



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

วิศวกรรมเครื่องกล

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับความเข้มของแสง
ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อน

Study on the Correlation of Water Flow Rate and Light Intensity
to the Efficiency of the Hot Water System

نامผู้วิจัย นายรุ่งทิวี ผดากาล

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์สุรัชย์ รดาการ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ณัฐศักดิ์ บุญมี, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ชาลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับความเข้มของแสง
ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อน

Study on the Correlation of Water Flow Rate and Light Intensity
to the Efficiency of the Hot Water System

โดย

นายรุ่งทิวี ผดากาล

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
พ.ศ. 2551

รุ่งทวี ผดากาล 2551: การศึกษาความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับความเข้มของแสงที่มี
ผลต่อประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อน ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
(วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์สุรัชย์ รดาการ, Ph.D. 107 หน้า

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับความเข้มของแสงที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบน้ำร้อน และแนวทางการในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อน โดยปรับปรุงแผงรับแสงให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพื่อนำน้ำร้อนมาใช้ในชีวิตประจำวัน และสามารถประยุกต์ใช้กับพลังงานแสงอาทิตย์ได้ การศึกษานี้ทำการทดลองในห้องทดลอง เพื่อปรับความเข้มแสงให้คงที่ และเป็นระบบเปิด โดยใช้ น้ำเป็นสารทำงาน และแผงรับแสง แบบแผ่นโค้งรูปพาราโบลา มีพื้นที่แผงรับแสง 2.24 ตารางเมตร ท่อรับแสงที่ใช้คือ ท่อสุญญากาศพื้นที่รับแสง 0.33 ตารางเมตร และใช้แสงจากหลอดไฟในการทดลอง การศึกษาประสิทธิภาพของระบบโดยการทดลองที่ 1 ปรับอัตราการไหลของน้ำที่ 0.0083 กิโลกรัมต่อวินาที ถึง 0.0499 กิโลกรัมต่อวินาที ที่ความเข้มแสงคงที่ 607.5 วัตต์ต่อตารางเมตร การทดลองที่ 2 ปรับความเข้มแสงที่ 474.75 วัตต์ต่อตารางเมตร ถึง 290.75 วัตต์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.0083 กิโลกรัมต่อวินาที การทดลองที่ 3 ทดลองระบบตามมาตรฐาน ASHRAE 93-97 โดยทำการปรับอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าแผงรับแสงที่ 25 องศาเซลเซียส ถึง 50 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของน้ำคงที่ 0.02 กิโลกรัมต่อวินาที ทดลองที่ความเข้มแสงคงที่ 881.26 วัตต์ต่อตารางเมตร

ผลการทดลองพบว่า เมื่อปรับอัตราการไหลของน้ำที่ความเข้มแสงคงที่ ประสิทธิภาพของระบบอยู่ในช่วง 70 เปอร์เซ็นต์ ถึง 72 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิของน้ำสูงสุด 53 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.0083 กิโลกรัมต่อวินาทีที่ความเข้มแสง 607.50 วัตต์ต่อตารางเมตร เมื่อทำการปรับความเข้มแสง ที่อัตราการไหลคงที่ พบว่า ประสิทธิภาพอยู่ที่ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิของน้ำสูงสุด 78 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 0.0083 กิโลกรัมต่อวินาที ที่ความเข้มแสง 1,290.75 วัตต์ต่อตารางเมตรและผลการทดสอบระบบตามมาตรฐาน ASHRAE 93-97 พบว่า ที่อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าแผงรับแสง 40 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของน้ำที่ออกจากแผงรับแสงสูงสุดที่ 50.17 องศาเซลเซียส และประสิทธิภาพของระบบประมาณ 53 เปอร์เซ็นต์ จากการทดลอง พบว่า อัตราการไหลของน้ำและความเข้มแสงส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบตามความสัมพันธ์ที่ได้ สามารถนำความสัมพันธ์นี้ไปประยุกต์ใช้ได้ต่อไป

Rungtawee Padakan 2008: Study on the Correlation of Water Flow Rate and Light Intensity to the Efficiency of the Hot Water System. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering.
Thesis Advisor: Associate Professor Surachai Radakarn, Ph.D. 107 pages.

The purpose of this research was to consider the water flow rate and the light Intensity to the efficiency of the hot water system so it can be applied with the light and pressures other. The Experiment was done in a laboratory for control of the light intensity and the flowing rate of the water in the system and laboratory temperature. The design and development of the hot water system was an open system. The hot water system composes the collector which has an area for the receiver of 2.24 m^2 and uses a mirror in reflecting. The receiver which was used in this research was a vacuum tube. It had an area of 0.33 m^2 . This experiment used a light bulb for simulation because we wanted to control light intensity have stability and change light intensity for other conditions. The experiment had 3 cases. In the first experiment, we changed water flow rate at 0.0083 kg/s to 0.0499 kg/s and kept the light intensity stable. It was about 607.5 W/m^2 . In the second experiment, we changed the light intensity at 474.75 W/m^2 to $1,290.75 \text{ W/m}^2$ and water flow rate was stable at 0.0083 kg/s . In the third experiment, we had to test the hot water system in ASHRAE STANDARD 93-77. We changed the temperature of the water before it went inside a collector. We used water flow rate at 0.02 kg/s and light intensity was stable at 881.26 W/m^2 .

In the first experiment, The findings revealed that the efficiency of the system was 70 % to 72 % and the maximum temperature of water was 53°C at 0.0083 kg/s of the water flow rate and the light intensity was stable at 607.50 W/m^2 . In the second experiment, The findings revealed that the maximum temperature of water was 78°C at 0.0083 kg/s of the water flow rate and the light intensity was $1,290.75 \text{ W/m}^2$. In the third experiment, The result of this study showed that at 40°C of temperature condition of the water before it went inside a collector. The maximum temperature of water was 50.17°C and the efficiency of system was 53 %. The findings reveal that the water flow rate and the light intensity affect to the efficiency of system.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิจัยนี้สำเร็จล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุรัชย์ รดาการ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา และผู้ควบคุมงานวิจัยนี้ ที่ท่านอาจารย์กรุณาให้แนวความคิด คำแนะนำในการดำเนินงานวิจัย ช่วยเหลือในเรื่อง วัสดุอุปกรณ์ในการทำวิจัย การตรวจทาน และคำแนะนำในการเรียบเรียงวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ตลอดจนแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้น อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ ซึ่งผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างมาก

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ณัฐศักดิ์ บุญมี อาจารย์กรรมการ ที่ให้คำแนะนำในการทำวิจัย คุณสมบัติ ในการให้ยืมอุปกรณ์ในการทำวิจัย และคุณสุกิจ ที่ช่วยประสานงาน รวมทั้งครูช่างที่คอยให้ความช่วยเหลือในการสร้างเครื่องทดสอบ รวมทั้งภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล และสถาบันวิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในการให้ความสนับสนุนในการทำวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณพ่อคุณแม่ พี่น้อง และเพื่อนๆ ที่ช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำงานวิจัยนี้สำเร็จด้วยดี ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยนี้ ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของท่านดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

รุ่งทิวี ผดากาล

กันยายน 2551

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	33
อุปกรณ์	33
วิธีการ	33
ผลการศึกษาและวิจารณ์	54
สรุปและข้อเสนอแนะ	68
สรุป	68
ข้อเสนอแนะ	69
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	70
ภาคผนวก	72
ภาคผนวก ก ตารางบันทึกผลการทดลอง	73
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ	84
ภาคผนวก ค การตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือวัด	98
ภาคผนวก ง ตารางแสดงค่าของคุณสมบัติต่างๆ	102

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ระดับอุณหภูมิในการใช้งานของน้ำร้อน	28
2	การวิเคราะห์ความแปรปรวนการทดสอบแบบ F	51
3	ความเข้มแสงที่ใช้ในการทดลอง	55
4	ความเข้มแสงที่แผ่รับแสง และท่อรับแสงที่ 270.00 ลักต์	56
5	ข้อมูลเฉลี่ยที่ได้จากผลการทดลอง ที่ความเข้มแสง 607.50 วัตต์ต่อตารางเมตร	56
6	ความร้อนที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ความเข้มแสง 607.50 วัตต์ต่อตารางเมตร	58
7	ความร้อนที่น้ำได้รับที่อัตราการไหลต่างๆ ที่ความเข้มแสงคงที่ 607.50 วัตต์ต่อตารางเมตร	58
8	ประสิทธิภาพของระบบที่อัตราการไหลต่างๆ ที่ความเข้มแสง 607.50 วัตต์ต่อตารางเมตร	59
9	อัตราไหลของน้ำผ่านท่อทองแดง และอัตราอุณหภูมิของน้ำทางออก	61
10	ความเข้มแสงที่แผ่รับแสง และท่อรับแสง ที่อัตราการไหลของน้ำคงที่ 0.0083 กิโลกรัมต่อวินาที	62
11	ค่าความร้อนที่จุดต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำคงที่ 0.0083 กิโลกรัมต่อวินาที	63
12	ข้อมูลเฉลี่ยที่ได้จากผลการทดลองที่ 2 ที่อัตราการไหลของน้ำคงที่ 0.0083 กิโลกรัมต่อวินาที	63
13	ประสิทธิภาพของระบบที่ความเข้มแสงต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำคงที่ 0.0083 กิโลกรัมต่อวินาที	65
14	อัตราส่วนของความเข้มแสงในการทดลองกับค่าคงตัวรังสีอาทิตย์ และประสิทธิภาพของระบบ	66

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก1 แสดงผลการทดลองที่อัตราการไหลของน้ำคงที่ 0.0083 กิโลกรัมต่อวินาที และความเข้มแสงคงที่ 607.50 วัตต์ต่อตารางเมตร	74
ก2 แสดงผลการทดลองที่อัตราการไหลของน้ำคงที่ 0.0166 กิโลกรัมต่อวินาที และความเข้มแสงคงที่ 607.50 วัตต์ต่อตารางเมตร	75
ก3 แสดงผลการทดลองที่อัตราการไหลของน้ำคงที่ 0.0249 กิโลกรัมต่อวินาที และความเข้มแสงคงที่ 607.50 วัตต์ต่อตารางเมตร	76
ก4 แสดงผลการทดลองที่อัตราการไหลของน้ำคงที่ 0.0332 กิโลกรัมต่อวินาที และความเข้มแสงคงที่ 607.50 วัตต์ต่อตารางเมตร	77
ก5 แสดงผลการทดลองที่อัตราการไหลของน้ำคงที่ 0.0415 กิโลกรัมต่อวินาที และความเข้มแสงคงที่ 607.50 วัตต์ต่อตารางเมตร	78
ก6 แสดงผลการทดลองที่อัตราการไหลของน้ำคงที่ 0.0498 กิโลกรัมต่อวินาที และความเข้มแสงคงที่ 607.50 วัตต์ต่อตารางเมตร	79
ก7 แสดงผลการทดลองที่ความเข้มแสงคงที่ 474.75 วัตต์ต่อตารางเมตร และอัตราการไหลของน้ำคงที่ 0.0083 กิโลกรัมต่อวินาที	80
ก8 แสดงผลการทดลองที่ความเข้มแสงคงที่ 607.50 วัตต์ต่อตารางเมตร และอัตราการไหลของน้ำคงที่ 0.0083 กิโลกรัมต่อวินาที	81
ก9 แสดงผลการทดลองที่ความเข้มแสงคงที่ 881.26 วัตต์ต่อตารางเมตร และอัตราการไหลของน้ำคงที่ 0.0083 กิโลกรัมต่อวินาที	82
ก10 แสดงผลการทดลองที่ความเข้มแสงคงที่ 1,290.75 วัตต์ต่อตารางเมตร และอัตราการไหลของน้ำคงที่ 0.0083 กิโลกรัมต่อวินาที	83
ข1 อัตราการไหลของน้ำ และประสิทธิภาพของระบบจากการทดลองที่ 2	87
ข2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้การแจกแจงแบบ F การทดลองที่ 1	91
ข3 แสดงผลการทดลองปรับอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าแผงรับแสง ที่ความเข้มแสงคงที่ 881.26 วัตต์ต่อตารางเมตร และอัตราการไหลของน้ำคงที่ 0.02 กิโลกรัมต่อวินาที	92

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ข4 แสดงผลการทดลองปรับอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าแผงรับแสง ที่ความเข้มแสงคงที่ 881.26 วัตต์ต่อตารางเมตร และอัตราการไหลคงที่ 0.02 กิโลกรัมต่อวินาที	93
ข5 แสดงค่าความร้อนที่ตำแหน่งต่างๆ โดยปรับอุณหภูมิของน้ำ ทางเข้าแผงรับแสง	94
ข6 แสดงประสิทธิภาพของระบบตามมาตรฐาน ASHRAE 93-97	95
ข7 ค่าความเฉลี่ยความเข้มแสงอาทิตย์รายเดือนมีนาคม ถึงเดือนมิถุนายน ปี 2549	96
ข8 ค่าประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อน โดยใช้ข้อมูลค่าความเฉลี่ย ความเข้มแสงอาทิตย์	97
ค1 แสดงค่าปริมาตรของน้ำที่อัตราการไหลของน้ำที่ค่าต่างๆ	99
ค2 แสดงค่าของอุณหภูมิของเทอร์โมมิเตอร์ในช่วงการวัดต่างๆ	100
ค3 แสดงค่าของความดันจริงกับความดันที่อ่านได้จากเครื่องวัดความดัน	101
ง1 แสดงค่าการนำความร้อนของโลหะ อโลหะ ของเหลว และ แก๊สบางชนิด	103
ง2 ค่าโดยประมาณของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย	103
ง3 แสดงแถบสี และความยาวของคลื่นแสง	104
ง4 ตารางแจกแจงแบบที (t-distribution)	104
ง5 ตารางแจกแจงแบบเอฟ (F-distribution) ($\alpha = 0.01$)	106

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แผนภาพการถ่ายเทความร้อนของระบบผลิตน้ำร้อน	9
2	หลอดไฟที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงในระบบ	35
3	การติดตั้งเครื่องกำเนิดแสง	36
4	แผงรับแสง	36
5	ท่อสุญญากาศใช้เป็นท่อรับแสงในระบบ	37
6	ท่อน้ำเข้าและออกจากแผงรับแสง	38
7	ท่อทองแดงใช้เป็นท่อน้ำในระบบ	38
8	ถังเก็บน้ำก่อนเข้าแผงรับแสง	39
9	เครื่องปรับอากาศของแผงรับแสง	40
10	เครื่องสูบน้ำในระบบ	40
11	เครื่องวัดอัตราการไหล	41
12	เทอร์โมมิเตอร์	42
13	การติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์กับท่อน้ำ	42
14	ลักค์มิเตอร์	43
15	เครื่องวัดความดัน	44
16	เครื่องทำความร้อน	45
17	เครื่องควบคุมระดับอุณหภูมิของน้ำ	45
18	ห้องทดลอง	46
19	แผนภาพระบบผลิตน้ำร้อน และตำแหน่งที่ทำการวัดค่าต่างๆ	54
20	ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับอุณหภูมิของน้ำ ที่ความเข้มแสง 607.50 วัตต์ต่อตารางเมตร	57
21	ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับประสิทธิภาพของระบบ ที่ความเข้มแสงคงที่ 607.50 วัตต์ต่อตารางเมตร	59
22	อัตราไหลของน้ำผ่านท่อทองแดง และอัตราอุณหภูมิของน้ำทางออก	61

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
23	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับอุณหภูมิของน้ำที่อัตราการไหลของน้ำคงที่ 0.0083 กิโลกรัมต่อวินาที	64
24	ความสัมพันธ์ของความเข้มแสง กับประสิทธิภาพของระบบที่อัตราการไหลของน้ำ 0.0083 กิโลกรัมต่อวินาที	65
25	แสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของความเข้มแสงในการทดลองกับค่าคงตัวรังสีอาทิตย์ กับประสิทธิภาพของระบบ	67
ภาพผนวกที่		
ข1	ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับประสิทธิภาพของระบบการทดลองที่ 1	88
ข2	ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของน้ำเข้าแผงรับแสง และอุณหภูมิของน้ำที่ออกจากแผงรับแสงของการทดสอบตามมาตรฐาน ASHRAE 93-97	93
ข3	ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของน้ำเข้าแผงรับแสง กับประสิทธิภาพของระบบ	95
ค1	แสดงอัตราการไหลของน้ำกับค่าเฉลี่ยของปริมาตรของน้ำ	100

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	พื้นที่แผงรับแสง หน่วย ตารางเมตร
A_{shade}	=	พื้นที่ของท่อรับแสง หน่วย ตารางเมตร
C_p	=	ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ หน่วย จูลต่อกิโลกรัมองศาเซลเซียส
E	=	ความสว่าง หน่วย ลักต์
I	=	กำลังส่องสว่าง หน่วย วัตต์ต่อตารางเมตร
I_b	=	ความเข้มแสง หน่วย วัตต์ต่อตารางเมตร
$\dot{m}$	=	อัตราการไหลของน้ำ หน่วย กิโลกรัมต่อวินาที
P	=	กำลังของหลอดไฟ หน่วย วัตต์
Q_{total}	=	พลังงานความร้อนที่ให้กับระบบทั้งหมดหน่วย วัตต์
Q_{useful}	=	พลังงานความร้อนที่ใช้ประโยชน์หน่วย วัตต์
Q_{loss}	=	พลังงานความร้อนที่สูญเสียจากระบบหน่วย วัตต์
$Q_{collector}$	=	พลังงานความร้อนที่แผงรับแสงได้รับหน่วย วัตต์
$Q_{reciever}$	=	พลังงานความร้อนที่ท่อรับแสงได้รับหน่วย วัตต์
$Q_{heatpipe}$	=	พลังงานความร้อนที่ท่อทำความร้อนได้รับหน่วยวัตต์
Q_u	=	ความร้อนที่น้ำได้รับจากท่อทำความร้อนหน่วย วัตต์
R	=	ระยะห่างจากหลอดไฟถึงพื้นที่พิจารณาหน่วย เมตร
T_a	=	อุณหภูมิของอากาศภายในห้อง หน่วย องศาเซลเซียส
T_i	=	อุณหภูมิของน้ำทางเข้าแผงรับแสง หน่วย องศาเซลเซียส
T_o	=	อุณหภูมิของน้ำทางออกจากแผงรับแสง หน่วย องศาเซลเซียส
α	=	ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของวัตถุ
τ	=	ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของวัตถุ
ρ	=	ค่าคงที่การสะท้อนแสงของกระจก
σ	=	ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลทซ์มันน์ (Stefan-Boltzmann constant) มีค่าเท่ากับ 5.67×10^{-8} หน่วย วัตต์ต่อตารางเมตรองศาเซลเซียสยกกำลังสี่
$\eta_{overall}$	=	ประสิทธิภาพทางความร้อนรวมของระบบ
$\eta_{collector}$	=	ประสิทธิภาพของแผงรับแสง
$\eta_{receiver}$	=	ประสิทธิภาพของท่อรับแสง
$\eta_{heaterpipe}$	=	ประสิทธิภาพของท่อทำความร้อน
η_u	=	ประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนจากท่อทำความร้อนไปสู่ น้ำ

การศึกษาความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับความเข้มของแสง ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อน

Study on the Correlation of Water Flow Rate and Light Intensity to the Efficiency of the Hot Water System

คำนำ

ปัจจุบันพลังงานเป็นสิ่งที่ต้องการอย่างมาก โดยเฉพาะน้ำมันและไฟฟ้า เมื่อจำนวนคนเพิ่มขึ้น ความต้องการพลังงานก็เพิ่มขึ้นด้วย จึงมีการใช้พลังงานจากแหล่งอื่นๆ เข้ามาทดแทน เช่น ถ่านหิน ชีวมวล แสงอาทิตย์ เป็นต้น โดยเฉพาะแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นพลังงานประเภทหมุนเวียนได้ สามารถนำมาใช้ได้อย่างไม่สิ้นสุด อีกทั้งสะอาดปราศจากมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นได้มีการศึกษา และการทำวิจัย พัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อนำมาใช้ทดแทนพลังงานจากที่ใช้แล้วหมดไป ในการใช้พลังงานแสงอาทิตย์นั้น ควรทราบศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ในพื้นที่ ซึ่งขึ้นกับความเข้มของแสงอาทิตย์ ที่ตกกระทบ จึงสามารถเลือกเทคโนโลยีเข้ามาใช้ได้เหมาะสม เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์สามารถแบ่งได้ 2 รูปแบบ โดยคำนึงถึงประโยชน์ที่จะได้รับดังนี้ คือ เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตน้ำร้อน เนื่องจากปริมาณของแสงอาทิตย์ในแต่ละวันไม่เท่ากัน ดังนั้น การปรับปรุงเครื่องมือเพื่อให้เหมาะสม และเพิ่มประสิทธิภาพของระบบให้ดียิ่งขึ้นเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง การพัฒนาแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ก็เป็นอีกวิธีหนึ่ง ซึ่งแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์มีหลายชนิดส่วนใหญ่เป็น แบบแผ่นเรียบ และแบบรวมแสง ซึ่งงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบรวมแสง ปัญหาหนึ่งที่พบในการออกแบบระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้แผงรับแบบรวมแสงคือ ประสิทธิภาพต่ำ และต้นทุนการผลิตสูง และการนำความร้อนที่ได้ ไปใช้ประโยชน์อย่างมีประสิทธิภาพ

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดได้นั้น เป็นเรื่องที่ทำได้ยาก เนื่องจากหลายปัจจัย เช่น ประสิทธิภาพของเครื่องมือ และอุปกรณ์ และปริมาณของแสงที่ตกมายังโลกไม่เท่ากัน ต่างพื้นที่ และเวลาที่ต่างกัน ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเครื่องติดตามดวงอาทิตย์เพื่อให้รับรังสีที่ตกกระทบแผงรับแสงมากที่สุด เทคโนโลยีนี้ได้ถูกนำมาใช้ร่วมกับแผงรับแสงอาทิตย์ แต่ยังไม่ได้รับความนิยมในการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการผลิตน้ำร้อน เนื่องจากราคาสูง และอีกหลายสาเหตุ ดังนั้นในการใช้งานของน้ำร้อน ทั้งในชีวิตประจำวัน ตามบ้านพักอาศัย

หรืออุตสาหกรรม สิ่งที่ต้องทราบแน่ชัดคือ ระดับอุณหภูมิของน้ำ หรือช่วงของอุณหภูมิของน้ำที่ต้องการประการหนึ่ง ในการนำแสงรับแสงอาทิตย์แบบรวมแสงโดยการไหลของน้ำในระบบเป็นการไหลแบบบังคับนั้น เมื่อทราบความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำและความเข้มของแสงที่แน่นอน สามารถระบุถึงช่วงของอุณหภูมิที่ได้ และสามารถเลือกใช้งานอุณหภูมินั้นๆ ได้ตามความต้องการ

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาการใช้แสงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบรวมแสง เพื่อนำมาผลิตน้ำร้อน โดยใช้การสะท้อนแสงจากแผงรับแบบรวมแสง มายังท่อสุญญากาศที่ใช้รับแสง ท่อสุญญากาศนี้มีคุณสมบัติในการดูดซับความร้อนที่ได้จากแสง ในลักษณะการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี ลดการสะท้อนของแสง และการถ่ายเทความร้อนออกสู่ภายนอก เกิดความร้อนภายในท่อแก้ว และสามารถนำความร้อนนี้ไปใช้ได้ ซึ่งในการทดลองจะใช้น้ำเป็นสารทำงาน ซึ่งน้ำจะไหลภายในท่อนำความร้อน ไปรับความร้อนจากท่อรับแสง จะได้น้ำร้อนไปใช้ การออกแบบการทดลองใช้แสงจากหลอดไฟในการทดลอง เพื่อควบคุมความเข้มแสงให้คงที่ และสามารถปรับความเข้มแสงได้เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ในงานวิจัยทำการศึกษา การถ่ายเทความร้อนของระบบ และความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับความเข้มของแสงที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบ เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ อุณหภูมิที่ต้องการตามความสัมพันธ์ที่ได้ และสามารถนำไปใช้กับพลังงานแสงอาทิตย์ได้ เพื่อนำแสงที่ได้มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ได้น้ำร้อนมาใช้ในชีวิตประจำวัน และช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้า และน้ำมันได้อีกด้วย

