



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาศมรรถนะของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์

แบบคอนกรีตเปลือยเพื่อการผลิตน้ำร้อน

The Study of Uncovered Concrete Solar Collector
Performance for Hot Water

คณะผู้วิจัย สังกัด คณะวิทยาศาสตร์

โดย อาจารย์ธัญญา อุดอ้าย

ผศ.ดร.สมชาย เจียจิตต์สวัสดิ์

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนเรศวร
วันลงทะเบียน.....12 มี.ย. 2558
เลขทะเบียน.....1699409X
เลขเรียกหนังสือ.....2 TH

0561.7

04617

2557

สนับสนุนโดยกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยนเรศวร

บทคัดย่อ

คอนกรีต เป็นวัสดุก่อสร้างชนิดหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในสิ่งปลูกสร้างหรือสิ่งก่อสร้าง เนื่องจากคอนกรีต หาง่าย ราคาถูก และทนทาน อีกทั้งคอนกรีตมีคุณสมบัติในการเก็บความร้อนได้สูง ซึ่งเหมาะสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้สร้างตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์

ในงานวิจัยนี้ มีจุดประสงค์เพื่อออกแบบ สร้างและ ทดสอบสมรรถนะเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีชนิดแผ่นเรียบที่ทำจากวัสดุคอนกรีตที่มีขนาดพื้นที่ 2 m^2 และ หนา 0.07 m ภายในแผ่นคอนกรีตมีท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.8 cm ขดแบบคดโค้งฝังอยู่ ระบบดังกล่าวได้ถูกนำมาทดสอบและ จำลองภายใต้สภาวะแสงอาทิตย์จริงและ ไม่มีการระความร้อน ผลการศึกษาสมรรถนะของระบบเพื่อผลิตน้ำร้อนทั้งจากการทดสอบจริงและ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่า ระบบสามารถผลิตน้ำร้อนได้ในช่วง $40^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C}$ ตามที่คาดหวังไว้ การพ่นด้วยสีดำด้านบนแผ่นคอนกรีตเปลือยช่วยทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบผลิตน้ำร้อนสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดกลืนแสงอาทิตย์ให้กับแผ่นคอนกรีต ปริมาณของพลังงานแสงอาทิตย์ในแต่ละวันและ อัตราการไหลของน้ำในระบบมีผลกระทบต่ออุณหภูมิสูงสุดของน้ำร้อนที่ผลิตได้ นั่นคือ ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่มากทำให้อุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตสูง ในทางตรงกันข้าม อัตราการไหลของน้ำที่เพิ่มทำให้อุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้ลดลง และ การเพิ่มจำนวนท่อที่ขดภายในแผ่นคอนกรีตมีผลกระทบต่ออุณหภูมิสูงสุดของน้ำที่ผลิตได้ อย่างไรก็ตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ยังต้องการการพัฒนาต่อไปสำหรับความน่าเชื่อถือ

คำสำคัญ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์คอนกรีต, เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

Abstract

Concrete is one type of construction materials widely used in building, because it is available, inexpensive, and durable. Moreover, the concrete has properties in the high thermal storage, which is suitable for constructive application of solar collector.

In this research, the objective is to design, fabricate, and test the thermal performance of a flat plate collector made of concrete material having area of 2 m^2 with thickness of 0.07 m, in which the PVC pipes with inside diameter of 1.8 m are located. The mentioned system was tested and simulated under natural sunlight and no thermal load. The study results of the system performance to produce hot water from both experimental testing and mathematical modeling was found that the system is capable to produce hot water in the range between 40°C and 60°C as expected, black color spraying on the concrete plate allows the higher thermal efficiency of the hot water system because it increases the performance of solar absorption on the concrete plate, amount of daily solar radiation and mass flow rate of the water inside the system affect on the maximum temperature of the hot water produced meaning the higher the amount of daily solar radiation, the higher the maximum water temperature is, in contrast, increase of the mass flow rate decreases the water temperature, and increasing number of tubes affects less on the maximum water temperature generated. However, the mathematical models used in this research work are in need of further development for their reliability.

