

การวิเคราะห์แผงผลิตน้ำร้อนจากวัสดุโพลีเมอร์โดยวิธีพลศาสตร์ของไหล
เชิงคำนวณ

ANALYSIS OF POLYMERIC SOLAR COLLECTOR BY
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

จिरพงษ์ พงษ์สีทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การวิเคราะห์แอมพลิจูดความร้อนจากวัสดุโพลีเมอร์โดยวิธีพลศาสตร์ของไหล
เชิงคำนวณ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลฉะบuri
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลฉะบuri

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์แผงผลิตน้ำร้อนจากวัสดุโพลีเมอร์โดยวิธีพลศาสตร์
ของไหลเชิงคำนวณ

Analysis of Polymeric Solar Collector by Computational Fluid
Dynamics

ชื่อ - นามสกุล

นายจิรพงษ์ พงษ์สีทอง

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์มนูศักดิ์ งานทอง, Dr.-Ing.

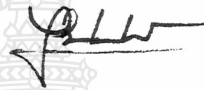
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์วารุณี อริยวิริยะนันท์, Dr.Eng.

ปีการศึกษา

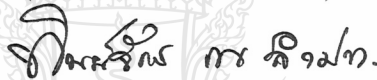
2555

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



ประธานกรรมการ

(อาจารย์พัฒนา ปรามอทย์, Ph.D.)



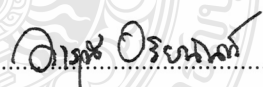
กรรมการ

(อาจารย์ทิพย์จักร ณ ลำปาง, Dr.Eng.)



กรรมการ

(อาจารย์สถาพร ทองวิค, ปร.ค.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วารุณี อริยวิริยะนันท์, Dr.Eng.)



กรรมการ

(อาจารย์มนูศักดิ์ งานทอง, Dr.-Ing.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมหมาย ผิวสอาด, Ph.D.)

วันที่ 7 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2555

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์แผงผลิตน้ำร้อนจากวัสดุโพลีเมอร์โดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
ชื่อ – นามสกุล	นายจิรพงษ์ พงษ์สีทอง
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์มนูศักดิ์ จานทอง, Dr.-Ing.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วารุณี อริยวิริยะนันท์, Dr. Eng.
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

แผงผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จากวัสดุโพลีเมอร์ถูกใช้เพื่อทดแทนแผงผลิตน้ำร้อนทำจากโลหะเนื่องจากมีสมบัติทางกลและกายภาพที่ดีทำให้สามารถผลิตแผงที่มีน้ำหนักเบา ราคาถูก และไม่กัดกร่อน ในการหาประสิทธิภาพของตัวดูดซับแสงอาทิตย์จากวัสดุโพลีเมอร์ได้นำพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาใช้เพื่อบอกลักษณะการไหลของของเหลวและการกระจายอุณหภูมิ ค่าที่ได้จะทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงตามมาตรฐาน ASHRAE Standard 93-77

วัสดุโพลีเมอร์ที่ใช้ในการวิจัยนี้คือ พีพี-อาร์ พีวีซี และพีวีซี-บี การออกแบบแผงให้มีพื้นที่รับรังสีแสงอาทิตย์เป็น 2 m^2 ตัวแผงเอียงทำมุม 14 องศากับพื้น ส่วนการออกแบบคำนวณ CFD โดย Flow Simulation Ver.2011 เงื่อนไขที่ใช้ในการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ คืออัตราการไหลเชิงมวลของน้ำที่เข้าแผงรับความร้อนอยู่ที่ 0.02 kg/s อุณหภูมิของน้ำทางเข้า 303 K และการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวที่ต่อด้านนอกกับอากาศแวดล้อม $10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

ผลลัพธ์ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิน้ำเข้าและน้ำออกที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงพบว่าแผงผลิตน้ำร้อน 3 ชนิด คือ พีพี-อาร์ พีวีซี และพีวีซี-บี ให้ผลต่างอุณหภูมิจากการจำลองคือ 6.5 7.8 และ 9.4 K ในขณะที่จากการทดลองจริงคือ 9.5 9.9 และ 11.8 K ตามลำดับ ค่าที่ได้จากการจำลองสอดคล้องกับการทดลองจริงถึงแม้ว่าค่าที่ได้จะต่ำกว่าเล็กน้อย ผลจากการจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิได้ คือ บริเวณด้านข้างจะมีอุณหภูมิต่ำและบริเวณตรงกลางมีการกระจายตัวของอุณหภูมิสูงและเป็นรูปโค้ง เสนอแนะว่าการจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการพัฒนาต่อเพื่อแก้ปัญหาที่จะเกิดจากแผงผลิตน้ำร้อนทำจากวัสดุโพลีเมอร์

คำสำคัญ: ตัวดูดซับความร้อน วัสดุโพลีเมอร์ พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ แผงทำน้ำร้อน

Thesis Title	Analysis of Polymeric Solar Collector by Computational Fluid Dynamics
Name - Surname	Mr.Jiraphong Phongsitong
Program	Mechanical Engineering
Thesis Advisor	Mr.Manusak Janthong, Dr.-Ing.
Thesis Co-advisor	Assistant Professor Warunee Ariyawiriyanan, Dr. Eng.
Academic Year	2012

ABSTRACT

Polymeric solar collectors were been used to replace a typical metal collector because their mechanical and physical properties make the volume production of lightweight, low cost and corrosion resistance. To investigate the performance of polymer collector, computation fluid dynamics (CFD) techniques was applied to obtain characteristics of fluid flow including temperature distribution. Validation of the CFD model was performed by comparing with experimental data according to standard test method of ASHRAE Standard 93 –77.

The polypropylene random copolymer (PP-R), polyvinyl chloride (PVC) and polyvinyl chloride-black (PVC-B) were used in this study. The collector with total area 2 m^2 and angle of 14 degree to the horizontal were implemented. The design grid and CFD were performed with Flow Simulation Ver.2011. The boundary conditions for CFD computation were mass flow rate of 0.02 kg/s, water inlet temperature of 303 K and convection heat transfer coefficient of $10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

The difference between the inlet and outlet water temperature of polymer collectors were recorded both with CFD and experimental. It was found that the different temperatures of PP-R, PVC and PVC-B collectors for CFD computation were 6.5, 7.8 and 9.4 K while the experimental results were 9.5, 9.9 and 11.8 K, respectively. The CFD results of all collectors were in good agreement with the experiment, although CFD results were lower than the actual values. The CFD qualitatively predicts the temperature distribution of the collector, i.e. low temperature at the sides and wavy pattern with high temperature at the middle. Suggestively, the CFD model is a useful tool for further investigations to optimize of the problematic polymeric solar collector.

Keywords: solar thermal collector, polymer materials, computational fluid dynamics, solar hot water

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ดร.มนูศักดิ์ จานทอง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วารุณี อริยวิริยะนันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ดร.พิพัฒน์ ปราโมทย์ ดร.สถาพร ทองวิก กรรมการสอบ ดร.ทิพย์จักร นวลบุญเรือง ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาดลจดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา บ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้ นอกเหนือจากนี้ขอขอบคุณผู้บริหารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่มอบทุนสนับสนุนพัฒนาบุคลากรตลอดระยะเวลาในการศึกษาของผู้วิจัย รวมทั้งขอขอบใจนักศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความร่วมมืออดทนในการดำเนินกิจกรรมวิจัยร่วมกันจนได้ความสมบูรณ์ของงาน ขอขอบคุณบุคลากรบัณฑิตศึกษาทุกคนที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือตลอดช่วงเวลาของการศึกษาและทำการวิจัย และขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ รวมทั้งคุณนุกูล เอื้อพันธ์เศรษฐ และคุณพงษ์พิศณุ เมืองเจริญ ที่ช่วยอนุเคราะห์ในการออกแบบชิ้นงานสร้างโดยโปรแกรม SolidWorks และคำนวณโดยโปรแกรม Flow Simulation 2011

คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

จิรพงษ์ พงษ์สีทอง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.6 ข้อยกเว้นของการศึกษา.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Energy).....	4
2.2 สัณฐานภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย.....	10
2.3 แผงรับรังสีแสงอาทิตย์.....	11
2.4 อุปกรณ์วัดพลังงานแสงอาทิตย์.....	14
2.5 การถ่ายเทความร้อนที่เกี่ยวข้องกับพลังงานแสงอาทิตย์.....	17
2.6 แผงรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นราบ (Flat Plate Collector).....	28
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	47
3.1 การศึกษาและรวบรวมข้อมูล.....	47
3.2 การวิเคราะห์แผนผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	47
3.3 การทดสอบแผนผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์.....	51
3.4 วิธีการทดสอบ.....	53

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลหรือผลการวิจัย	55
4.1 การเปรียบเทียบและยืนยันความถูกต้องในการวิเคราะห์แบบจำลองผกผันน้ำร้อน โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	55
4.2 ผลการวิเคราะห์การผลิตความร้อนของแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์	57
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	60
5.1 สรุปผลการวิจัย	60
5.2 ข้อเสนอแนะ	60
5.3 ปัญหาที่พบในการทำวิจัย.....	62
รายการอ้างอิง.....	63
ภาคผนวก.....	65
ภาคผนวก ก ข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	66
ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	70
ประวัติผู้เขียน.....	95



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของดวงอาทิตย์.....	5
2.2 ช่วงความยาวคลื่น	5
2.3 รังสีแสงอาทิตย์	6
2.4 ประเภทของรังสีที่ตกกระทบแผงรับรังสีแสงอาทิตย์แบบราบเรียบ.....	7
2.5 ประเภทของรังสีที่ผิวโลกและมวลอากาศ.....	8
2.6 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย (พ.ศ. 2542).....	10
2.7 ลักษณะของแผ่นรับรังสีแบบแผ่นเรียบ.....	12
2.8 การทำงานของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์	13
2.9 ตัวเก็บรังสีแบบรวมรังสีลักษณะต่าง ๆ	13
2.10 ภาพของไพรานอมิเตอร์	15
2.11 ภาพของไพรานอมิเตอร์วัดรังสีกระจาย	15
2.12 ภาพของไพเฮลิโอมิเตอร์.....	16
2.13 ภาพของเครื่องบันทึกแดด.....	17
2.14 การกระจายสเปกตรัมของการแผ่รังสีวัตถุดำ.....	18
2.15 การกระจายสเปกตรัมที่ปรับให้เป็นมาตรฐาน (Normalized) ของการแผ่รังสี ของวัตถุดำ.....	19
2.16 แผนภาพความเข้มของการแผ่รังสี.....	23
2.17 แผนภาพฟลักซ์ของการแผ่รังสี	23
2.18 ค่า Nu เฉลี่ยในท่อขนาดสั้นที่ Pr ต่างๆ.....	27
2.19 ภาพตัดขวางของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ	28
2.20 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์และท่อनाของไหล.....	29
2.21 การกระจายอุณหภูมิบนแผ่นดูดกลืนรังสี.....	29
2.22 วงจรความร้อนของตัวเก็บรังสีที่มีแผ่นปิดใสสองชั้น	31
2.23 วงจรความร้อนสมมูลของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ.....	31
2.24 ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การสูญเสียด้านบนกับระยะห่างระหว่างแผ่น	33
2.25 ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การสูญเสียด้านบนกับมุมเอียง.....	34
2.26 แผ่นดูดกลืนรังสีและท่อ.....	35

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.27 สมดุลพลังงานบนครีป.....	35
2.28 ประสิทธิภาพของครีปสำหรับตัวเก็บรังสีอาทิตย์.....	38
2.29 แพลตเตอร์ประสิทธิภาพ F' ที่ใช้กับท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm (a) $h_{fi} = 100 \text{ W.m}^{-2}.\text{C}^{-1}$ (b) $h_{fi} = 300 \text{ W.m}^{-2}.\text{C}^{-1}$ (c) $h_{fi} = 1,000 \text{ W.m}^{-2}.\text{C}^{-1}$	41
2.30 การสมดุลพลังงานในอนุภาคของไหล.....	44
2.31 ความสัมพันธ์ระหว่าง F'' กับ $m^0 C_p / A_c U_L F'$	46
3.1 ผลต่างของอุณหภูมิน้ำเข้าและน้ำออกของ PP-R (Header 1 1/4 inch) @ Riser 66.....	49
3.2 ผลต่างของอุณหภูมิน้ำเข้าและน้ำออกของ PVC (Header 1 1/4 inch) @ Riser 60.....	50
3.3 ผลต่างของอุณหภูมิน้ำเข้าและน้ำออกของ PVC-B (Header 1 1/4 inch) @ Riser 84.....	50
3.4 ผลการจำลองการทำงานของแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์และการต่อท่อ.....	51
3.5 การติดตั้งการทดลองแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์.....	52
4.1 กราฟผลต่างของอุณหภูมิเปรียบเทียบระหว่างการทดลองและวิเคราะห์ โดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์.....	57
4.2 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิของน้ำภายในท่อของแผงผลิตน้ำร้อน จากพลังงานแสงอาทิตย์.....	57
4.3 กราฟที่ได้จากการพล็อตกราฟ.....	58
4.4 กราฟประสิทธิภาพแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากวัสดุ PP-R.....	59
4.5 กราฟประสิทธิภาพแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากวัสดุ PVC.....	59
4.6 กราฟประสิทธิภาพแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากวัสดุ PVC-B.....	60

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สภาพอากาศที่มีผลต่อความเข้มของแสงอาทิตย์	11
2.2 สัดส่วนของพลังงานการแผ่รังสีของวัตถุตั้งแต่ 0 ถึง λT สำหรับส่วนเพิ่มของ λT	20
2.3 สัดส่วนของพลังงานการแผ่รังสีของวัตถุจาก 0 ถึง λT สำหรับสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น.....	21
2.4 ค่าคงที่ในสมการ 2.25 สำหรับท่อกลมที่มีอัตราการให้ความร้อนคงที่.....	27
2.5 ค่าคงที่ในสมการ 2.25 สำหรับท่อกลมที่มีอุณหภูมิผนังคงที่.....	27
3.1 คุณสมบัติของวัสดุในการประกอบแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์	48
3.2 ตารางการกำหนดค่าในการจำลองการทำงานโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	48
3.3 ตารางคุณลักษณะของท่อที่ทำกรจำลองการทำงาน	49
4.1 จุดตัดและความชันของแผงแต่ละชนิดตามวัสดุโพลีเมอร์	48
5.1 ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างการจำลองข้อมูลและการทดลอง	61



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

CFD	คือ Computational Fluid Dynamics
PP-R	คือ Polypropylene Random Copolymer
PVC	คือ Polyvinyl Chloride
PVC-B	คือ Polyvinyl Chloride-Black
°C	คือ หน่วยองศาเซลเซียส
g/cm ³	คือ หน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
K	คือ หน่วยองศาเคลวิน
kg/s	คือ หน่วยกิโลกรัมต่อวินาที
MJ/m ² ·Day	คือ หน่วยเมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน
mV·cal ⁻¹ ·cm ⁻² ·min ⁻¹	คือ หน่วยมิลลิโวลต์ต่อแคลอรีต่อตารางเซนติเมตรต่อนาที
m	คือ หน่วยเมตร
m ²	คือ หน่วยตารางเมตร
mm	คือ หน่วยมิลลิเมตร
W/m ²	คือ หน่วยวัตต์ต่อตารางเมตร
W/m ² ·K	คือ หน่วยวัตต์ต่อตารางเมตรต่อองศาเคลวิน
μm	คือ หน่วยไมโครเมตรหรือไมครอน

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานสะอาดและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งประเทศไทยมีศักยภาพในการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีสูงถึง $17 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{Day}$ ได้ในหลายๆด้าน ในส่วนของการนำมาผลิตน้ำร้อนก็เป็นอีกทางหนึ่งที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายและกว้างขวางทั่วโลก อาทิเช่น ยุโรป, อเมริกา, ออสเตรเลียและจีน เป็นต้น แผงผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบธรรมดา (Solar Collectors) โดยทั่วไปสามารถผลิตน้ำร้อนได้อุณหภูมิประมาณ $70-80 \text{ }^\circ\text{C}$

ในประเทศไทยแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ก็ยังไม่เป็นที่แพร่หลายเท่าที่ควร เนื่องจากมีราคาแพงกว่าเครื่องทำน้ำร้อนจากไฟฟ้า อีกทั้งปัจจุบันแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่นำมาใช้งานส่วนใหญ่จะเป็นแผงที่นำโลหะมาเป็นวัสดุในการทำท่อน้ำ เพื่อให้สามารถผลิตน้ำร้อนได้อุณหภูมิสูง จึงนิยมใช้ท่อทองแดง ซึ่งทองแดงมีความสามารถในการนำความร้อนได้ดี แต่ท่อทองแดงและข้อต่อต่าง ๆ มีราคาต่อเมตรสูง รวมทั้งการประกอบท่อน้ำทำได้ยาก อีกทั้งเครื่องมือในการเชื่อมประกอบมิใช่เครื่องมือทั่วไป ที่จะสามารถหาใช้งานได้ง่าย จำเป็นต้องใช้ช่างผู้ชำนาญการ และ/หรือ การว่าจ้างในการผลิตแผงฯ ทำให้มีราคาสูง จึงไม่เป็นที่สนใจของประชาชนทั่วไป

การศึกษานี้จึงนำโพลีเมอร์มาใช้ในการทดลอง เพื่อให้สามารถผลิตน้ำร้อนได้อุณหภูมิสูงประมาณ $40-50 \text{ }^\circ\text{C}$ โดยโพลีเมอร์ที่ใช้เป็นวัสดุทดแทนท่อน้ำนี้ สามารถหาได้ง่ายในท้องตลาดและใช้งานได้ดี อาทิเช่น PP-R, PVC และ PVC-B เป็นต้น ซึ่งหากสามารถใช้งานได้ จะเป็นส่วนหนึ่งในการผลักดันให้เกิดความนิยมในการผลิตน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ และยังเป็นการช่วยชาติประหยัดไฟฟ้าที่จะใช้ในการผลิตน้ำร้อนจากไฟฟ้าอีกทางหนึ่ง

1.2 วัตถุประสงค์

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้โพลีเมอร์เป็นวัสดุทดแทนการใช้ท่อทองแดง ให้สามารถผลิตน้ำร้อนได้ดีที่อุณหภูมิสูงประมาณ $40-50 \text{ }^\circ\text{C}$ ต่อพื้นที่รับแสงอาทิตย์โดยประมาณ 2 m^2 ซึ่งทำการศึกษาดังนี้

1.2.1 ทำการศึกษาโดยใช้ข้อมูลทั้งทางทฤษฎีและทางการทดลอง เพื่อประกอบการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ในการทำนายค่าองค์ประกอบต่างๆของแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์

รวมทั้งการนำไปติดตั้งเป็นระบบผลิตน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ เช่น อัตราการไหลของน้ำเข้าแผง, ลักษณะการต่อท่อน้ำในแผง เป็นต้น

1.2.2 นำผลที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองจริง

1.2.3 ประเมินความเป็นไปได้ของแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

การศึกษาแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ตามมาตรฐานการทดสอบของ ASHRAE Standard 93-77 [1] โดยคุณสมบัติของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ของแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงตามสภาพอากาศ การหาคุณสมบัติของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ จะทำเพื่อสามารถกำหนดตัวแปรที่สามารถแสดงคุณสมบัติจำเพาะของเครื่อง ได้แก่ค่า Optical Efficiency Factor Loss Factor ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนค่าพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นค่าพลังงานความร้อนจะมีค่าตามสมการ

$$\eta_c = (A_a/A_c) F_R [(\tau\alpha)_c - U_L(T_i - T_a)] / I_{\pi} \quad (1.1)$$

และ
$$\eta_c = \dot{m}C_p(T_o - T_i) / I_{\pi} A_c \quad (1.2)$$

โดยที่	η_c	= ประสิทธิภาพของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์, %
	m^0	= อัตราการไหลเชิงมวลของของไหล, kg/s
	C_p	= ค่าความร้อนจำเพาะของของไหล, J/kg·K
	T_i	= อุณหภูมิของไหลขาเข้า, °C
	T_o	= อุณหภูมิของไหลขาออก, °C
	A_a	= พื้นที่ของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์, m ²
	A_c	= พื้นที่รับรังสีแสงอาทิตย์, m ²
	T_a	= อุณหภูมิอากาศแวดล้อม, °C
	F_R	= สัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์
	$(\tau\alpha)_c$	= สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านและดูดซับรังสีแสงอาทิตย์
	U_L	= สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน, W/m ² ·K
	I_{π}	= ค่าความเข้มของพลังงานแสงอาทิตย์, W/m ²

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

การศึกษาแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากวัสดุโพลีเมอร์ นี้มีขอบเขตการศึกษา ดังนี้

1.4.1 ศึกษาแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากวัสดุโพลีเมอร์ โดยอ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบของ ASHRAE Standard 93-77 ทั้ง 3 ชนิดดังนี้

1.4.1.1 พีพีอาร์ (PP-R: Polypropylene Random Copolymer)

1.4.1.2 พีวีซี (PVC: Polyvinyl Chloride)

1.4.1.3 พีวีซี-บี (PVC-B: Polyvinyl Chloride-Carbon Black)

1.4.2 วิเคราะห์ผลของแผงผลิตน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์จากการจำลองการทำงาน

1.4.3 วิเคราะห์ผลของแผงผลิตน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์จากการทดสอบการทำงาน

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1.5.1 ศึกษาคุณลักษณะของการต่อท่อแบบขนาน และความสามารถในการผลิตความร้อน

1.5.2 ทำการออกแบบและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม SolidWorks

1.5.3 ทำการทดลองและสรุปผลการทดลอง

1.6 ข้อยกเว้นของการศึกษา

การศึกษาแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากวัสดุโพลีเมอร์เป็นวัสดุทดแทนการใช้งานท่อทองแดงยังมีข้อยกเว้นหลายอย่าง ดังนี้

1.6.1 การประกอบท่อเพื่อให้สามารถรับรังสีแสงอาทิตย์ได้มากที่สุด

1.6.2 การศึกษาทางกลศาสตร์ของวัสดุโพลีเมอร์

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 สามารถใช้เป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากวัสดุโพลีเมอร์ได้

1.7.2 สามารถประยุกต์ใช้แผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานในรูปแบบอื่น

1.7.3 ทราบถึงผลการใช้งานแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากวัสดุโพลีเมอร์

บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

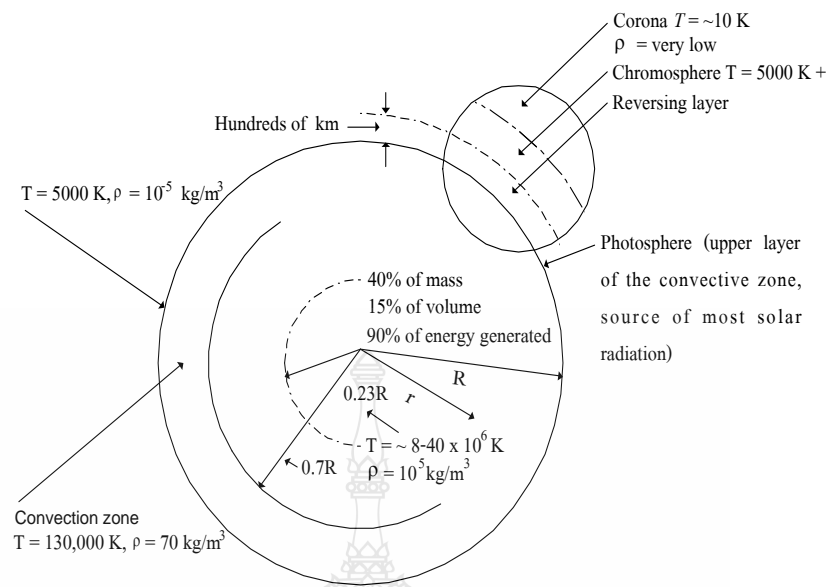
2.1 พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Energy)

พลังงานแสงอาทิตย์ [2, 3] เป็นแหล่งพลังงานที่อุดมสมบูรณ์ และถาวรมากที่สุด ซึ่งเป็นสิ่ง
ที่แสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมของแหล่งพลังงานที่วัดได้ เป็นแหล่งพลังงานที่มีอยู่ในทุก ๆ ท้องที่
ของประเทศไทย แต่พลังงานแสงอาทิตย์นี้เป็นพลังงานที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ไม่แน่นอน
ขึ้นอยู่กับเวลา และสภาวะของท้องฟ้าในแต่ละวัน

พลังงานแสงอาทิตย์เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชั่นของก๊าซที่เป็นส่วนประกอบอย่าง
ต่อเนื่อง พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาจากดวงอาทิตย์เป็นพลังงานที่ได้จากปฏิกิริยาการแตก
ตัวหลายชนิด ปฏิกิริยาที่สำคัญ คือ การรวมตัวกันของไฮโดรเจนเป็นฮีเลียม



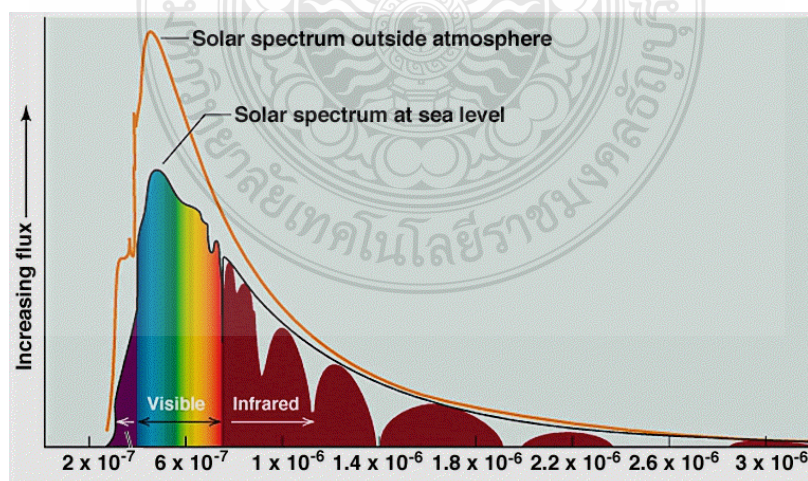
โดยการเปลี่ยนมวลของดวงอาทิตย์ให้เป็นพลังงาน คือ แก๊สไฮโดรเจนในดวงอาทิตย์ 4
อะตอมรวมกันเป็นแก๊สฮีเลียม 1 โมเลกุล แต่แก๊สฮีเลียม 1 โมเลกุลที่ได้มีมวลน้อยกว่าแก๊สไฮโดรเจน
4 อะตอม โดยมวลที่หายไปจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานของรังสีที่แผ่ออกไป ซึ่งพลังงานนี้มีการเคลื่อนที่
ในลักษณะคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยโครงสร้างของดวงอาทิตย์ที่บริเวณ 0.23 R (R คือ รัศมีของดวง
อาทิตย์) รอบศูนย์กลางประกอบด้วยสารที่มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 100 g/cm^3 น้ำหนักรวมของส่วน
นี้เท่ากับ 40% ของน้ำหนักทั้งหมด 90% ของพลังงานที่ดวงอาทิตย์ผลิตได้จากบริเวณนี้มีอุณหภูมิ
เท่ากับ $8 \times 10^6 \text{ K}$ ถึง $4 \times 10^6 \text{ K}$ ถัดออกจากระยะ 0.23 R ถึงระยะ 0.7 R ความถ่วงจำเพาะลดลงเหลือ
 0.07 g/cm^3 และอุณหภูมิเท่ากับ 10^8 K ระยะจาก R ถึงผิวมีความถ่วงจำเพาะ 10^{-8} g/cm^3 และอุณหภูมิ
เท่ากับ 5,000 K ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของดวงอาทิตย์

2.1.1 รังสีแสงอาทิตย์

พลังงานแสงอาทิตย์มีข้อโปรตรอนส่งมาเป็นหลักในรูปแบบของสเปกตรัมหรือคลื่นแม่เหล็กความร้อน (Electromagnetic Thermal) ในรูปแบบของการแผ่รังสีความร้อนที่มีความยาวคลื่นต่างกัน เช่น ความร้อน แสงสว่าง รังสีอัลตราไวโอเล็ต รังสีเอ็กซ์ และรังสีแกมมา โดยการแผ่รังสีแสงอาทิตย์สามารถจำแนกประเภทรังสีตามความยาวคลื่นได้ 2 ประเภท คือ



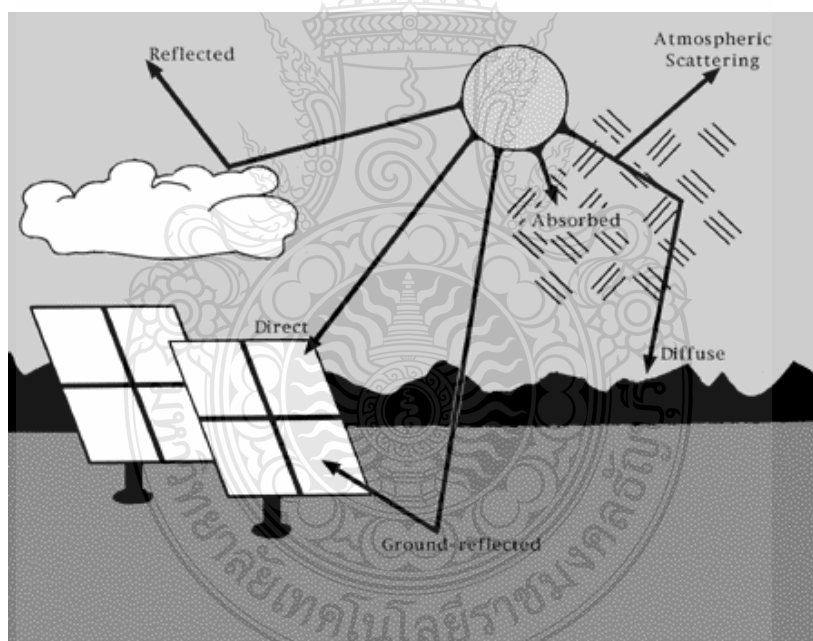
ภาพที่ 2.2 ช่วงความยาวคลื่น

1) รังสีอาทิตย์ หรือรังสีคลื่นสั้น (Solar or Short-Wave Radiation) เป็นรังสีที่ปลดปล่อยออกจากดวงอาทิตย์ มีความยาวคลื่น ตั้งแต่ $0.3 - 3.0 \mu\text{m}$ ประกอบไปด้วยรังสีตรงและรังสีกระจาย

2) รังสีคลื่นยาว (Long Wave Radiation) เป็นรังสีที่แผ่ออกจากแหล่งกำเนิดความร้อนที่อุณหภูมิแวดล้อมปกติ มีความยาวคลื่น มากกว่า $3.0 \mu\text{m}$ เช่น รังสีที่แผ่ออกจากบรรยากาศ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ หรือวัตถุต่าง ๆ ที่อุณหภูมิปกติ

สัดส่วนพลังงานคลื่นสั้นที่มาจากดวงอาทิตย์ สามารถแบ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ดังนี้

1. 100 ส่วน ส่งผ่านมายังส่วนบนของชั้นบรรยากาศผ่านเข้าไปในบรรยากาศ
2. ก๊าซและโอโซนในบรรยากาศดูดกลืนรังสีคลื่นสั้นจำนวน 25 ส่วน
3. เมฆในบรรยากาศสะท้อนรังสีคลื่นสั้นกลับไปยังอวกาศจำนวน 25 ส่วน
4. พื้นผิวโลกสะท้อนรังสีคลื่นสั้นกลับไปยังอวกาศจำนวน 5 ส่วน
5. บางส่วนถูกดูดกลืนโดยพื้นผิวโลกจำนวน 45 ส่วน

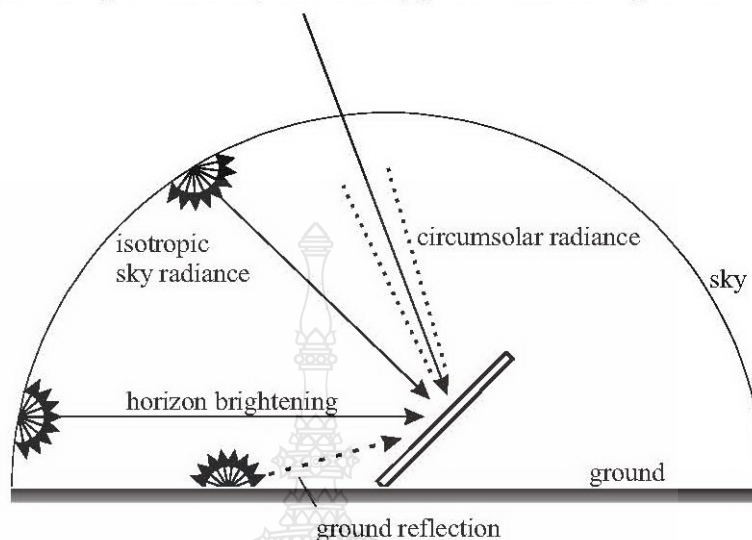


ภาพที่ 2.3 รังสีแสงอาทิตย์

2.1.1.1 การแผ่รังสีแสงอาทิตย์บนพื้นราบ

ในเวลากลางวันความร้อนจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่น (λ) น้อยกว่า $2.5 \mu\text{m}$ จะแผ่ผ่านชั้นบรรยากาศของโลก ดังนั้นจึงทำให้ความร้อนของดวงอาทิตย์

บางส่วนถูกดูดกลืน กระจาย ทิศทางเบี่ยงเบนไป ทำให้ปริมาณการแผ่รังสีที่เหลือมายังโลกมีค่าลดลง ตามลักษณะที่ผ่านชั้นบรรยากาศโลก [4] ดังนี้



