทร สันติภิรมย์กุล. (2521). เตาแสงอาทิตย์. วิทยานิพนธ์ วศม. (วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตธนบุรี.
- ศักรินทร์ วีรณศิลป์. (2550). การสร้างเตาสุริยะอุณหภูมิสูงที่มีระบบรวมแสงเป็นผิวโค้งพาราโบลา. วิทยานิพนธ์ วศม. (ฟิสิกส์). ขอนแก่น: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- สมภพ ปัญญาสมพรรค. (2542). การพัฒนาหม้อหุงข้าวพลังแสงอาทิตย์. วิทยานิพนธ์ วศม. (เทคโนโลยีพลังงาน). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สิทธิกร จอเฉลิมชัย, ชัชชัย นิสภากร และ ปราณี จันทินมาตร (2553). การพัฒนาระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบ 2 แกน. ปรินูญานิพนธ์ วศบ. (วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- โสภณ โกวิทอัสริยะ. (2553). การศึกษาประสิทธิภาพจากรวมแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา การศึกษาค้นคว้าด้วยตนเอง วศม. (พลังงานทดแทน). พิษณุโลก: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- อนุชา ดีผาง, สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์ และ เจริญพร เลิศสถิตชนกร. (2548). ระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่ควบคุมโดยการคำนวณตำแหน่งดวงอาทิตย์ ที่ปรากฏในท้องฟ้าด้วยไมโครคอมพิวเตอร์. วิทยานิพนธ์ วศม. (เทคโนโลยีพลังงาน). มหาสารคาม: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- อนุตร จำลองกุล. (2545). พลังงานหมุนเวียน โอ.เอส.พรีนติ้งเฮาส์ : กรุงเทพฯ. หน้า 31-32.
- อนุสร ศรีสรवल. (2545). การศึกษาวัสดุผิวเคลือบสะท้อนความร้อน. วิทยานิพนธ์ วศม. (เทคโนโลยีพลังงาน). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- อากาศ เสนีวงศ์ ณ อยุธยา และคณะ. (2548). การประเมินค่าพลังงานความร้อนของจานพาราโบลา. การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 1 วันที่ 11-13 พฤษภาคม 2548 โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ซิตี้จอมเทียนจังหวัดชลบุรี.
- A. Timinger, W. Spirkel and, A. Kribus (2000). Optimized Secondary Concentrators for a Partitioned Central Receiver System. In *Solar Energy*. 69(2): 153-162.

- A.R.El Quederni et al. (2009). Experimental study of a parabolic solar concentrator. In *Revue des Energies Renouvelables*. V.12 N°3 395-404.
- Adel, M.A., Taha, K.M.M. and Akyurt, M. (1986). On Prediction or Solar Cooker Performance and Cooking in Pyrex Pots. In *Solar and Wind Technology*. 3(1): 13-19.
- Aden B. Meinel and Marjorie P. Meinel. (1977). *Applied Solar Energy*. Addison Wesley Publishing Company. pp.1-35.
- Ahmed, A., Al-Agami, M. and Al-Garni, M. (1990). Solar Powered Stirling Engine with a Single Membrane Dish Concentrator. In *Proceedings of the 1st World Renewable energy Congress, Energy and The Environment*, Reading, U.K., vol. 2, Sep. 23-28, pp.1202-1207.
- Ajiya M. (1995). Design and Construction of a Parabolic Solar Cooker. Unpublished B.Eng. Project, Mechanical Engineering Department, University of Maiduguri.
- Allen Jong-Woei, W., Yi-Yung, C., Bo-Yi, W.: (2009). Innovative design of Cassegrain Solar concentrator system for indoor illumination utilizing chromatic aberration to filter out ultraviolet and infrared in sunlight. In *Solar Energy* 83: 1115–1122
- Al-Rebaian, A. and Hansen, J. (1987). 50 kW Solar Concentrators With Stirling Generators- Results of the First Six Mounts of Operation in Saudi Arabia. *Abs., I.S.E.S. Solar World Cong.*, Hamburg, pp. 2, 13, 15.
- Ángel García-Botella et,al (2009). Field method for concentrator design. *Proc. of SPIE* V.7423 pp.1-10.
- Audy, Ch., Fischer, M. and Messerschmid, E.W. (1999). Non steady behavior of solar dynamic power systems with Stirling cycle for space stations. In *Aerospace Science and Technology*, 1: 49-58.
- B. Murgante et al. (2011). Optical Modelling of Square Solar Concentrator (Eds.): Springer-Verlag Berlin Heidelberg ICCSA Part IV, LNCS 6785, pp. 287–295.
- Bingol O, ALTINTAS, A, O'NER Y. (2006). Microcontroller based solar-tracking system and its implementation. In *Journal of Engineering Sciences* 12 (2): 243–8.
- Brown, C.T., Mackie, P.E. and Neale, D.H. (1983). Advanced component research in the solar thermal program. *Proc. Solar World Cong.*, Perth, pp. 1421-1425.
- Brunotte M, Goetzberger A, Blieske U. (1996). Two-stage concentrator permitting concentration factors up to 300_ with one-axis tracking. In *Solar Energy* 56 (3): 285–300.

- Chen, C.F., Chih-Hao, L., Huang-Tzung, J.: (2010). A solar concentrator with two reflection mirrors designed by using a ray tracing method. In *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* 121: 1042–1051
- Chen, C.-F., Lin, C.-H., Jan, H.-T., Yang, Y.-L., (2009). "Design of a Solar Concentrator Combining Paraboloidal and Hyperbolic Mirrors Using Ray Tracing Method," In *Optics Communication* 28: 360–366.
- Childs, W.D., Dabiri, A.E., Al-Hinai, H.A. and Abdullah, H.A. (1999). VARI-RO solar-powered desalting technology Desalination. Vol.125, pp.155-166.
- Collares-Pereira, M. et al. (1991). High Concentration Two-stage Optics for Parabolic Trough Solar Collectors with Tubular Absorber and Large Rim Angle. In *Solar Energy* 47: 457-66.
- D.Feurmann and J.M.Gordon (1991). Analysis of a two-stage linear fresnel reflector solar concentrator. In *Journal of Solar Energy Engineering-transactions of The ASME-J SOLAR ENERGY ENGINEERING* 01/1991 113(4): 272-279.
- Daniels, F. (1964). Direct use of the sun's energy. New Haven: Yale University Press, pp. 254, 256, 260, 261, 263, 265.
- David Barlev; et al. (2011). Innovation in concentrated solar power. In *Solar Energy Material & Solar cells*. 2703-2725.
- Domanski, R., ei-Sebaï, A.A. and Jaworski, M.(1994). Cooking During Off Sunshine Hours Using PCMs As Storage Media. In *Energy* 20(7): 607-616.
- Dominic Groulx and Benjamin Sponagle (2010). Ray-Tracing Analysis of a Two-Stage Solar Concentrator. In *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering* 34(2).
- Duerr, F., Meuret, Y., Thienpont, H.: (2010). Miniaturization of Fresnel lenses for solar concentration: a quantitative investigation. In *Applied Optics* 49: 2339–2346.
- Duffie, J.A. and Beckman, W.A. (2006). In *Solar Engineering of Thermal Processes*. 3rd ed., Wiley Interscience. 324–375.
- Feuermann, D., Gordon, J.M. and Ries, H. (1999). High-Flux Solar Concentration with Imaging Designs. In *Solar Energy*. 65: 83–89.
- Feuermann, D., Gordin, J.M.: (2001). High-concentration photovoltaic designs based on miniature parabolic dishes. In *Solar Energy* 70: 423–430.
- Freris, L. and Infield, D.(2008). In *Renewable Energy in Power Systems*. Wiley 40–42.

- Gordon, J.M. and Feuermann, D.(2005). Optical Performance at the Thermodynamics Limit with Tailored Imaging Designs. In *Applied Optics*. 44: 2327–2331.
- Hasnat A et al. (2011). Numerical Analysis for Thermal Design of a Paraboloidal Solar Concentrating Collector. In *International Journal of Natural Sciences*. (3) 68-74.
- Hassanain Ghani Hameed and Hayder Aziz Neema (2011). Experimental Study For Productivity Enhancement of A Parabolic Solar Concentrator System. In *Al-Qadisiya Journal for Engineering Sciences*. 4(2).
- Helwa NH, Bahgat ABG, Shafee AMRE, Shenawy ETE. (2000). Computation of the solar energy captured by different solar tracking systems. In *Energy Sources*. 22: 35–44.
- Holland, M.B. (1979). The Stirling engine- power plant of the future. *Chartered Mechanical Engineer*, April, pp. 60-63.
- Hyunjoo, H., Jeong, T.K. (2010). Application of high-density daylight for indoor illumination. In *Journal of Energy* 35(6): 2654–2666.
- Ibrahim Laden Mohammed (2012). Design and Development of Parabolic Dish Solar Water Heater. In *International Journal of Engineering Research and Applications*. 2: 822-830.
- Jaruwat Jareanjit (2012). The Thermal Potential of Solar Water Heating in Industrials Cluster. In *Burapha Sci. J.* 17. 2: 174-181.
- Jean-pierre Van Dormael. (2014). Retrieved October 20, 2014, from http://www.moteurstirling.com/pdf/calcul_uk.xls.
- Jia-hong, H., Wun-Ciang, F., Wei-Chi, H., Jui-che, T. (2010). Solar concentrator constructed with a circular prism array. In *Applied optics* 49: 4472–4478.
- K.Reddy, N.Sendhil Kumar. (2009). Convection and surface radiation heat losses from modified cavity receiver of solar parabolic dish collector with two-stage concentration. In *Heat and Mass Transfer*. 45 (3): 363–373.
- K.S.Reddy,N.S.Kumar. (2008). Combined laminar natural convection and surface radiation heat transfer in a modified cavity receiver of solar parabolic dish. In *International Journal of Thermal Sciences*. 47(12): 1647–1657.
- Kalogirou, S.A.(2003). The potential of solar industrial process heat applications. In *Journal of Apply Energy*. 76: 337-361.
- Kanpal,T.C. et al. (1980).Performance of a two-stage solar concentrator. In *Journal of Applied Energy*. 191-199.

- Kinley, P.J. Two-stage solar concentrating system. Canadian Patent CA 2562615. 2009.
- Kongtragool B, Wongwiset S (2008). A four power-piston low-temperature differential Stirling engine using simulated solar energy as a heat source. In *Solar Energy*. 82: 493-500.
- Koyuncu B, Balasubramanian K. (1991). A microprocessor controlled automatic sun tracker. In *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. 37(4): 913–7.
- Leibowitz, L. and Hanseth, E. (1982). Solar thermal technology-outlook the 80's. *Mechanical Engineering*, vol. 104, pp. 30-35.
- Leonard D.Jaffie. (1989). Test results on parabolic dish concentrators for solar thermal power systems. In *Solar Energy*. 42: 173-187.
- Leutz, R. and Annen, H.P. (2007). Reverse Ray-Tracing Model for the Performance Evaluation of Stationary Solar Concentrators. In *Solar Energy*. 81: 761–767.
- Luque, A., Sala, G., Luque-Heredia, I.: (2006). Photovoltaic concentration at the onset of its commercial deployment. *Progress in Photovoltaics* 14(5), pp.413–428
- Mark Schmitz et al (2006). Assessment of the potential improvement due to multiple apertures in central receiver systems with secondary concentrators. In *Solar Energy*. 80: 111–120.
- Marriott, A.T. (1983). Solar electric power from parabolic dishes. *Proc. Solar World Cong.*, Perth, pp. 1438-1443.
- Mauk, C.E., Prengle, H.W., Eddy, C.H.S.: (1979). Optical and thermal analysis of a Cassegrainian solar concentrator. In *Solar Energy*. 23: 157–167.
- McGlaun, M.A. (1987). The LaJet energy large scale innovative solar concentrator study of wind loading effects. *Abs.*, I.S.E.S. Solar World Cong., Hamburg, pp. 2, 18, 15.
- Meenakshisundaram A. and William Christaj (2012). Experimental Analysis of Non Tracking Solar Parabolic dish Concentrating System for Steam Generation. In *Engineering Journal* 16 India.
- Omer, S.A. and Infield, D.G. (2000). Design and Thermal Analysis of a Two Stage Solar Concentrator for Combined Heat and Thermoelectric Power Generation. In *Energy Conversion & Management*. 41: 737–756.
- Pablo Benitez et al.(1997). Contactless efficient two-stage solar concentrator for tubular absorber. In *Applied Optics*. 36(28): 7199-7124.

- Palavras I, Bakos GC. (2006). Development of a low-cost dish solar concentrator and its application in zeolite desorption. In *Renewable Energy*. 3: 2422–31.
- Panagiotis, K., Eleni, C., Vijay, M.: (2010). Nonimaging lenses for solar concentration. In *Applied Optics*. 49: 5183–5191
- Pons, R.L. and Fox, R.J. (1976). A solar/Stirling total energy system. Sharing the Sun, Solar Technology in the Seventies Conf., Winnipeg, pp. 77-91.
- PunitaTaneja, et al. (2007). "Concentration characteristics of a two stage solar concentrator: Effect of primary mirror surface errors. In *International Journal of Energy Research* 16(3): 203-211.
- R Bader et al (2009). Optical Design of a Novel Two-stage Solar through Concentrator Based on Pneumatic Polymeric Structures. In *Journal of Solar Energy Engineering* Vol.131/031007-1.
- Riyad Abu-Malouh et al. (2011). Design, construction and operation of spherical solar cooker with automatic sun tracking system. In *Energy Conversion and Management* 52: 615–620.
- Rizzo, J.G. (1997). The Stirling engine manual. Somerset: Camden miniature steam services, pp. 1, 6, 13, 42, 43, 153, 155, 160.
- Robert P. Friedman et al. (1993). New high-flux two-stage optical designs for parabolic Solar concentrators. In *Journal of Solar Energy*. 51(5): 317-325.
- Roger A.Hinriches and Merlin Kleinbach (2002). Energy Its Use and the Environment 3ed.Newyork: USA. pp.165-166.
- S.A. Kalogirou. (2004). Solar thermal collectors and applications. Progress in *Energy and Combustion Science*. 30(3): 231-295.
- Schlaich, J. (1987). Solar power plants with a membrane concave mirror-50 kW. *Abs., I.S.E.S. Solar World Cong.*, Hamburg, pp. 2, 18, 16.
- Shouli, J., Peng, H., Songping, M., Zeshao, C.: (2010). Optical modeling for a two-stage parabolic trough concentrating photovoltaic/thermal system using spectral beam splitting technology. In *Journal of Solar Energy Materials & Solar Cells*. 94: 1686–16
- Srinivasan Ashwyn. (2009). Introduction to Cassegrain antenna. Article, pp.1-11. Retrieved December 2, 2014, from http://www.gmrt.ncra.tifr.res.in/gmrt_hpage/sub_system/corr/IMH/Documents/Report/CASSEGRAIN.pdf.

- Suravut Snidvongs and Sirinuch Chindaruksa. (2007). The design of small solar thermal dish Stirling 500 W stand alone in Thailand. In *Japan society of mechanical engineer Journal*.
- Swanson, R.M.: (2000). The promise of concentrators. *Progress in Photovoltaics*. 8(1): 93–111.
- Thomas,A. and Thomas,Satish (1994). A. Design Data for The Computation of Thermal Loss IN The Receiver of A Parabolic Trough Concentrator. In *Energy Converse*. 35: 555-68.
- Walpita S.H., (1983). Development of the solar receiver for a small Stirling engine. Special Study Project Report no. ET-83-1, Bangkok: Asian Institute of Technology.
- Xinshi, Ge,et al. (1996). Solar Collection Assembly of Solar Industry Heating and Generating Systems with Low Cost and High Efficiency. Dept. of thermal Science and Energy Engineering. Institute of Applied Solar Energy.
- Y J Dai et al.(2009).Development of a Two-Stage Solar Concentrator Using Freshnel Lens and Dish Reflector. Paper presented in Inaugural US-EU-China Thermo physics Conference-Renewable Energy.
- Zogbi R, Laplaze D. (1984). Design and construction of a sun tracker. In *Solar Energy* 33(3/4): 369–72.





การตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติที่ปรากฏในฐานข้อมูลการจัดอันดับวารสาร SJR หรือมีการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติที่ปรากฏในฐานข้อมูลสากล ISI หรือ Scopus

1. Sookramoon K., Bunyawanchakul P., and Kongtragool B. (2015). Performance Assessment of a Constructed Double Reflection Parabolic Dish Concentrator Under Thailand Climatic Condition. *In International Journal of Applied Engineering Research*. ISSN 0973-4562 Volume 10, Number 4 (2015) pp. 10015-10031.
2. Sookramoon K., Bunyawanchakul P., and Kongtragool B. (2015). Performance Evaluation of a Paraboloidal Concentrator. In *Applied Mechanics and Materials*. Volume 799-800 (2015) pp. 463-467. © (2015) Trans Tech Publications, Switzerland doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.799-800.463.
3. Sookramoon K., Bunyawanchakul P., and Kongtragool B. (2015). Experimental Study of a 2-stage Parabolic Dish-Stirling Engine in Thailand. *In Walailak Journal of Science and Technology*. Volume 13 (2015). Accepted.
4. Sookramoon K., Bunyawanchakul P., and Kongtragool B. (2015). PERFORMANCE OF A LABORATORY-SCALED STIRLING ENGINE POWERED BY A 2-STAGE PARABOLIC DISH SOLAR CONCENTRATOR USING SIMULATED SOLAR POWER. *In Journal of Engineering Science and Technology*. In review process round 2.

ข้อมูลวารสารนานาชาติ

1. วารสารนานาชาติ International Journal of Applied Engineering Research

ปกในของบทความ



หลักฐานคะแนน SJR มีค่าคะแนน SJR (SCOPUS) 0.130





SCImago
Journal & Country
Rank

EST MODUS IN REBUS

Horatio (Satire 1.1.106)

Home

Journal Rankings

Journal Search

Country Rankings

Country Search

Compare

Map Generator

Help

About Us

Journal Rankings

Ranking Parameters

Subject Area:

Subject Category:

Region/Country:

Order By:

Year:

Display journals with at least: Citable Docs. (3 years)

Subject Area: Engineering.
Country: India.
Year: 2014.

Download data (Excel .xlsx)

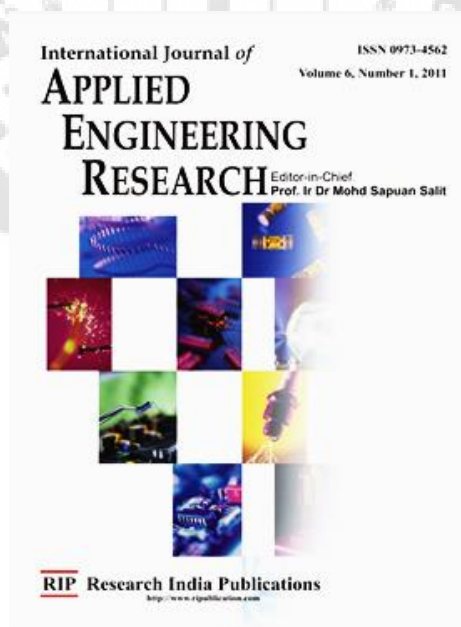
1 - 36

Related product



	Title	Type	SJR	H index	Total Docs. (2014)	Total Docs. (3years)	Total Refs.	Total Cites (3years)	Citable Docs. (3years)	Cites / Doc. (2years)	Ref. / Doc.	Country
1	Bulletin of Materials Science	j	0,417	45	203	612	5.736	797	612	1,08	28,26	
2	International Journal of Performability Engineering	j	0,410	12	85	214	1.316	99	188	0,53	15,48	
3	Advances and Applications in Fluid Mechanics	j	0,398	10	29	61	1.342	94	61	1,70	46,28	
4	IETE Technical Review (Institution of Electronics and Telecommunication Engineers, India)	j	0,349	14	27	145	853	160	137	0,87	31,59	
19	Indian Journal of Engineering and International Journal of Applied Engineering Research	j	0,130	5	1.898	892	28.613	91	890	0,12	15,08	

หน้าปกวารสาร



Research India Publications

International Journal of Applied Engineering Research (IJAER)

Editorial Board Members

Toni Lupo, Department: Dipartimento di Ingegneria Chimica, Gestionale, Informatica, Meccanica (DICGIM) University/Department: Università degli Studi di Palermo, Viale delle Scienze, Palermo, 90128, Italy
Area of Interest, Quality management, Performance Measurement, Statistical Process Control, Maintenance Optimization

Jong-Wook Lee, Electrical & Computer Engineering University/Department: Ajou University, Worldcupro 206, Yeongtong-gu. 16499, Geonggi-do, South Korea
Area of Interest, I Device structure and materials for sub-0.5V voltage operation, I Scaling-down enabling technology, I Low-power, high-speed devices and circuits, I System-on-chip using 3-D devices and technology

Mohd Hafiz bin Jali, Department : Faculty of Electrical Engineering University/Department: Universiti Teknikal Malaysia Melaka, Universiti Teknikal Malaysia Melaka, Hang Tuah Jaya, Melaka, 76100, Melaka, Malaysia
Area of Interest, Control system, Signal Processing, Rehabilitation, Human assist technology. Pattern Recognition, Robotic

MOHD SAZLI B. SAAD, Department : SCHOOL OF MANUFACTURING ENGINEERING University/Department: UNIVERSITI MALAYSIA PERLIS, KAMPUS PAUH PUTRA, ARAU, 02600, PERLIS, MALAYSIA
Area of Interest, Active vibration control, PID control, Self-tuning/Adaptive Control, Evolutionary Algorithms, Particle Swarm Optimisation, Differential Evolution, Genetic Algorithm, System Identification

Zaki Ahmad, Department of Mechanical Engineering, KFUPM, Box # 1748, Dhahran 31261 Saudi Arabia
Area of research/interest: Advanced Materials, Corrosion and Corrosion protection of materials, Surface Engineering.

Rajeev Ahuja, Physics Department, Uppsala University, Box 530, 751 21 Uppsala Sweden
Area of research/interest: Computational Materials Science, Electronic Materials, Spintronics, High pressure, Dynamics, Melting.

Shigeru Aoki, Department of Mechanical Engineering, Tokyo Metropolitan College of Technology, 1-10-40 Higashi-Ohi, Shinagawa-ku, Tokyo 140-0011, Japan
Area of research/interest: Random vibration, Seismic response of mechanical system, Approximate analysis of nonlinear vibration, Utilization of vibration.

Ching-Yao Chen, Dept. of Mechanical Engineering, National Yunlin University of Science & Technology, University Road, Touliu, Yunlin, Taiwan, 640 R.O.C.
Area of research/interest: Biofluid mechanics, thermo-fluid mechanics, Magnetic fluids, Computational fluid dynamics.

G.Q. Chen, Department of Mechanics and Engineering science, Peking University, Beijing 100871, China CFD (Computational fluid dynamics), energy and resources engineering, and systems ecology.

B.T.F. Chung, Department of Mechanical Engineering, University of Akron, Akron, Ohio 44325, USA
Area of research/interest: Heat Transfer with Phase Changes, Optimum Design of Extended Surfaces, Radiative Heat Transfer System, Heat Transfer in Polymers.

Tariq Darabseh, Mechanical Engineering Department, JUST P.O. Box 3030 Irbid-22110 Jordan

Nihad Dib, Electrical Engineering Department JUSTP. O. Boc 3030, Irbid 22110 Jordan
Area of research/interest: Computational Electromagnetics, Microwave Circuits, Antennas.

Marcelo J.S. De Lemos, Departamento de Energia - IEME, Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, 12228-900 São José dos Campos - S.P. - Brazil .
Area of research/interest: Turbulence Modeling, Porous Media, Combustion in Porous Media, Numerical Methods, Finite Volume.

Mohammed Salifu, Associate Professor of Transport Engineering & Head Department of Civil Engineering Faculty of Civil and Geomatic Engineering College of Engineering Kwame Nkrumah University of Science and Technology (KNUST) University, Post Office Kumasi, GHANA

Dimitris Drikakis, Head of Aerospace Sciences Department, Cranfield University, School of Engineering, Cranfield, Bedfordshire, MK43 0AL, United Kingdom
Area of research/interest: Computational Fluid Dynamics, Aerodynamics, Turbulence Gas dynamics, computational Nanotechnology, Microflows Biofluid Mechanics, Transport Phenomena.

M.R. Eslami, Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Hafez Ave. Tehran, 15914 Iran
Area of research/interest: thermoelasticity, plasticity, cyclic loading, structural instability, buckling.

A.S. Al-Harthi, Department of Civil, Surveying and Environmental Engineering, University of Newcastle, Callaghan, NSW 2308 Australia.
Area of research/interest: Concrete material and durability, Recycling construction materials, reliability assessment of structures.

International Journal of Applied Engineering Research
 ISSN 0973-4562 Volume 10, Number 4 (2015) pp. 10015-10031
 © Research India Publications
<http://www.ripublication.com>

Performance Assessment of a Constructed Double Reflection Parabolic Dish Concentrator Under Thailand Climatic Condition

Krissadang Sookramoon¹ Pracha Bunyawachakul^{1*} Bancha Kongtrakool²

¹*Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering
 Srinakharinwirot University, Rangsit-Nakhornmayok Rd., Klong 16, Ongkharak,
 Nakhornmayok 26120, Thailand*

²*Department of Energy Technology, Faculty of Engineering Northern-Chiangmai
 University 169 Moo 3 Tambol Nongkaew Amphoe Hang Dong Chiangmai 50230,
 Thailand*

Corresponding Author E-mail: prachabu@swu.ac.th

E-mail: krissadangs@gmail.com¹, prachabu@swu.ac.th^{1}, bancha@nortcm.ac.th²
 Tel. +668(0)89-1716397*

Abstract

In the present work, an experimental study of a 2-stage concentration parabolic dish has been performed towards achieving an efficient design of a parabolic dish solar concentrator. Based on the ASHRAE standard, an experiment was conducted under Thailand climatic conditions. The arrangement consists of the primary stage, which was lined with aluminum foil for the primary stage paraboloidal reflector in a size of 1.68 m aperture diameter; the second stage was constructed of multi-piece of the light reflector to form the paraboloidal shape reflector in a size of 0.652 m × 0.606 m diameter. The receiver, in other word the water calorimeter was painted black and made of 1 mm thick copper sheet in the inside diameters of 138 mm, shielded with rubber insulation. Two-axis sun tracking system (battery powered) has been mounted to track 2-stage PDC allowing to the direction of the sun for receiving the direct solar radiation. Water was used as a working fluid; the water loading reservoir is made-up with stainless steel in 2 meter height for controlling the steady flow condition. The experimental results shown that the maximum thermal efficiency was 64.77 %, the optical efficiency was 85.5%, and the total geometrical concentration was 254.918 X. The performance of a 2-stage concentrator leads to further improvement of the efficiency, at an average of 42.54 % compared to the 1-stage parabolic dish concentrator, 17.97 % approximately. It was also found that the receiver can achieve during operation due to the relatively high water temperature of 101.5 °C. The predictable useful applications of this research were solar heater, solar food dryer and dish-Stirling for solar power generation.

Keywords: Solar Energy, 2-stage concentration parabolic dish, Concentrator efficiency

Introduction

Solar energy is the renewable energy derived from incoming solar radiation, unpolluted, and therefore is used as one of the most favorable alternative energy resource decisions. In the near future, the large-scale introduction of solar energy systems, straight converting solar radiation into heat, can be looked forward. Solar radiation is transformed into thermal energy in the focus of solar thermal concentrating systems. These systems are characterized by their focus geometry as point-focus concentrators (parabolic dishes and central receiver systems) and line-focus concentrators (parabolic-trough system) and linear Fresnel system). Parabolic dishes concentrate incoming solar radiation to a focal point. At this point the light is concentrated so make the hot area, which placed a receiver around this. A heat transfer fluid flows inside a receiver with then absorbs concentrated solar energy from the receiver partitions and raises its energy. This solar collector is provided with two-axis solar tracking to ensure that the solar beam falls parallel to its aperture area. Parabolic dishes can only use direct solar radiation, the slice of solar radiation, which is not defeated by clouds or dust in the air and that reaches the Earth's surface as a parallel beam. The applications of parabolic dishes with two-axis tracking are electricity generation system, photo voltaic, heating, and refrigeration system. Thailand is located in the sultry area and, therefore, contains plentiful solar power source of solar heat gain. Solar is one of uncontaminated natural energy sources that can be transformed into heat, machine-driven energy, and electrical energy. Thailand has numerous areas with excessive solar power potential in the Dominant Region. The combine solar potential area interpretations for around 14.3% of the country's whole area, achievement average daily solar revelation in the range of 19 – 20 MJ/m²-day. [1] Central region of Thailand, where this research was lead has sufficient of solar energy to be used as an unconventional energy[8]. Several designs of a 2-stage parabolic dish concentrator have been studied over the years. The design of a suitable parabolic dish concentrator is one of the most important factors controlling the economics and the performance of a solar concentrator. The concept of a 2-stage parabolic dish concentrator was introduced by many researchers. Chen et al. [2] studied the design of a solar concentrator combining paraboloidal and hyperbolic mirrors using the ray tracing technique. The ray tracing technique was used to calculate and find out higher concentration ratio and the tracing error was investigated as well. They decided that the concentration ratios were around 2027 or 1220 with tracing errors of 0.5 or 1, and 5447 or 4701 with the detector in the radial-direction. They suggested many curves of mirror with focal number of 0.22 for the primary mirror and a numerical aperture of 0.61 for the secondary mirror. Whang et al. [3] presented the innovative design of the Cassegrain solar concentrator system for indoor illumination utilizing chromatic aberration to filter out ultraviolet and infrared in sunlight for illumination purposes. A Cassegrain solar concentrator system based on the theory of chromatic aberration equipped with sun tracking system was used to

Performance Assessment of a Constructed Double Reflection Parabolic Dish 10017

increase the efficiency. The result showed that the system can filter out UV totally and decrease IR partially. Soe et al. [4] carried out a performance analysis and design consideration of Cassegrain for Satellite Communication. Cassegrain and Gregorian type reflector are used to increase the performance of an antenna. They also studied the effects of losses in the system and plotted the parametric curves, which shown losses as a gathering of the Cassegrain design constraints. Colozza et al. [5] designed a Cassegrain Solar Concentrator System for ISRU Material Processing. The Cassegrain concentrator in the size of 0.5 m diameter has a concentration ratio of about three thousand. The 2 axis optical system was placed after the main concentrator, which caused the focal point size smaller and achieved more concentration ratio of about six thousand. Groulx and Sponagle [6] studied the ray-tracing analysis of a two-stage solar concentrator. They concluded that focal length, the distance between the secondary mirror and the goal, and the misalignment with the sun was affected to its efficiency. The optimal focal length was 157.9", and a maximum was 1.26×10^4 MW/m². Hamdani et al. [7] enhanced 2 and 3 dimensional of Fresnel lenses and VCassegrain dish for photovoltaic uses. Ray tracing technique was used to achieve the output, productivity of the silicon cell. Sookramoon K. [8] presented the design, construct and performance evaluation of a 2-stage parabolic through solar concentrator in PathumThani, Thailand. The first stage was made of polished stainless steel (SUS 400) in size of 1.489 m $\times$ 1.489 m, the second stage was created in hyperbolic profile reflector made from multi - piece mirror in a size of 0.13 m $\times$ 1.489 m. A copper pipe in diameters of 27.2 mm protected with glass tube was used as a receiver. One - axis Sun tracking scheme was installed to track the 2-stage PTC. The performance of a 2-stage PTC was evaluated using open-air experimental measurements, including the useful heat achievement, the thermal instantaneous efficiency and the energy gained by the water. The results shown the maximum thermal efficiency of 23.43%, the optical efficiency of 76%, and the total geometrical concentration was 27.08 X, respectively.

The aim of this research was to design and asset the energy with its performance gained from a 2-stage parabolic dish solar concentrator, which can raise the temperature of water and enhance more thermal efficiency than using only a single stage PDC. The attained data from this research is anticipated to be used in the design and development of PDCS technology in Thailand in the close future.

Nomenclature			
a	partial of the transverse axis	L_r	distance from main dish focal point to sub dish, m
b	partial of the conjugate axis	$\dot{m}$	mass flow rate of water, kg s ⁻¹
A_m	aperture area of main dish concentrator, m ²	Q_{absorbed}	absorbed thermal energy, W
A_s	aperture area of sub dish concentrator, m ²	Q_m	incoming solar energy to PDC, W
A_r	aperture area of the receiver, m ²	r	radial coordinate of themain dish, m

$A_{2, stage}$	aperture area of a 2-stage concentrator, m^2 ($A_{a1}-A_{a2}$)	T_{air}	ambient (air) temperature, $^{\circ}C$
C_p	heat water capacity at constant pressure, $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$	T_{inlet}	inlet water temperature inside the receiver, $^{\circ}C$
$C_{1, stage}$	main dishconcentration ratio	T_{outlet}	outlet water temperature inside the receiver, $^{\circ}C$
$C_{2, stage}$	sub dishconcentration ratio	X	1 sun solar intensity, $1000\ W/m^2$
D_m	diameter of a main dish, m	X_m	contour of main dish
D_s	diameter of a sub dish, m	X_s	contour of sub dish
e	the eccentricity	y_m	y coordinate of main dish
E_{con}	concentrator efficiency, %	Greek symbols	
F_m	focal length of the main dish, m	θ_1	main dish rim angle, deg.
F_s	equivalent focal length, m	θ_s	sub dish rim angle, deg.
f_2	focal distance of the sub dish, m	θ_z	azimuth angle of the sun, deg.
h	depth of the parabolic solar concentrator, m	η_o	the collector optical efficiency, %
I_{bn}	direct solar radiation, W/m^2	$\rho_{primary}$	primary dish reflectivity
I_{dg}	diffuse solar radiation, W/m^2	$\rho_{secondary}$	secondary dish reflectivity
I_t	total solar radiation, W/m^2		

A 2-Stage Concentration Parabolic Dish Design

The preliminary design for the concentrator consisted of a 1.68m diameter main dish (area of $2.216\ m^2$) and $0.652 \times 0.606\ m$ diameter sub dish parabolic reflector (area of $0.3096\ m^2$) retaining at main dish's focus. Solar radiation falling on the main dish concentrator is revealed up and focused onto the sub reflector. The secondary concentrator redirects it back through the opening at the base of the primary, to the focus of the arrangement, which is overdue the primary, as illustrated in Fig. 1. The perception design is as follows: A 2-stage parabolic dish focuses the direct solar radiation onto a focal point of the system. The half rim angle of this first concentrating stage is chosen to be equal to the sun's maximum declination of 23.5 degrees. The second stage consists of pieces of light reflector paraboloidal shape concentrator,

which couple the concentrated light directly into a copper receiver covered with an insulator. This suggested design increases concentration ratio of the system by using the second stage concentrator by a factor of 2.0 relative to the conservative design.