Key words: Concrete solar collector, solar water heater system

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยและคณะ ใคร่ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยนเรศวรที่อนุเคราะห์เงินอุดหนุน งบประมาณกองทุนวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2556

ขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนร่วมช่วยเหลือในการสร้างต้นแบบและทดสอบระบบ โดยเฉพาะนิสิตชั้นปีที่ 3 สาขาฟิสิกส์และ ฟิสิกส์พลังงาน และขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวนามที่มีส่วนช่วยให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี



สารบัญ

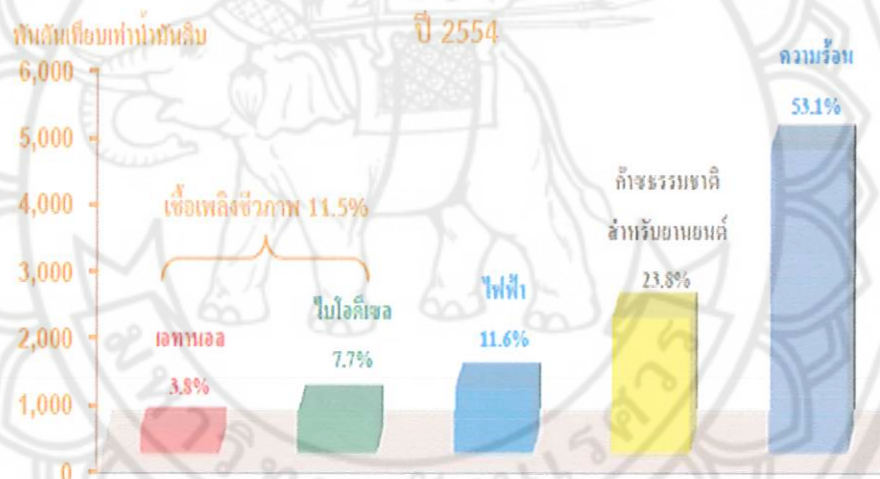
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	2
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ของโครงการวิจัย	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 วัสดุคอนกรีต	3
2.2 ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์	4
2.3 โปรแกรม TRNSYS	5
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	19
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	19
3.2 การออกแบบและ ทดสอบตัวรับรังสีแสงอาทิตย์	20
3.3 การสร้างแบบจำลอง โดยใช้โปรแกรม TRNSYS	22
บทที่ 4 ผลการวิจัย	40
4.1 ผลการทดสอบระบบ	40
4.2 ผลการจำลองระบบ	42
บทที่ 5 บทสรุป	45
5.1 สรุปผลการทดสอบ	45
5.2 ข้อเสนอแนะ	45
ภาคผนวก ก	46
บรรณานุกรม	57

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

จากสถานการณ์ในปัจจุบันประเทศไทยมีแนวโน้มความต้องการพลังงานในปริมาณที่เพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก จากรายงานของสำนักงานคณะกรรมการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ (สศช.) ปี 2553 พบว่า เศรษฐกิจของประเทศไทยมีการขยายตัวถึงร้อยละ 7.8 [1] เนื่องจากเศรษฐกิจโลกที่ฟื้นตัว การส่งออก การลงทุน และการบริโภคในประเทศเติบโต จึงส่งผลให้การใช้พลังงานทุกประเภทเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งปริมาณการใช้พลังงานในปี 2553 มีมูลค่าสูงถึง 1,801,743 ล้านบาท เพิ่มขึ้นจากปีก่อน 224,058 ล้านบาท หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 14.2 โดยมูลค่าการใช้พลังงานทุกชนิดเพิ่มขึ้น [2] ด้วยศักยภาพด้านพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทยที่มีค่ารังสีแสงอาทิตย์รวมเฉลี่ยทั้งปีของประเทศประมาณ $18 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ ซึ่งสามารถนำมาใช้ได้ในการทำความร้อนและผลิตกระแสไฟฟ้าได้ อีกทั้งพลังงานแสงอาทิตย์มีโอกาสดึงพาตัวเองได้ในระยะยาว เป็นแหล่งผลิตพลังงานที่กระจายตัวอยู่ตามภูมิภาคต่างๆ ได้ และเป็นพลังงานที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม จากแผนพัฒนาและส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทน 15 ปี ได้มีการผลักดันให้มีการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้น ซึ่งในปี 2554 พบว่ามีการใช้พลังงานความร้อนที่มาจากแสงอาทิตย์ ชีวมวล ขยะ และก๊าซชีวภาพ ถึงร้อยละ 53.1 ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1. ปริมาณการใช้พลังงานทดแทนในรูปแบบต่างๆ ปี 2554 ของประเทศไทย

ระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat plate collector) เป็นเทคโนโลยีด้านพลังงานทดแทนรูปแบบหนึ่งที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในหลายๆ ประเทศทั่วโลก การผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์คือการผลิตน้ำร้อนจากตัวรับรังสีอาทิตย์ (Solar collector) ที่เป็นแผงให้น้ำไหลผ่านท่อเพื่อรับพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ น้ำร้อนที่ได้จากเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จะมีอุณหภูมิประมาณ 30-80 °C สามารถนำมาใช้โดยตรงในครัวเรือน หรือใช้ร่วมกับระบบทำน้ำร้อนอื่นๆ ในภาคการผลิตหรือภาคอุตสาหกรรมได้

จากสิ่งปลูกสร้างหรือสิ่งก่อสร้างในปัจจุบันล้วนมีคอนกรีตเป็นโครงสร้างและส่วนประกอบ เมื่อพื้นผิวคอนกรีตได้รับพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์จะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากดวงอาทิตย์สู่พื้นผิวคอนกรีต กลายเป็นความร้อนสะสมอยู่ในชั้นความหนาของคอนกรีต ซึ่งคอนกรีตจะสามารถสะสมความร้อนได้ตลอด

ช่วงเวลาที่แสงแดดตกกระทบ และจะสามารถถ่ายเทความร้อนที่สะสมออกมาสู่สิ่งแวดล้อมได้ในช่วงระยะเวลาหนึ่งหลังจากที่ไม่มีแสงตกกระทบแล้ว เนื่องจากอุณหภูมิของพื้นผิวคอนกรีตยังมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อมอยู่ ซึ่งจากกรณีดังกล่าวการนำความร้อนที่สะสมอยู่ในชั้นความหนาของคอนกรีตมาใช้เพื่อผลิตน้ำร้อน โดยพื้นผิวคอนกรีตทำหน้าที่เป็นตัวรับรังสีอาทิตย์จะเป็นการลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล และลดการปลดปล่อยก๊าซพิษสู่สิ่งแวดล้อมอีกด้วย อีกทั้งคอนกรีตมีราคาถูกและ หาซื้อง่าย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการพัฒนาเทคโนโลยีระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยประยุกต์ใช้กับตัวรับรังสีอาทิตย์แบบคอนกรีตเปลือย (Uncovered concrete solar collector)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อออกแบบ สร้าง และทดสอบตัวรับรังสีอาทิตย์แบบคอนกรีตสำหรับประยุกต์ใช้กับระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
- 2) เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำน้ำร้อนโดยใช้ตัวรับรังสีอาทิตย์แบบคอนกรีต โดยใช้โปรแกรม TRNSYS
- 3) เพื่อวิเคราะห์และ เปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบที่ได้จากการทดลองจริงและ ทฤษฎี

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

การศึกษาสมรรถนะของตัวรับรังสีอาทิตย์แบบคอนกรีตเปลือยสำหรับประยุกต์ใช้กับระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ จะแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วน คือ 1.) การออกแบบ สร้างและ ทดสอบตัวรับรังสีอาทิตย์แบบคอนกรีตเปลือยที่เหมาะสมสำหรับนำมาประยุกต์ใช้กับระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ดังกล่าวจะสามารถทำอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 40-60 °C 2.) การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การทำงานของระบบผลิตน้ำร้อนที่ใช้ตัวรับรังสีอาทิตย์แบบคอนกรีตเปลือย

1.4 ประโยชน์ของโครงการวิจัย

- 1) ได้ต้นแบบตัวรับรังสีอาทิตย์คอนกรีตเปลือยที่สามารถใช้งานกับระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่สามารถผลิตน้ำร้อนได้ที่ช่วงอุณหภูมิ 40-60 °C และสามารถนำไปศึกษาเพื่อขยายผลสำหรับอุตสาหกรรมที่ต้องการผลิตน้ำร้อนในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว
- 2) เมื่อดำเนินงานวิจัยแล้วเสร็จพร้อมปิดโครงการ จากนั้นจะนำพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับชาติ
- 3) สามารถนำไปประยุกต์เป็นหลังคา หรือผนังอาคารคอนกรีตเพื่อลดความร้อนที่เข้าสู่อาคาร หรือลดภาระการทำงานของเครื่องปรับอากาศ และสามารถผลิตน้ำร้อนได้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุคอนกรีต (Concrete)