ภาพที่ 2.4 ประเภทของรังสีที่ตกกระทบแผงรับรังสีแสงอาทิตย์แบบราบเรียบ

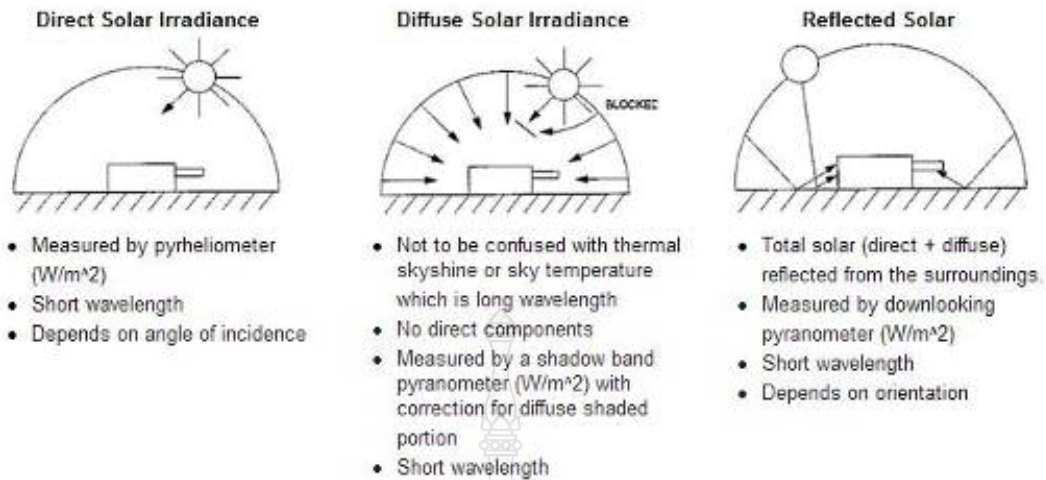
1) รังสีตรง (Beam or Direct Radiation) คือ รังสีที่มาจากดวงอาทิตย์โดยตรงและตกลงบนผิวรับรังสี มีทิศทางแน่นอนที่เวลาหนึ่งเวลาใด ทิศทางของรังสีตรงอยู่ในแนวลำแสงอาทิตย์โดยตรง ไม่มีการเปลี่ยนทิศทางของรังสี

2) รังสีกระจาย (Diffuse or Scattered Radiation) คือ รังสีที่ตกกระทบบนผิวโลกหลังจากที่รังสีนั้นเปลี่ยนทิศทางไปจากเดิมซึ่งเกิดจากการสะท้อน และการกระจายที่มีทิศทางไม่แน่นอน เมื่อรังสีจากดวงอาทิตย์ กระทบกับชั้นบรรยากาศของโลก บางทีอาจเรียกว่า รังสีสะท้อน

3) รังสีรวม (Total or Global Radiation) คือ ผลรวมของการแผ่รังสีตรง และรังสีกระจาย การหาค่ารังสีรวมบนพื้นราบสามารถหาได้จากการเปรียบเทียบกับรังสีดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก (Extraterrestrial Insulations) หรือใช้เครื่องมือวัดรังสีรวมของดวงอาทิตย์ที่เรียกว่าไพราโนมิเตอร์ (Thermopiles or Thermocouple Junctions)

1. ในกรณีที่ผิวรับรังสีเป็นแผ่นราบที่วางเอียงกับแนวระดับ รังสีรวมจะประกอบด้วยรังสีตรงจากท้องฟ้า รังสีกระจายจากท้องฟ้าและผิวโลก เรียกรังสีรวมนี้ว่า Total Radiation

2. สำหรับกรณีที่ผิวรับรังสีเป็นแผ่นราบที่วางในแนวระดับ รังสีรวมจะมาจากครึ่งทรงกลมท้องฟ้าไม่มีส่วนที่มาจากผิวโลก เรียกรังสีรวมในกรณีนี้ว่า Global Radiation



ภาพที่ 2.5 ประเภทของรังสีที่ผิวโลกและมวลอากาศ

2.1.1.2 การแผ่รังสีอาทิตย์บนพื้นเอียง

ในการติดตั้งแผงรับรังสีแบบแผ่นราบต้องทำมุมเอียงให้ใกล้เคียงกับมุมฉากของรังสีอาทิตย์ ทั้งนี้เพื่อให้ได้รับพลังงานที่ตกกระทบบนแผงรับรังสีอาทิตย์มากที่สุด ดังนั้นการปรับมุมเอียงของแผงรับรังสีอาทิตย์ที่จะให้ได้ประสิทธิภาพของระบบการทำน้ำแข็งให้มีค่าเหมาะสมนั้นอาจทำให้มุมเอียงของแผงรับแสงอาทิตย์ไม่ตั้งฉากกับรังสีที่ตกกระทบโดยตรงนัก เมื่อพิจารณารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นเอียงที่แท้จริงแล้ว สามารถคำนวณหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$I_T = I_b R_b + I_d \quad (2.1)$$

เมื่อ I_T = รังสีรวมบนพื้นเอียง

I_b = รังสีตรงบนพื้นราบ

I_d = รังสีรังสีกระจาย หรือรังสีสะท้อน

R_b = อัตราส่วนของรังสีตรงบนพื้นเอียงต่อรังสีตรงบนพื้นราบ

แผงรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ (Flat Plate Solar Collector) จะวางหันไปทางทิศใต้ เป็นมุม $13^\circ - 15^\circ$ กับแนวระนาบ เนื่องจากเป็นทิศที่สามารถรับแสงอาทิตย์ได้ตลอดทั้งวัน ดังนั้นค่า R_b สามารถหาได้จากสมการของ Hottel และ Woertz

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi + \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta} \quad (2.2)$$

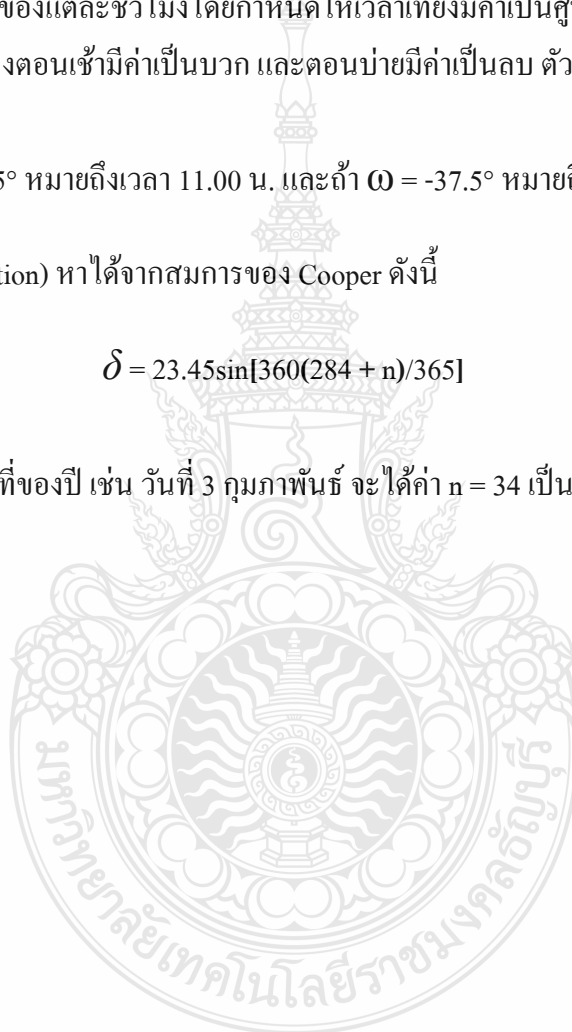
- เมื่อ ϕ = มุมละติจูดที่แผงรับแสงอาทิตย์ตั้งอยู่
 β = มุมเอียงของแผงรับรังสีอาทิตย์
 δ = มุมที่ดวงอาทิตย์ตอนเที่ยงทำมุมกับแนวระนาบเส้นศูนย์สูตร
 ω = มุมของแต่ละชั่วโมง โดยกำหนดให้เวลาเที่ยงมีค่าเป็นศูนย์ และแต่ละชั่วโมงมีค่า 15° ลองติจูด ถ้าไปทางตอนเช้ามีค่าเป็นบวก และตอนบ่ายมีค่าเป็นลบ ตัวอย่างเช่น

$$\omega = +15^\circ \text{ หมายถึงเวลา 11.00 น. และถ้า } \omega = -37.5^\circ \text{ หมายถึงเวลา 14.30 น.}$$

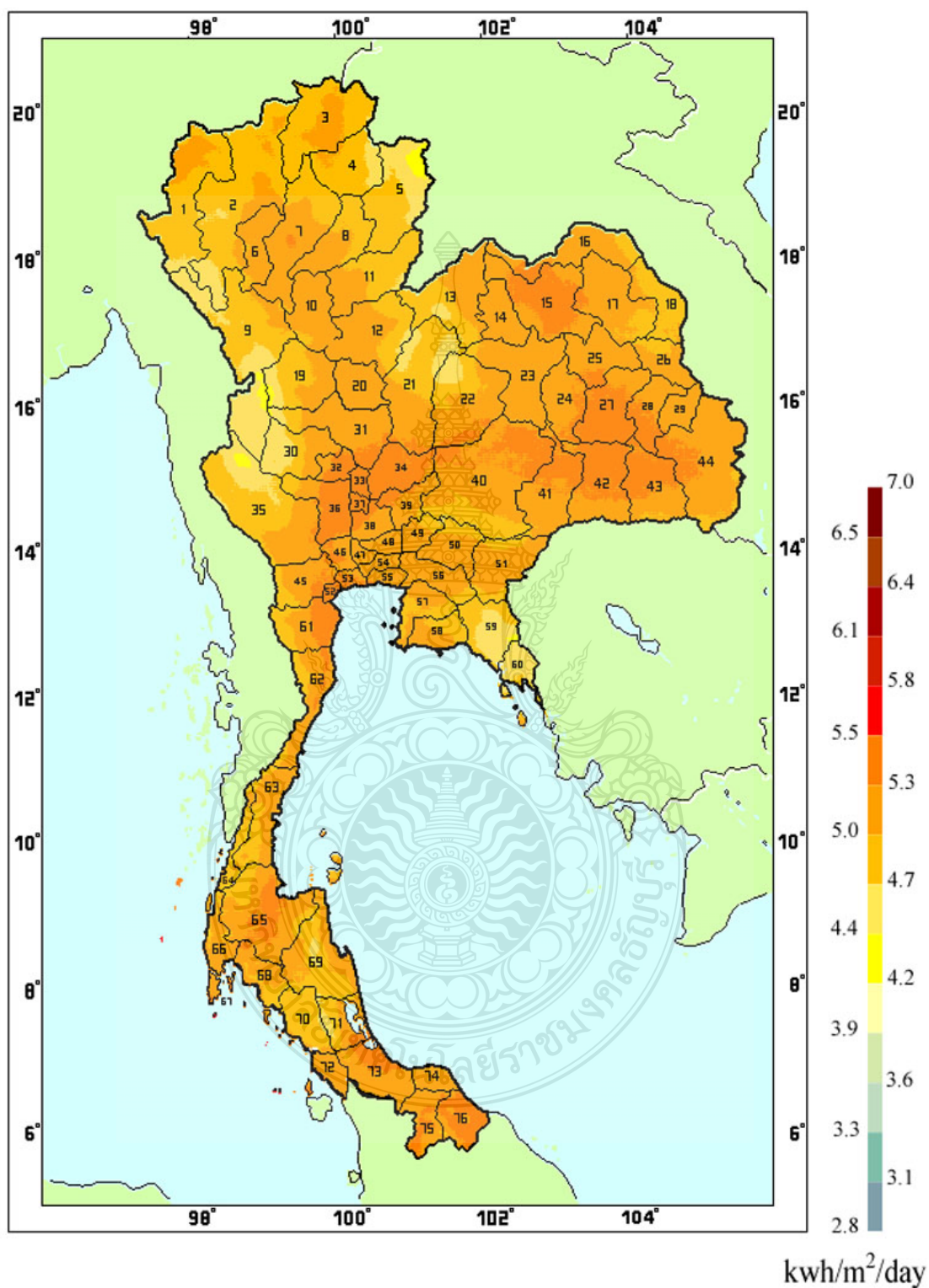
สำหรับค่า δ (Declination) หาได้จากสมการของ Cooper ดังนี้

$$\delta = 23.45 \sin[360(284 + n)/365] \quad (2.3)$$

เมื่อ n = วันที่ของปี เช่น วันที่ 3 กุมภาพันธ์ จะได้ค่า $n = 34$ เป็นต้น



2.2 สักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย



ภาพที่ 2.6 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย (พ.ศ. 2542)

จากแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย (พ.ศ. 2542) [5] โดยกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร พบว่าการกระจายของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ตามบริเวณต่าง ๆ ในแต่ละเดือนของประเทศไทย ได้รับอิทธิพลสำคัญจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ และลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศไทยได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดระหว่างเดือนเมษายน และพฤษภาคม โดยมีค่าอยู่ในช่วง 20 - 24 MJ/m²·Day เมื่อพิจารณาแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปี พบว่าบริเวณที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดเฉลี่ยทั้งปีอยู่ที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยครอบคลุมบางส่วนของ จังหวัดนครราชสีมา บุรีรัมย์ สุรินทร์ ศรีสะเกษ ร้อยเอ็ด ยโสธร อุบลราชธานี และอุดรธานี และบางส่วนของภาคกลางที่จังหวัดสุพรรณบุรี ชัยนาท อัญญา และลพบุรี โดยได้รับรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปี 19 ถึง 20 MJ/m²·Day พื้นที่ดังกล่าวคิดเป็น 14.3% ของพื้นที่ทั้งหมดของประเทศไทย นอกจากนี้ยังพบว่า 50.2% ของพื้นที่ทั้งหมดได้รับรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปี ในช่วง 18-19 MJ/m²·Day

จากการคำนวณรังสีรวมของดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ทั่วประเทศพบว่า มีค่าเท่ากับ 18.2 MJ/m²·Day แสดงให้เห็นว่าประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง แต่ก็ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศในแต่ละวันและสถานที่ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สภาพอากาศที่มีผลต่อความเข้มของแสงอาทิตย์

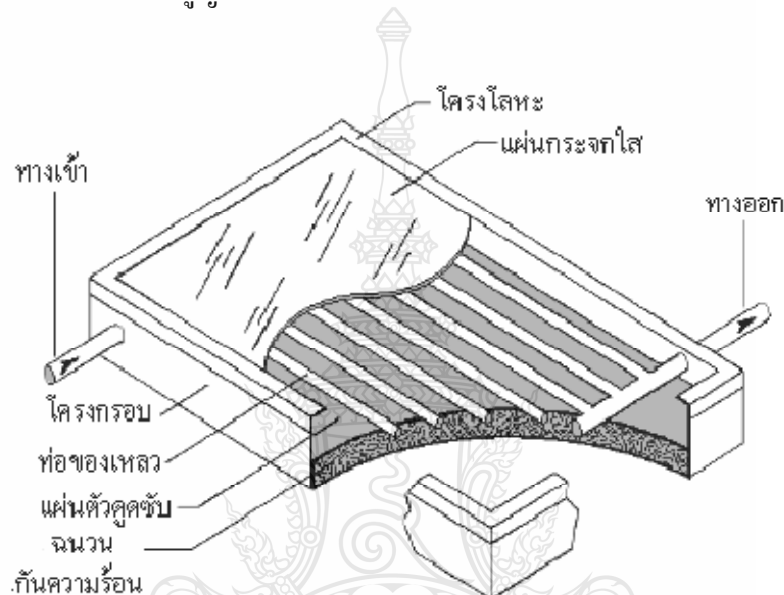
สภาพอากาศ	ท้องฟ้าโปร่ง	มีเมฆ	ท้องฟ้ามีเมฆมืดครึ้มมาก
Global	600-1000 W/m ²	200-400 W/m ²	50-150 W/m ²
Diffuse	10-20%	20-80%	80-100%

2.3 แผงรับรังสีแสงอาทิตย์

แผงรับรังสีอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน ทำหน้าที่แปลงพลังงานรังสีอาทิตย์ให้อยู่ในรูปพลังงานความร้อน แผงรับรังสีอาทิตย์มีความแตกต่างจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทั่วไป เนื่องจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทั่วไปจะมีลักษณะการแลกเปลี่ยนระหว่างของไหลกับของไหล แต่แผงรับรังสีอาทิตย์จะมีลักษณะการถ่ายเทความร้อนจากแผงรับรังสีอาทิตย์ไปยังของไหล แผงรับรังสีอาทิตย์ คือ

2.3.1 แผงรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นราบ (Flat Plate Collector)

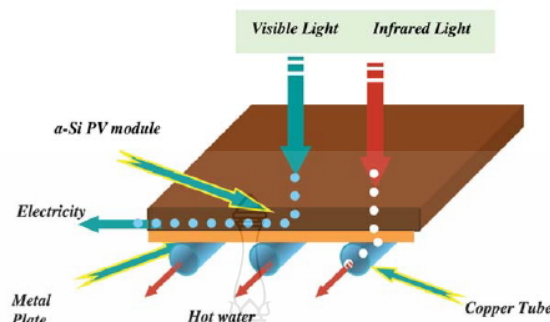
แผงรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นราบนี้ถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อมประมาณ 100°C สามารถรับรังสีได้ทั้งแบบรังสีตรง และแบบรังสีกระจาย โดยไม่จำเป็นต้องมีระบบติดตามดวงอาทิตย์ นอกจากนี้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบนี้ไม่ต้องการการบำรุงรักษามากนัก และมีกลไกการทำงานที่ซับซ้อนน้อยกว่าแบบรวมรังสี แต่ข้อเสียของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ คือ การเกิดการสูญเสียความร้อนจากอิทธิพลของสิ่งแวดล้อม เช่น ลม ฝน เป็นต้น



ภาพที่ 2.7 ลักษณะของแผ่นรับรังสีแบบแผ่นเรียบ

ปัจจุบันแผงรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นราบ ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell or Photovoltaic) เพื่อให้สามารถผลิตได้ทั้งไฟฟ้าและน้ำร้อน สำหรับช่วยลดต้นทุนในการผลิตและติดตั้ง เมื่อคิดจากการติดตั้งระบบทั้งสองแยกจากกัน เรียกแผงชนิดนี้ว่า แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic Thermal Solar Collector ; PV/T) [6] โดยหลักการทำงานของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์แบบนี้จะใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์มาประกอบเข้ากับท่อโลหะด้านใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งมีการประกอบแผง 2 แบบ คือ การลามิเนต (Laminate) และการใช้ฉนวนนำความร้อน (Thermal Epoxy) เมื่อแสงอาทิตย์มาตกกระทบบนแผง PV/T จะมีคลื่นแสงช่วงที่ตามองเห็น (Visible) มาตกกระทบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์จึงเกิดปฏิกิริยากับเซมิคอนดักเตอร์ที่อยู่ในตัวเซลล์แสงอาทิตย์เกิดเป็นไฟฟ้า ส่วนคลื่นแสงช่วงอินฟราเรด (Infrared) ที่ตกกระทบบน

โลหะด้านหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้เกิดการสะสมความร้อนและถ่ายเทให้สารตัวกลาง เช่น น้ำ, อากาศ เป็นต้น



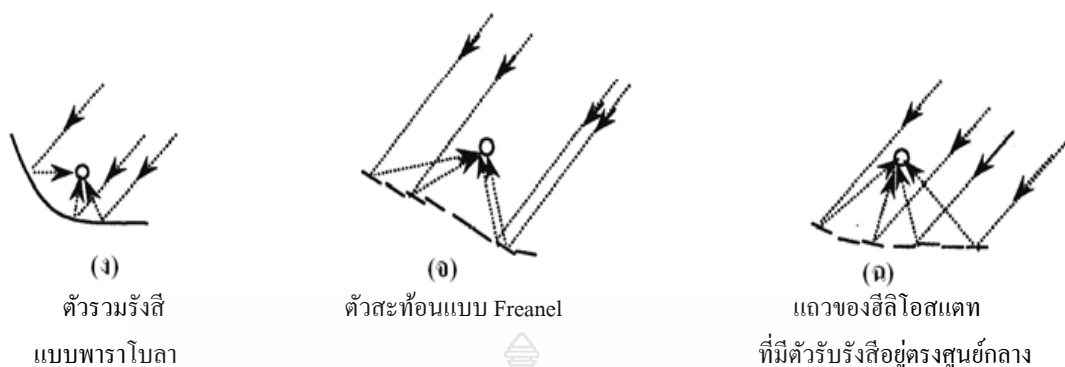
ภาพที่ 2.8 การทำงานของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

2.3.2 แผงรับรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมแสง (Concentrating Collector)

แผงรับรังสีอาทิตย์แบบรวมแสงสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายรูปแบบดังนี้ ตัวรวมแสง (Concentrator) ทำหน้าที่สะท้อน หรือตัวหักเห (Reflector or Refractor) ตัวรวมรังสีมีลักษณะเป็นทรงกระบอก หรือผิวโค้ง (Cylindrical or Surfaces of Revolution) และตัวรวมรังสีแบบต่อเนื่อง หรือแบบแยกส่วน (Continuous or Segmented) นอกจากนี้ตัวรับรังสีอาจเป็นแบบนูน แบบแบน หรือแบบเว้า (Convex, Flat or Concave) และแบบมีแผ่นปิด หรือแบบไม่มีแผ่นปิด (Covered or Uncovered) เนื่องจากการยากที่จะนำหลักการวิเคราะห์ทั่วไปมาใช้กับตัวเก็บรังสีทุกแบบ ดังนั้นจึงแบ่งตัวรวมรังสีออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ตัวเก็บรังสีแบบไม่มีภาพมีอัตราส่วนการรวมรังสีต่ำ และตัวเก็บรังสีแบบมีภาพเชิงเส้น (Linear Imaging Collector) ซึ่งมีอัตราการรวมรังสีปานกลาง



ภาพที่ 2.9 ตัวเก็บรังสีแบบรวมรังสีลักษณะต่าง ๆ



ภาพที่ 2.9 ตัวเก็บรังสีแบบรวมรังสีลักษณะต่าง ๆ (ต่อ)

2.4 อุปกรณ์วัดพลังงานแสงอาทิตย์

2.4.1 ไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer)

เป็นอุปกรณ์วัดค่ารังสีรวม ปกติจะใช้วัดบนพื้นราบแต่อาจประยุกต์วัดรังสีกระจายได้ โดยติดตั้งแหวนหรือจานบังเงา ไพรานอมิเตอร์ประกอบด้วยตัวรับแสง (Detector) ที่ประกอบด้วย (Thermopile) หลายชุดต่อกัน ตัวรับแสงบรรจุอยู่ในโดมแก้วครึ่งทรงกลม โดมแก้วนี้มีหน้าที่ป้องกันตัวรับแสงจากฝุ่นและลม ซึ่งจะทำให้ตัวรับแสงสูญเสียความร้อนไป เนื่องจากการพาและการแผ่รังสี ปกติโดมแก้วจะมี 2 ชั้นทำด้วยแก้วพิเศษซึ่งจะต้องมีความหนาที่สม่ำเสมอ เพื่อที่จะไม่ก่อให้เกิดการกระจายของรังสีที่จะตกกระทบตัวรับแสง เทอร์โมไพล์ประกอบด้วยโลหะต่างชนิดเชื่อมกันอยู่ โลหะแต่ละชั้นข้างหนึ่งชุบด้วยสีดำและอีกด้านหนึ่งชุบเคลือบด้วยสีขาวสลับกัน โลหะด้านที่ชุบเคลือบด้วยสีขาวจะมีสมบัติสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบ โลหะสีดำมีสมบัติการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ เมื่อมีแสงตกกระทบจะก่อให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของผิวทั้งสอง เนื่องจากโลหะข้างหนึ่งดูดกลืนรังสีอาทิตย์ อีกข้างหนึ่งสะท้อนรังสีอาทิตย์ ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก โดยที่แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของโลหะขาวและดำ ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิจะขึ้นอยู่กับความเข้มแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบตัวรับแสง แรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าประมาณ $5-10 \text{ mV} \cdot \text{cal}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ ได้โดมแก้วจะมีจานกลมสีขาวสวมอยู่ จานกลมนี้มีหน้าที่ป้องกันรังสีกระจายที่สะท้อนจากพื้นดินและสิ่งแวดล้อม เพื่อที่จะให้รังสีที่เข้าโดมเป็นรังสีที่มาจากครึ่งทรงกลมท้องฟ้าเท่านั้น



ภาพที่ 2.10 ภาพของไพรานอมิเตอร์

ในการวัดรังสีกระจายในแนวราบสามารถทำได้โดยใช้ไพรานอมิเตอร์ชนิดเดียวกับที่ใช้วัดรังสีรวม แต่จะต้องมีอุปกรณ์ที่ใช้บังรังสีตรงไม่ให้รังสีตรงตกลงบนตัวรับรังสีแสง อุปกรณ์บังรังสีตรงที่สำคัญมี 2 ชนิด คือ

1) จานบังเงา (Shading Disc) มีลักษณะเป็นจานกลมเล็ก ซึ่งขับเคลื่อนโดยใช้เครื่องมือติดตามแสงอาทิตย์ (Solar Tracking) โดยที่เงาของจานกลมจะตกลงบนตัวรับแสงตลอดทั้งวัน และขนาดของเงาจะต้องมีขนาดพอดีกับตัวรับแสงเพื่อไม่ให้จานกลมบังรังสีส่วนอื่นที่ไม่ใช่รังสีตรง รังสีที่ตกกระทบตัวรับแสงจึงเป็นรังสีกระจายเท่านั้น

2) แหวนบังเงา (Shading Ring) มีลักษณะส่วนเป็นส่วนของวงแหวน โดยวงแหวนนี้จะต้องวางให้มีมุมเอียงเท่ากับเส้นรุ้งของตำแหน่งที่ต้องการวัด และจะต้องมีการขยับวงแหวนให้เงาของวงแหวนตกลงบนตัวรับแสงตลอดเวลา เนื่องจากวงแหวนมีขนาดใหญ่ เงาของวงแหวนนอกจากจะบังรังสีตรงแล้วยังบังรังสีกระจายบางส่วนไม่ให้ตกกระทบตัวรับแสง ดังนั้นจึงต้องมีค่าชดเชยรังสีกระจายที่วัดได้โดยที่ค่าชดเชยนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของวงแหวน สถานที่ตั้งและฤดูกาล



ภาพที่ 2.11 ภาพของไพรานอมิเตอร์วัดรังสีกระจาย

2.4.2 ไพเฮลิโอมิเตอร์ (Pyrheliometer)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดรังสีตรง มีหลักการทำงานคล้ายไพรานอมิเตอร์ แต่ไพเฮลิโอมิเตอร์ต่างจากไพรานอมิเตอร์ตรงที่มีชุดขับเคลื่อนตามดวงอาทิตย์ เพื่อที่จะให้ผิวรับแสงตั้งฉากกับลำแสงตลอดเวลา ผิวรับแสงติดอยู่ส่วนท้ายของท่อที่ให้แสงเข้ามาผิวรับแสงที่ปากกล้องมีค่าไม่เท่ากันแล้วแต่บริษัทผู้ผลิต พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบจึงเป็นรังสีตรงและรังสีกระจายรอบดวงอาทิตย์ ซึ่งในทางปฏิบัติจะถือว่ารังสีที่วัดได้เป็นรังสีตรงอย่างเดียว



ภาพที่ 2.12 ภาพของไพเฮลิโอมิเตอร์

2.4.3 เครื่องบันทึกแดด (Sunshine Recorder)

เครื่องบันทึกแดดวัดช่วงเวลาที่รังสีตรงมีความเข้มสูงพอที่จะกระตุ้นเครื่องบันทึก โดยที่ช่วงเวลาที่วัดได้ที่สั้นที่สุด คือ 0.1 ชั่วโมง การกระตุ้นเครื่องมือจะใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ หรือใช้ปฏิกิริยาโฟโตโวลตาอิก องค์การอุตุนิยมวิทยาโลก (World Meteorological Organization, WMO) ใช้เครื่องบันทึกแดดชนิดแคมป์เบลล์-สโตกส์ (Campbell-Stokes Sunshine Recorder) เป็นมาตรฐาน เครื่องบันทึกแดดชนิดนี้ประกอบด้วยลูกแก้วทรงกลมขั้วมนผิวเรียบ โดยที่แกนของลูกแก้วจะขนานกับแกนของโลก ทรงกลมแก้วจะรวมรังสีให้ตกกระทบบนกระดาษพิเศษซึ่งมีช่วงเวลากำกับเมื่อดวงอาทิตย์เปลี่ยนตำแหน่งจุดรวมแสงบนกระดาษก็จะเปลี่ยนตำแหน่งไปด้วย ถ้าแสงมีความเข้มสูงก็จะทำให้กระดาษไหม้เป็นแถบ ความยาวของแถบไหม้บนกระดาษจะสมนัยกับช่วงเวลาที่แดด (Sunshine Duration) กระดาษแผ่นหนึ่งจะใช้บันทึกหนึ่งวัน และชนิดของกระดาษจะขึ้นกับฤดูกาล



ภาพที่ 2.13 ภาพของเครื่องบันทึกแดด

2.5 การถ่ายเทความร้อนที่เกี่ยวข้องกับพลังงานแสงอาทิตย์

2.5.1 วัตถุดำ

วัตถุดำ (Blackbody) คือวัตถุที่สามารถดูดกลืนรังสีที่ตกกระทบได้อย่างสมบูรณ์ไม่ว่าในช่วงความยาวคลื่นหรือทิศทางใด วัตถุดำเป็นเพียงวัตถุในอุดมคติเท่านั้น วัตถุที่มีอยู่จริงทุกชนิดจะมีการสะท้อนรังสีบางส่วนออกไปเสมอ

ถึงแม้ว่าวัตถุดำจะไม่มีอยู่จริงในธรรมชาติ แต่ก็มีวัตถุบางอย่างที่มีสมบัติใกล้เคียงกับวัตถุดำ เช่น ถ่านดำ ซึ่งสามารถดูดกลืนรังสีความร้อนที่ตกกระทบได้ 99% โดยประมาณ นอกจากนี้แล้ววัตถุดำยังเป็นตัวแผ่รังสีความร้อนที่ดีที่สุดอีกด้วย

2.5.2 กฎของพลังค์และกฎการกระจายของวิน

รังสีในสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 0.2-1000 μm เรียกว่ารังสีความร้อน (Thermal Radiation) ซึ่งถูกปลดปล่อยโดยวัตถุที่มีอุณหภูมิค่าหนึ่ง การกระจายของความยาวคลื่นของรังสีที่ปลดปล่อยโดยวัตถุดำเป็นไปตามกฎของพลังค์ (Planck's Law)

$$E_{\lambda_b} = \frac{2\pi h C_0^2}{\lambda^5 [\exp(hC_0 / \lambda kT) - 1]} \quad (2.4)$$

- เมื่อ
- E_{λ_b} = พลังงานของวัตถุดำที่ความยาวคลื่นใดๆ
 - h = ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's Constant)
 - k = ค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์ (Boltzmann's Constant)

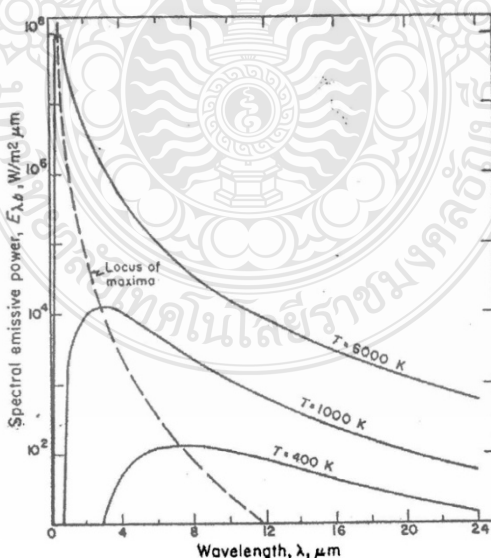
เทอม $2\pi hC_0^2$ และ hc_0/k เรียกว่าค่าคงที่ของการแผ่รังสีอันดับที่ 1 และ 2 ของ พลังค์ ซึ่งแทนด้วย C_1 และ C_2 ตามลำดับโดย $C_1 = 3.7405 \times 10^{-16} \text{ m}^2 \cdot \text{W}$ และ $C_2 = 0.0143879 \text{ m}^2 \cdot \text{K}$

ความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นกับค่าสูงสุดของการแผ่รังสีของวัตถุดำ สามารถหา ได้โดยการหาอนุพันธ์สมการการกระจายของพลังค์และให้เท่ากับศูนย์ จะทำให้ได้กฎการกระจายของ วิน (Wien's Displacement Law)

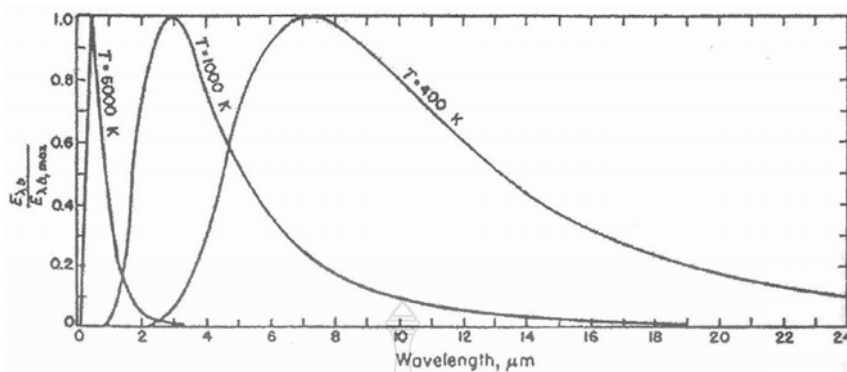
$$\lambda_{\max} T = 2897.8 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (2.5)$$

กฎของพลังค์และกฎการกระจายของวินอาจแสดงได้จากภาพที่ 2.13 สเปกตรัมของ รังสีสำหรับการแผ่รังสีของวัตถุดำจากแหล่งที่มีอุณหภูมิ 6000, 1000 และ 400 K ซึ่งจะเห็นได้ว่า ตำแหน่งความเข้มมากที่สุดอยู่ที่อุณหภูมิ 6000 K และที่อุณหภูมินี้จะแทนอุณหภูมิผิวโดยประมาณ ของดวงอาทิตย์ ดังนั้นการกระจายที่แสดงสำหรับอุณหภูมินี้จึงเป็นการประมาณการกระจายของการ แผ่รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกและอุณหภูมิก็คงสองค่าที่เหลือจะแทนที่วัตถุดำที่มีอุณหภูมิต่ำและ ปานกลาง

จากข้อมูลเดียวกันของภาพที่ 2.14 สามารถนำมาเขียนบนสเกลเชิงเส้นได้ดังภาพที่ 2.15 ซึ่งแสดงอย่างชัดเจนของแต่ละความยาวคลื่นระหว่างแหล่งที่มีอุณหภูมิ 6000 K และแหล่งที่มี อุณหภูมิต่ำกว่า 1000 และ 400 K