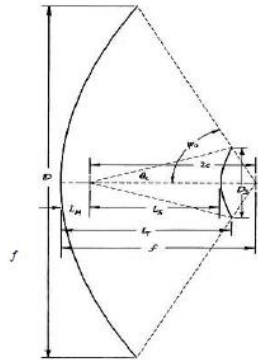


Figure 1: The Cassegrain geometry arrangement.

Geometry

The Cassegrain geometry [9], shown in Fig. 1, illustrate a parabolic form for the main dish and a hyperbolic curve for the sub dish. Either the first or the second foci of the hyperbola is the real focal point of the system, and is located at the center of the concentrator; the other is a receiver location which is the real focal point of the scheme, and is placed at the midpoint of the receiver; the additional is a practical focal point which is set at the focus of the paraboloidal. As significance, all parts reflected from two surfaces, movable identical spaces to a plane forward-facing of the concentrator.

Researchers have performed analytical studies of the main dish of Cassegrain antenna [9], the affiliation is as follows;

$$\tan \frac{1}{2} \theta_m \pm \sin \beta = \pm \frac{1}{4} \frac{D_m}{F_m} \quad (1)$$

The positive symbol put on to Cassegrain systems and the negative sign in the Gregorian forms.

For the sub dish, the associations are expressed as follow [9]:

$$\frac{\sin \theta_s}{\sin \theta_r} = 2 \frac{F_c}{D_s} \quad (2)$$

$$1 - \frac{\sin^2(\theta_s - \theta_r)}{\sin^2(\theta_s + \theta_r)} = 2 \frac{L_v}{F_c} \quad (3)$$

The curve of the main dish is calculated by the equation [9]

$$x_m = \frac{y_m^2}{4F_m} \quad (4)$$

The curvature of the sub dish is derived by the equation [9];

$$x_s = a \left[\sqrt{1 + \left(\frac{y_s}{b}\right)^2} - 1 \right] \quad (5)$$

Where the eccentric is [9];

$$e = \frac{\sin \theta_1 (D_r + D_s)}{\sin \theta_2 (D_r - D_s)} \quad (6)$$

$$a = \frac{F_s}{2e} \quad (7)$$

$$b = a \sqrt{e^2 - 1} \quad (8)$$

The magnitudes e , a , and b are the parameters of the hyperbola, e is the eccentricity, a is half the transverse axis, and b is half the conjugate axis.

Design Parameter

To design 2-stage parabolic dish Gregorian Cassegrain concentrator shape, Cassegrain Antenna calculation program was used to calculate the coordinates (x, y) of parabola in primary stage and hyperbola in second stage as shown in Table 1.

Table 1: Design parameter and results obtained from the Cassegrain Antenna calculation program

Data Input	Results	Data Input	Results
Fc (mm)	94.00	θ_p (rad)	0.55
Ds Sub ref (mm)	652.00	θ_p (deg)	31.40
Dmmain Dish(mm)	1680.00	Fe/Fm = Magnification	2.02
Fm Focal L Main Dish (mm)	672	Fe equivalent focal length	1494.18
h Dish Depth(mm)	237.83	Fm/Dm Main Dish	0.44
θ_p (rad)	1.03	Fe/Dm Equivalent Dish	0.89
θ_p (deg)	59.04	Eccentricity of sub reflector	2.97
$1/\tan \theta_p$	1.64	Lv (mm)	31.18

In the design process, a detailed analysis using ATMOS ray tracing software was performed on the concentrator to determine the paraboloidal outline needed to locus the focus a sufficient distance behind the primary dish. A ray-trace of the primary and secondary dish is shown in Fig. 2a. Assuming perfectly shaped concentrator and high specular reflective surfaces the spot size at the first focus was estimated to be 25 mm in diameter as shown by Fig. 2b. Since perfect surfaces are never achieved the actual spot size achieved was expected to be slightly larger. The energy density within the spot is given by Fig. 2b. The concentrator was designed so that the focus was located 7 cm behind the secondary concentrator.

Performance Assessment of a Constructed Double Reflection Parabolic Dish 10021

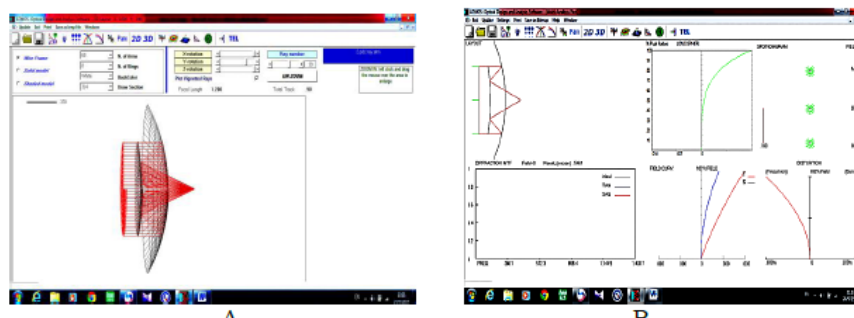


Figure 2: ATMOS Ray-Trace with Focus Spot.

In Fig.3 two series are shown in which the curvature of the sub dish is modified from the classical convex shape to a concave shape. As this is done, the diameter of the sub dish increases. This type of Cassegrain is called as classical Gregorian. Under these conditions, the Gregorian [9] form requires shorter focal length for the main dish as shown in Fig.3.

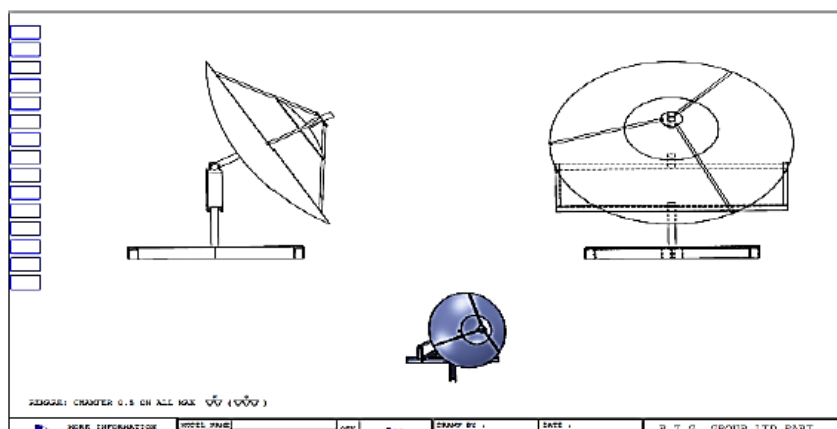


Figure 3: A Gregorian form 2-stage PDC CAD design.

Experimental Setup and Procedure

The experimental setup used for testing a 2-stage PDC is shown in as a schematic diagram and photograph in Figs. 4 and 5. The processes set forward in the ASHRAE standard [10] were followed to achieve a steady state condition of the concentrator.

10022

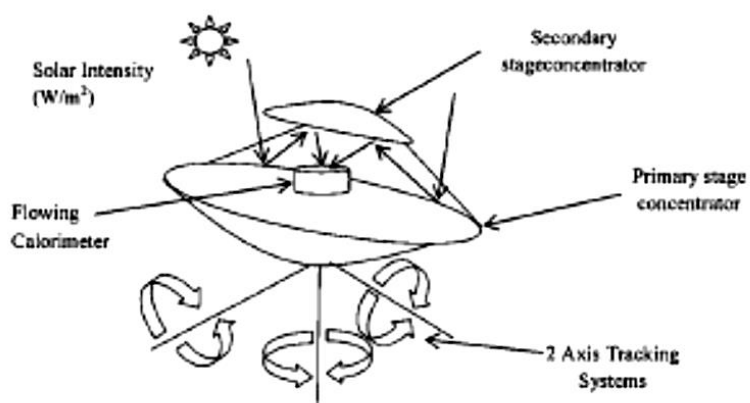
Krissadang Sookramoon et.al.

Figure 4: A schematic diagram of 2-stage PDC.

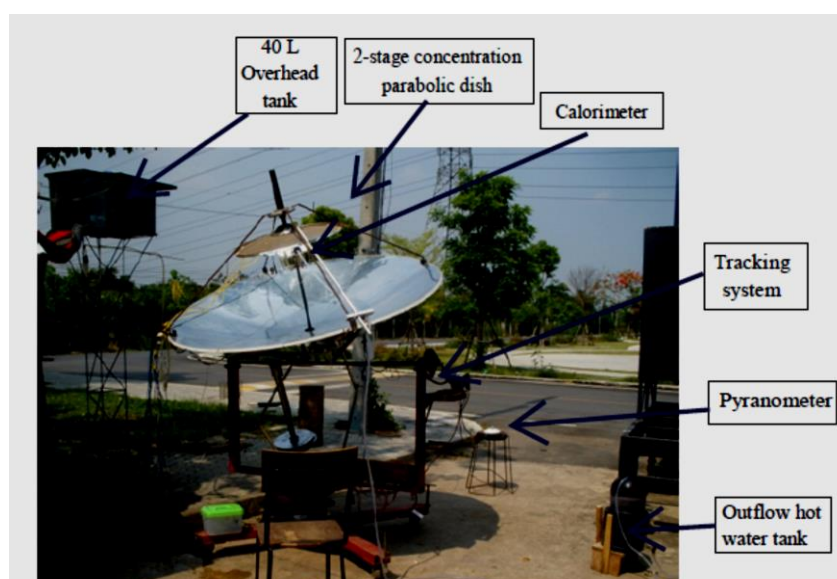


Figure 5: A photograph of the experimental setup.



Figure 6: Aphotograph of calorimeter and thermocouples.

The erected 2-stage PDC consists of a 40 liter storage tank with the mass flow rate of 0.133 kg/Sec. Water flow by gravity through a water pipe. In the experiment, the water circuit is an opened one. The overhead tank was filled up from the main water supply. At the edge of the absorbing receiver, flexible tubes with insulation were used for conveyance of the heat transfer fluid. Water from the tank passed through the receiver tube of the solar collector. The water temperatures at the inlet and outlet of the calorimeter were measured and recorded by using K-type thermocouple as shown in Fig.6 and solar radiation intensity were continuously measured (every one minute) and retained in data acquisition & computer throughout the 3 selected day of the month May 2014 experiment.

Data Acquisition

Data obtained from the experiment were measured and collected by using k-type thermocouple (0-1000°C (0.01°C Accuracy) inserted in the insulated copper calorimeter and Graphtec Midi logger(GL820 model) to measure and record data for calculating the absorbed solar energy as shown in Fig.7.

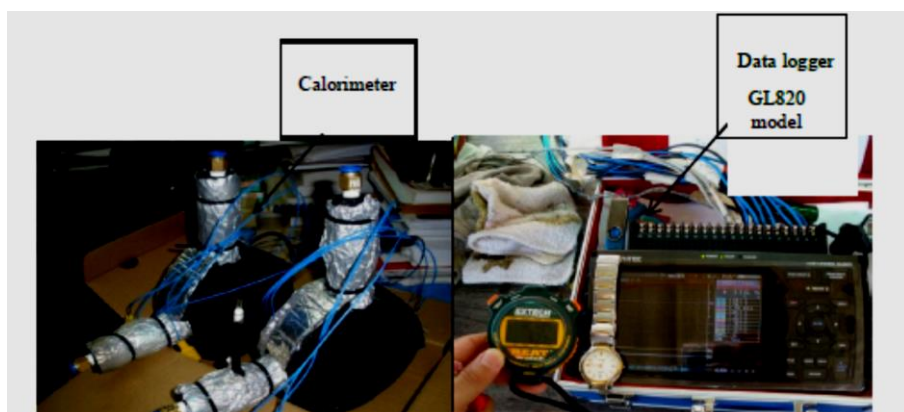


Figure 7: Photograph of calorimeter and data acquisition.

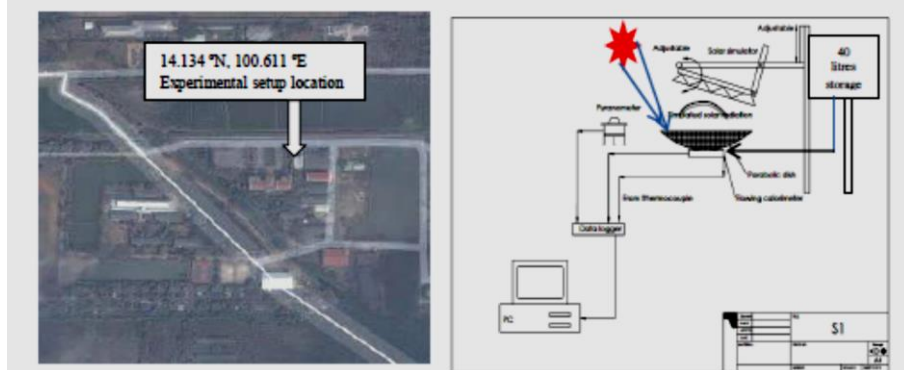


Figure 8: The experimental setup location and a schematic diagram of instrumentation with data acquisition system.

Tracking and Control System

A 2-stage PDC with automatic two axes sun tracking system was used to track the sun. The system consists of electro optic part represent as photo sensors by using four LDR placing in the four corners of the main dish, two 12VDC motors and electronic control box as shown in Fig. 9 and 10.

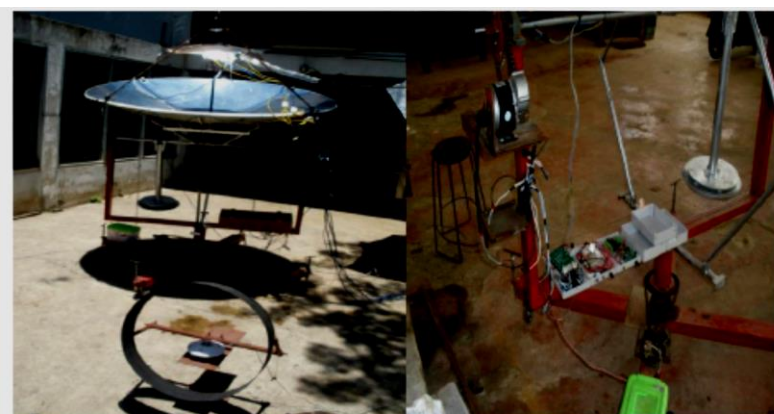


Figure 9: A photograph of two-axis tracking control system with 24 and 12 V DC motor.

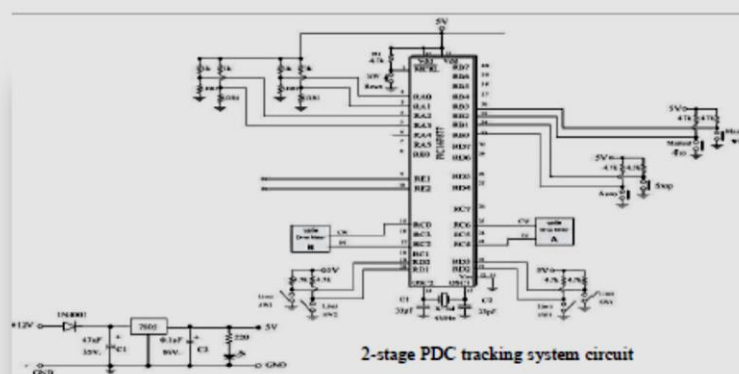


Figure 10: Electronic circuit for 2-stage parabolic dish tracking system.



Figure 11: A 24VDC 250 W motor with gear ratio 1:5 at 600 RPM for elevation movement and a 12 VDC wiper motor 110 RPM for azimuth movement.

Performance Evaluation of a 2-stage PDC:

The performance of the 2-stage PDC is determined by obtaining values of instantaneous thermal efficiency and the system efficiency for different combinations of incident radiation, ambient temperature and outlet water temperature.

The concentration Ratio is calculated as follows:

The concentration ratio is the ratio of the area of the entry aperture of the exit aperture. For the primary stage of the concentrator, the concentration ratio can be calculated by Eq.9:

$$C_{1\text{-stage PDC}} = A_{\text{main dish}} / A_{\text{receiver}} = 127.459 \quad (9)$$

For the secondary stage of the concentrator, the concentration ratio is calculated in the same manner, providing a concentration ratio

$C_{\text{secondary}} = 2x$. Concentration ratios for two stage reflector systems are the product of the two component concentration ratios, therefore:

$$C_{2\text{-stage PDC}} = 254.918X \quad (10)$$

The direct solar intensity on the normal plane can be calculated from:

$$I_{b,n} = (I_{t,h} - I_{d,h}) / \cos \theta_z \quad (11)$$

Where $I_{t,h}$ = total intensity on a horizontal plane, W/m^2 $I_{d,h}$ = Diffuse intensity on a horizontal plane, W/m^2 θ_z = Solar azimuth angle, degree

The incoming energy, Q_{in} is calculated from the measurement of the direct solar radiation, $I_{b,n}$, the area of 2-stage PDC, reflectivity of main dish and sub dish as follows:

$$Q_{in} = P_{\text{main}} P_{\text{sub}} I_{b,n} A_{2\text{-stage}} \quad (12)$$

The absorbed energy, Q_{absorbed} , is calculated from the measurement of the inlet and outlet water temperatures and the water mass flow rate, $\dot{m}$ as follows:

$$Q_{\text{absorbed}} = \dot{m}_{\text{water}} C_p (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) \quad (13)$$

Where $\dot{m}_{\text{water}}$ is mass flow rate of water from the storage tank (kg), $I_{b,n}$ is beam radiation (W/m^2), A_s is a concentrator aperture area (m^2), C_p is the specific heat of water ($4187 J/kg.K$), T_{in} is the inlet water temperature ($^{\circ}C$) and T_{out} is the outlet water

temperature ($^{\circ}\text{C}$) in and out of the calorimeter. Based on the ASHRAE standard [10], the concentrator efficiency (E_{con}) is calculated as follows:

$$E_{\text{con}} = \frac{m_{\text{water}} C_p (T_{\text{out}} - T_{\text{in}})}{I_b A_a} \quad (14)$$

In a 2-two stage PDC, the optical efficiency is the product of the reflectivity of each of the reflective surfaces. The reflectivity of the aluminum foil surface of the main dish (ρ_{main}) is 0.80, and the reflectivity of the light reflector (ρ_{sub}) is 0.95. The collector optical efficiency is:

$$\begin{aligned} \eta_o &= \rho_{\text{main}} \times \rho_{\text{sub}} \\ &= 0.80 \times 0.95 = 0.855 \end{aligned} \quad (15)$$

Results and Discussion

A period of three sunny days (12, 14 and 15 May 2014) has been selected for measuring all necessary data to analyze the performance of the 2-stage PDC. The direct, diffuse and total incoming solar radiation are shown in Fig. 12. It can be seen that the absorbed heat increases gradually with the increasing of the temperature difference, between 92.5 and 97 $^{\circ}\text{C}$. The working fluid passes through calorimeter in the flow rate of 0.133 kg/s.

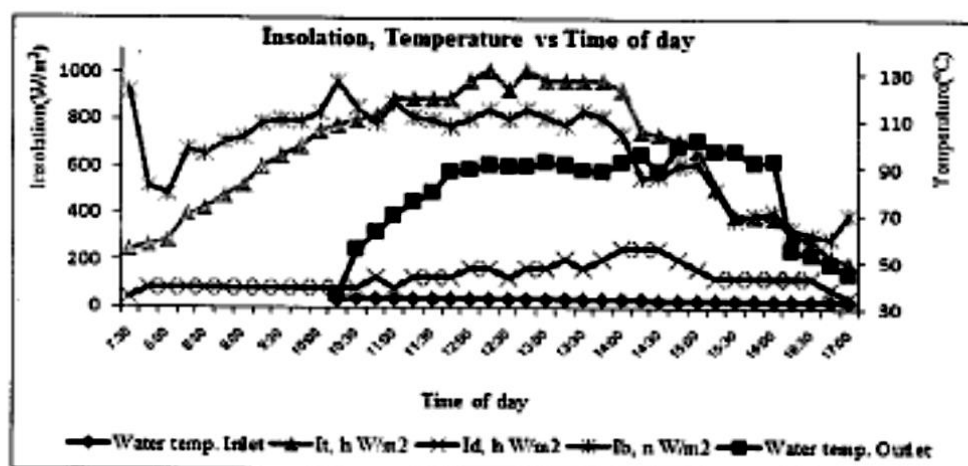


Figure 12: Time variation of Insolation on May 12, 2014.

10028

Krissadang Sookramoon et.al.

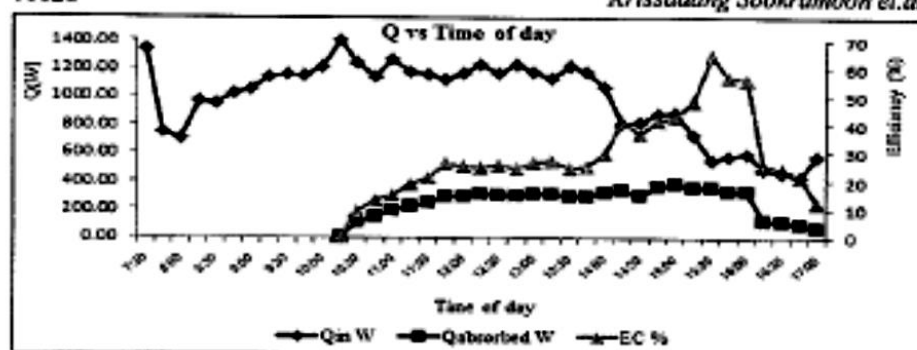


Figure 13: Time variation of Energy and efficiency on May 12, 2014.

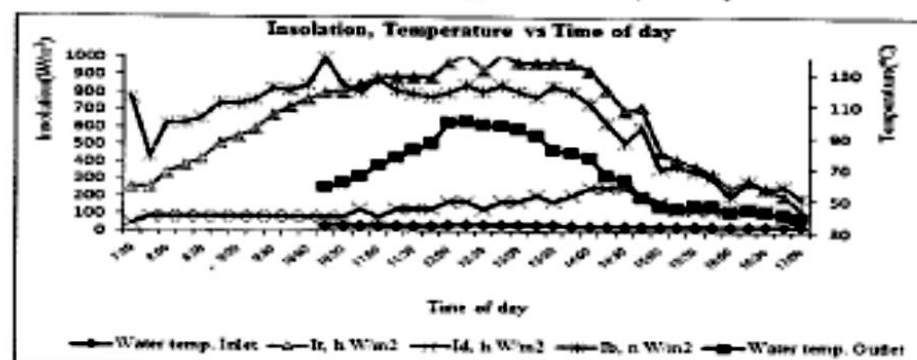


Figure 14: Time variation of Insolation on May 14, 2014.

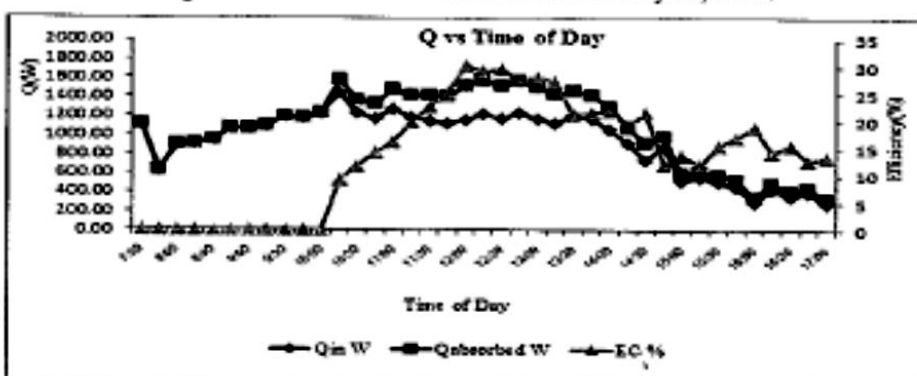


Figure 15: Time variation of Energy and efficiency on May 14, 2014.

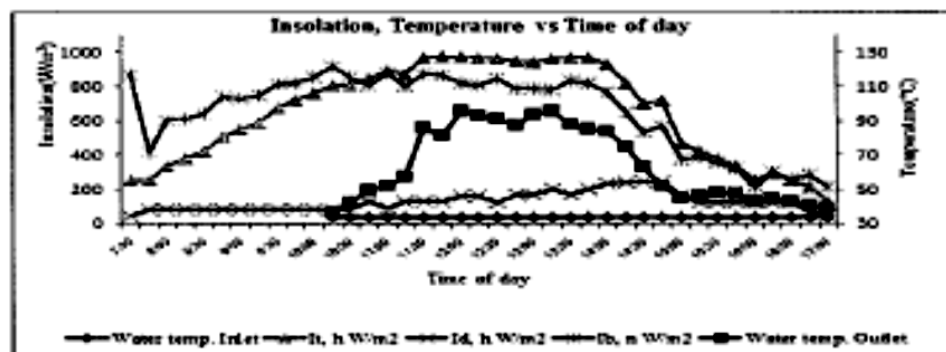


Figure 16: Time variation of Insolation on May 15, 2014.

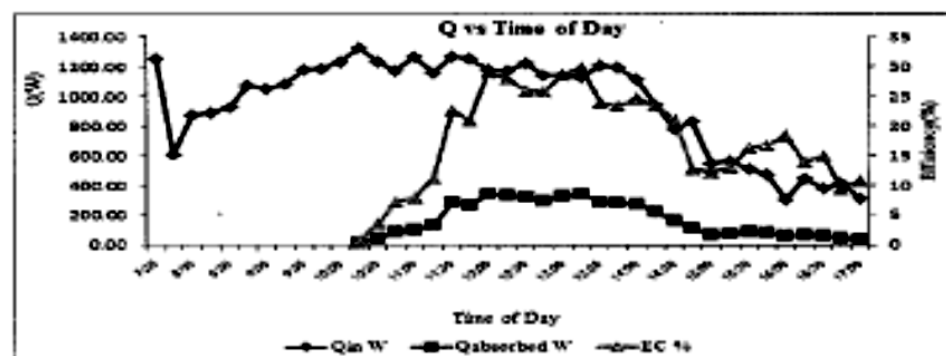


Figure 17: Time variation of Energy and efficiency on May 15, 2014.

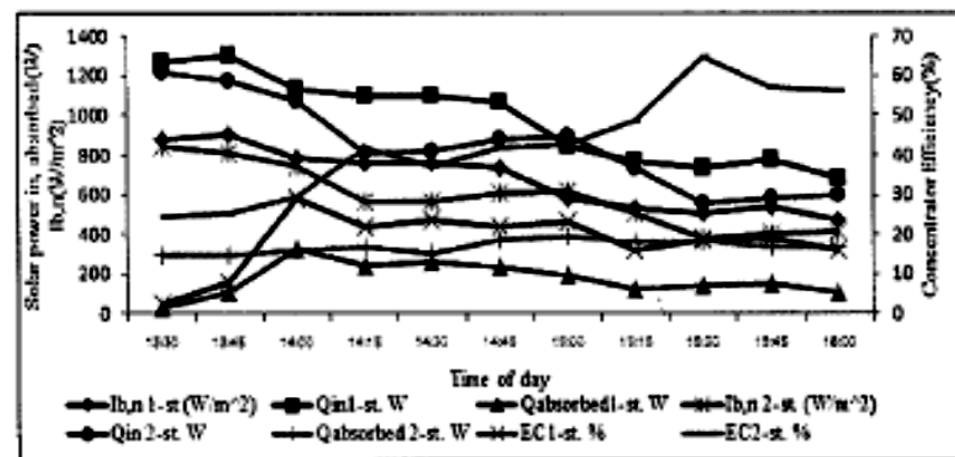


Figure 18: Energy and efficiency comparisons between 1-stage on May 12 and 2-stage on May 16, 2014.

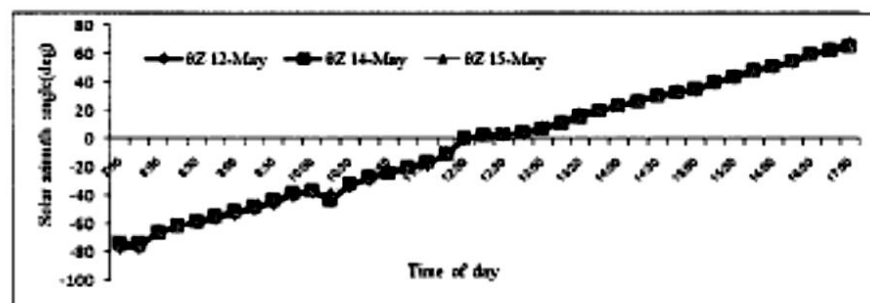


Figure 19: Solar azimuth measurement results of 3 selected days.

As shown in Fig. 13, 15 and 17 the relationship between the absorbed heat, Q_{absorbed} , and the direct incoming solar radiation, I_{dir} , from morning to afternoon. The experiment was carried out from 7:30 A.M. to 5:00 P.M., it was found that Q_{absorbed} in the afternoon was higher than in the morning and at noon. This is due to the fact that the heat gain is powerfully influenced by the absorbed heat to water in the calorimeter and therefore follows its variation. Fig. 13, 15 and 17 shows clearly that Q_{absorbed} increases with reducing heat loss from convection and radiation by using absorber (calorimeter) covered with a thick rubber insulation, which primarily enhances heat transfer from the absorber wall to the water flowing inside it due to decline heat loss. In comparisons between the 2-stage and 1-stage concentrator efficiency at the same time of day on May 12 and May 16 as shown in Fig. 18, it can be seen that a 2-stage PDC produced more efficiently (42.54 % average) than a 1-stage PDC (17.97 % average). The numerical azimuth angles are determined by experimentation, illustrate by the solar tracking system performance as shown in Fig. 19.

Conclusion

A 2-stage Parabolic Dish Concentrator (2-stage PDC) equipped with two axis sun tracking system have been designed, built and assessed. The performance of a 2-stage PDC was experimentally examined with water as the heat transfer fluid. The thermal efficiency of the 2-stage PDC can be obtained at maximum of 64.765% and in the average of 42.54 %. The optical efficiency was 85.5% and the total geometrical concentration was 254.918 X, derived from the calculation. It was also originate that the receiver (calorimeter) can easily attain during operation with relatively high water temperature levels approaching 101.5 °C, which is suitable for other solar energy application.

Acknowledgements

The authors would like to express thanks Srinakarinwirot University colleagues for the useful guidance and appreciatively thank the Department of Energy Policy and Planning Organization Thailand for providing financial support for this research work.

References

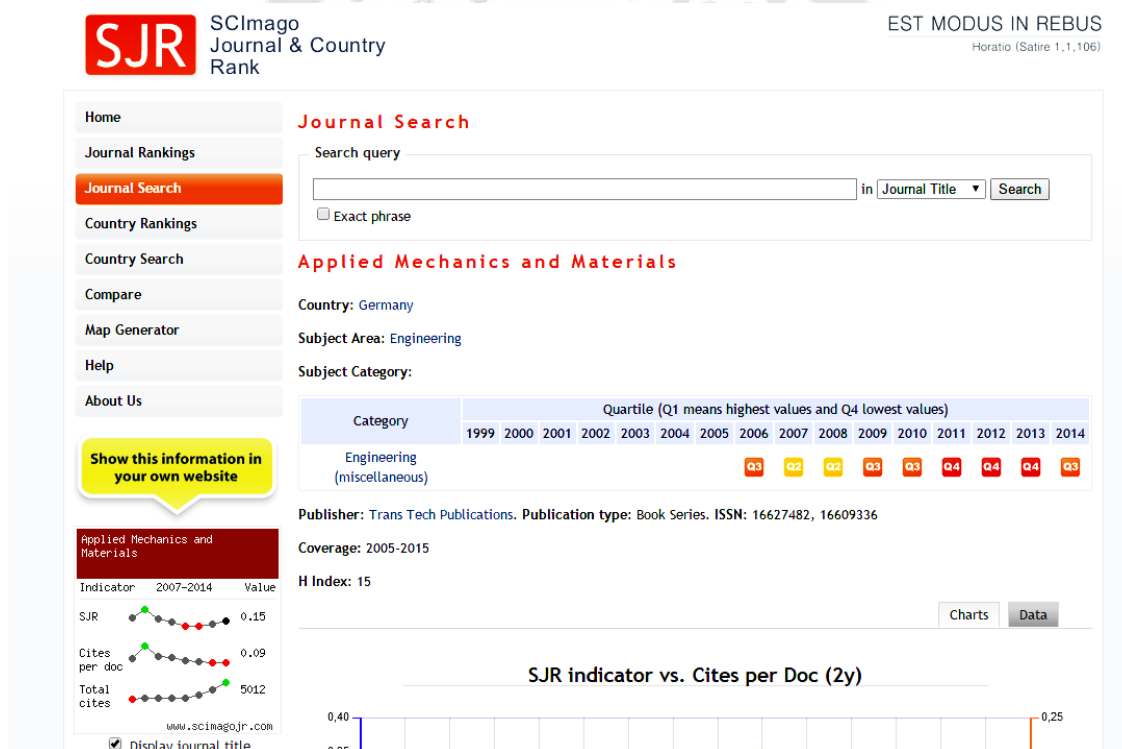
- [1] <http://Weben.dede.go.th/webmax/content/areas-solar-power-potential>.
- [2] Chi-Feng Chen, Chih-Hao Lin, Huang-Tzung Jan, Yun-Ling Yang, 2009 "Design of a solar concentrator combining paraboloidal and hyperbolic mirrors using the ray tracing method," *Optics Communications*; 282: 360.
- [3] Allen Jong-Woei Whang, Yi-Yung Chen, Bo-Yi Wu, 2009, "Innovative design of cassegrain solar concentrator system for indoor illumination utilizing chromatic aberration to filter out ultraviolet and infrared in sunlight," *Solar Energy*; 83:1115.
- [4] Myint Myint Soe, Zaw Min Aung, Zaw Min Naing, Khaing Theingi Oo, 2009, "Performance Analysis and Design Consideration of Cassegrain for Satellite Communication," *Proc of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists*; 1
- [5] Anthony J. Colezza, Robert Macosko, Charles Castle, 2010, "Cassegrain Solar Concentrator System for ISRU Material Processing," *American Institute of Aeronautics and Astronautics*; 1.
- [6] Dominic Groulx, Benjamin Sponagle, 2010, "Ray-Tracing analysis of a two-stage solar concentrator," *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*; 34 (2): 263.
- [7] Ali. H. AL-Hamdani, Batool. D. Blawa, S. K. AL-Ani, 2011, "Parabola dish and Cassegrain concentrators to improve solar cell Conversion Efficiency," *Baghdad Science Journal*; 8 (2): 571.
- [8] Krissadang Sookramoon, 2014, "Design, construct and performance evaluation of a 2-stage parabolic through solar concentrator in Pathum Thani," *Advanced Materials Research*; 931-932 :1291-97.
- [9] http://www.gmrt.ncra.tifr.res.in/gmrt_hpage/sub_system/Conn/IMH/Documents/Report/CASSEGRAIN.pdf
- [10] Methods of testing to determine the thermal performance of solar collectors, 1977, "ASHRAE STANDARD 93-77," ASHRAE, 345 East 47th street, New York 10017.