คอนกรีตคือ วัสดุก่อสร้างชนิดหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย มีส่วนผสมหลักคือ ซีเมนต์ น้ำ และ วัสดุผสม ได้แก่ หิน ทราย นำมาผสมกันและ ขึ้นรูปตามต้องการ ซีเมนต์ มีหน้าที่เสริมช่องว่างระหว่างวัสดุผสม ช่วยหล่อลื่นคอนกรีตขณะเทหล่อ และให้ความแข็งแรงกับคอนกรีตรวมถึง การป้องกันการซึมของน้ำ คุณสมบัติของซีเมนต์ขึ้นอยู่กับคุณภาพของปูนซีเมนต์ที่ใช้ อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ และคุณสมบัติของปฏิกิริยาน้ำกับปูน วัสดุผสม มีหน้าที่เป็นตัวแทรกประสานในซีเมนต์ ที่ช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน แข็งแรง การเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่ำ ความต้านทานต่อแรงกระแทกและเสียดสี น้ำ มีหน้าที่หลักในการก่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันกับปูนซีเมนต์

อัตราส่วนในการผสมคอนกรีต (ปูน : ทราย : หิน) ที่ใช้ ขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่ต้องการนำคอนกรีตไปใช้หรือ อาจเลือกได้จากข้อมูลต่อไปนี้ (โดยปริมาตร)

อัตราส่วนผสมคอนกรีต (ปูน : ทราย : หิน)	การประยุกต์ใช้งาน
1 : 1.5 : 3	ทำเสาและ โครงสร้างที่ต้องการความตึงน้ำ
1 : 2 : 0	ทำงานฉาบและ ก่ออิฐ
1 : 2 : 4	ทำงานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป ได้แก่ พื้นและ คาน
1 : 2 : 5	ทำงานที่ต้องรับน้ำหนักมากเป็นพิเศษ เช่น เสา งานฐานราก

วัสดุคอนกรีต ยังได้นำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวกลางเก็บสะสมความร้อนสัมผัส (Sensible heat storage media) ที่อุณหภูมิสูง สำหรับโรงไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์ เนื่องจาก ง่าย มีราคาถูก ค่าความจุความร้อนสูง คุณสมบัติเชิงกลที่ดี (เช่น ความต้านแรงกด) ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนใกล้เคียงกับเหล็กที่ใช้ทำท่อและ แรงต้านเชิงกลต่อภาระความร้อนแบบวัฏจักร (Cyclic thermal loading) ที่สูง [3] ตารางด้านล่าง แสดงคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ของคอนกรีต [4]

วัสดุ	คอนกรีต
ความหนาแน่น ที่ อุณหภูมิ 200 °C [kg/m^3]	2700
ค่าความร้อนจำเพาะ ที่ อุณหภูมิ 200 °C [J/kg K]	910
ค่าการนำความร้อน ที่ อุณหภูมิ 200 °C [W/m K]	1.0
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ที่ อุณหภูมิ 200 °C [$10^{-6}/\text{K}$]	9.3
ค่าความจุ [$\text{kWh/m}^3 \text{ K}$]	0.68

2.2 ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ (Solar collectors)

พลังงานแสงอาทิตย์สามารถผลิตน้ำร้อนได้โดยใช้ ตัวรับรังสีอาทิตย์ (Solar collector) ซึ่งตัวรับรังสีอาทิตย์ที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบันมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนอยู่ระหว่าง 40 – 60 เปอร์เซ็นต์ โดยทั่วตัวรับรังสีแสงอาทิตย์มีอยู่ 3 ชนิด ด้วยกัน ดังนี้

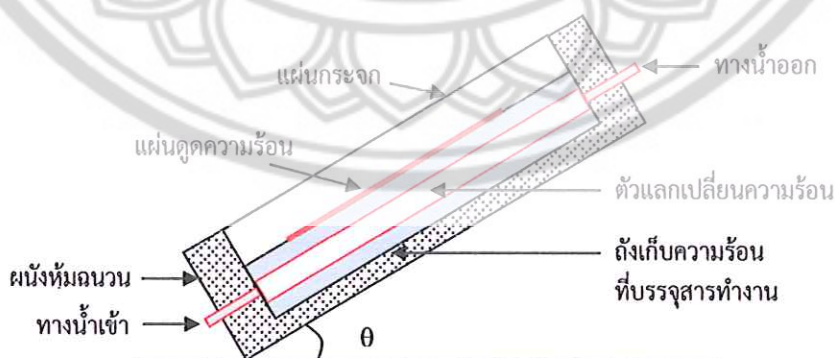
1) ตัวรับรังสีแบบรวมแสง (Focusing solar collector) เป็นตัวรับรังสีที่สามารถผลิตน้ำร้อนได้ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 300 °C – 1000 °C และต้องทำงานร่วมกับอุปกรณ์ให้เคลื่อนตามดวงอาทิตย์เพื่อให้ได้รับแสงอาทิตย์ได้เต็มที่ตลอดช่วงกลางวัน