ภาพที่ 2.14 การกระจายสเปกตรัมของการแผ่รังสีวัตถุดำ



ภาพที่ 2.15 การกระจายสเปกตรัมที่ปรับให้เป็นมาตรฐาน (Normalized) ของการแผ่รังสีของวัตถุดำ

2.5.3 สมการของสเตฟาน-โบลทซ์มันน์

กฎของพลังค์ได้แสดงการกระจายของการแผ่รังสีของวัตถุดำ แต่ในการคำนวณทางวิศวกรรมจะสนใจค่าพลังงานทั้งหมดซึ่งหาได้โดยการอินทิเกรตสมการ 2.4 ตลอดความยาวคลื่น พบว่าพลังงานทั้งหมดที่ถูกแผ่โดยวัตถุดำ คือ

$$E_b = \int_0^{\infty} E_{\lambda b} d\lambda = \sigma T^4 \quad (2.6)$$

เมื่อ σ = ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลทซ์มันน์ (Stefan-Boltzmann Constant)
มีค่า $5.6697 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$

2.5.4 ตารางการแผ่รังสี

Dunkle (1954) [7] ได้เสนอวิธีการที่ง่ายสำหรับการคำนวณค่าพลังงานจากการแผ่รังสีโดยวัตถุดำ ดังนั้นสามารถเขียนกฎของพลังค์ใหม่ได้ ดังนี้

$$E_{\lambda b} = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2 / \lambda T) - 1]} \quad (2.7)$$

หลังจากนั้นทำการอินทิเกรตจะได้ค่าการแผ่รังสีทั้งหมดจากศูนย์ถึงความยาวคลื่นใดๆดังสมการ

$$E_{0-\lambda,b} = \int_0^{\lambda} E_{\lambda,b} d\lambda \quad (2.8)$$

แทนสมการ 2.7 ใน 2.8 แล้วหารด้วย σT^4 และทำการอินทิเกรตจะได้ค่าการแผ่รังสีที่ขึ้นอยู่กับ λT เท่านั้น ดังสมการ

$$E_{0-\lambda,b} = \frac{E_{0-\lambda,b}}{\sigma T^4} = \int_0^{\lambda T} \frac{C_1 d(\lambda T)}{\sigma(\lambda T) [\exp(C_2 / \lambda T) - 1]} \quad (2.9)$$

ค่าที่ได้จากการอินทิเกรตนี้เป็นค่าสัดส่วนของพลังงานของวัตถุดำระหว่าง 0 และ λT ซึ่ง Sargent (1972) [8] ได้คำนวณค่าพลังงานในช่วงต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สัดส่วนของพลังงานการแผ่รังสีของวัตถุดำตั้งแต่ 0 ถึง λT สำหรับส่วนเพิ่มของ λT

λT ($\mu\text{m.K}$)	$f_{0-\lambda T}$	λT ($\mu\text{m.K}$)	$f_{0-\lambda T}$	λT ($\mu\text{m.K}$)	$f_{0-\lambda T}$
1000	0.0003	4500	0.5643	8000	0.8562
1100	0.0009	4600	0.5793	8100	0.8601
1200	0.0021	4700	0.5937	8200	0.8639
1300	0.0043	4800	0.6075	8300	0.8676
1400	0.0077	4900	0.6209	8400	0.8711
1500	0.0128	5000	0.6337	8500	0.8745
1600	0.0197	5100	0.6461	8600	0.8778
1700	0.0285	5200	0.6579	8700	0.8810
1800	0.0393	5300	0.6693	8800	0.8841
1900	0.0521	5400	0.6803	8900	0.8871
2000	0.0667	5500	0.6909	9000	0.8899
2100	0.0830	5600	0.7010	9100	0.8927
2200	0.1009	5700	0.7107	9200	0.8954
2300	0.1200	5800	0.7201	9300	0.8980
2400	0.1402	5900	0.7291	9400	0.9005
2500	0.1613	6000	0.7378	9500	0.9030
2600	0.1831	6100	0.7461	9600	0.9054
2700	0.2053	6200	0.7541	9700	0.9076
2800	0.2279	6300	0.7618	9800	0.9099

ตารางที่ 2.2 สัดส่วนของพลังงานการแผ่รังสีของวัตถุดำตั้งแต่ 0 ถึง λT
สำหรับส่วนเพิ่มของ λT (ต่อ)

λT ($\mu\text{m.K}$)	$f_{0-\lambda T}$	λT ($\mu\text{m.K}$)	$f_{0-\lambda T}$	λT ($\mu\text{m.K}$)	$f_{0-\lambda T}$
2900	0.2506	6400	0.7692	9900	0.9120
3000	0.2732	6500	0.7763	10000	0.9141
3100	0.2958	6600	0.7831	11000	0.9318
3200	0.3181	6700	0.7897	12000	0.9450
3300	0.3401	6800	0.7961	13000	0.9550
3400	0.3617	6900	0.8022	14000	0.9628
3500	0.3829	7000	0.8080	15000	0.9689
3600	0.4036	7100	0.8137	16000	0.9737
3700	0.4238	7200	0.8191	17000	0.9776
3800	0.4434	7300	0.8244	18000	0.9807
3900	0.4624	7400	0.8295	19000	0.9833
4000	0.4829	7500	0.8343	20000	0.9855
4100	0.4987	7600	0.8390	30000	0.9952
4200	0.5160	7700	0.8436	40000	0.9978
4300	0.5327	7800	0.8479	50000	0.9988
4400	0.5488	7900	0.8521	∞	1

ตารางที่ 2.3 สัดส่วนของพลังงานการแผ่รังสีของวัตถุดำจาก 0 ถึง λT สำหรับสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น

$f_{0-\lambda T}$	λT ($\mu\text{m.K}$)	λT at midpoint	$f_{0-\lambda T}$	λT ($\mu\text{m.K}$)	λT at midpoint
0.05	1880	1660	0.55	4410	4250
0.10	2200	2050	0.60	4740	4570
0.15	2450	2320	0.65	5130	4930
0.20	2680	2560	0.70	5590	5350
0.25	2900	2790	0.75	6150	5850
0.30	3210	3010	0.80	6860	6480
0.35	3350	3230	0.85	7850	7310
0.40	3580	3460	0.90	9380	8510
0.45	3820	3710	0.95	12500	10600
0.50	4110	3970	1.00	∞	16300

สำหรับการใช้คอมพิวเตอร์ อาจทำได้โดยการประมาณสมการ 2.9 ด้วยโพลิโนเมียลต่อไปนี้ โดย Pivovonsky & Nagel (1961) [9] สำหรับค่า γ ที่ใหญ่กว่าหรือเทียบเท่ากับ 2

$$f_{0-\lambda T} = \frac{E_{0-\lambda T}}{\sigma T^4} = \frac{15}{\pi^4} \sum_{m=1,2,\dots} \frac{e^{-m\gamma}}{m^4} \{[(m\gamma + 3)m\gamma + 6]m\gamma + 6\} \quad (2.10)$$

และสำหรับ γ ที่น้อยกว่า 2

$$f_{0-\lambda T} = \frac{E_{0-\lambda T}}{\sigma T^4} = 1 - \frac{15}{\pi^4} \gamma^3 \left(\frac{1}{3} \frac{\gamma}{8} + \frac{\gamma^2}{60} - \frac{\gamma^4}{5040} + \frac{\gamma^6}{272,160} - \frac{\gamma^8}{13,305,600} \right) \quad (2.11)$$

เมื่อ $\gamma = C_2 / \lambda T$

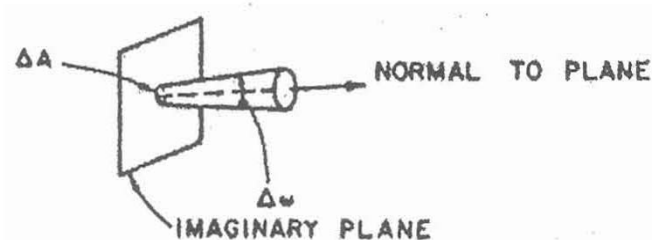
2.5.5 ความเข้มและฟลักซ์ของการแผ่รังสี

เมื่อพิจารณาถึงพลังงานที่ส่งออกมาจากวัตถุดำในทุกทิศทาง จำเป็นต้องอธิบายถึงลักษณะทิศทางของสนามการแผ่รังสีในที่ว่างใด ๆ ความเข้มของการแผ่รังสี คือ พลังงานที่ตกกระทบในแนวตั้งฉากต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ในหนึ่งหน่วยเวลาและต่อหนึ่งหน่วยมุมตัน จากภาพที่ 2.16 พบว่า ถ้า ΔE แทนพลังงานต่อหน่วยเวลาที่ตกกระทบ ΔA แทนพื้นที่ $\Delta \omega$ แทนมุมตัน ดังสมการ 2.12

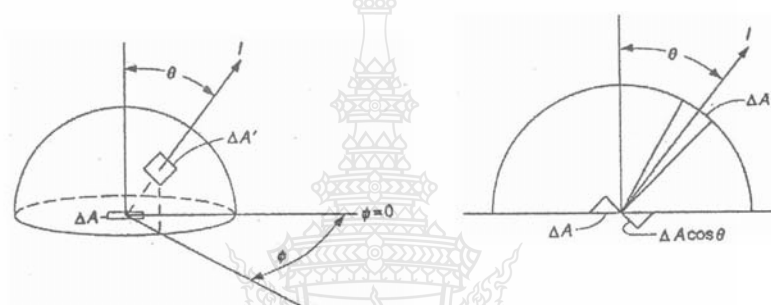
$$I = \lim_{\substack{\Delta A \rightarrow 0 \\ \Delta \omega \rightarrow 0}} \frac{\Delta E}{\Delta A \Delta \omega} \quad (2.12)$$

ค่าความเข้ม I มีทั้งขนาดและทิศทางซึ่งสามารถพิจารณาเป็นปริมาณเวกเตอร์ และสำหรับระนาบจินตนาการในที่ว่างใด ๆ จะสามารถพิจารณาได้ 2 เวกเตอร์ของความเข้ม ซึ่งมีทิศทางตรงกันข้าม ดังนั้น 2 เวกเตอร์เหล่านี้จะแสดงด้วยสัญลักษณ์ I^+ และ I^-

ฟลักซ์การแผ่รังสีมีความหมายคล้ายกับความเข้มซึ่งถูกนิยามว่า พลังงานที่ตกกระทบบนระนาบจินตนาการในทุกทิศทางต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่และต่อหนึ่งหน่วยเวลาบนด้านหนึ่งของระนาบจินตนาการ สังเกตว่าระหว่างความเข้มและฟลักซ์จะต่างกันตรงพื้นที่ ΔA ในกรณีความเข้ม ΔA จะตั้งฉากกับทิศทางของการแผ่รังสี แต่ในกรณีของฟลักซ์ ΔA จะวางตัวในระนาบครึ่งวงกลมที่รังสีแผ่ออกไป



ภาพที่ 2.16 แผนภาพความเข้มของการแผ่รังสี



ภาพที่ 2.17 แผนภาพฟลักซ์ของการแผ่รังสี

ความเข้มสามารถพิจารณาเป็นฟลักซ์ผ่านระนาบใด ๆ โดยพิจารณาส่วนเล็กๆของพื้นที่ ΔA บนระนาบจินตนาการที่ถูกครอบโดยครึ่งวงกลมรัศมี r ดังแสดงในภาพที่ 2.17 พบว่าค่าพลังงานต่อหน่วยเวลาที่ผ่านพื้นที่ $\Delta A'$ บนผิวของครึ่งวงกลมจากพื้นที่ ΔA ได้ดังสมการ

$$\Delta Q = I \Delta A (\cos \theta) \frac{\Delta A'}{r^2} \quad (2.13)$$

โดยที่ $\frac{\Delta A'}{r^2}$ = มุมที่รองรับ $\Delta A'$ โดยมองจาก ΔA และ

$\Delta A' \cos \theta$ = พื้นที่ของ ΔA ที่ตั้งฉากกับ I

ดังนั้นฟลักซ์ของการแผ่รังสีบน ΔA ต่อ $\frac{\Delta A'}{r^2}$ และฟลักซ์พลังงานต่อหน่วยมุม θ

และทิศทาง ϕ สามารถที่จะแสดงได้ดังสมการ

$$\Delta q = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta A} = I \cos \theta \frac{\Delta A'}{r^2 \Delta A \rightarrow 0} \quad (2.14)$$

ดังนั้นฟลักซ์ของการแผ่รังสีแสดงในรูปอย่างง่ายได้ดังสมการ 2.15 และ 2.16

$$q = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi \quad (2.15)$$

กำหนดให้ $\mu = \cos \theta$ จะได้

$$q = \int_0^{2\pi} \int_0^1 I \mu d\mu d\phi \quad (2.16)$$

สิ่งสำคัญ 2 ประการของฟลักซ์รังสีที่ควรคำนึงถึง คือ ฟลักซ์รังสีเป็นฟังก์ชันของการวางตัวของระนาบจินตนาการที่ถูกเลือก และฟลักซ์รังสีจะมี 2 ค่าที่สัมพันธ์กัน คือ ค่าของทิศทางที่เป็นไปได้ของระนาบที่ตั้งฉากกับระนาบจินตนาการ ซึ่งคือค่าบวกและค่าลบตามทิศทางนั้นๆ

ถ้าฟลักซ์ของการแผ่รังสีในสุญญากาศหรือในที่ไม่มีตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน จะได้ค่าฟลักซ์ของการแผ่รังสีดังสมการ

$$Q = \pi I q \quad (2.17)$$

ถ้าผิวมีค่าความเข้มคงที่จะเรียกว่าผิว Lambertian หรือผิวกระจาย (Diffuse Surfaces) วัตถุดำที่แผ่รังสีในลักษณะกระจาย จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงอกกับความเข้ม

$$E_b = \pi I_b \quad (2.18)$$

และสามารถเขียนในรูปแบบการแผ่รังสีโมนโครมาติก (Monochromatic) ได้ดังสมการ

$$E_{\lambda b} = \pi I_{\lambda b} \quad (2.19)$$

2.5.6 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี

เพื่อให้การคำนวณปริมาณความร้อนอันเนื่องมาจากการแผ่รังสีมีรูปแบบที่ง่าย จะใช้สมการเชิงเส้นในการคำนวณ ดังนั้นจึงได้กำหนดค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี h_r เพื่อพิจารณาการแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวทั้งสอง ดังสมการ

$$Q = A_1 h_r (T_1 - T_2) \quad (2.20)$$

โดยที่

$$h_r = \frac{\sigma(T_2^2 + T_1^2)(T_2 + T_1)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{(1 - \varepsilon_2)A_1}{\varepsilon_2 A_2}} \quad (2.21)$$

ถ้าพื้นที่ A_1 และ A_2 ไม่เท่ากัน ค่า h_r จะขึ้นกับทั้ง A_1 และ A_2 และถ้า T_1 กับ T_2 มีค่าใกล้เคียงกัน สมการ 2.21 สามารถแสดงได้ในรูป $4\sigma\bar{T}^3$ โดยที่ \bar{T} คือ ค่าอุณหภูมิเฉลี่ย

$$4\sigma\bar{T}^3 = \sigma(T_2^2 + T_1^2)(T_2 + T_1) \quad (2.22)$$

2.5.7 การไหลภายในท่อ

กรณีการไหลแบบปั่นป่วนที่พัฒนาเต็มรูปแบบ (Fully Developed Turbulent Flow) ในท่อ ($Re = \rho v D_h / \mu > 2200$) Kays & Crawford (1980) [10] ได้แนะนำให้ใช้สมการของ Petukhov

$$Nu = \frac{(f/8) Re Pr}{1.07 + 12.7 \sqrt{f/8} (Pr^{2/3} - 1)} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^n \quad (2.23)$$

เมื่อ $n = 0.11$ สำหรับการทำความร้อนและ 0.25 สำหรับการทำความเย็น ค่าแฟคเตอร์ความเสียดทาน กรณีท่อผิวเรียบสามารถหาได้จาก

$$f = (0.79 \ln Re - 64)^{-2} \quad (2.24)$$

กรณีไม่ใช่ท่อกลมต้องใช้เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic Diameter)

$$D_h = \frac{4(\text{flow area})}{\text{wetted perimeter}} \quad (2.25)$$

สำหรับท่อสั้นที่มีค่า L/D มากกว่า 1.0 และทางเข้าเป็นมุมแหลม (Sharp-Edged Entry) McAdams (1954) [11] ได้เสนอสมการ

$$Nu_{short} = Nu_{long} \left[1 + \left(\frac{D}{L} \right)^{0.7} \right] \quad (2.26)$$

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ $Nu = 3.7$ (อุณหภูมิผิวคงที่) และ $Nu = 4.4$ (ฟลักซ์ความร้อนคงที่) สำหรับท่อสั้นและชั้นขอบเขตความร้อนและการเคลื่อนที่ของของไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่เพิ่มขึ้นบริเวณทางเข้า Heaton (1964) [12] ได้ให้สมการ

$$Nu = Nu_{\infty} \frac{a(\text{Re Pr } D_h / L)^m}{1 + b((\text{Re Pr } D_h / L)^n)} \quad (2.27)$$

ค่าคงที่ a , b , m และ n ดังตารางที่ 2.4

Rohsenow & Choi (1961) [13] ได้แนะนำการหาค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยกรณีอุณหภูมิผนังคงที่ โดยใช้ภาพที่ 2.17 ที่ค่าของ Pr เท่ากับ 0.7, 5 และ ∞ สำหรับค่าคงที่ในสมการ 2.27 ให้ไว้ในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 ค่าคงที่ในสมการ 2.27 สำหรับท่อกลมที่มีอัตราการให้ความร้อนคงที่

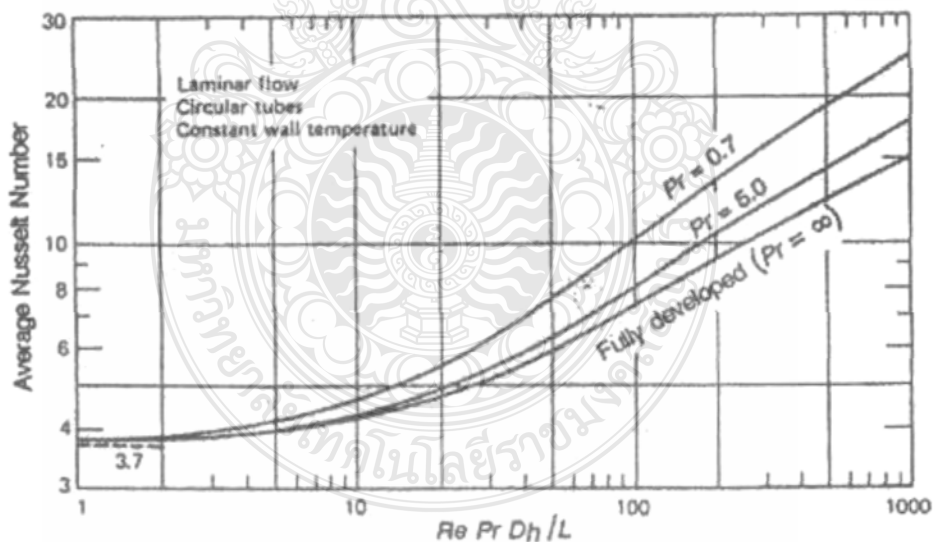
Pr	a	b	m	n
0.7	0.00398	0.0114	1.66	1.12
10	0.00236	0.00857	1.66	1.13
∞	0.00172	0.00281	1.66	1.21

$Nu_{\infty} = 4.4$

ตารางที่ 2.5 ค่าคงที่ในสมการ 2.27 สำหรับท่อกลมที่มีอุณหภูมิผนังคงที่

Pr	a	b	m	n
0.7	0.0791	0.0331	1.15	0.82
5	0.0534	0.0335	1.15	0.82
∞	0.0461	0.0316	1.15	0.84

$Nu_{\infty} = 3.7$



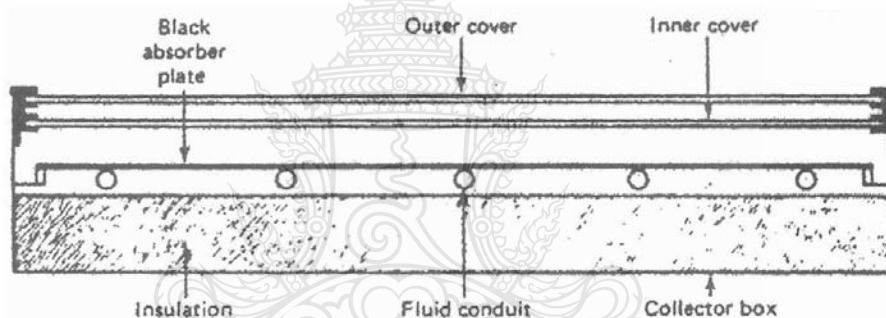
ภาพที่ 2.18 ค่า Nu เฉลี่ยในท่อขนาดสั้นที่ Pr ต่างๆ

2.6 แผงรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ (Flat Plate Collector)

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบเป็นรูปแบบหนึ่งของการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำหน้าที่แปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้อยู่ในรูปพลังงานความร้อน โดยเป็นการถ่ายเทความร้อนจากของแข็งไปยังของไหล การวิเคราะห์ตัวเก็บรังสีจะพิจารณาเฉพาะปัญหาการเปลี่ยนแปลงพลั๊กซ์ของพลังงานและหาความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์กับรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบ

2.6.1 ส่วนประกอบของแผงรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบประกอบด้วย ตัวดูดรังสีอาทิตย์สีดำซึ่งจะถ่ายเทพลังงานแสงอาทิตย์ที่ดูดกลืนไว้ให้กับของไหล แผ่นปิดใสเหนือตัวดูดรังสีจะช่วยลดการสูญเสียความร้อนออกสู่บรรยากาศโดยการพาและแผ่รังสี และฉนวนที่อยู่ทางด้านล่างซึ่งจะทำหน้าที่ลดการสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อน ภาพที่ 2.20

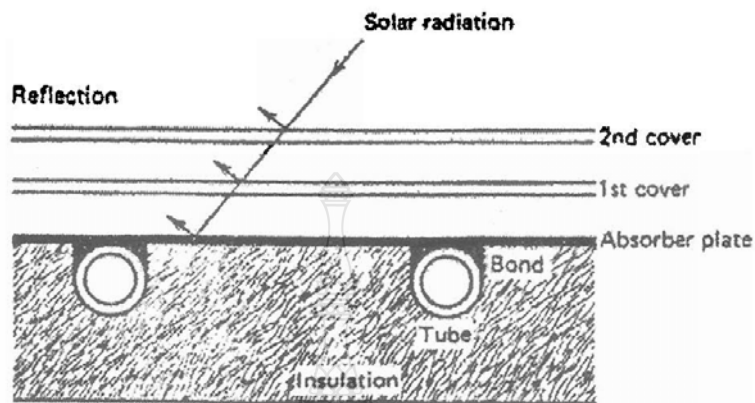


ภาพที่ 2.19 ภาพตัดขวางของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ

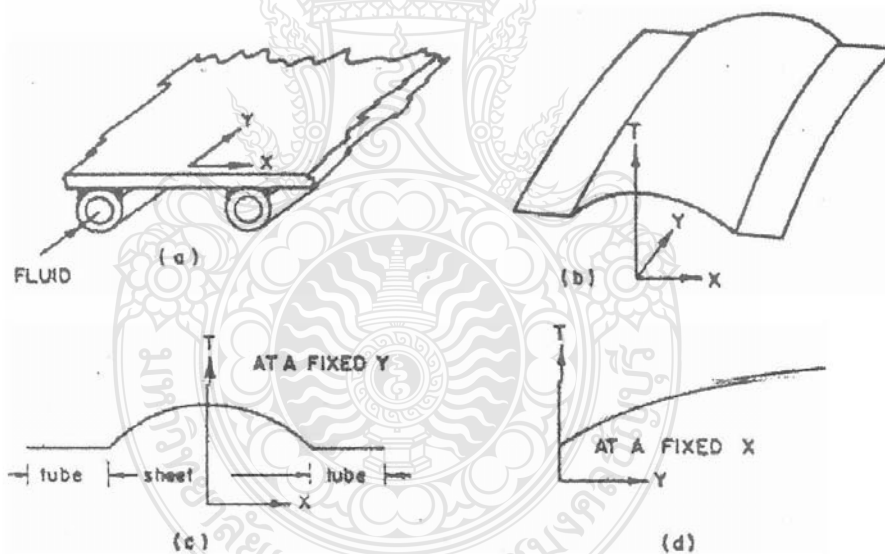
2.6.2 การกระจายอุณหภูมิในแผงรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นราบ

การวิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นมีความซับซ้อนพอสมควรแต่ทั้งนี้สามารถวิเคราะห์ในรูปแบบที่ง่าย โดยได้ผลการวิเคราะห์ที่มีความถูกต้องเพียงพอ จะพิจารณาการกระจายอุณหภูมิในตัวเก็บรังสีที่มีโครงสร้าง ดังภาพที่ 2.20 ส่วนภาพที่ 2.21 (a) แสดงบริเวณระหว่างท่อ 2 ท่อ รังสีอาทิตย์บางส่วนจะถูกดูดกลืนโดยแผ่นดูดกลืนรังสีและถูกส่งผ่านไปยังท่อ ดังนั้นอุณหภูมิที่อยู่ระหว่างท่อทั้งสองจะมีอุณหภูมิสูง สำหรับด้านบนของท่อจะมีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน เพราะท่อติดเชื่อมติดอยู่กับแผ่นราบ พลังงานที่ส่งผ่านของไหลจะทำให้ของไหลร้อนขึ้น อุณหภูมิที่บริเวณต่างๆ ของตัวเก็บรังสีจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของของไหล ดังภาพที่ 2.21 (b) ที่ตำแหน่ง y ต่างๆการกระจาย

อุณหภูมิในทิศทาง x แสดงในภาพที่ 2.21 (c) และที่ตำแหน่ง x ต่างๆการกระจายของอุณหภูมิในทิศทาง y จะมีลักษณะดังภาพที่ 2.21 (d)



ภาพที่ 2.20 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์และท่อนำของไหล



ภาพที่ 2.21 การกระจายอุณหภูมิตามแนวท่อและแผ่นรังสี

ในการวิเคราะห์ตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะอาศัยสมมติฐาน ดังนี้

- 1) เป็นการวิเคราะห์ที่ภาวะสม่ำเสมอ (Steady State)
- 2) โครงสร้างของแผ่นดูดกลืนรังสีมีลักษณะเป็นครีบและท่อขนาน

3) ท่อร่วม (Headers) มีพื้นที่น้อยเมื่อเทียบกับพื้นที่ของแผ่นดुकกลืนรังสี สามารถตัดทิ้งได้

- 4) มีการไหลอย่างสม่ำเสมอภายในท่อ
- 5) ไม่มีการดुकกลืนรังสีที่แผ่นปิดใส
- 6) การไหลของความร้อนในแผ่นปิดใสเป็นไปในทิศทางเดียวกัน
- 7) ไม่คิดการลดลงของอุณหภูมิในแผ่นปิดใส
- 8) รังสีอินฟราเรดไม่สามารถส่งผ่านแผ่นปิดใส
- 9) การไหลของความร้อนในฉนวนเป็นไปในทิศทางเดียวกัน
- 10) พิจารณาท่อไฟฟ้าเสมือนหนึ่งวัตถุดำ สำหรับการแผ่รังสีคลื่นยาวที่อุณหภูมิสมมุทธ์

ของท่อไฟฟ้า

- 11) ไม่คิดผลของอุณหภูมิที่แตกต่างกันในบริเวณรอบๆท่อ
- 12) พิจารณาเกรเดียนต์ (Gradients) ของอุณหภูมิในทิศทางการไหลและในแนวระหว่ง

ท่ออย่างอิสระต่อกัน

- 13) สมบัติทางความร้อนของวัสดุไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ
- 14) การสูญเสียความร้อนทางด้านบนและด้านล่างของตัวเก็บรังสีจะคิดเทียบกับ

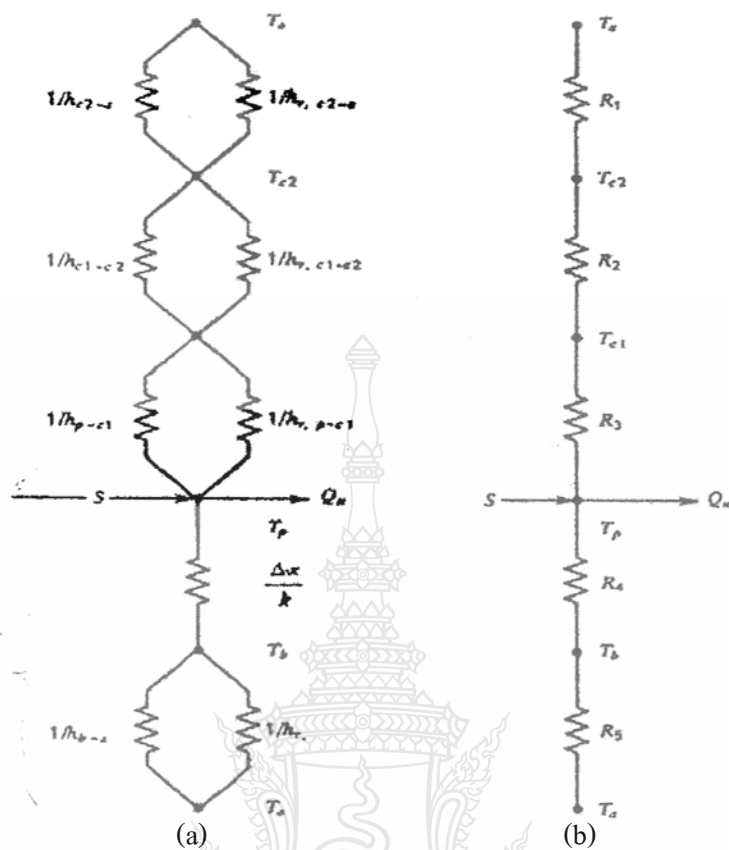
อุณหภูมิแวดล้อมค่าเดียว

- 15) ไม่คิดผลของฝุ่นและความสกปรกบนตัวเก็บรังสี
- 16) ไม่มีการบังแสงบนแผ่นดुकกลืนรังสี

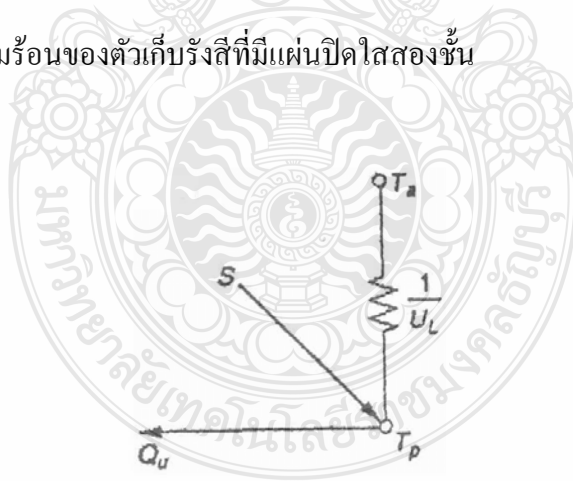
2.6.3 สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์

พิจารณาวงจรความร้อนสำหรับระบบที่มีแผ่นปิดใสสองชั้น ดังภาพที่ 2.21 ซึ่งในหัวข้อนี้จะทำการแปลงวงจรความร้อนให้มีลักษณะดังภาพที่ 2.22 พลังงานที่สูญเสียทางด้านบนเป็นผลมาจากการพาและการแผ่รังสีระหว่างแผ่นปิดใสทั้งสอง กำหนดให้

- T_p = อุณหภูมิของแผ่นดुकกลืนรังสี
 S = พลังงานที่ถูกดुकกลืนรังสี โดยแผ่นดुकกลืนรังสี
 T_{c1} = อุณหภูมิของแผ่นปิดใสชั้นที่ 1
 T_{c2} = อุณหภูมิของแผ่นปิดใสชั้นที่ 2
 T_b = อุณหภูมิของฉนวน
 T_a = อุณหภูมิแวดล้อม



ภาพที่ 2.22 วงจรความร้อนของตัวเก็บรังสีที่มีแผ่นปิดใสสองชั้น



ภาพที่ 2.23 วงจรความร้อนสมมูลของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ

จากภาพที่ 2.22 อัตราการสูญเสียความร้อนทางด้านบนของตัวเก็บรังสี (ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่รับแสง) เท่ากับการถ่ายเทความร้อนจากแผ่นดูดกลืนรังสีไปยังแผ่นปิดใสชั้นใน

$$q_{loss,top} = h_{c,p-c1}(T_p - T_{c1}) + \frac{\sigma(T_p^4 - T_{c1}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_{c1}} - 1} \quad (2.28)$$

เมื่อ $h_{c,p-c1}$ คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากแผ่นดูดกลืนรังสีไปยังแผ่นปิด
โอสันใน อาจเขียนสมการ 2.28 ได้ในรูป

$$q_{loss,top} = (h_{c,p-c1} + h_{r,p-c1})(T_p - T_{c1}) \quad (2.29)$$

เมื่อ

$$h_{r,p-c1} = \frac{\sigma(T_p - T_{c1})(T_p^2 + T_{c1}^2)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_{c1}} - 1} \quad (2.30)$$

ความต้านทาน R_3 สามารถเขียนได้ ดังนี้

$$R_3 = \frac{1}{h_{c,p-c1} + h_{r,p-c1}} \quad (2.31)$$

ในทำนองเดียวกันสามารถหา R_2 ได้ สำหรับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
จากแผ่นปิดโอสันนอกไปยังสิ่งแวดล้อม คือ

$$h_{r,c2-a} = \frac{\sigma\varepsilon_c(T_{c2} + T_s)(T_{c2}^2 + T_s^2)(T_{c2} - T_s)}{(T_{c2} - T_a)} \quad (2.32)$$