2. วารสารนานาชาติ Applied Mechanics and Materials.

ปกในของบทความ

Scientific.Net By Trans Tech Publications Ltd				
Subscriptions	For Editors	Distributors	Downloads	My Cart
AUTHOR HOME PAPERS TTP 50% DISCOUNT TITLES				
Paper Title	Page	Actions		
		Offprint	Download	Open Access
Performance Evaluation of a Paraboloidal Concentrator (978-3-03835-631-8)	463			

หลักฐานคะแนน SJR มีค่าคะแนน SJR (SCOPUS) 0.15



หน้าปกวารสาร



รายชื่อกองบรรณาธิการ

■ Applied Mechanics and Materials: Editorial Board

AMM Editors

Professor Xu, X. P. [Send email](#)

Huaqiao University, Ministry of Education Engineering Research Center for Brittle Materials Machining
Xiamen, China, 361021

AMM Editorial Board

Professor Cadoni, E. [Send email](#)

University of Applied Sciences of Southern Switzerland, Dynamat Laboratory
Via Trevano P.o. Box 12, Canobbio, 6952, Switzerland

Professor Cheng, Y. S. [Send email](#)

Harbin Institute of Technology, School of Materials Science and Technology
P.O. Box 435, Harbin, China, 150001

Professor Chinakhov, D.A. [Send email](#)

Yurga Institute of Technology of National Research Tomsk Polytechnic University
Leningradskaya Street, 26, Yurga, Russian Federation, 652055

Professor Delgado Sobrino, D. R. [Send email](#)

Slovak University of Technology in Bratislava, Faculty of Materials Science and Technology in Trnava
Bottova 25, Trnava, 917 24, Slovakia

Professor Dodun, O. [Send email](#)

Gheorghe Asachi Technical University of Iași, Department of Machine Manufacturing Technology
D. Mangeron Blvd, 39A, Iași, 700050, Romania

Professor Gogu, G. [Send email](#)

Clermont Université, Pascal Institute
UMR 6602 CNRS/UBP/IFMA, BP10448, Clermont-Ferrand, F-63000, France

Professor Hajduk, M. [Send email](#)

Technical University of Kosice, Department of Production Systems and Robotics, Faculty of Mechanical Engineering
Letná 9, Kosice, 042 00, Slovakia

[view all editors...](#) ▼

Performance Evaluation of a Paraboloidal Concentrator

Krissadang Sookramoon^{1,*}, Pracha Bunyanichakul^{1,b}
 Bancha Kongtrakool^{2,c}

¹Department of Mechanical Engineering Faculty of Engineering Srinakharinwirot University Rangsit-
 Nakhornnayok Rd., Klong 16, Ongkharak, Nakhornnayok 26120, Thailand

²Department of Energy Technology, Faculty of Engineering Northern-Chiangmai University 169
 Moo 3 Tambol Nongkaew Amphoe Hang Dong Chiangmai 50230, Thailand

*krissadangs@gmail.com, ^bprachabu@eng.swu.ac.th, ^cbancha@northom.ac.th

Keywords: Solar energy, Reflection, Paraboloidal concentrator, Simple calorimeter

Abstract. This research aims to design, build and analyze the performance of concentrated solar energy onto a simple calorimeter, made of copper and stainless steel. A scrapped yard antenna dish with a diameter of 1.68 meters was lined with aluminum foil reflector sheet. The average dish aperture area of 2.21 m², the system uses water as a heat transfer fluid distributed from overhead tank. Absorbed energy was investigated at a water flow rate of 0.5 L/min were performed in the experiment and the maximum useful energy was determined. Parabolic dish concentrator displacement angle was adjusted in every 15 degrees per hour, with the used of electric controlled sun tracking system. The experimental tests carried out in Faculty of Industrial Technology, Vajiravudh Alongkorn Rajabhat University Pathum Thani, under Thailand climatic conditions (14.134°N, 100.611°E) during 2 selected days of the months April 2013. The performance of a paraboloidal concentrator was assessed using open-air experimental measurements including the incoming heat, the energy absorbed by the water, and the concentrator efficiency. The experimental results shown the maximum thermal efficiency was 89.73%. It was also found that copper calorimeter can simply attain during operation relatively high water temperature levels oncoming 97 °C. The concentrated solar flux at the focal point was 442,073.11 W/m² for stainless steel calorimeter and 619,448.66 W/m² for copper calorimeter, respectively.

Introduction

Thailand, which is located in the tropics near the equator, received high level of solar intensity to be used as a solar heating. The solar radiation amount per unit time on a unit surface outside the earth's atmosphere is known as solar constant. This value is 1353 W/m². The solar radiation as received on the earth's surface is composed of the following: beam radiation (I_b), diffuse radiation (I_d), and global radiation (I_g). The applications of solar energy are solar electricity and solar heating systems. Concentrating solar radiation by using concentrator have been developed, the applications are hot water and hot air producing. It has been researched continuously. The solar thermal combinations are developed in different countries. The past can be classified into the following three categories, parabolic trough system, which works by using the reflection from a curved surface is parabolic trough a long pipe. Solar power tower system, a system that uses high technology system as it operates at very high temperatures. Most such is the nature of the research and demonstration. Parabolic dish systems with Stirling engine (parabolic dish/stirling engine system) power system is used to convert energy from the sun's radiation to be heat, then converts thermal energy into mechanical energy and finally to electricity. Some investigational studies have been carried out to investigate the performance of a parabolic dish solar concentrator. Singh et al. [1] examined the performance of a concentrator assisted still and a flat-plate collector assisted still. They summarized that the efficiency of the system using the concentrator was upper than the collector assisted system. Zulqurnan [2], have inspected the performance of a parabolic concentrator attached with solar still. The parabolic concentrator was coupled with still in such a way that the solar radiations were made to focus at the base of the tray of the still. The supreme amount of distillate was 2.2l. Ahmad et al.

[3], have done an experiment on a parabolic solar reflector along with a suitable heat-mechanism for desalination of saline groundwater. To enhance the output of the system, two flat collectors were put in series. The developed evaporating system was capable of producing 12-15 liter/day of potable water. FK Forson, MAA Nazha, H. Rajakaruna [4] studied and evaluated the performance of the solar heat dryer. Solar radiation is focused to 57×203 cm, aluminum coil pipe in the size of 2.54 cm was used as a receiver, gray painted to absorb heat from the sun for drying. Insulated cabinets in the size of 51×105×129 cm. Thermal performance were 30% -80%. Ibrahim Laden Mohammed [5] conducted the design and development of a parabolic dish solar water heater for domestic hot water application (higher than 100°C) is designated. The heater provided 40 litres of hot water per day for a family of four. The thermal efficiencies of 52% - 56% were obtained. M. Mohamed, et al. [6] carried out design and fabrication of solar dish concentration with diameters (1.6) meters for water heating application and solar steam was achieved. The dish equipped with tracking system and measurement of the temperature and solar power. Water temperature increased up to 80 °C, and the system efficiency increased by 30% at mid noon time. There is no research work in absorbed heat measurement from different material. This research focuses on investigating the absorbed heat from copper and stainless steel calorimeter.

Parabolic dish design

A simple equation of parabolic equation is used for calculating the paraboloidal size in x and y direction.

Parabolic equation is as follow:

$$x^2 = 4fy \quad (1)$$

To measure the amount of absorbed heat can be calculated from the equation below

$$Q = m.C.\Delta T \quad (2)$$

Q is the amount of heat that rises the temperature of calorimeter and contained water vary with the change of time, so the amount of heat can be calculated from the following equation.

$$Q = \left[mC_{cu} \frac{\Delta T}{\Delta t} \right]_{cal} + \left[mC_p \frac{\Delta T}{\Delta t} \right]_{water} \quad (3)$$

Concentrated solar intensity can be calculated from:

$$I = \frac{Q}{A} \quad (4)$$

Research Equipment

A 1.68 m diameter parabolic dish solar concentrator was performance investigation in this research. It consists of three main parts: (1) solar parabolic reflector (2) the solar receiver (calorimeter). (3) Tracking system to maintain the collector perpendicular to the sun. The measuring equipment are; K-type thermocouple and automatic temperature recorder. The amount of solar radiation measured by a pyranometer. Data collections were kept in every 1 minute. Local material has been selected to construct a parabolic dish solar concentrator. With stand and rotated by sun tracking system, parabolic dish is made of steel with a diameter of 1.68 meters, 0.238 m depth, which is the moderate size for ease of use and mobility as shown in Fig 1. To rotate the dish chain equipped with motor is used. A light sensor sends a signal to the control the collector movement, as shown in Fig. 1.



Fig. 1 A constructed parabolic dish collector with the electronic controlled sun tracking system.

Measure the heat absorbed by using the 2 different calorimeters. The instrument used to measure the amount of absorbed heat, called calorimeter designed and built using copper because copper has the ability to receive and transfer heat better and cheaper than stainless steel, a material higher thermal conductivity. The conductivity of copper is 390.6 kJ/kg.K compared with stainless steel, which has the higher thermal conductivity, at 414 kJ/kg.K . Calorimeter used in this study is placed at the focal point of the paraboloidal concentrator for applying the measurement of heat from solar radiation at the focus of a parabolic solar receiver. Calorimeter in the size of diameter of 140 mm and a height of 36 mm and a weight of 0.44 kg as shown in Fig. 2.



Fig. 2 Calorimeter made of copper and stainless steel (both areas 0.0154 m^2)

Calorimeter made from copper and stainless steel was forming in a cylinder shape as shown in Fig. 3, rubber is used as insulation outside. One side is painted matt black. And the other side of the room thermometer plugged into the data logger for reading the temperature of the water rises. This can be used to measure the intensity of solar radiation as shown in Fig.3.

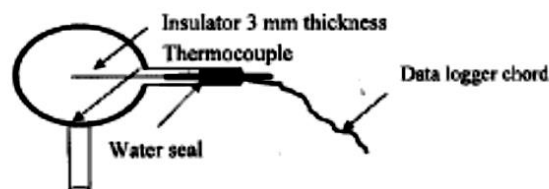


Fig. 3 Calorimeter and thermocouple.

The experiment was conducted based on the measurement of the heat from the water temperature rise within the specified period. Read the initial temperature and the final temperature of the water at the time of recording the temperature of the water changes. To calculate the amount of heat per unit of time measurement equation and calculate the intensity of solar radiation formulas for the intensity of radiation at the time of the trial in the graph to view the radiation intensity at each time step.

Results

The results showed that the paraboloidal concentrator performed highest efficiency in the period of time 11:30 to 13:00, and then the solar radiation is reduced gradually. This is based on the amount of solar radiation falling on the earth. The properties of the material used as the absorber plate. And materials used reflect solar radiation however; when the amount of sky with clouds blocking the sun reduces solar radiation causes the temperature measurement increases or decreases. The effects of several reasons like the wind on the day of the experiment, the winds speed were 3 m/s so the temperature has dropped. Parabolic dish experiments with solar radiation by using stainless steel calorimeter for 1 hr and 1 min intervals is recorded in data logger and plot as shown in figure 4.

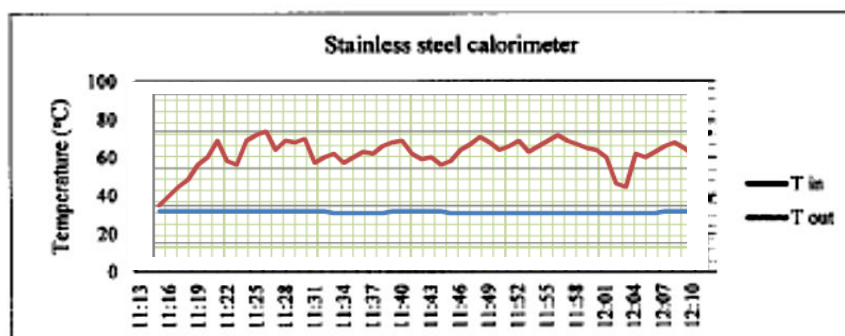


Fig. 4 A plot of the experimental results using parabolic dish and a stainless steel Calorimeter.

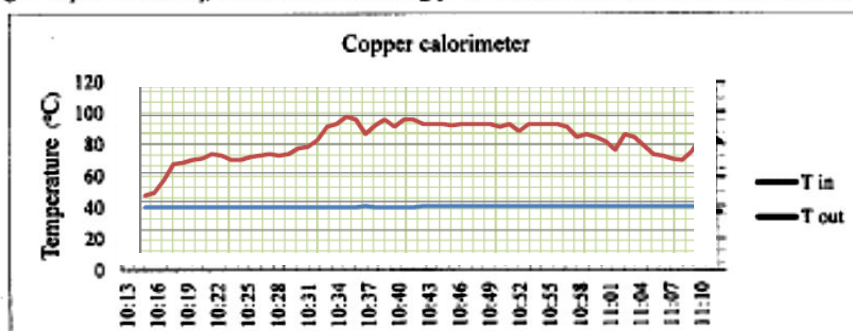


Fig. 5 A plot of the experimental results using parabolic dish and a copper type calorimeter.

Figure 4 and 5 shows the water temperature change with time. The rate of water flow 0.5 L/ min the heat exchange efficiency is increased from 10:13 to 11:10 hrs. The thermal efficiency increases while solar radiation is increased and decreases as the solar radiation decreases with time and the sun path changed.

The concentrator efficiency (η_{con}) is calculated as follows:

$$\eta_{con} = \frac{\dot{m}_{water} C_p (T_{out} - T_{in})}{I_p A_s} \quad (5)$$

The results showed the difference between the temperature of the flowing copper and stainless calorimeter, which play a role as a heat exchanger. The temperature of water flowing out of the calorimeter is in the average of 82.15 °C, and 67.93 °C for copper and stainless steel, respectively. In comparison between these two calorimeter, copper calorimeter show a better performance in water temperature and solar flux intensity at the focal point of the system.

Summary

The simple paraboloidal concentrator was built and performance tested. The experimental results shown the maximum thermal efficiency was 89.73% while using copper calorimeter. It was initiate that copper calorimeter can simply attain during operation relatively high water temperature levels oncoming 97 °C. The concentrated solar flux at the focal point was 442,073.11 W/m² for stainless steel calorimeter and 619,448.66 W/m² for copper calorimeter, respectively.

References

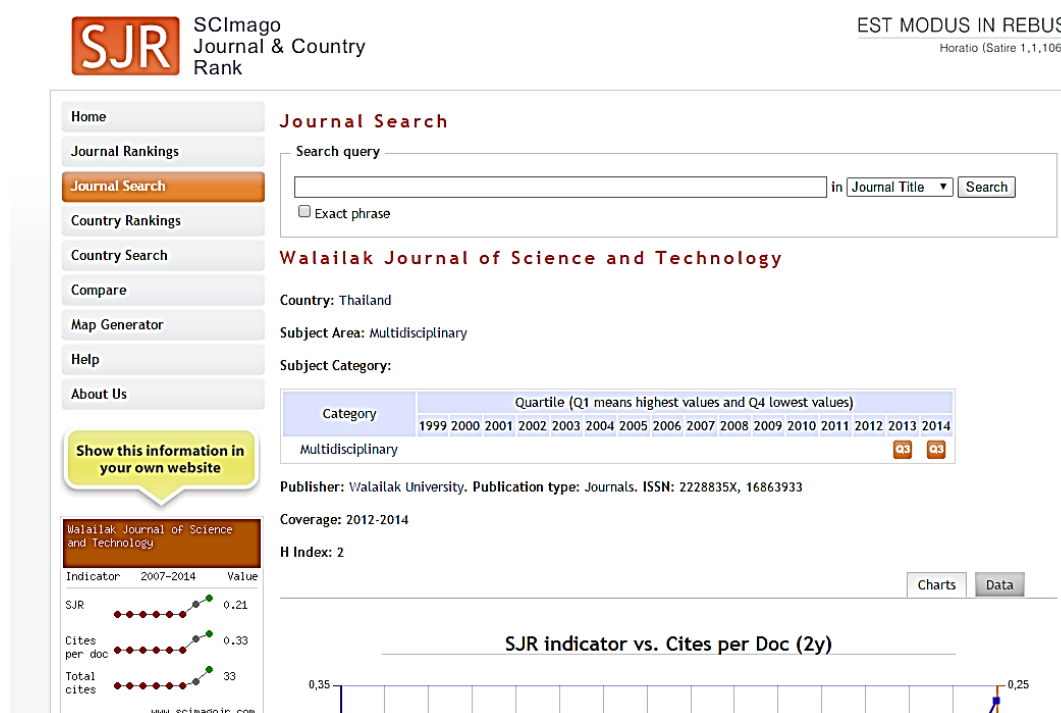
- [1] Singh S. K., Bhatnagar P. and Tiwari G. N., Design Parameters for Concentrator Assisted Solar Distillation System , Energy Conversion and Management Vol. 37, No. 2, (1998) 247-252.
- [2] Zulqurnan M., "Designing, Fabrication and Performance study of a conical solar still coupled With the Parabolic Concentrator", M.Sc Thesis, Department of Physics, University of Agriculture, Faisalabad (2002).
- [3] Ahmad R. N., Sial J. K. and Arshad M., "Development and performance evaluation of solar saline-water evaporator", Pakistan Journal of Water Resources, Vol. 9 (2005) 41- 48.
- [4] F.K. Forson, M.A.A. Nazha, H. Rajakaruna, Modelling and experimental studies on a mixed-mode natural convection solar crop- dryer , Solar Energy, Volume 81, Issue 3, March (2007) 346-357.
- [5] Ibrahim Laden Mohammad, Design and Development of Parabolic Solar Dish Water Heater, Inter J. of Engineering Research and Applications (IJERA) Vol. 2, Issue 1, (2012) 822-830.
- [6] Fareed . M. Mohamed, Auatf.S.Jassim, Yaseen. H. Mahmood, Mohamad A.K.Ahmed, Design and Study of Portable Solar Dish Concentrator, Inter J. of Recent Research and Review, Vol. III, September (2012).

3. วารสารนานาชาติ Walailak Journal of Science and Technology

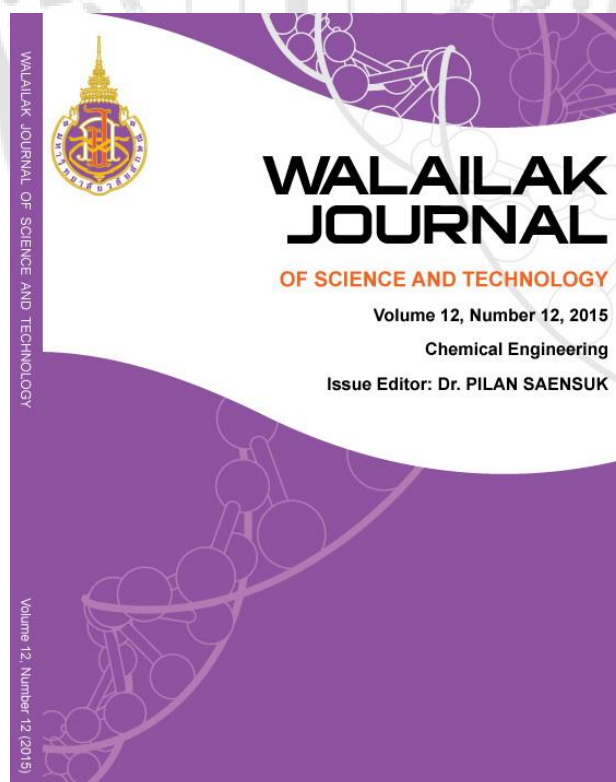
ปกในของบทความ

The screenshot displays the website of the Walailak Journal of Science and Technology (WJST). The page is titled "Walailak Journal of Science and Technology (WJST)" and shows the "Table of Contents" for Volume 13. The "Forthcoming Issue : Engineering and Information Technology" is highlighted. The "Table of Contents" lists several original articles, including "An Automated Question Answering System for a Web Forum Based on a Language Model and Ontology" by Kanda Runapongsa SAIKAEW, "Cognitive Estimation of Development Effort, Time, Errors, and the Defects of software's" by Amit Kumar JAKHAR, Kumar RAJNISH, "Evaluation of Network Performance under Provision of Short Predictive Traffic Information" by Apirath PHUSITTRAKOOL, Chawalit JEENANUNTA, Passakon PRATHOMBUTR, "An Investigation of Internet Banking Security of Selected Licensed Banks in Vietnam" by Panida SUBSORN, Sunsern LIMWIYAKUL, "Correlation Coefficient Based DVB-T Continual Pilot Detection to Identify Spectrum Hole for CR Application" by Md. Mizanur Rahman, Chalie Charoenlarpparut, Prapun Suksompong, Attaphongse Taparugssanagorn, "Numerical and Experimental Study of the Transverse Creep-Recovery Behavior of Bamboo Culm (Dendrocalamus hamiltonii)" by Thawatchai OUNDAIJOM, Wetchayan RANGSRI, "2-Stage Parabolic Dish-Stirling Engine Experimental Study in Thailand" by Kriasadang SOOKRAMOON, Pracha BUNYAWANICHAKUL, Bancha KONGTRAKOOL, and "The Composition of Bamboo Walls and Compressed earth blocks walls in Simple House that Produce Energy Efficient to Heat and Embodied Energy in Indonesia". The page also includes a "JOURNAL CONTENT" section with a search bar and a "CURRENT ISSUE" section showing the latest issue (Vol. 13, No. 1, 2013).

หลักฐานคะแนน SJR มีค่าคะแนน SJR (SCOPUS) 0.21



หน้าปกวารสาร



รายชื่อกองบรรณาธิการ


Walailak Journal of Science and Technology (WJST)

HOME ABOUT LOGIN REGISTER SEARCH CURRENT ARCHIVES ANNOUNCEMENTS PROCESS ONLINE SUBMISSIONS

Home > About the Journal > **Editorial Team**

Editorial Team

Editor

Chitnarong Sirisathitkul, School of Science, Walailak University, Thasala, Nakhon Si Thammarat 80161, Thailand

Editorial Board

Ahmad ISMAIL, Department of Biology, Faculty of Science, Universiti Putra Malaysia, 43400 UPM Serdang, Selangor, Malaysia
Atef ABDRAOU, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, United Arab Emirates University, Al-Ain, United Arab Emirates P.O.BOX 17555, United Arab Emirates
Bahram Hemmateenejad, Chemistry Department, Faculty of Science, Shiraz University, Shiraz, Iran, Islamic Republic of
Bhaskar Choubey, Lecturer of Electronics Design, University of Glasgow, Rankine Building, Oakfield Avenue, Glasgow, G12 8LT, United Kingdom
Carlo Santulli, Department of Electrical Engineering, Università La Sapienza, via Eudossiana 18, 00184 Roma, Italy
Chandra Prakash Kala, Ecosystem & Environment Management, Indian Institute of Forest Management, Post Box No. 357, Nehru Nagar, Bhopal 462 003, Madhya Pradesh, India
Che Abd Rahim Mohamed, Marine Ecosystem Research Center, Faculty Science and Technology, Universiti Kebangsaan Malaysia, Bangi, Selangor, Malaysia
Chuanhe Tang, Department of Food Science and Technology, College of Light Industry and Food Sciences, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China
Claude F. Boyd, Department of Fisheries and Allied Aquacultures, Auburn University, Alabama 36849, United States
Dhanesh SINGH, Department of Chemistry, K.G. Arts & Science College, Raigarh, India
Ehab Abdel Rahman Abu-Basha, Vice Dean, Pharmacology/Toxicology, Faculty of Veterinary Medicine, Jordan University of Science and Technology, Irbid 22110, Jordan
El-Sayed H. El-Ashry, Organic Chemistry, Chemistry Department, Faculty of Science, University of Alexandria, Egypt
Fabio Grizzi, Laboratories of Molecular Gastroenterology, IRCCS Istituto Clinico Humanitas, Rozzano, Milan, Italy
Frederick William H. Beamish, Department of Integrative Biology and Institute of Ichthyology University of Guelph, Guelph, Ontario, Canada
Friddoon Jawad Ahmad, Molecular Cell Biology and Genetics Center, Pathology Department, King Edward Medical University, Lahore, Pakistan
Guo-Cheng WU, College of Mathematics and Information Science, Neijiang Normal University, Neijiang 641100, China
Havdar AKCA, Department of Applied Sciences and Mathematics, College of Arts and Sciences, Abu Dhabi University, Abu Dhabi, United Arab Emirates
Ho Soonmin, Faculty of Applied Sciences, INTI International University, Putra Nilai, Negeri Sembilan, Malaysia
Jinrong Wan, Division of Plant Sciences, University of Missouri-Columbia, Columbia, MO 65211, United States
Jitbanjara TANGPONG, School of Allied Health Sciences and Public Health, Walailak University, Nakhon Si Thammarat 80161, Thailand
Jyotindra C Prajapati, Department of Mathematical Sciences, Chatar University of Science and Technology, Anand, Changa, India
Krzysztof Gorzki, Institute of Vehicle and Machine Exploitation, Radom University of Technology, Boleslaw Chrobrego 45, PL-26-600, Radom, Poland
Kyoung-Woong KIM, Dean, School of Environmental Science and Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology (GIST), 1 Oryong-dong, Buk-gu, Gwangju 500-712, Korea, Republic of
K.V.M. Acharyulu, Department of Mathematics, Faculty of Science, Bapatla Engineering College, Bapatla 522101, India
Laith Ahmed Naim, Department of Physics, College of Science, Mosul University, Mosul, Iraq
Ming Hung WONG, Croucher Institute for Environmental Sciences, and Department of Biology, Hong Kong Baptist University, Kowloon Tong, Hong Kong
Mohamed El-Doma, Faculty of Mathematical Sciences, University of Khartoum, Khartoum, Sudan
Mohammad Mehdi Rashidi, Department of Mechanical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, Islamic Republic of
Mohammad Salem Abdullah Nemat Al-Hwaili, Environmental Engineering Department, Faculty of Engineering, Al-Hussein Bin Tala University, Jordan
Mohsen SAEDI, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Iran, Islamic Republic of
Narayanan KANNAN, Faculty of Environmental Studies, Universiti Putra Malaysia, Serdang, Selangor Darul Ehsan 43400, Malaysia
Praveen AGARWAL, Department of Mathematics, Anand International College of Engineering, Jaipur 303012, India
Qin Xin, Faculty of Science and Technology, University of the Faroe Islands, Denmark
Ratikorn YIMNITS, Faculty of Physics, Institute Of Science, Suranaree University of Technology, 111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand
Roberto Montemanni, University of Applied Sciences of Southern Switzerland (SUPSI), Galleria 2, 6911 Manno, Switzerland
Sebastian Brandl, Department of Applied Sciences, University of Applied Sciences, Griesbachstrasse 1, 8032 Graz, Austria

หลักฐานการตอบรับการตีพิมพ์ ใน Vol.13 ปี 2015 Engineering and Information Technology

[WJST] Manuscript Decision ID 1503 กดแสดงรายละเอียด

Walailak Journal of Science and Technology <journal.wu@hotmail.com> 1 เม.ย. 11:00

ถึง คุณ > ไทย > แปลข้อความ ปิดสำหรับ: ถึงคุณ

Dear Professor Krissadang SOOKRAMOON:

We have reached a decision regarding your submission to Walailak Journal of Science and Technology (WJST), "2-Stage Parabolic Dish-Stirling Engine Experimental Study in Thailand". Please revise the manuscript carefully. The manuscript should be resubmitted along with point-by-point explanation according to reviewers' comments. If you disagree with any of the comments, please state your reasons. All corrections are mandatory and must be differentiated with red colour and submit it.

We request that you send a revised manuscript within 60 days, otherwise it may be considered withdrawn.

PS. Please submit in Microsoft Word version and WJST template, the references aren't in WJST format, please correct. Thank you very much for your kind helps.

Revised Version Upload STEP :: Author > Submissions > Paper's ID > Review > Editor Decision > Upload Author Version.

Author Guidelines: <http://wjst.wu.ac.th/index.php/wjst/about/submissions#authorGuidelines>

Walailak Journal of Science and Technology
 The Walailak Journal of Science and Technology, Institute of Research and Development, Walailak University,
 Thasala, Nakhon Si Thammarat 80161, Thailand
journal.wu@gmail.com



W 2-stage parabolic...

Chitnarong Sirisathitkul <chitnarong.siri@gmail.com> 9 เม.ย. 11:00

ถึง คุณ, Walailak > ไทย > แปลข้อความ ปิดสำหรับ: ถึงคุณ

Dear Author,

Your manuscript is accepted for publication but you have to send revised figures 11-13 to journal.wu@gmail.com. The x-axis of Fig 13 must be adjusted and the x-axis labels of Fig 11-12 are too dense (i.e. the number should not be at every tick)

Regards,
 Editor

Experimental Study of a 2-stage Parabolic Dish-Stirling Engine in Thailand**Krissadang SOOKRAMOON^{1,*} Pracha BUNYAWANICHAKUL¹ Banchu KONGTRAGOOL²**¹*Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering Srinakharinwirot University, Rangsit-Nakhornmayok Rd., Klong 16, Ongkharak, Nakhornmayok 26120, Thailand*²*Department of Energy Technology, Faculty of Engineering Northern-Chulalongkornrajavidyalaya University 169 Moo 3 Tambol Nongkhaew Amphoe Hangdong Chiangmai 50230, Thailand*

(*Corresponding author's e-mail: krissadangs@gmail.com)

Received: 25 December 2014, Revised: 14 May 2015, Accepted: 1 April 2015

Abstract

This paper conducted an experimental study of a laboratory-scaled 2-stage parabolic dish-Stirling engine. Experimental investigation of the system was performed, using an actual sun and a 2-stage parabolic dish concentrator as a heat source. Results from the performance testing by using a generator with a solar radiation and a double reflection parabolic dish solar concentrator on May 2014 indicated that the maximum concentrator efficiency is 26.291 %, the engine produced the maximum power of 0.359 W at 55.6 rpm, electrical power of 0.27 W, the generator efficiency at the maximum of 79.021 %, and the maximum overall brake thermal efficiency of 0.25033 %, approximately. The average heat input to concentrator is 1936.07 W and to the engine in an average of 180.28 W, respectively. The gross solar-to-electric conversion efficiency is 3.71 %.

Keywords: 2-stage parabolic dish, solar concentrator, solar-powered Stirling engine**Introduction**

The Sun has an irradiance of about 63 MW/m². On the Earth's surface, solar energy flow decreases down to approximate 1 kW/m². At the present time, solar energy is an eye-catching energy source, which can be used as a heat source for heat engines. The Stirling engine is a hot air engine, which works on a temperature differential, any heat source can be used to power the engine such as solar energy. In 1987, a solar powered Stirling engine was patented by Roelf J. Meijer [1] as shown in Figure 1. His innovation, a Stirling cycle engine, with a solar dish collector produces mechanical energy.[2] The output work of the Stirling cycle is then used to drive a generator and produce electric power. This apparatus reflects the sun rays into the focal point at the center of the paraboloidal dish. Solar energy is collected in the form of heat to power a Stirling cycle engine which operates by permitting heat flow from a hot source to a cold side in order to do work as shown in Figure 1. The dimensions of the Stirling engine can also be adjusted to advance the energy derived from the heat source. A Stirling engine uses the heated fluid to move pistons and create mechanical power. The mechanical work, in the form of the rotation of the engine's crankshaft, a Stirling engine requires an electric generator to transform its mechanical production into electricity.

In solar Dish-Stirling units, the solar energy is converted to electrical energy in three phases. In the first phase, radiation is converted to heat by concentrating the solar radiation onto a light absorbing heat pipe by means of a parabolic reflector. In the second phase, the heat is transformed into mechanical power by a Stirling engine. In the final phase, a generator converts the mechanical power to electricity. Generators fluctuating from low to high voltage outputs, alternating or direct current is available. Generators convert mechanical energy into electrical energy by using a center rotor that is bounded by stator magnets, which create a magnetic field. These rotors interrelate with either an electromagnet or a permanent magnet to generate electric current. The current that is formed can develop in either direct current or alternate current.