2) ตัวรับแสงแบบสุญญากาศ (Evacuated tube solar collector) เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นความร้อนอีกรูปแบบหนึ่ง โดยมีหลอดแก้วสองชั้นเป็นส่วนประกอบและ ระหว่างชั้นเป็นสุญญากาศ ภายในเคลือบด้วยสารดูดกลืนรังสี ตัวรับแสงชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูง และสามารถผลิตน้ำร้อนได้ในช่วงอุณหภูมิ 100 °C – 200 °C

3) ตัวรับแสงแบบแผ่นเรียบ (Flat plate collector) เป็นตัวรับแสงที่ผลิตน้ำร้อนอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 40 °C – 90 °C และไม่ต้องใช้อุปกรณ์ตามดวงอาทิตย์ ตัวรับแสงนี้มีหลายชนิด เช่น แผ่นเรียบชนิดมีแผ่นปิดใส (Single glazed) แผ่นเรียบชนิดไม่มีแผ่นปิด (Unglazed) แผ่นเรียบชนิดท่อวน/ท่อขนาน/ท่อคดโค้ง/ท่อในแนวนอน/ท่อในแนวตั้ง และ แผ่นเรียบที่รวมถังเก็บ (Integral collector storage)

การเลือกชนิดของตัวรับแสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับความร้อนที่ต้องการใช้และ สภาพแวดล้อมที่จะนำไปใช้ โดยทั่วไปแล้วตัวรับรังสีแบบรวมแสงส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้ในการประยุกต์แสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิสูงและเหมาะสมกับภูมิอากาศที่ท้องฟ้าโปร่ง ตัวรับรังสีชนิดนี้ไม่ค่อยเหมาะสมกับสภาพอากาศของประเทศไทย สำหรับตัวรับรังสีแบบสุญญากาศโดยปกติใช้ผลิตน้ำร้อนภายในอาคารบ้านเรือน มีราคาค่อนข้างแพง เนื่องจากราคาของท่อสุญญากาศ และตัวสะท้อนแสงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อน ตัวรับแสงแบบแผ่นเรียบถึงแม้ว่ามีประสิทธิภาพต่ำกว่าแบบสุญญากาศ แต่มีราคาถูก และก่อสร้างง่าย

ตัวรับแสงแบบเรียบร่วมกับถังเก็บ (Integral collector storage) ดังแสดงในรูปที่ 2 เป็นหนึ่งในรูปแบบที่ง่ายที่สุดของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่อยู่ในท้องตลาดและ เป็นตัวเลือกหนึ่งของระบบผลิตน้ำร้อนที่นิยมใช้กัน ด้วยข้อได้เปรียบหลายประการ คือ ระบบมีการรวมกันของตัวรับแสงกับถังเก็บความร้อนเข้าด้วยกันทำให้สารทำงานสัมผัสกับแผ่นดูดความร้อนได้โดยตรงซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบ ในกรณีที่ระบบไม่มีการติดตั้งท่อน้ำและ ข้อต่อกับถังเก็บความร้อนจะช่วยลดการสูญเสียความร้อนออกจากระบบลงได้ ตัวรับแสงชนิดนี้สามารถรับรังสีได้ทั้งรังสีตรงและ รังสีสะท้อนทำให้มีประสิทธิภาพโดยรวมดีในสภาพท้องฟ้าปิด



รูปที่ 2. ตัวรับรังสีร่วมกับถังเก็บความร้อน

2.3 โปรแกรม TRNSYS

โปรแกรม TRNSYS (Transient system simulation) เป็นโปรแกรมถูกนำมาใช้สำหรับการจำลองสถานะไม่คงที่ของระบบ (Transient simulation of systems) รวมไปถึงการจำลองอาคารแบบหลายส่วน (Multi-zone buildings) เพื่อพิสูจน์แนวคิดใหม่ทางด้านพลังงาน จากระบบผลิตน้ำร้อนภายในครัวเรือนแบบง่ายไปจนถึงการออกแบบและจำลองอาคาร รวมถึงอุปกรณ์ต่างๆ ภายในอาคาร อาทิเช่น วิธีการควบคุมพฤติกรรมของผู้อยู่อาศัย ระบบพลังงานทางเลือก เช่นระบบพลังงานลม แสงอาทิตย์ โซลาร์เซลล์ ไฮโดรเจนและอื่นๆ โปรแกรมนี้สามารถทำงานร่วมกับโปรแกรมอื่นๆ ได้ เช่น โปรแกรม Microsoft Excel, Matlab เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้ ได้นำโปรแกรม TRNSYS เวอร์ชัน 16 [5] มาใช้ในการจำลองการทำงานของระบบผลิตน้ำร้อนแบบตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบร่วมกับถังเก็บ (Integral flat plate collector storage (ICS) domestic hot water system) โดยโปรแกรมดังกล่าว มี 4 โปรแกรมย่อย ดังนี้ 1) TRNSYS simulation studio, 2) simulation engine (TRNDLL.dll และ TRNExe.exe), 3) Building input data visual interface (TRNBuild.exe) และ 4) TRNEdit และ TRNSED