จะได้ความต้านทานไปยังสิ่งแวดล้อม

$$R_1 = \frac{1}{h_w + h_{r,c2-a}} \quad (2.33)$$

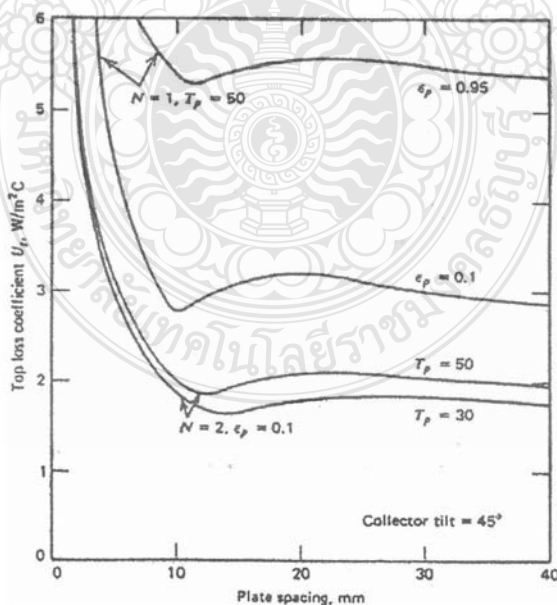
ค่าของ R_1 จะขึ้นอยู่กับความเร็วลมที่พัดเหนือตัวเก็บรังสีและอุณหภูมิของท้องฟ้า เมื่อทราบค่า R_1 , R_2 และ R_3 สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางความร้อนทางด้านบนของตัวเก็บรังสี ได้ดังนี้

$$U_1 = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (2.34)$$

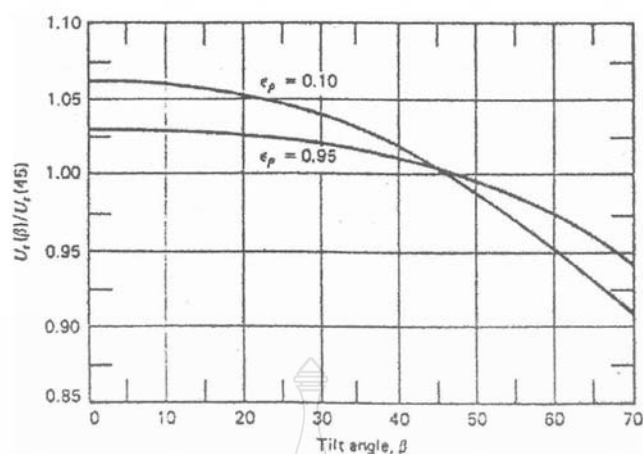
วิธีการหาค่า U_1 จะใช้วิธีคำนวณซ้ำ โดยขั้นแรกสมมติค่าอุณหภูมิแผ่นปิดใสจากสัมประสิทธิ์การพาและแผ่รังสีระหว่างแผ่น จากนั้นคำนวณ U_1 โดยใช้สมการ 2.34 ขั้นต่อมาให้คำนวณหาค่า T_c ใหม่จนกระทั่งค่า T_c ที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกัน โดยอุณหภูมิที่คำนวณได้ในแผ่นปิดใสแรกใช้สำหรับหาอุณหภูมิที่แผ่นปิดใสใหม่ถัดไป สำหรับแผ่นที่วางขนานกัน อุณหภูมิใหม่ของแผ่นที่ j สามารถหาได้ในเทอมของอุณหภูมิของแผ่นที่ i ดังสมการ

$$T_j = T_i - \frac{U_1(T_p - T_a)}{h_{c,j-i} + h_{r,j-i}} \quad (2.35)$$

จากสมการนี้ แทนค่าจนกระทั่งอุณหภูมิของแผ่นปิดใสไม่เปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 2.24 ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การสูญเสียด้านบนกับระยะห่างระหว่างแผ่น



ภาพที่ 2.25 ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การสูญเสียด้านบนกับมุมเอียง

สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนด้านหลัง (U_b) สามารถคำนวณได้จาก

$$U_b = \frac{1}{R_4} = \frac{k}{L} \quad (2.36)$$

เมื่อ k และ L คือ ค่าการนำความร้อนและความหนาของฉนวน ตามลำดับ สำหรับสัมประสิทธิ์การสูญเสียด้านข้าง (U_e) หาได้จาก

$$U_e = \frac{(UA)_{edge}}{A_c} \quad (2.37)$$

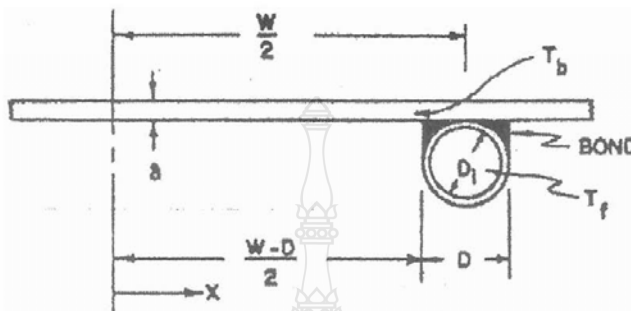
สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม (U_L) เป็นผลรวมของสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนด้านบน ด้านหลังและด้านข้าง

$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad (2.38)$$

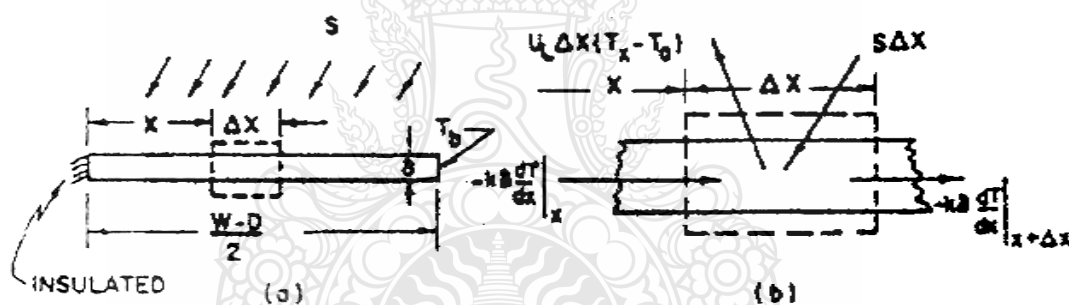
2.6.4 การกระจายอุณหภูมิระหว่างท่อและประสิทธิภาพของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์

การกระจายอุณหภูมิระหว่างท่อของไหลสองท่อ สามารถหาค่าได้โดยสมมติว่าไม่มีผลของเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในทิศทางกรไหล พิจารณาภาพที่ 2.26 ระยะห่างระหว่างท่อ W

เส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ D และแผ่นฉนวนรังสีมีความหนา δ เนื่องจากแผ่นฉนวนความร้อนได้ดี ดังนั้นจึงไม่คิดการเดินตัวของอุณหภูมิ ให้สมมติว่าอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งรอยต่อระหว่างแผ่นฉนวนกับท่อเท่ากับ T_b แผ่นฉนวนรังสีที่อยู่ระหว่างท่อจะเปรียบเหมือนครีป



ภาพที่ 2.26 แผ่นฉนวนรังสีและท่อ



ภาพที่ 2.27 สมดุลพลังงานบนครีป

จากภาพที่ 2.27 ครีปมีความยาว $(W-D)/2$ พิจารณาส่วนของครีปที่มีความกว้าง ΔX และยาว 1 หน่วย ในทิศทางการไหล สมดุลพลังงานในส่วนนี้ คือ

$$S\Delta x - UL\Delta x(T - T_a) + \left(-k\delta \frac{dT}{dx}\right)\Big|_x - \left(-k\delta \frac{dT}{dx}\right)\Big|_{x+\Delta x} = 0 \tag{2.39}$$

เมื่อ S = พลังงานรังสีอาทิตย์ที่ดูดกลืน หารตลอดด้วย ΔX และคิดลิมิต ΔX เข้าใกล้ศูนย์จะได้

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = \frac{U_L}{k\delta} \left(T - T_a - \frac{S}{U_L} \right) \quad (2.40)$$

เงื่อนไขขอบเขตที่จำเป็นในการแก้ปัญหา คือ

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = 0, \quad T|_{x=(W-D)/2} = T_b \quad (2.41)$$

เพื่อความสะดวกกำหนดตัวแปรใหม่ ดังนี้

$$m = \sqrt{U_L / k\delta} \quad (2.42 \text{ a})$$

$$\varphi = T - T_a - \frac{S}{U_L} \quad (2.42 \text{ b})$$

ดังนั้นสมการที่ 2.40 จะกลายเป็น

$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} - m^2 \varphi = 0 \quad (2.43)$$

และมีเงื่อนไขขอบเขต

$$\left. \frac{d\varphi}{dx} \right|_{x=0} = 0, \quad \varphi|_{x=(W-D)/2} = T_b - T_a - \frac{S}{U_L} \quad (2.44)$$

สมการ 2.43 มีคำตอบทั่วไป คือ

$$\varphi = C_1 \sinh(mx) + C_2 \cosh(mx) \quad (2.45)$$

ค่าคงที่ C_1 และ C_2 หาได้จากการแทนเงื่อนไขขอบเขตในคำตอบทั่วไป ดังนั้น

$$\frac{T - T_a - \frac{S}{U_L}}{T_b - T_a - \frac{S}{U_L}} = \frac{\cosh(mx)}{\cosh[m(W - D) / 2]} \quad (2.46)$$

พลังงานที่นำเข้าสู่ท่อต่อหน่วยความยาวในทิศทางกรไหล สามารถหาได้โดยใช้กฎของฟูรีเยร์ (Fourier's)

$$q'_{fin} = -k\delta \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=(W-D)/2} = \frac{k\delta m}{U_L} [S - U_L(T_b - T_a)] \tanh[m(W - D) / 2] \quad (2.47)$$

แต่เนื่องจาก $\frac{k\delta m}{U_L} = \frac{1}{m}$ สมการ 2.47 จึงเป็นการสะสมพลังงานเพียงด้านเดียวของท่อ เมื่อคิดทั้งสองด้าน สมการ 2.47 จะกลายเป็น

$$q'_{fin} = (W - D)[S - U_L(T_b - T_a)] \frac{\tanh[m(W - D) / 2]}{m(W - D) / 2} \quad (2.48)$$

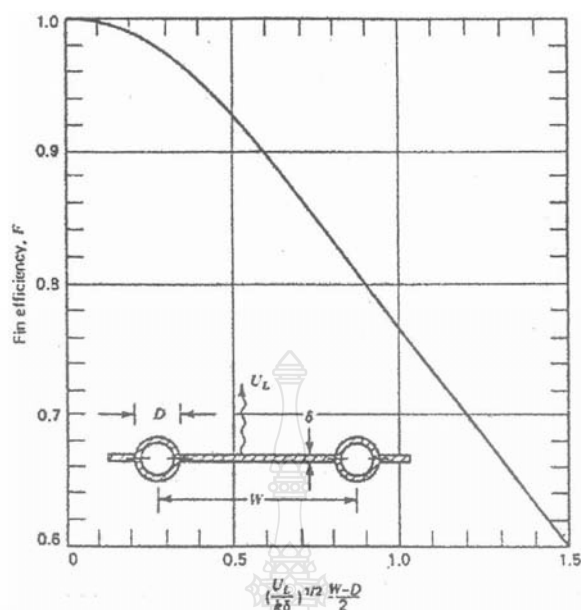
เพื่อความสะดวกจะเขียนสมการ 2.48 ใหม่ โดยใช้นิยามประสิทธิภาพของครีบ

$$q'_{fin} = (W - D)F[S - U_L(T_b - T_a)] \quad (2.49)$$

เมื่อ

$$F = \frac{\tanh[m(W - D) / 2]}{m(W - D) / 2} \quad (2.50)$$

F = ประสิทธิภาพมาตรฐานของครีบ สามารถหาได้จากภาพที่ 2.28



ภาพที่ 2.28 ประสิทธิภาพของครีบริบสำหรับตัวเก็บรังสีอาทิตย์

พลังงานที่ใช้ประโยชน์ของตัวเก็บรังสีจะรวมถึงพลังงานที่สะสมเหนือบริเวณท่อ ซึ่งพลังงานนี้คือ

$$q'_{tube} = D[S - U_L(T_b - T_a)] \quad (2.51)$$

พลังงานที่ใช้ประโยชน์ของตัวเก็บรังสีต่อหน่วยความยาวในทิศทางกรไหล คือผลรวมของสมการ 2.49 และ 2.51

$$q'_u = [(W - D)F + D][S - U_L(T_b - T_a)] \quad (2.52)$$

พลังงานที่ใช้ประโยชน์จากสมการ 2.52 จะถูกถ่ายเทไปยังของไหล ความต้านทานการไหลของความร้อนของของไหลจากรอยต่อระหว่างแผ่นครีบริบรังสีกับท่อ และความต้านทานระหว่างท่อกับของไหล พลังงานใช้ประโยชน์สามารถกระจายให้อยู่ในเทอมของความต้านทานสองเทอม คือ

$$q'_u = \frac{T_b - T_f}{\frac{1}{hf_i \pi D_i} + \frac{1}{C_b}} \quad (2.53)$$

เมื่อ D = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายในท่อ
 h_{fi} = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับผนังท่อ
 γ = ความหนาเฉลี่ยของรอยต่อระหว่างแผ่นคูคกลื่นรังสีกับท่อ
 b = ความกว้างของรอยต่อระหว่างแผ่นคูคกลื่นรังสีกับท่อ
 C_b = ค่าการนำความร้อนตรงรอยต่อระหว่างแผ่นคูคกลื่นรังสีกับท่อ
 ซึ่งสามารถประมาณได้จากค่าการนำความร้อนตรงรอยต่อระหว่างแผ่นคูคกลื่นรังสีกับท่อ (K_b)

$$C_b = \frac{K_b b}{\gamma} \quad (2.54)$$

ค่าการนำความร้อนตรงรอยต่อระหว่างแผ่นคูคกลื่นรังสีกับท่อมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความเที่ยงตรงของสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ วัสดุที่นำทำการต่อหรือยึดนั้นจะต้องมีความเป็นโลหะที่ดีเพื่อที่จะทำให้การนำความร้อนของบริเวณรอยต่อมีค่ามากกว่า $30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$

เพื่อเป็นการลดรูปสมการให้ง่ายต่อการนำไปใช้อาจทำได้โดยการแทนค่า T_o จากสมการ 2.53 ลงในสมการ 2.52 จะได้สมการของพลังงานใช้ประโยชน์ คือ

$$q'_u = WF'[S - U_L(T_f - T_o)] \quad (2.55)$$

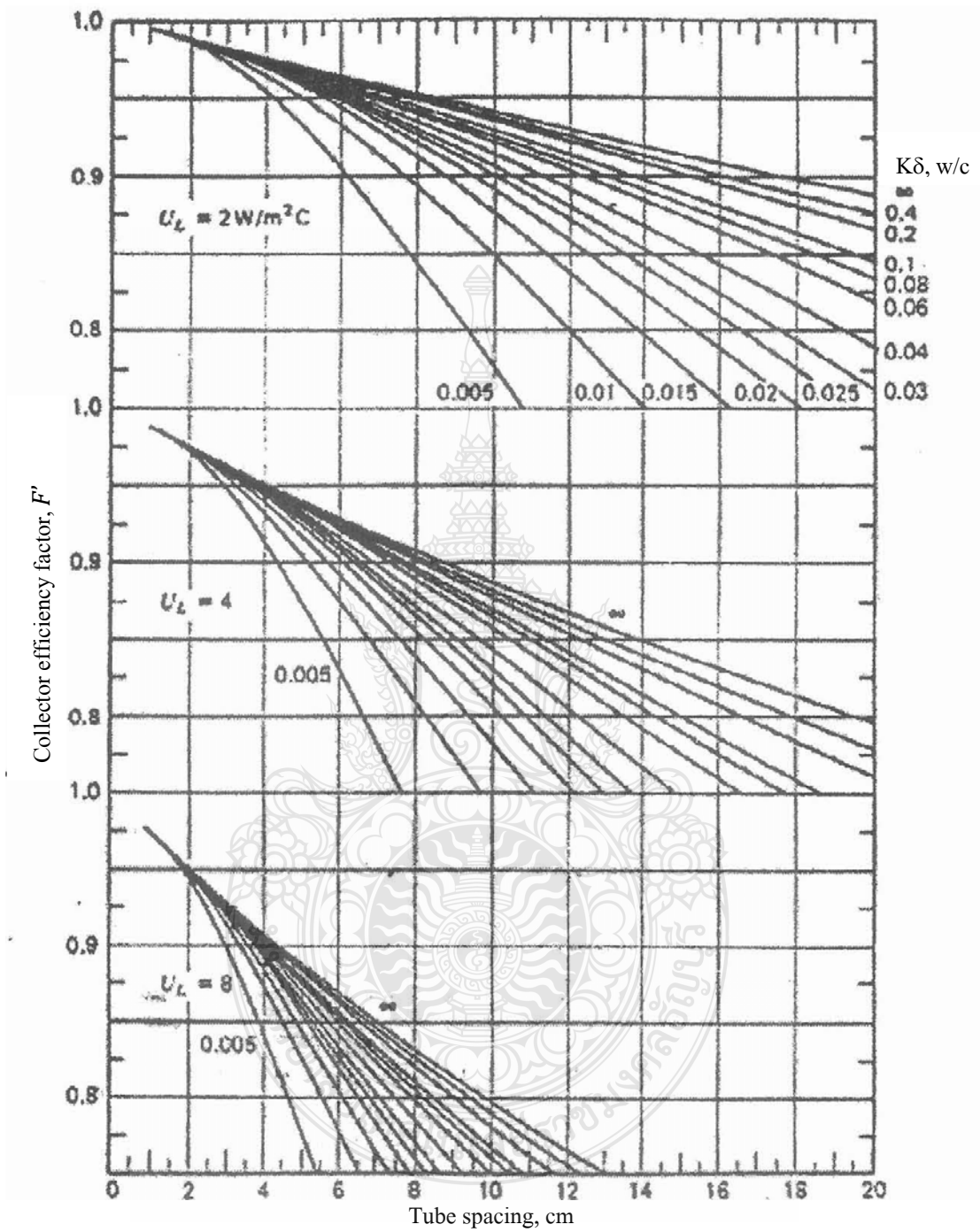
เมื่อ F' = แฟกเตอร์ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสี (Collector Efficiency Factor)

$$F' = \frac{1/U_L}{W \left[\frac{1}{UL[D + (W - d)F']} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i h_{fi}} \right]} \quad (2.56)$$

F' แสดงถึงอัตราการส่วนของพลังงานที่ใช้ประโยชน์ต่อพลังงานที่ได้รับ ถ้าการคูคกลื่นของตัวเก็บรังสีเกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าซึ่งส่วนมากแล้วตัวเก็บรังสีจะเป็นกรณีเช่นนี้ แต่ถ้าเป็นตัวเก็บรังสีที่มีรูปแบบอื่น ๆ การอธิบายของ F' จะชัดเจนมากขึ้นเมื่อตัวหารของสมการ 2.55 คือ ความต้านทานการส่งผ่านความร้อนจากของไหลไปยังอุณหภูมิแวดล้อม โดยกำหนดให้ความต้านทานนี้ คือ $1/U_o$ ตัวเศษ คือ ความต้านทานความร้อนจากแผ่นคูคกลื่นรังสีไปยังอากาศแวดล้อม ดังนั้น F' คืออัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนทั้งสอง

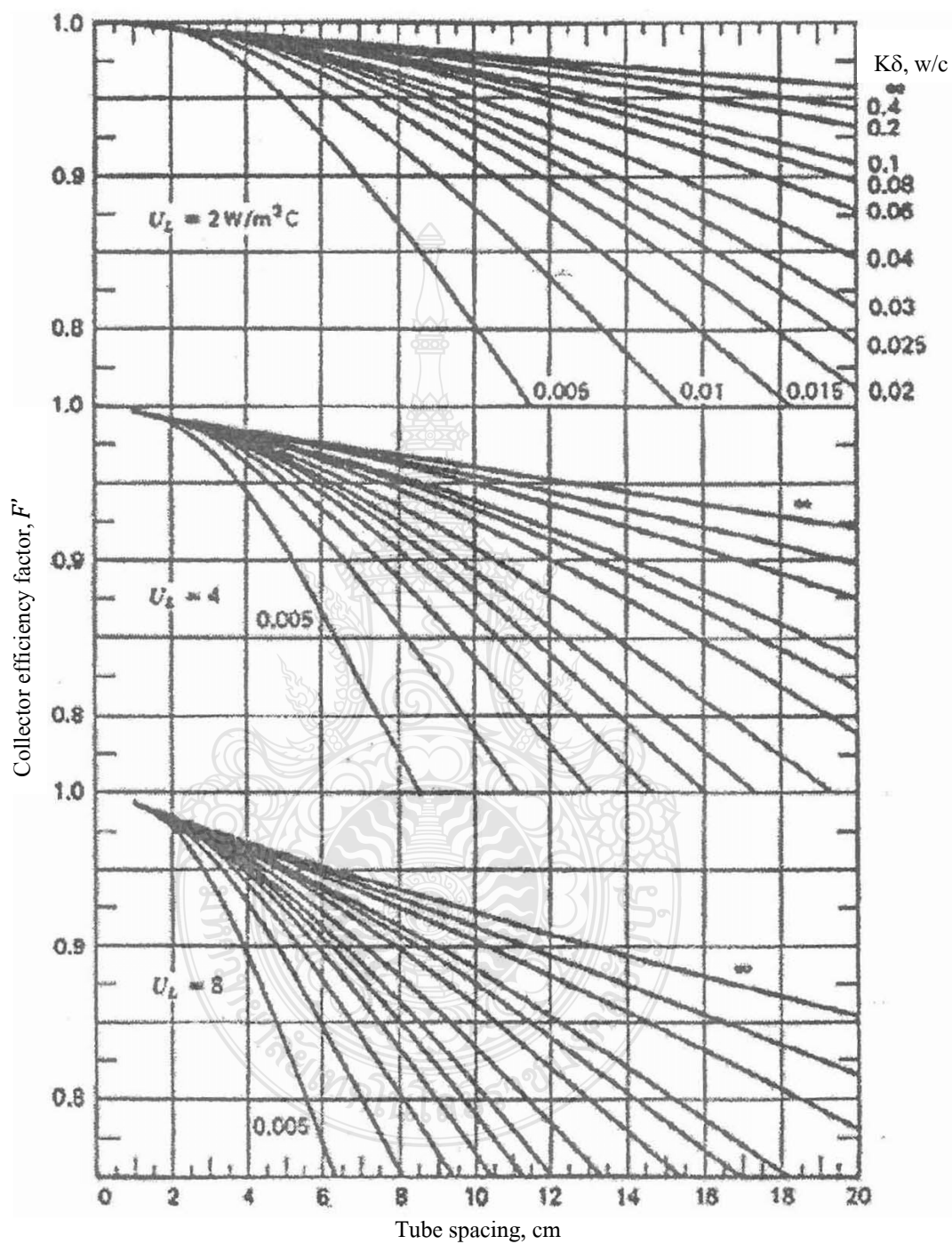
$$F' = \frac{U_o}{U_L} \quad (2.57)$$

แฟกเตอร์ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสี คือ ค่าคงที่เมื่อออกแบบตัวรับรังสีแบบต่าง ๆ และ อัตราการไหลของของไหล อัตราส่วนของ U_L ต่อ C_b อัตราส่วนของ U_L ต่อ h_{fi} และประสิทธิภาพของครีป F คือ ตัวแปรที่ปรากฏในสมการ 2.56 ซึ่งอาจเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ การออกแบบตัวเก็บรังสีส่วนมาก F จะเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้กำหนดหา F' เพื่อแสดงผลการออกแบบพารามิเตอร์บนขนาดของ F' ภาพที่ 2.29 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อน 3 ค่า (2, 4 และ $8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$) ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่ไม่มีแผ่นปิดไสถึงมีแผ่นไสสองชั้น การเลือกวัสดุที่ใช้ทำแผ่นดูดกลืนรังสี กราฟจะกำหนดความหนา $k\delta$ ผลคูณของการนำความร้อนของแผ่นดูดกลืนรังสีและความหนาของแผ่นดูดกลืนรังสี สำหรับแผ่นดูดกลืนรังสีที่เป็นทองแดงมีความหนา 1 mm $k\delta$ คือ $0.4 \text{ W}\cdot\text{C}^{-1}$ สำหรับเหล็กหนา 1 mm $k\delta$ คือ $0.1 \text{ W}\cdot\text{C}^{-1}$ ดังนั้นช่วงของ $k\delta$ ตั้งแต่ 0.005 ถึง 0.4 สมมติให้การนำความร้อนตรงรอยต่อ (Bond) มีค่ามาก ($1/C_b = 0$) และเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อถูกเลือกเป็น 0.01 m ค่าทั้งสามที่ถูกเลือกใช้เป็นสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนข้างในท่อที่มีตัวปิด และมีการไหลเป็นแบบราบเรียบ (Laminar) จนถึงการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent) 100, 300 และ $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$ สังเกตการเพิ่ม h_{fi} มากเกิน $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อจะไม่มีผลต่อการเพิ่มของ F' ยกเว้นถ้าแฟกเตอร์ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีลดลง เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อจะเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มของรอยต่อและความหนาของวัสดุและการนำความร้อน การเพิ่มของสัมประสิทธิ์สูญเสียจะทำให้ F' ลดลงในขณะที่การเพิ่มของของไหลในท่อจะทำให้ F' เพิ่มขึ้น



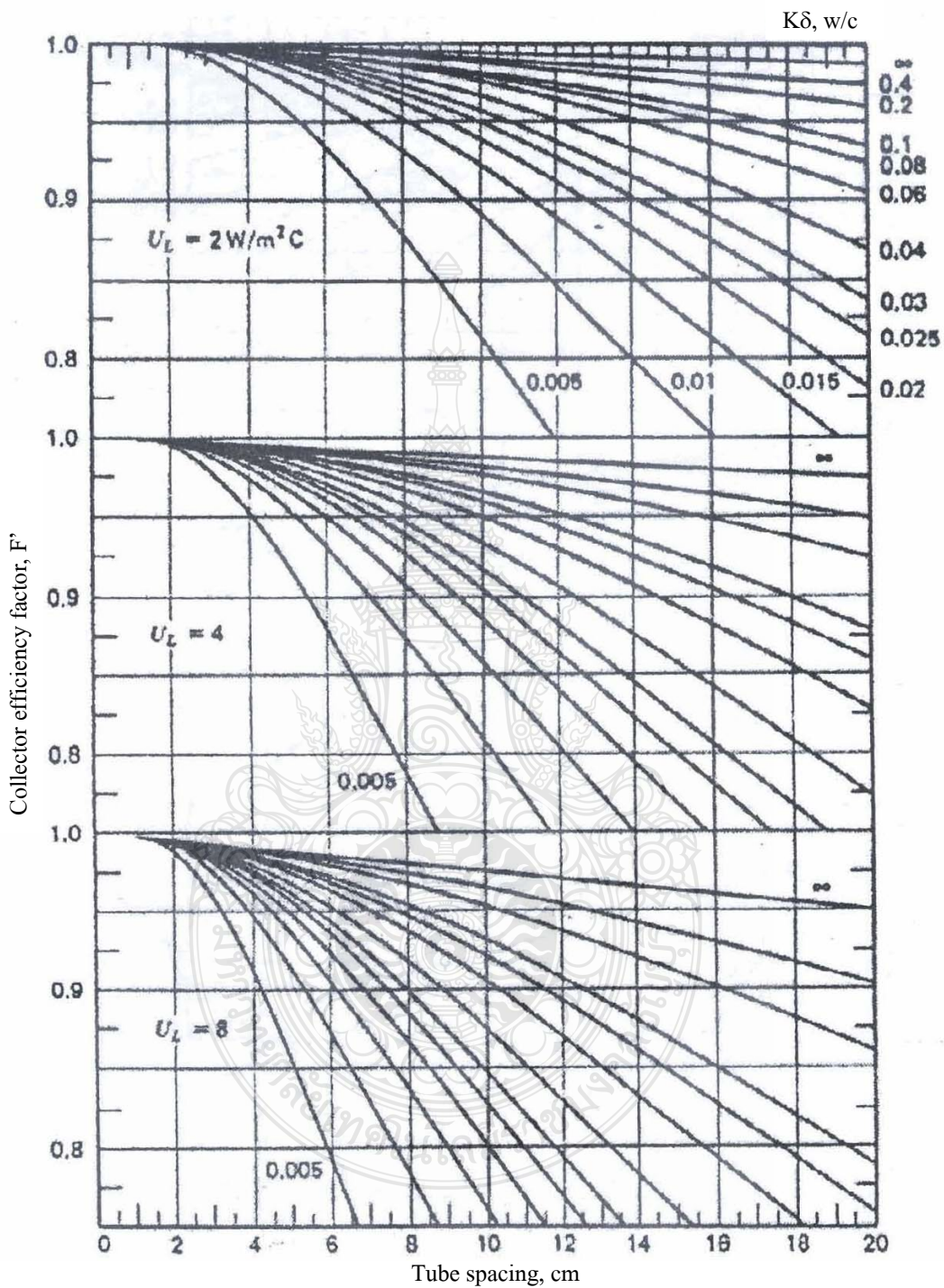
(a) $h_{fi} = 100 \text{ W.m}^{-2}\text{.C}^{-1}$

ภาพที่ 2.29 แฟกเตอร์ประสิทธิภาพ F' ที่ใช้กับท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm



(b) $h_{fi} = 300 \text{ W.m}^{-2}\text{.C}^{-1}$

ภาพที่ 2.29 แฟลคเตอร์ประสิทธิภาพ F' ที่ใช้กับท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm (ต่อ)



(c) $h_{fi} = 1,000 \text{ W.m}^{-2}.\text{C}^{-1}$

ภาพที่ 2.29 แฟลคเตอร์ประสิทธิภาพ F' ที่ใช้กับท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm (ต่อ)

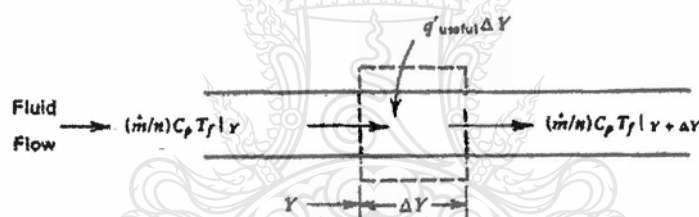
2.6.5 การกระจายอุณหภูมิในทิศทางกรไหล

พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทจากแผ่นดูดกลืนไปยังของไหล สามารถคำนวณได้โดยสมการ 2.57 สามารถเขียนสมดุลพลังงานของของไหลที่ไหลผ่านท่อเดี่ยวที่มีความยาว Δy โดยอาศัยภาพที่ 2.30 ให้ของไหลที่ไหลเข้าตัวเก็บรังสีมีอุณหภูมิ T_f และของไหลที่ไหลออกจากตัวเก็บรังสีซึ่งมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากเดิมเป็น T_{f_0}

$$\left(\frac{m^o}{n}\right)C_p T_f \Big|_y - \left(\frac{m^o}{n}\right)C_p T_f \Big|_{y+\Delta y} + \Delta y q'_u = 0 \quad (2.58)$$

เมื่อ m^o = อัตราการไหลรวมในตัวเก็บรังสี

n = ตัวเลขของจำนวนท่อที่ขนานและหารตลอดด้วย Δy พิจารณา Δy มีค่าเข้าใกล้ศูนย์แทน q'_u จากสมการ 2.55 จะได้



ภาพที่ 2.30 การสมดุลพลังงานในอนุภาคของไหล

$$m^o C_p \frac{dT_f}{dy} - nWF' [S - U_L(T_f - T_a)] = 0 \quad (2.59)$$

ถ้าสมมติให้ F' และ U_L มีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับตำแหน่งใด ๆ ดังนั้นคำตอบของอุณหภูมิของของไหลแต่ละตำแหน่งของ y คือ

$$\frac{T_f - T_a - S/U_L}{T_{f_0} - T_a - S/U_L} = \exp(-U_L nWF' y / m^o C_p) \quad (2.60)$$

ถ้าตัวเก็บรังสีมีความยาว L ในทิศทางการไหล ดังนั้นค่าตอบของอุณหภูมิทางออกของของไหลเป็น T_{fo} ซึ่งได้โดยแทน y เท่ากับ L ลงในสมการ 2.58 ดังนั้นปริมาณ nWL คือพื้นที่(A) ของตัวเก็บรังสี

$$\frac{T_{fo} - T_a - S/U_L}{T_{fi} - T_a - S/U_L} = \exp(-A_c U_L F' / m^o C_p) \quad (2.61)$$

2.6.6 แฟกเตอร์การดึงความร้อนและแฟกเตอร์การไหล

อัตราส่วนระหว่างปริมาณพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ตรงต่อพลังงานใช้ประโยชน์เมื่อแผ่นดูดกลืนรังสีมีอุณหภูมิเท่ากับของไหลที่เข้า เรียกว่า แฟกเตอร์การดึงความร้อนของตัวเก็บรังสี (Collector Heat Removal Factor, F_R)

$$F_R = \frac{m^o C_p (T_{fo} - T_{fi})}{A_c [S - U_L (T_{fi} - T_a)]} \quad (2.62)$$

กระจายแฟกเตอร์การดึงความร้อนของตัวเก็บรังสีได้ดังนี้

$$F_R = \frac{m^o C_p}{A_c U_L} \left[\frac{T_{fo} - T_{fi}}{\frac{S}{U_L} - (T_{fi} - T_a)} \right] \quad (2.63)$$

$$\frac{m^o C_p}{A_c U_L} \left[\frac{\left(T_{fo} - T_a - \frac{S}{U_L} \right) - \left(T_{fi} - T_a - \frac{S}{U_L} \right)}{\frac{S}{U_L} - (T_{fi} - T_a)} \right]$$

หรือ

$$F_R = \frac{m^o C_p}{A_c U_L} \left[1 - \frac{\frac{S}{U_L} - (T_{fo} - T_a)}{\frac{S}{U_L} - (T_{fi} - T_a)} \right] \quad (2.64)$$

จากสมการ 2.62 จะได้

$$F_R = \frac{m^{\circ}C_p}{A_c U_L} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_c U_L F'}{m^{\circ}C_p}\right) \right] \quad (2.65)$$