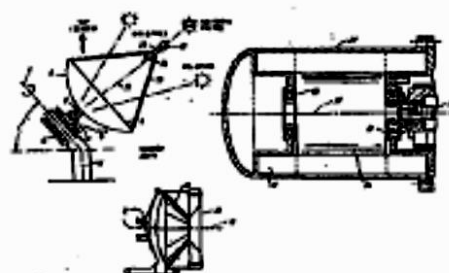


Figure 1 A solar powered Stirling engine by Roelf J. Meijer.[1]

A rational amount of research work has been done to quantify and predict the performance of Stirling Engines and Concentrating Collector. In 1976, Pons and Fox [3] reported the use of heat pipe systems to run solar-powered Stirling engines and recommended some concepts of system thermal storage. Even though this idea has profits, the increased complication may limit uses in technically untrained areas. In 1979, Holland [4] pointed out that the proper balancing of single cylinder Stirling engines was difficult, and may be solved by using the relatively complex mechanisms, such as the Phillips rhombic drive. Vibration is an important problem with solar-powered Stirling engines since they are generally mounted on light structures above parabolic dish collectors, and vibration of the dish would result in optical imprecision. In 1982, Leibowitz and Hansen [5] presented the possibilities of Stirling engines working with high-temperature gas. However, with most improvements resulting from the use of sophisticated technology, rural areas of developing countries seem to not gain much from them. In 1983, Efficiency is potentially high and in 1983, Marriott [6] suggested an overall efficiency of 29% before parasitic losses, and 26% after deduction of all expected losses, for a 26.5 kW engine operated with a parabolic dish. In 1985, Selouk and Bowyer [7] claimed approximately 32.5% engine efficiency, with working fluid temperatures around 700°C. Economic reflector design, to withstand the wind and weather, is important for this technology and continues to consume much effort. Lajet carried out a recent study, involving sophisticated wind-tunnel testing of loads on parabolic dish collectors. McGlaun [8] reported in 1987, that wind loading was much higher than predicted, and collector design changes are

necessary. In 1987, Schlaich [9] developed a 17 m diameter dish, by using a sheet steel membrane formed into the reflecting surface shape by a partial vacuum. In 1987, two units of this design equipped with 50 kW Stirling engines were tested in Riyadh [10]. In 1990, Ahmed *et al.* [11] used a single membrane dish collector and hydrogen as an operational gas in the process of a 50 kW solar-powered Stirling engine electricity production. They described the problems of tracking system, due to errors in design and problems in starting during winter season, due to improper control part selection. In 1991, Kleih J. [12] proposed a Dish-Stirling test facility. The effects of the Stirling engine performance were collector geometry, insolation, and the engine configuration. Its performance from the test was in the range of 5-25 kW. In 1999, Childs *et al.* [13] presented the innovative concept to determine the cost-effectiveness of new methodologies to solar powered desalting technology. Combined new solar conversion technology with lately advanced, hydraulic pump and energy regaining technology for solar desalting. A Solar dish concentrator-Stirling engine, electric module with an overall efficiency of 22% for 10 h/day average production, was reported. In 1999, Audy *et al.* [14] informed a Stirling engine for space station applications by using a solar dynamic power system. Theoretical models for dissimilar four representative orbit shapes were developed. The simulation consequences were compared to those of a solar dynamic power module, using a Brayton gas turbine. In 2007, Snidvongs S. [15] conducted a small solar dish Stirling engine 500 W Stand Alone System with a medium insolation in Thailand. The 4-piston, double acting Gamma type solar Stirling engine was constructed and operated at 650 °C coupled with a 2.5 m diameter dish solar collector. The thermal efficiency was 60% with a 31 % mechanical efficiency. In 2010, Wua *et al.* [16] proposed the thermal-electric conversion performance of parabolic dish/AMTEC solar thermal power system with the overall conversion efficiency of 20.6 % with the output power of 18.54 kW. In 2012, Ricardo [17] investigated a mathematical model for the study and design of a solar dish collector with cavity receiver for its application in Stirling engine. This work suggested a mathematical model for the design of parabolic dish collector, with cavity receiver such as Stirling engine, and analyzing the influence of geometric, operative and climatic variables on the efficiency and thermal capacity of the system. In 2013, Reddy *et al.* [18] studied the exergetic analysis and performance evaluation of parabolic dish Stirling engine solar power plant. A 50 MWe design capacity parabolic dish Stirling engine, solar power plant (PDSSPP) has been modeled for analysis, where 2000 units of parabolic dish Stirling engine each having a capacity of 25 kW were considered to get desired capacity. An attempt has been made to carry out the energetic and exergetic analysis of the different components of a solar power plant system using parabolic dish collector/receiver and Stirling engine. The developed model is examined at location Jodhpur (26.29°N, 73.03°E) in India. It is found that year-round energetic efficiency varies from 15.57% to 27.09%, and exergetic efficiency varies from 16.83% to 29.18%. In 2014, Ahmadi *et al.* [19] investigated on finite time thermodynamic (FTT) evaluation of a solar-dish Stirling heat engine. FTTs has been applied to decide the output power and the consistent thermal efficiency, exergetic efficiency, and the rate of entropy generation of a solar Stirling system with a finite rate of heat transfer, regenerative heat loss, conductive thermal connecting loss, and finite regeneration process time. The results imply that the optimized absorber temperature is somewhere between 850 K and 1000 K. In 2014 Li, Y *et al.* [20] conducted an adiabatic model of the Stirling engine developed for the study of a grid-connected dish-Stirling solar-thermal power plant. The model relates the average values of the engine state variables and also takes into description the engine losses. As the engine is shown to exhibit non-minimum phase behavior, an improved temperature control scheme for the engine heat absorber is developed. Containing the parameters such as engine speed, pressure, and solar insolation limits into the analysis, a steady-state feasible operating system of the solar-thermal power plant is obtained. The techniques of analysis for Stirling engines can be categorized with Martin's [21] classification as follows: 1. Zero the Order Analysis: as Beale formula. 2. First Order Analysis: (Schmidt analysis) was done in 1871 by Gustav Schmidt in which he obtained closed-form solutions for the special case of sinusoidal volume variations and isothermal hot and cold spaces. There are many ways to investigate the dish/Stirling performance and behavior, such as photometric, analytical and numerical. As the rationale mentioned above,

there is no published paper on a 2-stage dish Stirling engine experimental study. Thus, it is interesting to further study the 2-stage dish Stirling in details.

This work deals with a calorimetric method to measure the heat gained from solar radiation, which concentrated by a 2-stage parabolic dish concentrator focuses to hot end rod on the Stirling engine, then the engine produces mechanical energy and transformed into electricity. A two axis sun tracking system was used to maintain the dish perpendicular to the sun. The performance of a 2-stage parabolic dish solar concentrator and Stirling engine are investigated as well. The laboratory scaled Stirling engine is kinematic; single acting one power piston, gamma configuration, using a non-pressurized air as a heat transfer fluid. The heat source used is a 2-stage parabolic dish solar concentrator made of the satellite dish lined with aluminum foil reflector in stage one and a mini satellite dish lined with a light reflector sheet in stage two, reflect the sunray in two times to maximize the thermal energy at the focal point of the system.

Nomenclature			
A_m	Aperture area of the main dish concentrator, m^2	P	Stirling engine power, W
A_s	Aperture area of the sub dish concentrator, m^2	P_G	The generator power output, W
$A_{2-stage}$	Aperture area of 2-stage parabolic dish concentrator, m^2	Q_{con}	Total thermal energy come to a concentrator, W
A_R	Absorber area, m^2	q_A	The concentrated heat on the absorber plate, W
C_p	Specific heat of water at constant pressure, $kJ kg^{-1} K^{-1}$	q_{in}	The amount of heat absorbed by the water, W
$C_{1-stage}$	Main dish concentration ratio	q_s	Heat input from heat source for engine, W
$C_{2-stage}$	Sub dish concentration ratio	R_M	Main dish reflectivity, 0.8
D_m	Diameter of a main dish, m	R_S	Sub dish reflectivity, 0.95
D_s	Diameter of a sub dish, m	T_C	Engine cooler wall temperature, K
d_R	Absorber diameter, m	T_H	Engine heater wall temperature, K
E	Voltage reading from the meter, V	T_m	The average temperature in the regenerator, K
E_{con}	Concentrator efficiency, %	$T_{w, in}$	Inlet water temperature inside the receiver, K
E_{BT}	Brake thermal efficiency, %	$T_{w, out}$	Outlet water temperature inside the receiver, K
E_O	The overall efficiency, %	t_i, t_f	Initial, final time of water temperature °C
F_1	Focal length of the main dish, m	W	Weight of mass, kg
F_2	Focal length of the sub dish, m	Greek symbols	
h	Depth of the parabolic solar concentrator, m	η_{gen}	The generator efficiency, %
θ	Solar elevation angle, degree	η_{gross}	The gross solar-to-electric
$I_{b,s}$	Direct solar radiation, W/m^2		
$I_{d,s}$	Diffuse solar radiation, W/m^2		

$I_{0,p}$	Total solar radiation W/m^2	θ_z	conversion efficiency, %
m_w	Water mass flow rate, kg/s	δ	solar azimuth angle, degree
N	Engine speed, rpm	ω	Declination angle, radian
P_g	The actual shaft power, W	φ	Hour angle, radian
			Altitude angle, radian

Materials and methods

Experimental Apparatus

Solar-Powered Engine

The solar-powered Stirling engine is a single power piston, single acting configuration. The Displacer is made from an aluminum pipe. The purpose of this engine is as a laboratory- scale prototype engine for verification of actual solar-powered operations. This engine is experimented with actual solar energy, by using a 2-stage parabolic dish concentrator. The solar-powered Stirling engine was experimented as follows: The experiments with an actual sun consist of heat input experiment and the engine performance experiment. The main engine design parameters are listed in Table 1. It is designed as a single-acting, gamma-configuration with a power piston. The power cylinders are directly connected to the cooler plate, to minimize the cold space and transfer port dead volume. A photograph of this engine is shown in Figure 2.

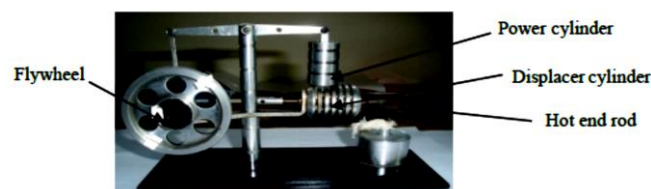


Figure 2 The solar-powered engine.

Table 1 Solar-powered engine main design parameters

Stirling engine configuration:		Size
Gamma		
Power piston:	bore x stroke (mm)	12.0 x 3.0
Swept volume (cc)		0.339
Displacer:	bore x stroke (mm)	9 x 6.2
Swept volume (cc)		0.394
Compression ratio		4.94
Phase angle		90°

A 2-stage concentration parabolic dish

The apparatus consists of paraboloidal dishes made of different type of materials and reflectors. The main dish fabricated using 1.68 m diameter satellite dish with a 0.741 m focal length. The sub dish was 0.625 m diameter mini satellite dish with 0.632 m focal length of the secondary stage. The reflecting surface is covered with aluminum sheet lining and lighting reflector for the main dish and sub dish, respectively. The design parameters are shown in table 2 and the configuration is shown in Figure 3 below. Two dishes are supported by a high-strength frame equipped with 2-axis sun tracking system. The aims of a 2-stage concentration parabolic dish are to boost the concentration ratio, which increases the heat flux of solar radiation.

Table 2 A 2-stage concentration parabolic dish main design parameters

Symbol	Dimension	Symbol	Dimension
A main dish (m^2)	2.216	D_{main} (m)	1.68
A sub dish (m^2)	0.309	d_H (mm)	138
A_H (m^2)	0.014957	F_1 (mm)	672
$A_{2-stage}$ (m^2)	1.9064	F_2 (mm)	632
C_{H1}	127.459	Q_{main} average (W)	1936.07
C_{H2}	254.918		

The experimental set up

The experimental setup consists of the calorimeter, the engine coupled to a generator, solar radiation measuring equipment, thermocouple, data acquisition system and a double reflection parabolic dish concentrator as shown in Figure 3-4.

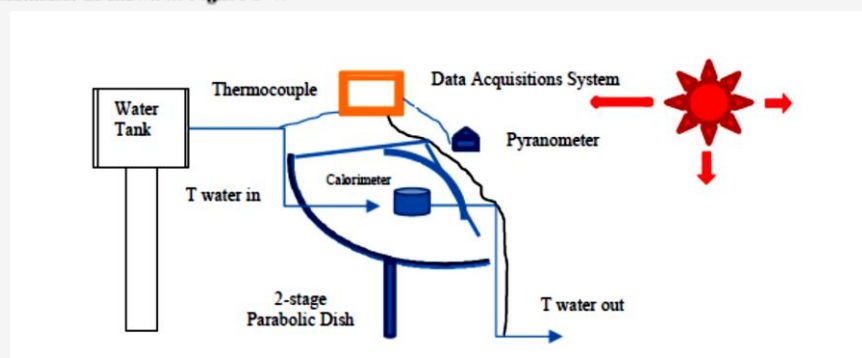


Figure 3 Schematic diagram of heat input experiment.



Figure 4 The simple calorimeter with a 2-stage concentration parabolic dish experimental setup.

The cooling air is supplied by air passes through the fins. The cooler temperature, T_C and the heater temperature, T_H , are measured by infrared thermocouples. The temperature indicators are shown in Figure 5.



Figure 5 A simple calorimeter for engine heat input experiment and data logger.

For engine experiment with actual solar energy, the experimental facilities are as follows:

The Displacer cylinder is used as a flowing calorimeter as shown in Figure 5. The constant water flow is provided by the constant head of the water storage tank. The water flow rate is measured by using a beaker and a stopwatch. The water inlet and outlet temperature are measured by the K-type thermocouples and recorded in the data logger. The diffuse intensity on a horizontal plane ($I_{d,h}$), is measured by using a pyranometer (CM 11 Kipp & Zonen, $5.67 \mu V/W/m^2$) and a shading ring. The solar zenith angle is measured as well. The apparatus setup for the engine-generator output experiment is shown in Figure 6-8. The solar total intensities in the horizontal plane ($I_{t,h}$) are measured by a pyranometer and recorded in Graphtec data logger model GL820 as shown in Figure 5. The generator is driven by an engine via a rubber belt, as shown in Figure 7. The small DC lamps are used as a load for the generator, as shown in Figure 9-10.



Figure 6 The temperature indicators measuring instrument.



Figure 7 The concentrator experiment arrangement.



Figure 8 The shading ring and equipment for solar zenith angle measurement.



Figure 9 The apparatus arrangement for an engine-generator output experiment.



Figure 10 The measuring instrument for engine-generator output experiment.

Experimental procedure

The performance study of a laboratory-scaled single-acting gamma-configuration Stirling engine equipped with a 2-stage parabolic dish solar concentrator to concentrate solar radiation to its focal point as a heat source.

The details of the experimental work consist of the following steps:

Experiment 1. A 2-Stage parabolic dish solar concentrator with a simple calorimeter

The concentrator experiment is done; the objective of the concentrator experiment is to determine the actual heat input into the engine. The solar concentrator reflects solar radiation twice for increasing the concentration ratio to the calorimeter, which is placed at its focal point and represented to the engine Displacer. The flowing water with a mass flow rate of 1.33 g/s from the water storage tank flows through the calorimeter (in a size of 138 mm diameter copper made) to absorb this heat.

The heat input into a simple calorimeter can be determined from:

$$q_{in} = m_w c_p (T_{w, out} - T_{w, in}) \quad (1)$$

Experiment 2. The engine experiment with a 2-stage parabolic dish solar concentrator

For an engine experiment with a sun, the concentrated heat flux was placed underneath the Displacer head. The Displacer head was heated up by the concentrated heat flux until it reached the operating temperature. The engine is then started and run, until steady state conditions were reached. The engine was loaded by adding a weight to the rope brake dynamometer. Then, the speed reading, spring balance reading and all temperatures from thermocouples were recorded. Another vary loading weight was added to the dynamometer until the engine stopped.

The direct solar intensity on the normal plane can be calculated from:

$$I_{b,n} = (I_{b,s} - I_{d,s}) / \cos \theta_s \quad (2)$$

For an absorber having an area A , with the intensity of a solar radiation of $I_{b,n}$, the concentrated heat on the absorber plate may be calculated from:

$$q_A = I_{b,n} A_H \quad (3)$$

Where $I_{b,n}$ is the concentrated intensity on an absorber plate and is equal to the average intensity experimented, and A_H is the absorber area. The absorber diameter is 138 mm.

The useful heat input is the amount of heat absorbed by the water inside the calorimeter, and can be determined from:

$$q_{in} = m_w c_p \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (4)$$

Where m_w is water mass (1.5 kg), c_p is a specific heat at constant inlet water temperature, (4168 J/kg K) [22], ΔT is the water temperature rise, Δt is the time taken during the water temperature rise.

Experiment 3. Engine Performance Experiment

The engine performance, experimental results is shown in Tables 3, in these tables, the engine torque is calculated from:

$$M_b = (S - G) r \quad (5)$$

Where S is the spring balance reading (N), and G is the loading weight (N), and r is the brake drum radius

The actual shaft power can be calculated from:

$$P_b = 2\pi M_b n \quad (6)$$

Where n is the engine speed (rpm).

E_{ST} is the brake thermal efficiency, calculated from:

$$E_{ST} = P_B / \dot{Q}_S \quad (7)$$

Where $\dot{Q}_S$ is the heat input from the heat source to the engine.

The total solar energy comes to concentrator may be calculated from the equation, as follows:

$$Q_{con} = R_m \times R_s \times I_{b,n} \times A_{2-stage} \quad (8)$$

This applies when R_m is the reflectivity of the main dish reflector surface and R_s is the reflectivity of the sub dish reflector surface. $I_{b,n}$ is the direct solar intensity on the normal plane and $A_{2-stage}$ is the total aperture area of the system.

The concentrator efficiency can be calculated from the useful heat input to the calorimeter and the total energy come to the concentrator, as follows:

$$\begin{aligned} E_{con} &= \dot{q}_h / Q_{con} \\ &= \dot{q}_h / (R_m \times R_s \times I_{b,n} \times A_{2-stage}) \end{aligned} \quad (9)$$

The generator power output and efficiency

The engine-generator power output experiment is carried out to determine the power output from the engine-generator set. The load on the generator is measured by using a load bank, voltmeter and ammeter. The generator power output is calculated from:

$$P_G = I E \quad (10)$$

Where I (A) and E (V) is reading from the meter.

The generator efficiency can be calculated from:

$$\eta_{gen} = P_G / P_o \quad (11)$$

The gross solar-to-electric conversion efficiency is the product of equations 7, 9, and 11:

$$\eta_{gross} = E_{ST} E_{con} \eta_{gen} \quad (12)$$

Solar tracking system

A 2-stage parabolic dish-Stirling engine with automatic two axes sun tracking system was used to track the sun. The system consists of electro-optic part represent as photo sensors by using four LDR placing in the four corners of the main dish, two 12V DC motors and electronic control box. The two important solar angles are as follows:

Solar azimuth angle

For a fixed point on the earth's surface (for a specific longitude and altitude) the sun begins a move from east to west. This is the angle between the line that points to the sun and south. The angle is negative to

the east and positive to the west. This angle is 0° at noon. It is probably close to -90° at sunrise and 90° at sunset, depending on the season. The azimuth angle is calculated according to the following equation

$$\sin \theta_z = \frac{\cos \delta \cos \omega}{\cos \phi} \quad (13)$$

Solar elevation angle

The solar elevation angle is the angle between the line that points to the sun and the horizontal. It is the complement of the zenith angle. This angle is 0° at sunrise and sunset. The elevation angle is calculated as follows:

$$\sin h = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (14)$$

Results and discussion

A 2-stage parabolic dish solar concentrator with a simple calorimeter

The actual heat input to the engine q_{in} , from the solar radiation heat flux, was experimentally determined, by using flowing calorimeter to measure the absorbed heat. The actual heat input to the engine and the heat source efficiency, the variations in heat source efficiency with an average intensity on the concentrator, is shown in Table 3 and Fig 11. It can be seen that the concentrator efficiency increases as the average intensity increases.

Table 3 A 2-stage parabolic dish solar concentrator experiment

No.	Time	Watertemp		θ_p	I_{s1}	I_{s2}	I_{s3}	Q_{in}	Q_{out}	Eff
		Inlet	Outlet	deg.	W/m ²	W/m ²	W/m ²	W	W	%
1.00	7.30			-68.75	353.99	84.00	578.54	838.23		
2.00	7.45			-69.38	353.99	84.00	477.58	699.95		
3.00	8.00			-70.79	338.12	83.00	775.28	1123.42		
4.00	8.15			-71.06	380.39	83.00	965.23	1327.39		
5.00	8.30			-71.33	422.65	83.00	1361.33	1527.39		
6.00	8.45			-71.60	587.19	83.00	1343.85	1967.68		
7.00	9.00			-72.58	549.45	83.00	1358.89	2237.48		
8.00	9.15			-72.66	591.71	83.00	1706.85	2473.01		
9.00	9.30			-72.75	679.25	83.00	1998.31	2895.27		
10.00	9.45			-72.81	718.51	83.00	2136.33	3115.54		
11.00	10.00			-73.89	768.78	83.00	2330.18	3379.11		
12.00	10.15	34.00	37.00	-72.85	809.94	83.00	2440.48	3555.93	18.71	0.47
13.00	10.30	34.00	43.00	-72.80	803.84	83.00	2487.84	3488.64	58.12	1.44
14.00	10.45	34.00	51.00	-73.35	845.31	125.00	2435.68	3462.85	94.66	2.73
15.00	11.00	34.00	53.00	-71.44	887.57	85.00	2518.52	3648.39	185.60	2.90
16.00	11.15	34.00	57.30	-70.29	870.60	136.00	2286.02	3176.22	179.75	4.06
17.00	11.30	34.00	65.60	-69.15	966.08	176.00	2368.06	3419.41	287.53	8.68
18.00	11.45	34.00	81.20	-68.00	975.00	176.00	2264.38	3283.67	262.62	8.00
19.00	12.00	34.00	95.60	-63.80	979.00	158.00	1848.73	2637.83	343.02	12.81
20.00	12.15	34.00	95.00	-57.85	969.00	161.00	1528.89	2181.41	318.54	14.82
21.00	12.30	34.00	91.00	-51.98	946.08	173.00	1336.38	1935.94	317.90	16.49
22.00	12.45	34.00	87.00	-46.97	932.00	167.00	1171.48	1639.37	258.15	18.00
23.00	12.50	35.00	85.50	-34.40	945.00	165.00	816.50	1243.95	325.36	26.33
24.00	13.05	35.00	85.50	-30.31	963.00	280.00	851.49	1277.16	325.18	26.29
25.00	13.30	36.00	87.00	-36.22	972.30	167.00	997.96	1443.90	283.99	19.64
26.00	13.45	35.00	87.00	-42.15	972.30	180.00	1041.18	1308.41	289.56	15.28
27.00	14.00	35.00	88.00	-63.80	929.84	239.00	1065.12	1226.62	285.12	12.80
28.00	14.15	35.00	83.00	-64.95	820.80	248.00	1369.83	1984.30	256.15	12.91
29.00	14.30	34.00	71.00	-66.09	980.60	242.00	1130.02	1637.25	229.45	14.62
30.00	14.45	33.00	63.00	-67.24	718.21	263.00	1228.12	1780.83	167.03	9.58
31.00	15.00	32.00	55.00	-71.44	464.92	359.00	961.11	1368.52	122.51	8.95
32.00	15.15	32.00	51.00	-71.60	422.65	421.00	969.20	1581.38	160.23	7.20
33.00	15.30	32.00	46.00	-71.34	380.39	421.00	816.70	1212.27	83.53	6.89
34.00	15.45	31.00	47.00	-72.38	338.12	421.00	706.49	1022.92	77.96	7.58
35.00	16.00	35.00	43.00	-72.89	253.39	421.00	455.85	649.44	55.88	8.43
36.00	16.15	35.00	43.00	-73.61	295.86	421.00	298.41	387.01	63.25	7.86
37.00	16.30	35.00	43.00	-72.94	213.99	421.00	451.86	654.85	55.88	8.50
38.00	16.45	33.00	39.00	-72.86	211.35	38.00	452.40	635.47	32.41	5.18
39.00	17.00	33.00	38.00	-71.58	126.80	49.00	289.52	428.06	32.41	7.09
average		33.89	68.27		646.39	126.38	1536.27	1936.87	183.18	9.51

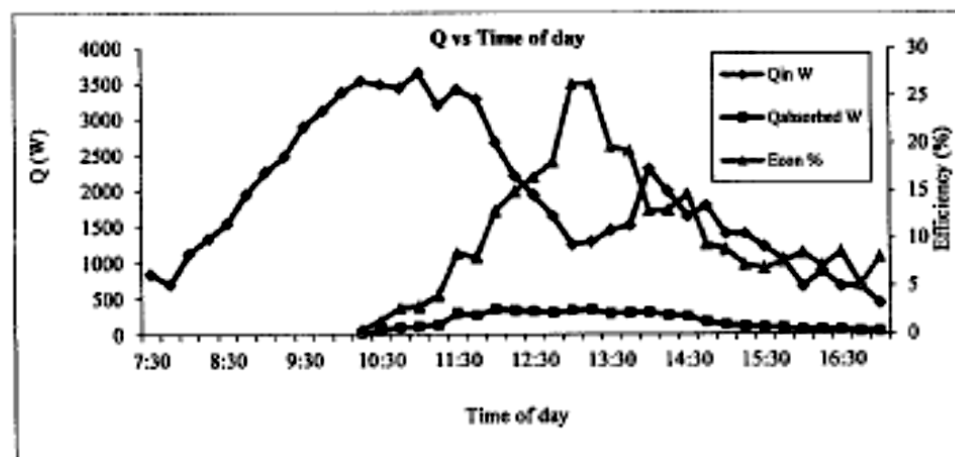


Figure 11 Results from the heat source experiment, using a simple calorimeter.

Engine Experiment with a 2-Stage Parabolic Dish solar Solar Concentrator

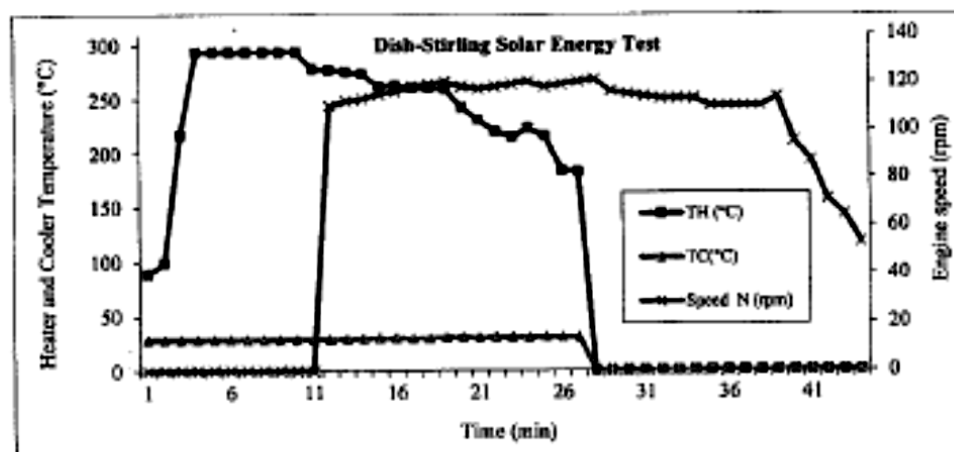


Figure 12 Results of the solar test: gamma-type Dish-Stirling engine.

From the experiment results, the engine started up at the initial temperature of 250 °C and came to steady state running between 250-260 °C, which could find the maximum power of the engine.

Engine Performance Experiment

The engine performances, on average, solar intensities of 870-961 W/m², as shown in Figure 13, the variations in the engine torque, shaft power, and brake thermal efficiency, at the variation of solar intensity with engine speed. As expected, the more improved engine performance results from the higher heat input. An increase in the engine torque, shaft power and brake thermal efficiency, is shown to also depend on the heater temperature. The values for maximum torque, shaft power and brake thermal efficiency is summarized in Table 4. The maximum shaft power and heater temperature, at various heat inputs, the shaft power and heater temperature increases as a function of the average intensity. Therefore, greater maximum shaft power will be obtained from the higher average intensity.

Figure 13 shows the variations in brake thermal efficiency, heat source efficiency and overall efficiency with the average intensity. It can be seen that brake thermal and overall efficiency increase, as the average intensity rises while the heat source efficiency.

Table 4 Performance of the dish-Stirling engine

N (rpm)	S (kg)	W (kg)	T(N.m)	P(W)	V	A	P _g (W)	Br _t (%)	Br _s (%)	η _{net} (%)	Br _{net} (%)	η _{net} (%)
55.600	0.097	0.074	0.062	0.359	1.180	0.230	0.271	0.250	0.036	75.531	14.910	2.819
48.150	0.089	0.084	0.069	0.348	1.120	0.230	0.258	0.243	0.031	73.029	16.390	2.941
39.850	0.010	0.094	0.077	0.323	1.110	0.230	0.255	0.225	0.031	79.021	18.000	3.201
39.200	0.010	0.094	0.077	0.317	0.980	0.230	0.225	0.324	0.030	71.093	26.250	6.040
31.550	0.001	0.034	0.030	0.101	0.870	0.103	0.090	0.128	0.000	89.492	26.290	3.023
Ave.						0.226	0.234	0.002	77.813	20.368	3.710	

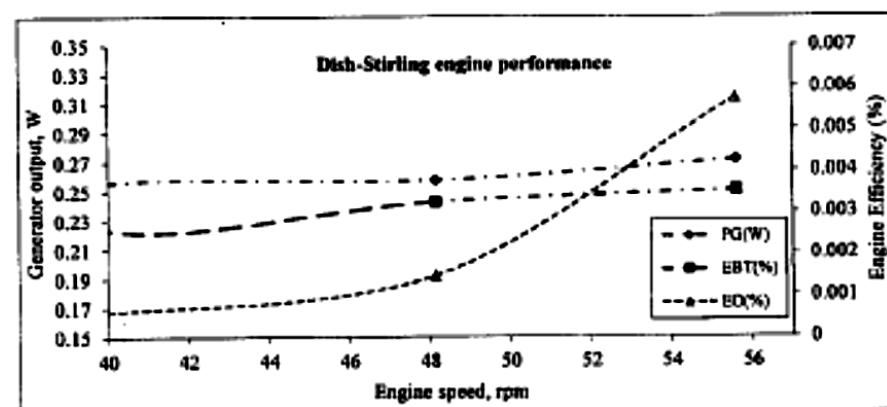


Figure 13 Results of the dish-Stirling power generation.

The relation between the torque and speed are shown in Table 4 and the generator power output versus speed shows the maximum power of 0.27 W at 55.6 rpm.

Conclusions

In this study, a laboratory-scaled parabolic dish-Stirling engine, with its two axis sun tracking system has been experimentally investigated, using an actual sun and a 2-stage parabolic dish concentrator as a heat source. The actual heat input to the dish-Stirling engine was measured the temperature different of water and assessed by the calorimetric method. The thermal efficiency of concentrator depends on the absorbed heat capability of the receiver, solar intensity and total aperture area of the dish. From the experiment, the maximum concentrator efficiency was found near 1 pm around 26.29% because of incoming solar radiation on that day gave more direct solar radiation, which suit to the point focus concentrator like parabolic dish. Although the performance of the system is not so high, this study would promote concentrating solar power technology. This information can be used for consideration in the large scale construction of solar dish power generation development in remote areas in the near future. To increase the efficiency of the system could be recommended:

- Experimental test of 2-stage parabolic dish concentrator reflector in order to use the performed aluminum foil in main dish and light reflector sheet in the sub dish with higher reflectivity, advanced thermal efficiency can be reached.
- Enlarge the main dish and sub dish to increase the aperture area could add more heat input.
- Enhancing the brake power of Stirling engine by scale up the size of the engine. Increase the hot end of the engine and add more fin of the heat sink for increase the cooling.
- The shading of the sub dish blocked solar radiation onto a main dish reduces total aperture area. Redesign the sub dish in any other form such as, hyperbolic shape.
- To scale up the system could be done after the study in the details of heat loss from the receiver of the Stirling engine such as convection and radiation loss. To minimize heat loss would gain more useful heat, which transfer to the engine.

Acknowledgements

The authors would like to express thanks, Srinakharinwirot University colleagues for the useful advice and gratefully thank the Department of Energy Policy and Planning Organization Thailand for providing financial support for this research work.

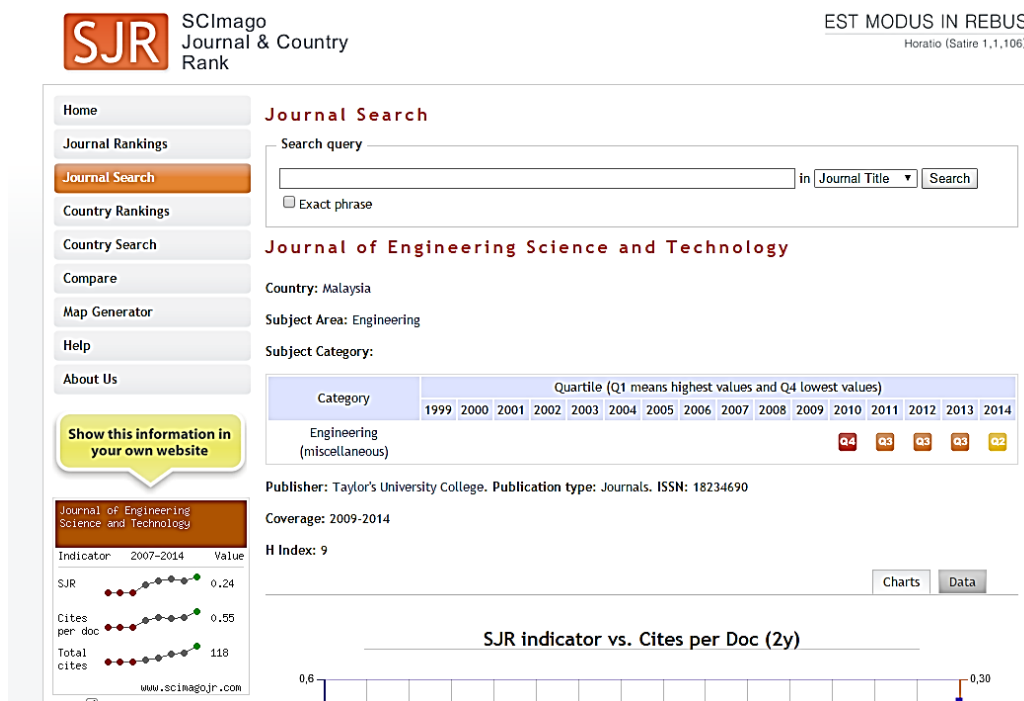
References

- [1] J Roelf Meijer. 1987, Solar Powered Stirling Engines, U.S. Patent 4,707,990.
- [2] Moran, J Michael and NJ Hoboken. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, John Wiley & Sons, Inc, New York, 2011, p.72-73.
- [3] RL Pons, and RJ Fox. A solar/Stirling total energy system. *Sharing the Sun, Solar Technology in the Seventies Conf.*, Winnipeg, 1976, 77-91.
- [4] MB Holland. The Stirling engine- power plant of the future. *Chartered Mechanical Engineer*, 1979, 60-63.
- [5] L Leibowitz and E Hanzeth. Solar thermal technology-outlook the 80's. *Mechanical Engineering*, 1982; 104, 30-35.
- [6] AT Marriott. Solar electric power from parabolic dishes. *Proc. Solar World Cong.*, Perth, 1983, 1438-1443.
- [7] MK Selcuk and JM Bowyer. Dish Stirling module performance analysis as evaluated from tests of various TBC concentrator / USAB engine configurations at the parabolic dish test site. *Ext. Abst. Intersol '85*, Montreal, 1985, 313.
- [8] MA McGlaun. The LaJet energy large scale innovative solar concentrator study of wind loading effects. *Abst. I.S.E.S. Solar World Cong.*, Hamburg, 1987, 2, 18, 15.
- [9] J Schlaich. Solar power plants with a membrane concave mirror-50 kW. *Abst. I.S.E.S. Solar World Cong.*, Hamburg, 1987, 2, 18, 16.