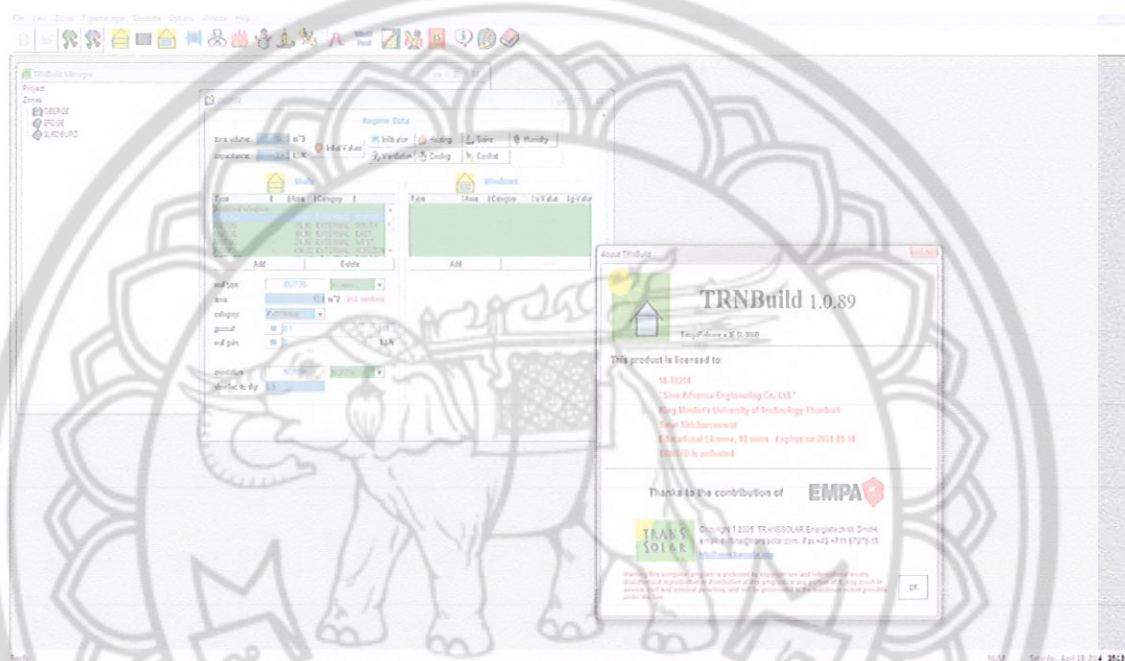
1) TRNSYS simulation studio เป็นโปรแกรมกราฟิกหลักที่ใช้ดำเนินการ (Main visual interface) ดังแสดงในรูปที่ 3 เพื่อจำลองระบบต่างๆ โดยการลากและปล่อย (Drag and drop) ส่วนประกอบต่างๆ ของระบบที่จำลองลงบนพื้นที่ทำงาน (Workspace) จากนั้นทำการเชื่อมโยงเส้นระหว่างส่วนประกอบต่างๆ พร้อมกำหนดตัวแปรของแบบจำลองส่วนกลาง (Global simulation parameters)