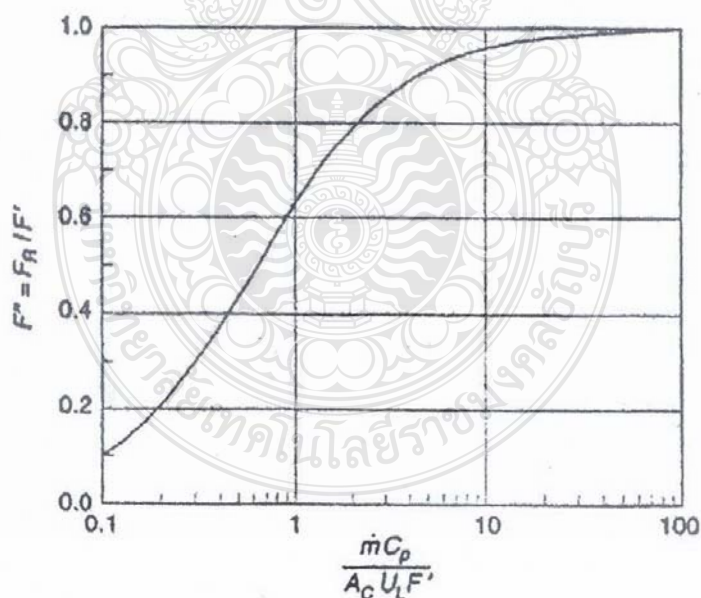
เพื่อความสะดวกจะแสดงสมการ 2.65 ในรูปกราฟ กำหนดให้

$$F'' = \frac{F_R}{F'} = \frac{m^{\circ}C_p}{A_c U_L F'} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_c U_L F'}{m^{\circ}C_p}\right) \right] \quad (2.66)$$

เมื่อ F'' = แฟคเตอร์การไหลของตัวเก็บรังสี (Collector Flow Factor)

แสดงในภาพที่ 2.31 สามารถเขียนสมการในการหาค่าพลังงานใช้ประโยชน์ (Q_u) ในเทอมของ F_R และอุณหภูมิของไหลขาเข้าได้ ดังนี้

$$Q_u = A_c F_R [S - U_L (T_i - T_a)] \quad (2.67)$$



ภาพที่ 2.31 ความสัมพันธ์ระหว่าง F'' กับ $m^{\circ}C_p / A_c U_L F'$

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 การศึกษาและรวบรวมข้อมูล

แผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ นิยมใช้ทองแดงเป็นวัสดุดูดกลืนความร้อน (Absorber Material) ซึ่งมีทั้งท่อ (Tube) และแผ่นเรียบ (Plate) เนื่องจากหาง่ายในท้องตลาดและยังสามารถนำความร้อนได้ดี รวมทั้งยังทนต่อการกัดกร่อนจากสารตัวกลางได้ดี ซึ่งสารตัวกลางที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นน้ำและอากาศ [14] ส่วนการวิเคราะห์แผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากการทดลองจะอ้างอิงตาม ASHRAE Standard 93-77 [15] ส่วนการวิเคราะห์แผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากการจำลองการทำงาน โดยการออกแบบชิ้นงานสร้างโดยโปรแกรม SolidWorks และคำนวณโดยโปรแกรม Flow Simulation Ver.2011 ซึ่งสมการที่ใช้ในการคำนวณจากโปรแกรมนั้นเป็นสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier–Stokes) [16]

3.2 การวิเคราะห์แผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การวิจัยนี้ได้ศึกษาลักษณะของแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีท่อน้ำเป็นวัสดุแลกเปลี่ยนความร้อนและเป็นวัสดุดูดซับรังสีแสงอาทิตย์ งานวิจัยนี้ใช้ท่อน้ำที่เป็นวัสดุโพลีเมอร์ และทำการประกอบท่อน้ำให้มีลักษณะขนานกัน โดยให้มีพื้นที่ในการรับรังสีแสงอาทิตย์ประมาณ 2 m^2 โดยแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ทำการทดสอบนั้นการทำงานของแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากวัสดุโพลีเมอร์ ดังนี้

- 1) พีพี-อาร์ (PP-R: Polypropylene Random Copolymer)
- 2) พีวีซี (PVC: Polyvinyl Chloride)
- 3) พีวีซี-บี (PVC-B: Polyvinyl Chloride-Black)

โดยมีคุณลักษณะที่ใช้ในการจำลองการทำงาน ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของวัสดุในการประกอบแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์

Description	PP-R	PVC	PVC-B
Density (kg/m ³)	905	1300	1375
Specific Heat (J/kg·K)	2000	900	900
Thermal Conductivity (W/m·K)	0.24	0.14	0.21
Melting Temperature (K)	483.15	453.15	453.15

3.2.1 การตั้งค่าในการจำลองการทำงาน

การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Flow Simulation Ver.2011 นั้นจำเป็นต้องทำการตั้งค่าตัวแปรต่างๆ ที่จำเป็น ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตารางการกำหนดค่าในการจำลองการทำงาน โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

No.	Description	Unit	
1	Water Flow	0.02	kg/s
2	Water Inlet Temperature	303.15	K
3	Environment Temperature (Ta)	303.15	K
4	Temperature of External Fluid (Te)	293.20	K
5	Heat Transfer Coefficient (Wind)	10	W/m ² ·K
6	Irradiation	800	W/m ²

ในตารางที่ 3.2 รายการที่ 4 Temperature of External Fluid สามารถหาได้จาก สมการ

$$Te = Ta [1.34 + (0.0065 Td) - 26] \quad (3.1)$$

- เมื่อ
- Te = อุณหภูมิภายนอกของไหล, (°C)
 - Ta = อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม, (°C)
 - Td = อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำเข้าแผง, (°C)

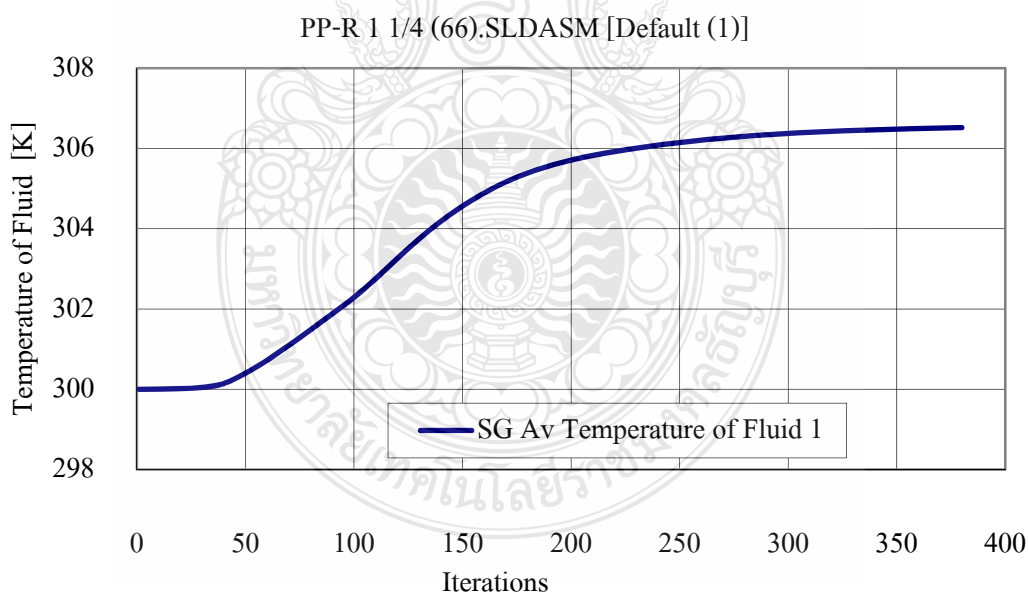
3.2.2 การจำลองการทำงาน

เนื่องจากการจำลองการทำงานอ้างอิงวัสดุที่สามารถหาได้จากท้องตลาด โดยวัสดุทั้ง 3 ชนิด นี้มีท่อหลักและท่อแยกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ดังแสดงในตารางที่ 3.3 ในส่วนของจำนวนท่อแยกมีจำนวนต่างกัน เนื่องจากมีการทดสอบการประกอบก่อน โดยเน้นที่พื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 2 m^2 (กว้าง 1 m ยาว 2 m) ทำให้มีจำนวนท่อแยกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 3.3

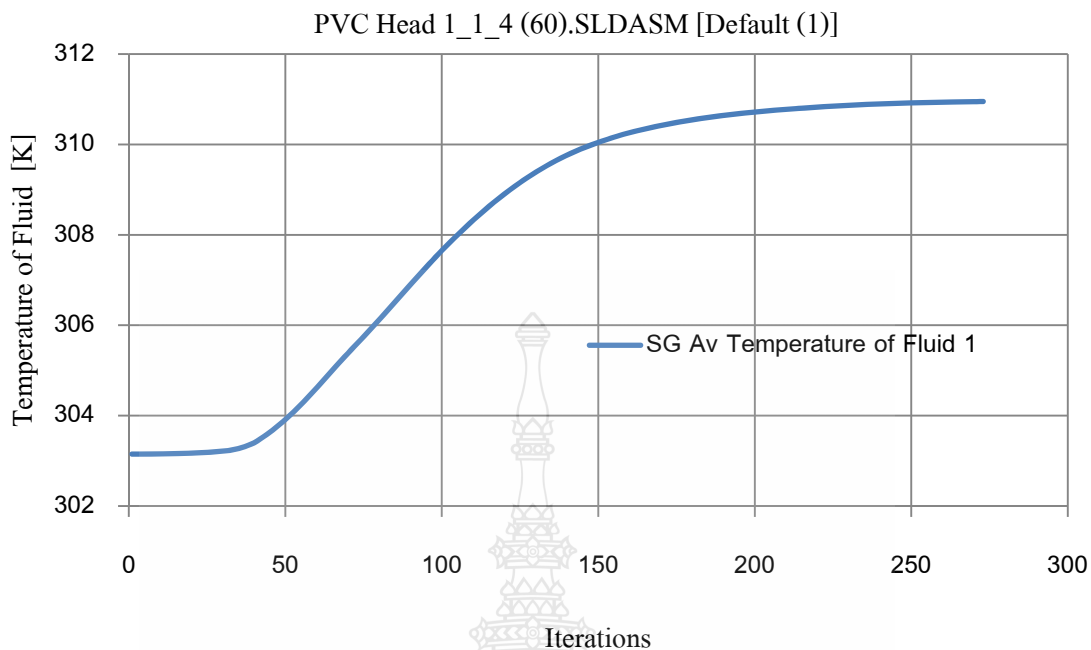
ตารางที่ 3.3 ตารางคุณลักษณะของท่อที่ทำกรจำลองการทำงาน

No.	ชนิดของ โพลีเมอร์	ท่อหลัก			ท่อแยก			จำนวน ท่อแยก
		ขนาด \varnothing ภายนอก	หนา	ยาว	ขนาด \varnothing ภายใน	หนา	ยาว	
1	PP-R	34	4	2000	26	2.5	1000	66
2	PVC	34	3	2000	22	2.5	1000	60
3	PVC-B	34	2	2000	20	0.75	1000	84

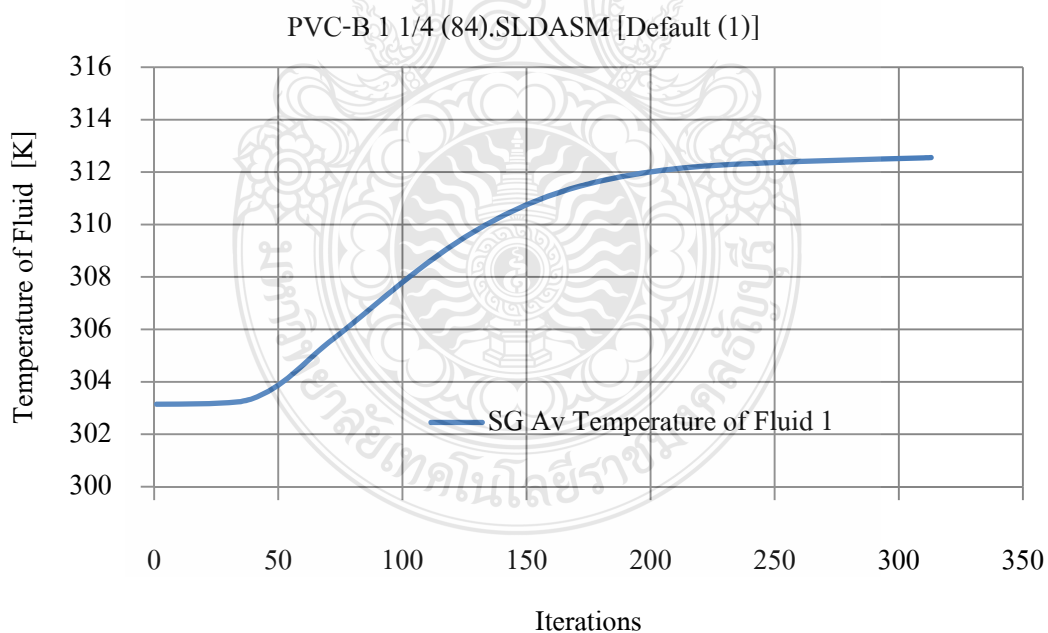
หมายเหตุ: หน่วยมิลลิเมตร



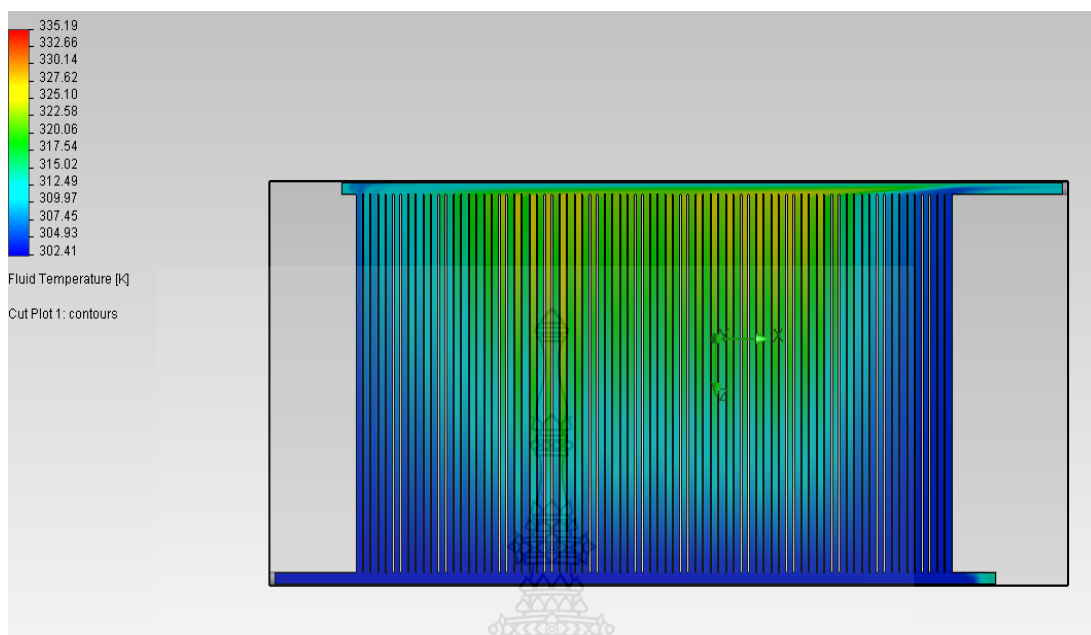
ภาพที่ 3.1 ผลต่างของอุณหภูมิน้ำเข้าและน้ำออกของ PP-R (Header 1 1/4 inch) @ Riser 66



ภาพที่ 3.2 ผลต่างของอุณหภูมิน้ำเข้าและน้ำออกของ PVC (Header 1 1/4 inch) @ Riser 60



ภาพที่ 3.3 ผลต่างของอุณหภูมิน้ำเข้าและน้ำออกของ PVC-B (Header 1 1/4 inch) @ Riser 84



ภาพที่ 3.4 ผลการจำลองการทำงานของแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์และการต่อท่อ

3.3 การทดสอบแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์

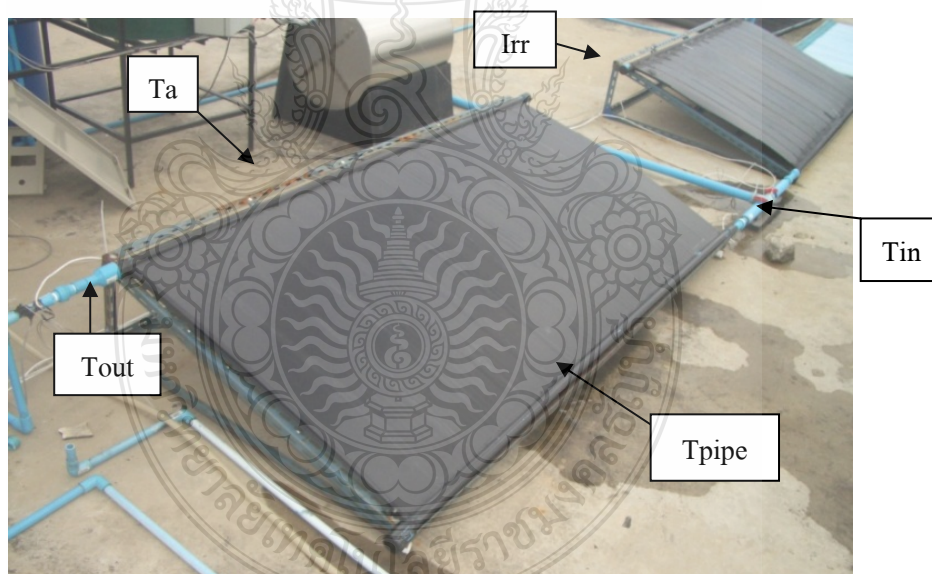
3.3.1 สถานที่ติดตั้ง ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติ 80 พรรษา 5 ธันวาคม 2550 (อาคาร 9 ชั้น คณะวิศวกรรมศาสตร์) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ซึ่งตั้งอยู่บนเส้นละติจูด $13^{\circ} 57'$ เหนือ และลองจิจูด $100^{\circ} 46'$ ตะวันออก โดยทำการติดตั้งแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ให้หันไปทางทิศใต้และเอียงทำมุมกับแนวระนาบ 13-15 องศา ซึ่งเป็นทิศทางและมุมที่เหมาะสมสำหรับการรับพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยตลอดทั้งปีของประเทศไทย แผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์นั้นเป็นแผงแบบแผ่นราบ (Flat Plate Collector) รวมทั้งเป็นตัวโครงสร้างของแผงนั้นไม่มีวัสดุอื่นในการกักเก็บความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ กล่าวคือเป็นแผงที่มีท่อทางเป็นตัวดูดซับรังสีแสงอาทิตย์อีกทั้งไม่มีฝาครอบทั้งด้านบน ด้านข้างและด้านล่าง รวมถึงไม่มีวัสดุอื่นใดเป็นฉนวนในการป้องกันการระบายความร้อนออกจากวัสดุดูดซับรังสีแสงอาทิตย์และไม่มีฝาครอบด้านบนที่เป็นกระจกอีกด้วย ดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 การติดตั้งการทดลองแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์

3.3.2 อุปกรณ์การทดลอง

- 1) เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความเข้มแสงอาทิตย์



2) ถังเก็บน้ำร้อน



3) ตู้เก็บอุปกรณ์บันทึกข้อมูลและควบคุมปั๊มน้ำ



3.4 วิธีการทดสอบ

การทดสอบแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เป็นระบบที่ได้มีการติดตั้งอุปกรณ์หลักและเครื่องมือวัดตามรูปไว้แล้ว ซึ่งการทดสอบจะเป็นการจัดการเพิ่มเติมกับระบบการของน้ำ ซึ่งได้แก่ การกำหนดอัตราการไหลของน้ำและอุณหภูมิทางเข้าให้เป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนด และการติดตั้งแผงผลิตน้ำร้อนและไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 2 แบบ ซึ่งวิธีการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

3.4.1 ทำความสะอาดแผงด้านบนก่อนการทดสอบ

3.4.2 ทำการต่อสายไฟและท่อน้ำกับแผงผลิตน้ำร้อนและไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ทั้งทางเข้าและออก

3.4.3 ติดตั้งเครื่องมือวัดตามรูป

3.4.3 ติดตั้ง หัววัดอุณหภูมิอากาศแวดล้อม วัดอุณหภูมิของน้ำทางเข้าและทางออก และต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล

3.4.5 ติดตั้งระบบควบคุมน้ำซึ่งประกอบด้วย ถังกักเก็บน้ำ ปั๊มน้ำ

3.4.6 เริ่มทำการทดสอบตามเงื่อนไขการทดสอบ

3.4.7 บันทึกผลการทดสอบ ค่าอุณหภูมิน้ำเข้า (T_i) ค่าอุณหภูมิของน้ำออก (T_o)

ค่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อม (T_a) ค่าอัตราการไหลของน้ำ (m') และค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รวม (Irr) ตามมาตรฐานของ ASHRAE Standard 93-77

3.4.8 ทำการทดสอบซ้ำ ตามเงื่อนไขการทดสอบแล้วบันทึกค่า



บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล หรือผลการวิจัย

4.1 การเปรียบเทียบและยืนยันความถูกต้องในการวิเคราะห์แบบจำลองแผงน้ำร้อนโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ ผลจากการทดลองและผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่ทำการออกแบบคำนวณ CFD โดย Flow Simulation Ver.2011 เจือใจที่ใช้ในการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ คืออัตราการไหลเชิงมวลของน้ำที่เข้าแผงรับความร้อนอยู่ที่ 0.02 kg/s อุณหภูมิของน้ำทางเข้า 303 K และการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวท่อด้านนอกกับอากาศแวดล้อม 10 W/m².K ซึ่งการคำนวณของโปรแกรมใช้สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes) ดังนี้

1) สมการอนุรักษ์มวล

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (4.1)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นมวล (mass density)
 t คือ เวลา
 u คือ ความเร็วของของไหลในแกน x
 v คือ ความเร็วของของไหลในแกน y

2) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \rho g_x \beta (T - T_0) \quad (4.2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho g_y \beta (T - T_0) \quad (4.3)$$

เมื่อ g คือ แรงโน้มถ่วงของโลก
 β คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อน
 T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)

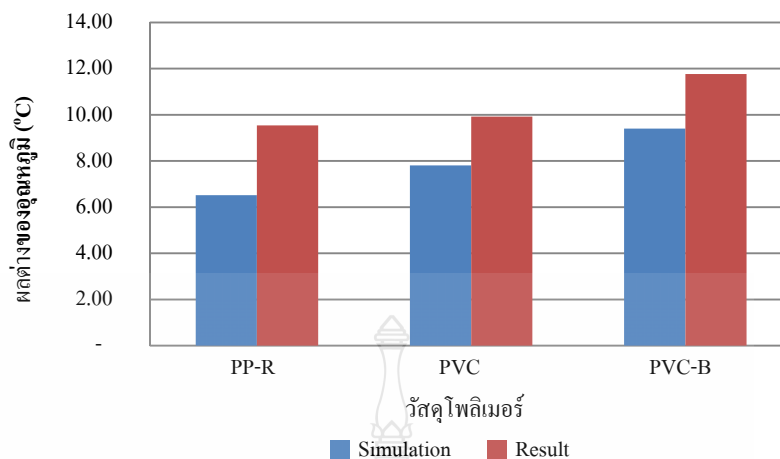
μ คือ ความหนืดสัมบูรณ์

3) สมการอนุรักษ์พลังงาน

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho \left(u \frac{\partial e}{\partial x} + v \frac{\partial e}{\partial y} \right) = \rho q + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (4.4)$$

เมื่อ e คือ พลังงานภายในต่อมวลหนึ่งหน่วย
 k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน
 q คือ ปริมาณความร้อน

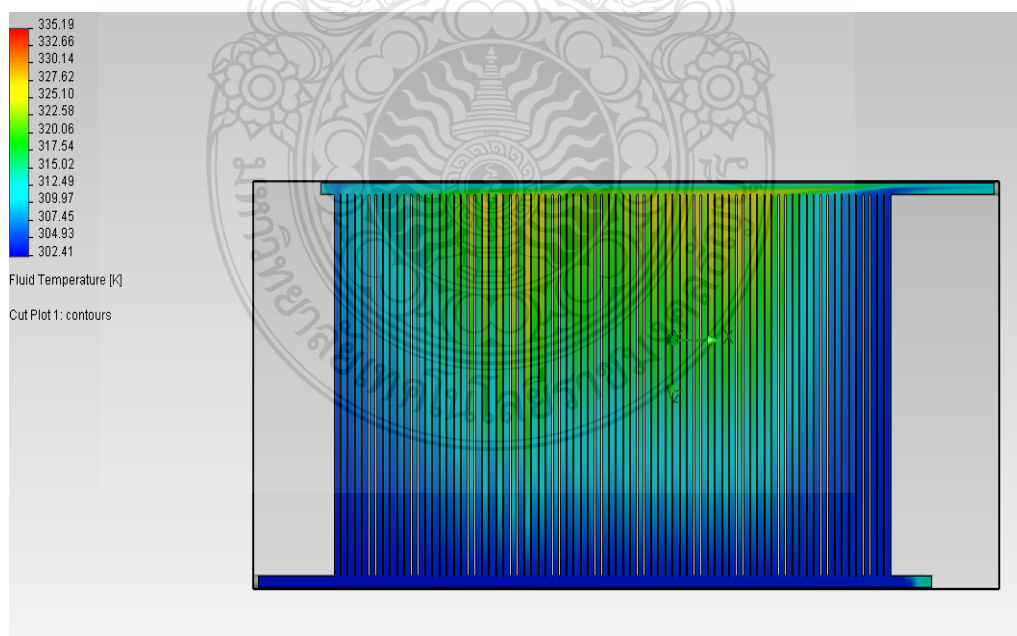
เมื่อทำการเปรียบเทียบผล จากทั้ง 2 วิธีพบว่า วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าผลต่างของอุณหภูมิ น้ำสูงกว่าการทดลอง เนื่องจากสถานที่ในการทดลองมีอัตราการถ่ายเทความร้อนมากกว่าที่ระบุในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการทดลองนั้นได้ทำการติดตั้งบนอาคารเฉลิมพระเกียรติ 80 พรรษา 5 ธันวาคม 2550 คณะวิศวกรรมศาสตร์ ผลลัพธ์ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิน้ำเข้าและน้ำออกที่ได้ นำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง พบว่าผลผลิตน้ำร้อน 3 ชนิด คือ พีพี-อาร์ พีวีซี และพีวีซี-บี ให้ผลต่างอุณหภูมิจากการจำลองคือ 6.5 7.8 และ 9.4 K ในขณะที่จากการทดลองจริงคือ 9.5 9.9 และ 11.8 K ตามลำดับ ค่าที่ได้จากการจำลองสอดคล้องกับการทดลองจริงถึงแม้ว่าค่าที่ได้จะต่ำกว่าเล็กน้อย ผลจากการจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิได้ คือ บริเวณด้านข้างจะมีอุณหภูมิต่ำและบริเวณตรงกลางมีการกระจายตัวของอุณหภูมิสูงและเป็นรูปโค้ง เสนอแนะว่าการจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการพัฒนาต่อเพื่อแก้ปัญหาที่จะเกิดจากแผงผลิตน้ำร้อนทำจากวัสดุโพลีเมอร์



ภาพที่ 4.1 ผลต่างของอุณหภูมิเปรียบเทียบระหว่างการทดลองและวิเคราะห์โดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์

4.2 ผลการวิเคราะห์การผลิตความร้อนของแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากการทดลอง

เนื่องจากการทดลองไม่ได้พิจารณาถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในระบบแผงรับความร้อน ดังนั้นวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการศึกษาและแสดงผลของการกระจายตัวของอุณหภูมิในระบบ ดังแสดงในภาพที่ 4.2



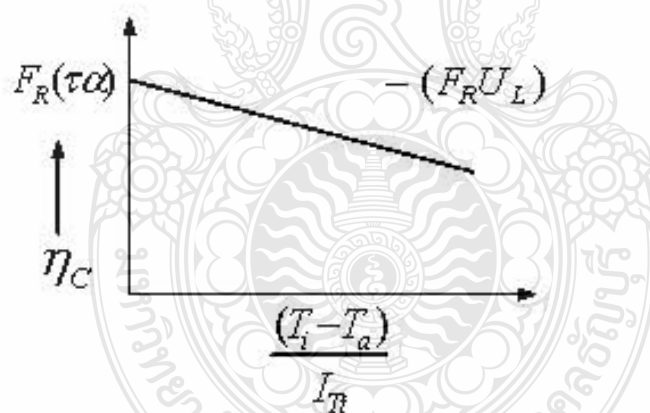
ภาพที่ 4.2 การกระจายตัวของอุณหภูมิของน้ำภายในท่อของแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์

4.2.1 การคำนวณผลการทดลอง

ประสิทธิภาพของแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\eta = \frac{Q}{A_c \cdot I_{rr}} = \frac{m^o c_p \Delta T}{A_c \cdot I_{rr}} \quad (4.5)$$

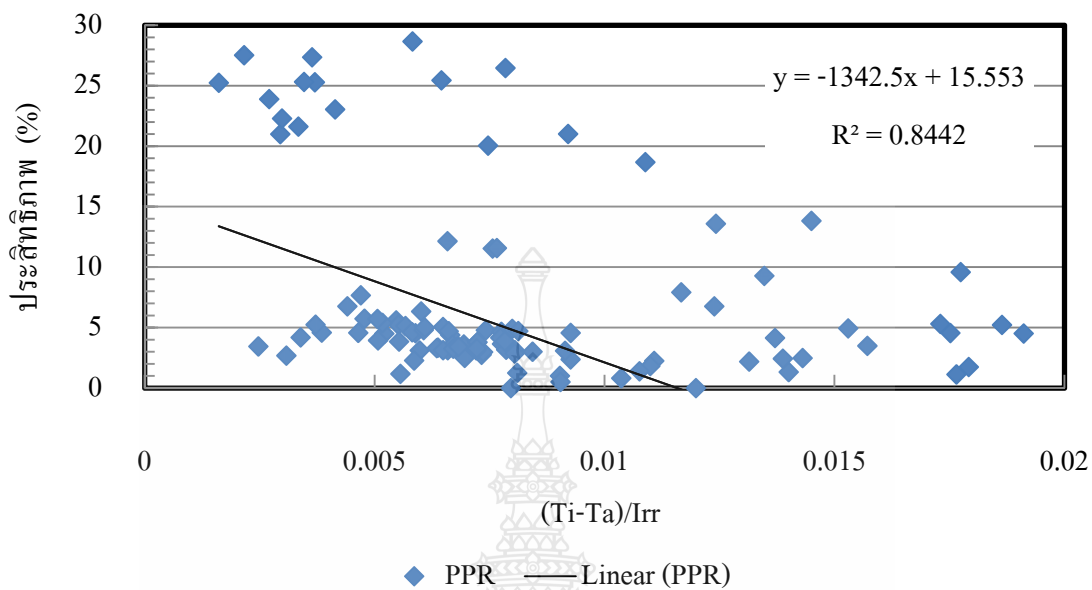
เมื่อ η = ประสิทธิภาพของแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์
 Q = พลังงานความร้อน
 m^o = อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ
 c_p = ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่
 ΔT = ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างทางเข้าและทางออกของน้ำจากแผง
 A_c = พื้นที่รับรังสีแสงอาทิตย์ของแผง
 I_{rr} = ค่าความเข้มแสงอาทิตย์



ภาพที่ 4.3 กราฟที่ได้จากการพล็อตกราฟ

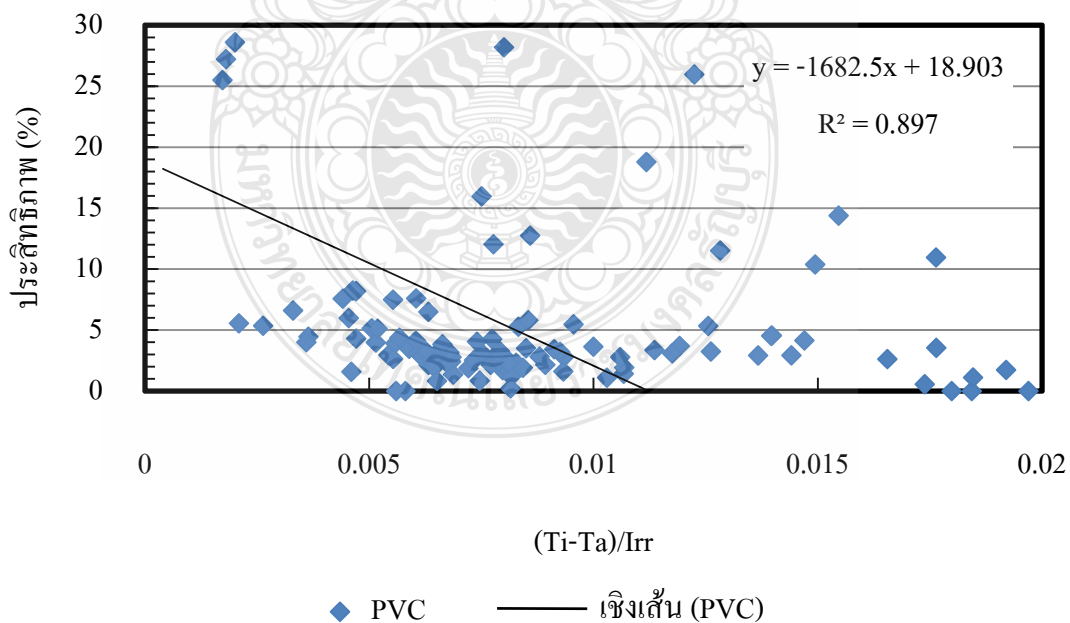
จากการทดลองตามมาตรฐาน ASHRAE Standard 93-77 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจะได้ออกมาในรูปแบบสมการถดถอยเชิงเส้น โดยมีรูปสมการจากสมมุติฐานการศึกษา (สมการที่ 1.1) เมื่อทำการคำนวณและพล็อตกราฟผลการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 4.4 - 4.6 โดยอ้างอิงจากภาพที่ 4.3 [17] ซึ่งทำให้ได้ผล ดังตารางที่ 4.1

ประสิทธิภาพแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากวัสดุ PP-R

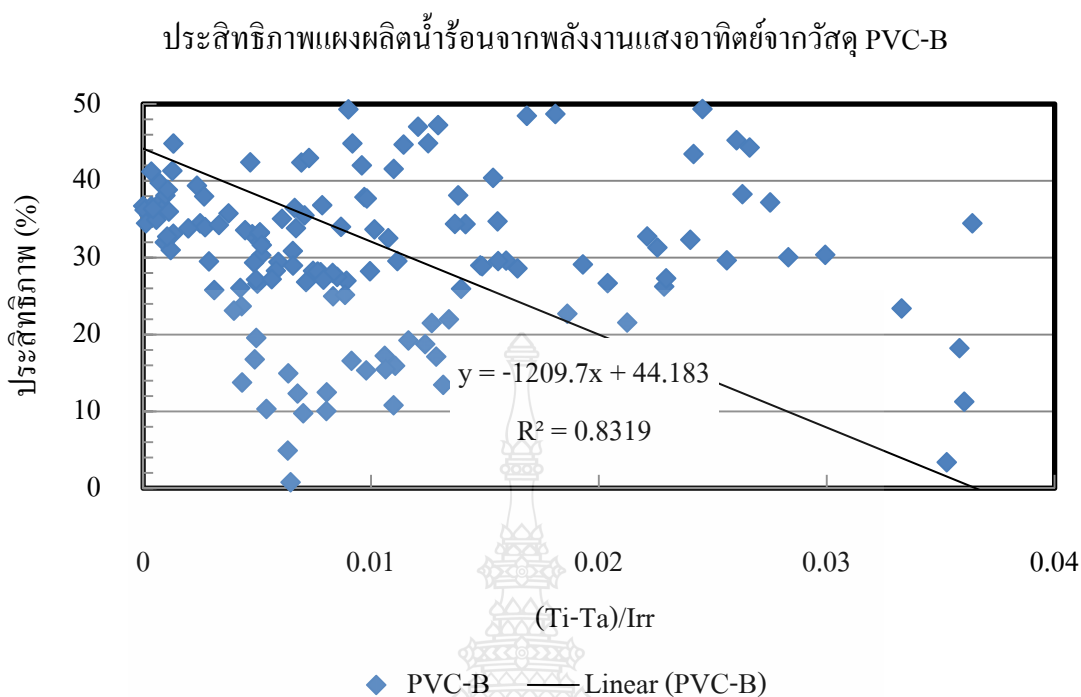


ภาพที่ 4.4 กราฟประสิทธิภาพแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากวัสดุ PP-R

ประสิทธิภาพแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากวัสดุ PVC



ภาพที่ 4.5 กราฟประสิทธิภาพแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากวัสดุ PVC



ภาพที่ 4.6 กราฟประสิทธิภาพแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากวัสดุ PVC-B

ตารางที่ 4.1 จุดตัดและความชันของแผงแต่ละชนิดตามวัสดุโพลิเมอร์

วัสดุโพลิเมอร์	จุดตัดแกน Y	ค่าความชัน	ความน่าเชื่อถือ
PP-R	13.5	1342	0.844
PVC	18.5	1682	0.897
PVC-B	44	1209	0.831

จากสมการที่ 1.1 เราสามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพสูงสุดของแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากวัสดุโพลิเมอร์แต่ละชนิด โดยกำหนดให้ $U_L = 0$ ซึ่งหมายความว่า แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ไม่มีการสูญเสียความร้อนไปยังอากาศแวดล้อม ประสิทธิภาพสูงสุดจะมีค่าเท่ากับ $\eta_{\max} = F_R(\tau\alpha)_c$ ซึ่งหมายความว่า ประสิทธิภาพสูงสุดจะขึ้นอยู่กับค่าการดูดกลืนรังสีของท่อน้ำ (ไม่มีฉนวนและกรอบ) และค่าตัวประกอบประสิทธิภาพการนำความร้อนไปใช้งาน (F_R) ผลการทดสอบหาประสิทธิภาพสูงสุดของแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากวัสดุโพลิเมอร์พบว่า PVC-B มีประสิทธิภาพสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 44 รองลงมาคือ PVC ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 18.5 และ PP-R ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 13.5

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบริเวณท่อน้ำของแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยวัสดุโพลีเมอร์ โดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับทดลอง

จากการเปรียบเทียบผลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริงนั้นพบว่าผลที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีผลต่างของอุณหภูมิน้ำเข้าและน้ำออกแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์กับผลที่ได้จากการทดลอง พบว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าผลต่างของอุณหภูมิน้อยกว่าเนื่องจากการทดลองมีความคลาดเคลื่อนของระดับอุณหภูมิน้ำทางเข้าแผงเมื่อเทียบกับค่าที่ระบุในระบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการทดลองนั้นได้พยายามรักษาระดับอุณหภูมิน้ำเข้าแผงแล้วก็ตาม

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าแนวโน้ม (Trend) มีทิศทางเดียวกัน แต่ขนาด (Magnitude) หรือค่าของผลต่างของอุณหภูมิ ที่ได้ของ Simulation จะน้อยกว่า ทั้งนี้เพราะจากการทดลองมีความคลาดเคลื่อนของระดับอุณหภูมิน้ำทางเข้าแผง

ตารางที่ 5.1 ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างการจำลองข้อมูลและการทดลอง

No	Description	Simulation	Result
1	PP-R	6.52	9.54
2	PVC	7.81	9.93
3	PVC-B	9.40	11.77

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การทดสอบระบบผลิตน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์นี้ ทำการทดลองในสถานที่จริง ดังนั้นการนำผลการทดสอบไปใช้ หรือนำระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงไปใช้กับแหล่งกำเนิดแสงในรูปแบบอื่น เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ ควรจะพิจารณาปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลกระทบต่อระบบด้วย

5.2.2 เนื่องจากการศึกษาในงานวิจัยนี้ มุ่งเน้นไปที่ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับความเข้มของแสง ดังนั้น การออกแบบอุปกรณ์ในระบบ เช่นถังเก็บน้ำร้อน หรืออุปกรณ์เสริมอื่นๆ ยังไม่สมบูรณ์ ดังนั้นเพื่อที่จะสามารถนำระบบไปใช้งานหรือนำไปประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวัน และมีประสิทธิภาพ ระบบต้องสมบูรณ์

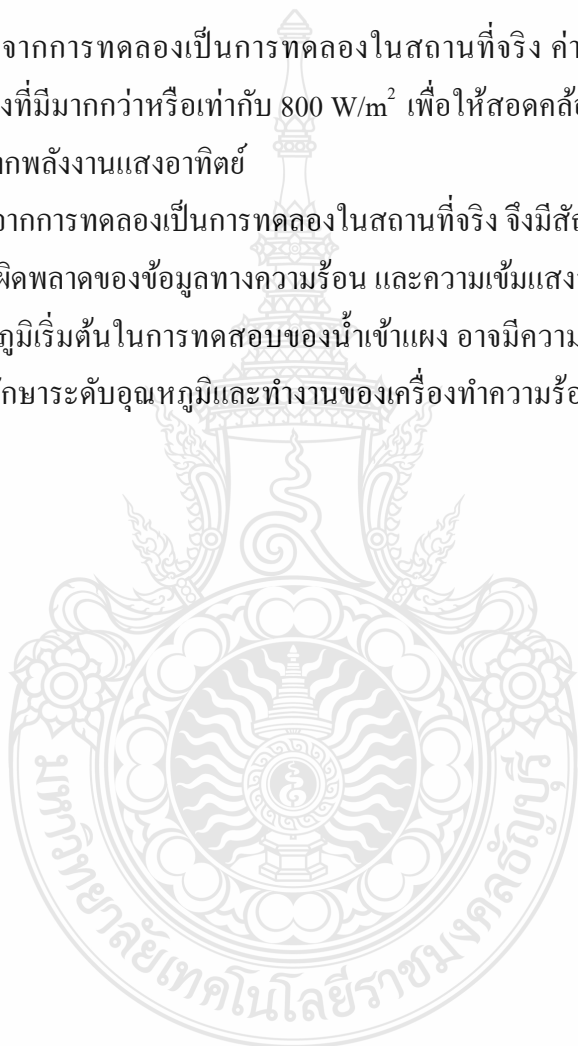
5.2.3 การบันทึกผลการทดลอง การอ่านค่าที่ได้จากการทดลองด้วยสายตา จากผู้ทำการทดลองเอง ทำให้ค่าที่ได้ไม่ละเอียดและแม่นยำมากนัก ดังนั้นจึงทำการเฉลี่ยค่าที่สูงสุดของแต่ละการทดลอง 3 ค่า ส่งผลให้ค่าการทดลองที่ได้จึงเป็นค่าโดยประมาณ ดังนั้นควรมีเครื่องมือวัดที่สามารถวัดค่าได้อย่างละเอียด ถูกต้อง และสะดวกต่อการใช้งาน เพื่อให้ผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุด

5.3 ปัญหาที่พบในการทำวิจัย

5.3.1 เนื่องจากการทดลองเป็นการทดลองในสถานที่จริง ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่ได้จำเป็นต้องใช้ค่าในช่วงที่มีมากกว่าหรือเท่ากับ 800 W/m^2 เพื่อให้สอดคล้องกับการจำลองการทำงานของแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์

5.3.2 เนื่องจากการทดลองเป็นการทดลองในสถานที่จริง จึงมีสัญญาณรบกวนภายนอกซึ่งอาจทำให้เกิดความผิดพลาดของข้อมูลทางความร้อน และความเข้มแสงอาทิตย์

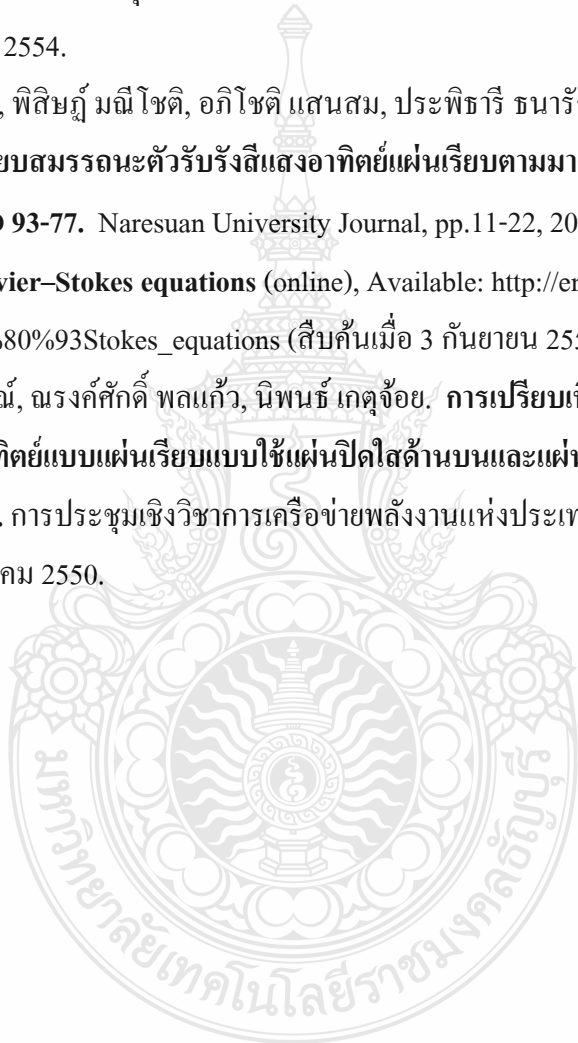
5.3.3 อุณหภูมิเริ่มต้นในการทดสอบของน้ำเข้าแผง อาจมีความคลาดเคลื่อน เนื่องจากระบายความร้อนเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิและทำงานของเครื่องทำความร้อนไฟฟ้าที่ทำให้อุณหภูมิสูงกว่าที่ทำการตั้งค่า



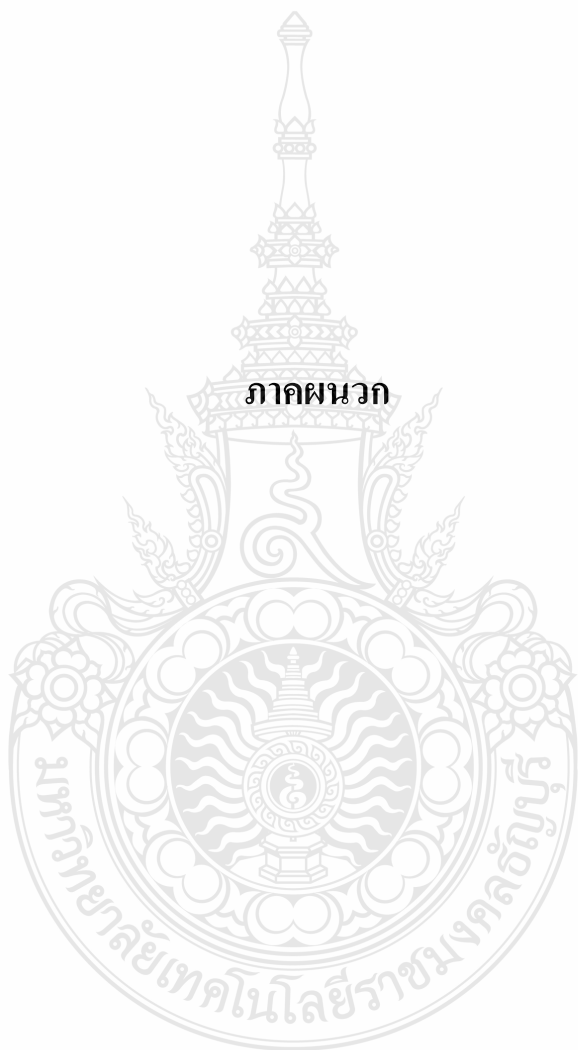
รายการอ้างอิง

- [1] Ashrea Standard 93-77., **Methods of Testing to Determine The Thermal Performance of Solar Collectors**. New York: The America Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 1978.
- [2] John A. Duffie and William A. Beckman. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 2nd edition, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1974.
- [3] จงจิตรี หิรัญลาภ. **กระบวนการพลังงานแสงอาทิตย์ในรูปความร้อน. คณะพลังงานและวัสดุ** สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2541.
- [4] Ursula Eicker. **Solar Technologies for Buildings**. New York: A Wile-Interscience Publication, 2003.
- [5] มหาวิทยาลัยศิลปากรและกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงานร่วมกับภาควิชาฟิสิกส์. **แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากข้อมูลดาวเทียมสำหรับประเทศไทย. กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงานและภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร, กรุงเทพฯ, 2542.**
- [6] Jiraphong Phongsitong, Thipjak Nualboonrueng, Porponth Sichanutgrist. **The Performance of Combined A-SI PVT and Heat-Pipe Evacuated Collectors**. 3-7 September 2007, 22nd EU PVSEC.
- [7] Dunkle, R. W.. **Thermal Radiation Tables and Applications**. Trans. ASME, 76,549 (1954).
- [8] Sargent, S.L.. **A Compact Table of Blackbody Radiation Functions**. Bull. of the Am. Meteorological Soc., 53, 360 (Apr. 1972)
- [9] Pivovonsky, M. and M. R. Nagel. **Table of Blackbody Radiation Properties**. Macmillan, New York (1961)
- [10] Kays, W. M. and M. E. Crawford. **Convective Heat and Mass Transfer**. 2nd Edition, McGrew-Hill, New York (1980)
- [11] McAdams, W.H. **Heat Transmission**. 3rd Edition, McGrew-Hill, New York (1954)
- [12] Heaton, H. S., W. C. Reynolds and W. m. Kays. **Heat Transfer in Annular Passages. Simultaneous Development of Velocity and Temperature Fields in Laminar Flow**. Int. J. Heat and Mass Transfer, 7, 763 (1964)

- [13] Rohsenow, W. M. and Choi H. **Heat Mass and Momentum Transfer**. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ (1961)
- [14] จีรพงษ์ พงษ์สีทอง, มนุศักดิ์ จานทอง, มานพ เข้มแพ่ง, วาฤทธิ์ อริยวิริยะนันท์, พงศ์พิชญ์ ต่วนภุษา, จักรวาล บุญหวาน, นฤกุล เอื้อพันธ์เศรษฐ, พงษ์พิศณุ เมืองเจริญ และ ศุภชาติ จงไพบูลย์พัฒนา. การศึกษาวัสดุที่ใช้ในแผงรับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 7, 3-5 พฤษภาคม 2554.
- [15] บงกช ประสิทธิ์, พิสิษฐ์ มณีโชติ, อภิโชติ แสนสม, ประพิธรี ธนารักษ์ และ ยุวดี คงมัน. การเปรียบเทียบสมรรถนะตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แผ่นเรียบตามมาตรฐาน ASHRAE STANDARD 93-77. Naresuan University Journal, pp.11-22, 2003.
- [16] Wikipedia: **Navier–Stokes equations** (online), Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Navier%E2%80%93Stokes_equations (สืบค้นเมื่อ 3 กันยายน 2555)
- [17] สมชาย มณีวรรณ, ณรงค์ศักดิ์ พลแก้ว, นิพนธ์ เกตุจ้อย. การเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบแบบใช้แผ่นปิดใสด้านบนและแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่แตกต่างกัน. การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 3, 23-25 พฤษภาคม 2550.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
ข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



ตารางที่ ก.1 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องบันทึกข้อมูลยี่ห้อ Yokogawa รุ่น XL100

Item		Details		
Shape of Input terminal	Push-in type terminal			
Number of Input	4ch or 1ch (Channel-to-Channel isolation, terminal "A" is shared by resistance temperature detector (RTD))			
Measuring interval	100 ms (for 4-channel type only), 200 ms, 500 ms, 1 s, 2 s, 5 s, 10 s, 20 s, 30 s, 1 min, 2 min, 5 min, 10 min, 20 min, 30 min, 1 h			
Resolution of A/D converter	16 bits			
Average function	Moving average processing and can be used for each channel (1, 2, 3, 10, and 20 times)			
Each mode	Free running, Logging, Power, Logging + Power, File processing, Logging			
Measuring screen display	Waveform, Digital Bar graph, Waveform + Digital, Alarm summary, Log			
Input Item	Item	Range	Accuracy	Min. Resolution
	DCV	100 mV, 200 mV, 1 V, 5 V, 10 V, 30 V, 100 V, 500 V, 1 kV	±0.1% of rdg., ±0.1% for 100 mV range	1 digit for 100 mV range
TC (4-wire reference junction guarantee accuracy)	K, E, J, T, L, U, N		±0.02% of rdg. ±0.1°C	0.1°C
	W, R, S, B		±0.02% of rdg. ±0.2°C	1°C
RTD (2-wire)	PT100, Pt100		±0.02% of rdg. ±0.2°C	0.1°C
Reference junction guarantee accuracy	±1°C			
Maximum input voltage	DC30 V			
Logic (DI) (2ch)	Voltage Input		OFF: Less than 0.9 V, ON: Over 2.1 V	
	Current Input		Current ON/OFF	
Pulse (1ch)	Measurement value, Integration, resolution			
Alarm output	Number of output: 1ch, Type: Level (H/L), Window (H/OUT) / Output mode: Open collector / Output hold mode: Hold for Hold alarm sound: ON/OFF / Output level: measuring period / Delay time of delay alarm: F for each channel, else: or from 1 s to 1 h			
Trigger function	Starting: Falling edge, Trigger delay: Condition: On, Alarm: Level & falling edge/Falling edge, Window: (H/OUT), Logic (H) alarm, Time (1/Year can only be used to stop logging)			
Computing function	Differential comparison	Between any two channels		
	Linear scaling	Possible calculation range: DCV, TC, RTD Pulse / Scaling possible range: -30000 to 30000		
Communication function	Serial calculation	Displays value from logging screen to unit row. Calculation includes: average value, Min value, oVt value, Peak value, RMS value		
	Loth	Media: Ethernet / Modbus-RTU / Modbus-TCP / Protocol: TCP/IP, FTP, HTTP, SMTP, SFTP / Function: Web server function, FTP client function, FTP server function, Real time monitoring function, Email delivery function, Time adjustment function		
Data saving	USB (1 port, RS-232, RS-485 (Protocol: Dedicated protocol, Modbus-RTU, Modbus-ASCII))	Data saving media: Internal memory (16 MB), CF card, SD card, USB memory (USB memory is optional only) / Data saving method: Manual or Logging data		
	Serial data: human-readable value (file saved value/Calculated value) / Data format: Binary or ASCII	Other possible data saving: Image data (BMP form), Setting data (CSV form), Alarm data (CSV form), Log data (CSV form)		
Additional function	Auto sleep & auto run by external memory, auto battery change when the remaining power is less than 50%, Key lock, Key light, Clock function			
Printer	3.5-inch TFT color LCD (200 x 240 pixels)			
Power supply	AC: 100 to 240 V/50-60 (50/60 Hz), Lithium ion battery (approx. 6 hours, when operated under the "Normal" recommended conditions)			
Operation Temp. & RH range	0 to 50°C, 5 to 85% RH (no condensation)			
Outside dimension & Weight	approx. 152 (W) x 125 (H) x 52 (D) approx. 660 g (14.4 oz) battery and rubber boot			
Supplied Standard accessories	Safety Ethernet cable - Ethernet ETK-235 class A, ETK20 - class B network, ETK-000-2-3, ETK-000-2-3, terminal: ETK-235 connector, Terminal block unit (4ch or 1ch) x2, adapter, Quick manual, CD-ROM (Standard software, human manual, Communication function manual, Guide manual), rubber boot, Screw driver for terminal block			

Optional accessories and Spares				Model number and suffix code		
Name	Model No.	Description	Model	Suffix code	Specification	
Type-K TC	3-0060	Shunt x 4 sets	XL100	-1	With each terminal block unit	
Carrying case	3-0037	To store the unit and accessories		-2	With each terminal block unit	
Lithium ion battery	3-0029	2400 mAh, 7.4 V		-D	Power cord (UL/CSA Standard)	
Digital I/O cable	3-1029	For digital logic input and alarm output, 3 m		-F	Power cord (VDE Standard)	
Communication cable	3-1011	RS-232 communication cable for PC (3 pin)		-H	Power cord (IEC Standard)	
Printer cable	3-1010	RS-232 cable for printer		-S	Power cord (SAA Standard)	
Printer	3-1700	Includes 1 roll thermal paper and 1 battery pack	-G	Power cord (BS Standard)		
Printer thermal paper	3-1060	1 roll/roll				
oC adapter for printer	3-1066	Power supply: 200-240 V				
oC adapter for printer	3-1007	Power supply: 100-120 V				
Terminal block unit (4ch)	3-0020	4-ch type				
Terminal block unit (1ch)	3-0021	1-ch type				
Rubber boot	3-0036	For protecting input				
oC adapter	3-1010	Power cord				
Spares (Suffix code)		-D	For UL/CSA Standard			
		-F	For VDE Standard			
		-H	For IEC Standard			
		-S	For SAA Standard			
		-G	For BS Standard			

Related products (Connectable to Datum-Y)

Clamp on power meter
CW120 series



Digital Illumination meter
S10 series



Clamp meter
CL series





Yokogawa
Yokogawa Meters & Instruments Corporation

World Wide Web site at
<http://www.yokogawa.com/MCO>

YOKOGAWA METERS & INSTRUMENTS CORPORATION
1-1-1-1 Nishinohara 5-ch, Nishiku, Tokyo, 114-8501 Japan
Phone: +81-41-851-2155 ext. 0 Fax: +81-41-851-1154

YOKOGAWA CORPORATION OF AMERICA (U.S.A.) Phone: 1-770-351-7000	YOKOGAWA EUROPE B.V. (THE NETHERLANDS) Phone: 31-20-464-1411	YOKOGAWA SINGAPORE PTE. LTD. (SINGAPORE) Phone: 65-6341-9922
YOKOGAWA AMERICA DO S.A. (BRAZIL) Phone: 55-11-5021-3800	YOKOGAWA METERING INSTRUMENTS (INDIA) PVT. LTD. (INDIA) Phone: 91-20-2277-1100	YOKOGAWA METERING INSTRUMENTS (CHINA) LTD. (CHINA) Phone: 86-21-6280-2107
YOKOGAWA MIDDLE EAST F.Z.C. (BAHRAIN) Phone: 973-522100	YOKOGAWA ELECTRIC LTD. (RUSSIAN FEDERATION) Phone: 7095-7277-822	YOKOGAWA ELECTRIC LTD. (INDONESIA) Phone: 62-21-770-13022

NOTICE

● Before using the product, read the instruction manual carefully to ensure proper and safe operation.

Represented by:

MHC 0214

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องบันทึกค่าความเข้มแสงอาทิตย์

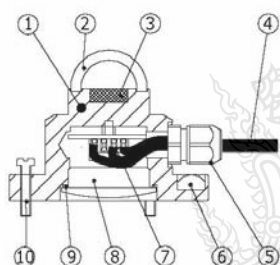


Figure 1 LP02 solar radiation sensor: (1) LP02 housing, (2) glass dome, (3) sensor, (4) cable, standard length 5 m, (7) screwed cable connection, (8) access for cable connection/ replacement.

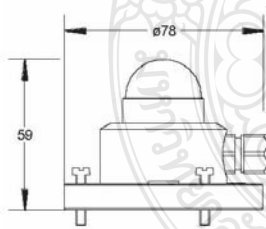


Figure 2 LP02 dimensions. Standard cable length is 5 m. All dimensions are in mm. Cable can be installed / replaced by the user.

LP02 SOLAR RADIATION SENSOR COMPLIANT WITH ISO AND WMO STANDARDS

LP02 is a solar radiation sensor that can be applied for most common solar radiation observations. It complies with the latest ISO and WMO standards. The scientific name of this instrument is pyranometer. LP02 is a modern alternative for the so-called "star" or "black and white" pyranometers overcoming the problem of poor stability of the white reflective paint.

LP02 serves to measure the solar radiation flux that is incident on a plane surface in W/m^2 from a 180 degrees field of view (also called "global" solar radiation). Working completely passive, using a thermopile sensor, LP02 generates a small output voltage proportional to this flux. Contrary to photodiode-based- and "black and white" instruments LP02 has a spectrally flat response across the full solar spectrum.

Using LP02 is easy. For readout one only needs an accurate voltmeter that works in the millivolt range. To calculate the radiation level the voltage must be divided by the sensitivity; a constant that is supplied with each individual instrument. LP02 can directly be connected to most commonly used datalogging systems. LP02 can be used for general meteorological observations, building physics, climate- and solar collector testing. A common application is for outdoor solar radiation measurements as part of a meteorological station. This application requires horizontal levelling; levelling feet (7) and a level (11) are included. The LP02 cable can easily be installed or replaced by the user.

Applicable standards are ISO 9060 and 9847, WMO (World Meteorological Organisation), and ASTM E824-94. LP02 can also be used for stability estimations according to EPA (EPA-454/R-99-005).

LP02 SPECIFICATIONS

ISO classification:	second class
Spectral range:	305 to 2800 nm
Sensitivity (nominal):	15 $\mu V/Wm^{-2}$
Temperature range:	-40 to +80 °C
Range :	0 to 2000 Wm^{-2}
Temperature dependence:	< 0.1%/°C
Calibration traceability:	WRR

OPTIONS

Additional cable length x metres (add to 5m)
AMF 01 Albedometer Fixture (used with 2 x LP02)
AC100 / AC420 amplifiers
With LI19 readout unit, in handy carrying case

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลจำเพาะสาย Thermocouple Type K

MAXIMUM TEMPERATURE RANGE

Thermocouple Grade - 328 to 2282°F - 200 to 1250°C

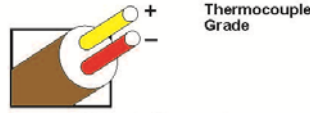
Extension Grade 32 to 392°F 0 to 200°C

LIMITS OF ERROR (whichever is greater) Standard: 2.2°C or 0.75% Above 0°C 2.2°C or 2.0% Below 0°C Special: 1.1°C or 0.4%

COMMENTS, BARE WIRE ENVIRONMENT:

Clean Oxidizing and Inert; Limited Use in Vacuum or Reducing; Wide Temperature Range; Most Popular Calibration

TEMPERATURE IN DEGREES °C REFERENCE JUNCTION AT 0°C



Nickel-Chromium vs. Nickel-Aluminum



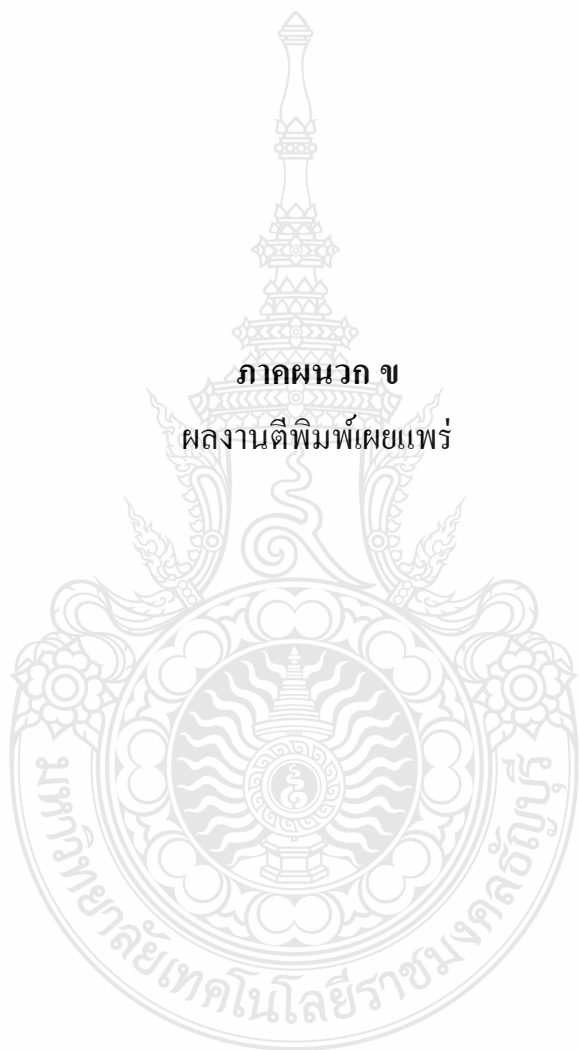
Revised Thermocouple Reference Tables

TYPE K Reference Tables N.I.S.T. Monograph 175 Revised to ITS-90

Z

Table with columns for temperature in °C and millivolt output. It is a large reference table for Type K thermocouples, showing the relationship between temperature and voltage for various grades and conditions.