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับความเข้มของแสงที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อน
2. เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

ขอบเขตการวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษา และพัฒนาเครื่องทำน้ำร้อนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และสามารถประยุกต์ใช้กับพลังงานแสงที่มีอยู่ในธรรมชาติได้ด้วย โดยเน้นถึงความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำและความเข้มแสง มีขอบเขตการวิจัยดังนี้

1. ชุดทดสอบประกอบด้วยแผงรับแสงแบบแผ่นโค้งรูปพาราโบลา มีพื้นที่รับแสง 2.24 ตารางเมตร ท่อรับแสงใช้ท่อสุญญากาศมีพื้นที่รับแสง 0.33 ตารางเมตร ระบบเปิด ใช้น้ำเป็นสารทำงาน และใช้พลังงานไฟฟ้าผ่านหลอดไฟฟ้าเป็นแหล่งกำเนิดแสง การส่งน้ำไปรับความร้อนจากแสงโดยปั๊มน้ำ
2. การไหลของน้ำภายในระบบเป็นการไหลแบบราบเรียบ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถใช้เป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อนได้
2. สามารถใช้ความสัมพันธ์ที่ได้ในการพัฒนาระบบผลิตน้ำร้อน และเลือกช่วงของอุณหภูมิที่ใช้งานได้ตามอัตราการไหลของน้ำและความเข้มแสงต่างๆ
3. สามารถประยุกต์ใช้กับพลังงานแสงอาทิตย์ได้ เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานไฟฟ้า หรือจากเชื้อเพลิงในรูปแบบอื่น

การตรวจเอกสาร

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสง

1. ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสง

1.1 ประเภทของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสง

ระบบผลิตน้ำร้อนโดยใช้พลังงานจากแสงเป็นแหล่งให้พลังงานแบ่งเป็นสองระบบตามลักษณะการไหลของน้ำคือ การไหลของน้ำร้อนในระบบตามธรรมชาติ (Natural-Circulation System) และการไหลของน้ำร้อนในระบบแบบบังคับ (Forced-Circulation System) การไหลของน้ำร้อนในระบบตามธรรมชาติ ระบบประกอบด้วย แผงรับแสง และถังเก็บน้ำแบบการไหลธรรมชาติ (Norton *et al.*, 1992) มีหลักการทำงานดังนี้ เมื่อแผงรับความร้อนจากแหล่งกำเนิดแสง แสงจะผ่านชั้นแก้วที่อยู่ด้านหน้าของแผงรับความร้อนผ่านไปสู่ผิวท่อที่อยู่ด้านใน ทำให้อุณหภูมิของน้ำที่อยู่ด้านในสูงขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของน้ำน้อยลง จากนั้นน้ำไหลผ่านไปสู่ถังน้ำที่ใช้เก็บความร้อนของน้ำที่มีอุณหภูมิไว้อย่างดี และน้ำเย็นซึ่งมีความหนาแน่นมากกว่าจะไหลลงผ่านท่อไปสู่แผงรับความร้อน ซึ่งจะทำให้การทำงานเป็นไปอย่างต่อเนื่องต่อไป (ถนัด, 2545) ส่วนการไหลของน้ำร้อนในระบบแบบบังคับ (Wibulswas, 1985) เป็นการใช้เครื่องสูบน้ำให้หมุนเวียนในระบบ

1.2 ส่วนประกอบของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสง

ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงที่ศึกษาเป็นการไหลของน้ำภายในระบบแบบบังคับ โดยมีส่วนประกอบหลักดังนี้ แหล่งกำเนิดแสง แผงรับแสง ท่อรับแสง ท่อน้ำร้อน ถังเก็บน้ำร้อน และระบบหมุนเวียนหลัก

1.2.1 แหล่งกำเนิดแสง

แหล่งกำเนิดแสงสามารถใช้จากไฟฟ้าโดยผ่านทางหลอดไฟฟ้า หรือแหล่งกำเนิดแสงจากธรรมชาติ เช่น แสงจากดวงอาทิตย์ เป็นต้น

1.2.2 แผงรับแสง

โดยทั่วไปแผงรับแสงที่ใช้มี สองแบบ คือ แผงรับแสงแบบแผ่นราบ และแผงรับแสงแบบรวมแสง หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าแผงรับแสงแบบรวมรังสี ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึง แผงรับแสงแบบรวมแสงเป็นหลัก แผงรับแสงแบบรวมแสง (Concentrating Collector) (Duffie and Beckman, 1991) ประกอบด้วยสองส่วน คือ ตัวรวมแสง (Concentrator) และตัวรับแสง (Receiver) ตัวรวมแสง ทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อน หรือหักเหแสงที่ตกกระทบ มีหลายลักษณะ เช่น ทรงกระบอก หรือผิวโค้ง (Cylindrical or Surfaces of Refractor) ตัวรวมแสงแบบต่อเนื่อง หรือแบบแยกส่วน (Continuous or Segmented) ส่วนตัวรับแสงเป็นส่วนหนึ่งของระบบ ทำหน้าที่ดูดกลืนแสง และเปลี่ยนเป็นพลังงานรูปอื่น มีหลายรูปแบบเช่น แบบนูน แบบแบน หรือแบบเว้า และแบบที่มีแผ่นปิด และไม่มีแผ่นปิด การถ่ายเทพลังงานของแผงรับแสงจะมากหรือน้อยขึ้นกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ผิวดูดกลืน หมายถึง การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการรวมแสง ซึ่งอัตราส่วนการรวมแสง คือ อัตราส่วนช่องรับแสงต่อพื้นที่ของตัวรับแสง

1.2.3 ท่อรับแสง

ท่อรับแสงในระบบผลิตน้ำร้อน ใช้ท่อสุญญากาศ ซึ่งออกแบบมาเพื่อทำหน้าที่รับแสง หรือแสงอาทิตย์ สำหรับการนำมาใช้ในการผลิตน้ำร้อนโดยการดูดซับพลังงาน จากนั้นเปลี่ยนรูปเป็นความร้อนสำหรับผลิตน้ำร้อน ท่อสุญญากาศเคยนำมาใช้เป็นเวลาหลายปีมาแล้ว ที่หลายประเทศ เช่น เยอรมัน แคนาดา หรือ สหรัฐอเมริกาเป็นต้น ซึ่งหลายๆ ชนิดถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรม ท่อสุญญากาศที่นิยมนำมาใช้ประกอบด้วยท่อแก้วสองชั้น ระหว่างท่อแก้วทั้งสองเป็นสุญญากาศ ซึ่งเป็นท่อแก้วชนิดบอโรซิลิเกต (borosilicate glass) ท่อแก้วชั้นนอกเป็นท่อโปร่งแสงแสงสามารถผ่านเข้าไปได้ ท่อแก้วภายในจะฉาบด้วยสารพิเศษ เช่น อลูมิเนียม อลูมิเนียมผสมนิเกิล ซึ่งจะทำให้เกิดการดูดซับการแผ่รังสีจากแหล่งกำเนิดแสงเป็นอย่างดี รวมทั้งมีคุณสมบัติในการสะท้อนแสงออกสู่ภายนอกน้อย ด้านบนสุดของท่อแก้วทั้งสองหลอมรวมกัน และสูบลมอากาศที่อยู่ภายในออกทำให้เกิดสุญญากาศ ซึ่งความเป็นสุญญากาศนี้เป็นฉนวนที่ดี ลดการสูญเสียความร้อน โดยทั่วไปอุณหภูมิภายในท่ออาจสูงถึง 150 องศาเซลเซียส หรือ 304 องศาฟาเรนไฮต์ ซึ่งขึ้นกับเวลาและความเข้มแสง นอกจากนี้อุณหภูมิของท่อภายนอกใกล้เคียงกับอุณหภูมิบรรยากาศ ที่สำคัญคือ ระบบทำน้ำร้อนโดยใช้ท่อสุญญากาศนี้สามารถทำงานได้ในขณะที่อากาศเย็น (Morrison *et al.*, 2004)

1.2.4 ท่อน้ำร้อน

ท่อน้ำร้อนควรหุ้มฉนวนกันความร้อน เพื่อลดการสูญเสียความร้อนและความหนาของฉนวนที่เหมาะสม และให้ใช้วัสดุปิดผนึกด้านทานอากาศ เมื่อทำการติดตั้งภายนอกอาคาร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อในวงจรหมุนเวียนหลักต้องไม่น้อยกว่า 22 มิลลิเมตร (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2542)

1.2.5 ถังเก็บน้ำร้อน

ถังเก็บน้ำร้อนคือ ถังน้ำร้อน รวมถึงอุปกรณ์ประกอบทั้งหมดที่ใช้เก็บน้ำร้อน แบ่งออกเป็นสองชนิดคือ ถังเก็บน้ำร้อนเปลือกเดี่ยว และถังเก็บน้ำร้อนเปลือกผสม ถังเก็บน้ำร้อนเปลือกเดี่ยว หมายถึง ถังเก็บน้ำร้อนที่ถังชั้นใน และ ถังชั้นนอกทำจากวัสดุชนิดเดียว เช่น พลาสติก โลหะไมซ์เหล็ก หรือเหล็กกล้าไร้สนิม ถังเก็บน้ำร้อนเปลือกผสม หมายถึง ถังเก็บน้ำร้อนที่ถังชั้นนอกทำจากเหล็กกล้า และถังชั้นในทำจากวัสดุชนิดอื่น นอกจากนี้ถังเก็บน้ำร้อนต้องมีความร้อน โดยต้องไม่เสียหายในขณะที่ใช้งานหรือถูกทำให้ยุบตัว และไม่เป็นสื่อให้เกิดการกัดกร่อนกับส่วนใดๆ ของเครื่องทำน้ำร้อนที่สัมผัสวัสดุฉนวนต้องติดตั้งอยู่ในตำแหน่งที่ให้ประสิทธิภาพในการใช้งานคงที่ และป้องกันการถูกทำลายจากสัตว์ นอกจากนี้เปลือกนอกของถังเก็บน้ำร้อนต้องมีความแข็งแรง และทนการสึกกร่อนภายใต้ภาวะการใช้งาน (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2542)

1.2.6 ระบบหมุนเวียนหลัก

เมื่อถังเก็บน้ำร้อนอยู่ต่ำกว่าระดับแผงรับแสง จะต้องติดตั้งเครื่องสูบน้ำ เพื่อให้เกิดการไหลเวียนของน้ำตลอดทั้งระบบ โดยเครื่องสูบน้ำต้องเป็นชนิดที่ใช้กับของไหลถ่ายโอนความร้อนที่มีอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส

1.3 ประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสง

ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงในงานวิจัยนี้เป็นระบบเปิด อัตราการไหลของน้ำ และความเข้มแสงคงที่ การเก็บข้อมูลเมื่ออุณหภูมิของน้ำที่ออกจากแผงรับแสงคงที่ทุกๆ สภาวะการทดลอง

เพื่อให้เกิดความถูกต้องในการคำนวณหาประสิทธิภาพ โดยการหาประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสง พิจารณาจากคุณสมบัติของพลังงานดังนี้

พลังงานที่ให้กับระบบทั้งหมด = (พลังงานความร้อนที่ใช้ประโยชน์) + (พลังงานสูญเสีย)
จะได้

$$Q_{total} = Q_{useful} + Q_{loss} \quad (1)$$

จากสมการที่ 1 สามารถหาประสิทธิภาพที่อุปกรณ์ต่างของระบบได้ โดยประสิทธิภาพของแผงรับแสงคำนวณได้ดังนี้

$$\eta_{collector} = \frac{Q_{collector}}{Q} \quad (2)$$

จากสมการที่ 2 สามารถหาประสิทธิภาพของท่อรับแสงได้ดังนี้

$$\eta_{receiver} = \frac{Q_{reciever}}{Q_{collector}} \quad (3)$$

จากสมการที่ 3 สามารถหาประสิทธิภาพของท่อนำความร้อนที่อยู่ภายในท่อรับแสงได้ดังนี้

$$\eta_{heatpipe} = \frac{Q_{heatpipe}}{Q_{receiver}} \quad (4)$$

จากสมการที่ 4 สามารถหาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจากความร้อนที่น้ำได้รับกับท่อนำความร้อนได้ดังนี้

$$\eta_u = \frac{Q_u}{Q_{heatpipe}} \quad (5)$$

จากสมการที่ 2 ถึงสมการที่ 5 สามารถหาประสิทธิภาพทางความร้อนรวมของระบบ ดังนี้

$$\eta_{overall} = \eta_{collector} \times \eta_{receiver} \times \eta_{heatpipe} \times \eta_u \quad (6)$$

จะได้ประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อนจาก อัตราส่วนของความร้อนที่น้ำได้รับจากแผงรับแสงกับความร้อนที่ได้จากแผงรับแสงได้ดังนี้

$$\eta_{overall} = \frac{Q_u}{Q} \quad (7)$$

พลังงานความร้อนที่น้ำได้รับ พิจารณาจากอัตราการไหลของน้ำ ค่าคงที่ของน้ำ และผลต่างของอุณหภูมิของน้ำ (M. Li and L.L. Wang, 2006) ดังสมการที่ 8

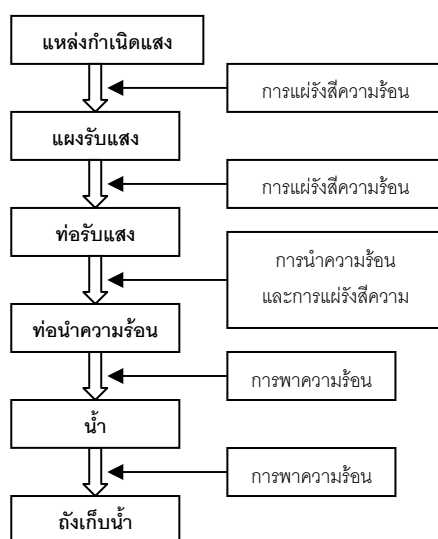
$$Q_u = m \cdot c_p (T_{out} - T_{in}) \quad (8)$$

ความร้อนที่ได้จากแสง พิจารณาจากผลต่างของพื้นที่รับแสงของแผงรับแสง ค่าคงที่การสะท้อนของกระจก และความเข้มแสงที่แผงรับแสงได้รับ สามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$Q = (A - A_{shade}) \rho I_b \quad (9)$$

2. การถ่ายเทความร้อนของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสง

การถ่ายเทความร้อนของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงประกอบด้วย การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน (Conduction Heat Transfer) การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน (Convection Heat Transfer) และการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน (Radiation Heat Transfer) (สุนันท์, 2545; Cengel and Yunus, 2003) การถ่ายเทความร้อนของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสง พิจารณาจากแผงรับแสงได้รับความร้อนโดยการถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสีความร้อนจากแหล่งกำเนิดแสง และสะท้อนแสงไปยังท่อรับแสง จากนั้นถ่ายเทความร้อนภายในท่อรับแสงให้กับท่อนำความร้อนที่อยู่ภายในท่อรับแสง โดยการแผ่รังสีความร้อน จากนั้นความร้อนจะส่งผ่านท่อนำความร้อนไปยังน้ำ เมื่อน้ำได้รับความร้อนแล้วพาความร้อนมาเก็บไว้ในถังเก็บน้ำร้อน



ภาพที่ 1 แผนภาพการถ่ายเทความร้อนของระบบผลิตน้ำร้อน

2.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน

การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน เป็นการไหลของความร้อนที่เคลื่อนที่จากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำ เมื่อโมเลกุลของตัวกลางมีการสัมผัสกันโดยตรง ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน กับการกระจายของอุณหภูมิภายในตัวกลาง ตามกฎของฟูเรียร์ การนำความร้อนเกิดขึ้นได้ทั้งในของแข็ง ของเหลว และแก๊ส แต่เนื่องจากการไหลหมุนเวียนเกิดขึ้นในของเหลว และแก๊ส ดังนั้นจึงมีการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนเกิดขึ้นในของเหลว และแก๊สด้วย ส่วนที่เกิดขึ้นในตัวกลางที่เป็นวัตถุทึบแสงโดยไม่มีการเคลื่อนที่ไหลภายในวัตถุนั้นจะเป็นการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนอย่างเดียว เมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิในวัตถุนั้น สมการการนำความร้อนพิจารณาจาก การอนุรักษ์พลังงานภายในก้อนวัตถุ โดยการสมดุลพลังงานของวัตถุขึ้นเล็กๆ ที่ความร้อนกำลังไหลผ่านโดยการนำความร้อน อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนใช้สัญลักษณ์ q_k ซึ่งแปรผันกับสัดส่วนของอุณหภูมิและระยะทางการเคลื่อนที่ของความร้อนคูณกับพื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน เมื่อ q_k คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนมีหน่วยเป็นวัตต์ A คือ พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่านมีหน่วยตารางเมตร T คือ อุณหภูมิมีหน่วยเป็นมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียสใช้สัญลักษณ์ K และ x คือ ระยะทางการเคลื่อนที่ของความร้อนมีหน่วยเมตรสัญลักษณ์ จะได้ดังสมการที่ 10

$$q_k \propto A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (10)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนที่เกิดขึ้นจริงนั้น ขึ้นกับค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ใช้สัญลักษณ์ k หน่วยการนำความร้อนคือ วัตต์ต่อตารางเมตรเคลวิน ซึ่งค่าการนำความร้อน เป็นคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวกลางที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนหาได้ดังนี้

$$q_k = -kA \cdot \frac{dT}{dx} \quad (11)$$

จากสมการที่ 11 เรียกว่า กฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ (Fourier's law conduction) เครื่องหมายลบในสมการ เป็นผลจากกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งกำหนดว่าความร้อนจะไหลจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำอีกทั้งอุณหภูมิจะลดลง เมื่อระยะทางการเคลื่อนที่ของความร้อนเพิ่มขึ้น

2.1.1 ค่าการนำความร้อน

ค่าการนำความร้อนเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของวัตถุ ข้อมูลเกี่ยวกับการนำความร้อนส่วนใหญ่ของวัตถุได้มาจากการวัดและการทดสอบ ส่วนค่าการนำความร้อนของอุณหภูมิต่างๆ ของแก๊สนั้น ไม่สามารถหาได้จากการวิเคราะห์กลไกการถ่ายเทความร้อน โดยการนำความร้อนของแก๊ส สามารถอธิบายได้จากทฤษฎีคิเนแมติ เนื่องจากโมเลกุลของแก๊สมีการเคลื่อนที่อิสระ ไม่มีเส้นทางที่แน่นอนตายตัว ดังนั้นโมเลกุลเหล่านั้นเกิดการชนกันขึ้นก็มีการแลกเปลี่ยนพลังงาน และโมเมนตัมซึ่งกันและกัน แต่เนื่องจากโมเลกุลที่มีอุณหภูมิสูงนั้นมีพลังงานจลน์มากกว่า ดังนั้นเมื่อโมเลกุลจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ก็จะพาพลังงานจลน์ไปในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่านั้นด้วย และเมื่อโมเลกุลที่มีพลังงานจลน์สูงเกิดการชนกับโมเลกุลที่มีพลังงานจลน์ต่ำกว่าก็จะมีการถ่ายเทพลังงานเกิดขึ้น กลไกการนำความร้อนทางกายภาพภายในของเหลวก็มีลักษณะเช่นเดียวกัน แต่เนื่องจากโมเลกุลของของเหลวนั้นมีจำนวนมากกว่าโดยทั่วไปแล้วค่าการนำความร้อนของวัตถุจะแปรไปตามอุณหภูมิ แต่การใช้งานส่วนใหญ่จะใช้ค่าการนำความร้อนคงที่ที่หาจากอุณหภูมิเฉลี่ย

2.1.2 การเปรียบเทียบการนำความร้อนกับการไหลของกระแสไฟฟ้า

การนำการไหลของความร้อนเปรียบเทียบกับการไหลของกระแสไฟฟ้า เพื่อช่วยให้สามารถวิเคราะห์ปัญหาการถ่ายเทความร้อนที่ซับซ้อนได้สะดวกยิ่งขึ้น โดยหลักการของวงจรไฟฟ้าที่เรียกว่า ความคล้ายคลึง (analogy) ระหว่างการไหลของความร้อนกับการไหลของกระแสไฟฟ้า เมื่อเขียนสมการที่ 11 ให้อยู่ในรูปสมการสมการไฟฟ้าตามกฎของโอห์ม เมื่อผลต่างของอุณหภูมิที่ตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่สอง ($\Delta T = T_1 - T_2$) เป็นศักย์ภาพทางด้านการความร้อน (thermal potential) และ $R_k = \frac{L}{kA}$ เป็นความต้านทานทางความร้อนแสดงดังสมการที่ 12

$$q_k = \frac{\Delta T}{R_k} \quad (12)$$

2.1.3 ความต้านทานสัมผัส

เมื่อผิวของวัตถุที่มีค่าการนำความร้อนแตกต่างกันสัมผัสกัน จะเกิดความต้านทานขึ้นที่ผิวสัมผัสของวัตถุนั้น ความต้านทานที่ผิวสัมผัสซึ่งเรียกว่า ความต้านทานสัมผัสเกิดขึ้นเมื่อวัตถุทั้งสองสัมผัสกันไม่สนิท และมีช่องไหลขึ้นบางๆ มากันอยู่ในระหว่างผิวสัมผัสทั้งสอง ซึ่งอาจเป็นอากาศ ของเหลว หรือสุญญากาศ ความต้านทานสัมผัสนี้เป็นฟังก์ชันของความหยาบของผิว แรงกดระหว่างผิวที่สัมผัสกันของไหลที่ขึ้นกลาง และอุณหภูมิที่ผิวสัมผัส การถ่ายเทความร้อนที่ผิวสัมผัสนี้ซับซ้อนมาก คือ จะเกิดการนำความร้อนขึ้นที่จุดสัมผัสของวัตถุ ส่วนการพาความร้อน และการแผ่รังสี ความร้อนจะไหลผ่านของไหลที่อยู่ระหว่างผิวทั้งสองในกรณีที่ผิวทั้งสองมีการสัมผัสที่ดี ความต้านทานสัมผัสก็จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ และอุณหภูมิของผิวสัมผัสทั้งสองก็จะมีขนาดที่เท่าๆ กัน แต่ถ้าหากมีการสัมผัสที่ไม่ดี อุณหภูมิของผิวสัมผัสทั้งสองก็จะมีขนาดที่แตกต่างกัน ถ้าหากฟลักซ์ความร้อน (Heat flux) ที่ไหลผ่านผิวสัมผัสเป็น q/A ส่วนความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวสัมผัสทั้งสองเป็น ΔT_i แล้ว ความต้านทานสัมผัสหาได้ดังสมการ 13

$$R_i = \frac{\Delta T_i}{q/A} \quad (13)$$

2.1.4 การนำความร้อนแบบมิติเดียวที่สภาวะต่างๆ คงที่ และไม่มีความร้อนเกิดขึ้นในระบบแกนของวัตถุรูปทรงกระบอก