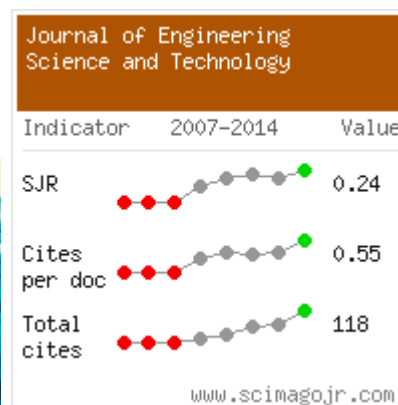
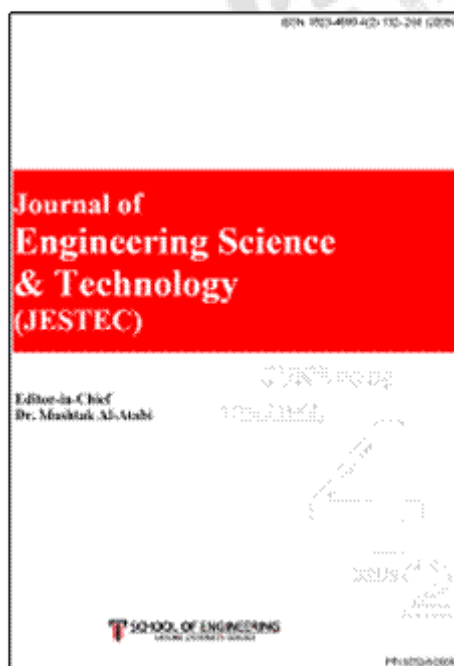
- [10] A Al-Rebalan and J Hansen. 50 kW Solar Concentrators With Stirling Generators- Results of the First Six Months of Operation in Saudi Arabia. *Abs., I.S.E.S. Solar World Cong.*, Hamburg, 1987, 2, 13, 15.
- [11] A Ahmed, M Al-Agarni, and M Al-Garni. Solar Powered Stirling Engine with a Single Membrane Dish Concentrator. *Proceedings of the 1st World Renewable energy Congress, Energy and The Environment*, Reading, U.K., 1990; 2, 1202-1207.
- [12] J Kleih. Dish-Stirling test Facility. *Sol. Energy Mater.* 1991; 67, 317-330.
- [13] WD Childs, AE Dabiri, Al-Hinai, HA and HA VARI-RO Abdullah. Solar-powered desalting technology. *Desalination*, 1999; 125, 155-166.
- [14] Ch Audy, M Fischer and EW Messerschmid. Nonsteady behavior of solar dynamic power systems with Stirling cycle for space stations. *Aerosp Sci Technol.* 1999; 1, 49-58.
- [15] S Snidvongs and S Chindaraksa. The design of a small solar Thermal dish Stirling 500 W Stand Alone in Thailand. *JSME Int J., Ser. A*, 2007.
- [16] Wu Sy, L Xiao, Y Cao and YR Li. A parabolic dish/AMTEC Solar thermal power system and its performance evaluation. *J. Appl. Ener.* 2010; 87, 452-462.
- [17] R Beltran, N Velazquez, AC Espericueta, D Saucedo and G Perez. Mathematical model for the study and design of a solar dish collector with cavity receiver for its application in Stirling engines. *J. Mech Sci Technol.* 2012; 26, 3311-3321, DOI:10.1007/s12206-012-0801-0.
- [18] V Siva Reddy, SC Kaushik and SK Tyagi. Exergetic analysis and performance evaluation of parabolic dish Stirling engine solar power plant. *Int. J. Energy Res.* 2013; 37, 1287-1301.
- [19] H Mohammad Ahmadi, Hoseyn Sayyaadi and Hadi Hosseinzadeh. Optimization of Output Power and Thermal Efficiency of Solar-Dish Stirling Engine Using Finite Time Thermodynamic Analysis. *Int. J. Energy Res.* 2014; 37, 1287-1301.
- [20] Y Li, SS Choi and C2 Yang. Dish-Stirling Solar Power Plants: Modeling, Analysis, and Control of Receiver Temperature. *IEEE T. Sustain Emerg.* 2014; 5, 398 - 407.
- [21] RW Dyson, SD Wilson and CT Roy. Review of Computational Stirling Analysis Methods, *NASA/TM-2004-213300, AIAA-2004-5582*, 2004.
- [22] European Standard. *Domestic cooking appliances burning gas*, EN 30: Edition 2, 1979.

4. วารสารนานาชาติ Journal of Engineering Science and Technology

หลักฐานคะแนน SJR มีค่าคะแนน SJR (SCOPUS) 0.24



หน้าปกวารสาร



รายชื่อกองบรรณาธิการ

Journal of Engineering Science and Technology (JESTEC)

[Home](#)[Submit a paper](#)[Instructions](#)[Editors](#)[Reviewers](#)[Downloads](#)[Contacts](#)

Editorial Board

**Editor-In-Chief**

• **Mushtak Al-Atabi, Ph.D.**
 Dean, School of Engineering
 Taylor's University
 Taylor's Lakeside Campus
 No. 1 Jalan Taylor's, 47500 Subang Jaya
 Selangor DE
 MALAYSIA
 Tel: ++603-56295451
 Fax: ++603-56295477
 E-mail: mushtak.t@taylors.edu.my

Deputy Editor-In-Chief

• **Professor A. Aroussi, Ph.D.**
 Department of Mechanical and Industrial Engineering
 Qatar University
 Qatar
 Tel: +974 4403 4373
 E-mail: aroussi@qu.edu.qa

Executive Editor

• **Abdulkareem Shafiq Mahdi Al-Obaidi, Ph.D.**
 Taylor's University
 Taylor's Lakeside Campus
 No. 1 Jalan Taylor's, 47500 Subang Jaya
 Selangor DE
 MALAYSIA
 Tel: ++603-56295263
 Fax: ++603-56295477

Associate Editor

§ **Siow Chun Lim, Ph.D**
 Taylor's University
 Taylor's Lakeside Campus
 No. 1 Jalan Taylor's, 47500 Subang Jaya
 Selangor DE
 MALAYSIA
 Tel: ++603-56295000
 Fax: ++603-56295001
 E-mail: ChunLim.Siow@taylors.edu.my

Editors

§ **Professor G. Davies, Ph.D.**
 Dean, Faculty School of Engineering
 The University of New South Wales
 UNSW Sydney
 NSW 2052
 Australia
 Tel: +61 2 9385 4970
 E-mail: g.davies@unsw.edu.au

§ **Associate Professor Rodney Chaplin, Ph.D.**
 Associate Dean (International)
 Faculty of Engineering
 The University of New South Wales
 UNSW Sydney
 NSW 2052
 Australia
 Tel: +61 2 9385 6361
 E-mail: R.Chaplin@unsw.edu.au

หลักฐานการตอบรับการตีพิมพ์

Review of a paper (ME15_007)_First Round Result
กล่องจดหมาย X
🖨️ 📧


Abdulkareem Shafiq Mahdi Al-Obaidi <Abdulkareem.Mahdi@taylors.edu.my>
ถึง ฉัน ▾

📧 17 พ.ค. ☆

↩️ ▾

🇹🇹

อังกฤษ ▾
>
ไทย ▾
แปลข้อความ

ปิดสำหรับ: อังกฤษ X




Dear Author

The **first round** of the review process has been completed.

I am glad to advise that your paper has been accepted for publication with no modification/minor/**major** corrections.

Attached herewith, please find one/**two**/three/four/five/six reviewers' reports.

Please notice the following:

- 1- Address all the concerns/recommendations of the reviewers
- 2- All additions/corrections are to be highlighted in red color in the revised paper.
- 3- Send a separate outlining how did you address each reviewers' concern/recommendations.
- 4- In order to complete the review process on time, we highly appreciate it if we can receive the revised paper within **three weeks** from today.

Review of a paper (ME15_007)_Second Round
กล่องจดหมาย X
🖨️ 📧


Abdulkareem Shafiq Mahdi Al-Obaidi <Abdulkareem.Mahdi@taylors.edu.my>
ถึง ฉัน ▾

📧 4 ก.ค. ☆

↩️ ▾

🇹🇹

อังกฤษ ▾
>
ไทย ▾
แปลข้อความ

ปิดสำหรับ: อังกฤษ X

Dear Author

This email is to confirm that we have received your revised paper. The paper is currently undergoing the second round of the review process.

Best regards

Dr. Abdulkareem Sh. Mahdi Al-Obaidi, CEng MIMechE
Journal of Engineering Science and Technology (JESTEC)

Journal of Engineering Science and Technology
 Vol. X, No. Y (Year) PPP - QQQ
 © School of Engineering, Taylor's University

PERFORMANCE OF A LABORATORY-SCALED STIRLING ENGINE POWERED BY A 2-STAGE PARABOLIC DISH SOLAR CONCENTRATOR USING SIMULATED SOLAR POWER

KRISSADANG SOOKRAMOON^{1*} PRACHA BUNYAWANICHAKUL¹
 BANCHIA KONGTRAKOOL²

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering Srinakharinwirot University, Rangsit-Nakhornnayok Rd., Klong 16, Ongkharak, Nakhornnayok 26120, Thailand

²Department of Energy Technology, Faculty of Engineering Northern-Chiangmai University 169 Moo 3 Tambol Nongkaew Amphoe Hang Dong Chiangmai 50230, Thailand

*Corresponding Author: krissadangs@gmail.com

Abstract

This paper presents the performance of a laboratory-scaled single-acting gamma-configuration Stirling engine, by using a solar simulator made of twenty-four units of 1500 W tungsten lamp with a 2-stage parabolic dish concentrator. The experimental study of this engine was carried-out. The engine performance is investigated experimentally and the engine power is analyzed by using the Schmidt analysis. The experimental results indicated that when the heat input into the concentrator was 8890.93 W, into the engine of 602.3 W, and the thermal efficiency of solar-gamma Stirling engine is 6.775 %. The engine produces a maximum torque of 0.0774 N m at 39.85 rpm, and a maximum shaft power of 0.339 W at 55.6 RPM. The generated power of 0.27 W with the maximum brake thermal efficiency of 0.2503 %. The overall efficiency of the system is 0.00574 %. The hot-space and cold-space temperature was 655, and 306 K, respectively. The approximate Beule number was 0.000487.

Keywords: Solar-powered Stirling engine, Solar simulator, 2-stage parabolic dish, Solar concentrator.

1. Introduction

Solar energy is a common renewable energy source, which are used as an energy source for heat engines. Solar radiation has been acknowledged as the biggest renewable resource on earth. The solar-collector concentrates the solar radiation onto the displacer hot-end of the Stirling engine dish-shaped collectors that track and focus the solar radiation onto a receiver. David et al [1] have been conducted the projects of Coupling sun concentrator and a Stirling engine. The systems used high quality of materials, with the preciseness for parts manufactured. Some authors carried out low cost experimental study. [2,3].

Nomenclatures

A_m	Aperture area of the main dish concentrator, m^2
A_r	Aperture area of the sub dish concentrator, m^2
A_H	Absorber area, m^2
C_p	Specific heat of water at constant pressure, $kJ\ kg^{-1}\ K^{-1}$
$C_{i,avg}$	Main dish concentration ratio
$C_{s,avg}$	Sub dish concentration ratio
D_m	Diameter of a main dish, m
D_s	Diameter of a sub dish, m
E_{con}	Concentrator efficiency, %
E_{br}	Brake thermal efficiency, %
E_H	Heat source efficiency, %
E_{OBT}	Overall brake thermal efficiency, %
E_t	Total efficiency, %
F_m	Focal length of the main dish, m
f	Engine frequency Hz
h	Depth of the parabolic solar concentrator, m
I	Electric Current, ampere
I_s	Solar simulator intensity, W/m^2
M_t	Engine torque, N.m
m_w	Mass of water to absorbed heat, kg
N	Engine speed, rpm
NB	Beale number, W/bar cc Hz
P_a	The actual shaft power, W
P_m	Engine mean pressure, bar
P_g	The generator power output
$P_{BE, Beale}$	Stirling engine performance calculation using Beale number
$Q_{absorbed}$	Absorbed thermal energy, W
q_{in}	The amount of heat absorbed by the water
q_t	Heat input from heat source to engine
T_C	Engine cooler wall temperature, K
T_H	Engine heater wall temperature, K
T_m	The average temperature in the regenerator, K
$T_{w,in}$	Inlet water temperature inside the receiver, K
$T_{w,out}$	Outlet water temperature inside the receiver, K
t_1, t_2	Initial, final time of water temperature °C
V_{max}	The maximum Volume, cc
V	Electricity voltage, Volt
VP	Power swept volume, cc
V_{re}	The swept volume of the engine, cc

The receiver is part of a power conversion unit that comprises an engine/generator. The reflected energy from the solar concentrator transmit to the receiver and increases a working fluid temperature, such as air, which push the piston and rotate the flywheel that can store mechanical power. A generator is equipped with Stirling engine to generate electricity has loss from the friction in a transmission system.

Many researchers have been investigated the solar-powered Stirling engines. Pons and Fox [4] studied the use of heat pipe systems for running solar-powered Stirling engines. They suggested the idea of complicated in thermal storage for Stirling engine, but it is not suited for rural area. Holland [5] showed that while solar-powered Stirling engines are operated, vibration may cause the inaccuracy problem in an optical. The single cylinder Stirling engine balancing was a problem, and may be resolved by using the Philips rhombic drive, complicated machinery. Leibowitz and Hanseth [6] proposed a high temperature gas used as a working fluid for Stirling engines, and require the development of higher-temperature receivers, improved engines, and concentrators with high-quality surfaces. Marriot [7] suggested that a 26.5 kW dish Stirling engine with an overall efficiency of 29% before parasitic losses, and 26% after deduction of all expected losses. Selsuk and Bowyer [8] proposed working fluid temperatures around 700°C, that made the engine efficiency came to 32.5 %. In the design of the reflector, the strength of material to withstand the climate condition, and the economy is the most important technique that could be used. Lajet conducted a parabolic dish concentrator load test in a wind tunnel. McGlaun [9] informed that wind loading affected the collector, which should be concerned. Schlaich [10] studied a big dish in the size of 17 m diameter, two units of a big dish coupled with 50 kW Stirling engines under Riyadh climatic condition were tested. Dishes were constructed of steel membrane sheet by a partial vacuum for reason of reducing the cost of parabolic dishes [11]. Ahmed et al. [12] summarized the operation of a 50 kW solar-powered hydrogen Stirling engine for producing electricity. They described the problems of tracking system, errors in design, and troubles in the engine start up through winter season. Childs et al. [13] studied the innovative concept to determine the cost-effectiveness of new approaches to solar powered desalting technology with methods in modern solar conversion technology and hydraulic-driven pump. They reported a solar dish -Stirling engine, electric module, having 10 h/day normal production an overall efficiency of 22%. Audy et al. [14] described a solar dynamic power system using a Stirling engine for space station applications. They established theoretical models for different four demonstrative orbit arrangements. Reddy et al. [15] presented the exergetic analysis and performance evaluation of parabolic dish Stirling engine solar power plant. A parabolic dish Stirling engine, solar power plant of 50 MW design capacity has been analyzed. They carried out the energetic and exergetic analysis of different apparatuses of a solar power plant system using parabolic dish collector/receiver and Stirling engine. The model is studied in India, Jodhpur (26.29°N, 73.03°E). They concluded that the year-round energetic efficiency is 15.57% - 27.09%, and exergetic efficiency of 16.83% - 29.18%. Ahmadi et al. [16] investigated on finite time thermodynamic evaluation of a solar-dish Stirling heat engine. Results indicate that the optimized absorber temperature is around 850 K and 1000 K. This technique consisted of: the production power, the compatible thermal and exergetic efficiency, and the amount of entropy production of a solar Stirling system with a finite rate of heat transfer, such as, regenerative heat loss, conductive thermal loss, and finite regeneration process time was applied to determine the mention parameters above. Li, Y. et al. [17] conducted an adiabatic model of the Stirling engine developed for the study of a grid-connected dish-Stirling solar-thermal power plant. They developed the model for accounting the engine losses. The temperature control scheme for the heat

absorber is also improved. By including the speed of engine, pressure, and solar radiation limits into the investigation, a steady-state achievable working system of the solar-thermal power plant is obtained. They proposed that the solar Dish-Stirling, convert the solar radiation to electricity in three steps. The radiation is converted to heat by at the focal point, which placed a heat absorbing, then the heat is converted to mechanical power the rotation of the engine, and finally the generator produced electricity. Martin's [18] summarized the Stirling engine analysis techniques, which can be characterized in 2 items: Beale equation and Schmidt analysis, which provide results of sinusoidal volume deviations and isothermal thermodynamic process. Kongtragool [19] suggested a low-priced solar concentrator such as axicon or conical reflector could simply yield a concentration factor value and temperature suited for solar power Stirling engine. To achieve a preferred high concentration factor rate, the principle of two-stage concentration can also be applied. Such a lot of investigators have explored the power output of Stirling engine [20], most of the researchers have not considered the Stirling engine powered by a 2-stage parabolic dish solar concentrator using simulated solar power. A.R. El Ouederni [21] carried out the experimental study of a 2.2 m parabolic dish concentrator. The result showed that the temperature at the focal point is about 400 °C.

The objective of this paper is to investigate the performance of a laboratory-scaled single-acting gamma-configuration Stirling engine, by using a solar simulator and a 2-stage parabolic dish concentrator as a heat source. The engine performance is investigated by the results of the experiment and the power is also analyzed by using the Schmidt analysis made by Jean-pierre Van Dormael. The results are compared to experimental data.

2. Experimental Procedure

The solar-powered Stirling engine is a single power piston, single acting arrangement. The displacer is accomplished from an expanded aluminum sheet. The purpose of this engine is as a laboratory-scale model engine for verification of actual solar-powered operations. This engine is tested with solar simulator and a 2-stage parabolic dish concentrator. The Stirling engine was designed to investigate:

1. Actual heat input into the engine, the system experiment with a solar simulator.
2. Performance of the engine.

2.1. Experimental Apparatus

2.1.1. Solar-Powered Engine

The schematic of the solar-powered engine is shown in Fig. 1. The main engine design parameters are listed in Table 1. A single-acting, gamma-configuration with a 2-stage parabolic dish concentrator. The power cylinders are directly connected to the cooler plate, to decrease the cold-space dead volume. The schematic diagrams of the experimental apparatus are shown in Figs.1. Since the engine speed is low, a rope-brake dynamometer can be used to measure the engine torque. A flywheel, 60 mm in diameter, is used as a brake drum. The

braking load is measured by the loading weight and the spring balance reading. A photo tachometer with ± 0.1 rpm accuracy is used to measure the engine speed.

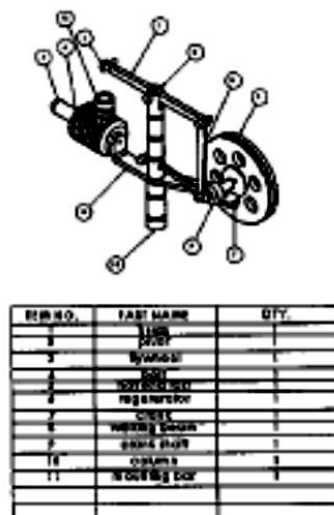


Fig. 1. Schematic diagram of the solar-powered engine.

Table 1. Solar-Powered Engine Parameters with a 2-stage PDC Specification.

Engine	Type	Size
Stirling engine configuration	Gamma	
Power piston:	bore x stroke (mm)	12.0 x 3.0
Swept volume (cc)		0.339
Displacer:	bore x stroke (mm)	9 x 6.2
Swept volume (cc)		0.394
Compression ratio		4.94
Phase angle		90°
Concentrator	2-stage PDC	
Dish aperture area (m ²)		1.9064
F ₁ F ₂ (mm)		672,632
A main dish (m ²)		2.216
A sub dish (m ²)		0.3096
CR		254.918
Calorimeter area (m ²)		0.01887
Solar Simulator	Tungsten lamps	24 x 1500 W ^a

The experimental set up consists of water calorimeter, Stirling engine coupled to the generator, solar simulator measuring equipments, and a 2-stage parabolic dish concentrator as shown in Fig.2 and 3. A solar simulator consisting of 24× 1 kW tungsten halogen lamp (Osram Haloline 64740L J R7s) is used to power the engine. The intensity on the absorber plate or displacer cylinder head is measured by a pyranometer. A data logger (GRAPHTEC midi logger GL-820 model) and a personal computer are used to collect data from the thermocouples and pyranometer.

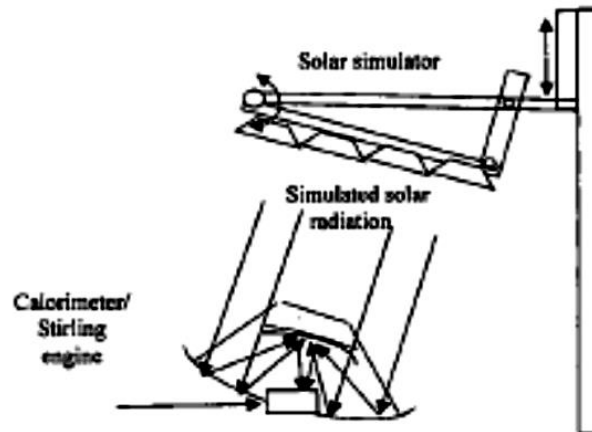


Fig. 2. A schematic diagram of the solar simulator.

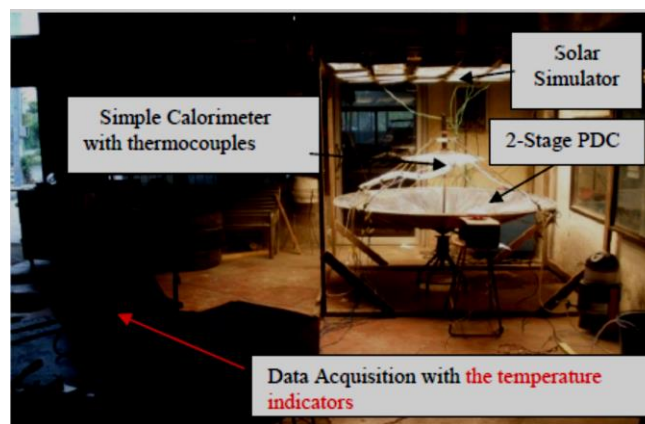


Fig. 3. A calorimeter experiment with solar simulator.

The cooling air is supplied by air passes through the fins. The cooler temperature, T_c , is measured by T-type thermocouples. K-type thermocouples are used to

measure the heater temperature of the engine, T_H . The temperature indicators are shown in Fig. 3. For engine experiment with simulated solar energy, the experimental facilities are as follows: Fig. 4 shows the apparatus for a concentrator experiment, to determine the actual heat input into the engine.



Fig. 4. The measuring instruments used in the experiment.

The apparatus consists of a 2-stage PDC, for primary stage 1.68 m in diameter and 0.672 m in focal length and the secondary stage 0.65 m in diameter and 0.632 m in focal length. The reflecting surface is placed with aluminum sheet lining and lighting reflector for the main dish and sub dish, respectively. The displacer cylinder is used as a flowing calorimeter (solar heat absorbed measuring instrument). The constant water flow is provided by the constant head of the water storage tank. The water flow rate is measured by using a beaker and a stopwatch. The water inlet and outlet temperature are measured by the T-type thermocouples. For the engine performance test, the generator is driven by an engine via a belt, as shown in Fig. 4. The small DC lamps are used as a load for the generator. The solar total intensity on the horizontal plane ($I_{t,h}$) is measured by a pyranometer (CM11 Kipp & Zonen) as shown in Fig. 5 and recorded in GRAPHTEC midi logger GL-820 model as shown in Fig. 6.



Fig. 5 Solar total intensity on the horizontal plane measured by a pyranometer.



Fig. 6 GRAPHTEC midi logger.

2.2. Experimental setup

The tests were performed at the Mechanical Technology workshop, Vallaya Alongkorn Rajabhat University, Pathum Thani, Thailand facility. The main objective of this research paper is to study the performance of a laboratory-scaled single-acting gamma-configuration Stirling engine using a 2-stage parabolic dish solar concentrator and a solar simulator, 24×1500 W halogen lamp as a heat source. The engine performances were investigated and compared between the experiment results and the analytical method using the Schmidt analysis.

2.2.1. Determine the actual heat input into the engine.

The concentrator experiment is carried out to determine the actual heat input into the engine. The solar concentrator reflects solar radiation twice for increasing the concentration ratio ($C_2 = 2C_1$) to the engine displacer head, which is placed at its focal point. The circulating water, from the water storage tank, flows through the calorimeter to absorb the heat collected from the solar collector. The water mass flow rate is measured. The inlet and outlet temperature is measured by K-type thermocouples. ($Q_{\text{engine}} = C_{2\text{-stage}} I_s A_{\text{engine receiver}}$)

2.2.2. The system experiment with a solar simulator.

For an engine experiment with a solar simulator, the solar simulator was placed upper a 2-stage parabolic dish solar concentrator, the lights were focused to the Displacer head, or absorber plate. The electrical supply switch was then turned on. The displacer head was heated up until it reached the operating temperature. The engine is formerly run, to reach steady state conditions. The engine was loaded by totaling a mass to the dynamometer. Then, the engine speed, spring balance, and all temperatures from thermocouples were recorded in Graphtec Midi logger (GLK20 model). Another loading weight was added to the dynamometer until the engine stopped.

The heat input into the displacer cylinder of the engine is expressed as [22],

$$q_{in} = m_w c_p (T_{w,out} - T_{w,in}) \quad (1)$$

where m_w = Water mass flow rate, kg/s
 c_p = Water specific heat at constant pressure, 4.186 kJ/kg K
 $T_{w,out}$ = Water outlet temperature, K
 $T_{w,in}$ = Water inlet temperature, K

For an absorber area A_H , with the intensity from a solar simulator of I_s , the concentrated heat on the absorber plate may be determined from [22]:

$$q_A = I_s A_H \quad (2)$$

Where I_s is the concentrated intensity on an absorber plate and is equal to the average intensity experimented, and A_H is the absorber area. The absorber diameter is 138 mm.

The useful heat input is the amount of heat absorbed by the water inside the displacer, and can be calculated from [22]:

$$q_{in} = m_w c_p dT/dt \quad (3)$$

Where m_w is water mass (0.5 kg), c_p is a specific heat at constant water pressure, (4168 J/kg K) [22], ΔT is the water temperature rise, Δt is the time taken during the water temperature rise.

2.2.3. Engine Performance Experiment

The performance of the engine experimental results are shown in Tables 2 and 3, in these tables, the engine torque is calculated from [20]:

$$M_t = (S - G) r \quad (4)$$

Where S is the spring balance reading (N), and G is the loading weight (N), and r is the brake drum radius (0.147 m). The actual shaft power can be calculated from [20]:

$$P_s = 2\pi M_t n \quad (5)$$

Where n is the engine speed (rpm). E_{st} is the brake thermal efficiency is [22],

$$E_{st} = P_s / q_s \quad (6)$$

Where q_s is the heat input from the heat source to the engine. Engine maximum performances were summarized in Table 4. These tables also show the Beale number, gained from this engine at different heat inputs. The Beale number is [22],

$$N_b = P_s / (p_m V_p f) \quad (7)$$

Where p_m is the engine mean pressure (bar), V_p is the power-piston swept volume (cc) and f is the engine frequency (Hz). For non-pressurized engines, $p_m = 1$ bar is used in calculations.

The heat source efficiency may be calculated from European Standard [23], as follows:

$$E_H = \frac{m_w c_p (T_{w2} - T_{w1})}{I_x A_s (t_2 - t_1)} \quad (8)$$

This applies when t_1 is the initial time at a water temperature of T_{w1} (s) and t_2 is the final time at a water temperature of T_{w2} (s).

The engine-generator power output experiment is carried out after the concentrator experiment. The objective of this experiment is to determine the power output from the engine-generator set. The load on the generator is measured by using a load bank, voltmeter and ammeter.

The generator power output is calculated from:

$$P_g = I V \quad (9)$$

Where P_g is the generator power output (W) obtained from the generator, I is current (Ampere), and V is electricity potential (Voltage) from the voltmeter. The total efficiency is [22],

$$E_t = P_g / q_s \quad (10)$$

Where q_s is the heat input into the concentrator. The heat input into the concentrator is calculated from [22]:

$$q_s = I_s A_s \quad (11)$$

Where A_D is the concentrator opening area, m^2 . Beale number equation which includes a term for mean engine pressure (Urieli and Berchowitz, 1984) was used to calculate the performance of Stirling engine as follow [22]:

$$P_{SE,Beale} = N_B \cdot P_{mean} \cdot V_{se} \cdot f \quad (12)$$

Where N_B is the Beale number, $mean$ is the mean engine pressure, V_{se} is the engine swept volume, and f is the engine operating frequency. Two plots and curve fits are required when using the Beale number Stirling engine component. The calculation of the Beale number as a function of input power to the Stirling engine is shown in Figure 12. These records used in Equation (12) to forecast what the output power to the Stirling engine when the receiver model predicts the input power to the engine during different ambient conditions.

3. Results and Discussion

3.1. Experiment with a Solar Simulator: Intensity Experiment

The purpose of this experiment is to find out the actual intensity on the absorber plate in different distances for engine performance calculation. The test at various distances from halogen lamp to absorber for determination of the actual intensity on the engine absorber has been carried out. The variations in average intensity on an absorber plate, at varying distances, are shown in Fig. 7. From this figure, it can be observed that the average intensity decreases when the distance from the lamp to the absorber increases.

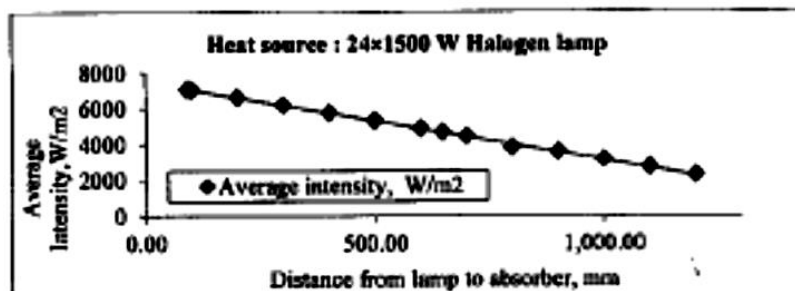


Fig. 7. Results from intensity experiment, using a simple calorimeter.

3.2. Experiment with a Solar Simulator: Heat Source Experiment

The actual heat input to the engine Q_{in} , from the solar simulator was experimentally determined, by using water to absorb the concentrated heat. The actual heat input to the engine and the heat source efficiency, results obtained from the heat of the solar simulator, and the variations in heat source efficiency with an average intensity of the absorber plate is shown in Fig. 8. It can be seen that the heat source efficiency decreases as the average intensity increases.

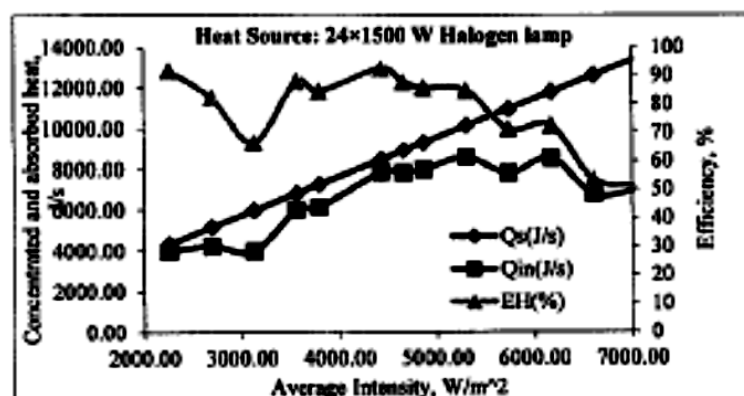


Fig. 8. Results from the heat source experiment.

3.3. Experiment with a Solar Simulator: Performance Experiment

The engine performances, on average, simulated intensities of 7094.00, 6176.06, 4663.52, 3564.80 and 2259.17 W/m² shown in Table 4 and Figs. 9. Figs. 10 show the deviations in the torque, brake thermal efficiency and, shaft power, at various actual heat inputs with engine speed. As expected, the more improved engine performance results from the higher heat input. An increase in the engine torque, shaft power and brake thermal efficiency, also depend on the heater temperature. The maximum shaft power and heater temperature, at various heat inputs, the average intensity is shown in Table 4. The shaft power and heater temperature increase as a function of the average intensity. Therefore, greater maximum shaft power will be obtained from higher average intensity.

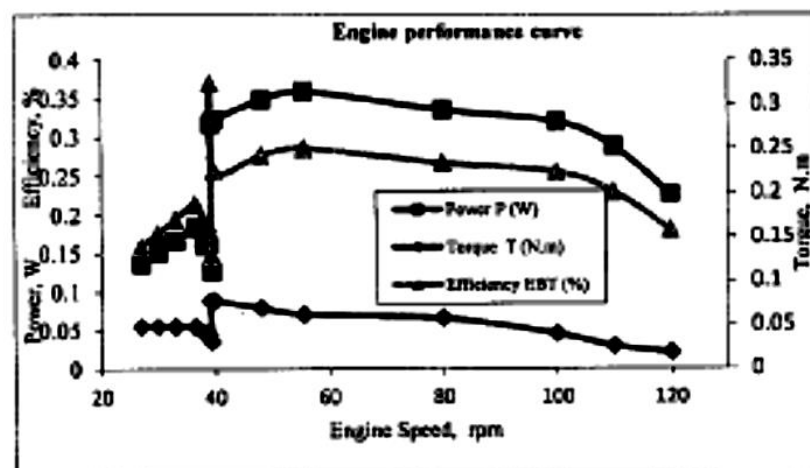
Table 4 shows the variations in brake thermal efficiency, heat source efficiency with the average intensity. The brake power is measured by adding weight to the engine gradually. It can be seen that brake thermal and overall efficiency increase, as the average intensity rises while the heat source efficiency diminishes as the average intensity increases.

The maximum shaft power, at the average intensity of 4663.52 W/m², is plotted against the engine speed, as shown in Fig. 9 and 10. In these figures, the shaft power increases as a function of the heater temperature. Therefore, greater maximum shaft power will be obtained from a higher heater temperature. Beale number, for estimating the power output of this tested Stirling engine is modeling as follow:

$$N_p = P / 0.000000339 T_{ad} f \quad (13)$$

Table 4. Thermal Performance of The Dish-Stirling Engine.

Distance d mm	I_s W/m^2	q_h J/s	q_m J/s	T_H $^{\circ}C$	T_C $^{\circ}C$	N rpm	P_d mm W	E_{gr} %	E_m %
90.00	7094.0	12603.7	1356.7	382.0	33.0	48.2	0.3	0.2	67.1
0	0	0	4	0	0	0	5	4	4
300.00	6176.0	10944.4	1040.1	325.0	32.0	39.9	0.3	0.2	70.7
6	0	0	7	0	0	0	2	3	5
648.00	4663.5	8890.53	602.30	314.3	29.2	35.6	0.2	0.2	76.7
2	0	0	6	8	4	3	3	3	0
900.00	3564.8	6795.93	339.19	200.3	33.0	34.9	0.0	0.0	81.0
0	0	0	6	0	0	5	7	7	2
1200.00	2259.1	4306.88	142.46	120.1	34.0	33.6	0.0	0.0	86.1
7	0	0	0	0	6	5	7	5	5

Fig. 9. Heat-up and start-up curves at an average intensity of 4663.52 W/m^2 .