รูปที่ 3. โปรแกรม TRNSYS simulation studio

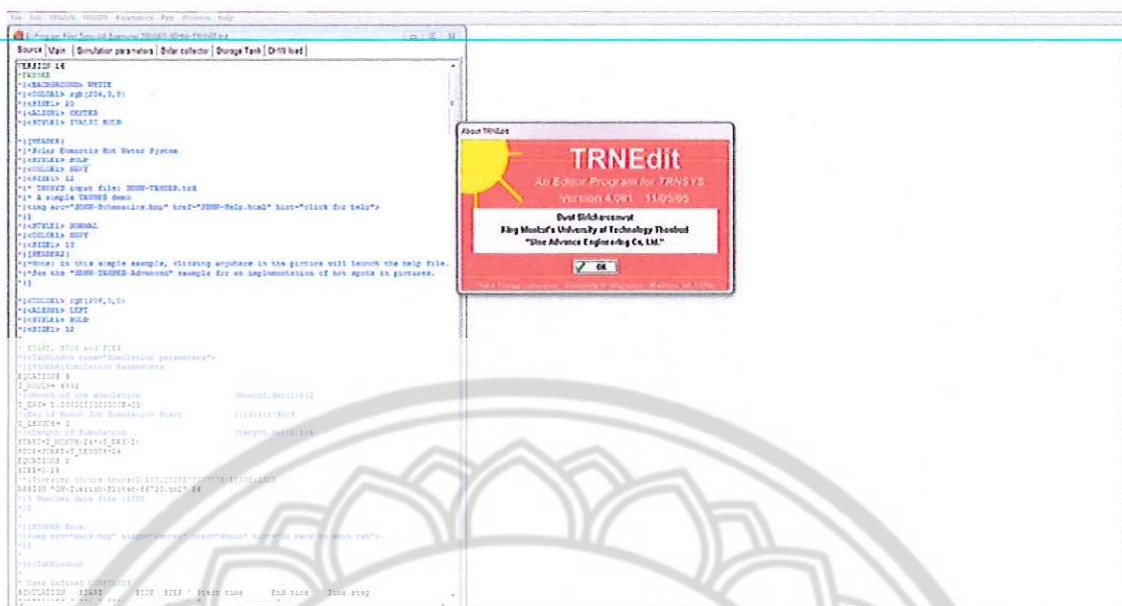
2) TRNSYS simulation engine เป็นโปรแกรมย่อยหนึ่งของโปรแกรม TRNSYS ถูกเขียนด้วยภาษาฟอร์แทรน (Fortran language) โปรแกรมนี้เป็นโปรแกรมปฏิบัติการสำหรับใช้ในการแสดงผลของตัวแปรต่างๆ

3) Building visual interface เป็นโปรแกรมอีกโปรแกรมของ TRNSYS ดังแสดงในรูปที่ 4 ถูกใช้ป้อนข้อมูลของงานอาคารแบบหลายส่วน เช่น รายละเอียดโครงสร้างของอาคารและ ข้อมูลต่างๆ ที่จำเป็นสำหรับการจำลองพฤติกรรมทางความร้อนของอาคาร เช่น คุณสมบัติทางด้านแสงของกระจกหน้าต่าง และ ตารางการทำความเย็นและ ร้อน



รูปที่ 4. โปรแกรม Building visual interface

4) TRNEdit and TRNSED เป็นโปรแกรมเฉพาะที่ใช้ในการสร้างหรือ แก้ไขไฟล์อินพุต ดังแสดงในรูปที่ 5 เครื่องมือชนิดนี้ไม่แนะนำให้ใช้ แต่เหมาะกับผู้ใช้งานสูงที่ต้องการเปลี่ยนซอร์สโค้ดภายในไฟล์



รูปที่ 5. โปรแกรม TRNEdit และ TRNSED

ในส่วนต่อไปนี้จะอธิบายขั้นตอนการจำลองระบบใดๆ โดยใช้โปรแกรม TRNSYS simulation studio พร้อมตัวอย่างการจำลองระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์อย่างง่าย

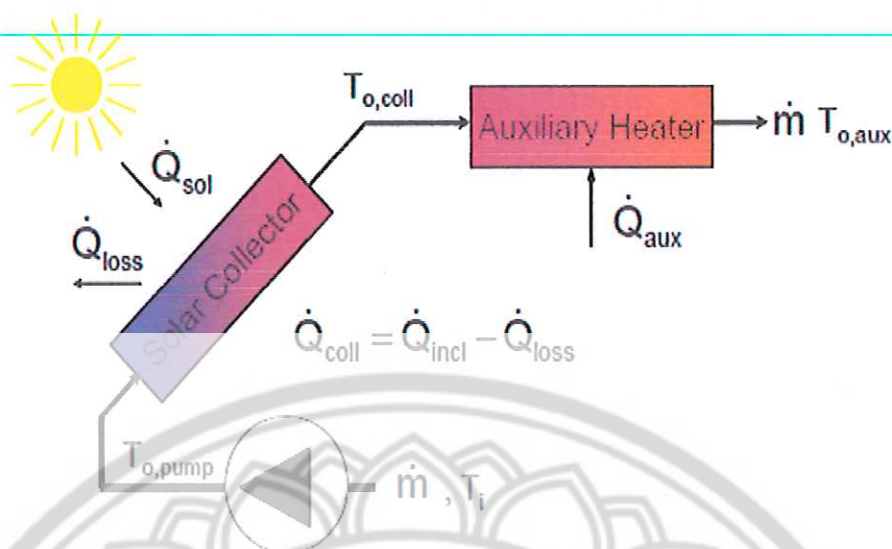
1. ขั้นตอนการจำลองระบบ โดยใช้โปรแกรม TRNSYS simulation studio