การนำสมการ การนำความร้อนมาใช้ในปัญหาที่อุณหภูมิเป็นฟังก์ชันของแกนเพียงแกนเดียว สำหรับแกนของรูปทรงกระบอก และทรงกลมจะเป็นฟังก์ชันของแกนในแนวรัศมี เพียงแกนเดียวเท่านั้น และพิจารณาเฉพาะในกรณีค่าการนำความร้อนคงที่ และไม่มีความร้อนเกิดขึ้นในวัตถุ การหาอัตราการถ่ายเทความร้อนทำได้โดยหาค่าการกระจายของอุณหภูมิจากการนำความร้อนในรูปแบบที่ง่าย ๆ และทำการแก้สมการดิฟเฟอเรนเชียล จากนั้นพิจารณาเงื่อนไขขอบเขต และหาค่าคงที่ จากนั้นหาอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ไหลผ่านวัตถุจากกฎของฟูเรียร์ การนำความร้อนตามแนวรัศมีของวัตถุรูปทรงกระบอกกลวงยาว โดยมี r เป็นรัศมี, r_i เป็นรัศมีภายใน, r_o เป็นรัศมีภายนอก, l เป็นความยาวของทรงกระบอก, T_i เป็นอุณหภูมิของผิวด้านใน และ T_o เป็นอุณหภูมิของผิวด้านนอก สำหรับในกรณีที่สภาวะต่างๆ คงที่ วัตถุมีสมบัติคงที่ และไม่มีความร้อนเกิดขึ้นในวัตถุรูปทรงกระบอกกลวงนั้นแล้ว อัตราการไหลของความร้อนดังสมการที่ 14 และค่าความต้านทานความร้อนของวัตถุรูปทรงกระบอกกลวงนั้นมีค่าดังสมการที่ 15

$$q_k = \frac{T_i - T_o}{\ln(r_o/r_i)/2\pi kl} \quad (14)$$

$$R_t = \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi kl} \quad (15)$$

2.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน

การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนเกิดขึ้น เมื่อของไหลสัมผัสกับผิวของวัตถุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันเกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อน ระหว่างของไหลกับวัตถุ การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ การพาความร้อนแบบอิสระ และการพาความร้อนแบบบังคับ แรงที่ทำให้ของไหลเกิดการเคลื่อนไหวของการพาความร้อนแบบอิสระนั้นเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในก้อนของไหล เนื่องมาจากการที่ของไหลสัมผัสกับผิวของวัตถุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันจนทำให้เกิดแรงลอยตัวขึ้น ตัวอย่างการพาความร้อนแบบอิสระ เช่น การถ่ายเทความร้อนระหว่างผนัง หรือหลังคาบ้านที่เกิดขึ้นในวันที่มีลมพัด การพาความร้อนภายในกาต้มน้ำที่มีขดลวดให้ความร้อน หรือการถ่ายเทความร้อนจากผิวของตัวเก็บความร้อนที่ได้มาจาก

ดวงอาทิตย์ในช่วงที่ไม่มีลมพัด ส่วนการพาความร้อนแบบบังคับจะเกิดขึ้นเมื่อมีแรงภายนอกมาบังคับให้ของไหลเคลื่อนที่ผ่านผิววัตถุที่ร้อนกว่า หรือเย็นกว่า เนื่องจากการไหลของการพาความร้อนแบบบังคับมีความเร็วสูงกว่าแบบอิสระ ดังนั้นถ้าหากความแตกต่างของอุณหภูมิที่มีขนาดเท่าๆ กันแล้ว การพาความร้อนแบบบังคับก็จะมีอัตราการพาความร้อนที่สูงกว่า การพาความร้อนทั้งสองแบบสามารถหาอัตราการพาความร้อนที่อยู่ในรูปของกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) เมื่อ $\bar{h}_c$ คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลกับวัตถุ A คือ พื้นที่ผิวของวัตถุที่สัมผัสกับของไหลหน่วยตารางเมตร หรือหนึ่งหน่วยการนำจากการพาความร้อน หน่วยวัตต์ต่อเมตรเคลวิน T_s คือ อุณหภูมิของวัตถุหน่วยเคลวิน และ $T_{f,\infty}$ คือ อุณหภูมิของของไหลอิสระที่อยู่ห่างออกไปจากผิววัตถุมาก ๆ หน่วยของศาเคลวิน ได้ดังสมการที่ 16

$$q_c = \bar{h}_c A(T_s - T_{f,\infty}) \quad (16)$$

2.2.1 การพาความร้อนแบบบังคับภายในท่อที่ไหลแบบราบเรียบ

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบบังคับภายในท่อที่มีการไหลแบบราบเรียบ หาได้จากพลັกซ์ความร้อนกับโปรไฟล์ความเร็วที่ไม่เปลี่ยนรูป ในการหาสมการการอนุรักษ์พลังงาน ดังกล่าว พิจารณาจากของไหลรูปทรงกระบอกกลวงขึ้นเล็กน้อย ยาว dx ที่มีรัศมีภายในเป็น r และมีรัศมีภายนอกเป็น $r + dr$ เมื่อความร้อนไหลเข้าออกจากผนังของก้อนของของไหล โดยการนำตามแนวรัศมี ส่วนการพาความร้อนนั้นจะอยู่ในแนวแกนท่อ สำหรับอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำที่ไหลเข้าสู่ผนังของก้อนของไหลรูปทรงกระบอกกลวงหาได้จากสมการ

$$q_r = -k(2\pi r dx) \frac{\partial T}{\partial r} \quad (17)$$

2.2.2 การพาความร้อนจากของไหลที่ไหลผ่านท่อ

เมื่อต้องการหาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของของไหลที่ไหลผ่านท่อจากอุณหภูมิของของไหลเข้ากับอุณหภูมิของท่อ ที่กำหนดให้ สำหรับการไหลในท่อที่ยาว L ที่มีอุณหภูมิผิวเป็น T_s นั้น อัตราความร้อนรวมที่ท่อถ่ายเทให้กับของไหลนั้นจะต้องมีค่าเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของก้อนของของไหลที่ไหลผ่านท่อ เมื่อ T_{b1} คืออุณหภูมิเฉลี่ยของก้อนของไหลที่ไหลเข้าท่อ T_{b2} คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของก้อนของไหลที่ออกจากท่อ และ A คือ พื้นที่

สัมพัทธ์ระหว่างผนังท่อกับของไหล ดังนั้นเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 18 และค่าของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยรวม สำหรับการไหลที่ไหลผ่านท่อเป็นแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ 19

$$q_c = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T = \rho \frac{\pi D^2}{4} V_{av} c_p (T_{b1} - T_{b2}) \quad (18)$$

$$q_c = \bar{h}_c A (T_s - T_b)_{av} \quad (19)$$

2.2.3 การไหลในท่อแบบราบเรียบ

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของการไหลในท่อที่มีการไหลแบบราบเรียบ และ มีค่าของ $(Re_D Pr D/L) > 10$ นั้นหาได้จากสมการที่ Sieder และ Tate สร้างไว้ดังนี้

$$\bar{Nu}_D = 1.86(Re_D Pr)^{0.33} \left(\frac{D}{L} \right)^{0.33} \left(\frac{\mu_b}{\mu_s} \right)^{0.14} \quad (20)$$

คุณสมบัติต่างๆ ของของไหลที่อยู่ในสมการที่ 19 นั้นเป็นคุณสมบัติที่หาจากอุณหภูมิเฉลี่ย $T_{b,av}$ ของก้อนของไหล ส่วน $(\mu_b/\mu_s)^{0.14}$ ที่หาได้จากการทดลองนั้นเป็นตัวแก้ที่เกิดจากผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืด ทั้งนี้ เพราะของเหลวจะมีความหนืดน้อยลง เมื่ออุณหภูมิเริ่มสูงขึ้น ส่วนแก๊สกลับมีความหนืดสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ฉะนั้นเมื่อของเหลวได้รับความร้อน ของเหลวก่อนที่อยู่ใกล้ผนังก็จะมีความหนืดน้อยกว่าก้อนที่อยู่กลางท่อ จึงทำให้ของเหลวที่มีอุณหภูมิสูงมีความเร็วกว่าของเหลวที่มีอุณหภูมิต่ำ

2.3 การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน

2.3.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการแผ่รังสีความร้อน

การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน เป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วแสง พลังงานความร้อนที่เคลื่อนที่โดยการแผ่รังสีนี้สามารถเคลื่อนที่ผ่านที่ต่างๆ ได้ ความร้อนจากการแผ่รังสีสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้โดยไม่จำเป็น

ต้องมีตัวกลาง เช่น บริเวณที่เป็นสุญญากาศ เป็นต้น พลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีนั้นจะเคลื่อนที่ไปในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความเร็วเท่ากับความเร็วของแสง เท่ากับ 3×10^{10} เซนติเมตรต่อวินาที พลังงานที่เคลื่อนที่ไปในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นมีอยู่มากมายหลายชนิด เช่น รังสีเอ็กซ์ รังสีอินฟราเรด เป็นต้น จำนวนพลังงานที่ส่งออกจากผิววัตถุในรูปรังสีความร้อนนั้น ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสัมบูรณ์ และลักษณะของผิววัตถุที่สามารถแผ่รังสีได้สูงสุด หรือที่เรียกว่า วัตถุดำ เมื่อ q_r คือ อัตราความร้อนจากการแผ่รังสีหน่วยวัตถุ A คือ พื้นที่ผิวของตัวแผ่รังสีความร้อน หน่วยตารางเมตร T คือ อุณหภูมิของตัวแผ่รังสีความร้อน หน่วยของสเคลวิน และ σ คือ ค่าคงที่ของสตีฟานโบลทซ์มันน์ เท่ากับ 5.67×10^{-8} หน่วยวัตต์ต่อตารางเมตรของสเคลวินยกกำลังสี่ใช้สัญลักษณ์ จะได้อัตราการแผ่รังสีความร้อนเป็นดังสมการที่ 21

$$q_r = \sigma AT^4 \quad (21)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีของวัตถุดำนี้ แปรผันโดยตรงกับกำลังสี่ของอุณหภูมิสัมบูรณ์ ทั้งๆ ที่อัตราการแผ่รังสีความร้อนไม่ขึ้นอยู่กับสภาพของสิ่งแวดล้อม ปรากฏว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิของการแผ่รังสีจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิ ระหว่างวัตถุ 2 ชิ้น หรือมากกว่า 2 ชิ้น ที่กำลังแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งกันและกัน ถ้าวัตถุดำแผ่รังสีความร้อนไปยังวัตถุที่เป็นวัตถุดำด้วยกันแล้ว อัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิจากการแผ่รังสีของวัตถุดำที่มีอุณหภูมิ T_1 ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุดำหน่วยของสเคลวิน ไปยังวัตถุดำที่อยู่รอบๆ ซึ่งมีอุณหภูมิเป็น T_2 ซึ่งเป็นอุณหภูมิของวัตถุที่อยู่รอบๆ ซึ่งเป็นวัตถุดำด้วย มีหน่วยของสเคลวิน จะมีค่าเป็น

$$q_r = \sigma A_1(T_1^4 - T_2^4) \quad (22)$$

วัตถุจริงจะไม่สามารถแผ่รังสีความร้อนได้มากเท่ากับตัวแผ่รังสี ในอุดมคติที่เรียกว่าวัตถุดำ แต่จะแผ่รังสีได้น้อยกว่า ถ้าหากที่อุณหภูมิเท่า ๆ กันนั้นวัตถุจริงสามารถแผ่รังสีความร้อนในอัตราส่วนที่คงที่กับวัตถุดำได้ทุกความยาวคลื่นแล้ว วัตถุจริงนั้นเรียกว่า วัตถุเทา ซึ่งอัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิจากการแผ่รังสีของวัตถุเทาที่มีอุณหภูมิ T_1 ไปยังวัตถุดำที่อยู่รอบๆ และมีอุณหภูมิเป็น T_2 เมื่อ ε_1 คือ ค่าการแผ่รังสี (Emittance) ของวัตถุเทา มีค่าเท่ากับอัตราส่วน ของความร้อนจากการแผ่รังสีของวัตถุเทากับวัตถุดำอุณหภูมิเท่าๆ กัน ดังนี้

$$q_r = \sigma A_1 \varepsilon_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (23)$$

การศึกษาเรื่องการแผ่รังสีความร้อนนั้นจะมีทฤษฎีของคลื่นและทฤษฎีของอนุภาคเข้ามาเกี่ยวข้อง ทฤษฎีของคลื่น กล่าวว่า การเคลื่อนที่ของความร้อนจากการแผ่รังสีนั้นเหมือนกับการเคลื่อนที่ของคลื่นที่ส่ายไปมาด้วยความถี่ใช้สัญลักษณ์ ν ด้วยความยาวคลื่นใช้สัญลักษณ์ λ ดังนั้น ผลคูณระหว่างความถี่ และความยาวของคลื่นก็จะเป็นความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือความเร็วของแสง ดังสมการ 24

$$c = \lambda \cdot \nu \quad (24)$$

ส่วนทฤษฎีของอนุภาคนั้น ได้สมมุติว่าพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีจะเคลื่อนที่ไปในรูปของแพ็คเกจของพลังงาน (Packet of energy) ที่เรียกว่า โฟตอน ซึ่งโฟตอนแต่ละโฟตอนจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วแสงในระดับพลังงานที่แตกต่างกันไป บ้างก็เคลื่อนที่ด้วยระดับพลังงานที่สูง บ้างก็เคลื่อนที่ด้วยระดับพลังงานที่ต่ำ เมื่อ h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) มีค่าเท่ากับ 6.625×10^{-34} หน่วยจูลวินาที และ ν คือ ความถี่ของคลื่น หน่วยรอบต่อวินาที พลังงานดังกล่าวมีค่าเป็นดังสมการ 25

$$e = h \cdot \nu \quad (25)$$

โฟตอนที่มีความถี่ของคลื่นสูงก็จะมีพลังงานสูงกว่าโฟตอนที่มีความถี่ต่ำ ดังนั้นเมื่อวัตถุร้อนขึ้น อิเล็กตรอนอิสระก็จะกระโดดไปอยู่ในระดับที่มีพลังงานสูงขึ้นไป แต่เมื่ออิเล็กตรอนอิสระกลับมากอยู่ในระดับพลังงานเดิมแล้ว อิเล็กตรอนอิสระก็จะแพร่โฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับความแตกต่างของพลังงานในสองระดับนั้น ปกติแล้วอิเล็กตรอนที่ผิววัตถุส่วนใหญ่จะผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานมาแล้วทั้งสิ้น ดังนั้นพลังงานที่แพร่ออกไปจากผิวจะต้องเป็นพลังงานที่ได้มาจากทุกๆ ความถี่ของคลื่นพลังงานที่แพร่ออกมาจากวัตถุนี้ จะแพร่ออกมาด้วยอำนาจของอุณหภูมิของวัตถุก้อนนั้นๆ เราเรียกพลังงานดังกล่าวนี้ว่า ความร้อนจากการแผ่รังสี (thermal radiation) โฟตอนนอกจากจะแพร่ออกจากผิวได้ด้วยการทำให้ผิวนั้นร้อนขึ้นแล้ว ยังมีวิธีอื่นๆ อีกมากมาย เช่น การบังคับให้ลำอิเล็กตรอนไปตกกระทบลงบนชิ้นโลหะเพื่อผลิตรังสีเอ็กซ์ ซึ่งเป็นรังสีคลื่นสั้น ที่อยู่ทางด้านปลายสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น สำหรับคลื่นที่มีความยาวอยู่ระหว่างรังสีเอ็กซ์กับคลื่นวิทยุ คือ คลื่นของความร้อนจากการแผ่รังสีที่แพร่ออกมาจากวัตถุด้วยอำนาจของอุณหภูมิของวัตถุก้อนนั้น ช่วงของความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งหมดนี้ เรียกว่า สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic spectrum) สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แบ่งออกเป็นความยาวช่วง

ต่างๆ ของคลื่น สำหรับความร้อนจากการแผ่รังสีที่แผ่ออกมาจากผิวของวัตถุด้วยอำนาจของอุณหภูมิ นั้นจะมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 10^{-7} ถึง 10^{-4} ส่วนความร้อนจากการแผ่รังสีที่สามารถมองเห็นได้ อยู่ในช่วงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวประมาณ 3.8×10^{-7} ถึง 7.6×10^{-7} เมตร

2.3.2 ฟิสิกส์ของการแผ่รังสีความร้อน

เพื่อให้เกิดความเข้าใจในเบื้องต้นเกี่ยวกับฟิสิกส์ของการแผ่รังสีความร้อน ผู้วิจัย ได้รวบรวมมาประกอบด้วยวัตถุดำ (Black body) กฎของพลางค์ (Plank's Law) กฎการเคลื่อนที่ของวิน (Wien's Displacement Law) กฎของสเตฟาน-โบลทซ์มันน์ (Stefan-Boltzmann Law) และคุณสมบัติการแผ่รังสี มีรายละเอียดดังนี้

- วัตถุดำ

วัตถุดำ คือ วัตถุที่สามารถแผ่ และดูดซึมพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีได้ สูงสุด เมื่อมีอุณหภูมิเท่าๆ กัน วัตถุดำเป็นวัตถุมารฐานที่มีไว้สำหรับให้วัตถุอื่นใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ เช่น ปิ๊มและกังหัน ที่มีเอลทาลปีคังที่ เป็นต้น

- กฎของพลางค์

วัตถุดำเมื่อถูกเผาให้ร้อนจนกระทั่งมีอุณหภูมิเท่ากับ T ก็จะมีโฟตอนแผ่ออกมาจากผิว จำนวนโฟตอนที่แผ่ออกมาจากผิวนั้นจะขึ้นอยู่กับระดับอุณหภูมิ T ของผิววัตถุนั้นๆ แมคพลางค์ ได้พิสูจน์ให้เห็นในปี ค.ศ. 1900 ว่า พลังงานที่แผ่ออกมาจากวัตถุดำที่อุณหภูมิ T ด้วยความยาวคลื่น λ นั้น จะมีค่าเป็นดังสมการ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการแผ่รังสีโมโนโครแมติก กับอุณหภูมิ และความยาวคลื่นของวัตถุที่อยู่ในสมการ เรียกว่า กฎของพลางค์ เมื่อ E_{b_λ} คือ กำลังการแผ่รังสีโมโนโครแมติก หรือกำลังการแผ่รังสีสเปกตรัม (Monochromatic or spectral emissive power) ที่อุณหภูมิ T ของวัตถุดำ C_1 คือ ค่าคงที่จากการแผ่รังสีค่าแรก มีค่าเท่ากับ 3.7418×10^{-16} วัตต์ต่อตารางเมตร C_2 คือ ค่าคงที่จากการแผ่รังสีค่าที่สอง มีค่าเท่ากับ 1.4388×10^{-2} เมตรองศาเคลวินใช้สัญลักษณ์ T คือ อุณหภูมิ หน่วยองศาเคลวิน และ λ คือ ความยาวคลื่น หน่วยไมโครเมตรใช้สัญลักษณ์ สามารถหาลำดับการแผ่รังสีโมโนโครแมติก หรือกำลังการแผ่รังสีสเปกตรัมที่อุณหภูมิ T ของวัตถุดำได้ดังนี้

$$Eb_\lambda = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad (26)$$

- กฎิสเพลชเมนต์ของวิน

ความยาวคลื่นที่วัตถุดำให้กำลังการแผ่รังสีสูงสุดของอุณหภูมิที่กำหนดให้ นั้นสามารถหาได้จาก การดิฟเฟอเรนเชียลค่า Eb_λ ในสมการ 26 โดยมุ่งที่ค่า λ ซึ่งเป็นความยาวของคลื่นแล้วให้เท่ากับศูนย์ และ $\lambda_{\max}$ คือ ความยาวคลื่นที่วัตถุดำสามารถให้กำลังการแผ่รังสีโมโนโครแมติกสูงสุดสำหรับอุณหภูมิ T นั้นๆ ดังนี้

$$\frac{dEb_\lambda}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} \left[\frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)_{T=\text{const.}}} \right] = 0 \quad (27)$$

จากการดิฟเฟอเรนเชียลนี้จะให้ค่า

$$\lambda_{\max} T = 2.898 \times 10^{-3} \quad (28)$$

จากสมการที่ 28 มีชื่อเรียกว่า กฎิสเพลชเมนต์ของวิน สำหรับเส้นทางการเคลื่อนที่หรือ โลกัศของ $\lambda_{\max}$ กำลังการแผ่รังสีสูงสุดของวัตถุดำนั้นสามารถหาได้ด้วยการแทนค่า $\lambda_{\max}$ ลงในสมการจะได้กำลังการแผ่รังสีสูงสุดของวัตถุดำ ดังนี้

$$(Eb_\lambda)_{\max} = 1.287 \times 10^{-5} T^5 \quad (29)$$

การศึกษากฎิสเพลชเมนต์ของวิน โดยป้อนกระแสไฟฟ้าให้หลอดไฟฟลูออโรเจนกระทั้งไส้หลอดไฟ ซึ่งเป็นเส้นลวดเล็กๆ ร้อนจนอุณหภูมิเท่ากับ 900 องศาเซลวิน ดังนั้นเมื่อแทนค่า T ในสมการที่ 29 ด้วย 900 องศาเซลวิน ก็จะได้ความยาวคลื่น ที่ไส้หลอดไฟให้กำลังการแผ่รังสีสูงสุดประมาณ ได้เท่ากับ 3.2×10^{-6} เมตร เมื่อพิจารณาพบว่าเป็นความยาวคลื่นของรังสีอินฟราเรด ในกรณีดังกล่าวนี้หากเอามือไปอยู่ใกล้ๆ หลอดไฟแล้วก็จะรู้สึกร้อน ทั้งนี้เพราะว่ามีพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีที่แผ่ออกมาจากเส้นลวดมาตกกระทบบนฝ่ามือ เมื่ออุณหภูมิของไส้หลอดไฟเพิ่มสูงขึ้น จำนวนพลังงานความร้อนของการแผ่รังสีก็จะเพิ่มมากขึ้น และอุณหภูมิเพิ่มถึงประมาณ 1,000 องศาเซลวินแล้ว พลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีตกอยู่ในช่วงของคลื่น

ที่ขาว หรือทางด้านสีแดงของสเปกตรัมที่มองเห็นได้เพียงนิดเดียว ทำให้สามารถมองเห็นพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีที่แพร่ออกมาได้ด้วยตาเปล่า และจะมองเห็นไส้หลอดไฟมีสีแดงเรื่อ (red dull) แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นไปอีก พลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีที่ตกอยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่สามารถมองเห็นได้ก็จะมากยิ่งขึ้น และเมื่ออุณหภูมิสูงถึง 1,600 องศาเคลวิน พลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีที่แพร่ออกมาทั้งหมด ก็จะตกอยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่สามารถมองเห็นได้ ดังนั้นไส้หลอดไฟในช่วงนี้ก็จะร้อนมากจนกระทั่งมองเห็นเป็นสีขาว

ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งของพลังงานความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงมาก ผิวของดวงอาทิตย์จะมีอุณหภูมิประมาณ 5,800 องศาเคลวิน ดังนั้นความยาวคลื่นที่สามารถให้กำลังการแผ่รังสีสูงสุดของดวงอาทิตย์ หรือ $\lambda_{\max}$ ของดวงอาทิตย์จากกฎของวินก็จะมีค่าเท่ากับ 5.2×10^{-7} เมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นในช่วงกลาง ๆ ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถมองเห็นได้