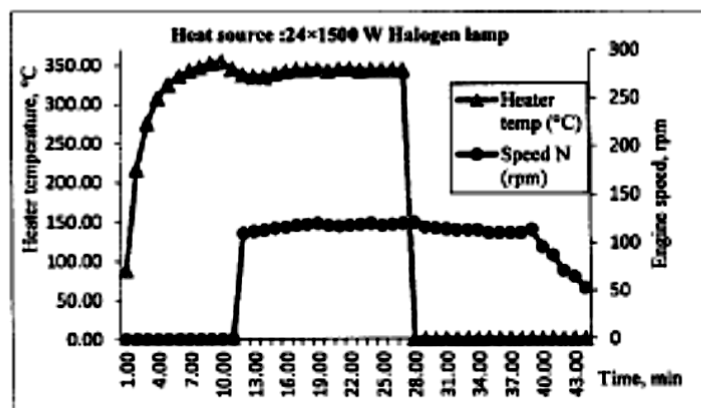


Fig. 10. Engine performance curves at an average intensity of 4663.52 W/m^2 .

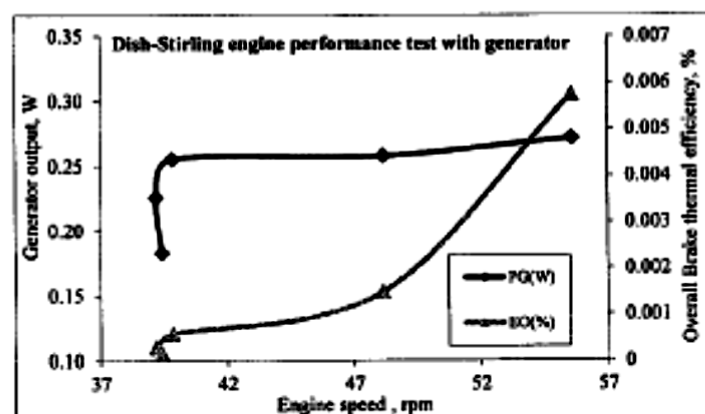


Fig. 11. Engine performance curves at an average intensity of 4663.52 W/m^2 .

Beale number, a parameter that characterizes the Stirling engine performance. From this experiment NB varies from 9.97 E-05 to 0.000487 as shown in table 5 below.

Table 5. Thermal Performance of Model-test Engine: 24 x 1500 W Halogen Lamp with 2-stage PDC.

T_H (°C)	P_{max} (W)	N (rpm)	f (Hz)	Beale No
382	0.35	48.2	0.803333	0.000487
325	0.32	39.9	0.665	0.000538
314.36	0.23	35.64	0.594	0.000433
200.36	0.05	34.9	0.581667	9.62E-05
120.1	0.05	33.66	0.561	9.97E-05

The Schmidt analysis for determining the indicated work per cycle of a Stirling engine has been done by using worksheet made by Jean-pierre Van Dormael [18] as shown in Fig.12. From the calculations indicate that the volume swept by the piston engine is 0.339 cm^3 . The maximum volume V_{max} is 0.839 cm^3 , hot temperature T_H is 382 °C , the calculated power is 0.35 W , the average pressure is $1,258,143 \text{ pascal}$, maximum pressure is $2,257,652 \text{ pascal}$, and the average temperature in the regenerator T_m is 457.92 K , respectively. The Schmidt formula for determining the indicated cyclic work of the gamma-configuration Stirling engine:

$$W_{Schmidt} = \pi(f - r) p_m V_D \frac{4p_m \alpha \pi}{p_m + \sqrt{p_m^2 - k^2}} \quad (14)$$

The results from the experiment showed that when heater temperature is 382 °C , the engine maximum power is 0.35 W at 48.2 rpm , which equivalent to the calculation results from the Schmidt analysis.

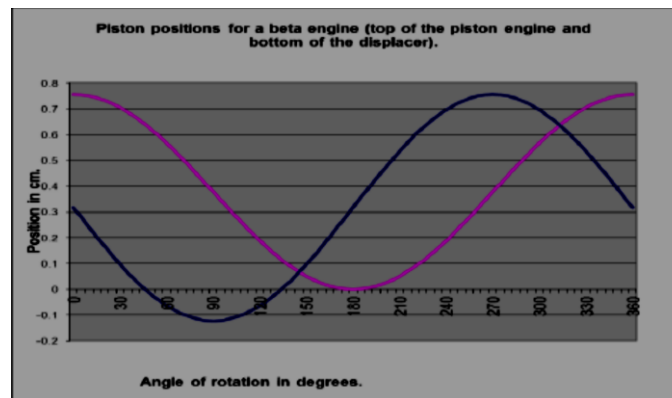


Fig.12. Schmidt analysis of the Stirling cycle using worksheet, made by Jean-pierre Van Dormael [24]

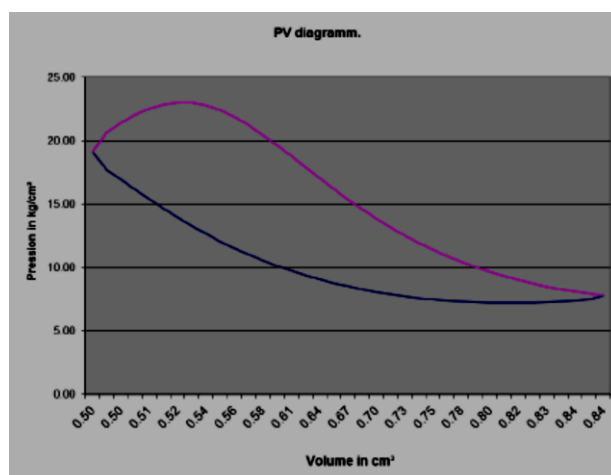


Fig.13. PV diagram calculation using worksheet made by Jean-pierre Van Dormael [24].

By having instantaneous pressure and volume it is possible to calculate the output energy or work done by the engine. If instantaneous measured pressure and volume during a cycle be improved on a XY coordinate, where X is the volume of the engine and Y is the pressure, the result will be an unequal polygon (Fig. 13) which the area is the output energy of cycle of Stirling engine. Power can be obtained by multiplying energy of a cycle by the frequency of engine, at the end dividing it by input heating power provides the efficiency of the engine.

4. Conclusions

In this work, the performance of a laboratory-scaled single-acting gamma-configuration Stirling engine, by using a solar simulator made of twenty-four units of 1500 W tungsten lamp with a 2-stage parabolic dish concentrator is presented. The experimental results show that the engine performance rises while accumulative simulated solar intensity. The torque, shaft power, brake thermal efficiency, speed, and heater temperature also increase with increasing simulated intensity. The maximum engine torque, shaft power, and brake thermal efficiency rise with the rising the heater temperature. The Beale number of this engine increases with increasing heater temperature. At the focal point simulated solar intensity of 8890.53 W/m^2 , when the heat input into the engine was 602.3 J/s , and the heat source efficiency of 6.775% . The engine created a maximum torque of 0.0774 N m at 39.85 RPM , a maximum shaft power of 0.359 W at 55.6 rpm , a generator power of 0.27 W and the maximum brake thermal efficiency of 0.2503% , approximately. The overall efficiency of the system is 0.00574% . The hot-space temperature is 655 K , the cold-space temperature is 306 K , and the Beale

number of 0.000487. The analytical method using the Schmidt analysis in the calculation of the engine power, showing a good agreement with the results obtained from the experiment which was 0.35 W. The engine power compared to experimental measurements gives good results and permits to study the detailed engine parameter design. The engine performance can be enhanced by generating more heat source efficiency and the precision of the engine parts production. If a better heat transfer fluid, e.g. hydrogen or helium is used, the engine performance could be additional improved.

Acknowledgements

The authors would like to acknowledge Srinakharinwirot University colleagues for the useful advices and gratefully thank the Department of Energy Policy and Planning Organization Thailand for providing financial support for this research work.

References

1. Palavras, J.; and Bakos, G.C. (2006). Development of a Low-Cost Dish Solar Concentrator and its Application in Zeolite Desorption. *Renewable Energy*, 15(31), 2422–2431.
2. Kalogirou, S.; Eleftheriou, P.; Lloyd, S.; and Ward, J. (1994). Low Cost High Accuracy Parabolic Troughs Construction and Evaluation. *Renewable Energy*, N°1-4(5), 384–386.
3. Alvarado, D.; Birade, M.; and Carrizo et M. Duboseq, B. (2003). Couplage d'un Concentrateur Solaire et d'un Moteur Stirling.
4. Pons, R.L.; and Fox, R.J. (1976). A solar/Stirling total energy system. *Sharing the Sun, Solar Technology in the Seventies Conf.*, Winnipeg, 77-91.
5. Holland, M.B. (1979). The Stirling engine- power plant of the future? *Chartered Mechanical Engineer*, 60-63.
6. Leibowitz, L.; and Hanseth, E. (1982). Solar thermal technology-outlook the 80's. *Mechanical Engineering*, 104, 30-35.
7. Marriott, A.T. (1983). Solar electric power from parabolic dishes. *Proc. Solar World Cong.*, Perth, 1438-1443.
8. Selcuk, M.K.; and Bowyer, J.M. (1985). Dish Stirling module performance analysis as evaluated from tests of various TBC concentrator / USAB engine configurations as the parabolic dish test site. *Ext. Abst. Intersol '85*, Montreal, 313.
9. McClaun, M.A. (1987). The LaJeta energy large scale innovative solar concentrator study of wind loading effects. *Abst. I.S.E.S. Solar World Cong.*, Hamburg, 2, 18, 15.
10. Schlaich, J. (1987) Solar power plants with a membrane concave mirror-50 kW. *Abst. I.S.E.S. Solar World Cong.*, Hamburg, 2, 18, 16.
11. Al-Rebaian, A.; and Hansen, J. (1987). 50 kW Solar Concentrators With Stirling Generators- Results of the First Six Months of Operation in Saudi Arabia. *Abst. I.S.E.S. Solar World Cong.*, Hamburg, 2, 13, 15.

12. Ahmed, A., Al-Agami, M. and; Al-Garni, M. (1990). Solar Powered Stirling Engine with a Single Membrane Dish Concentrator. *Proceedings of the 1st World Renewable energy Congress, Energy and The Environment*, Reading, U.K., 2, 1202-1207.
13. Childs, W.D., Dabiri, A.E., Al-Hinai, H.A. and; Abdullah, H.A. (1999). VARI-RO solar-powered desalting technology. *Desalination*, 125, 155-166.
14. Audy, Ch., Fischer, M. and; Messerschmid, E.W. (1999). Nonsteady behavior of solar dynamic power systems with Stirling cycle for space stations. *Aerospace Science and Technology*, 1, 49-58.
15. V. Siva Reddy, S. C. Kaushik and; S. K. Tyagi. (2012). Exergetic analysis and performance evaluation of parabolic dish Stirling engine solar power plant. DOI: 10.1002/er.2926
16. Mohammad H. Ahmadi, Hoseyn Sayyaadi and; Hadi Hosseinzadeh (2014). Optimization of Output Power and Thermal Efficiency of Solar-Dish Stirling Engine Using Finite Time Thermodynamic Analysis. *International Journal of Energy Research*, 11(37), 1287-1301.
17. Li, Y.; Choi, S.S.; and Yang, C. (2014). Dish-Stirling Solar Power Plants: Modeling, Analysis, and Control of Receiver Temperature. *Sustainable Energy, IEEE Transactions*, 2(5), 398 – 407.
18. R.W. Dyson, S.D. Wilson and; C.T. Roy. (2004). Review of Computational Stirling Analysis Methods, NASA/TM—2004-213300, AIAA-2004-5582.
19. Kongtragool, B.; and Wongwises S. (2007). Performance of a twin power piston low temperature differential Stirling engine powered by a solar simulator. *Solar Energy*, 8, 884-895.
20. Kongtragool, B.; and Wongwises, S. (2007). A review of solar powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7, 131-54.
21. Ouederni, A.R. El.; Ben Salah, M.; Askri, F.; Ben Nasrallah, M.; and Aloui, F. (2009). Experimental study of a parabolic solar concentrator. *Revue des Energies Renouvelables*, N° 3(12), 395 – 404.
22. Kongtragool, B. (2007). *A Performance Evaluation of a Solar-Powered Low Temperature Differential Stirling Engine*. Ph.D. Thesis. King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand.
23. European Standard (1979). *Domestic cooking appliances burning gas*, EN 30 Edition 2, January.
24. Jean-pierre Van Dormael. (2014). Retrieved October 20, 2014, from http://www.moteurstirling.com/pdf/calcul_uk.xls.



รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

A_m	=	พื้นที่ช่องรับรังสีของจานหลัก	m^2
A_s	=	พื้นที่ช่องรับรังสีของจานรอง	m^2
A_H	=	พื้นที่ของตัวดูดซับรังสี	m^2
A_r	=	พื้นที่ช่องรับรังสีของของตัวดูดซับรังสี	m^2
$A_{2-stage}$	=	พื้นที่ช่องรับรังสีของของตัวรวมรังสี 2 ขั้นตอน	m^2
a	=	ความยาวของแกนหลัก	m
b	=	ความยาวของแกนรอง	m
C_p	=	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ	$J/kg.K$
$C_{1-stage}$	=	อัตราส่วนการรวมรังสีของจานหลัก	-
$C_{2-stage}$	=	อัตราส่วนการรวมรังสีของจานรอง	-
D_m	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของจานหลัก	m
D_s	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของจานรอง	m
d_H	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวดูดซับรังสี	m
E	=	ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า	V
E_{con}	=	ประสิทธิภาพของตัวรวมรังสี	%
E_{BT}	=	ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก	%
E_H	=	ประสิทธิภาพของแหล่งความร้อน	%
E_O	=	ประสิทธิภาพรวม	%
E_{OBT}	=	ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกรวม	%
F_c	=	ความยาวโฟกัสระหว่างจานหลักและจานรอง	m
F_e	=	ความยาวโฟกัสสมมูล	m
F_m	=	ความยาวโฟกัสของจานหลัก	m
f	=	ค่าความถี่ของเครื่องยนต์	HZ
f_2	=	ความยาวโฟกัสของจานรอง	m
h	=	มุมเอียงของดวงอาทิตย์	$^{\circ}$
h	=	ความลึกของจานพาราโบลา	m
I	=	กระแสไฟฟ้า	A
$I_{b,n}$	=	ค่าความเข้มรังสีตรงของดวงอาทิตย์	W/m^2
$I_{d,h}$	=	ค่าความเข้มรังสีกระจายของดวงอาทิตย์	W/m^2
$I_{t,h}$	=	ค่าความเข้มรังสีรวมของดวงอาทิตย์	W/m^2

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์

I_s	=	ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์จำลอง	W/m^2
M_t	=	แรงบิดของเครื่องยนต์	N.m
m_w	=	มวลของน้ำที่ดูดซับความร้อน	kg
$\dot{m}$	=	อัตราการไหลของน้ำ	kg/s
N	=	ความเร็วรอบของเครื่องยนต์	rpm
N_B	=	ตัวเลขบีล	W/bar ccHz
P_B	=	กำลังเพลาจริงของเครื่องยนต์	W
PDC	=	ตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลา	-
2-PDC	=	ตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลาสองชั้นตอน	-
P_m	=	ความดันเฉลี่ยของเครื่องยนต์	bar
P_g	=	กำลังงานส่งออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	W
$P_{SE,Beale}$	=	กำลังงานของเครื่องยนต์ที่คำนวณจากตัวเลขบีล	W
$Q_{absorbed}$	=	ค่าพลังงานความร้อนดูดซับ	W
Q_{con}	=	ค่าพลังงานความร้อนทั้งหมดที่เข้าสู่ตัวรวมรังสี	W
Q_{in}	=	ค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่เข้าสู่ตัวรวมรังสี	W
q_A	=	ค่าความร้อนจากการรวมรังสีลงบนแผ่นดูดซับ	W
q_{in}	=	ค่าความร้อนจากการรวมรังสีที่น้ำดูดซับ	W
q_s	=	ค่าความร้อนป้อนเข้าเครื่องยนต์จากแหล่งกำเนิดความร้อน	W
R_M	=	ค่าการสะท้อนของผิวบนจานหลัก	0.9
R_s	=	ค่าการสะท้อนของผิวบนจานรอง	0.95
r	=	ระยะรัศมีของจานหลัก	m
T_{air}	=	อุณหภูมิของอากาศ	°C
T_C	=	อุณหภูมิด้านเย็นของเครื่องยนต์	K
T_H	=	อุณหภูมิที่ฮีตเตอร์ของเครื่องยนต์	K
$T_{w,in}$	=	อุณหภูมิน้ำเข้าตัวดูดซับรังสี	K
$T_{w,out}$	=	อุณหภูมิออกตัวดูดซับรังสี	K
t_1	=	เวลาเริ่มต้นของอุณหภูมิน้ำ	sec
t_2	=	เวลาสิ้นสุดของอุณหภูมิน้ำ	sec
V_{max}	=	ปริมาตรสูงสุดของเครื่องยนต์	cc

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์

V_p	=	ปริมาตรกวาดของเครื่องยนต์	cc
V_{sw}	=	ปริมาตรกวาดของเครื่องยนต์	cc
W	=	น้ำหนักของก้อนมวล	N
X	=	ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ 1 ดวง	1000 W/m ²
X_m	=	พิกัดบนจานหลัก	mm
X_s	=	พิกัดบนจานรอง	mm
y_m	=	พิกัด y บนจานหลัก	mm
y_s	=	พิกัด y บนจานรอง	mm

ตัวอักษรกรีก

ϕ_v	=	มุมที่ขอบของจานหลัก	°
ϕ_r	=	มุมที่ขอบของจานรอง	°
θ_z	=	มุมอะซิมุทของดวงอาทิตย์	°
η_{gen}	=	ประสิทธิภาพของแหล่งความร้อน	%
η_{gross}	=	ประสิทธิภาพของแหล่งความร้อน	%
η_o	=	ประสิทธิภาพของแหล่งความร้อน	%
$\rho_{primary}$	=	ค่าการสะท้อนรังสีของจานหลัก	0.8
$\rho_{secondary}$	=	ค่าการสะท้อนรังสีของจานรอง	0.95
δ	=	มุมเอียงของดวงอาทิตย์	rad
ω	=	มุมชั่วโมงของดวงอาทิตย์	rad
φ	=	มุมความสูงของดวงอาทิตย์	rad



ภาคผนวก ค
ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างการคำนวณ

1. การออกแบบตัวรวมรังสีแบบจานพาราโบลาสองขั้นตอน 2-Stage Concentrator

Calculation

1.1 พลังงานที่เข้าจานพาราโบลา 2 ขั้นตอน

พลังงานที่เข้ามาทั้งหมด Q_{in} สามารถคำนวณได้จากการวัดค่ารังสีตรง $I_{b,n}$ พื้นที่ของจานพาราโบลาสองขั้นตอน และค่าการสะท้อนของผิววัสดุที่ใส่ปลงบนจานในขั้นตอนที่หนึ่งและขั้นตอนที่สอง

$$Q_{in} = \rho_{main} \rho_{sub} I_{b,n} A_{2-stage}$$

$$Q_{in} = \rho_{main} \times \rho_{sub} \times I_{b,n} \times (\pi r_m^2 - \pi r_s^2)$$

$$Q_{in} = 0.80 \times 0.95 \times 1000 \times (2.215 - 0.3096) \text{ m}^2$$

$$Q_{in} = 1,448.104 \text{ W}$$

1.2 คำนวณหาค่ามุมที่ขอบของจานหลักและอัตราส่วนความยาวโฟกัสต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง

$$\frac{f}{D} = \frac{1}{4 \tan(\phi_{rim/2})}$$

$$f = 0.741 \text{ m}, d = 1.68 \text{ m} \quad f/d = 0.4415 \text{ m} \quad \phi_{rim} = 60^\circ$$

1.2 ค่ารังสีตรงที่ตกกระทบบนระนาบสามารถคำนวณได้จาก

$$I_{b,n} = (I_{t,h} - I_{d,h}) / \cos \theta_z$$

เมื่อ $I_{t,h}$ = ค่ารังสีรวมบนพื้นระดับมีหน่วยเป็น W/m^2 $I_{d,h}$ = ค่ารังสีกระจายบนพื้นระดับ มีหน่วยเป็น W/m^2 θ_z = ค่ามุมอะซิมุทของดวงอาทิตย์ในหน่วยองศา

วันที่ 12/05/2557

$$\text{เวลา } 13.30 \text{ น. } \theta_z = 17^\circ \quad I_{t,h} = 972 \text{ W/m}^2 \quad I_{d,h} = 169 \text{ W/m}^2$$

$$I_{b,n} = (972 - 169) / \cos 17^\circ = 839.74 \text{ W/m}^2$$

ข้อมูลของตัวรวมรังสีแบบ 2 ขั้นตอน เพื่อใช้ประกอบการคำนวณ

F_1	672	mm
F_2	632	mm
d_{abs}	138	mm
A_{abs}	0.014957	m^2
C_p	4186	J/kg K
D_{main}	1.68	m

$A_{\text{main dish}}$	2.216	m^2
$A_{\text{sub dish}}$	0.3096	m^2
$A_{\text{2-stage}}$	1.9064	m^2
$C_{\text{1st.}}$	127.459	
$C_{\text{2st.}}$	254.918	

1.3 ค่าพลังงานที่ดูดซับ Q_{absorbed} สามารถคำนวณได้จากการวัดผลต่างของอุณหภูมิของน้ำที่เข้าและออกจากแคลอริมิเตอร์ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (4186 J/kg.K) และอัตราการไหล $\dot{m}_{\text{water}}$ ดังสมการ

$$Q_{\text{absorbed}} = \dot{m}_{\text{water}} c_p (T_{\text{out}} - T_{\text{in}})$$

วันที่ 12/05/2557 เวลา 13.30 น.

$$Q_{\text{absorbed}} = 0.00133 \times 4186 (89 - 36)$$

$$Q_{\text{absorbed}} = 295.13 \text{ W}$$

1.4 ประสิทธิภาพของตัวรวมรังสีอาทิตย์ (E_{con}) คำนวณได้จากสมการ

$$E_{\text{con}} = \frac{\dot{m}_{\text{water}} C_p (T_{\text{out}} - T_{\text{in}})}{I_b A_a}$$

เมื่อ A_a คือพื้นที่ของช่องรับรังสีของจานพาราโบลา (m^2)

วันที่ 12/05/2557 เวลา 13.30 น.

$$E_{\text{con}} = \frac{295.13}{839.74 \times 1.906} = 24.26 \%$$

ประสิทธิภาพของตัวรวมรังสีสามารถคำนวณได้จาก ค่าความร้อนใช้ประโยชน์ที่ป้อนเข้าแคลอริมิเตอร์และพลังงานรวมทั้งหมดที่เข้าสู่ตัวรวมรังสีดังสมการ

$$E_{\text{con}} = q_{\text{in}} / Q_{\text{con}}$$

$$= q_{\text{in}} / (R_m \times R_s \times I_{b,n} \times A_{\text{2-stage}})$$

1.5 ประสิทธิภาพเชิงแสงของจานพาราโบลาแบบสองชั้นตอนนี้สามารถคำนวณได้จากผลคูณของค่าการสะท้อนรังสีของผิวสะท้อนรังสีของแต่ละชั้นตอน ซึ่งค่าการสะท้อนรังสีของแผ่นอลูมิเนียมพอยล์ (ρ_{main}) มีค่า 0.8 และค่าการสะท้อนรังสีของแผ่นโคมไฟสะท้อนแสง (ρ_{sub}) มีค่า 0.95 ดังสมการ

$$\eta_o = \rho_{\text{main}} \times \rho_{\text{sub}}$$

$$= 0.90 \times 0.95 = 0.855$$

1.6 คำนวณค่าอัตราส่วนการรวมรังสีเชิงเรขาคณิตได้จากพื้นที่ช่องรับสีของจานต่อพื้นที่ของตัวดูดซับพลังงานจะได้อัตราส่วนการรวมรังสีของจานพาราโบลาขั้นตอนที่ 1 เป็นดังสมการ

$$C_{1\text{-stage PDC}} = A_{\text{main dish}} / A_{\text{reciever}} = 2.215 / 0.014957$$

$$C_{1\text{-stage PDC}} = 148.091$$

$C_{1\text{-stage PDC}}$ เมื่อหักพื้นที่ของขั้นตอนที่ 2

$$C_{1\text{-stage PDC}} = A_{\text{main dish}} / A_{\text{reciever}} = 1.9064 / 0.014957 = 127.458$$

สำหรับตัวรวมรังสีรูปทรงพาราโบลาอยู่ขั้นตอนที่สองค่าอัตราส่วนการรวมรังสีคำนวณได้โดยวิธีเดียวกันค่าอัตราส่วนการรวมรังสีมีค่าเป็น $C_{\text{secondary}} = 2x$ โดยที่อัตราส่วนการรวมรังสีของระบบเป็นผลจากอัตราส่วนการรวมรังสีของขั้นตอนที่หนึ่งและขั้นตอนที่สองสามารถคำนวณได้เป็น

$$C_{2\text{-stage PDC}} = 254.918X$$

2. ความร้อนที่รังสีอาทิตย์จำลองให้แก่แคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่อง

จะถ่ายเทให้กับน้ำที่ไหลผ่านแคลอริมิเตอร์ทั้งหมดความร้อน(มีหน่วยเป็น J/s) ที่น้ำดูดซับไว้ได้จะคำนวณได้จากสมการ

$$q_{\text{abs}} = m_w c_{p,w} (T_{w,\text{out}} - T_{w,\text{in}})$$

เมื่อ m_w คืออัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านแคลอริมิเตอร์ (kg/s) $c_{p,w}$ คือค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (4187 J/kg K) $T_{w,\text{in}}$ คืออุณหภูมิของน้ำตรงจุดที่เข้าสู่แคลอริมิเตอร์ (°C) และ $T_{w,\text{out}}$ คืออุณหภูมิของน้ำตรงจุดที่ออกจากแคลอริมิเตอร์ (°C) ค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์จำลอง (มีหน่วยเป็น W/m^2) จะคำนวณได้จากสมการ

$$I = \frac{q_{\text{abs}}}{A_{\text{abs}}}$$

$$I = \frac{295.13}{A_{\text{abs}}}$$

$$A_{\text{abs}} = 0.014957 \text{ m}^2$$

$$I = \frac{295.13}{0.014957} = 19,731.9 \text{ W/m}^2$$

เมื่อ A_{abs} คือพื้นที่รับรังสีของแคลอริมิเตอร์ (m^2) I คือค่าความเข้มของรังสี (มีหน่วยเป็น W/m^2) จะสามารถคำนวณได้จากจำนวน mV ที่อ่านได้จาก Pyranometer คือ

$$I = \frac{1000(\text{mV})}{27.66 \mu\text{V}/(\frac{\text{W}}{\text{m}^2})}$$

เมื่อ $27.66 \mu\text{V}/(\text{W/m}^2)$ คือค่าคงที่ในการสอบเทียบของ Pyranometer

3. การประเมินสมรรถนะของเครื่องยนต์

3.1 ผลการคำนวณหาสมรรถนะของเครื่องยนต์จากการทดลอง ค่าแรงบิดของเครื่องยนต์คำนวณได้จากสมการ

$$M_t = (S-G) r$$

$$M_t = (0.0738-0.07) \times 9.81 \times 0.923 = 0.0344 \text{ N.m}$$

เมื่อ S ค่าแรงที่อ่านได้จากตาชั่งสปริง (N) และ G คือน้ำหนักที่ถ่วง (N) และ r คือรัศมีของวงล้อเบรค

กำลังเพลจริงคำนวณได้จาก

$$P_B = 2\pi M_t n$$

เมื่อ n คือความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (rps)

ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 55.6 rpm

$$P_B = 2\pi \times 0.06171 \times 55.6 = 0.35932 \text{ W}$$

3.2 ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค E_{BT} คำนวณได้จากสมการ

$$E_{BT} = P_B/q_s$$

เมื่อ q_s คือค่าความร้อนจากแหล่งกำเนิดที่ป้อนเข้าเครื่องยนต์

$$E_{BT} = 0.35932 / q_s = 0.35932 / 1.435$$

$$E_{BT} = 0.2503 \%$$

3.3 ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

$$\eta_{\text{Stirling}} = 0.4 \left(1 - \left(\frac{T_c}{T_r} \right) \right)$$

$$\eta_{\text{Stirling}} = 0.4 \left(1 - \left(\frac{305.15}{655.15} \right) \right) = 21.4 \%$$

ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงตาม Bancha Kongtragool

$$\eta_{\text{Stirling}} = [\alpha p - K_1 \alpha p (T_r^4 - 9.2845 \times 10^{-6} T_a^6)] - K_2 \alpha p (T_r - T_a) \left(1 - \left(\frac{T_c}{T_r} \right)^{0.5} \right)$$

3.4 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และประสิทธิภาพ

กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้โดยใช้เครื่องยนต์ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ภาระของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ใช้ load bank โวลท์มิเตอร์ และ แอมมิเตอร์เป็นเครื่องมือวัด กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้คำนวณได้จาก

$$P_G = I E$$

เมื่อ I (A) และ E (V) คือค่าที่อ่านได้จากมิเตอร์

ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 55.6 rpm

$$P_G = 0.230 \times 1.180 = 0.271 \text{ W}$$

ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคำนวณได้จาก

ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 55.6 rpm

$$\eta_{\text{gen}} = P_G / P_B$$

$$\eta_{\text{gen}} = 0.271 / 0.359 = 0.75531 = 75.531 \%$$

ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานจากแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\eta_{\text{gross}} = E_{\text{BT}} E_{\text{con}} \eta_{\text{gen}}$$

ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 55.6 rpm

$$\eta_{\text{gross}} = 0.250 \times 14.910 \times 75.531 = 2.819 \%$$

4. การสูญเสียความร้อน

1. การพาความร้อน

$$Q_{\text{conv}} = h_c \times A_r \times (T_r - T_a)$$

กรณีลมสงบ $V_{\text{wind}} < 10 \text{ m/s}$, $h = 4 \text{ W/m}^2\text{K}$

$$Q_{\text{conv}} = 4 \times A_r \times (T_r - T_a)$$

การสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

$$Q_{\text{conv}} = 4 \times (\pi \times 0.02 \times 0.1) + \pi / 4 \times (0.02)^2 \times (200 - 34) = 0.21488 \text{ W}$$

การสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนของแคลอริมิเตอร์บริเวณผิวด้านรับความร้อนที่ไม่ได้หุ้มฉนวน

$$Q_{\text{conv}} = 4 \times 0.014957 \times (200 - 34) = 9.93 \text{ W}$$

2. การแผ่รังสีความร้อน

$$Q_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma A_r (T_r^4 - T_a^4)$$

การสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

$$Q_{\text{rad}} = 1 \times 5.667 \times 10^{-8} \times (\pi \times 0.02 \times 0.1) + \pi/4 \times (0.02)^2 \times (200^4 - 34^4) = 0.597 \text{ W}$$

การสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนของแคลอริมิเตอร์บริเวณผิวด้านรับความร้อนที่ไม่ได้หุ้มฉนวน

$$Q_{\text{rad}} = 0.87 \times 5.667 \times 10^{-8} \times 0.014957 \times (200^4 - 34^4) = 1.18 \text{ W}$$

3. การสูญเสียความร้อนรวม $Q_{\text{loss, total}}$

การสูญเสียความร้อนรวมของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

$$Q_{\text{loss, total Stirling engine}} = 0.21488 \text{ W} + 0.597 \text{ W} = 0.8118 \text{ W}$$

คิดเป็น = $0.8118 \text{ W} / 1448.104 \text{ W} = 0.056 \%$ ของค่าความร้อนที่เข้าสู่งานทั้งหมด

การสูญเสียความร้อนรวมของแคลอริมิเตอร์บริเวณผิวด้านรับความร้อนที่ไม่ได้หุ้มฉนวน

$$Q_{\text{loss, total calorimeter}} = 9.93 \text{ W} + 1.18 \text{ W} = 11.11 \text{ W}$$

คิดเป็น = $0.8118 \text{ W} / 1448.104 \text{ W} = 0.767 \%$ ของค่าความร้อนที่เข้าสู่งานทั้งหมด

4. ความร้อนที่ใช้ประโยชน์ได้ของงานพาราโบลา 2 ขั้นตอนกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

$$Q_u = Q_{\text{in}} - Q_{\text{loss}} = 1,448.104 - 0.8118 = 1447.29 \text{ W}$$

5. ความร้อนที่ใช้ประโยชน์ได้ของงานพาราโบลา 2 ขั้นตอนกับแคลอริมิเตอร์

$$Q_u = Q_{\text{in}} - Q_{\text{loss}} = 1,448.104 - 11.11 = 1436.99 \text{ W}$$

5. การคำนวณค่าความไม่แน่นอน (Experimental Uncertainty)

$$E_c = f(I_{b,n}), \quad E_c = 35.462 - 1.33 \times 10^{-2} I_{b,n}$$

$$\sigma_{E_c} = f(\sigma_{I_{b,n}}), \quad \sigma_{E_c} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial E_c}{\partial I_{b,n}} \cdot \sigma_{I_{b,n}} \right)^2} \quad \text{ที่ } \sigma_{I_{b,n}} = 100 \text{ W/m}^2$$

$$\frac{\partial E_c}{\partial I_{b,n}} = -1.33 \times 10^{-2} \text{ แทนค่า } \sigma_{E_c} = \pm \sqrt{((-1.33 \times 10^{-2}) \times 100)^2} = \pm 1.33$$

ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนจากการทดลองเพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพของงานพาราโบลาแบบ 2

ขั้นตอนที่ความเข้มรังสี 850 W/m^2 คือ $E_c = 35.462 - 1.33 \times 10^{-2} (850 \text{ W/m}^2) = 24.157 \pm 1.33 \%$

การคำนวณหาขนาดและกำลังของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

The data to be included are red on a green background (column "values to be seized, lines 7 to 19). The other data are calculated.

The useful results appear lines 30 to 35

The data to seize are expressed as usual (cc, degrees Celsius, kg / cm³). The calculations are done in International System (meter, newton, joule, watt, second, pascal).