ภาคผนวก ข
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



E-NETT 2011

การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7

The 7th Conference on Energy Network of Thailand

- Renewable Energy
- Energy Conservations
- Applied Energy
- Energy Materials
- Environmental Management

3-5 พฤษภาคม 2554

ณ ศูนย์ออร์คิด รีสอร์ทแอนด์สปา หาดกะรน จังหวัดภูเก็ต

ดำเนินการโดย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



ผู้ทรงคุณวุฒิเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย



ชื่อ	นามสกุล	มหาวิทยาลัย/สถาบัน/องค์กร
ศ.ดร.บัณฑิต	เอื้ออาภรณ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศ.ดร.บัณฑิต	เอื้ออาภรณ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศ.ดร.ทงเกียรติ	เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศ.ดร.มจุงศักดิ์	รัตนเดโช	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
ศ.ดร.สมชาติ	โสภณระณฤทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.วัฒนพงศ์	รักษ์วิเชียร	มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
รศ.ดร.นำยุทธ	สงฆ์ชนาพิทักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.จิวรัตน์	ดวงเดือน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.อุดมเกียรติ	นันทแก้ว	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ธนาคม	สุนทรชัยนาคแสง	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.สินชัย	ชินวรัตน์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.พีณี	งามสม	มหาวิทยาลัยรังสิต
รศ.ดร.วิทยา	ยงเจริญ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.คณิต	วัฒนวิเชียร	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.วารุณี	เด็ย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.พงษ์เจต	พรหมวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.จาวรัตน์	เจริญสุข	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.สมิทธิ์	เอี่ยมสอาด	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รศ.ดร.เสริม	จันทร์ฉาย	มหาวิทยาลัยศิลปากร
รศ.ดร.สมรัฐ	เกิดสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รศ.ดร.ธำชัย	กุลวราวิชัยพงษ์	มหาวิทยาลัยสุรนารี
รศ.ดร.ศุภชาติ	จงโพธิ์พัฒน	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
รศ.ดร.อดิศักดิ์	นาคกมลกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.ชัชวาล	ตันหิทธิ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รศ.ดร.สัทกมล	เทพหัสดิน อนุชญา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.สุรัชย์	มัจฉาชีพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
รศ.ดร.สมรัฐ	เกิดสุวรรณ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ศิริชัย	เทพา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.เวทิน	ปิยรัตน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร.สมชัย	หิรัญโรดม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.สมหมาย	ฉิวสอาด	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.พูลเกียรติ	นาคะวิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ภาวณี	ศักดิ์สุนทรศิริ	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผศ.ดร.เจริญพร	เลิศถิตชนกร	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร.ณัฐพล	ภูมิสะอาด	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร.กุลเชษฐ์	เพ็ชรทอง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร.อำไพศักดิ์	ทิบุญมา	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร.ชวลิต	ถีนวงศ์พิทักษ์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ประชาสันติ	ไตรยสุทธิ์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร.นภาพ	แย้ม ไตรพัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ชื่อ	นามสกุล	มหาวิทยาลัย/สถาบัน/องค์กร
ผศ.ดร.ติเกษ	บุญนาค	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
ผศ.ดร.ไชยณรงค์	จักรธราพันธ์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
ผศ.ดร.อชิตพล	ศศิธรานวัฒน์	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตต์
ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ	คุชฎี	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ผศ.ดร.สุรจิตร์	พระเมือง	มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย
ผศ.ดร.สุนทรพร	ดวงใหญ่	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
ผศ.ดร.สมบูรณ์	สารสิทธิ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
ผศ.ดร.สมชาย	มณีวรรณ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร.เนวิส	ประทีนทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.บัลลังก์	นิยมมณี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.ชัยพล	ธงชัยสุวัชต์กุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.สุธรรม	ปทุมสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.บัญชา	กัณฑ์กุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.เกียรติชัย	รักษาชาติ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร.กิตติ	สถาพรประสาธน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร.กุสกาภา	ภูษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ศิระ	อัจฉริยวิริยะ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผศ.ดร.กอดขวัญ	นามสงวน	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผศ.ดร.ฉัตรชัย	นิมมล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.ณัฐ	ภาคย์บัณฑิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.เนิพนธ์	เกตุจ้อย	วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร.วารุณี	อริยวิริยะเนิพนธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเทคโนโลยีราชมงคลชัยบุรี
ผศ.ดร.อาทิตย์	โสทรโยม	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
ดร.กอบศักดิ์	ศรีประภา	สำนักงาน พัฒนาวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีแห่งชาติ
ดร.อนุสรณ์	แสงประจักษ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ดร.ประภาพงษ์	วางทุกข์	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
ดร.พิสิษฐ์	มณีโชติ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.ประพิษาวี	ชนาว์เกษ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.ผดุงศักดิ์	รัตนเดโช	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
ดร.วิภา	ยงประยูร	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
อ.ณรงค์	วัชรเสถียร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อ.วิทยา	พวงสมบัติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร.สุชาติ	สุขใจ	วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.วเรศ	วิระชัย	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
ดร.จันทนา	กัญชรรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.ศิรินุช	จินตารักษ์	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.นพรัตน์	นานคงแนบ	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ
ดร.ชนากานต์	อาษาสุจริต	มหาวิทยาลัยสยาม
ดร.อัมพร	กัญชรรัตน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

สารบัญ

		หน้า
Session	Renewable Energy 08	
ประธาน	ดร.จันทนา กฤษณวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
เวลา	08:45-10:15 วันพฤหัสบดี ที่ 5 พฤษภาคม 2554	
ห้องบรรยาย	Orchid A	
AEN39	<p>การศึกษาวัดดูที่ใช้ในแง่รับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ</p> <p>จิรพงษ์ พงษ์สิทธิ์ทอง¹ มนุศักดิ์ จานทอง¹ มานพ แยมแพง¹ วารุณี อริยวิริยะนันท์² พงศ์พิชญ์ ต่วนภูษา³ จักรวาล บุญหวาน¹ นุกุล เอื้อพันธ์เศรษฐ⁴ พงษ์พิศณ เมืองเจริญ⁴ ศุภชาติ จึงโพบูลย์พัฒนะ⁵</p> <p>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี^{1,2,3}</p> <p>ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ⁴</p> <p>สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต⁵</p>	199
AEN40	<p>การศึกษามรรถนะของเครื่องกลั่นน้ำทะเลด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีภาคองน้ำ</p> <p>แบบเรียบและแบบลอนสี่เหลี่ยม</p> <p>บัญญัติ นิยมवास</p> <p>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย</p>	205
AEN41	<p>การอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรด้วยพลังงานแสงอาทิตย์</p> <p>วิศิษฐ์ ลีลาผาดิกุล</p> <p>มหาวิทยาลัยสยาม</p>	209
AEN42	<p>การนำความร้อนเหลือทิ้งจากระบบผลิตไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กมาใช้ในการอบแห้ง</p> <p>ศรายุทธ วัชรวิ</p> <p>มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ</p>	214
AEN43	<p>การศึกษาระสิทธิภาพรวมของเตาอบแบบวัสดุพูนชนิดใช้เชื้อเพลิงชีวมวล</p> <p>อนันต์ มัทธจักร ชินพงษ์ คงศิลา วีระศักดิ์ สายสุด ยาไพศักดิ์ ที่บุญมา</p> <p>มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี</p>	219
AEN44	<p>ผลกระทบของการเผาไหม้เชื้อเพลิงร่วมระหว่างทะเลลายปาล์มเปล่าโยผลปาล์มและ</p> <p>ทะเลลายปาล์ม ในเตาเผาไหม้ตะกรับแบบชั้น บนไดต่อความสามารถการรับความร้อน</p> <p>ต่อผลิตไอน้ำร้อนยวดยิ่ง</p> <p>สุขสวัสดิ์ คงกล้า ฐานิตย์ เมธิยานนท์</p> <p>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร</p>	225

การศึกษาวัสดุที่ใช้ในแผงรับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ

The Study of Material in Solar Collector Flat Plate

จิรพงษ์ พงษ์สีทอง¹ มนุศักดิ์ จานทอง¹ มานพ แยมแพง¹ วรุณี อริยวิริยะนันท์² พงศพิชญ์ ส่วนภูษา³ จักรวาล บุญหวาน¹
นุชฎ เอื้อพันธ์เศรษฐ⁴ พงษ์พิศณุ เมืองเจริญ⁴ และ สุภชาติ จงใหญ่ทรัพย์พัฒนา⁵

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี
จังหวัดปทุมธานี 12110 โทร 0-2549-3378 E-mail: jiraphongphongsitong@yahoo.com

²ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอ
ธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110 โทร 0-2549-3497 โทรสาร 0-2549-3432 E-mail: warunee.a@en.mutt.ac.th

³สำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัด
ปทุมธานี 12110 โทร 0-2549-3082 โทรสาร 0-2549-3080 E-mail: pongpith@en.mutt.ac.th

⁴ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ เลขที่ 111 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถนน
พหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120 โทร 0-2664-6500 ต่อ 4450

⁵ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบการผลิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาเกี่ยวกับภาวนำวัสดุชนิดต่างๆที่นำมาใช้เป็น
ส่วนประกอบของแผงรับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ ที่ทำการ
ทดสอบตามมาตรฐานของ Solar Rating and Certification
Corporation (SRCC) โดยเน้นที่แผงรับความร้อนจากพลังงาน
แสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ เพื่อเปรียบเทียบและศึกษาความเป็นไปได้
ในกาที่จะนำวัสดุพอลิเมอร์ มาใช้ในการผลิตเป็นแผงนำร้อนจาก
พลังงานแสงอาทิตย์

คำสำคัญ: พลังงานแสงอาทิตย์, แผงนำร้อน, แผ่นเรียบ, วัสดุ, พอลิ
เมอร์

Abstract

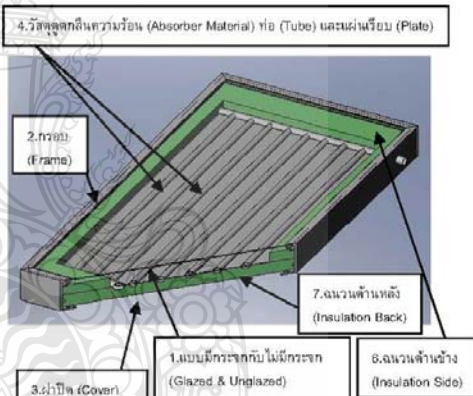
This article studies the application of various materials to
be used as a component of solar heat from the sun. A was tested
by the standard of Solar Rating and Certification Corporation
(SRCC) with a focus on flat plate solar collector. A comparison of
the possibility to use a polymeric material as a solar collector was
also revealed.

Keywords: solar, hot water panel, flat plate, materials, Polymer

1. คำนำ

บทความนี้จะกล่าวถึงวัสดุในส่วนต่างๆ ของแผงผลิตน้ำร้อน
ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อเปรียบเทียบชนิดของวัสดุที่นำมาใช้เมื่อ
ประกอบเป็นแผงเรียบเรียบร้อยแล้ว ตามลำดับต่อไปนี้คือ 1.แบบมีกระจก
กับไม่มีกระจก (Glazed & Unglazed) 2.กรอบ (Frame) 3.ฝาปิด
(Cover) 4.วัสดุดูดกลืนความร้อน (Absorber Material) ซึ่งมีทั้งท่อ
(Tube) และแผ่นเรียบ (Plate) 5.วัสดุเคลือบผิว (Absorber Coating)

6.ฉนวนด้านข้าง (Insulation Side) 7.ฉนวนด้านหลัง (Insulation
Back)



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของแผงรับความร้อนจากแสงอาทิตย์

จากรูปที่ 1 เป็นการแสดงส่วนประกอบต่างๆในแผงรับความร้อน
จากพลังงานแสงอาทิตย์ มีส่วนประกอบใกล้เคียงกันกับแผงรับความ
ร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ทั่วไปที่ใช้กัน ซึ่งโครงสร้างส่วนประกอบ
ต่าง ๆตามทั้งหมดแล้วแต่ผู้ผลิตที่จะใช้ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด
ของแผงรับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ ตามแต่วัตถุประสงค์
โดยมากจะเน้นที่สามารถเก็บสะสมพลังงานความร้อนและมีการ
สูญเสียความร้อนแก่สภาพแวดล้อมน้อยที่สุด ตั้งแต่ตัวแผงไปจนเป็น
ระบบ แต่ก็จะมีที่แผงรับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ และแผง
เก็บสะสมพลังงานความร้อนเป็นหลัก

การศึกษานี้ทำการศึกษาจากแผงที่ทำการทดสอบกับ Solar Rating and Certification Corporation (SRCC) ^[1] โดยเน้นที่แผงรับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1982-2011 จำนวน 344 แผง

2. การดำเนินงานวิจัย

2.1 แผงรับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ

ในการศึกษานี้จะกล่าวถึงแผงรับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ ที่ผ่านการจัดอันดับของแผงฯ โดยใช้มาตรฐานของ ASHRAE 96-1980 ^[2] และ ASHRAE 93-77 ^[3] จากทาง SRCC มีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังนี้

1. การตรวจรับแผงรับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์
2. การทดสอบแรงดันของท่อทางของแผงรับความร้อนจาก

พลังงานแสงอาทิตย์

3. การทดสอบการรั่วซึมของแผงรับความร้อนจากพลังงาน
4. การทดสอบการรั่วซึมของแผงรับความร้อนจากพลังงาน

จากแหล่งความร้อนภายนอก

5. การทดสอบการรั่วซึมของแผงรับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากแหล่งความร้อนภายใน
6. การทดสอบที่เวลาคงที่

7. การวัดประสิทธิภาพ
8. การทดสอบโดยการปรับมุมในการรับความร้อนจาก

พลังงานแสงอาทิตย์

9. การทดสอบแรงดันของท่อทางของแผงฯ
10. การทดสอบแรงดันตกคร่อม
11. การตรวจสอบผลกระทบ
12. การถอดแยกชิ้นส่วนและตรวจสอบทุกส่วน

ในการศึกษานี้ไม่เน้นที่ของไหลว่าจะเป็นชนิดใด โดยจากการศึกษาแผงรับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ ทั้งหมด 344 แผงนั้น สามารถแบ่งชนิดของของไหลที่ใช้เป็นตัวกลางในการรับความร้อนได้ 3 ชนิดคือ 1.น้ำ 2.อากาศ 3.น้ำร่วมกับกลีเซอรีนไกลคอล

2.2 ส่วนประกอบต่างๆของแผงรับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์

การศึกษานี้แบ่งส่วนประกอบของแผงรับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ ทั้งหมด 7 ส่วนประกอบ โดยมีจำนวนแผงรับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ ทั้งหมด 344 แผง ดังนี้

1. แบบมีกระจกกับไม่มีกระจก (Glazed & Unglazed)
2. กรอบ (Frame)
3. ฝาปิด (Cover)
4. วัสดุดูดกลืนความร้อน (Absorber Material) ซึ่งมีทั้งท่อ (Tube) และแผ่นเรียบ (Plate)
5. วัสดุเคลือบผิว (Absorber Coating)
6. ฉนวนด้านข้าง (Insulation Side)
7. ฉนวนด้านหลัง (Insulation Back)

2.2.1 แบบมีกระจกกับไม่มีกระจก (Glazed & Unglazed)

กระจกที่ทำการติดตั้งมีวัตถุประสงค์หลัก เพื่อให้เกิดภาวะเรือนกระจกภายในแผงรับความร้อนจากแสงอาทิตย์ เพื่อเป็นการสะสมความร้อนอีกทางหนึ่ง กล่าวคือความร้อนสามารถเข้ามาสะสมได้ แต่ให้เกิดระบายออกจากแผงได้น้อย

จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าแผงรับความร้อนจากแสงอาทิตย์ไม่ว่าจะมีกระจกหรือไม่มีกระจก ก็มีประสิทธิภาพทางความร้อนใกล้เคียงกัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง อาทิเช่น วัสดุดูดกลืนความร้อน พื้นที่ในการรับความร้อน เป็นต้น

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผงรับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบมีกระจกและไม่มีกระจก

Optic Type	Efficiency	Q'ty
Glazed Flat-Plate	0.683	313
Unglazed Flat-Plate	0.687	31

2.2.2 กรอบ (Frame)

กรอบหรือเฟรม มีไว้เพื่อใช้ในการรับน้ำหนักของท่อและเพลท (รวมทั้งของไหล) และป้องกันความเสียหายจากการขยายตัวของวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุดูดกลืนความร้อน รวมถึงเป็นส่วนในการช่วยสะสมความร้อนอีกทางหนึ่งในกรณีที่ไม่มีกระจก เนื่องจากมีพื้นที่ในการทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก แต่ในส่วนที่ไม่มีอาจช่วยลดราคาของแผงรับความร้อนจากแสงอาทิตย์ได้ในระดับหนึ่ง ซึ่งจะยุ่งยากในการติดตั้งได้ อีกทั้งยังเป็นการระบายความร้อนออกอีกทางหนึ่งซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบวัสดุที่ใช้ในการทำกรอบ

Frame	Q'ty	%
Aluminum	143	41.57
Aluminum and wood	1	0.291
Aluminum Extrusion	73	21.221
Aluminum, Galvanized Steel	1	0.291
Anodized Aluminum	73	21.221
Copper	3	0.872
Fiberglass	4	1.163
Galvanized Steel	3	0.872
Galvanized steel with fiber reinforced back	1	0.291
None	22	6.395
Polycarbonate	2	0.581
Polyester, metal backing	2	0.581
Polymer	3	0.872
Polypropylene	2	0.581
PVC	1	0.291
Sheet Metal	1	0.291
Stainless Steel	9	2.616

ตารางที่ 2 วัสดุในการใช้ทำเป็นกรอบอลูมิเนียมถูกนำมาใช้มากที่สุด เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาง่ายในท้องตลาด น้ำหนักเบาและสามารถ

รับน้ำหนักได้สูง รวมทั้งมีรูปร่างหลากหลายที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับแผงรับความร้อนจากแสงอาทิตย์ได้

2.2.3 ฝาปิด (Cover)

ฝาปิด มีวัตถุประสงค์หลักเดียวกับในหัวข้อ 2.2.1 โดยมีวัสดุที่นิยมนำมาใช้จำนวนมากที่สุดจากตารางที่ 3 คือ Low Iron Tempered Glass เนื่องจากกระจกชนิดนี้รวมข้อดีไว้ ดังนี้ กระจก Low Iron สามารถให้พลังงานแสงอาทิตย์ส่องผ่านได้มากถึง 90-95% และกระจก Tempered เป็นกระจกมีคุณสมบัติในการป้องกันการเกิดอุบัติเหตุ กล่าวคือกระจกมีความแข็งแรงมากกว่ากระจกธรรมดาถึง 5 เท่า และเมื่อแตกจะมีลักษณะเป็นเม็ดสีขาวโพล่งซึ่งกระจกธรรมดาจะแตกเป็นปากฉลาม

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบวัสดุที่ใช้เป็นฝาปิด

Cover	Q'ty	%
Fiberglass Reinforced Plastic	1	0.291
Lexan Polycarbonate	2	0.581
Low Iron Glass	3	0.872
Low Iron Safety Glass	5	1.453
Low Iron Tempered Glass	220	63.953
None	30	8.721
Polycarbonate	4	1.163
PV Module	1	0.291
Safety Glass	2	0.581
Solar Glass	10	2.907
Tempered glass	64	18.605
Textured Tempered Glass	2	0.581

2.2.4 วัสดุดูดกลืนความร้อน (Absorber Material) ซึ่งมีทั้งท่อ (Tube) และแผ่นเรียบ (Plate)

วัสดุดูดกลืนความร้อนและถ่ายเทความร้อนให้กับของไหลนั้นมีลักษณะการประกอบเพื่อใช้งาน 3 รูปแบบ คือ

1. ท่อน้ำหรือท่ออากาศ
2. เฟลท (ท่อน้ำหรือท่ออากาศเป็นรูปสี่เหลี่ยม (Harmonica Tube))
3. ท่อน้ำหรือท่ออากาศร่วมกับเฟลท (เฟลทในนี้คือครีป (Fin)) เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการรับรังสีแสงอาทิตย์

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบวัสดุที่ใช้เป็นท่อน้ำหรือท่ออากาศ

Absorber Material (Tube)	Q'ty	%
Aluminum	7	2.03
Co-polymer plastic	3	0.87
Copper	288	83.7
Copper Tube on Aluminum	1	0.29
EPDM	1	0.29

None	22	6.4
PEX	2	0.58
Polyethylene	1	0.29
Polypropylene with UV stabilization	18	5.23
Steel	1	0.29

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบวัสดุที่ใช้เป็นเพลทหรือครีป

Absorber Material (Plate)	Q'ty	%
Aluminum	63	18.3
Aluminum Sheet	9	2.62
Co-polymer plastic	3	0.87
Copper	121	35.2
Copper Fin	110	32
Copper Sheet	1	0.29
Dark concrete tile	1	0.29
None	21	6.1
Polymer	1	0.29
Polypropylene with UV stabilization	6	1.74
Plate - Aluminum	1	0.29
Plate - Fibrous mat spun fiberglass	1	0.29
PV Cell	1	0.29
Steel	5	1.45

ตารางที่ 4 และ 5 สามารถบ่งบอกได้ว่าวัสดุที่ถูกนำมาใช้เป็นท่อและเพลทคือ ทองแดง เนื่องจากทองแดงมีคุณสมบัติที่เป็นตัวนำความร้อนได้ดี ค่าความจุความร้อนต่ำ ทนต่อการกัดกร่อน น้ำหนักเบา สามารถติดตั้งได้ง่าย หางซื้อได้ง่ายในท้องตลาด และทำการประกอบได้โดยไม่ต้องยกมากน้ำหนัก มีความหนาตามท้องตลาด(ในประเทศไทย) ตั้งแต่หนา 3 มม. ไปจนถึงหนา 3 มม. คือ Type K, L, M และมีค่าการนำความร้อนสูงถึง 401 W/m.k

2.2.5 วัสดุเคลือบผิว

การเคลือบผิววัสดุ สามารถทำได้หลายรูปแบบและวิธีการขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ วัตถุประสงค์และค่าใช้จ่ายในการนำวัสดุที่ผ่านการเคลือบผิวไปใช้งาน อาทิเช่น เพื่อความสวยงาม ป้องกันการสึกหรอหรือกัดกร่อน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการนำความร้อน เป็นต้น

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบวัสดุเคลือบผิว (Absorber Coating)

Absorber Coating	Q'ty	%
Anodization	1	0.29
Anodization Extrusions	1	0.29

Black Chrome	50	14.5
Black Nickel	1	0.29
Black Paint	8	2.33
Black Painted Aluminum	1	0.29
Bluetec	1	0.29
Dark Green Fluorocarbon	1	0.29
Flat Black Paint	14	4.07
Metallic Oxide	1	0.29
Moderately Selective	1	0.29
Moderately Selective Black Paint	48	14
None	32	9.3
Non-selective coating	3	0.87
Paint	5	1.45
Polyester Flat Black Paint	3	0.87
Powder coating	4	1.16
Selective	28	8.14
Selective coating	88	25.6
Selective Vapor Deposition	10	2.91
Semi-Selective Paint	4	1.16
Sputtered aluminium nitride	2	0.58
Sputtered aluminum nitride	5	1.45
Sputtered cermet	4	1.16
Sputtered Selective	20	5.81
Sputtered titanium nitride	1	0.29
Titanium oxide	2	0.58
Vapor Deposition Selective Coating	5	1.45

ตารางที่ 6 แสดงให้เห็นว่าการเคลือบผิวนิยมทำการเคลือบแบบ Selective coating เนื่องจากการเคลือบผิวบนโลหะทองแดง (ตารางที่ 4 และ 5) เพื่อให้วัสดุมีความสามารถในการดูดกลืนรังสีเพิ่มขึ้นโดยจะแปรผันตามความเข้มของสีผิวที่ทำการเคลือบ ยิ่งมากจะยิ่งดูดกลืนความร้อนได้สูง ตามวัสดุในอุดมคติ คือ วัสดุดำ ที่สามารถดูดกลืนความร้อนได้ถึงหนึ่งร้อยเปอร์เซ็นต์

2.2.5 ฉนวนด้านข้างและด้านหลัง (Insulation Side & Back)

ฉนวนเป็นวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ จึงเป็นวัสดุที่มีความจำเป็นเพื่อป้องกันความร้อนถูกถ่ายเทออกทางด้านข้างและด้านหลังของแผงจากสภาพแวดล้อม เช่น ลม อุณหภูมิอากาศ ผ่น เป็นต้น

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบฉนวนกันความร้อนด้านข้าง

Insulation Side	Q'ty	%
Fiber	7	2.03
Fiberglass	7	2.03
Fiberglass Board	10	2.91
Foam	9	2.62
Foil-Faced Rigid Foam	15	4.36
Glass Wool	13	3.78
Glass Wool and Black Fleece	1	0.29
Glass Wool with Black Felt	2	0.58
Isocyanurate	2	0.58
Isocyanurate Foam	13	3.78
Mineral Wool	24	6.98
None	46	13.4
Paper-faced fiberglass	5	1.45
Plywood	1	0.29
Polyester	3	0.87
Polyester wool	2	0.58
Polyisocyanurate	128	37.2
Polymer	2	0.58
Polyurethane	8	2.33
Polyurethane	4	1.16
Poyurethane [Foil-Faced]	12	3.49
Polyurethane Foam	7	2.03
Rock Wool	23	6.69

ตารางที่ 8 เปรียบเทียบฉนวนกันความร้อนด้านหลัง

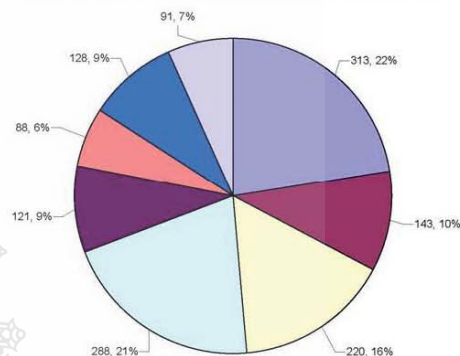
Insulation Back	Q'ty	%
Fiber	10	2.91
Fiberglass	7	2.03
Fiberglass & polyisocyanurate	4	1.16
Fiberglass Board	10	2.91
Foam	2	0.58
Foam, Fiber	2	0.58
Foam, Fiberglass	2	0.58
Foil-Faced Fiberglass	5	1.45
Glass wool	13	3.78
Glass Wool with Black Felt	2	0.58

การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7
3-5 พฤษภาคม 2554, โรงแรม Phuket Orchid Resort and Spa หาดกะรน จังหวัดภูเก็ต

isocyanurate	1	0.29
isocyanurate Foam & Fiberglass	12	3.49
Mineral Fibre	1	0.29
Mineral Wool	27	7.85
Mineral Wool & Polyurethane	3	0.87
Mineral Wool & Poyurethane [Foil-Faced]	9	2.62
Mineral Wool and Rigid Foam	15	4.36
None	32	9.3
Plywood	1	0.29
Polyester	3	0.87
Polyisocyanurate	91	26.5
Polyisocyanurate & Fiberglass	33	9.59
Polymer	2	0.58
Polyurethane	8	2.33
Polyurethane Foam	2	0.58
Polyurethane and glass wool	3	0.87
Polyurethane Foam	6	1.74
Polyurethane, Fiber glass	1	0.29
Polyurethane, Rock Wool	3	0.87
Radiant Reflective Membrane	1	0.29
Rigid Foam	5	1.45
Rock Wool	28	8.14

	Plate	Copper	121	35.17
Absorber Coating	Selective coating		88	25.58
Insulation Side	Polyisocyanurate		128	37.21
Insulation Back	Polyisocyanurate		91	26.45

Component of solar Collector Flat Plate



Glazed or Unglazed Glazed Flat-Plate
Frame Aluminum
Cover Low Iron Tempered Glass
Absorber Tube Copper
Absorber Plate Copper
Absorber Coating Selective coating
Insulation Side Polyisocyanurate
Insulation Back Polyisocyanurate

ตารางที่ 7 และ 8 แสดงให้เห็นว่า Polyisocyanurate เป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นฉนวน เนื่องจากฉนวนชนิดนี้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม คือไม่มี hydrochlorofluorocarbons (HCFCs) ที่จะทำลายชั้นบรรยากาศของโลก มีค่าการนำความร้อนต่ำที่ 0.023 W/m.K สามารถทนอุณหภูมิได้สูงถึง 145 °C โดยมีความหนาต่ำสุดเพียง 15 มิลลิเมตร

3 ผลการวิเคราะห์

การศึกษาพบว่าวัสดุที่นิยมนำมาใช้ประกอบเป็นแผงรับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยแยกตามส่วนประกอบต่างๆ ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 วัสดุที่นิยมนำมาใช้ประกอบแผงรับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ จากการจัดอันดับของ SRCC เฉพาะ Flat Plate จำนวน 344 แผง

Component	Description	Qty	%
Glazed or Unglazed	Glazed Flat-Plate	313	90.99
Frame	Aluminum	143	41.57
Cover	Low Iron Tempered Glass	220	63.95
Absorber	Tube Copper	288	83.72

ภาพที่ 2 วัสดุที่นิยมใช้ในการประกอบแผงรับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ จากการจัดอันดับของ SRCC

ตารางที่ 9 แสดงให้เห็นว่าวัสดุที่นำมาใช้ในการผลิตแผงรับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์นั้นนิยมใช้โลหะทองแดงในการดูดกลืนความร้อน เนื่องจากมีค่าการนำความร้อน และทนทานต่อการกัดกร่อนของของไหลได้ดี เปรียบเทียบกับตารางที่ 4 และ 5 ที่มีการนำวัสดุพอลิเมอร์มาใช้ในการดูดกลืนความร้อนนั้นเพียง 7.27 และ 2.91 เปอร์เซ็นต์ในการนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของท่อและเพลท ตามลำดับ

4. สรุปผล

งานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยได้ศึกษาชนิดของวัสดุที่เป็นส่วนประกอบของแผงรับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยผ่านการทดสอบจาก SRCC ตามมาตรฐาน ASHRAE 93-77 และ ASHRAE 96-1980 เฉพาะ Flat-Plate Solar Collector จำนวน 344 แผง จากการศึกษา

สามารถจำแนกส่วนประกอบของแผงรับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีความนิยมในส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้

1.แบบมีกระจกกับไม่มีกระจก (Glazed & Unglazed) สามารถใช้ได้ทั้งสองแบบ เนื่องจากมีประสิทธิภาพทางความร้อนแตกต่างกันน้อยมาก (จากตารางที่ 1)

2.กรอบ (Frame) นิยมใช้อลูมิเนียม เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาง่ายในท้องตลาด น้ำหนักเบาและสามารถรับน้ำหนักได้สูง (จากตารางที่ 2)

3.ฝาปิด (Cover) นิยมใช้กระจก Low Iron Tempered Glass โดยคำนึงถึงการใช้งานและความปลอดภัยในการใช้งานเป็นหลัก

4.วัสดุดูดกลืนความร้อน (Absorber Material) ซึ่งมีทั้งท่อ (Tube) และแผ่นเรียบ (Plate) นิยมใช้ทองแดง เนื่องจากหาง่ายในท้องตลาด และยังสามารถนำความร้อนได้ดี รวมทั้งยังทนต่อการกัดกร่อนจากสารดังกล่าวได้ดี ซึ่งสารตัวกลางที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นน้ำและอากาศ

5.วัสดุเคลือบผิว (Absorber Coating) นิยมทำการเคลือบแบบ Selective coating โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อเพิ่มการดูดกลืนความร้อน

6.ฉนวนด้านข้าง (Insulation Side)

7.ฉนวนด้านหลัง (Insulation Back)

ข้อ 6, 7 นิยมใช้ Polyisocyanurate มาทำเป็นฉนวน เพื่อใช้ในการป้องกันการถ่ายเทความร้อนออกสู่สภาพแวดล้อมและวัสดุที่ใช้ เนื่องจากฉนวนชนิดนี้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งมีค่าการนำความร้อนต่ำ

ส่วนงานวิจัยที่คาดว่าจะทำในอนาคตคือแผงรับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ผลิตจากวัสดุพอลิเมอร์ โดยใช้วัสดุพอลิเมอร์ที่หาได้ง่ายในท้องตลาดราคาไม่สูง ซึ่งคาดว่าวัสดุพอลิเมอร์นี้จะสามารถผลิตของไหลให้มีอุณหภูมิสูงได้ประมาณ 40-55 °C ซึ่งจะเป็นการนำไปพัฒนาและต่อยอดในงานวิจัยต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ Solar Rating and Certification Corporation (SRCC) ที่เผยแพร่ข้อมูล

เอกสารอ้างอิง

- [1] Solar Rating and Certification Corporation, 2011, Solar Rating and Certification Corporation, *Directory of SRCC Certified Collector and Ratings*, Solar Rating and Certification Corporation, Cocoa, FL (2011)
- [2] ASHRAE 1977, Standard 93-77, Methods of testing to determine the thermal performance of solar collectors. New York: American Society of Heating, Refrigeration, and Air-conditioning Engineer.
- [3] ASHRAE 1980, Standard 96-1980, Methods of testing to determine the thermal performance of unglazed flat-plate liquid-type solar collectors. New York: American Society of Heating, Refrigeration, and Air-conditioning Engineer.
- [4] ผศ.สมชาย กฤตพลวิวัฒน์) เอกสารการสอน พลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-NETT 2011



การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7
7th Conference on Energy Network of Thailand

มอญชัยสุโขทัยธานีแต่

จิรพงษ์ หงษ์สีทอง สมศักดิ์ จานเทถง มานต์ บัณฑิตแย่ง วารุณี ศรีวิวิริยะนันท์
พงศ์พิชญ์ สุวภาษา จันทวาด บุญชวน นฤต เอพันธ์เศรษฐ
พงษ์พิชญ์ เมืองเจริญ สุทธชาติ จงไพบูลย์พัฒนา

AEN39 : การศึกษาวงศ์ตฤทไธใหม่แห่งรับควมร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ
ซึ่งเป็นผู้ผ่านสมอมผลงานในการประชุมวิชาการนี้
ไว้ไว้ ณ วันที่ 5 พฤษภาคม 2554

Sueh. An

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชัย หิรัญโรตม)
ประธานการจัดการประชุม E-NETT 2011



การประชุมสัมมนาวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5
The 5th Thailand Renewable Energy for Community Conference (TREC-5)
<http://www.adicet.cmru.ac.th/trec-5/> โทรศัพท์/โทรสาร 053-885871



สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย
อาคารวิจัยประยุกต์ พลังงาน ลม น้ำ และแสงอาทิตย์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (คลองหก)
39 ม.1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลอง6
อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12110

15 พฤศจิกายน พ.ศ. 2555

เรื่อง ตอบรับบทความการประชุมสัมมนาวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5

เรียน คุณจิรพงษ์ พงษ์สีทอง คุณมนุศักดิ์ จานทอง คุณมานพ แยมแพง คุณวารุณี อริยวิริยะนันท์
คุณพงศ์พิชญ์ ต่วนภูษา คุณจักรวาล บุญหวาน คุณนฤกุล เอื้อพันธ์เศรษฐ์ คุณพงษ์พิศณุ เมืองเจริญ
และคุณศุภชาติ จงไฟบุลย์พัฒนา

ตามที่ท่านได้ส่งบทความวิจัยเรื่อง “การวิเคราะห์แรงแผลตน้ำร้อนจากวัสดุโพลีเมอร์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์” รหัส S5 - 03 เข้าร่วมนำเสนอในการประชุมสัมมนาวิชาการ ครั้งที่ 5 พลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย (The 5th Thailand Renewable Energy for Community Conference (TREC-5)) ระหว่างวันที่ 18 - 20 ธันวาคม 2555 ณ เชียงใหม่ เวิร์ด กรีน ซิตี้ มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ วิทยาเขตสะเลียง - ซี่เหล็ก อำเภอแมริม จังหวัดเชียงใหม่ นั้น

ในการนี้ คณะกรรมการได้พิจารณาบทความและยินดี เรียนให้ท่านทราบว่า บทความเรื่องดังกล่าวได้ผ่านการพิจารณาแล้ว จึงขอให้ท่านส่งแบบตอบรับการลงทะเบียนพร้อมหลักฐานการชำระค่าธรรมเนียมโดยดาวน์โหลดแบบฟอร์มการลงทะเบียนที่ www.adicet.cmru.ac.th/trec-5 แล้วส่งมาที่เบอร์โทรสาร 053 - 885871 ภายในวันที่ 20 พฤศจิกายน 2555 หากเลยกำหนดดังกล่าวคณะกรรมการผู้จัดงานถือว่าท่านสละสิทธิ์

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ลงชื่อ

(ดร.วิรัช โยชนรินทร์)

นายกสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย
ประธานกรรมการดำเนินงาน

การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5
18 – 20 ธันวาคม 2555 มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

การวิเคราะห์แผงผลิตน้ำร้อนจากวัสดุโพลีเมอร์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ Analysis of Polymeric Solar Collector by Finite Element Method

จิรพงษ์ พงษ์สีทอง¹ มนุศักดิ์ จานทอง¹ มานพ แยมแพง¹ วารุณี อริยวิริยะนันท์² พงศ์พิชญ์ ต่วนภูษา³
จักรวาล บุญหวาน¹ นกุล เอื้อพันธ์เศรษฐ⁴ พงษ์พิศณุ เมืองเจริญ⁴ และ ศุภชาติ จงไฟบุลย์พัฒนา⁵

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

² ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

³ สำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

⁴ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ เลขที่ 114
อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

⁵ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบการผลิต สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
จังหวัดปทุมธานี 12120

*E-mail: jiraphongphongsitong@yahoo.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้วิเคราะห์แผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้วัสดุโพลีเมอร์ คือ พีพี-อาร์ (PP-R: Polypropylene Random Copolymer) พีวีซี-บลู (PVC-Blue: Polyvinyl Chloride-Blue) พีวีซี-แบล็ค (PVC-Black: Polyvinyl Chloride-Black) โดยมีพื้นที่รับรังสีแสงอาทิตย์ของแผงแต่ละชนิด 2 ตารางเมตร ทำการศึกษาเปรียบเทียบผลการทดลองตามมาตรฐาน ASHRAE 93-77 เพื่อหาผลต่างของอุณหภูมิน้ำเข้าและน้ำออกจากแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่วัสดุโพลีเมอร์สามารถทำได้ การออกแบบแผงในงานวิจัยนี้ใช้ท่อน้ำหลักขนาด 1 1/4 นิ้ว ท่อน้ำรองขนาด 1/2 นิ้ว โดยเงื่อนไขที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้แก่ 1) อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำที่เข้าแผงรับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์อยู่ที่ 0.02 กิโลกรัมวินาที และ 2) อุณหภูมิของน้ำทางเข้า 30 องศาเซลเซียส 3) มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวท่อด้านนอกกับอากาศแวดล้อม (ไม่หุ้มฉนวน)