ตาของมนุษย์เป็นตัวรับสัญญาณที่ดีสำหรับพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีที่มีความยาวคลื่นตกอยู่ในช่วงที่สามารถมองเห็นได้ วัตถุสีขาวที่อยู่ในแค่นั้นจะสะท้อนพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีกลับออกไปได้เกือบทั้งหมด ในทางปฏิบัติจะถือว่าไม่มีการดูดซึมเอาพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีที่อยู่ในช่วงที่เรามองเห็นได้เอาไว้เลย ส่วนวัตถุดำจะดูดซึมเอาพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่นได้ทั้งหมด และจะไม่สะท้อนเอาพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีที่มาจากกระทบใดๆ กลับออกไปเลย ดังนั้นจึงทำให้มองเห็นวัตถุดังกล่าวนี้เป็นสีดำ เนื่องจากตามนุษย์ไม่สามารถมองเห็นรังสีของพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีที่อยู่นอกช่วงของความยาวคลื่นที่สามารถมองเห็นได้ ดังนั้นการทำนายพฤติกรรมของวัตถุดำ จึงทำนายได้เฉพาะช่วงแคบๆ ของความยาวคลื่นเท่านั้น และเมื่อศึกษาถึงคุณสมบัติโมโนโครแมติก จะเห็นได้ว่าผิวของวัตถุบางชนิดที่เป็นตัวดูดซึมพลังงานความร้อน จากการแผ่รังสีที่ดีในช่วงความยาวคลื่นที่สามารถมองเห็นได้ และมองเห็นเป็นสีดำนั้นอาจเปลี่ยนแปลงไปเมื่อพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีนั้นอยู่ในช่วงความยาวคลื่นของรังสีอินฟราเรด ดังนั้นจึงทำให้วัตถุดังกล่าวเป็นตัวดูดซึมพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีที่เลวลง ในทางตรงกันข้าม วัตถุสีขาวซึ่งเป็นตัวดูดซึมพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีที่เลวเมื่อพลังงานความร้อนอยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นได้ก็อาจจะกลายเป็นตัวดูดซึมพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีที่ดี เมื่อพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีนั้นอยู่นอกช่วงความยาวคลื่นที่สามารถมองเห็นได้

- กฎของสเตฟาน-โบลทซ์มันน์ (Stefan-Boltzmann Law)

พลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีที่ได้มาจากทุก ๆ ความยาวคลื่นต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่แผ่ออกมาจากผิวด้วยอุณหภูมิสัมบูรณ์นั้นมีชื่อว่า กำลังการแผ่รังสีรวม (Total emissive power) และหากผิวนั้นเป็นผิวของวัตถุดำแล้ว กำลังการแผ่รังสีรวมก็จะต้องหาจากการอินทิเกรตทั่วทุกความยาวคลื่นตามกฎของพลาंक นั่นคือ

$$Eb = \int_0^{\infty} Eb_{\lambda} \cdot d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} = \sigma T^4 \quad (30)$$

จากสมการ 30 นี้มีชื่อเรียกว่า กฎของสเตฟาน-โบลทซ์มันน์ สำหรับค่า σ นั้นเป็นค่าคงที่ซึ่งมีชื่อเรียกว่า ค่าคงที่สเตฟาน-โบลทซ์มันน์ (Stefan-Boltzmann constants) และมีค่าเป็น 5.67×10^{-8} วัตต์ต่อตารางเมตรองศาเคลวินยกกำลังสี่ จะเห็นได้จากกฎของสเตฟาน-โบลทซ์มันน์ว่า ในกรณีที่อุณหภูมิต่ำๆ นั้นแทบจะไม่มีผลกระทบจากการแผ่รังสีความร้อนเลย ทั้งนี้เพราะ σ ในที่นี้มีค่าน้อยมาก จะเห็นได้ว่าพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีของวัตถุที่มีอุณหภูมิ 300 องศาเคลวินนั้นจะมีค่าเพียง 460 วัตต์ต่อตารางเมตรเท่านั้น และเมื่อนำเอาค่าดังกล่าวเปรียบเทียบกับพลັกซ์ความร้อนจากการพาความร้อนที่ถ่ายเทความร้อนจากผิววัตถุไปยังของไหลที่มีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย 100 วัตต์ต่อตารางเมตรองศาเคลวิน และเมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิววัตถุกับของไหลต่ำถึง 50 องศาเคลวิน แล้วก็จะมียังเศษหนึ่งส่วนสิบเท่าของพลັกซ์ความร้อนจากการพาความร้อนเท่านั้น ดังนั้นเราจึงมักตัดผลกระทบจากการแผ่รังสีความร้อนนี้ทิ้ง เมื่อวัตถุนั้นมีอุณหภูมิต่ำ แต่อย่างไรก็ตาม หากวัตถุนั้นมีอุณหภูมิสูง จะตัดความร้อนจากการแผ่รังสีนี้ทิ้งไม่ได้ ทั้งนี้เพราะความร้อนจากการแผ่รังสีจะแปรค่าตามอุณหภูมิ สัมบูรณ์ยกกำลังสี่

- คุณสมบัติการแผ่รังสี

คุณสมบัติการแผ่รังสีบอกให้ทราบว่าพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีจะมีปฏิกิริยาอย่างไรต่อผิวของวัตถุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะบอกให้ทราบว่าผิวของวัตถุสามารถที่จะแพร่ หรือสะท้อน และส่งพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีผ่านวัตถุได้มากหรือน้อยเพียงไร โดยทั่วไปแล้วคุณสมบัติการแผ่รังสีจะเป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่นที่สามารถมองเห็นได้แต่ถ้ารังสีนั้น อยู่ในช่วงของรังสีอินฟราเรดผิวนั้นกลับกลายเป็นตัวสะท้อนรังสีที่เลวคุณสมบัติที่บอกให้ทราบว่า วัตถุมีพฤติกรรมเชิงฟังก์ชันต่อความยาวคลื่นอย่างไรนั้นเรียกว่า คุณสมบัติโมโนโครแมติก (Monochromatic properties)

หรือคุณสมบัติสเปกตรัม (Spectral properties) นอกจากนี้คุณสมบัติการแผ่รังสียังเป็นฟังก์ชันของทิศทางที่พลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีไปตกกระทบบนผิวของวัตถุอีกด้วย คุณสมบัติที่บอกให้ทราบว่าการกระจายของพลังงานแปรตามทิศทางอย่างไรนั้น เรียกว่า คุณสมบัติเชิงทิศทาง (Direction properties) ถ้าต้องการทราบอุณหภูมิของผิววัตถุด้วยการสมดุลพลังงานของผิวแล้ว ก็จะทราบคุณสมบัติการแผ่รังสีของผิววัตถุนั้นและของผิวอื่นๆ ที่มีการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนกัน แต่ถึงแม้ว่าจะทราบคุณสมบัติสเปกตรัม และคุณสมบัติเชิงทิศทางของทุกผิวแล้วก็ตาม ก็ยังคงต้องมีการวิเคราะห์เช่นเดิม ปัญหาที่ซับซ้อนและขาดรายละเอียดทางด้านคุณสมบัติการแผ่รังสีความร้อนอย่างสิ้นเชิงนั้นควรจะหาวิธีแก้ปัญหานี้ให้ง่ายขึ้น ซึ่งทำได้ด้วยการใช้ค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติการแผ่รังสีจากทุกความยาวคลื่น และทุกทิศทาง คุณสมบัตินี้เรียกว่า คุณสมบัติรวม (total properties) พิจารณารังสีของพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีที่ตกกระทบบนผิววัตถุ พลังงานความร้อนรวมจากการแผ่รังสีที่มาตกกระทบนี้นี้หมายถึง พลังงานความร้อนรวมจากการแผ่รังสีที่ส่งมาจากทุกทิศทาง จะเป็นแหล่งที่เป็นตัวกำเนิดความร้อนเอง หรือไม่ก็ได้ ในที่นี้ใช้สัญลักษณ์ G เป็นสัญลักษณ์ พลังงานจากการแผ่รังสีเมื่อตกกระทบบนผิวของวัตถุ แล้วจะมีพลังงานบางส่วนถูกวัตถุนั้นดูดซึมเอาไว้ บางส่วนก็จะถูกสะท้อนกลับไป ส่วนที่เหลือจะถูกส่งทะลุผ่านออกไปจากวัตถุก่อนหน้านี้ อัตราส่วนของพลังงานที่ถูกดูดซึมเอาไว้ต่อพลังงานรวมที่มาตกกระทบนั้นเรียกว่า ค่าการดูดซึมรังสี (absorptivity) และใช้สัญลักษณ์ α อัตราส่วนของพลังงานที่สะท้อนกลับออกไปต่อพลังงานรวมที่มาตกกระทบนั้นเรียกว่า ค่าการสะท้อนรังสี (reflectivity) ใช้สัญลักษณ์ ρ และอัตราส่วนของพลังงานที่ถูกส่งกระทบผ่านหรือถูกส่งผ่านต่อพลังงานรวมที่มาตกกระทบนั้นเรียกว่า ค่าการส่งผ่านรังสี (transmissivity) ใช้สัญลักษณ์ τ จะเห็นได้ว่าเมื่อสมดุลพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีบนวัตถุ และจะเห็นได้ว่า พลังงานความร้อนรวม G ที่ตกกระทบนี้นี้จะต้องเท่ากับผลบวกของพลังงานที่ถูกดูดซึมเอาไว้กับพลังงานที่สะท้อนกลับ และพลังงานที่ถูกส่งผ่าน ดังนั้น จะได้สมการ $\alpha G + \rho G + \tau G = G$ เมื่อหารด้วย G ทุกพจน์จะได้

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (31)$$

คุณสมบัติการแผ่รังสีที่สำคัญอีกคุณสมบัติหนึ่งก็คือ ค่าการแผ่รังสี (emissivity) ใช้ ε เป็นสัญลักษณ์ ค่าการแผ่รังสีของวัตถุใด ๆ เป็นอัตราส่วนของพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีที่แผ่ออกมาจากวัตถุนั้นกับพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีที่แผ่ออกมาจากวัตถุดำ เมื่อวัตถุทั้งสองมีอุณหภูมิเท่าๆ กัน ดังนั้นค่าการแผ่รังสี ในบรรดาวัตถุที่มีอุณหภูมิเท่าๆ กันนั้น วัตถุดำจะ

สามารถแพร่รังสีได้มากที่สุด ดังนั้น ค่าการแพร่รังสีของวัตถุต่างๆ จึงมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 เสมอ และเมื่อวัตถุตั้งกล่าวเป็นวัตถุดำแล้ว วัตถุดังกล่าวนั้นจะมีค่า $E = Eb$ และ $\varepsilon = \alpha = 1$

$$\varepsilon = \frac{E}{Eb} = \frac{E}{\sigma T^4} \quad (32)$$

3. แสงและการคำนวณเกี่ยวกับแสง

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ทำการใช้แสงจากพลังงานไฟฟ้าผ่านหลอดไฟ เพราะต้องการความเข้มแสงที่คงที่ในการทดลอง ดังนั้นควรมีความรู้ ความเข้าใจในเบื้องต้นเกี่ยวกับแสง ซึ่งได้รวบรวมมาประกอบด้วย ทฤษฎีแสง การแบ่งชนิดของแสง รังสี และความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการส่องสว่าง มีรายละเอียดดังนี้

3.1 ทฤษฎีแสง

ทฤษฎีที่ใช้อธิบายคุณสมบัติของแสงมีอยู่หลายทฤษฎี (วัฒนา, 2539) เช่น ทฤษฎีอนุภาค ทฤษฎีคลื่น ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์ และทฤษฎีควอนตัม เมื่อประมาณกลางศตวรรษที่ 17 ของเซอร์ไอแซกนิวตัน แห่งอังกฤษ เสนอว่าแสงเป็นอนุภาค (The Corpuscular Theory) โดยกล่าวว่า ลำของแสงสว่างนั้น เป็นแสงที่ประกอบด้วยอนุภาคเล็กๆ ที่เรียกว่าอนุภาคโฟตอน ต่อมาคริสเตียน ไฮเกนส์ แห่งประเทศฮอลแลนด์ เสนอว่า แสงเป็นคลื่นชนิดหนึ่ง เคลื่อนที่ผ่านได้ในตัวกลางที่ไม่มีตัวตน หรือแม้แต่สุญญากาศ ซึ่งทฤษฎีนี้คล้ายกับนายแพทย์โทมัสยังเป็นชาวอังกฤษ ได้พิสูจน์ให้เห็นว่า แสงเป็นคลื่นเช่นเดียวกับคลื่นน้ำ แต่เป็นคลื่นที่แคบและสั้นกว่า โดยคลื่นแสงมีความยาวประมาณเศษหนึ่งส่วนห้าหมื่นนิ้วเท่านั้น ต่อมาเมื่อปี พ.ศ. 2470 เจมส์ คล๊าก แมกซ์เวลล์ นักฟิสิกส์ชาวสก็อตแลนด์ ได้เสนอทฤษฎีที่ใช้กันทั่วไป โดยกล่าวว่า แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีความเร็วเท่ากับคลื่นความร้อน คลื่นวิทยุ ฯลฯ นอกจากนี้ พลังค์ ยังสรุปทฤษฎีแสงในลักษณะที่คล้ายๆ กันว่า แสงเคลื่อนที่ออกตามขวางรอบด้นกำเนิด มีลักษณะเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เคลื่อนที่ไปตามขวาง มีความเร็วเท่ากับคลื่นความร้อน คลื่นวิทยุ ฯลฯ แต่ความยาวคลื่นต่างกัน แสงเดินทางในอากาศ หรือสุญญากาศ ด้วยความเร็วประมาณ 300 เมตรต่อวินาที

3.2 การแบ่งชนิดของแสง

การแบ่งชนิดของแสงแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ แสงสีเดียว (Monochromatic Light) คือ แสงที่มีความยาวคลื่นขนาดเดียวกันอยู่ในแสงนั้น และมีเพียงสีเดียว โดยเราไม่สามารถแยกแสงนั้น ออกเป็นแสงต่างๆ ได้อีก เช่น แสงที่เกิดจากการเอาเกลือแกงเผาด้วยไฟก๊าซ เรียกชื่อว่า แสงโซเดียม แสงที่ได้นี้เป็นสีเหลืองชนิดเดียวล้วน แม้จะผ่านไปในตัวกลางใดๆ หรือปริซึม ก็จะไม่แยกเป็นสี ต่างๆ แสงชนิดที่สองคือ แสงประกอบ คือแสงที่เกิดจากแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆ กันหลายขนาด มาผสมกัน เกิดเป็นแสงสีใดสีหนึ่ง เช่น แสงขาวจากดวงอาทิตย์ แสงจากไฟฟ้า ฯลฯ ซึ่งแสงเหล่านี้ เกิดจากแสงสีอื่นๆ ที่มีความยาวคลื่นหลายขนาดมาผสมกลมกลืนอยู่ด้วยกัน จากทฤษฎีคลื่นแสงที่ กล่าวว่าแสงมีความยาวคลื่นต่างๆ กัน

แสงแดดที่เห็นเป็นสีขาว หรือไม่มีสีนั้น ประกอบขึ้นด้วยแสงสีต่างๆ ถึง 7 สี คือ สีของ สายรุ้งที่พาดเป็นทางในท้องฟ้า แต่ละรุ้งมีสีไม่ครบทั้ง 7 สี ส่วนมากจะเห็นเพียงสีแดง ส้ม เหลือง เขียว น้ำเงิน และม่วง การที่เห็นเป็นสีต่างๆ เช่นนี้ก็เพราะขนาดความยาวคลื่น แต่ละสีไม่เหมือนกัน เช่น แสงสีม่วงได้ชื่อว่ามีขนาดความยาวคลื่นน้อยที่สุด คือ มีความยาวคลื่นเพียง 0.0004 มิลลิเมตร ส่วน แสงที่มีความยาวคลื่นมากที่สุดคือ แสงสีแดง มีความยาวคลื่นถึง 0.0007 มิลลิเมตร

3.3 รังสี

รังสี คือ แสงที่มองไม่เห็น ส่วนแสงที่มองเห็นจะอยู่ใกล้สเปกตรัมของแม่เหล็กไฟฟ้า ถ้าจะจำแนกชนิดต่างๆ ของแสงโดยใช้ความยาวคลื่นเป็นเกณฑ์ และเริ่มต้นด้วยแสงที่มีความยาวคลื่น สั้นที่สุดไปหาความยาวคลื่นที่ยาวที่สุดดังนี้ รังสีคอสมิก รังสีแกมมา รังสีเอกซ์ รังสีอัลตราไวโอเล็ต รังสีอินฟราเรด คลื่นโทรทัศน์ และคลื่นเรดาร์ คลื่นวิทยุขนาดสั้น คลื่นวิทยุกระจายเสียง คลื่นวิทยุ ขนาดยาว และคลื่นไฟฟ้า แสงที่มีคลื่นยาวที่สุดในบรรดาแสงด้วยกัน จะมีความยาวถึง 160 ไมล์ ส่วนคลื่นที่สั้นที่สุดนั้นได้แก่ รังสีคอสมิก จะมีความยาวคลื่นเพียง 5×10^{-13} นิ้ว หรือ 1 ใน 20 ล้าน ล้านนิ้ว นอกจากแสงและรังสีที่มีขนาดคลื่นไม่เท่ากันแล้ว ความถี่ยังไม่เท่ากันด้วย และความถี่ จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นเป็นสำคัญ คือ คลื่นที่ยาวที่สุดจะมีความถี่น้อยที่สุดด้วย ในขณะที่เดียวกัน เมื่อมีความถี่น้อยพลังงานที่ให้กับน้อย ส่วนคลื่นที่สั้นที่สุดจะมีความถี่สูงที่สุด และ ในขณะเดียวกันก็ให้พลังงานออกมามากที่สุดด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าแสงจะมีความยาวคลื่น และความถี่ที่แตกต่างกันออกไป แต่สิ่งหนึ่งที่แสงทุกชนิดมีเหมือนกันหมดไม่เปลี่ยนแปลงเลย นั่นคือ

ความเร็วทุกแสง และทุกลังสีจะเดินทางผ่านอากาศด้วยความเร็ววินาทีละ 186,00 ไมล์เสมอกัน ฉะนั้น ถ้าเรารู้ความยาวคลื่น เราก็สามารถหาความถี่ของคลื่นแสงนั้นๆ ออกมาได้ โดยเอาความยาวคลื่นไปหารความเร็วแสง ในทำนองเดียวกันถ้ารู้ความถี่ก็หาความยาวคลื่นออกมาได้ โดยเอาความถี่ไปหารความเร็วแสงได้เช่นกัน

3.4 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการส่องสว่าง

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการส่องสว่างประกอบด้วยหัวข้อต่างๆ ดังนี้คือ กำลังการส่องสว่าง (Illumination Power), กำลังเทียน (Candle Power), ลูเมน (Lumen), มุมตัน (Solid Angle), ความเข้มแห่งการส่องสว่าง (Intensity of Illumination), กฎการส่องสว่าง และกฎกำลังสองผกผัน (Law of Illumination and Inverse Square Law), การสะท้อนแสงและกฎการสะท้อนแสง (Reflection and Law of Reflection) และหลอดทั้งสแตนดาโลเจน (Tungsten-Halogen Lamps) มีรายละเอียดดังนี้

3.4.1 กำลังการส่องสว่าง

กำลังส่องสว่างของดวงไฟ หมายถึง กำลังของดวงไฟที่สามารถเปล่งแสงออกไปจากตัวเองได้ทุกทิศทาง

3.4.2 กำลังเทียน (Candle Power)

กำลังเทียนเป็นหน่วยของกำลังส่องสว่าง มีมาตรฐานดังนี้คือ มาตรฐานสมัยโบราณ และมาตรฐานปัจจุบัน มาตรฐานสมัยโบราณ ประกอบไปด้วยเทียนมาตรฐาน และตะเกียงมาตรฐาน ดังนี้ เทียนมาตรฐาน กำลังส่องสว่าง 1 กำลังเทียน คือ กำลังส่องสว่างของเทียนไขมาตรฐาน เล่มหนึ่ง มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $7/8$ นิ้ว และใช้ไส้เทียนที่เผาไหม้ได้ชั่วโมงละ 120 เกรน หรือประมาณ 7.776 กรัม ส่วนตะเกียงมาตรฐาน ประกอบด้วย ตะเกียงเวอร์นอน-ฮาร์ดคอต (Vernon-Harcourt Penton) และตะเกียงเฮฟเนอร์ (Hefner-Alterneck) มีรายละเอียดดังนี้ ตะเกียงเวอร์นอน-ฮาร์ดคอตใช้ไขของเพนเทนเป็นเชื้อเพลิง มีกำลังส่องสว่าง 10 กำลังเทียนสากล (International Candle Power) ใช้สัญลักษณ์ I.C.P. ปัจจุบันเลิกใช้แล้ว ส่วน ตะเกียงเฮฟเนอร์ ใช้แอมัลอะซิเตดเป็นเชื้อเพลิงมีกำลังส่องสว่าง 1 กำลังเทียนเฮฟเนอร์ มีค่าประมาณ 0.9 I.C.P. ใช้ในประเทศเยอรมัน ปัจจุบันเลิกใช้แล้ว

ปัจจุบันกำลังเทียน (Candle Power) ใช้ร่วมกับความเข้มแห่งการส่องสว่าง (Luminous Intensity) ใช้สัญลักษณ์ I หน่วยเป็นแคนเดลา (Candela) ซึ่งเป็นมาตรฐานในปัจจุบัน โดยเริ่มใช้มาตั้งแต่ปี พ.ศ 2489 โดย 1 แคนเดลา คือ กำลังส่องสว่างที่เป็นเศษหนึ่งส่วนหกสิบเท่าของกำลังส่องสว่างที่เปล่งออกมาทั้งหมด จากพื้นที่ 1 ตารางเมตรของทองคำขาว ณ อุณหภูมิเยือกแข็งของทองคำขาว คือ 2,046 องศาเซลวิน และมาตรฐานกำลังเทียนสากลใหม่นี้ กำหนดว่า กำลังส่องสว่างที่ใช้จะเป็นพื้นที่ 1 ตารางเมตรของทอเรียมออกไซด์ ที่ล้อมรอบด้วยทองคำขาวที่ถูกหลอมเหลวแล้วกำลังแฉ่งตัวที่อุณหภูมิ 2,046 องศาสมบูรณ์ มีกำลังส่องสว่างเท่ากับ 60 กำลังเทียนสากล

3.4.3 ลูเมน (Lumen)

ลูเมน คือ หน่วยสำหรับวัดปริมาณทางแสง ใช้สัญลักษณ์ ϕ ปริมาณแสง 1 ลูเมน คือ ปริมาณแสงที่เปล่งออกจากดวงไฟมาตรฐาน 1 กำลังเทียน ไปตกลงบนพื้นที่ 1 ตารางฟุต ของพื้นผิววัตถุที่วางห่างกัน 1 ฟุต

3.4.4 มุมตัน (Solid Angle)

มุมตัน หรือมุมกรวยตัน เป็นมุมที่เกิดขึ้นที่จุดศูนย์กลางของทรงกลม หากจากพื้นที่ที่ทรงกลมที่รองรับฐานมุมหารด้วย รัศมีของทรงกลมยกกำลังสอง โดย 1 มุมตันจะเท่ากับ 1 สเตอเรเดียน และทรงกลมทั้งหมดจะมีมุมตัน 4π สเตอเรเดียน ดังนั้นจะได้ปริมาณของแสงทั้งหมดที่เปล่งออกมาจากดวงไฟ 1 กำลังเทียน เท่ากับ 4π ลูเมน เป็นต้น

3.4.5 ความเข้มแห่งการส่องสว่าง (Intensity of Illumination)

ความเข้มแห่งการส่องสว่างบนพื้นผิววัตถุใด คือ ปริมาณของแสงที่ตกตั้งฉากบนหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิววัตถุใน 1 วินาที ถ้า ϕ เป็นปริมาณแสง ที่ตกตั้งฉากบนหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิววัตถุในเวลา 1 วินาทีมีหน่วยเป็นลูเมน A เป็นพื้นที่ผิวที่ ϕ บริเวณที่แสงตก มีหน่วยเป็นตารางฟุต หรือ ตารางเมตรและ I เป็นความเข้มแห่งการส่องสว่างบนพื้นผิววัตถุมีหน่วยเป็นลูเมนต่อตารางฟุต หรือตารางเมตร จะได้

$$I = \frac{\phi}{A} \quad (33)$$

3.4.6 กฎการส่องสว่าง และกฎกำลังสองผกผัน (Law Illumination and Inverse Square Law)