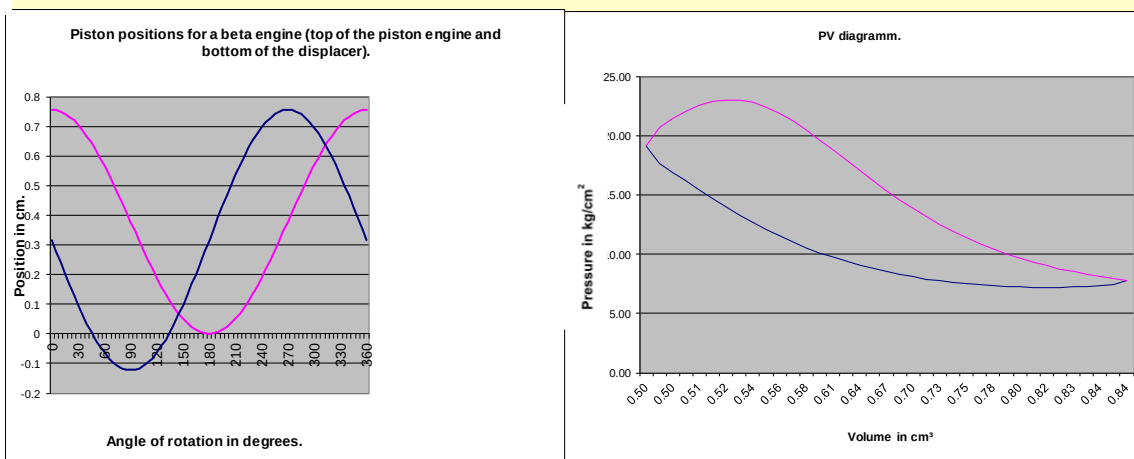
Initial data					
PARAMETERS	VALUES to be seized	Usual UNITS	COMMENTS	TRANSPPOSED VALUES	S.I. UNITS
Initial data					
Engine type=?	1		(0=alpha, 1=beta or gamma)		
Cylinder capacity Vm= ?	0.339	cm ³	(volume swept by the piston engine)	0.000000339	m ³
Displacement volume Vd= ?	0.394	cm ³	(volume swept by the displacer or the second piston of an alpha engine)	0.000000394	m ³
Cold dead volume Vdeadcold = ?	0	cm ³	This volume contains the cooler.	0	m ³
Hot dead volume Vdeadhot= ?	0	cm ³	This volume contains the heater.	0	m ³
Common volume swept by the two pistons Vcom= ?	0.394	cm ³	Vcom common is the volume swept by the two pistons in the case of a beta engine, in deduction from the cold dead volume.	0.000000394	m ³
Regenerator volume Vr=	0.5	cm ³		0.0000005	m ³
Hot temperature Th=	382	°C		655	K
Cold temperature Tc=	32	°C		305	K
Température difference of the régénérateur dT=	12	°C	That is the difference in the average temperature of the regenerator compared to the theoretical average temperature between the outward and return of the gas	12	K
Phase angle difference for the displacer psi=	90	degrés		1.570796327	radian
Internal pressure before running Po=	4.99	kg/cm ²	This is the filling pressure before running.	489421.4781	pascal
Rotation speed=	100	rpm		1.666666667	r/sec (Hz)

Calculation:					
PARAMETERS	CALCULATED VALUES	Usual units	COMMENTS	CALCULATED VALUES	S.I. units
Volume maximum Vmax=	0.839	cm ³		0.000000839	m ³
Po*Vmax/To=	0.001401449		(initial conditions during filling at room temperature: To=20°C=293K)		
Arithmetic average=			= Th + Tc / 2	480	K
Average temperature in the regenerator Tm=			= Th - Tc / Log Néperien Th / Tc	457.92	K
Vr/Tm=	1.09189E-09		= Th + Tc / 2		

PRACTICAL RESULTS:

Alpha engine

Calculated power:	0.35	watt	0.00	cv	If square cylinder (bore=stroke).	
Average pressure:	1,258,143	pascal	12.83	kg/cm ²	Diam. Pist. Engine.=	0.76 cm
Max pressure:	2,257,652	pascal	23.01	kg/cm ²	Area of piston=	0.45 cm ²
Min pressure:	705,762	pascal	7.19	kg/cm ²	Diam. Pist. displacer.=	0.79 cm
					Area=	0.50 cm ²
						5E-05 m ²



ตารางแสดงผลการคำนวณหา P-V diagram ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

P for graph. from 0 to 180	P for graph. from 180 to 360	V for graph. V (m3)	V for graph. V (cm ³)	dV	P*dV	T en K	Position Piston engine	Position Displacer
19.13	19.13	0.0000005	0.5	0	0	670	0.75574	0.316561857
20.68	17.67	5.0064E-07	0.50	6.45E-10	0.0012594	725	0.7543	0.278285335
21.41	16.92	5.0258E-07	0.50	1.93E-09	0.003984	753	0.75	0.240300119
22.03	16.15	5.0578E-07	0.51	3.2E-09	0.0068187	780	0.74286	0.202895302
22.52	15.40	5.1022E-07	0.51	4.447E-09	0.0097166	804	0.73295	0.166355556
22.85	14.67	5.1588E-07	0.52	5.659E-09	0.0125945	825	0.72033	0.130958971
23.01	13.96	5.2271E-07	0.52	6.828E-09	0.0153617	842	0.70511	0.096974935
22.99	13.29	5.3065E-07	0.53	7.945E-09	0.0179277	854	0.6874	0.064662089
22.78	12.66	5.3966E-07	0.54	9.002E-09	0.0202103	861	0.66733	0.034266352
22.41	12.08	5.4965E-07	0.55	9.99E-09	0.022143	862	0.64506	0.006019054
21.88	11.53	5.6055E-07	0.56	1.09E-08	0.0236806	858	0.62076	-0.019864826
21.22	11.02	5.7228E-07	0.57	1.173E-08	0.024801	850	0.5946	-0.043188295
20.47	10.56	5.8475E-07	0.58	1.247E-08	0.0255052	838	0.5668	-0.063773848
19.65	10.13	5.9787E-07	0.60	1.312E-08	0.0258136	822	0.53756	-0.081464818
18.79	9.74	6.1153E-07	0.61	1.366E-08	0.0257611	804	0.50711	-0.096126563
17.92	9.39	6.2563E-07	0.63	1.41E-08	0.025392	785	0.47567	-0.107647501
17.04	9.07	6.4007E-07	0.64	1.444E-08	0.0247549	764	0.44348	-0.115939949
16.19	8.78	6.5473E-07	0.65	1.466E-08	0.0238986	742	0.4108	-0.120940798
15.37	8.52	6.695E-07	0.67	1.477E-08	0.0228693	720	0.37787	-0.122611987
14.59	8.29	6.8427E-07	0.68	1.477E-08	0.0217087	699	0.34493	-0.120940798
13.85	8.08	6.9893E-07	0.70	1.466E-08	0.020453	678	0.31225	-0.115939949
13.17	7.90	7.1337E-07	0.71	1.444E-08	0.0191327	657	0.28007	-0.107647501
12.53	7.74	7.2747E-07	0.73	1.41E-08	0.017773	638	0.24863	-0.096126563
11.94	7.60	7.4113E-07	0.74	1.366E-08	0.0163942	619	0.21817	-0.081464818
11.40	7.48	7.5425E-07	0.75	1.312E-08	0.015012	602	0.18893	-0.063773848
10.90	7.39	7.6672E-07	0.77	1.247E-08	0.0136388	585	0.16113	-0.043188295
10.45	7.31	7.7845E-07	0.78	1.173E-08	0.0122836	569	0.13498	-0.019864826
10.04	7.26	7.8935E-07	0.79	1.09E-08	0.0109532	555	0.11067	0.006019054
9.66	7.22	7.9934E-07	0.80	9.99E-09	0.0096522	541	0.0884	0.034266352
9.33	7.20	8.0835E-07	0.81	9.002E-09	0.008384	528	0.06834	0.064662089
9.02	7.19	8.1629E-07	0.82	7.945E-09	0.0071505	516	0.05062	0.096974935
8.75	7.21	8.2312E-07	0.82	6.828E-09	0.0059527	504	0.0354	0.130958971
8.51	7.24	8.2878E-07	0.83	5.659E-09	0.004791	494	0.02279	0.166355556
8.30	7.30	8.3322E-07	0.83	4.447E-09	0.0036653	484	0.01288	0.202895302
8.11	7.37	8.3642E-07	0.84	3.2E-09	0.0025751	475	0.00574	0.240300119
7.94	7.46	8.3836E-07	0.84	1.93E-09	0.0015197	466	0.00144	0.278285335
7.81	7.81	8.39E-07	0.84	6.45E-10	0.0004983	458	0	0.316561857
		8.3836E-07	0.84	-6.45E-10	-0.0004829	438	0.00144	0.35483838
		8.3642E-07	0.84	-1.93E-09	-0.0014035	431	0.00574	0.392823595
		8.3322E-07	0.83	-3.2E-09	-0.0023019	426	0.01288	0.430228412
		8.2878E-07	0.83	-4.45E-09	-0.0031712	420	0.02279	0.466768158
		8.2312E-07	0.82	-5.66E-09	-0.0040118	415	0.0354	0.502164744
		8.1629E-07	0.82	-6.83E-09	-0.0048241	411	0.05062	0.536148779
		8.0835E-07	0.81	-7.95E-09	-0.0056082	407	0.06834	0.568461626
		7.9934E-07	0.80	-9E-09	-0.0063642	404	0.0884	0.598857363
		7.8935E-07	0.79	-9.99E-09	-0.0070918	401	0.11067	0.62710466
		7.7845E-07	0.78	-1.09E-08	-0.0077907	398	0.13498	0.65298854
		7.6672E-07	0.77	-1.17E-08	-0.00846	397	0.16113	0.676312009
		7.5425E-07	0.75	-1.25E-08	-0.0090987	395	0.18893	0.696897563
		7.4113E-07	0.74	-1.31E-08	-0.0097053	394	0.21817	0.714588532
		7.2747E-07	0.73	-1.37E-08	-0.0102782	394	0.24863	0.729250278
		7.1337E-07	0.71	-1.41E-08	-0.0108149	394	0.28007	0.740771215
		6.9893E-07	0.70	-1.44E-08	-0.0113126	395	0.31225	0.749063664
		6.8427E-07	0.68	-1.47E-08	-0.0117679	397	0.34493	0.754064512
		6.695E-07	0.67	-1.48E-08	-0.0121767	399	0.37787	0.755735701
		6.5473E-07	0.65	-1.48E-08	-0.0125342	402	0.4108	0.754064512
		6.4007E-07	0.64	-1.47E-08	-0.0128344	406	0.44348	0.749063664
		6.2563E-07	0.63	-1.44E-08	-0.0130708	411	0.47567	0.740771215
		6.1153E-07	0.61	-1.41E-08	-0.0132355	417	0.50711	0.729250278
		5.9787E-07	0.60	-1.37E-08	-0.0133196	424	0.53756	0.714588532
		5.8475E-07	0.58	-1.31E-08	-0.0133126	432	0.5668	0.696897563
		5.7228E-07	0.57	-1.25E-08	-0.0132032	442	0.5946	0.676312009
		5.6055E-07	0.56	-1.17E-08	-0.0129782	452	0.62076	0.65298854
		5.4965E-07	0.55	-1.09E-08	-0.0126234	465	0.64506	0.62710466
		5.3966E-07	0.54	-9.99E-09	-0.0121234	478	0.66733	0.598857363
		5.3065E-07	0.53	-9E-09	-0.0114618	494	0.6874	0.568461626
		5.2271E-07	0.52	-7.95E-09	-0.010622	511	0.70511	0.536148779
		5.1588E-07	0.52	-6.83E-09	-0.009588	530	0.72033	0.502164744
		5.1022E-07	0.51	-5.66E-09	-0.008345	550	0.73295	0.466768158
		5.0578E-07	0.51	-4.45E-09	-0.0068817	572	0.74286	0.430228412
		5.0258E-07	0.50	-3.2E-09	-0.0051914	595	0.75	0.392823595
		5.0064E-07	0.50	-1.93E-09	-0.0032746	619	0.7543	0.35483838
		0.0000005	0.50	-6.45E-10	-0.0011644	670	0.75574	0.316561857
	Vmax=	8.39E-07			0.2116014	joule / tour		
					0.352669	watt		



ภาคผนวก ง
ตารางบันทึกผลการทดสอบ

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบ 2 ขั้นตอนกับแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่อง

วันที่บันทึก 15/05/2557										
เวลา 14.01-15.11 $V_{wind} = 0.8 \text{ m/s}$										
หน้าที่	T_1 °C	T_2 °C	T_3 °C	I W/m^2	T_5 °C	T_6 °C	T_7 °C	T_8 °C	T_9 °C	T_{10} °C
0	75.7	98.4	55.1	870	143.5	149.7	163.2	36.3	42.4	54.5
1	83	49.8	60.5	876	148.3	152.2	162	35.7	43.1	56.8
2	88.8	42.3	68.3	876	163.5	177.5	181.7	35.7	43.7	57.1
3	92.2	58.5	72.5	874	162.6	181.4	191.6	36.3	44.2	58.5
4	94.3	41.8	76.6	862	167.3	188.1	198.2	36.5	44.3	59.4
5	95.1	115	78.6	856	169.7	190.8	195.9	36.2	44.5	58.6
6	94	113.3	77	855	166.1	184.8	185.6	36.2	44.3	58
7	92.4	111.3	75.7	862	165.6	179.7	182.5	36.5	44.4	58.7
8	75.8	97.3	48.2	858	121.1	123.8	129.4	36.5	43.7	56.7
9	55.3	73.4	13.9	850	115.7	111.2	113.8	36	42.6	54.3
10	73.8	87.7	41.5	856	176.3	163.2	143.2	35.9	43.2	48.1
11	84.9	99.2	57.8	856	187.3	165.2	155.6	35.9	43.8	49.2
12	92	103.5	56.3	852	197.6	163.2	146.7	35.9	44	58.2
13	94.9	109	64.8	818	231.5	179.1	148.4	36.3	43.4	60.9
14	75.7	98.4	55.1	870	143.5	149.7	163.2	36.3	42.4	54.5

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบ 2 ขั้นตอนกับแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่อง(ต่อ)

นาที	T ₁ °C	T ₂ °C	T ₃ °C	I W/m ²	T ₅ °C	T ₆ °C	T ₇ °C	T ₈ °C	T ₉ °C	T ₁₀ °C
15	95.9	109.9	67.6	835	235.9	190	153.8	36.4	43.2	58.8
16	98.3	112.7	72.5	846	236.3	196.1	159.9	36.1	43.1	57.9
17	98.7	112.7	72.1	850	235.5	202.2	162.3	36.2	43.2	58.1
18	69.5	99.5	63.7	854	234.6	204.3	164.5	36.5	37.7	29.8
19	62.6	91	60.8	718	228.9	203.9	167.6	36.5	37.1	30.1
20	60.8	90.9	60.8	717	229.4	203.6	166.4	36.5	37.1	31.8
21	61	92	63	728	231.1	202.6	169.4	36.4	37.2	31.8
22	53.5	88	61.3	755	231.4	193.3	168.6	36.5	36.7	32.5
23	74.3	97.3	65.2	768	234.7	190.5	168.7	36.5	39.4	40.3
24	92.1	110.3	75.9	787	243.1	195.9	174.9	36.8	41.3	54
25	102.1	117.8	88.2	795	247.3	225.3	202	36.9	43.3	61.3
26	111.1	126.7	101.1	795	250.7	232.2	216	36.9	44.3	66.9
27	117	132	110.4	795	255.9	239.8	228.1	37	45.5	68.8
28	119.9	134.7	114.6	793	251.5	237.7	229.9	37.2	46.2	70.7
29	121.6	136.6	117	804	249.8	239.4	234.8	36.9	46.7	70.8
30	121.6	137	118.2	811	244.7	238.8	234.3	37	46.9	70.6
31	122.4	138.5	121	811	244.7	242.2	238.3	37	47.1	71.3

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบ 2 ขั้นตอนกับแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่อง(ต่อ)

หน้าที่	T ₁ °C	T ₂ °C	T ₃ °C	I W/m ²	T ₅ °C	T ₆ °C	T ₇ °C	T ₈ °C	T ₉ °C	T ₁₀ °C
32	121.7	136.9	116.9	813	240.6	231.5	227.9	36.7	46.8	70.1
33	120.2	135.4	114.7	814	238.1	231.6	227.2	36.7	46.6	68.2
34	118.1	133.1	111.6	817	238.9	230.1	223.7	36.9	46.4	65.3
35	117.3	132.9	112.3	813	239.4	234.2	223.4	36.9	46.3	65.2
36	115.7	132.3	111.3	814	233.2	233.8	216.9	37.1	46.2	64.6
37	114	131	109.5	811	229.2	236.2	217.7	37.2	46.1	64.2
38	113.1	130.7	109.3	814	221.7	235.4	45.7	37.1	46.3	65.1
39	110.7	129.2	106.1	815	240.8	227.8	40.7	37.4	46.2	64.9
40	113	131.1	104.1	820	262.1	233.1	40.5	37.4	46.1	67.7
41	112.7	131.1	103.2	818	261.1	232.5	40.4	37.3	45.9	68.7
42	112.6	130.8	103.4	811	259.8	232	40.4	37.1	45.8	68.8
43	112.4	130.8	104	806	260.5	236.3	40.4	36.8	45.7	68.2
44	112.7	131.8	107.1	797	258.6	239.7	40.4	36.9	45.8	67.8
45	113.6	132.8	109.2	783	259.4	243	40.4	36.9	46.2	67.7
46	113.1	132.4	109.2	782	255.8	238	40.5	37.1	46.3	68.2
47	112.9	132.1	109.1	761	255.4	239.8	40.4	37.5	46.4	69
48	113.3	132.5	109.6	773	251.7	238.6	40.3	37.2	46.4	68

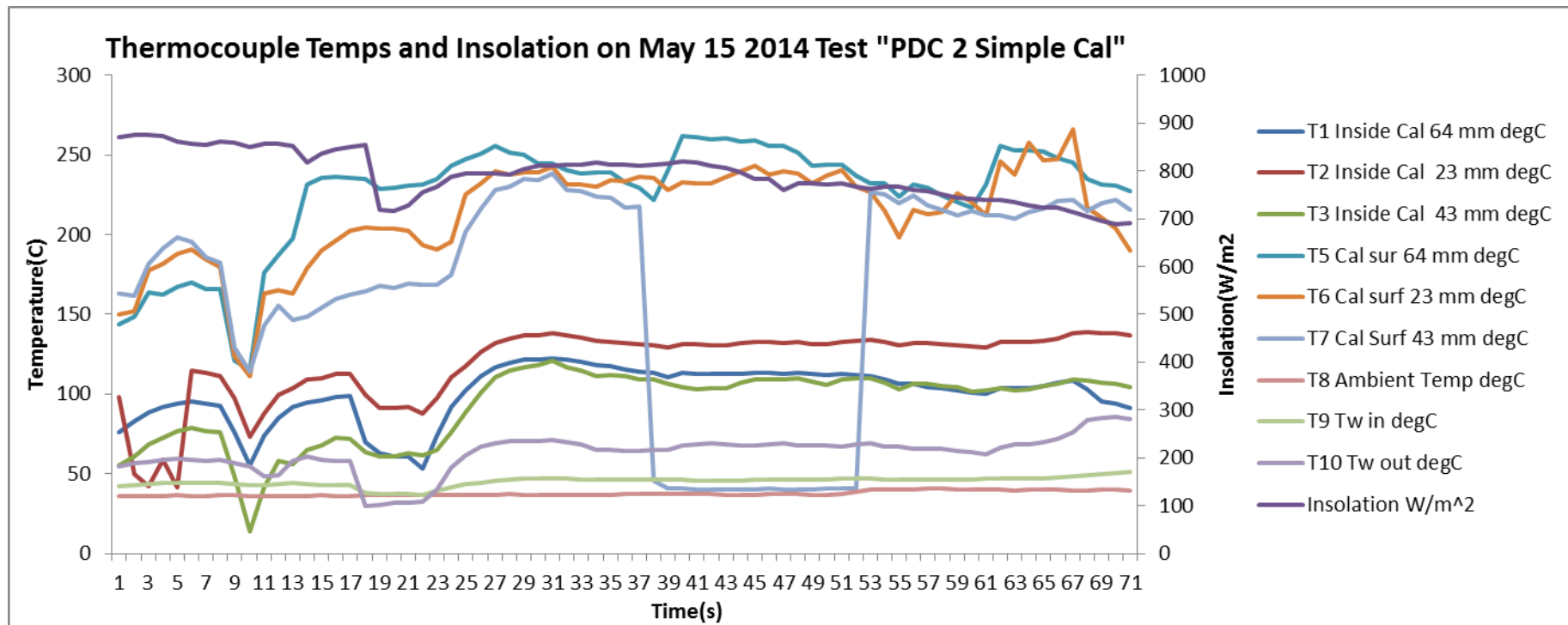
ตารางที่ 1 ผลการทดสอบตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบ 2 ขั้นตอนกับแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่อง (ต่อ)

นาที	T ₁ °C	T ₂ °C	T ₃ °C	I W/m ²	T ₅ °C	T ₆ °C	T ₇ °C	T ₈ °C	T ₉ °C	T ₁₀ °C
49	112.6	131.6	107.6	775	242.9	232	40.3	36.7	46.5	67.6
50	112	131.2	105.8	772	243.9	237.2	40.6	36.8	46.6	67.5
51	112.4	132.6	108.9	775	243.9	240.4	40.8	37.3	47	67.3
52	111.7	133.3	109.7	767	237	230	40.9	38.7	47	68.7
53	111	134.1	109.8	762	232.4	226.7	226.5	39.8	46.8	68.9
54	109.2	132.7	106.8	766	232	215.1	225.5	40.2	46.6	66.9
55	106.3	130.9	102.9	767	223.8	198.3	219.9	40.2	46.4	67
56	106.1	131.9	106.7	760	231.7	215.4	224.5	40.4	46.5	65.5
57	104.7	131.9	106.7	757	229.6	212.7	218.7	40.6	46.5	65.8
58	103.7	131	105.1	751	224.8	214.5	215.9	40.6	46.4	65.6
59	102.6	130.6	104.1	743	220.3	226	212.3	40.4	46.5	64.3
60	100.7	129.7	101.7	741	217.1	220.1	214.8	40.2	46.5	63.8
61	100	129.5	102.3	739	231.7	212.1	212	40.4	46.8	62.3
62	103.6	133	104	739	256	245.7	212	40	47.1	66.3
63	104	132.9	102.5	735	252.8	237.5	210.1	39.7	47.1	68.7
64	103.6	132.7	102.9	728	253.2	257.6	214.5	39.8	46.8	68.7
65	105	133.4	105.1	723	252.1	246.4	216.4	39.8	46.9	69.8

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบ 2 ขั้นตอนกับแคลอริมิเตอร์แบบน้ำไหลต่อเนื่อง (ต่อ)

นาที	T ₁ °C	T ₂ °C	T ₃ °C	I W/m ²	T ₅ °C	T ₆ °C	T ₇ °C	T ₈ °C	T ₉ °C	T ₁₀ °C
66	107.3	135	106.3	724	247.8	247.7	221.4	39.8	47.4	72.1
67	108.7	138.5	109.2	713	245.5	266.2	221.7	39.4	48.1	75.8
68	103.1	139.2	108.5	704	234.7	216.8	215	39.6	49.1	83.3
69	95.2	138.4	107.1	695	231.2	210.6	219.6	39.8	49.6	85
70	94.2	137.9	106.5	689	230.7	203.7	221.9	39.8	50.5	85.5
71	91.3	136.9	104.5	692	227.6	189.9	215.8	39.7	51.1	84.4
ค่าเฉลี่ย	100.432	118.928	92.472	791.014	226.065	213.294	163.737	37.593	45.111	62.775

ข้อมูลจากผลการทดลองนำมาพล็อตกราฟได้ดังนี้



ตารางที่ 2 ผลการทดสอบตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบ 2 ชั้นตอนกับแคลอริมิเตอร์แบบชดกันหอย

วันที่บันทึก 15/05/2557										
เวลา 11.14-13.16 Vwind = 1.2 m/s										
หน้าที่	T ₁ °C	T ₂ °C	T ₃ °C	I W/m ²	T ₅ °C	T ₆ °C	T ₇ °C	T ₈ °C	T ₉ °C	T ₁₀ °C
0	48.7	43.7	46.4	870	183.6	35	107.3	33.2	40.4	53.6
1	53.1	47.9	50.3	973	175.2	35.1	101.6	33.4	41.1	57.3
2	54.7	52.6	54.1	960	188.2	35.3	111.5	33.6	42.7	61.7
3	58.5	56.9	57.7	957	175.4	35.4	111.1	33.9	42.9	66.7
4	62.3	61.6	61.8	958	177.5	35.4	114.3	33.9	44.8	69.8
5	67.1	64.6	63.7	940	171.6	35.4	112.4	33.8	43.4	72.7
6	69	66.4	65.7	940	175.7	35.6	112.4	33.9	44.2	74.9
7	69.5	69.7	68.6	945	187.1	35.7	115.1	33.9	44.4	76.9
8	72.4	70.6	69.2	948	179.4	35.9	114.4	34.1	43.9	78.3
9	73.8	72	70.5	939	169.4	35.9	110.8	34.4	44.4	80.9
10	72.6	74.1	73.4	952	169.6	36	113.5	34.5	44.5	81.8
11	75.7	73.8	71.9	955	166	36.2	115	34.4	43.2	82.6
12	75.9	74.4	72.4	956	160.1	36.2	114.6	34.5	43.9	83
13	48.7	43.7	46.4	870	183.6	35	107.3	33.2	40.4	53.6
14	76.5	74.7	72.7	950	145.6	36.2	111.1	34.7	43.8	83.9

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบ 2 ขั้นตอนกับแคลอริมิเตอร์แบบชดกันหอย (ต่อ)

นาฬิกา	T ₁ °C	T ₂ °C	T ₃ °C	I W/m ²	T ₅ °C	T ₆ °C	T ₇ °C	T ₈ °C	T ₉ °C	T ₁₀ °C
15	76.4	74.8	72.7	962	143	36.2	112.4	34.6	43.8	83.6
16	75.2	76.4	76.4	955	209.5	36.4	121.6	34.5	47.2	83.5
17	76.1	76.8	75.9	966	190.2	36.5	132.5	34.8	44.8	85.6
18	78.3	78	76.4	963	180.4	36.5	133.3	34.9	45	88.6
19	78.8	79.7	79	959	184.4	36.5	134	34.8	44.9	90
20	80.6	80.9	80.1	971	191	36.7	133.6	34.8	45.3	90.9
21	81.3	82	80	965	181	36.8	132.8	34.9	44.9	92.9
22	82.3	83.6	82.5	963	185.5	36.8	133.6	35.1	45.5	93.2
23	83.2	87.3	89.7	966	207	37	128.3	35.4	47.1	94
24	84.9	85.8	84.7	939	172.2	37	115.1	35.8	45.9	94.8
25	79.8	90.6	90.7	968	110.7	37.1	98.9	35.5	44.8	87.7
26	72.2	84.1	84.2	962	74.5	37.1	84.7	35.3	41.9	77.5
27	66	67.8	69.1	972	126.6	37.2	97	35.5	40.6	73.2
28	63.7	66.8	68.7	972	159.5	37.3	115.6	35.6	41.5	76.6
29	67.6	67.4	66.3	960	166.3	37.3	114.9	35.8	41.8	80.3
30	67.5	68.1	65.9	964	177.2	37.3	125.5	35.8	42.5	76.9
31	71.3	71.4	69.5	970	182.8	37.3	133	35.6	47.4	78.9

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบ 2 ขั้นตอนกับแคลอริมิเตอร์แบบชดกันหอย (ต่อ)

นาฬิกา	T ₁ °C	T ₂ °C	T ₃ °C	I W/m ²	T ₅ °C	T ₆ °C	T ₇ °C	T ₈ °C	T ₉ °C	T ₁₀ °C
32	73.7	76.9	78.3	975	185.2	37.4	137.7	35.5	53.5	81.2
33	79.5	82.7	84.6	970	172.6	37.5	136.8	35.9	61.1	85
34	85.7	88.5	89	974	173.5	37.6	139.8	35.9	58.6	88.1
35	88.8	91.8	92.8	978	177.8	37.7	142.8	36	53.6	92.4
36	94	96.2	96.4	977	177.7	37.7	142.1	36	60.9	97.8
37	97.8	100.6	99.1	971	185.4	37.7	143	36	70.3	96.3
38	98.8	99.2	97.7	975	197.9	37.7	138.8	36	56.9	98.6
39	93.6	94	94.5	974	194.2	37.8	136.1	36	48.6	98
40	92.8	92.3	91.2	977	205.1	37.7	122.7	36	45.5	94.4
41	88.4	89.3	87.3	973	163.7	37.7	120.7	35.9	44.9	89.5
42	86.1	85.7	84.2	976	179.5	37.8	127	35.9	44.6	91.7
43	86.3	85.5	84	979	167.9	37.8	128.5	36	45.8	93.3
44	87.8	87.2	86.4	982	155.3	37.8	129.6	36.1	49.6	94.7
45	92.5	90.8	93.2	974	187.8	37.8	140	35.9	52.8	96
46	88.4	89.5	92.1	974	188.8	37.8	144.3	35.9	46.8	97.2
47	83.2	85	87.7	974	190.1	37.8	144.5	35.7	45.2	95.6
48	82.2	83.3	86	973	183.2	37.7	139.7	35.8	44.3	95

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบ 2 ขั้นตอนกับแคลอริมิเตอร์แบบชดกันหอย (ต่อ)

นาฬิกา	T ₁ °C	T ₂ °C	T ₃ °C	I W/m ²	T ₅ °C	T ₆ °C	T ₇ °C	T ₈ °C	T ₉ °C	T ₁₀ °C
49	81.7	83.2	87.3	963	181.7	37.7	138.5	35.9	44.4	96.2
50	85	83.9	89.8	966	178.5	37.7	134.4	36	43.8	93.1
51	84.7	86.1	86.2	967	176.7	37.8	129.8	36	44.9	89.3
52	87.9	88.7	89.5	971	186	37.8	141.8	35.9	51.3	92.8
53	91.5	92	95	958	181.4	37.8	142.3	35.9	53.2	96
54	91.8	93.1	95.6	950	189.6	37.9	142.3	36	50.8	97.8
55	93.3	94.3	96.1	945	188.8	38	140.6	36	50.6	99.1
56	94.6	95.5	97	946	192.6	38	140.9	36.1	56.2	100.6
57	94.5	97	98.7	955	200.6	37.8	136.2	36.1	52	99.7
58	91.8	93.6	98.3	963	194.7	37.8	136.7	36	46.8	98.9
59	87	88.1	92.6	956	190.3	37.8	133.9	36	44.7	96.4
60	85.6	86.6	88.6	966	186.6	37.7	127.6	35.9	43.7	95.1
61	85.1	87.5	91.2	969	185.9	37.7	127.6	35.9	43.4	93.7
62	85.9	88.2	89.8	969	185.9	37.7	122.3	35.6	43.4	93
63	87	90.6	94.1	966	193.9	37.7	127.6	35.5	46.6	90.3
64	89.9	91.8	98.3	966	196.7	37.8	136.9	35.6	49.1	97.8
65	91.1	93.3	99.4	969	190.3	37.8	139.9	35.7	49.5	97.6

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบ 2 ขั้นตอนกับแคลอริมิเตอร์แบบชดกันหอย (ต่อ)

หน้าที่	T ₁ °C	T ₂ °C	T ₃ °C	I W/m ²	T ₅ °C	T ₆ °C	T ₇ °C	T ₈ °C	T ₉ °C	T ₁₀ °C
66	93.3	95.1	100	957	186.3	38	139.2	35.8	54.1	98.1
67	95.2	96.8	100.1	960	182.4	38	139.8	36	62.1	98.7
68	96.6	98.1	100.1	969	180.9	38.2	141.5	36.4	69.1	99.5
69	97.2	99.2	99.6	968	187.5	38.3	129.6	36.5	67.6	98.1
70	96.1	98.7	99.2	956	176.8	38.5	127.8	37	56.9	100.1
71	92.1	96.1	99.1	961	181.7	38.5	129.5	36.7	49.1	100.6
72	88.3	93.8	99.1	962	184.2	38.5	131.2	36.5	46.1	100
73	85.5	91.9	99	956	188.4	38.5	132.8	36.5	45	98.7
74	83.8	90.3	98.8	959	187.1	38.6	134.2	36.7	44.1	96.7
75	81.8	88	98.3	961	185.4	38.6	133.8	36.6	43.4	97.4
76	79.8	85.7	97	960	182.7	38.7	132.5	37.1	42.9	97
77	76.8	82.4	94.1	962	190.7	38.8	135.1	36.8	42.6	91
78	74.1	79.7	90.3	963	189.1	38.9	132.8	36.8	42.5	88
79	71.8	77.2	88	951	183.7	39	130.8	37	42.3	85.8
80	70.6	75.8	85.3	957	172.5	39.1	125	37.2	41.8	83.7
81	69.1	74	83.5	967	171.2	39.1	123.5	37.5	41.5	82.1
82	67.8	72.6	81.8	959	164.4	39.1	117.9	37.7	41.2	81.4

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบ 2 ขั้นตอนกับแคลอริมิเตอร์แบบชดกันหอย (ต่อ)

นาฬิกา	T ₁ °C	T ₂ °C	T ₃ °C	I W/m ²	T ₅ °C	T ₆ °C	T ₇ °C	T ₈ °C	T ₉ °C	T ₁₀ °C
83	68.6	71.5	73	960	159.9	39.1	115.5	37.4	41.1	76.3
84	67.4	71.5	76.5	956	151.8	39.1	110.1	37.5	41.3	73.6
85	65.7	74.7	77.3	960	85	39.1	81.8	37	40.6	73.4
86	58.6	67	68.1	952	64.1	39.1	69.2	36.3	39.4	67.5
87	58.5	61	66.9	951	166.6	39.1	104.9	36	39.3	55.1
88	58.1	66.5	77.8	953	244.7	39.3	153.5	36.3	41.5	63.5
89	60.5	73.4	86.4	952	245.7	39.3	165.9	36.4	42.6	67.4
90	64.3	78.6	91	949	240.9	39.4	168.1	36.4	43.8	70.6
91	68.6	83.1	95.2	949	238	39.5	168.1	36.8	44.2	72.2
92	67.4	87.2	96.6	952	241.5	39.1	171.1	36.6	44.9	75
93	65.7	90.3	96.9	961	242.9	39.1	173.4	36.4	45.1	77.6
94	58.6	93	96.8	958	250.6	39.3	173	36.7	45.1	80.6
95	58.5	95.6	97	959	251.3	39.3	173.5	36.8	44.9	82.6
96	58.1	96.7	96.9	959	263	39.4	172.8	36.7	44.8	83.8
97	60.5	98.1	96.7	815	262.7	39.5	172.2	36.7	44.6	86.2
98	64.3	776.5	97	643	264.7	39.1	172.7	36.7	44.3	87.9
99	68.6	100.3	98.6	963	268	39.1	173.9	36.6	44.3	90.1