ผลลัพธ์ที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลจากการทดลองและจากการจำลอง พบว่าแผงผลิตน้ำร้อนชนิด PP-R จะให้ค่าผลต่างอุณหภูมิที่น้อยที่สุด คือ 6 องศาเซลเซียส ในขณะที่แผง PVC-Blue ให้ผลต่างอุณหภูมิเป็น 7 องศาเซลเซียส และแผง PVC-Black ให้ผลต่างอุณหภูมิเป็น 9 องศาเซลเซียส ทั้งนี้แผงทั้ง 3 ชนิด ค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Simulation) จะให้ค่าที่น้อยกว่าการทดลองประมาณ 2-3 องศาเซลเซียส จึงเสนอแนะได้ว่าเราสามารถใช่วิธีการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการประมาณค่าอุณหภูมิของแผงน้ำร้อนจากวัสดุโพลีเมอร์ได้ โดยสามารถจำลองได้หลายรูปแบบก่อนจะนำมาทำแผงน้ำร้อนเนื่องจากต้นทุนในการทำแม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปวัสดุโพลีเมอร์นั้นมีราคาค่อนข้างแพง

คำสำคัญ: แผงผลิตน้ำร้อน, พลังงานแสงอาทิตย์, โพลีเมอร์, ไฟไนต์เอลิเมนต์

1. บทนำ

พลังงานแสงอาทิตย์ได้ถูกนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนเพื่อใช้เป็นแหล่งความร้อนในการผลิตน้ำร้อนหรือลมร้อนสำหรับประเทศไทย มีค่าเฉลี่ยความเข้มแสงอาทิตย์ทั่วประเทศจากทุกพื้นที่มีค่าเท่ากับ $18.2 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{day}$ [1] หรือโดยประมาณเท่ากับ $5 \text{ kw.hr/m}^2 \cdot \text{day}$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับประเทศอื่นๆ ดังนั้นในการประยุกต์ใช้พลังงานความร้อนที่ได้จากดวงอาทิตย์เพื่อผลิตน้ำร้อนจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมในประเทศไทย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Collector) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตความร้อนรูปแบบหนึ่งและมีหลักการทำงานเช่นเดียวกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อแก้ปัญหาด้านพลศาสตร์ของไหล (CFD: Computational Fluid Dynamics) ในการคำนวณซึ่งเป็นระเบียบวิธีที่เหมาะสมในการนำมาใช้วิเคราะห์เพื่อแสดงผลการถ่ายเทความร้อน [2,3] จากนั้นเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองกับผลที่ได้จากการทดลองเพื่อวิเคราะห์ถึงปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนและการผลิตพลังงานความร้อนที่ได้จากแผงฯ

2. วัตถุประสงค์

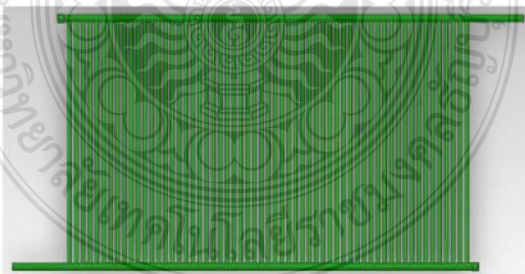
เพื่อศึกษาการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในแผงผลิตน้ำร้อนจากวัสดุโพลีเมอร์ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงตามมาตรฐาน ASHRAE 93-77

3. การดำเนินงานวิจัย

3.1 แผงรับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบชนิดไม่มีกระจกปิด

งานวิจัยนี้ใช้แผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้วัสดุโพลีเมอร์ คือ พีพี-อาร์ (PP-R: Polypropylene Random Copolymer) พีวีซี-บลู (PVC-Blue: Polyvinyl Chloride-Blue) พีวีซี-แบล็ค (PVC-Black: Polyvinyl Chloride-Black) โดยมีพื้นที่รับรังสีแสงอาทิตย์ของแผง 2 ตารางเมตร มีลักษณะการประกอบต่อดังรูปที่ 1

แผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ทำการวิจัยนี้ไม่มีฉนวนห่อหุ้มและไม่มีวัสดุปิดครอบ [4]



รูปที่ 1 ลักษณะการต่อแผงรับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 1x2 เมตร

3.2 การวิเคราะห์การผลิตความร้อนของแผงรับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์

ทำการวิเคราะห์ 2 ส่วนคือ 1)ทำการทดลองเพื่อหาปริมาณความร้อนที่แผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ผลิตได้จริง และ 2)วิเคราะห์หาปริมาณความร้อนและการถ่ายเทความร้อนโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากทั้ง 2 วิธี เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

- การทดลองเพื่อหาปริมาณความร้อนที่สามารถผลิตได้จริง

ทำการทดลองโดยติดตั้งแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ บนคาบศฟ้าอาคารเฉลิมพระเกียรติ 80 พรรษา (อาคาร 9 ชั้น) ใช้น้ำเป็นของไหลเพื่อรับความร้อนที่ผลิตได้จากแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยกำหนดค่าอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำที่ใช้ในการทดลองคือ 0.02 กิโลกรัม/วินาที และอุณหภูมิของน้ำเข้าแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ 30 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการบันทึกผลการทดลองของแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้อุปกรณ์ ดังนี้

1. เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) Type K สำหรับวัดอุณหภูมิ ต่างๆ คือ

T_{in} = วัดอุณหภูมิน้ำเข้าแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์

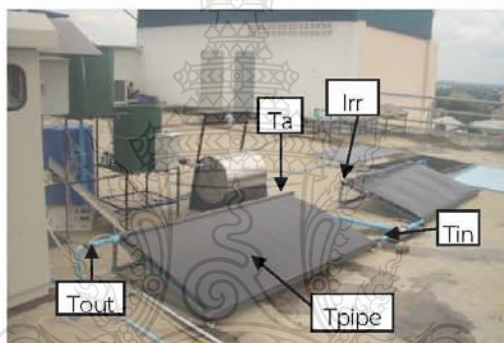
T_{out} = วัดอุณหภูมิน้ำเข้าแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์

T_a = วัดอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

T_{pipe} = วัดอุณหภูมิที่ผิวท่อของแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์

2. ไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer) สำหรับวัดค่าความเข้มแสงอาทิตย์ (IRR : Irradiation)

3. อุปกรณ์เก็บข้อมูลอัตโนมัติ (Data Logger) เพื่อทำการบันทึกค่าโดยบันทึกข้อมูลทุกๆ 1 นาที



รูปที่ 2 ตำแหน่งวัดอุณหภูมิ ค่าความเข้มแสงอาทิตย์

ตารางที่ 1 แผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากวัสดุโพลีเมอร์

No.	ชนิดโพลีเมอร์	ท่อน้ำหลัก			ท่อน้ำย่อย			จำนวนท่อน้ำย่อย
		ขนาด ๒ ภายนอก	หนา	ยาว	ขนาด ๒ ภายนอก	หนา	ยาว	
1	PP-R	34	4	2000	16	2.5	1000	66
2	PVC-Blue	34	3	2000	22	2.5	1000	60
3	PVC-Black	34	2	2000	20	0.75	1000	84

หมายเหตุ : หน่วยมิลลิเมตร

- การศึกษาโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ทำการวิเคราะห์แผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ ในการถ่ายเทความร้อนที่ผลิตได้จากท่อน้ำเพื่อส่งผ่านความร้อนไปยังน้ำ โดยมีขั้นตอนการคำนวณ ได้แก่

- 1) เขียนแบบของอุปกรณ์ต่างๆ ที่บริเวณที่รับความร้อนเท่าขนาดจริง
- 2) ระบุเงื่อนไขในการคำนวณ สมมติฐาน ได้แก่
 - เป็นการถ่ายเทความร้อนในสภาวะคงตัว (Steady State)

เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ได้แก่

- ไม่มีการขยายตัวเนื่องจากความร้อน (no thermal expansion)
- ผิวท่อไม่มีสภาพการลื่นไหลระหว่างสารทำงานและผิวท่อ (no slip condition)
- เป็นแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีการหมุนวนและวัสดุปิดครอบ
- อุณหภูมิผิวท่อมีการเปลี่ยนแปลงจากอากาศแวดล้อม

เงื่อนไขเริ่มต้น (Initial conditions)

- อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำที่เข้าแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ 0.02 กิโลกรัม/วินาที
- อุณหภูมิของน้ำทางเข้าแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ 30 องศาเซลเซียส

3) เปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่ทางออกกับผลที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุในการศึกษาโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Description		PP-R	PVC-Blue	PVC-Black
Density	(kg/m ³)	905	1300	1375
Specific Heat	(J/kg K)	2000	900	900
Thermal Conductivity	(W/m K)	0.24	0.14	0.21
Melting Temperature	(K)	483.15	453.15	453.15

ตารางที่ 3 เงื่อนไขเริ่มต้นในการศึกษาโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

No.	Description		Unit
1	Mass Flow Rate	0.02	Kg/s
2	Water inlet Temperature	303.1	K
3	Environment Temperature	303.1	K
4	Temperature of External	293.2	K
5	Heat Transfer coefficient	10	W/m ² /K
6	Irradiation	800	W/m ²

3.3 ทฤษฎี

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาโดยวิเคราะห์ในส่วนของการไหลและการถ่ายเทความร้อนซึ่งสมการที่นำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบด้วย

3.3.1 ทฤษฎีจากการจำลอง ด้วยโปรแกรม SolidWorks 2011 จากสมการนาเวียร์ – สโตกส์ (Navier-Stokes Equations)

- สมการอนุรักษ์มวล

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นมวล (mass density)

t คือ เวลา

u คือ ความเร็วของของไหลในแกน x

v คือ ความเร็วของของไหลในแกน y

- สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \rho g_x \beta (T - T_0) \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho g_y \beta (T - T_0) \quad (3)$$

เมื่อ g คือ แรงโน้มถ่วงของโลก
 β คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อน
 T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)
 μ คือ ความหนืดสัมบูรณ์

- สมการอนุรักษ์พลังงาน

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho \left(u \frac{\partial e}{\partial x} + v \frac{\partial e}{\partial y} \right) = \rho q + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (4)$$

เมื่อ e คือ พลังงานภายในต่อมวลหนึ่งหน่วย
 k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน
 q คือ ปริมาณความร้อน

3.2 ทฤษฎีจากการทดลอง

- สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) เพื่อใช้ในการคำนวณในส่วนของของไหล

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (5)$$

เมื่อ u คือ เวกเตอร์ความเร็ว (m/s)
 ρ คือ ความหนาแน่นของของเหลว (kg/m³)

- สมการโมเมนตัม (Momentum Equation) เพื่อใช้ในการคำนวณในส่วนของของไหล

$$\nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla P + \mu \nabla^2 u + \rho g \quad (6)$$

เมื่อ P คือ ความดันสถิต (Pa)
 g คือ ค่าแรงดึงดูดของโลก (m/s²)
 μ คือ ค่าความหนืดของของเหลว (Pa-s)

- การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในท่อน้ำของแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ ได้อาศัยปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ของความร้อน จากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่อุณหภูมิต่ำกว่า โดยงานวิจัยจะมีการถ่ายเทความร้อน ทั้งการแผ่ความร้อนจากรังสีแสงอาทิตย์กับแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ การนำความร้อนโดยท่อน้ำ รวมทั้งการพาความร้อนจากท่อน้ำไปยังสารตัวกลาง คือ น้ำและอากาศ โดยปริมาณของความร้อนที่เกิดการถ่ายโอนนั้นมีค่าแปรผันกับค่าความแตกต่างของอุณหภูมิตามระยะทาง ในกรณีนี้ที่คิดในแบบสามมิติซึ่งสภาพการนำความร้อนภายใต้ทิศทาง x , y และ z สามารถแสดงได้ตั้งสมการ

$$q_x = -k \, dy \, dz \, \frac{\partial T}{\partial x} \quad (7)$$

$$q_y = -k \, dx \, dz \, \frac{\partial T}{\partial y} \quad (8)$$

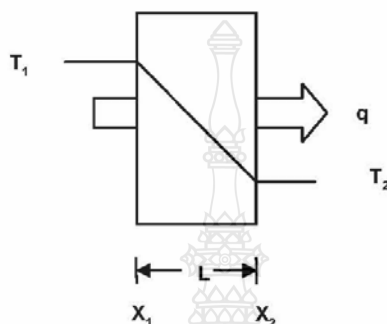
$$q_z = -k \, dx \, dy \, \frac{\partial T}{\partial z} \quad (9)$$

เมื่อ q คือ ปริมาณความร้อนที่เกิดการถ่ายโอน (Watt)

k คือ ค่าการนำความร้อน ($\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$)

∂T คือ ผลต่างของอุณหภูมิ ($^\circ\text{C}$)

- การนำความร้อน ภาพได้ทิศทาง x ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 การนำความร้อนผ่านผนังเรียบแบบอนุกรม

$$\frac{q}{A} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L}{k}} \quad (10)$$

เมื่อ T_1 คือ อุณหภูมิภายนอกของแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ ($^\circ\text{C}$)

T_2 คือ อุณหภูมิภายในท่อของแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ ($^\circ\text{C}$)

L คือ ความหนาของท่อน้ำของแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ (m)

k คือ ค่าการนำความร้อนของท่อน้ำของแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ ($\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$)

- การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างท่อน้ำและน้ำ กับท่อน้ำกับอากาศ นั้นเป็นการถ่ายโอนความร้อนแบบการพาความร้อน มีสมการที่ใช้ในการคำนวณอัตราการถ่ายโอนความร้อนคือกฎการเย็นตัวของนิวตัน "Newton's cooling law"

$$q = hA\Delta T \quad (11)$$

เมื่อ h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)

ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิ ($^\circ\text{C}$)

A คือ พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน (m^2)

- การสมดุลพลังงาน กรณีการถ่ายเทความร้อนของน้ำสามารถคำนวณได้จาก

$$Q = m \cdot C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (12)$$

เมื่อ Q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่น้ำได้รับ (Watt)

m คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ (kg/s)

C_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ ($\text{KJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$)

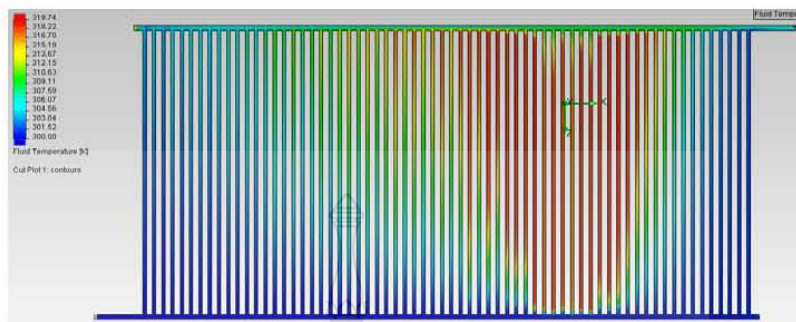
T_{in} คือ อุณหภูมิของน้ำด้านขาเข้า ($^\circ\text{C}$)

T_{out} คือ อุณหภูมิของน้ำด้านขาออก ($^\circ\text{C}$)

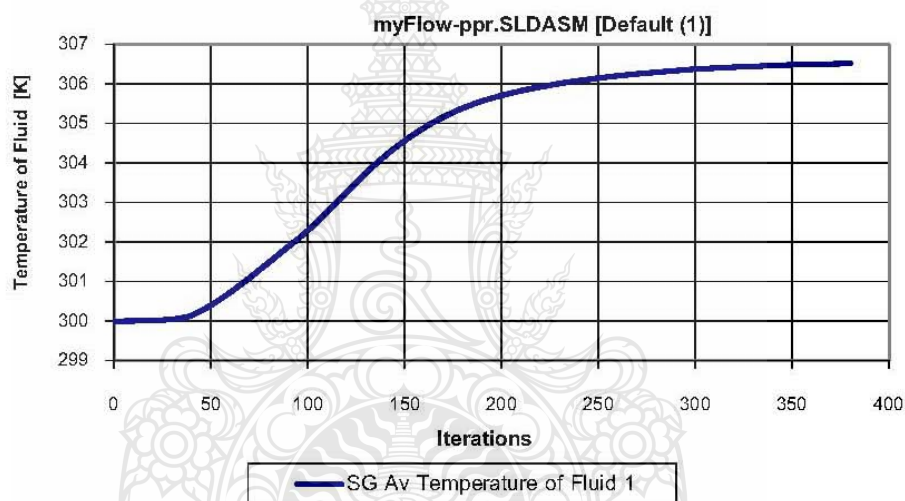
4. การวิเคราะห์

4.1 การวิเคราะห์แบบจำลองโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

4.1.1 แผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากวัสดุ PP-R

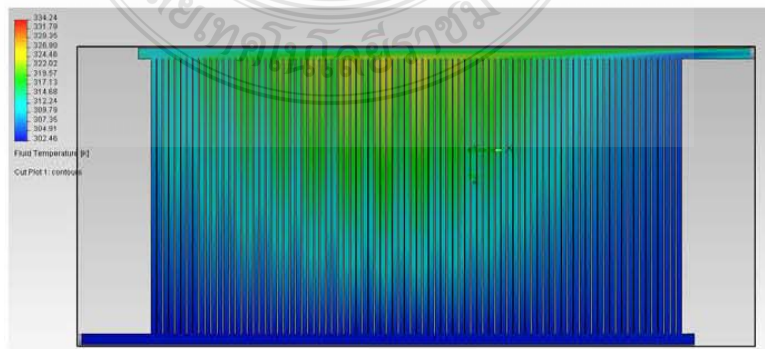


รูปที่ 4 ผลการจำลองการทำงานของแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากวัสดุ PP-R

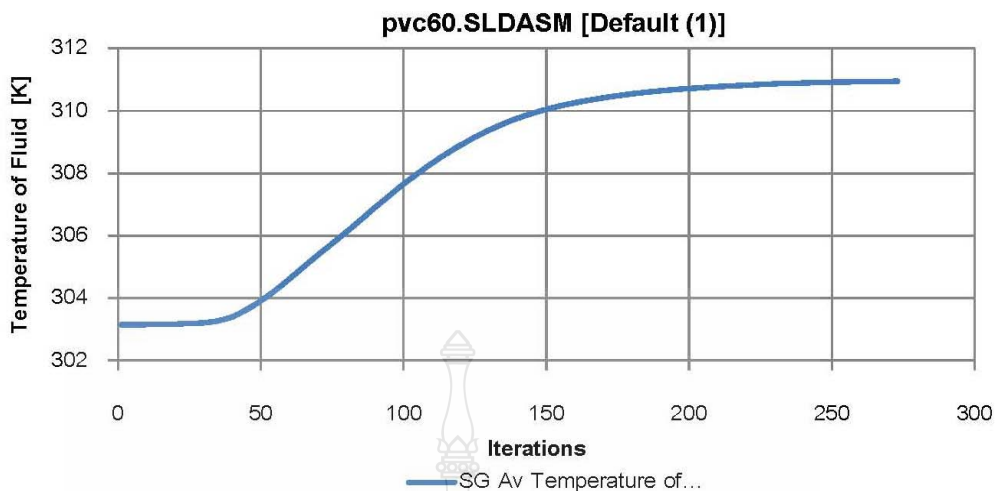


รูปที่ 5 กราฟผลต่างของอุณหภูมิน้ำ เข้า-ออก ของแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากวัสดุ PP-R

4.1.2 แผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากวัสดุ PVC-Blue

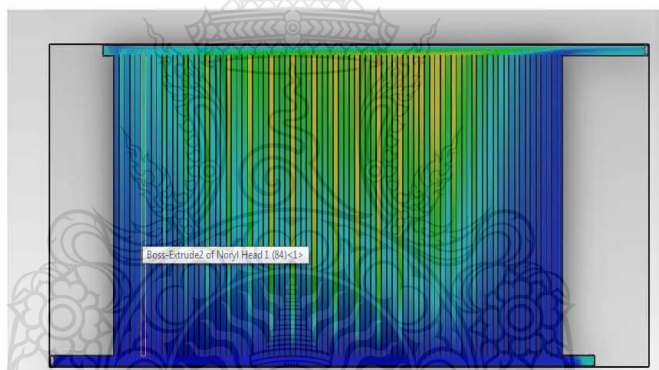


รูปที่ 6 ผลการจำลองการทำงานของแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากวัสดุ PVC-Blue

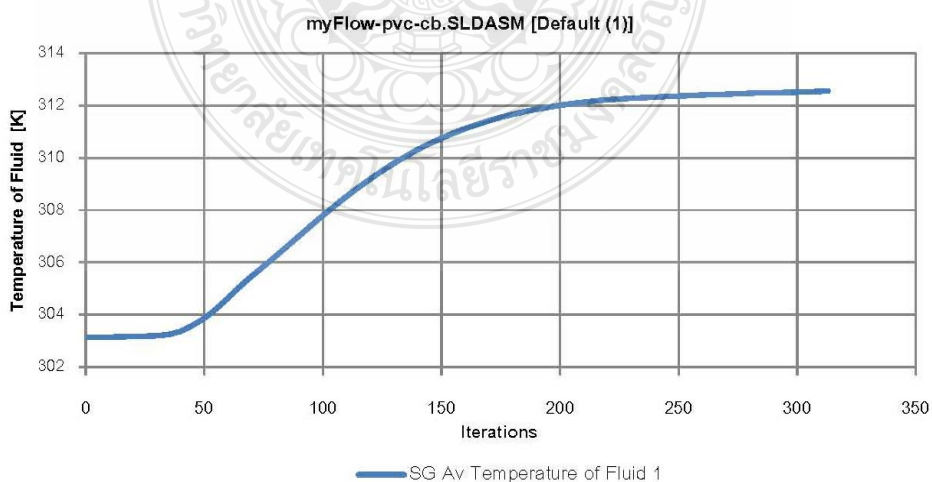


รูปที่ 7 กราฟผลต่างของอุณหภูมิน้ำ เข้า-ออก ของแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากวัสดุ PVC-Blue

4.1.3 แผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากวัสดุ PVC-Black



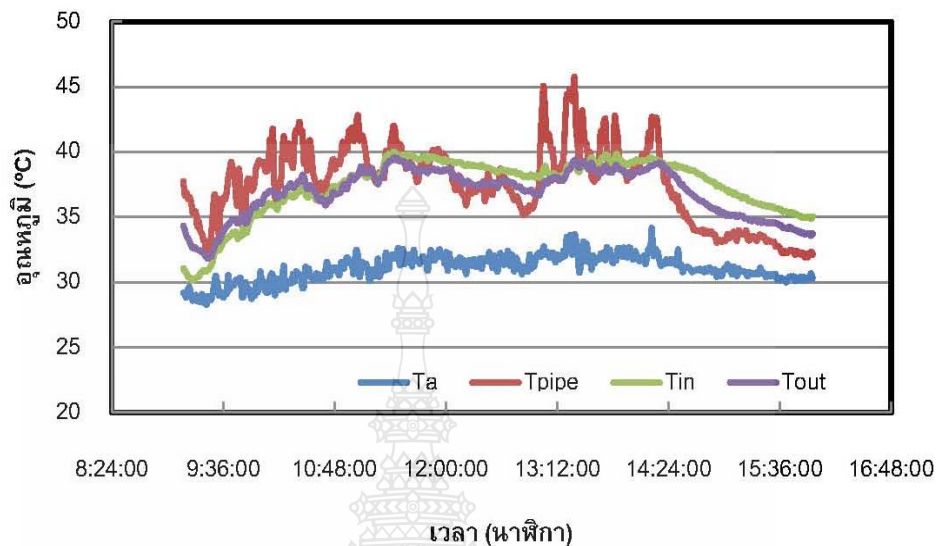
รูปที่ 8 ผลการจำลองการทำงานของแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากวัสดุ PVC-Black



รูปที่ 9 กราฟผลต่างของอุณหภูมิน้ำ เข้า-ออก ของแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากวัสดุ PVC-Black

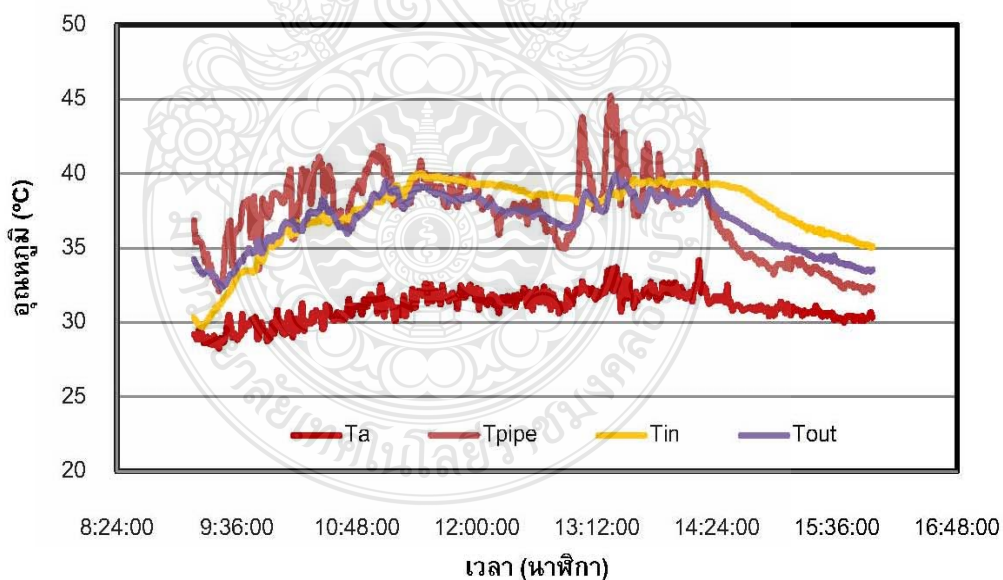
4.2 การวิเคราะห์จากการทดสอบ

4.2.1 แผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากวัสดุ PP-R



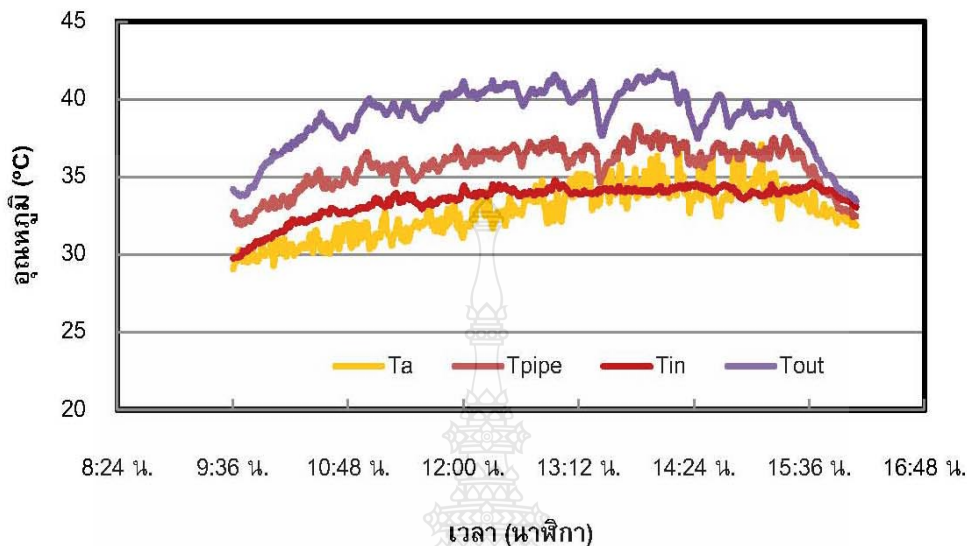
รูปที่ 10 กราฟอุณหภูมิของแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากวัสดุ PP-R

4.2.2 แผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากวัสดุ PVC-Blue

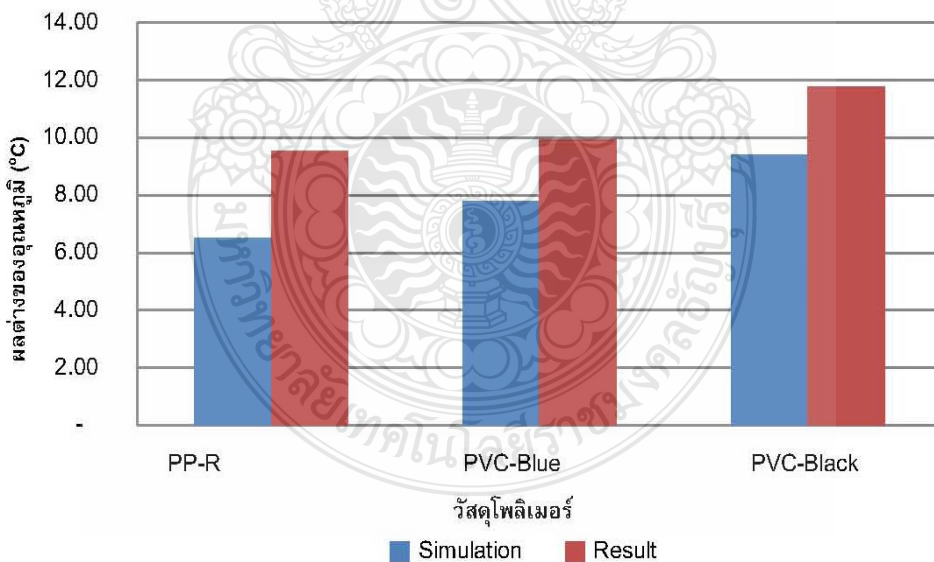


รูปที่ 11 กราฟอุณหภูมิของแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากวัสดุ PVC-Blue

4.2.3 แผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากวัสดุ PVC-Black



รูปที่ 12 กราฟอุณหภูมิของแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากวัสดุ PVC-Black



รูปที่ 13 กราฟผลต่างของอุณหภูมิต่างกันระหว่างการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลองจริงตามมาตรฐาน ASHRAE 93-77

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบริเวณท่อน้ำของแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยวัสดุโพลีเมอร์ โดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลการทดลอง

จากการเปรียบเทียบผลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริงนั้นพบว่า ผลที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีผลต่างของอุณหภูมิน้ำเข้าและน้ำออกแผงผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์กับผลที่ได้จากการทดลอง พบว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าผลต่างของอุณหภูมิน้อยกว่า เนื่องจากการทดลองมีความคลาดเคลื่อนของระดับอุณหภูมิน้ำทางเข้าแผงเมื่อเทียบกับค่าที่ระบุในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการทดลองนั้นได้พยายามรักษาระดับอุณหภูมิน้ำเข้าแผงแล้วก็ตาม

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าแนวโน้ม (Trend) มีทิศทางเดียวกัน แต่ขนาด (Magnitude) หรือค่าของผลต่างของอุณหภูมิ ที่ได้ของ Simulation จะน้อยกว่า ทั้งนี้เพราะจากการทดลองมีความคลาดเคลื่อนของระดับอุณหภูมิน้ำทางเข้าแผง

ตารางที่ 4 ผลต่างของอุณหภูมิมิระหว่างการจำลองข้อมูลและการทดลอง

No	Description	Simulation	Result
1	PP-R	6.52	9.54
2	PVC-Blue	7.81	9.93
3	PVC-Black	9.40	11.77

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ รวมทั้งคุณนกุล เอื้อพันธ์เศรษฐ และคุณพงษ์พิศณุ เมืองเจริญ ที่ช่วยอนุเคราะห์ให้ในการใช้งานเครื่องคอมพิวเตอร์ สำหรับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Solid Works 2011 รวมทั้งนักศึกษาจากมหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี ในการช่วยบันทึกข้อมูลผลการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] มหาวิทยาลัยศิลปากรและกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, "แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากข้อมูลดาวเทียมสำหรับประเทศไทย", กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงานและภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร, กรุงเทพฯ, 2542.
- [2] Ranganayakulu, Ch., Seetharamu, K.N., and Sreevatsan, K.V., "The Effect of Longitudinal Heat Conduction in Compact Plate-Fin and Tube-Fin Heat Exchangers Using a Finite Element Method", International Journal Heat and Mass Transfer, Vol. 96, No. 6, pp. 1261-1277, 1997.
- [3] Ranganayakula, Ch. And Seetharamu, K.N., "The Combined Effect of Wall Longitudinal Heat Conduction, Inlet Fluid Flow Nonuniformity and Temperature Nonuniformity in Compact Tube-Fin Heat Exchanges: A Finite Element Method", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 42, pp. 263-273, 1999.
- [4] เรวดีพันธ์ ขุนทองจันทร์, อ่ำไพศักดิ์ ที่บุญมา และ พิสิษฐ์ เตชะรุ่งไพศาล (2548). เครื่องทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดไม่มีกระจกปิด, การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 1, โรงแรมอมบาสเดอร์ซีดี จอมเทียน จังหวัดชลบุรี

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายจिरพงษ์ พงษ์สีทอง
วันเดือนปีเกิด	1 มกราคม 2520
ที่อยู่	49/528 หมู่บ้านวสิน หมู่ที่ 2 ตำบลบึงสนั่น อำเภอชัยบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลชัยบุรี ปี พ.ศ. 2544
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2544 – 2547	บริษัท 433 วิศวกรรม จำกัด วิศวกร โครงการ วิศวกรสนามงานระบบและ ไฟร์แมน (ระบบประปา ระบบไฟฟ้า ระบบปรับอากาศ) วิศวกร ประมาณราคาโครงการ วิศวกรจัดซื้อ พนักงานเขียนแบบงานระบบ
พ.ศ. 2547 – 2553	สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ ตำแหน่งผู้ช่วยวิจัย
พ.ศ. 2553-ปัจจุบัน	สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ หน่วยวิจัยการออกแบบและวิศวกรรม ห้องปฏิบัติการระบบอัตโนมัติและแมคคาทรอนิกส์ ตำแหน่งผู้ช่วยวิจัย