กฎการส่องสว่าง กล่าวว่า การส่องสว่างที่ส่องบนพื้นผิววัตถุใดๆ ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดแสงที่จุดกำเนิดแสงลงมายังพื้นผิวที่ต้องการอย่างเพียงพอ หรือการส่องสว่างขึ้นอยู่กับความเข้มของแหล่งกำเนิดแสง กฎกำลังสองผกผัน กล่าวว่า ความเข้มแห่งการส่องสว่างจากแหล่งกำเนิดแสงจะแปรผันแบบผกผันกับระยะทางยกกำลังสอง เมื่อ E เป็นค่าการส่องสว่าง และ R เป็นระยะทางจากแหล่งกำเนิดแสง หน่วยเป็น m จะได้ดังสมการ (34)

$$E = \frac{I}{R^2} \quad (34)$$

3.4.7 การสะท้อนแสง (Reflection)

การสะท้อนแสง คือ การที่รังสีพุ่งไปกระทบผิววัตถุแล้วย้อนกลับ หรือทำมุมไปในทิศทางอื่น เมื่อแสงผ่านตัวกลาง แสงมีอัตราเร็วสม่ำเสมอ และเดินทางเป็นเส้นตรง และถ้าแสงตกกระทบผิววัตถุที่เรียบเป็นเงา แสงส่วนใหญ่เกือบทั้งหมดจะสะท้อนกลับ อุปกรณ์ที่ใช้ในการสะท้อนแสงได้ดีที่สุดคือ ผิวโลหะชุบเงา กระดาษเงาขาว ผิวแก้วฉาบปรอท เมื่อแสงสะท้อนแล้วกลับไปในตัวกลางเดิม ก็จะมีอัตราเร็วคงเดิม และเดินทางเป็นเส้นตรงอย่างมีระเบียบ

กฎการสะท้อนแสง มีสองข้อดังนี้ กฎข้อที่ 1 รังสีตกกระทบ เส้นปกติและรังสีสะท้อนย่อมอยู่ในระนาบเดียวกัน กฎข้อที่ 2 มุมตกกระทบย่อมเท่ากับมุมสะท้อน หรือเรียกรวมกันว่า มุมตกกระทบและมุมสะท้อนอยู่ในระนาบเดียวกัน และมีขนาดเท่ากัน

3.4.8 หลอดทังสเตนฮาโลเจน (Tungsten-Halogen Lamps)

หลอดทังสเตนฮาโลเจนเป็นหลอดไส้ชนิดหนึ่ง ภายในบรรจุก๊าซฮาโลเจนเข้าไป บางครั้งก็ใช้ก๊าซไอโอดีนจึงถูกเรียกว่า หลอดไอโอดีน ได้เช่นกัน คำว่า ฮาโลเจน หมายถึงธาตุในกลุ่มที่ 7 ในตารางธาตุของเคมีศาสตร์ ประกอบด้วย ฟลูออรีน คลอรีน โบรมีน และไอโอดีน ซึ่ง

เป็นธาตุที่มีคุณสมบัติมีความไวต่อการรวมตัวกับธาตุอื่น ๆ สูง แก๊สฮาโลเจนที่ใช้ในหลอดทั้งสแตน-ฮาโลเจนโดยมากจะใช้แก๊สจากไอโอดีน และโบรมีน บรรจุในหลอดไฟพร้อมกับแก๊สอาร์กอน และไนโตรเจน

หลักการทำงานของหลอดทั้งสแตน-ฮาโลเจน ดังนี้ เมื่อเราเปิดให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าสู่ไส้ทั้งสแตน เมื่อไส้ทั้งสแตนร้อนแดง และให้แสงสว่าง ความร้อนจากกระแสไฟฟ้าจะทำให้ทั้งสแตนปล่อยอนุภาคอิเล็กตรอนออกมาจากไส้หลอด ซึ่งอนุภาคเหล่านี้จะจับอยู่ตามผิวของหลอดแก้วด้านใน ในหลอดไฟแบบเดิม การสูญเสียอนุภาคอิเล็กตรอนของไส้หลอดทั่วไป จะมีผลต่อการให้แสงสว่างที่น้อยลงของไส้หลอด และทำให้อายุการทำงานของไส้หลอดลดน้อยลงเรื่อยๆ แต่กับหลอดทั้งสแตน-ฮาโลเจน แก๊สฮาโลเจน ที่บรรจุอยู่ในหลอด เมื่อได้รับความร้อนจากไส้หลอดมากกว่า 500 องศาฟาเรนไฮต์ ก็จะเกิดการหมุนเวียนของอนุภาคอิเล็กตรอนของทั้งสแตนที่เกาะอยู่ตามผิวหลอดด้านใน ด้วยคุณสมบัติที่ไวต่อการรวมตัวกับธาตุอื่นสูง เมื่อเข้ารวมกับอนุภาคอิเล็กตรอนแล้ว อนุภาคของแก๊สฮาโลเจน ก็จะไหลเวียนกลับเข้าสู่ไส้หลอด และถ่ายก๊นอนุภาคอิเล็กตรอนของทั้งสแตนให้กลับคืนสู่ไส้หลอด เมื่อไส้หลอดไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านและมีอุณหภูมิลดลง และเมื่อไส้หลอดได้รับความร้อนอีกครั้ง เมื่อมีการใช้งานกระบวนการนี้ก็จะเกิดซ้ำแล้วซ้ำอีก หมุนเวียนกันไป ดังนั้นไส้หลอดจึงอยู่ในสภาพเดิมตลอด ผลคือเป็นการยืดอายุของไส้หลอด และเพื่อประสิทธิภาพการทำงานในการให้แสงสว่าง ผลที่ได้จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ทำให้ไส้หลอดมีสมมูลของอนุภาคอิเล็กตรอน ทำให้กำลังส่องสว่างของไส้หลอดมีค่าคงที่เกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ จากการที่ไส้หลอดมีอัตราการสูญเสียอนุภาคอิเล็กตรอนน้อยมาก ยังมีผลทำให้ไส้หลอดมีความทนทานกว่าหลอดมีไส้ปกติโดยทั่วไป คือ มีอายุการใช้งานนานถึง 3,000 ชั่วโมง เทียบได้กับการเปิดหลอดไฟทั้งสแตน-ฮาโลเจนนี้ทิ้งไว้ติดต่อกันเป็นเวลา 125 วัน หรือกว่า 4 เดือน

หลอดทั้งสแตน-ฮาโลเจน มีหลายขนาดและหลายลักษณะ ทั้งแบบที่เป็นทรงกระบอกยาว สั้น และหลอดชนิดที่บรรจุในรูปทรงกรวย เช่น ในการสะท้อนแสง ด้วยคุณสมบัติที่สามารถทำให้หลอดมีขนาดเล็กลง โดยไม่ลดทอนประสิทธิภาพการส่องสว่างในด้านการออกแบบ จึงทำให้ สามารถออกแบบโคมไฟที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ทางด้านกำลังส่องสว่างของหลอดมีให้เลือกหลายระดับตั้งแต่ 55, 150, 250 และเรื่อยไปจนถึง 1,500 วัตต์ คุณสมบัติของแสงที่ได้จากหลอดทั้งสแตน-ฮาโลเจน จะให้แสงสว่างที่สบายตา และให้สีส้มของวัตถุภายใต้แสงสว่างนี้ได้สดใสกว่า

หลอดฮาโลเจน จะให้ไฟที่สว่างเกือบเท่าตัว เมื่อเปรียบเทียบกับหลอดไส้ขนาดเดียวกัน ในขณะที่เดียวกันก็กินไฟน้อยกว่าด้วย หลอดฮาโลเจนทนความร้อนได้สูงมีอายุการใช้งานได้นาน หลอดไฟฮาโลเจนจะไม่หมองดำเหมือนหลอดธรรมดาเมื่อใช้ไปนานๆ เนื่องจากตัวหลอดทำด้วยหินเจียวนูมาน หรือหิน ควอตซ์ ภายในหลอดบรรจุก๊าซฮาโลเจน และไอโอดีน ด้วยเหตุนี้จึงห้ามมิให้ใช้มือจับตัวหลอด เพราะมือมักจะมีเหงื่อ และเหงื่อมีเกลือแร่ ซึ่งถ้าจับตัวหลอดแล้วผิวของหลอดจะเกิดเป็นรอยขึ้น รอยคราบที่เกิดขึ้นนี้ ถ้าไม่ทำความสะอาด เมื่อมีความร้อนสูงๆ จะทำให้รอยคราบไหม้ติดกับตัวแก้ว หลอดอาจร้าว หรือไส้หลอดอาจขาดตรงจุดนั้นได้ เราสามารถลบรอยคราบนั่นได้ โดยการใช้แอลกอฮอล์เช็ดบริเวณรอยคราบที่จับนั้น อายุการใช้งานของหลอดฮาโลเจนจะนานถึง 2,000 ชั่วโมง หลอดทั้งสแตนฮาโลเจนมีหลายแบบ มีทั้งแบบ PAR ซึ่งมีกำลังไฟ 500 วัตต์ มีอายุการใช้งานถึง 4,000 ชั่วโมง ให้แสงกระจาย กว้างกว่าหลอด PAR หลอดไส้ทั้งสแตนธรรมดาถึง 40 เปอร์เซ็นต์ และมีอายุการใช้งานเพียง 2,000 ชั่วโมง หลอดทั้งสแตนฮาโลเจนถูกออกแบบให้เป็นหลอดฉายภาพ หรือฟิล์มในเครื่องฉายสไลด์ เครื่องฉายภาพข้ามศีรษะ ฯลฯ

4. ประโยชน์ของน้ำร้อนและระดับอุณหภูมิในการใช้งาน

การใช้น้ำอุ่นโดยทั่วไปอุณหภูมิของน้ำอุ่นจะถูกผสมระหว่างน้ำร้อนกับน้ำเย็น หรือน้ำอุ่นที่ออกจากระบบผลิตน้ำร้อน อุณหภูมิของน้ำจะอยู่ในช่วง 32 องศาเซลเซียส ถึง 48 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถใช้อาบ ล้างหน้า หรือล้างมือเป็นต้น ส่วนน้ำร้อนถูกนำมาใช้กับระบบทำความร้อนขนาดใหญ่ หรือภายในอาคาร เฉพาะเขตที่มีอากาศหนาวอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 80 องศาเซลเซียส ขึ้นไป ประโยชน์ที่ได้เช่น ชักผ้า ล้างจาน ซักเสื้อผ้า ประคบอาหาร และกิจกรรมอื่นๆ (ปรีดา, 2542)

ตารางที่ 1 ระดับอุณหภูมิในการใช้งานของน้ำร้อน

ประเภทการใช้งาน	อุณหภูมิการใช้งาน (องศาเซลเซียส)
ฝักบัวใช้อาบ	32 - 40
อ่างน้ำใช้อาบ	40 - 48
ห้องครัว	60
ล้างจาน	60 - 77
ซักผ้า	82

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เมื่อปี 2004 Morrison, Budihardjo และ Behnia ทำการศึกษาน้ำภายในท่อสุญญากาศสำหรับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้ระเบียบวิธีทางตัวเลข แบบจำลอง ตามมาตรฐานการทดสอบ ISO 9452-2 และการเปรียบเทียบผลที่ได้ นอกจากนี้ก็ได้ศึกษาถึงน้ำที่มีผลต่อสมรรถนะของแผงรับพลังแสงอาทิตย์ โดยการไหลของน้ำภายในท่อจะเป็นการไหลโดยธรรมชาติ (Thermosyphon) ใช้ท่อสุญญากาศเป็นตัวรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยต่อกันเป็นแผง ท่อสุญญากาศนี้มีการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนน้อย เนื่องจากการดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ไว้ที่ผิวภายในสุญญากาศ และการสูญเสียความร้อนจากแผ่รังสีน้อยเช่นกัน เนื่องจากการส่งความร้อนออกสู่ภายนอกทำได้ยาก เพราะมีผิวที่ดูดซับไว้ ปัญหาคือ การส่งความร้อนที่ได้ไปใช้ ทฤษฎีที่ใช้ดึงความร้อนจากท่อสุญญากาศออกไปคือ ท่อ การไหลผ่านตัวดูดซับ จำนวนท่อแก้วทั้งหมด และขนาดตัวดูดซับ จากการศึกษาพบว่าความร้อนที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกัน และพบว่าน้ำที่ปลายท่อไม่มีการไหลซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพ และอาจส่งผลต่อสมรรถนะของแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ด้วย นอกจากนี้ยังนำเสนอการศึกษาปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องทำน้ำร้อนด้วย ซึ่งขึ้นกับประสิทธิภาพของท่อ การสูญเสียความร้อนจากท่อ การสูญเสียความร้อนของถังเก็บ และกระบวนการถ่ายเทความร้อนจากท่อสู่ถังเก็บ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาโครงสร้างของการไหลโดยใช้แบบจำลองโดย พิจารณาค่าของ Rayleigh Number และการไหลเป็นแบบราบเรียบ พบว่า เมื่อค่า Rayleigh Number เท่ากับ 13,000 จะได้อุณหภูมิถึง 200 ถึง 300 องศาเซลเซียส (Morrison, Budihardjo and Behnia, 2004)

Li และ Wang ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ท่อสุญญากาศเป็นท่อรับความร้อนของระบบผลิตความร้อนแบบรวมแสงในปี 2006 (Li and Wang, 2006) ในการทดลองใช้ท่อสุญญากาศซึ่งเป็นท่อแก้วสองช่องว่างภายในเป็นสุญญากาศ ซึ่งมีสองขนาดคือ ท่อที่หนึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 45 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 35 มิลลิเมตร ท่อที่สองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 38 มิลลิเมตร และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 30 มิลลิเมตรใช้แผงรับแสงอาทิตย์แบบพาราโบลิค สारนำความร้อนที่ใช้ในการทดลองสองชนิดคือ น้ำ และ ก๊าซไนโตรเจน ทำการทดลองปรับโดยอัตราการไหลของสารทำความร้อนและทำการวัดค่าอุณหภูมิ ทางเข้า และทางออกของท่อนำความร้อน ทำการวัดค่าพลังงานแสงอาทิตย์ในขณะที่ทำการทดลอง จากนั้นคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของแผงรับความร้อน และปริมาณความร้อนที่เพิ่ม ของสารนำความร้อนทั้งสองชนิดเทียบกับสมการที่ได้จากการจำลองขึ้น ผลที่ได้คือ ประสิทธิภาพทางความร้อนของแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ประมาณ

70 เปอร์เซ็นต์ ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ และที่อัตราการไหล 0.0046 กิโลกรัมต่อวินาที น้ำเดือดกลายเป็นไอน้ำ และเมื่อใช้ก๊าซในโครเจนเป็นสารทำงานพบว่า ประสิทธิภาพของแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์น้อยกว่า การใช้น้ำเป็นสารนำความร้อน 40 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ถึง 460 องศาเซลเซียส เมื่อทำการเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่สร้างขึ้นพบว่า ประสิทธิภาพของแผงรับความร้อนมีค่าใกล้เคียง และสอดคล้องกัน นอกจากนี้ยังใช้สมการที่ได้ไปใช้ในการวิเคราะห์ถึงผลกระทบของปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงรับแสงอาทิตย์และพื้นที่ของแผงรับ รวมทั้งการเสนอตัวอย่างการประยุกต์ใช้ในระบบการทำความเย็น จากการวิเคราะห์พบว่า ที่อัตราการไหล 0.004 กิโลกรัมต่อวินาที เวลาในการทดลอง 8 ชั่วโมง พื้นที่รับแสงของแผงรับแสงอาทิตย์ 2 ตารางเมตร พบว่า ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ 900 ถึง 1000 วัตต์ต่อตารางเมตร น้ำจะเดือดกลายเป็นไอน้ำ ที่ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ 500 วัตต์ต่อตารางเมตร ถึง 800 วัตต์ต่อตารางเมตร ได้น้ำร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ถึง 90 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ 100 วัตต์ต่อตารางเมตร ถึง 400 วัตต์ต่อตารางเมตร ได้น้ำอุ่น ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ถึง 50 องศาเซลเซียส และประสิทธิภาพโดยเฉลี่ย 70 เปอร์เซ็นต์ ส่วนผลกระทบของพื้นที่ทำการทดลองโดยปรับอัตราการไหลที่ 0.02 กิโลกรัมต่อวินาที อุณหภูมิทางเข้าแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ 20 องศาเซลเซียส และรังสีแสงอาทิตย์ที่ 900 วัตต์ต่อตารางเมตร จากการวิเคราะห์พบว่า เมื่อพื้นที่ของแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น อุณหภูมิทางออกของน้ำก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สำหรับการนำระบบนี้ไปประยุกต์ใช้กับระบบการทำความเย็น ต้องใช้อุณหภูมิถึง 90 องศาเซลเซียส ถึงจะทำให้สมรรถนะของระบบที่ดี

เมื่อปี พ.ศ. 2542 นายปริดา จันทวงษ์ ทำการศึกษาการออกแบบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์อย่างง่ายเพื่อใช้ในบ้าน (ปริดา, 2542) ในการพัฒนาเครื่องทำน้ำร้อนนี้เน้นการลดต้นทุนไม่เกินสองพันบาทต่อตารางเมตร และสามารถสร้างได้ด้วยตัวเองรวมทั้งความเหมาะสมของพื้นที่ติดตั้งเครื่องทำน้ำร้อน โดยใช้ท่อพลาสติกพีวีซี ขนาด 40 มิลลิเมตร เป็นแผงรับและสะสมพลังงานแสงอาทิตย์ ขนาดความจุของน้ำ 35 ลิตร ทำการทดสอบสองตำแหน่งคือ ติดตั้งบนผนังบ้านหันหน้าไปทางด้านทิศตะวันตกเฉียงใต้ และติดตั้งบนหลังคาบ้านหันหน้าไปทางทิศใต้ การทดสอบจะทดสอบผลความแตกต่างของสีของการใช้งาน อุณหภูมิของน้ำร้อนที่ได้ และค่าใช้จ่ายต่อปีของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ การทดลองแบ่งเป็นสองชุด คือ การทดลองชุดที่ 1 ทำการทดสอบในช่วงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2542 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2543 โดยใช้ฟางข้าวเป็นแผ่นฉนวนด้านหลังเครื่องและมีฝาปิดในช่วงตอนเย็นไม่มีพลังงานแสงอาทิตย์ การทดลองชุดที่สองทำการทดลองในช่วงเดือนมีนาคม ถึงเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2543 โดยแบ่งการทดลองเป็นสองส่วนคือ ใช้ซีแพคโมเนียเป็นฉนวนและสะสมความร้อนติดตั้งที่ด้านหลังของเครื่องซึ่งมีขนาดเท่ากับแผงรับรังสีทั้งแบบฝาปิด

และไม่มีฝาปิด และการวางท่อแบบท่อแนวตั้งมีฉนวนกระเบื้องซีเมนต์โมเนีย และมีฝาปิดพลาสติกใส ผลการทดลองพบว่า การทดลองชุดที่หนึ่งสามารถที่จะอุ่นน้ำทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเล็กน้อย 2 องศาเซลเซียส ถึง 10 องศาเซลเซียส ขึ้นกับความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ การทดลองชุดที่สองพบว่า ส่วนแรกใช้ซีเมนต์โมเนีย เป็นฉนวนและสะสมความร้อนติดตั้งที่ด้านหลังของเครื่อง ซึ่งมีขนาดเท่ากับแผงรับรังสีทั้งแบบฝาปิดและไม่มีฝาปิดแบบมีฝาปิดพลาสติกได้อุณหภูมิสูงถึง 72 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมประมาณ 34 องศาเซลเซียส และการวางท่อแบบท่อแนวตั้งมีฉนวนกระเบื้องซีเมนต์โมเนีย และมีฝาปิดพลาสติกใสได้อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมประมาณ 35 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิของน้ำร้อนถึง 70 องศาเซลเซียส อาจทำให้ท่อพลาสติกพีวีซี เสียหายจึงมีการป้องกันโดยใช้อากาศ มารบายความร้อนระหว่างท่อและฝาปิด สำหรับการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายทั้งหมดต่อปีของเครื่องทำน้ำร้อนทั้งสามระบบพบว่า เครื่องทำน้ำร้อนที่ทำการวิจัยถูกกว่าเครื่องทำน้ำร้อนด้วยไฟฟ้าค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาน้อย และประหยัดพลังงานต่อมา

เมื่อปี พ.ศ. 2543 นายมนูญ พิรุณวรรณ ทำการออกแบบและทดสอบแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ ชนิดรวมแสงด้วยแผงพาราโบลิค (มนูญ, 2543) ซึ่งอาศัยหลักการสะท้อนรังสีจากดวงอาทิตย์โดยตรง จากดวงอาทิตย์ไปยังจุดรวมรังสี ซึ่งสะท้อนรังสีด้วยแผงพาราโบลิค เป็นการสะท้อนในระนาบสองมิติเอ็กซ์ และวาย (ระนาบ x-y) พลังงานที่ได้ในแนวรัศมีจะถ่ายเทผ่านผนังท่อไปสู่ น้ำมันนำความร้อนที่บรรจุอยู่ภายใน โดยใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ขึ้นรูปเป็นแผงสะท้อนรังสี และใช้ท่อเหล็กกล้าไร้ตะกั่วเป็นท่อรวมรังสี สำหรับถ่ายเทความร้อนจากน้ำมันไปสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ การทดลองที่อัตราการไหล 5 ค่าพบว่า พลังงานสูงสุดที่แผงสร้างได้ 388.72 วัตต์ ที่อัตราการไหล 0.145 กิโลกรัมต่อวินาที โดยพลังงานตกกระทบบนแผงสูงสุดข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยา 880 วัตต์ต่อตารางเมตร ประสิทธิภาพสูงสุด 25.2 เปอร์เซ็นต์ และ 21.9 เปอร์เซ็นต์ โดยเฉลี่ย และอุณหภูมิน้ำมันสูงสุด 65.7 องศาเซลเซียส ขณะที่อุณหภูมิที่ผิวท่อรวมรังสีด้านนอกเท่ากับ 75 องศาเซลเซียสความยาวที่เหมาะสม ของแผงสะท้อนรังสีประมาณ 1800 มิลลิเมตร.