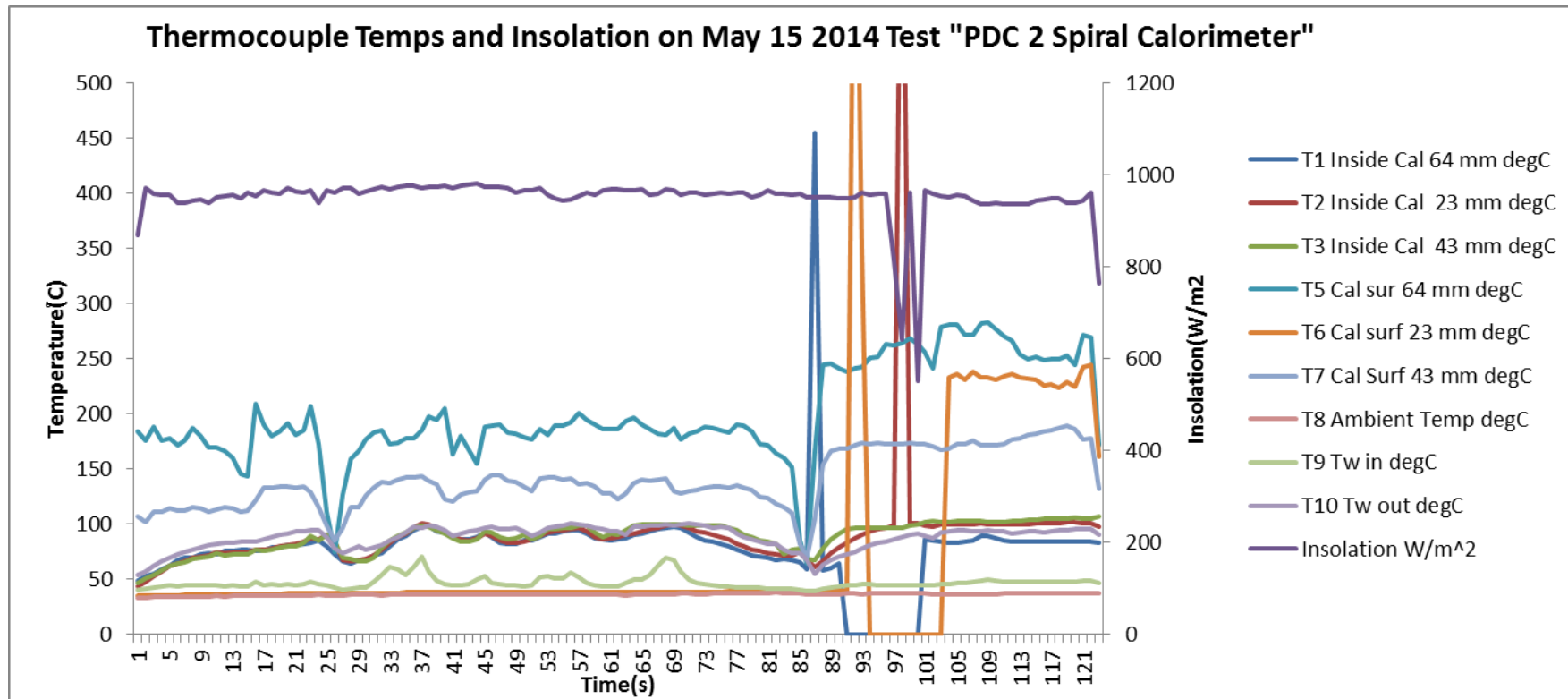
ตารางที่ 2 ผลการทดสอบตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบ 2 ขั้นตอนกับแคลอริมิเตอร์แบบชดกันหอย (ต่อ)

หน้าที่	T ₁ °C	T ₂ °C	T ₃ °C	I W/m ²	T ₅ °C	T ₆ °C	T ₇ °C	T ₈ °C	T ₉ °C	T ₁₀ °C
101	86.3	99	101.3	966	256.2	231	172.4	36.6	43.9	89.2
102	84.7	97.5	103	960	241.8	231	170.7	36.3	44	87.4
103	84	99.5	101.6	954	279	231	167	36.3	45.1	92.1
104	82.9	99.2	102	951	281	233	168.8	36.5	45.5	93.2
105	83.2	99.5	102.4	957	281.5	236.3	172.5	36.3	46.3	94
106	83.8	99.5	102.6	955	271.4	230.9	172.9	35.9	46.8	94.5
107	84.7	99.9	103	945	271.7	238.2	176.2	35.8	47.7	93.5
108	89	100.4	102.5	937	282.4	232.7	171.4	35.8	48.7	93.9
109	89.5	99.2	101.2	938	283.5	232.9	171.8	35.9	49.7	94.2
110	86.7	99.4	101.5	939	276.7	230.8	171.9	36.4	48.2	93.6
111	84.7	99.2	102.1	937	270.8	234.5	173	36.7	47.8	93.1
112	84.3	99.5	102.3	936	266.5	236.5	176.4	37	47.8	91.7
113	83.7	99.5	102.9	937	253.6	233	178	37	47.4	92.3
114	83.9	99.9	103.8	938	249.4	232.2	180.6	37.2	47.4	93
115	83.8	100.3	104.3	945	252.1	230.5	182.1	36.9	47.5	93
116	83.7	100.4	104.5	946	248.5	226	183.7	36.8	47.4	92.7
117	83.8	100.7	104.9	950	249.8	226.8	185.5	37.1	47.4	93.6

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบ 2 ขั้นตอนกับแคลอริมิเตอร์แบบชดกันหอย (ต่อ)

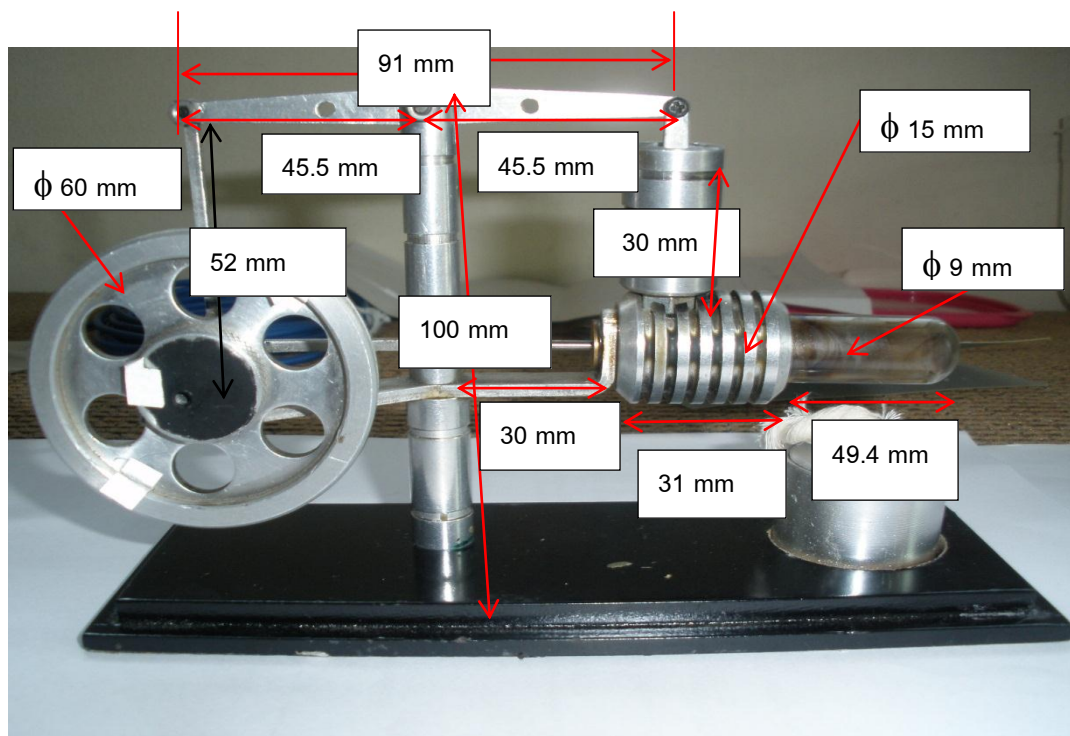
นาฬิกา	T ₁ °C	T ₂ °C	T ₃ °C	I W/m ²	T ₅ °C	T ₆ °C	T ₇ °C	T ₈ °C	T ₉ °C	T ₁₀ °C
118	84	101	105.2	949	249.3	223.8	186.7	37.1	47.1	94
119	84	101.3	105.3	940	253.1	229.2	189.4	36.9	47.8	94.1
120	84.2	101.3	105.7	939	244.7	225.1	186.1	37.2	48	95
121	84.3	101	105	945	271.8	242.9	176.5	36.7	48.6	95.2
122	83.9	100.9	105.3	961	269.3	244	177.9	36.7	48.5	95.3
123	83	97.3	107	765	171.4	160.7	132.2	37.2	46.3	90.5
ค่าเฉลี่ย	84.613	99.800	103.452	949.610	199.408	229.000	139.662	35.957	46.774	87.765

ข้อมูลจากผลการทดลองนำมาพล็อตกราฟได้ดังนี้



ภาคผนวก จ
ภาพถ่ายแสดงขนาดของอุปกรณ์

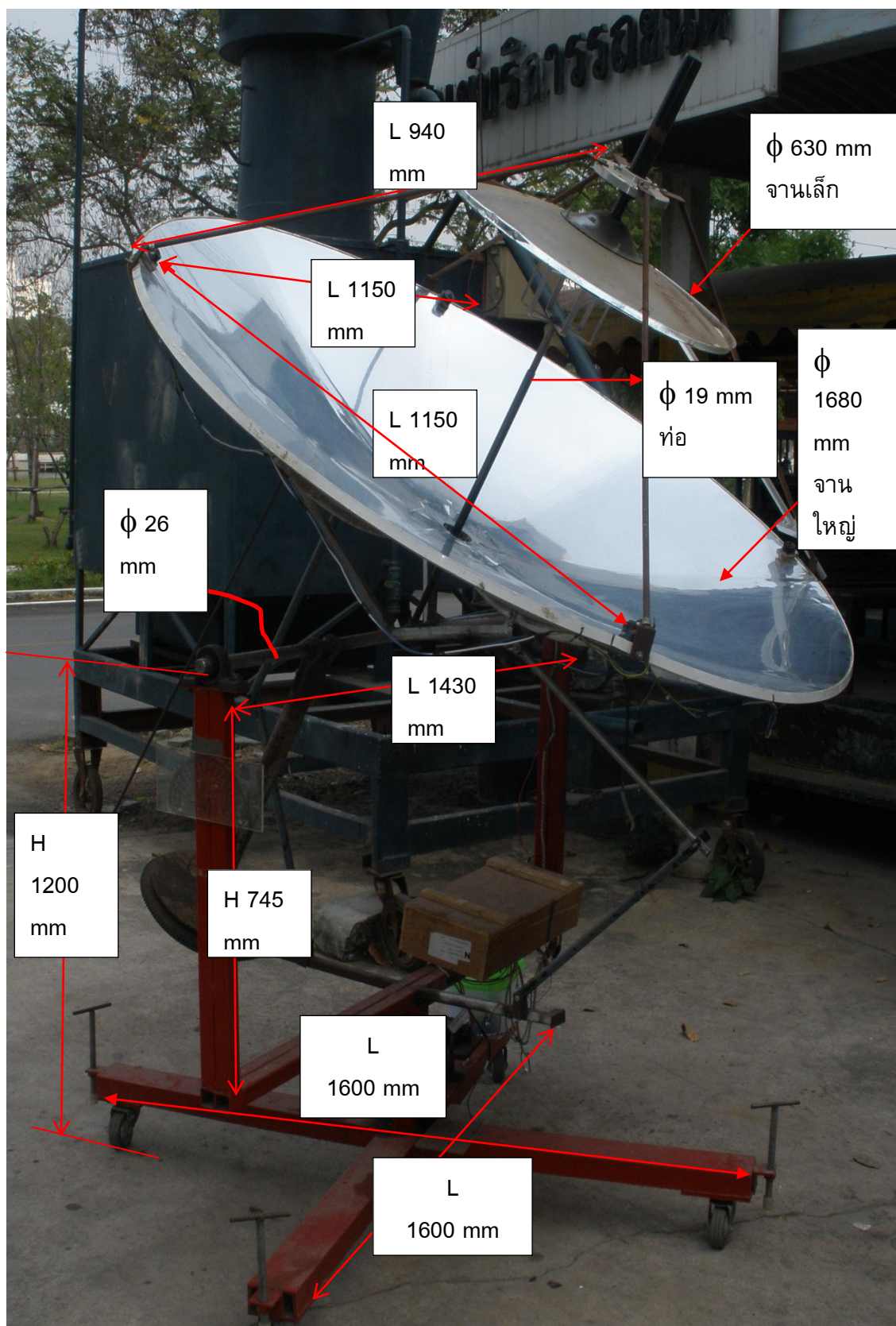




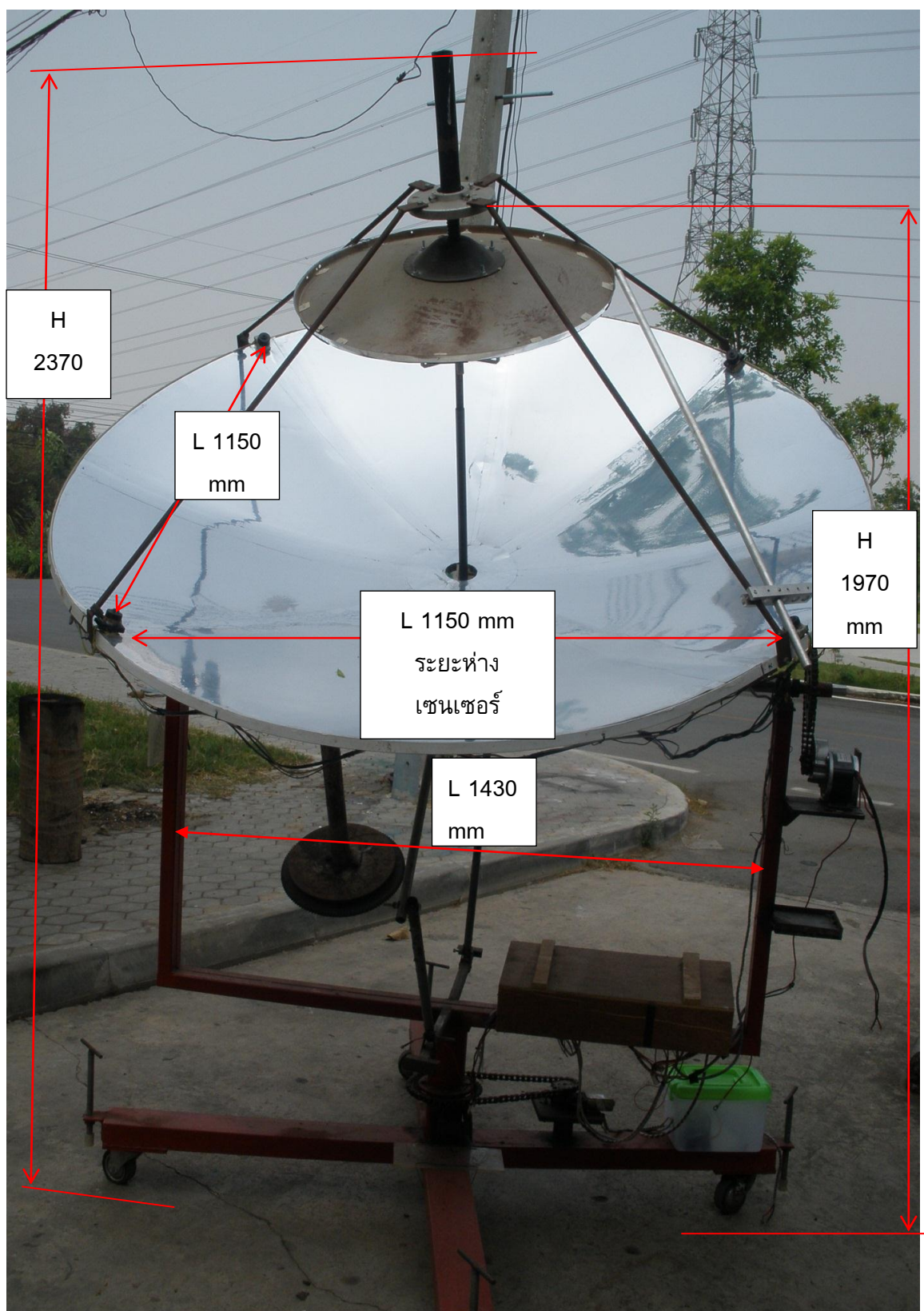
เครื่องย่นตีสเตอริงขนาด 0.35 W



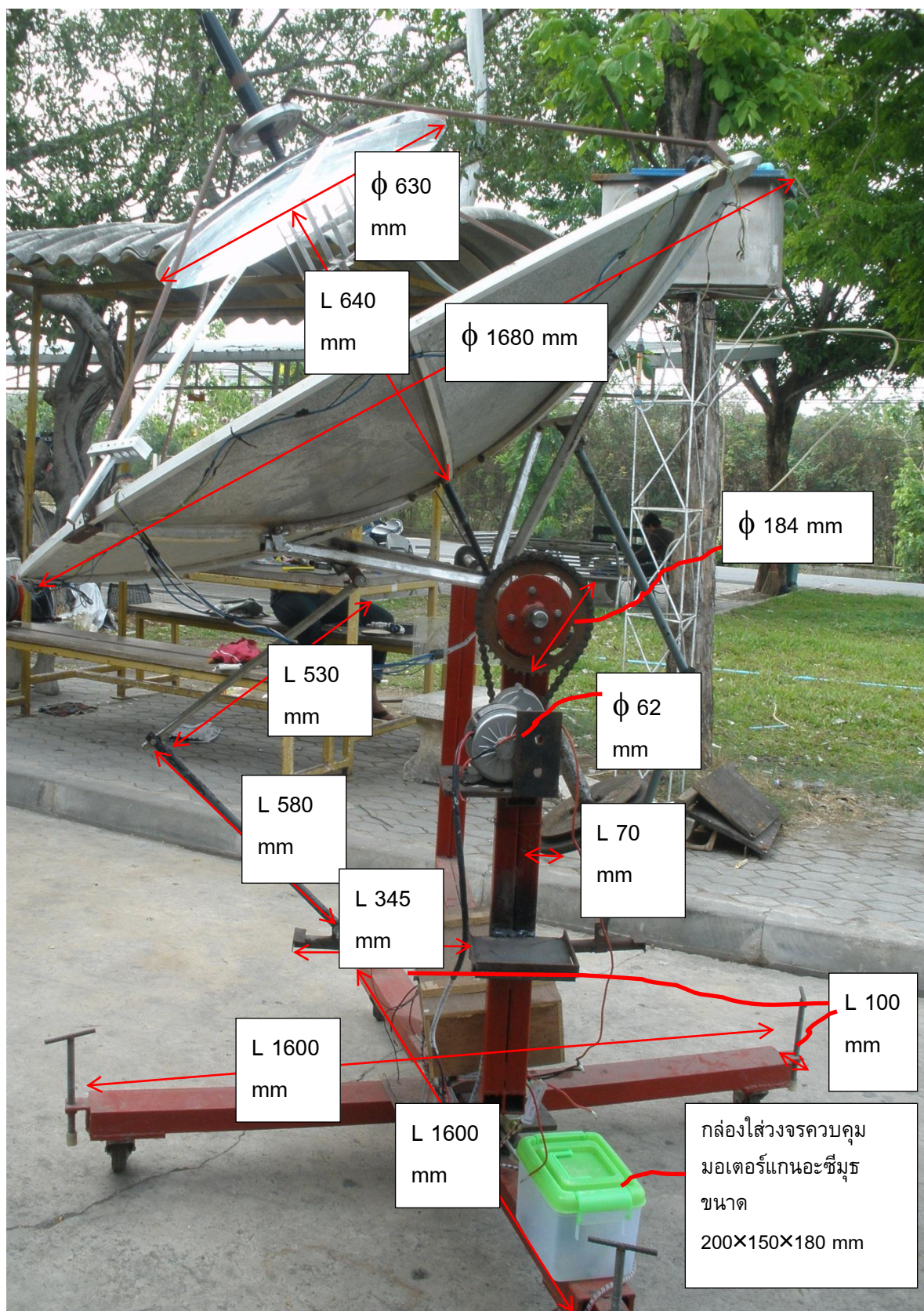
แคลอริมิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบทำจากทองแดงมีขนาด ϕ 138 mm สูง 40 mm



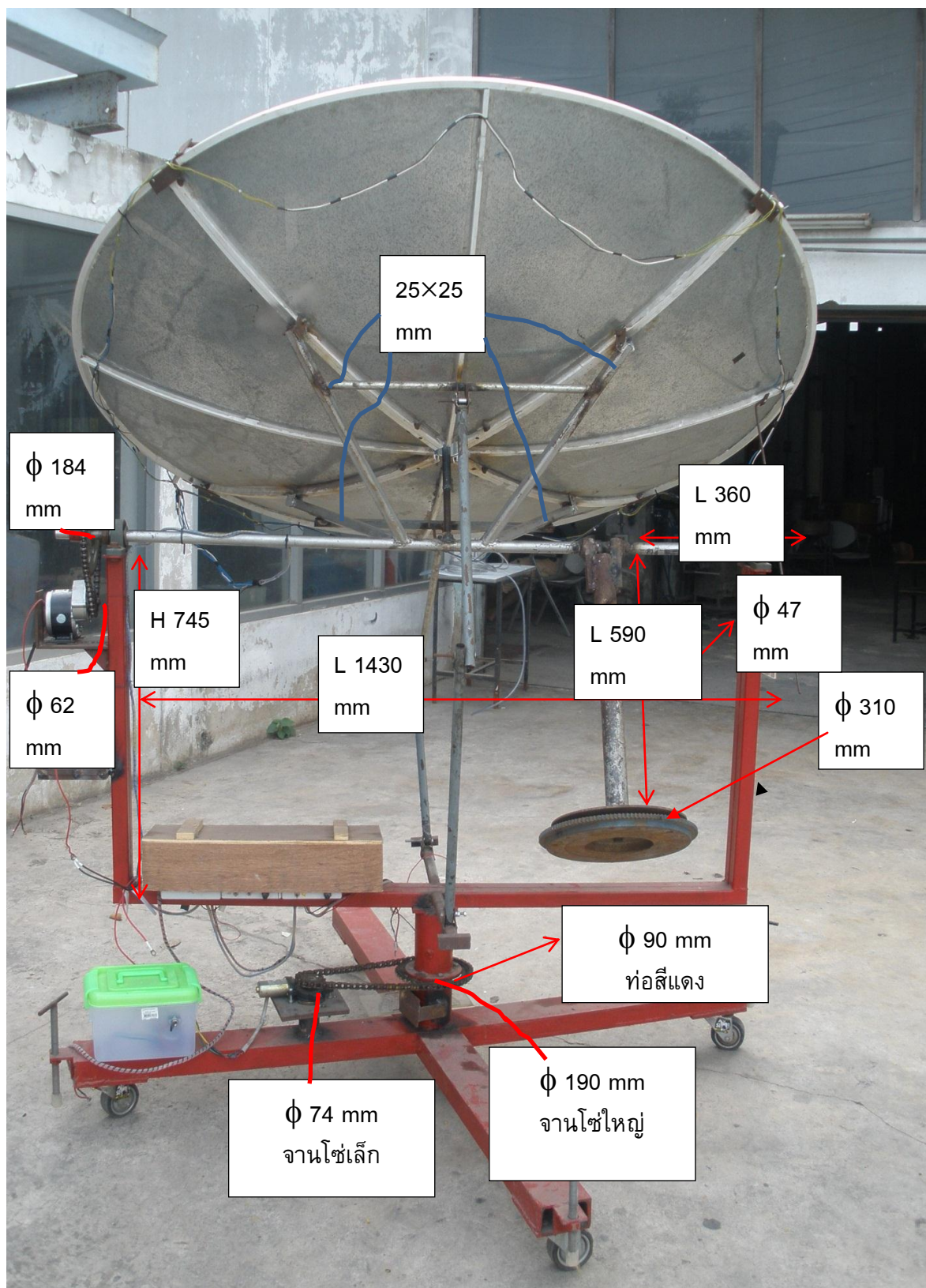
ภาพถ่ายแสดงมุมมองด้านข้างของจานพาราโบลาสองชั้นตอน



ภาพถ่ายแสดงมุมมองด้านหน้าของจานพาราโบลาสองชั้นตอน



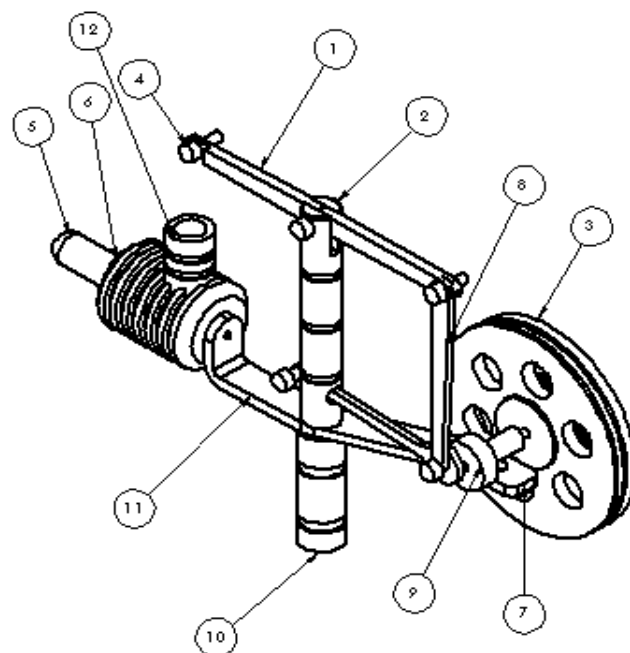
ภาพถ่ายแสดงมุมมองด้านข้างซ้ายของจานพาราโบลาสองชั้นตอน



ภาพถ่ายแสดงมุมมองด้านหลังของจานพาราโบลาสองชั้นตอน



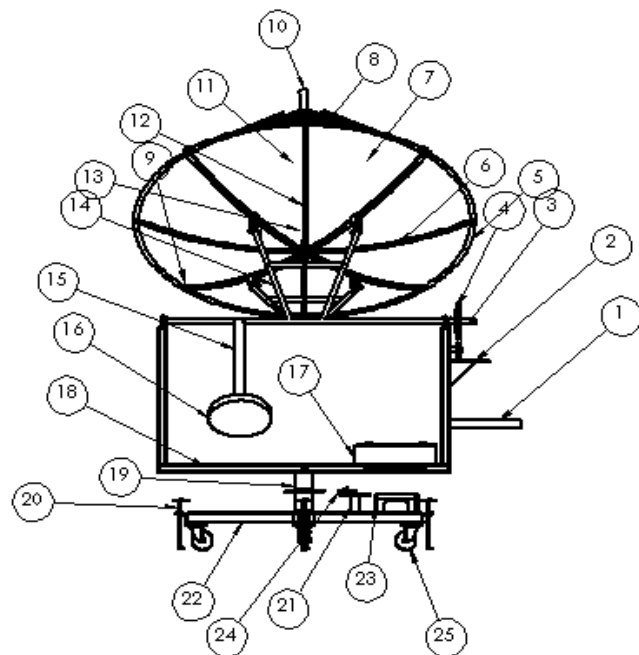
ภาคผนวก จ
เขียนแบบอุปกรณ์



ITEM NO.	PART NAME	QTY.
1	beam	1
2	pivot	1
3	flywheel	1
4	bolt	1
5	hot end rod	1
6	regenerator	1
7	crank	1
8	walking beam	1
9	crank shaft	1
10	column	1
11	mounting bar	1

			Complete Assembly	
	NAME	DATE		
DRAWING	KESARANG SOOKKAMON		material	REV. 1
CHECKED	PRACHA BUNPAWANACHAI		SCALE:	DW 101

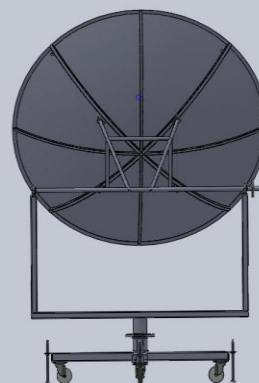
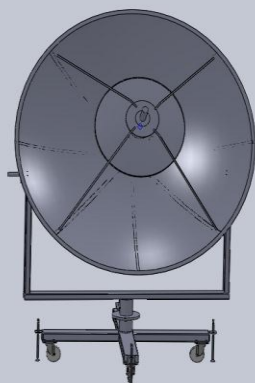
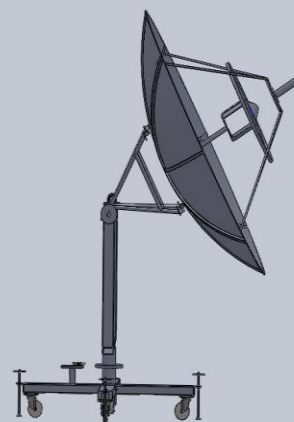
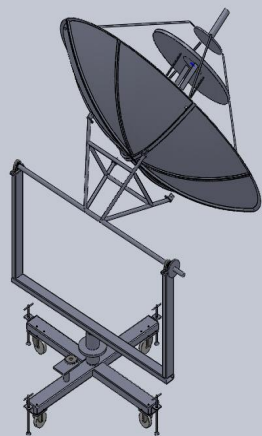
แบบแสดงรายละเอียดของเครื่องยนต์อริง



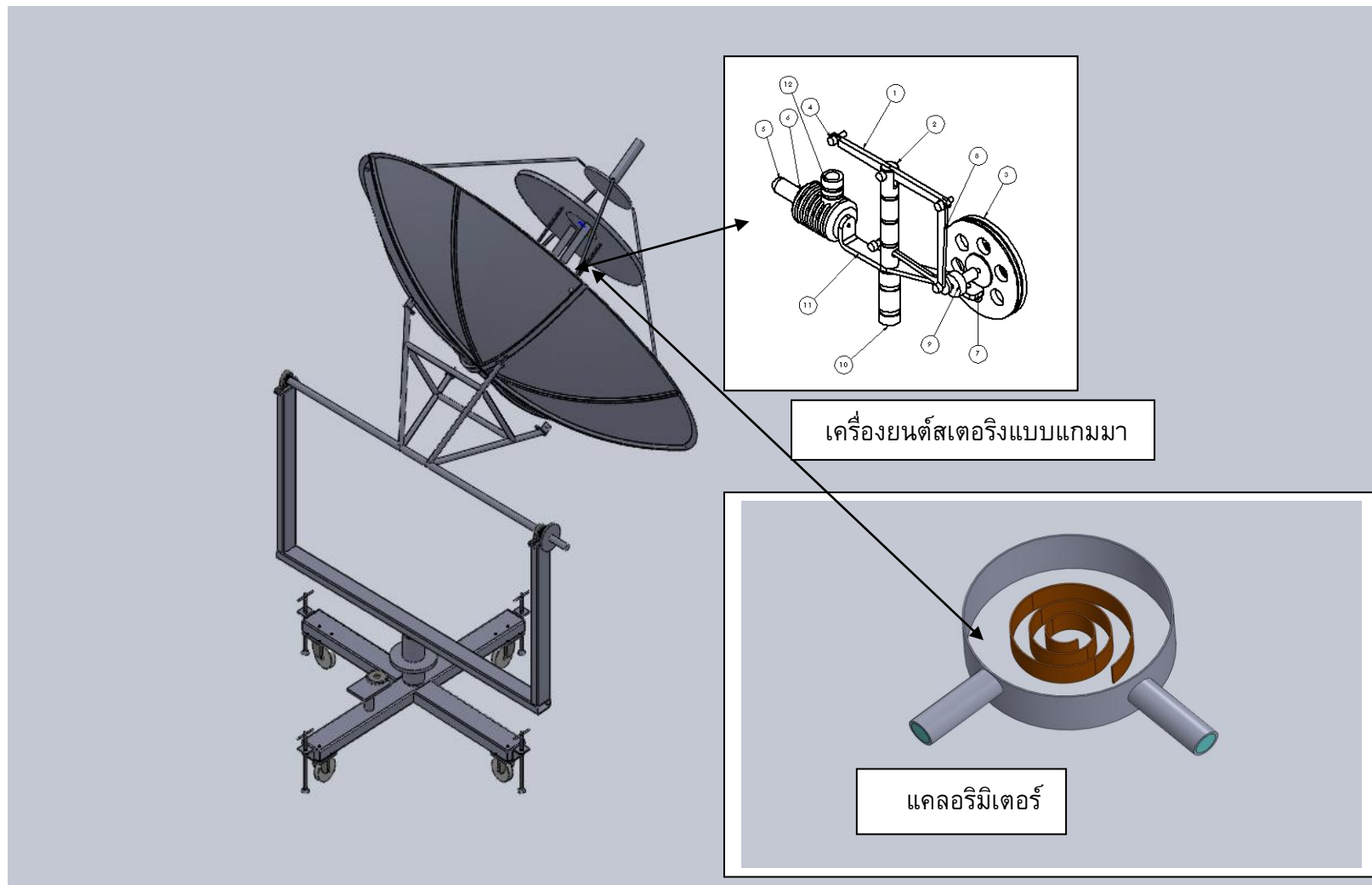
ITEM NO.	PARTNAME	QTY.
1	MOTOR STAND	1
2	FRAME	1
3	DRIVE SHAFT	1
4	SPROCKET	1
5	MAIN DISH	1
6	DISH RIB	1
7	METAL SHEET	1
8	SUB DISH	1
9	RIB	1
10	SUB DISH COLUMN	1
11	METAL SHEET	1
12	MAIN RIB	4
13	NUT	4
14	LINKAGE	4
15	COLUMN	1
16	COUNTER WEIGHT	1
17	ELECTRONIC CONTROL BOX	1
18	HORIZONTAL FRAME	1
19	AXLE	1
20	CLAMP STAND	4
21	AZIMUTH MOTOR STAND	1
22	MAIN FRAME	4
23	AZIMUTH CONTROL UNIT	1
24	AZIMUTH MOTOR AND SPROCKET	1
25	WHEEL	4

			Complete Assembly	
			COMPLETED ASSY	
DRAWING	KRESARAN SOOKKAMOON	DATE	Material	REV. 1
CHECKED	PRACHA BUNYAWANICHAKUL		SCALE:	DW 101

แบบแสดงอุปกรณ์และส่วนประกอบของจานพาราโบลาสองชั้นตอน



จานพาราโบลาสองชั้นตอนในหลายมุมมอง



การทดลองจานพาราโบลาสองชั้นตอนกับตัวรับรังสีได้แก่เครื่องยนต์สเตอร์ริงและแคลอริมิเตอร์



ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นายกฤษฎางค์ ศุกระมูล
วันเดือนปีเกิด	26 เมษายน 2517
สถานที่เกิด	จังหวัดสระบุรี
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	125/54 หมู่บ้านโดมทองวิลเลจ ต.สวนพริกไทย อ.เมือง จ. ปทุมธานี โทร 089-171-6397
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2529	ประถม จาก โรงเรียนอนุบาลสระบุรี
พ.ศ. 2535	มัธยมปลาย จาก โรงเรียนสระบุรีวิทยาคม
พ.ศ. 2539	ปริญญาตรี วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
พ.ศ. 2546	ปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรม สิ่งแวดล้อม) จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
พ.ศ. 2558	ปริญญาเอก ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต วิศวกรรมเครื่องกล คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