เมื่อปี พ.ศ. 2550 เบญจมาศ ปุยอ็อก ทำการหาประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศ เพื่อใช้ในการผลิตน้ำร้อน (เบญจมาศ, 2550) ในการทดสอบทำการตรวจวัดค่าความเข้มแสงอาทิตย์ค่าอุณหภูมิน้ำร้อนออกจากแผง และนำไปคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของระบบ และเปรียบเทียบผลของการประหยัดไฟฟ้า ที่ได้จากการใช้เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แทนเครื่องทำน้ำร้อนแบบใช้ไฟฟ้า การทดลองใช้หลักการของธรรมชาติโดยเมื่อ

น้ำได้รับความร้อนจากตัวหลอดแก้ว ซึ่งได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ น้ำร้อนจะลอยตัวสู่ด้านบน ส่วนน้ำเย็นหรือน้ำที่เดิมเข้ามาในระบบ จะอยู่ด้านล่าง จากนั้นนำน้ำร้อนไปใช้งาน จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิของน้ำอยู่ในช่วง 59 เปอร์เซ็นต์ ถึง 66 เปอร์เซ็นต์ ความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยอยู่ในช่วง 306.79 วัตต์ต่อตารางเมตร ถึง 408.68 วัตต์ต่อตารางเมตร พลังงานสะสมของน้ำร้อนอยู่ระหว่าง 306.79 เมกกะจูลต่อวัน ถึง 408.68 เมกกะจูลต่อวัน ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบอยู่ในช่วง 42 เปอร์เซ็นต์ ถึง 48 เปอร์เซ็นต์ และสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 3,661.68 บาทต่อปี และมีระยะเวลาคืนทุน 13.7 ปี

เมื่อปี พ.ศ. 2549 อติศักดิ์ แก้วประเสริฐและคณะวิจัย ได้ทำการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ ของระบบรวมแสงแบบพาราโบลิก เพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ และประเมินสมรรถนะของระบบรวมแสงอาทิตย์แบบรางรวมแสง (อติศักดิ์ และคณะ, 2549) โดยใช้น้ำมันเป็นสารทำงานรับความร้อน จากท่อความร้อน และนำไปแลกเปลี่ยนความร้อนให้กับน้ำ ที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ผู้วิจัยได้ ทำการออกแบบระบบและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และหาค่าประสิทธิภาพ รวมทั้งปรับ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ความสัมพันธ์ของความเร็วลมกับอุณหภูมิบรรยากาศที่มีผลต่อประสิทธิภาพ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาวิชวลเบสิก และเทียบกับผลการทดลอง จากการทดลองพบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แสดงด้วยความสัมพันธ์ของขนาดแผง รับประกอบด้วยความกว้าง ความยาว และเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวรับพลังงาน แสดงให้เห็นโดย สมการ ตัวแปรที่มีผลต่อระบบทำน้ำอุ่นด้วยรางรวมแสงแบบพาราโบลิก พบว่า ความเร็วลมที่ เปลี่ยนแปลง มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์มาก คือ ความเร็ว 1.5 เมตร ต่อวินาที ประสิทธิภาพรวมของแผงรับเท่ากับ 23.74 เปอร์เซ็นต์ กรณีความเร็วลม 3 เมตรต่อวินาที ประสิทธิภาพรวมของแผงรับเท่ากับ 19.4 เปอร์เซ็นต์ ส่วนอุณหภูมิของบรรยากาศที่เปลี่ยนแปลงมี ผลกระทบต่อประสิทธิภาพของพลังงานแสงอาทิตย์น้อยกว่า ส่วนความแม่นยำของแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ ค่าที่ได้จากแบบจำลองของแผงรับมีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองอยู่ 20 วัตต์ ถึง 70 วัตต์ อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำมันที่จุดทางออก ของแผงรับแตกต่างกันประมาณ 1 องศาเซลเซียส ถึง 3 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวของตัวรับพลังงานจากการทดลองมีค่าความแตกต่าง จากผลการ ทดลองประมาณ 3 องศาเซลเซียส ถึง 11 องศาเซลเซียส และค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยของแผงจากผล การจำลองมีความคลาดเคลื่อน จากผลการทดลอง 2 เปอร์เซ็นต์ ถึง 5 เปอร์เซ็นต์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุที่ใช้ในการสร้างระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสง

เหล็กที่ใช้ทำโครงสร้างแผงรับแสง ท่อสุญญากาศ กระฉกเงา แหล่งกำเนิดแสงจากไฟฟ้า เครื่องสูบน้ำ ท่อน้ำร้อน ท่อน้ำเย็น ข้อต่อ วาล์ว แผ่นอลูมิเนียม น้ำ ถังเก็บน้ำก่อนเข้าแผงรับแสง ห้องทดลอง และอื่นๆ

2. เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสง

เครื่องเชื่อมไฟฟ้า เครื่องเชื่อมแก๊ส เครื่องเจาะ เครื่องตัด เครื่องเจียรไน และอื่นๆ

3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์และทดสอบระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสง

เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ เครื่องวัดอุณหภูมิ เครื่องวัดแสง นาฬิกาจับเวลา เครื่องปรับองศาของแผงรับแสง เครื่องวัดความดัน น้ำ และอื่นๆ

วิธีการ

1. วิธีการดำเนินงานวิจัย

1.1 รวบรวมข้อมูลเบื้องต้นที่จำเป็นสำหรับการออกแบบระบบ

ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และรวบรวมข้อมูลที่เป็นจำเป็นสำหรับการออกแบบระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสง รวมทั้งงานวิจัยที่ได้มีการศึกษามาแล้ว

1.2 ออกแบบระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสง

จากความรู้ที่ได้ศึกษา และข้อมูลที่ได้รวบรวมมาทำการออกแบบ ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสง โดยมีเกณฑ์ในการออกแบบดังนี้

1.2.1 การออกแบบระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสง โดยใช้แสงจากแหล่งกำเนิดแสงจากไฟฟ้า เนื่องจากต้องการความเข้มแสงที่คงที่ในการทดลอง

1.2.2 ระบบการทำงานเป็นระบบเปิด และการหมุนเวียนน้ำในระบบแบบบังคับ

1.2.3 แผงรับแสงแบบรวมแสง

1.2.4 ท่อรับแสงเป็นท่อสุญญากาศ

1.2.5 ใช้น้ำเป็นสารทำงาน และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

1.2.6 สามารถประยุกต์ใช้งานกับแหล่งกำเนิดแสงอื่นได้

1.3 ดำเนินการสร้างระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสง

1.4 ทดสอบและประเมินผลระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสง

การทดสอบระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสง จะทดสอบหาความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับความเข้มแสงที่ระบบได้รับ และประสิทธิภาพของระบบ การทดสอบจะแบ่งออกเป็น 3 การทดลองดังนี้ การทดลองที่ 1 ปรับอัตราการไหลของน้ำ โดย ความเข้มแสงคงที่ การทดลองที่ 2 ปรับความเข้มแสง โดยอัตราการไหลของน้ำคงที่ และการทดลองที่ 3 การทดสอบระบบตามมาตรฐาน ASHRAE 93-97 ส่วนการวิเคราะห์ผลใช้การวิเคราะห์แบบถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย

2. การคำนวณหาความสว่างของแสง และกำลังส่องสว่าง

แสง คือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในช่วง 400 นาโนเมตร ถึง 700 นาโนเมตร ซึ่งเราสามารถมองเห็นได้ พลังงานที่มีอยู่ในคลื่นแสงที่ค่าตั้งแต่ 2.4×10^{-19} จูล ถึง 4.8×10^{-19} จูล (1 นาโนเมตร เท่ากับ 10^{-9} เมตร) (ก่องกัญจน์, 2522) ปริมาณการส่องสว่างของแสงขึ้นกับ ความเข้มแสงของแหล่งกำเนิด ระยะจากแหล่งกำเนิดแสงกับพื้นที่ที่แสงตกกระทบ และมุมตกกระทบของรังสีแสง

โดยแสงที่ใช้ทดลองจากหลอดไฟ โดยใช้การสะท้อนของแสงเป็นหลัก กำลังส่องสว่างสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$I = \frac{P}{4\pi R^2} \quad (35)$$

3. การออกแบบ และติดตั้งระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสง

3.1 แหล่งกำเนิดแสง

แหล่งกำเนิดแสงของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงที่ใช้ในการทดลอง ใช้พลังงานจากไฟฟ้าจากหลอดไฟขนาด 500 วัตต์ต่อหลอด ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 หลอดไฟที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงในระบบ



ภาพที่ 3 การติดตั้งเครื่องกำเนิดแสง

3.2 แผงรับแสง

แผงรับแสงในระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงที่ใช้ในการทดลอง เป็นแผงรับแสงแบบรวมแสง โดยมีขนาดความกว้าง 1.12 เมตร ความยาว 2 เมตร มีพื้นที่รับแสง 2.24 ตารางเมตรใช้กระจกเงาเป็นแผ่นสะท้อนแสง ดังแสดงตามภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แผงรับแสง

3.3 ท่อรับแสง

รับแสงในระบบผลิตน้ำร้อน ใช้ท่อสุญญากาศ ขนาดความยาว 1.8 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 58 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 47 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ท่อสุญญากาศใช้เป็นท่อรับแสงในระบบและการติดตั้ง

3.4 ท่อน้ำในระบบผลิตน้ำร้อน

ท่อน้ำในระบบผลิตน้ำร้อนแบ่งเป็นสามส่วน คือ ส่วนแรกท่อน้ำก่อนเข้าแผงรับแสง ส่วนที่สองท่อน้ำออกจากแผงรับแสง และส่วนที่สาม คือ ท่อนำความร้อน โดยท่อน้ำก่อนเข้าแผงรับแสง ใช้ท่อน้ำพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.54 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 6 ท่อน้ำออกจากแผงรับแสงใช้ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.95 เซนติเมตรหุ้มฉนวนกันความร้อน ดังแสดงในภาพที่ 6 ส่วนท่อนำความร้อนใช้ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.95 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 6 ท่อน้ำเข้าและออกจากแผงรับแสง



ภาพที่ 7 ท่อทองแดงใช้เป็นท่อนำความร้อนในระบบ

3.5 ถังเก็บน้ำก่อนเข้าแผงรับแสง

ถังเก็บน้ำก่อนเข้าแผงรับแสง ทำจากพลาสติกขนาดความจุ 0.0062 ลูกบาศก์เมตร



ภาพที่ 8 ถังเก็บน้ำก่อนเข้าแผงรับแสง

3.6 เครื่องปรับองศาของแผงรับแสง

เครื่องปรับองศาของแผงรับแสงติดตั้งที่ด้านข้างแผงรับแสง ปรับโดยการหมุนตามองศาที่ต้องการ สามารถได้ตั้งแต่ 0 องศา ถึง 180 องศา ซึ่งในการทดลองนี้ปรับองศาของแผงรับแสงคงที่ที่ 90 องศา ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 เครื่องปรับองศาของแสงรับแสง

3.7 ระบบหมุนเวียนหลัก

ระบบหมุนเวียนน้ำใช้เครื่องสูบน้ำขนาด 0.5 แรงม้า ความสามารถในการส่งน้ำสูงสุดที่ 40 เมตร ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 เครื่องสูบน้ำในระบบ

3.8 เครื่องวัดอัตราการไหล

เครื่องวัดอัตราการไหลติดตั้งก่อนเข้าแผงรับแสง ต่อเข้ากับท่อน้ำ โดยสามารถวัดอัตราการไหลได้ตั้งแต่ 0 ลิตรต่อนาที ถึง 7 ลิตรต่อนาที ดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 เครื่องวัดอัตราการไหล

คุณลักษณะเฉพาะของเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ มีดัง ต่อไปนี้

บริษัทผู้ผลิต	บริษัท รุจิระกรุ๊ป จำกัด
รุ่น	Z500
ช่วงการวัด	0 ถึง 7 ลิตรต่อนาที
ค่าความถูกต้อง	± 5 เปอร์เซ็นต์
อื่นๆ	ความร้อนสูงสุด 70 องศาเซลเซียส และ ความดันสูงสุด 150 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

3.9 เครื่องวัดอุณหภูมิ

เครื่องวัดอุณหภูมิใช้เทอร์โมมิเตอร์ช่วงการวัด 0 องศาเซลเซียส ถึง 100 องศาเซลเซียส และช่วงการวัด 0 องศาเซลเซียส ถึง 200 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 12 และทำการติดตั้งที่ท่อน้ำก่อนเข้าและออกจากแผงรับแสง ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 12 เทอร์โมมิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 13 การติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์กับท่อน้ำ

3.10 เครื่องวัดความเข้มแสง

เครื่องวัดความเข้มแสงใช้ลักต์มิเตอร์ แบบดิจิตอลมีช่วงการวัดอยู่ที่ 0 ลักต์ ถึง 50,000 ลักต์ ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 ลักต์มิเตอร์

คุณลักษณะเฉพาะของเครื่องวัดแสง มีดังต่อไปนี้

ที่มา	สถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (Thailand institute of scientific and Technological Research)
รุ่น	L466288
ช่วงการวัด	0 ถึง 200 ลักต์, 200 ลักต์ ถึง 2,000 ลักต์, 2,000 ลักต์ ถึง 20,000 ลักต์ และ 20,000 ลักต์ ถึง 50,000 ลักต์
ค่าความถูกต้อง	± 4 เปอร์เซ็นต์
ชนิดของการวัด	ทั้งเสตน/แสงแดด, ฟลูออเรสเซนต์, โปรท หรือ โซเดียม (Tungsten/daylight, fluorescent, mercury, or sodium)
ขนาด	กว้าง 7.37 เซนติเมตร ยาว 3.3 เซนติเมตร สูง 17.78 เซนติเมตร

3.11 เครื่องวัดความดัน

เครื่องวัดความดัน (Pressure gauge) ช่วงการวัด 0 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ถึง 60 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ทำการติดตั้งหลังจากเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ ก่อนเข้าสู่แผงรับแสง



ภาพที่ 15 เครื่องวัดความดัน

ที่มา	บริษัท สวนหลวงเอนจิเนียริง จำกัด
ชนิด	Bourdon Pressure Gauge
ช่วงการวัด	0 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ถึง 60 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
ค่าความถูกต้อง	± 5 เปอร์เซ็นต์
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง	60 มิลลิเมตร

3.12 เครื่องทำความร้อน

เครื่องทำความร้อนทำหน้าที่ ให้ความร้อนกับน้ำ หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ฮีสเตอร์ โดยให้ความร้อนกับน้ำก่อนเข้าสู่แผงรับแสง เพื่อทำการปรับอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าแผงรับแสง ตามการทดลองที่ 3 ขนาด 1,000 วัตต์



ภาพที่ 16 เครื่องทำความร้อน

3.13 เครื่องควบคุมระดับอุณหภูมิของน้ำ

เครื่องควบคุมระดับอุณหภูมิของน้ำ มีช่วงการทำงาน 30 องศาเซลเซียส ถึง 110 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิของน้ำถึงค่าที่ต้องการแล้ว เครื่องควบคุมระดับอุณหภูมิของน้ำจะส่งสัญญาณไปตัดการทำงานของเครื่องทำความร้อน และเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปจากระดับที่ตั้งไว้ เครื่องควบคุมระดับอุณหภูมิของน้ำจะส่งสัญญาณให้เครื่องทำความร้อนทำงานอีกครั้ง จนกว่าอุณหภูมิจะเท่ากับที่ตั้งไว้



ภาพที่ 17 เครื่องควบคุมระดับอุณหภูมิของน้ำ

3.14 ห้องทดลอง

การออกแบบห้องทดลอง เพื่อควบคุมปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลกระทบต่อการศึกษา เช่น แสง ลม และความชื้นที่มาจากภายนอกให้มีปริมาณน้อยที่สุด ห้องทดลองออกแบบให้มีขนาดที่เหมาะสมกับเครื่องทดสอบ โดยมีขนาดกว้าง 2 เมตร ยาว 3 เมตร สูง 2.50 เมตร วัสดุที่ใช้ทำห้องทดลอง คือ ไม้อัด คลุมด้วยพลาสติกสีดำ ติดตั้งอยู่ที่ชั้นคาเฟ่ของ อาคาร ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ห้องทดลอง

4. การทดสอบระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสง

การทดสอบระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงในงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 3 การทดลองดังนี้ การทดลองที่ 1 ปรับอัตราการไหลของน้ำที่ความเข้มแสงคงที่ การทดลองที่ 2 ปรับความเข้มของแสงที่อัตราการไหลของน้ำคงที่ และการทดลองที่ 3 การทดลองตามมาตรฐาน ASHRAE 93-97 (ASHRAE, Standard 93-77, 1977) ซึ่งการทดลองที่ 3 จะแสดงในภาคผนวกที่ 2 เนื่องจากต้องการแสดงผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าแผงรับแสง กับอุณหภูมิของน้ำทางออกจากแผงรับแสง และไม่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

ขั้นตอนการทดสอบระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสง

มีขั้นตอนดังนี้

1. ติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง
2. ทำความสะอาดแผงรับแสง
3. ปรับองศาของแผงรับแสง
4. เติมน้ำในถังเก็บน้ำ
5. เปิดเครื่องสูบน้ำให้น้ำไหลผ่านในระบบ
6. ปรับอัตราการไหลโดยใช้วาล์ว
7. เปิดเครื่องกำเนิดแสง

ทำการบันทึกผล โดยก่อนบันทึกผลต้องรอให้ระบบคงที่ก่อน หรือปล่อยให้ระบบทำงานประมาณ 1 ชั่วโมง จากนั้นบันทึกค่า อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าแผงรับแสง อุณหภูมิของน้ำออกจากแผงรับแสง อัตราการไหลของน้ำ ความเข้มแสง เพื่อนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ต่อไป

5. การวิเคราะห์ผลโดยใช้วิธีการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย

การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย คือ ความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระ และตัวแปรตามที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยรูปแบบการถดถอยเชิงเส้นตรงสำหรับพยากรณ์ตัวแปรตามมีส่วนประกอบดังนี้คือ รูปแบบสมการถดถอยเชิงเส้นตรงอย่างง่าย สมการถดถอยเชิงเส้นตรงอย่างง่าย การทดสอบนัยสำคัญของการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย สัมประสิทธิ์แห่งการกำหนด และการพยากรณ์ (สุรินทร์, 2548) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 รูปแบบการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย

ถ้าให้ Y เป็นตัวแปรตาม และ X เป็นตัวแปรอิสระ จากการเก็บรวบรวมข้อมูลของ Y และ X และนำมาสร้างแผนภาพการกระจาย หากพบว่า Y และ X มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง เมื่อ α คือ จุดตัดแกน Y (Y - intercept), β คือ ความชันของเส้นการถดถอย (Slope) หรือค่าที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของ Y เมื่อ X เพิ่มขึ้น 1 หน่วย, Y_i คือ ค่าของตัวแปรตามค่าที่ i , X_i คือ ค่าของ

ตัวแปรอิสระค่าที่ i , ε_i คือ ค่าความคลาดเคลื่อน (Error term) จะได้รูปแบบการถดถอยเชิงเส้นตรงอย่างง่าย (Simple linear regression model)

$$Y_i = \alpha + \beta X_i + \varepsilon_i \quad \text{เมื่อ } i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (36)$$

ทั้ง α และ β จะถูกเรียกว่าเป็น สัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficients) รูปแบบการถดถอยข้างต้นเป็นรูปแบบ การถดถอยเชิงเส้น เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระเป็นแบบเส้นตรง และจะเรียกว่าการถดถอยอย่างง่ายเนื่องจากมีตัวแปรอิสระเพียงตัวเดียว และมีกำลังเป็นหนึ่ง สมมติฐานในการวิเคราะห์การถดถอยมีดังนี้ข้อที่ 1 ความคลาดเคลื่อน (ε_i) จะมีการแจกแจงแบบปกติที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และมีความแปรปรวนคงที่เท่ากับ σ^2 ทุกค่า $i = 1, 2, \dots, n$ ข้อที่ 2 ความคลาดเคลื่อนจะเป็นอิสระต่อกัน กล่าวคือ ความแปรปรวนร่วมระหว่าง ε_i และ ε_j จะมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อ $i \neq j$ และข้อที่ 3 ตัวแปรอิสระและความคลาดเคลื่อน จะเป็นอิสระซึ่งกันและกัน

5.2 สมการการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย

ในรูปแบบการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย จะยังคิดค่าสัมประสิทธิ์ของการถดถอย α และ β ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ยังไม่ทราบค่า แต่จากการเก็บรวบรวมข้อมูลของ Y และ X มาจำนวน n คู่ จะนำมาคำนวณหาค่าประมาณของสัมประสิทธิ์การถดถอยได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุด (Least squares Estimation) ซึ่งวิธีประมาณดังกล่าวจะได้สมการปกติ (normal equation) 2 สมการคือ

$$an + b \sum_{i=1}^n X_i = \sum_{i=1}^n Y_i \quad (37)$$

$$a \sum_{i=1}^n X_i + b \sum_{i=1}^n X_i^2 = \sum_{i=1}^n X_i Y_i \quad (38)$$

เมื่อ a คือ ค่าประมาณของ α และ b คือ ค่าประมาณของ β จากการแก้สมการข้างต้น จะได้สูตรการคำนวณหาค่า a และ b ดังนี้

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - n\bar{X}\bar{Y}}{\sum_{i=1}^n X_i^2 - n\bar{X}^2} \quad (39)$$

$$\text{และ} \quad a = \bar{Y} - b\bar{X}, \quad \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i, \quad \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

จากค่า a และ ค่า b คำนวณได้จะได้สมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย เมื่อ $\hat{Y}_i$ คือ ค่าประมาณของ Y_i , a คือ ค่าประมาณของ α หรือจุดตัดแกน Y ของเส้นสมการถดถอย และ b คือ ค่าประมาณของ β หรือค่าประมาณการเปลี่ยนแปลงของ Y เมื่อ X เพิ่มขึ้น 1 หน่วยจะได้สมการถดถอยดังนี้คือ

$$\hat{Y}_i = a + bX_i \quad (40)$$

ค่าของ a อาจมีค่าบวก หรือลบก็ได้ หาก a มีค่าเป็นบวกจุดตัดแกน Y จะอยู่เหนือจุดกำเนิด(origin) แต่ถ้าหาก a มีค่าลบจุดตัดแกน Y จะอยู่ต่ำกว่าจุดกำเนิด ค่าของ b อาจมีค่าบวก หรือลบก็ได้เช่นกัน ถ้าหาก b มีค่าบวกความชันของเส้นสมการถดถอยจะเพิ่มขึ้นเมื่อ X มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ถ้าหาก b มีค่าลบความชันของเส้นสมการถดถอยจะลดลงเมื่อ X มีค่าเพิ่มขึ้น

5.3 การทดสอบนัยสำคัญของการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย

จากรูปแบบการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย $Y_i = \alpha + \beta X_i + \varepsilon_i$ เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, n$ การทดสอบนัยสำคัญของการถดถอยอาจเป็นการทดสอบว่า $\alpha = 0$ หรือไม่ และการทดสอบว่า $\beta = 0$ หรือไม่ ถ้าหากการทดสอบพบว่า $\alpha = 0$ แสดงว่ารูปแบบการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายผ่านจุดกำเนิด แต่ถ้าการทดสอบพบว่า $\alpha \neq 0$ แสดงว่ารูปแบบการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายไม่ผ่านจุดกำเนิด ถ้าหากการตรวจสอบพบว่า $\beta = 0$ แสดงว่ารูปแบบการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายไม่มีเทอมของ X ซึ่งหมายความว่าตัวแปรอิสระ(X) ไม่มีอิทธิพลของตัวแปรตาม (Y) ถ้าหากการทดสอบพบว่า $\beta \neq 0$ แสดงว่ารูปแบบการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายควรมีเทอมของ X ซึ่งหมายความว่าตัวแปรอิสระ (X) มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม (Y) นอกจากนี้การทดสอบอาจเป็นการทดสอบ $\alpha = \alpha_0$ หรือไม่ โดยที่ α_0 คือ ค่าคงที่ และการทดสอบ $\beta = \beta_0$ หรือไม่ โดยที่ β_0 คือ ค่าคงที่ ก็ได้ รายละเอียดการทดสอบมีดังนี้คือ การคำนวณต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง สมมติฐานที่ต้องการทดสอบ และตัว

สถิติที่ใช้ในการทดสอบ คือ ให้ e_i คือ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการประมาณค่าตัวแปรตามที่ $i = Y_i - \hat{Y}_i$ เมื่อ $i = 1, 2, \dots, n$ และ SSE คือ ผลรวมของกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Error Sum of Squares) หาได้ดังนี้

$$SSE = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (41)$$

MSE คือ ค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Error Mean Square) หาได้จาก

$$MSE = \frac{SSE}{n - 2} \quad (42)$$

$S^2(a)$ คือ ค่าประมาณความแปรปรวนของ a ดังนี้

$$S^2(a) = \frac{(MSE) \sum_{i=1}^n X_i^2}{n \sum_{i=1}^n (X - \bar{X})^2} = \frac{(MSE) \sum_{i=1}^n X_i^2}{n \sum_{i=1}^n X_i^2 - n\bar{X}^2} \quad (43)$$

$S(a)$ คือ ค่าประมาณส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ a หาจาก

$$S(a) = \sqrt{S^2(a)} \quad (44)$$

$S^2(b)$ คือ ค่าประมาณความแปรปรวนของ b หาได้จาก

$$S^2(b) = \frac{MSE}{\sum_{i=1}^n (X - \bar{X})^2} = \frac{MSE}{\sum_{i=1}^n X_i^2 - n\bar{X}^2} \quad (45)$$

$S(b)$ คือ ค่าประมาณส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ b หาได้จาก

$$S(b) = \sqrt{S^2(b)} \quad (46)$$

สมมติฐานในการทดสอบมีดังนี้คือ

(1) $H_0 : \alpha = 0$ (การถดถอยผ่านจุดกำเนิด), $H_1 : \alpha \neq 0$ (การถดถอยไม่ผ่านจุดกำเนิด)

ตัวสถิติที่ใช้ในการทดสอบคือ $t = \frac{a-0}{S(a)}$ เมื่อ $d.f. = n - 2$

(2) $H_0 : \beta = 0$ (ตัวแปรอิสระไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม), $H_1 : \beta \neq 0$ (ตัวแปรอิสระมีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม) ตัวสถิติที่ใช้ในการทดสอบคือ $t = \frac{b-0}{S(b)}$ เมื่อ $d.f. = n - 2$

ในกรณีการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย การทดสอบสมมติฐานว่า $\beta = 0$ หรือไม่นั้น อาจใช้ตัวสถิติในการทดสอบคือ F จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน ดังนี้คือ

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนการทดสอบแบบ F

แหล่งความแปรปรวน	d.f.	S.S.	M.S.	F
การถดถอย (Regression)	1	SSR	MSR	$F = \frac{MSR}{MSE}$
ความคลาดเคลื่อน (Error)	n - 2	SSE	MSE	
รวม (Total)	n - 1	SST		

ที่มา: สุรินทร์ (2548)

เมื่อ SST คือ ผลรวมของกำลังสองของทั้งหมด (Total Sum of Squares) หาได้ดังนี้

$$SST = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - n\bar{Y}^2 \quad (47)$$

SSR คือ ผลรวมของกำลังสองเนื่องจากการถดถอย (Regression Sum of Squares)

$$SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 = b \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) = b \left[\sum_{i=1}^n X_i Y_i - n\bar{X}\bar{Y} \right] \quad (48)$$

SSE คือ ผลรวมของกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Error Sum of Squares)

หาได้จาก

$$SSE = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 = SST - SSR \text{ (เนื่องจาก } SST = SSR + SSE \text{)} \quad (49)$$

MRS คือ ค่าเฉลี่ยของกำลังสองเนื่องจากการถดถอย (Regression Mean Squares)

หาได้จาก

$$MRS = \frac{SSR}{1} \quad (50)$$

MSE คือ ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Error Mean Square) หาได้ดังนี้

$$MSE = \frac{SSE}{n - 2} \quad (51)$$

ค่าของ $F = \frac{MSR}{MSE}$ ที่คำนวณได้จะมีการแจกแจงแบบ F ซึ่งมีองศาความเป็นอิสระเท่ากับ $(1, n-2)$ ซึ่งจะใช้เป็นตัวสถิติในการทดสอบสมมติฐานว่า $\beta = 0$ หรือไม่ ซึ่งในกรณีของการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย การทดสอบสมมติฐานว่า $\beta = 0$ อาจใช้ได้ทั้งการทดสอบโดยใช้การแจกแจงแบบ t (t-test) และการทดสอบโดยใช้การแจกแจงแบบเอฟ (F-test) ทั้งนี้เพราะว่า $t_{(n-2)}^2 = F_{(1,n-2)}$

5.4 สัมประสิทธิ์แห่งการกำหนด

การสร้างสมการการถดถอยเส้นตรงเพื่อประมาณค่าของตัวแปรตาม โดยใช้ค่าตัวแปรอิสระที่ได้จะสามารถหาค่าที่แสดงถึงอิทธิพลของตัวแปรอิสระที่มีต่อตัวแปรตามได้โดยการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แห่งการกำหนด (Coefficient of Determination) ได้ดังนี้ คือให้ R^2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์แห่งการกำหนดของสมการการถดถอย โดยค่าของ R^2 ที่คำนวณได้มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 ซึ่งจะมีความหมายว่า ถ้าหาก R^2 มีค่ามากแสดงว่าตัวแปรอิสระมีอิทธิพลต่อตัวแปรตามมาก แต่ถ้า R^2 มีค่าน้อยแสดงว่าตัวแปรอิสระมีอิทธิพลต่อตัวแปรตามน้อย ในบางครั้งค่าของ R^2 จะถูกทำให้เป็นร้อยละ หรือคูณด้วย 100 ซึ่งค่าร้อยละนี้จะแสดงถึงร้อยละที่ตัวแปรอิสระจะสามารถอธิบายถึงความแปรผันของตัวแปรตาม R^2 หาได้จาก

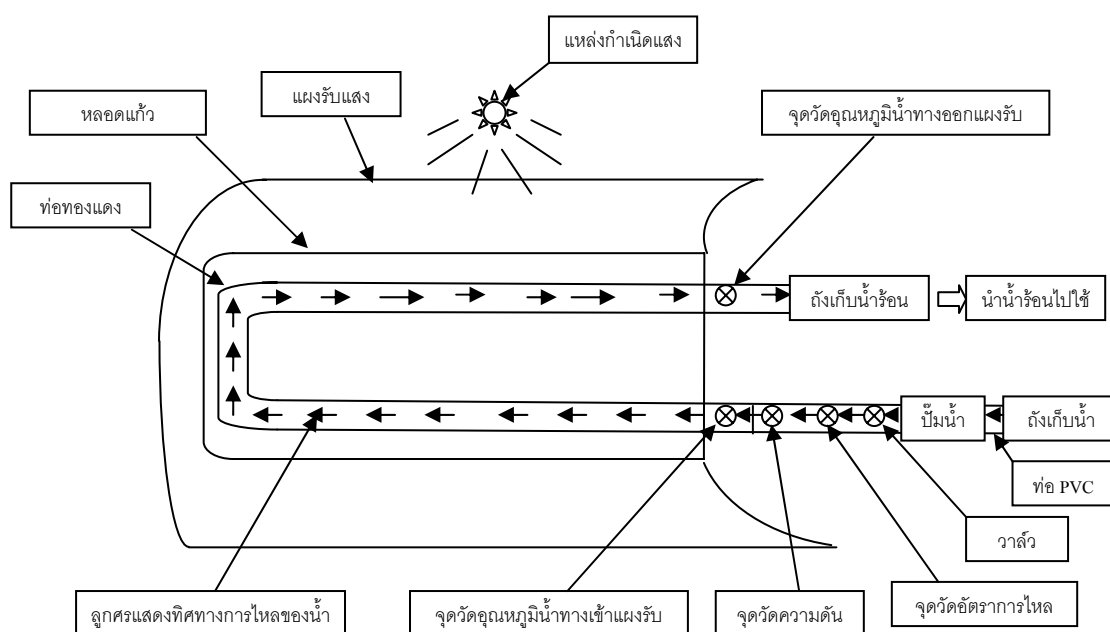
$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (52)$$

5.5 การพยากรณ์

สมการการถดถอยที่ได้ หากผลการทดสอบพบว่ามีความสำคัญ จะสามารถนำไปใช้ในการพยากรณ์หรือประมาณค่าของตัวแปรตามได้ โดยการแทนค่าของตัวแปรอิสระลงในสมการการถดถอยที่ได้ แต่การพยากรณ์ หรือการประมาณค่าของตัวแปรตามควรอยู่ในช่วงของค่าของตัวแปรอิสระเก็บรวบรวมมาได้ ไม่ควรอยู่ห่างจากช่วงของค่าของตัวแปรอิสระดังกล่าวมากนัก เพราะการพยากรณ์อาจมีความคลาดเคลื่อนมาก

ผลการศึกษาและวิจารณ์

การทดสอบระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงเพื่อหาประสิทธิภาพของระบบ และความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับความเข้มของแสงที่ใช้ในระบบ เพื่อให้เกิดความเข้าใจระบบ และจุดที่ทำการวัดค่าต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 แผนภาพระบบผลิตน้ำร้อน และตำแหน่งที่ทำการวัดค่าต่างๆ

เมื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์ และทำตามขั้นตอนการทดสอบระบบแล้ว ทำการบันทึกผลการทดลอง เพื่อหาประสิทธิภาพของระบบ มีขั้นตอนดังนี้คือ ทำการวัดค่าความสว่างโดยใช้ลักต์มิเตอร์ จากนั้นคำนวณหาค่าความเข้มแสงที่แผงรับแสง และท่อรับแสง และทำการทดลองโดยปรับอัตราการไหลของน้ำที่ความดันคงที่ และปรับความเข้มแสงที่อัตราการไหลคงที่ จากนั้นนำค่าที่ได้ไปหาค่าความร้อน และหาประสิทธิภาพของระบบต่อไป

การทดลองที่ 1 พิจารณาอัตราการไหลของน้ำ ที่ความเข้มแสงคงที่

ในการทดลองที่ 1 ใช้วิธีทดสอบโดยปรับอัตราการไหลของน้ำที่ความเข้มแสงคงที่ ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าแผงรับแสง และอุณหภูมิของน้ำที่ออกจากแผงรับแสง ผลต่างของอุณหภูมิ อุณหภูมิห้องทดลอง และความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องทดลอง

ตารางที่ 3 ความเข้มแสงที่ใช้ในการทดลอง

กำลังของ หลอดไฟ (วัตต์)	ระยะห่างจาก หลอดไฟถึงพื้นที่ พิจารณา (เมตร)	ความสว่าง (ลักซ์)			ความสว่าง เฉลี่ย (ลักซ์)	ความเข้มแสง (วัตต์ต่อตารางเมตร)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
500.00	1.00	670.00	660.00	565.00	631.67	631.67
	1.50	211.00	212.00	210.00	211.00	474.75
1,000.00	1.00	1,075.00	1,072.00	1,078.00	1,075.00	1,075.00
	1.50	271.00	269.00	270.00	270.00	607.50
1,500.00	1.00	1,210.00	1,208.00	1,209.00	1,209.00	1,209.00
	1.50	392.00	387.00	396.00	391.67	881.26
2,000.00	1.00	1,720.00	1,720.00	1,722.00	1,720.67	1,720.67
	1.50	574.00	574.00	573.00	573.67	1,290.75

จากตารางที่ 3 ทำการบันทึกผลการทดลอง โดยกำลังของหลอดไฟที่ 500.00 วัตต์, 1,000.00 วัตต์, 1,500.00 วัตต์ และ 2,000.00 วัตต์ จากนั้นวัดระยะห่างจากหลอดไฟถึงพื้นที่พิจารณา ที่ระยะ 1.00 เมตรจากหลอดไฟถึงท่อรับแสง และที่ระยะ 1.50 เมตรจากหลอดไฟถึงแผงรับแสง จากนั้นวัดความสว่างโดยใช้ลักซ์มิเตอร์ ทำการบันทึกค่า 3 ครั้ง จากนั้นทำการเฉลี่ยค่าที่ได้ และคำนวณค่าความเข้มแสงเพื่อนำไปใช้ต่อไป

ตารางที่ 4 ความเข้มแสงที่แผงรับแสง และท่อรับแสงที่ 270.00 ลักต์

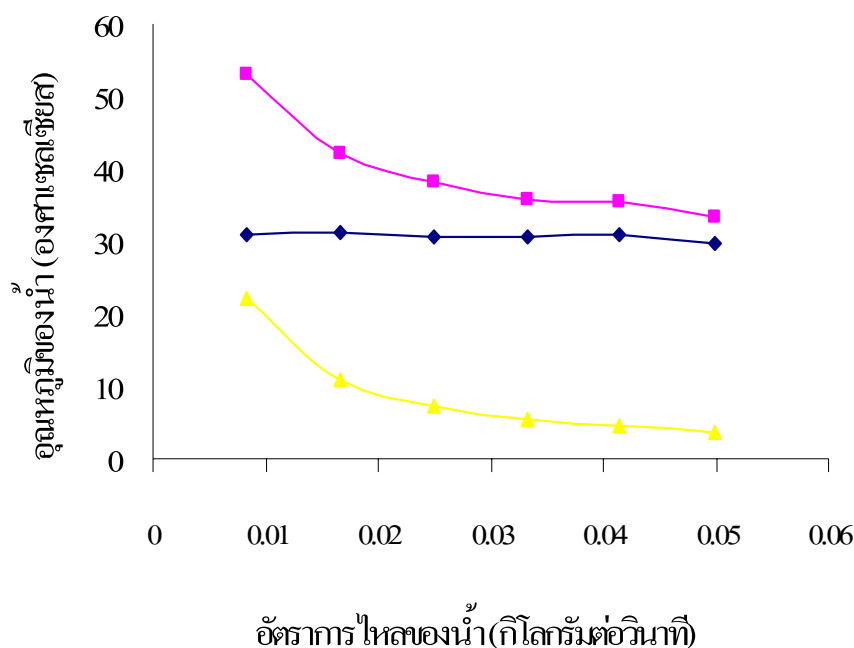
จุดที่ได้รับแสง	ความเข้มแสง (วัตต์ต่อตารางเมตร)
แผงรับแสง	607.50
ท่อรับแสง	1,075.00

จากตารางที่ 3 นำค่ากำลังส่องสว่างที่ได้จากตารางที่ 4 มาพิจารณาจะเห็นได้ว่า จุดที่ได้รับแสงมีกำลังส่องสว่างที่ 607.50 วัตต์ต่อตารางเมตร และท่อรับแสงได้รับกำลังส่องสว่างที่ 1,075.00 วัตต์ต่อตารางเมตร จากนั้นทำการบันทึกค่าอุณหภูมิของน้ำเข้าและออกจากแผงรับ อุณหภูมิห้องทดลอง หาค่าผลต่างอุณหภูมิที่ได้ และความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องทดลองที่อัตราการไหลของน้ำที่ค่าต่างๆ ที่ความเข้มแสงคงที่ 607.50 วัตต์ต่อตารางเมตร จากนั้นทำการปรับอัตราการไหลของน้ำโดยทำการทดลองที่ 6 อัตราการไหล ดังนี้คือ 0.0083, 0.0166, 0.0249, 0.0332, 0.0415 และ 0.0499 กิโลกรัมต่อวินาที ซึ่งในการบันทึกผลจะทำการทดลองจนกว่าอุณหภูมิของน้ำที่ทางออกจากแผงรับแสงจะคงที่ จากนั้นทำการเฉลี่ยค่าที่ได้ จากค่าสูงสุดที่บันทึกผลได้ จำนวน 3 ค่า ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ข้อมูลเฉลี่ยที่ได้จากผลการทดลอง ที่ความเข้มแสง 607.50 วัตต์ต่อตารางเมตร

รายการ		อัตราการไหลของน้ำ (กิโลกรัมต่อวินาที)					
		0.0083	0.0166	0.0249	0.0332	0.0415	0.0499
อุณหภูมิน้ำ (องศาเซลเซียส)	เข้าแผงรับแสง	31.00	31.17	30.67	30.50	31.00	29.67
	ออกแผงรับแสง	53.00	42.17	38.05	35.83	35.50	33.33
อุณหภูมิห้อง (องศาเซลเซียส)	กระเปาะแห้ง	34.00	33.33	32.67	32.00	32.00	30.00
	กระเปาะเปียก	29.00	30.00	30.33	30.00	30.00	27.67
ผลต่างของอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)		22.00	11.00	7.38	5.33	4.50	3.66
ความชื้นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)		67.00	81.00	86.33	88.00	88.00	80.33

จากตารางแสดงข้อมูลที่ 5 นำข้อมูลเฉลี่ยของอุณหภูมิของน้ำทางเข้าแผงรับแสง อุณหภูมิของน้ำทางออกของแผงรับแสง และผลต่างของอุณหภูมิ ที่ความเข้มแสง 607.50 วัตต์ต่อตารางเมตร มาสร้างกราฟเพื่อพิจารณาผลของความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น และแสดงความสัมพันธ์ ได้ดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับอุณหภูมิของน้ำ ที่ความเข้มแสง 607.50 วัตต์ต่อตารางเมตร

จากภาพที่ 20 แกนแนวนอนแสดงอัตราการไหลของน้ำหน่วยเป็นลิตรต่อวินาที แกนแนวตั้งแสดงอุณหภูมิของน้ำ หน่วยองศาเซลเซียส กราฟมีจำนวน 3 เส้น โดย กราฟเส้นบนแสดงอุณหภูมิของน้ำทางออกจากแผงรับแสง กราฟเส้นกลางแสดงอุณหภูมิของน้ำทางเข้าแผงรับแสง และกราฟเส้นล่างแสดงผลต่างของอุณหภูมิของน้ำทางเข้า และทางออกจากแผงรับแสง จากกราฟจะเห็นได้ว่า เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นการอุณหภูมิของน้ำที่ออกจากแผงรับแสงลดลง และผลต่างของอุณหภูมิก็ตกลงตามไปด้วย

เมื่อได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4 แล้ว หาค่าความร้อนที่จุดต่างๆ ได้รับดังนี้ แผงรับแสง ท่อรับแสง ท่อนำความร้อน และน้ำ โดยความร้อนที่แผงรับแสง และท่อรับแสง พิจารณาจากพลังงานที่ได้จากความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเป็นหลัก ความร้อนที่ท่อนำความร้อนได้รับพิจารณาจากการค่าการสูญเสียความร้อนของท่อรับแสง และอุณหภูมิของน้ำที่ออกจากแผงรับแสงซึ่งค่าที่ได้เป็นค่าที่ได้จากการวัด และการคำนวณ ซึ่งตัวอย่างการคำนวณแสดงไว้ในภาคผนวก ข แสดงผลค่าความร้อนที่จุดต่างๆ ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ความร้อนที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ความเข้มแสง 607.50 วัตต์ต่อตารางเมตร

จุดที่ได้รับความร้อน	ความร้อน (วัตต์)
แผงรับแสง	1,089.07
ท่อรับแสง	2,117.75
ท่อนำความร้อน	1,694.20
น้ำ	764.36

พิจารณาค่าความร้อนที่น้ำได้รับที่อัตราการไหลต่างๆ ที่ความเข้มแสงคงที่ 607.50 วัตต์ต่อตารางเมตร และผลต่างของอุณหภูมิดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ความร้อนที่น้ำได้รับที่อัตราการไหลต่างๆ ที่ความเข้มแสงคงที่ 607.50 วัตต์ต่อตารางเมตร

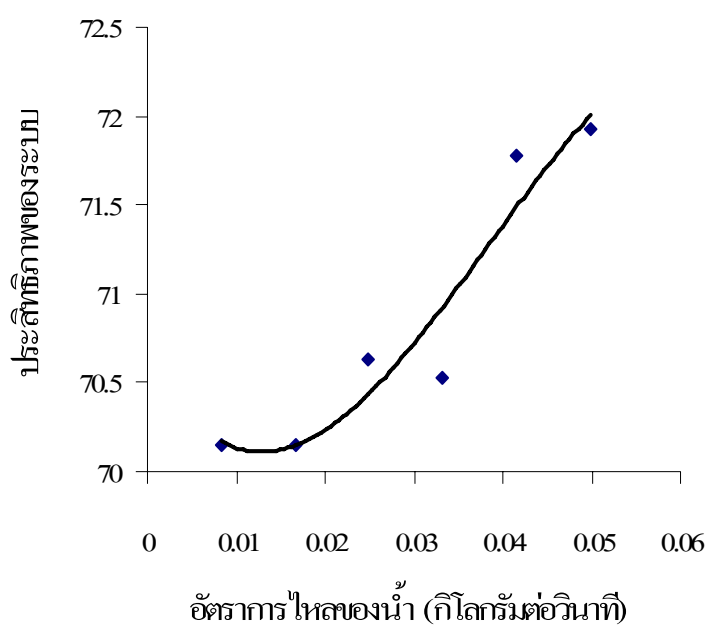
อัตราการไหล (กิโลกรัมต่อวินาที)	ผลต่างของอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความร้อนที่น้ำได้รับ (วัตต์)
0.0083	22.00	764.36
0.0166	11.00	764.36
0.0249	7.38	769.23
0.0332	5.53	768.53
0.0415	4.50	781.74
0.0499	3.75	783.31

จากอัตราการไหล อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าแผงรับแสง อุณหภูมิของน้ำที่ออกจากแผงรับแสง และความร้อนที่ได้ สามารถหาประสิทธิภาพของระบบได้จาก อัตราส่วนของพลังงานความร้อนที่นำมาใช้ประโยชน์ หรือความร้อนที่น้ำได้รับ ต่อ ความร้อนที่แผงรับแสงได้รับ แสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ประสิทธิภาพของระบบที่อัตราการไหลต่างๆ ที่ความเข้มแสง 607.50 วัตต์ต่อตารางเมตร

อัตราการไหลของน้ำ (กิโลกรัมต่อวินาที)	อุณหภูมิน้ำก่อนเข้า แผงรับแสง (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิน้ำออกจาก แผงรับแสง (องศาเซลเซียส)	ประสิทธิภาพ ของระบบ (เปอร์เซ็นต์)
0.0083	31.00	53.00	70.18
0.0166	31.17	42.17	70.15
0.0249	30.67	38.05	70.63
0.0332	30.50	35.83	70.53
0.0415	31.00	35.50	71.78
0.0499	29.67	33.42	71.93

เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพของระบบกับการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำ ตามตารางผลการทดลองที่ 10 นำมาสร้างกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ได้ดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับประสิทธิภาพของระบบ
ที่ความเข้มแสงคงที่ 607.50 วัตต์ต่อตารางเมตร

จากภาพที่ 21 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำ กับประสิทธิภาพของระบบที่ความเข้มแสง 607.50 วัตต์ต่อตารางเมตร โดยแกนแนวนอนแสดงอัตราการไหลของน้ำหน่วยกิโลกรัมต่อวินาที และแกนแนวตั้งแสดงประสิทธิภาพของระบบ จะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของระบบก็สูงขึ้นตามไปด้วย และสังเกตได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพของระบบนั้น อยู่ในช่วงแคบๆ ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ ถึง 72.50 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (linear regression analysis) ผลที่ได้คือ อัตราการไหลของน้ำมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพของระบบ 84.72 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพสูงสุดของระบบที่ 71.84 เปอร์เซ็นต์ เมื่อ x คือ อัตราการไหลของน้ำ หน่วยกิโลกรัมต่อวินาที และ y คือ ประสิทธิภาพของระบบ จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$y = 69.494 + 47.052x \quad (53)$$

เมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่างอัตราไหลของน้ำผ่านท่อทองแดง และอัตราอุณหภูมิของน้ำทางออกมาสร้างความสัมพันธ์ เมื่อ $\dot{m}$ คือ อัตราไหลของน้ำในการทดลอง และ $\dot{m}_{\max}$ คือ อัตราการไหลของน้ำสูงสุด ซึ่งในการทดลองนี้ อัตราไหลของน้ำสูงสุดเท่ากับ 0.08 กิโลกรัมต่อวินาที จะได้อัตราไหลของน้ำผ่านท่อทองแดง ดังสมการที่ 54 เมื่อ T_o คือ อุณหภูมิของน้ำทางออกจากแผงรับแสง T_i คือ อุณหภูมิทางเข้าของแผงรับแสง และ T_a คือ อุณหภูมิของห้องทดลอง จะได้ความสัมพันธ์ของอัตราอุณหภูมิของน้ำทางออก ดังสมการที่ 55

$$\text{อัตราไหลของน้ำผ่านท่อทองแดง} = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{\max}} \quad (54)$$

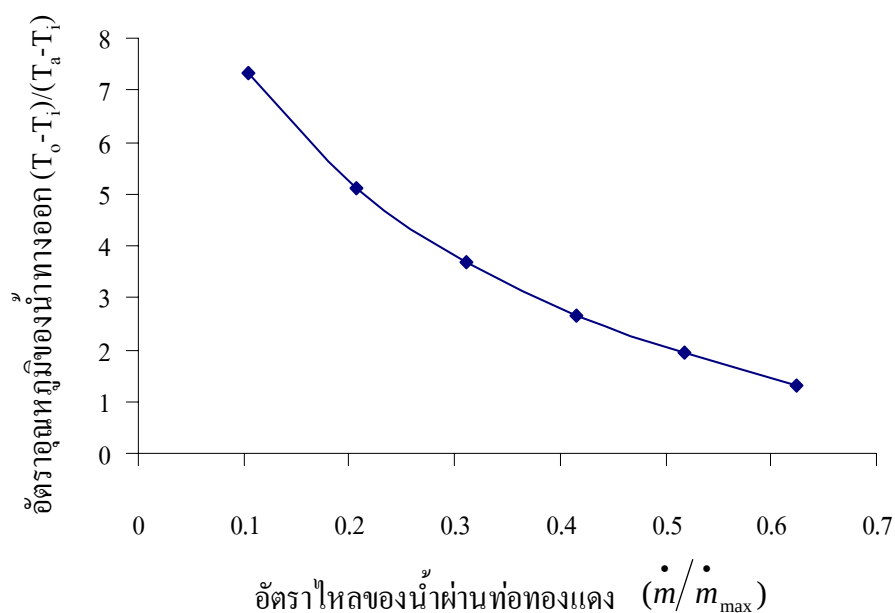
$$\text{อัตราอุณหภูมิของน้ำทางออก} = \frac{T_o - T_i}{T_a - T_i} \quad (55)$$

จากการทดลองที่ 1 ปรับอัตราการไหลของน้ำที่ความเข้มแสงคงที่ เมื่อนำผลที่ได้มาพิจารณาตามสมการที่ 54 และสมการที่ 55 จะได้ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 อัตราไหลของน้ำผ่านท่อทองแดง และอัตราอุณหภูมิของน้ำทางออก

อัตราการไหล ของน้ำ (กิโลกรัมต่อ วินาที)	อุณหภูมิของน้ำ ที่ทางเข้าของ แผงรับแสง (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิของน้ำ ที่ทางออกของ แผงรับแสง (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิของ ห้องทดลอง (องศาเซลเซียส)	อัตราไหลของ น้ำผ่านท่อ ทองแดง $\left(\frac{\dot{m}}{\dot{m}_{\max}} \right)$	อัตราอุณหภูมิ ของน้ำ ทางออก $\left(\frac{T_o - T_i}{T_a - T_i} \right)$
0.0083	31.00	53.00	34.00	0.1038	7.3333
0.0166	31.17	42.17	33.33	0.2075	5.0926
0.0249	30.67	38.05	32.67	0.3113	3.6900
0.0332	30.50	35.83	32.50	0.4150	2.6650
0.0415	31.00	35.50	33.33	0.5188	1.9313
0.0499	29.67	33.42	32.50	0.6238	1.2933

จากตารางที่ 9 นำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราไหลของน้ำผ่านท่อทองแดง และอัตราอุณหภูมิของน้ำทางออก ได้ดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 อัตราไหลของน้ำผ่านท่อทองแดง และอัตราอุณหภูมิของน้ำทางออก

จากภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ของอัตราไหลของน้ำผ่านท่อทองแดงหาจาก $\dot{m}/\dot{m}_{\max}$ และ อัตราอุณหภูมิของน้ำทางออกหาจาก $(T_o - T_i)/(T_a - T_i)$ ซึ่งเป็นมิติไร้หน่วย และ เมื่ออัตราไหลของน้ำผ่านท่อทองแดงเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าอัตราอุณหภูมิของน้ำทางออกลดลง และสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำกับอุณหภูมิของน้ำทางออกจากแผงรับแสง จากการทดลองที่ 1 ด้วย

การทดลองที่ 2 พิจารณาความเข้มแสง ที่อัตราการไหลของน้ำคงที่

การทดลองที่ 2 ใช้วิธีปรับความเข้มแสงที่อัตราการไหลของน้ำคงที่ ในการทดลองนี้ ทดลองที่อัตราการไหลของน้ำ 0.0083 กิโลกรัมต่อวินาที และปรับความเข้มแสงเฉลี่ย ดังนี้คือ 474.75, 607.5, 881.26 และ 1,290.75 วัตต์ต่อตารางเมตร โดยพิจารณาพลังงานที่แผงรับแสงและท่อรับแสงได้รับตามความเข้มแสงต่างๆ แสดงดังตารางที่ 10 เมื่อทราบความเข้มแสงแล้ว นำไปคำนวณหาค่าความร้อนที่จุดต่าง ดังแสดงในตารางที่ 11 อัตราการไหลคงที่ 0.0083 กิโลกรัมต่อวินาที ซึ่งตัวอย่างการคำนวณแสดงไว้ที่ภาคผนวก ข

ตารางที่ 10 ความเข้มแสงที่แผงรับแสง และท่อรับแสง ที่อัตราการไหลของน้ำคงที่ 0.0083 กิโลกรัมต่อวินาที

จุดที่พิจารณา	ความเข้มแสง (วัตต์ต่อตารางเมตร)			
	211.00 (ลักต์)	270.00(ลักต์)	391.67(ลักต์)	573.67(ลักต์)
แผงรับแสง	474.75	607.50	881.26	1,290.75
ท่อรับแสง	631.67	1,075.00	1,209.00	1,720.67

ตารางที่ 11 ค่าความร้อนที่จุดต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำคงที่ 0.0083 กิโลกรัมต่อวินาที

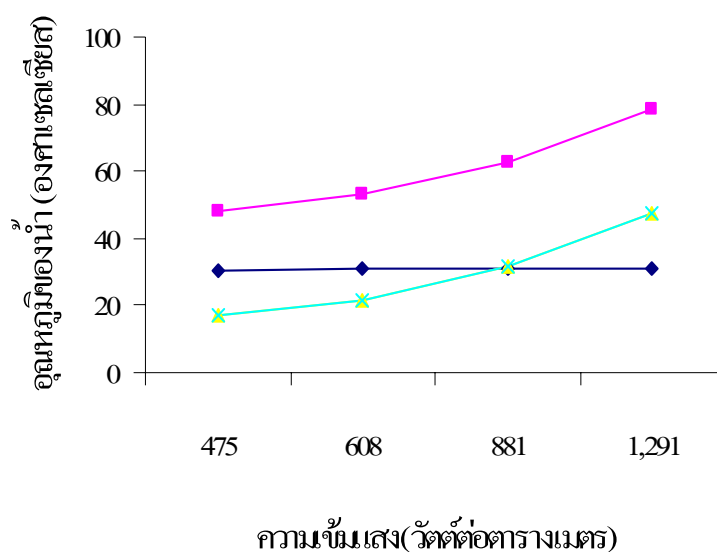
จุดที่ได้รับ ความร้อน	ค่าความร้อนที่ความเข้มแสงต่างๆ (วัตต์)			
	474.75 (วัตต์ต่อตารางเมตร)	607.50 (วัตต์ต่อตารางเมตร)	881.26 (วัตต์ต่อตารางเมตร)	1,290.75 (วัตต์ต่อตารางเมตร)
แผงรับแสง	851.08	1,089.07	1,579.84	2,313.93
ท่อรับแสง	1,244.39	2,117.75	2,381.37	3,389.72
ท่อนำความร้อน	995.51	1,694.20	1,905.10	2,711.78
น้ำ	208.46	764.36	509.34	654.22

ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าแผงรับแสงและออกจากแผงรับแสง อุณหภูมิห้องทดลอง ผลต่างของอุณหภูมิของน้ำทางเข้าและทางออกของแผงรับแสง ความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องทดลอง ที่อัตราการไหลของน้ำคงที่ที่ 0.0083 กิโลกรัมต่อวินาที ได้ผลตามตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ข้อมูลเฉลี่ยที่ได้จากผลการทดลองที่ 2 ที่อัตราการไหลของน้ำคงที่ 0.0083 กิโลกรัมต่อวินาที

รายการบันทึกผล		ความเข้มแสง (วัตต์ต่อตารางเมตร)			
		474.75	607.50	881.26	1,290.75
อุณหภูมิของน้ำ (องศาเซลเซียส)	เข้าแผงรับแสง	30.67	31.17	31.00	31.00
	ออกแผงรับแสง	47.83	53.00	62.83	78.17
อุณหภูมิห้องทดลอง (องศาเซลเซียส)	กระเปาะแห้ง	31.00	34.00	34.00	34.00
	กระเปาะเปียก	29.00	29.00	32.00	30.00
ผลต่างของอุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)		17.16	21.83	31.83	47.17
ความชื้นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)		88.00	67.00	87.00	77.00

จากตารางที่ 12 แสดงข้อมูลเฉลี่ยของอุณหภูมิของน้ำที่ทางเข้าแผงรับแสง และทางออกของแผงรับแสง และผลต่างของอุณหภูมิของน้ำที่ทางเข้าแผงรับแสง และทางออกของแผงรับแสง ที่ได้จากการทดลองที่ 2 ที่อัตราการไหลของน้ำคงที่ที่ 0.0083 กิโลกรัมต่อวินาที สามารถนำมาสร้างกราฟได้ดังภาพที่ 23



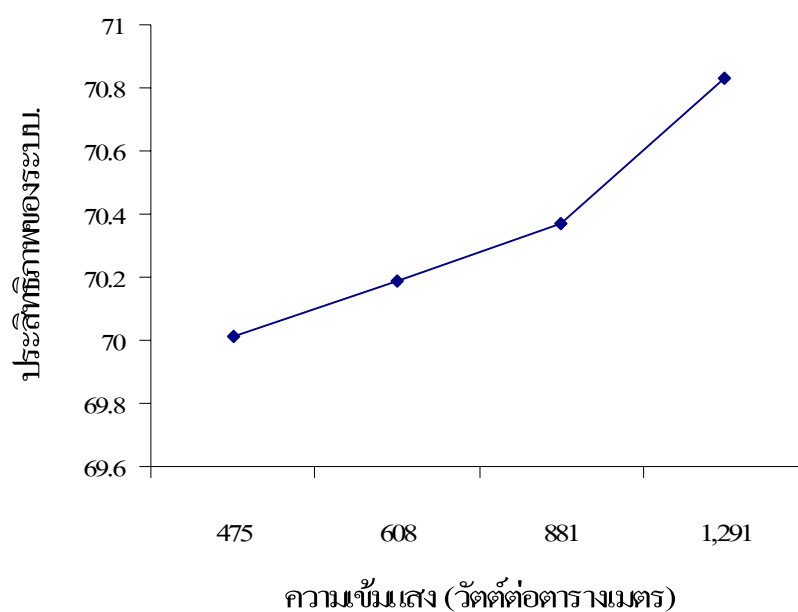
ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับอุณหภูมิของน้ำที่อัตราการไหลของน้ำคงที่ 0.0083 กิโลกรัมต่อวินาที

จากผลการทดลองดังภาพที่ 23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง กับอุณหภูมิที่อัตราการไหลของน้ำ 0.0083 กิโลกรัมต่อวินาที โดยแกนแนวนอนแสดงความเข้มแสงที่ค่าต่างๆ หน่วยวัตต์ต่อตารางเมตร ส่วนแกนแนวตั้งแสดงอุณหภูมิ หน่วยองศาเซลเซียส กราฟมีจำนวน 3 เส้น ดังนี้ กราฟเส้นบนแสดงอุณหภูมิของน้ำทางออกจากแผงรับแสง กราฟเส้นกลางแสดงอุณหภูมิของน้ำทางเข้าแผงรับแสง และกราฟเส้นล่างแสดงผลต่างของอุณหภูมิของน้ำทางเข้าและทางออกจากแผงรับแสง จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของน้ำทางออกจากแผงรับแสงเพิ่มขึ้น และผลต่างของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้น เมื่อทำการหาประสิทธิภาพของระบบเมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงไปจะได้ดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ประสิทธิภาพของระบบที่ความเข้มแสงต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำคงที่
0.0083 กิโลกรัมต่อวินาที

ความเข้มแสง (วัตต์ต่อตาราง เมตร)	อุณหภูมิน้ำก่อน เข้าแผงรับแสง (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิน้ำออก จากแผงรับแสง (องศาเซลเซียส)	ความร้อนที่แผง รับแสงได้รับ (วัตต์)	ความร้อน ที่น้ำได้รับ (วัตต์)	ประสิทธิภาพ ของระบบ (เปอร์เซ็นต์)
474.75	30.67	47.83	851.08	595.86	70.01
607.50	31.00	53.00	1,089.07	764.36	70.19
881.26	30.00	62.00	1,579.84	1,111.80	70.37
1,290.75	31.00	78.17	2,313.93	1638.87	70.83

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของระบบตามข้อมูลการทดลอง ตามตารางที่ 12 ซึ่งแสดงประสิทธิภาพของระบบที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำคงที่ที่ 0.0083 กิโลกรัมต่อวินาที นำผลที่ได้มาสร้างกราฟได้ตามภาพที่ 24



ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ของความเข้มแสง กับประสิทธิภาพของระบบที่อัตราการไหลของน้ำ
0.0083 กิโลกรัมต่อวินาที

จากภาพที่ 24 แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มแสงกับประสิทธิภาพของระบบที่อัตราการผลิตของน้ำ 0.0083 กิโลกรัมต่อวินาที โดยแกนแนวนอนแสดงความเข้มแสง หน่วยวัตต์ต่อตารางเมตร ส่วนแกนแนวตั้งแสดงค่าประสิทธิภาพของระบบ จะเห็นว่า เมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของระบบสูงขึ้นตาม แต่อยู่ในช่วงแคบๆ ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ ถึง 71 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากการทดสอบใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น ผลที่ได้คือ ความเข้มแสงมีความสัมพันธ์ต่อประสิทธิภาพของระบบ 98.90 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพสูงสุดของระบบจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้คือ 72.40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อ x คือ ความเข้มแสง และ y คือ ประสิทธิภาพของระบบ จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

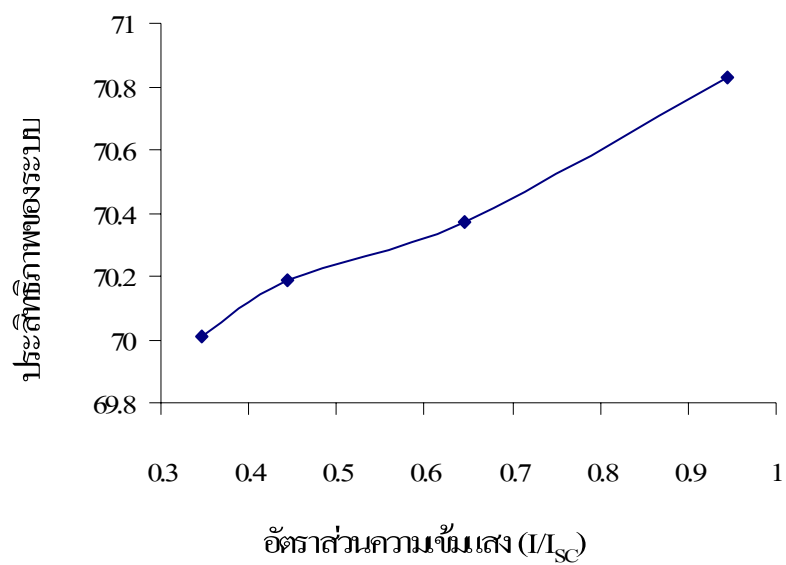
$$y = 69.559 + 0.0022x \quad (54)$$

เมื่อพิจารณาค่าคงตัวของรังสีอาทิตย์ (The Solar Constant) ใช้สัญลักษณ์ (I_{SC}) ซึ่งเป็นความเข้มของรังสีอาทิตย์ที่ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ซึ่งมีค่าประมาณ 1,376 วัตต์ต่อตารางเมตร จะได้อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มแสงที่ใช้ในการทดลอง (I_b) กับค่าคงตัวรังสีอาทิตย์ (I_{SC}) และประสิทธิภาพของระบบดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 อัตราส่วนของความเข้มแสงในการทดลองกับค่าคงตัวรังสีอาทิตย์ และประสิทธิภาพของระบบ

ความเข้มแสงในการทดลอง (วัตต์ต่อตารางเมตร)	$\frac{I_b}{I_{SC}}$	ประสิทธิภาพของระบบ
474.75	0.347	70.01
607.50	0.44	70.19
881.26	0.65	70.37
1,290.75	0.94	70.83

เมื่อนำผลที่ได้จากตารางที่ 14 มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความเข้มแสงในการทดลองกับค่าคงตัวรังสีอาทิตย์กับประสิทธิภาพของระบบ จะได้ดังภาพที่ 25



ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความเข้มแสงในการทดลองกับค่าคงตัวรังสีอาทิตย์
กับประสิทธิภาพของระบบ

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากผลการทดลองที่ 1 พิจารณาอัตราการไหลของน้ำ ที่ความเข้มแสงคงที่ โดยปรับอัตราการไหลที่ค่าต่างๆ ดังนี้คือ 0.0083, 0.0166, 0.0249, 0.0332, 0.0415 และ 0.0499 กิโลกรัมต่อวินาที ผลที่ได้พบว่า ประสิทธิภาพของระบบอยู่ในช่วง 70 เปอร์เซ็นต์ ถึง 72 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิสูงสุดที่ 53 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.0083 กิโลกรัมต่อวินาที ที่ความเข้มแสง 607.50 วัตต์ต่อตารางเมตร เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นอุณหภูมิของน้ำที่ออกจากแผงรับแสงลดลง เนื่องจาก เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นเวลาในการรับความร้อนของน้ำจากท่อรับแสงน้อยลง อีกทั้งเป็นระบบเปิดไม่มีการหมุนเวียนน้ำที่รับความร้อนแล้วกลับมารับความร้อนที่แผงรับแสงอีก ซึ่งผลการทดสอบ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น พบว่าอัตราการไหลมีความสัมพันธ์ต่อประสิทธิภาพของระบบ 84.72 เปอร์เซ็นต์ การทดลองที่ 2 พิจารณาความเข้มแสง ที่อัตราการไหลของน้ำคงที่ การทดลองนี้ใช้ความเข้มแสงที่ค่าต่างๆ ดังนี้คือ 474.75, 607.50, 881.26 และ 1,290.75 วัตต์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำที่ 0.0083 กิโลกรัมต่อวินาที จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพของระบบอยู่ที่ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิสูงสุดของน้ำที่ออกจากแผงรับแสง ที่ประมาณ 78 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มแสง 1,290.75 วัตต์ต่อตารางเมตร จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้น อุณหภูมิของน้ำที่ออกจากแผงรับแสงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากว่าพลังงานจากแสงที่แผงรับแสงได้รับมากขึ้น ความร้อนภายในท่อรับแสงเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้น้ำที่ไปรับความร้อนภายในท่อนำความร้อนได้รับความร้อนมากขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น จากการทดสอบใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น พบว่าความเข้มแสงมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพของระบบ 93.68 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพ การทดลองโดยทำการทดสอบระบบตามมาตรฐาน ASHRAE 93-97 พบว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำทางออกจากแผงรับแสงเพิ่มขึ้น ผลต่างของอุณหภูมิ และ ประสิทธิภาพของระบบ เพิ่มขึ้นในช่วงประมาณ 25 องศาเซลเซียส ถึง 40 องศาเซลเซียส และลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วง 40 องศาเซลเซียส ถึง 50 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของน้ำที่ออกจากแผงรับแสงสูงสุดที่ 50.17 องศาเซลเซียส และประสิทธิภาพของระบบประมาณ 53 เปอร์เซ็นต์

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราการไหลของน้ำกับความเข้มแสงเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จากความสัมพันธ์ที่ได้สามารถนำไปปรับใช้ในชีวิตประจำวันต่อไป

ข้อเสนอแนะ

1. การทดสอบระบบผลิตน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงนี้ ทำการทดลองในห้องทดลอง เนื่องจากต้องควบคุมความเข้มแสงให้คงที่ และป้องกันแสงที่เข้ามาจากนอก ดังนั้นการนำผลการทดลองไปใช้ หรือนำระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงไปใช้กับแหล่งกำเนิดแสงในรูปแบบอื่น เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ ควรจะพิจารณาปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลกระทบต่อระบบด้วย
2. เนื่องจากการศึกษาในงานวิจัยนี้ มุ่งเน้นไปที่ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับความเข้มของแสง ดังนั้น การออกแบบอุปกรณ์ในระบบ เช่น ถังเก็บน้ำร้อน หรืออุปกรณ์เสริมอื่นๆ ยังไม่สมบูรณ์ ดังนั้นเพื่อที่จะสามารถนำระบบไปใช้งานหรือนำไปประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวัน และมีประสิทธิภาพ ระบบต้องสมบูรณ์
3. การบันทึกผลการทดลอง การอ่านค่าที่ได้จากการทดลองด้วยสายตา จากผู้ทำการทดลองเอง ทำให้ค่าที่ได้ไม่ละเอียดและแม่นยำมากนัก ดังนั้นจึงทำการเฉลี่ยค่าที่สูงสุดของแต่ละการทดลอง 3 ค่า ส่งผลให้ค่าการทดลองที่ได้จึงเป็นค่าโดยประมาณ ดังนั้นควรมีเครื่องมือวัดที่สามารถวัดค่าได้อย่างละเอียด ถูกต้อง และสะดวกต่อการใช้งาน เพื่อให้ผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุด

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- ก่องกัญจน์ ภัทรากาญจน์. 2522. คลื่น เสียง แสง. สำนักพิมพ์โรงพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ.
- ถนัด เกษประดิษฐ์. 2545. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แบบเทอร์โมไซฟอน. แหล่งที่มา: <http://teenet.chiangmai.ac.th/emac/journal/2002/16/04.php>, July 14, 2008.
- เบญจมาศ ปุ้ยอ็อก และ วิทยา ขงเจริญ. 2550. การหาประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3 วันที่ 23-25 พฤษภาคม 2550 โรงแรมไบฮอกสกาย กรุงเทพมหานคร.
- ปรีดา จันทวงษ์. 2542. การออกแบบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์อย่างง่ายเพื่อใช้ภายในบ้าน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- มนูญ พิรุณวรรณ. 2543. การออกแบบและทดสอบแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดรวมแสงด้วยแผงพาราโบลิค. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วัฒนา ถาวร. 2539. การส่องสว่าง. สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.
- สุนันท์ ศรีณนิตย์. 2545. การถ่ายเทความร้อน. สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2542. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับบ้านพักอาศัย. มอก. 1507-2541.
- สุรินทร์ นิยมางกูร. 2548. สถิติวิจัย. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

อดิศักดิ์ แก้วประเสริฐ และ ธนาคม สุนทรชัยนาแสง. 2549. การจำลองแบบทางคณิตศาสตร์
ของระบบรวมแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา. การประชุมวิชาการเครือข่าย
วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20 วันที่ 18-20 ตุลาคม 2549
จังหวัดนครราชสีมา.

ASHRAE, Standard 93-77. 1977. **Methods of Testing to Determine the Thermal
Performance of Solar Collectors.** American Society of Heating, Refrigeration, and
Air Conditioning Engineers, New York.

Cengel and A. Yunus. 2003. **Heat Transfer.** 2nd. McGraw-Hill, New York.

Duffie, J.A and W.A. Beckman. 1991. **Solar Engineering of Thermal Process.** 2nd.
John Wiley & Sons, Inc.

Li, M. and L.L. Wang. 2006. Investigation of evacuated tube heated by solar trough
concentrating system. **Energy Conversion and Management.** 47: 3591-3601.

Morrison, G.L., I. Budihardjo and M. Behnia. 2004. Water-in-glass evacuated tube solar water
heaters. **Solar Energy.** 76:135-140.

Norton, B., J.E.J. Edmonds. and E. Lovolos. 1992. Dynamic Simulation of Indirect
Thermosyphon Solar Energy Water Heaters. **Renewable Energy.** 2: 283-297.

Soteris, A.K. 2004. Solar thermal collectors and applications. **Progress in Energy and
Combustion Science.** 30: 231-295.

Wibulswas, P. 1985. Performance Testing and Correlation of solar Domestic Hot Water Heaters.
Aseam, 4th Asian School on Solar Energy Harnessing, December 1985. pp 153-162.