ก่อนเริ่มการจำลองระบบ ในโปรแกรม TRNSYS simulation studio ต้องทำการศึกษาระบบที่ต้องการจำลองอย่างละเอียด เช่น หลักการทำงาน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ รวมถึงตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง จากนั้นให้ดำเนินการจำลองระบบบนโปรแกรม ตามขั้นตอนดังนี้

- 1.1 จำแนกส่วนประกอบ (Components) หรืออุปกรณ์ ต่างๆ ที่ต้องใช้ในการจำลองระบบ
- 1.2 สร้างแบบจำลองใหม่ โดยการเลือกเมนูบนโปรแกรมดังนี้ File>New>Empty Project
- 1.3 ลากและปล่อยส่วนประกอบต่างๆ พร้อมตั้งค่า
- 1.4 ลากเส้นเชื่อมต่อส่วนประกอบต่างๆ
- 1.5 ประมวลผลและ วิเคราะห์ระบบ

2. ตัวอย่างการจำลองระบบความร้อน โดยใช้โปรแกรม TRNSYS simulation studio

จากรูปที่ 6 แสดงระบบทำความร้อนอย่างง่ายด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ได้นำมาเป็นตัวอย่างในการจำลองพฤติกรรมทางความร้อน โดยใช้โปรแกรม TRNSYS



รูปที่ 6. ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์อย่างง่าย [5]

รายละเอียดของระบบ

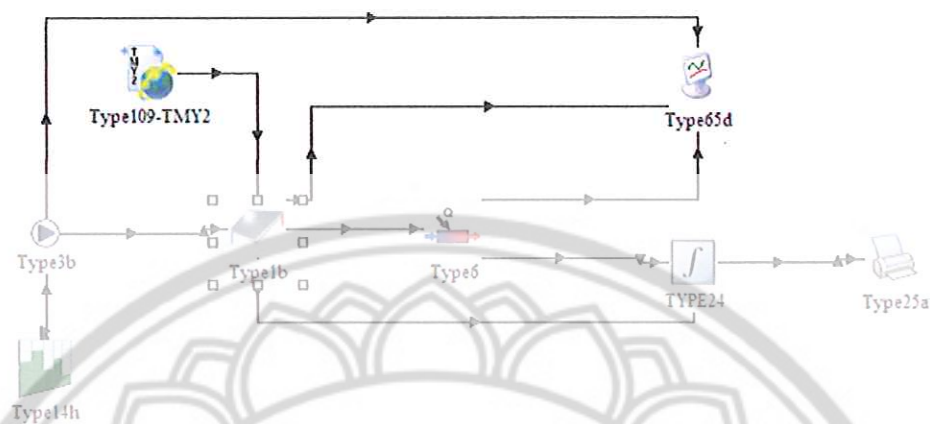
ระบบตัวอย่างที่นำมาจำลองการทำงาน เป็นระบบผลิตน้ำร้อนโดยใช้ตัวรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ ในการอุ่นน้ำและ นำน้ำอุ่นไปใช้ในกระบวนการผลิตหนึ่ง โดยระบบจะปั้มน้ำตั้งแต่ 6 โมงเช้า จนถึง 6 โมงเย็น ทุกวัน ด้วยอัตราการไหลสูงสุดที่ 50 ลิตรต่อชั่วโมง น้ำที่ป้อนเข้าปั้มน้ำมีอุณหภูมิคงที่ 20 องศาเซลเซียส และใช้ กำลังไฟฟ้า 16.7 วัตต์ โดยสมมุติให้ ร้อยละ 5 ของกำลังไฟฟ้าถูกเปลี่ยนเป็นความร้อนและ ถ่ายเทให้กับของไหล

สำหรับตัวรังสีที่ใช้ ประกอบด้วยแผงรับรังสีแผ่นเรียบ ขนาด 1 ตารางเมตร จำนวน 2 ชุด ต่อขนานกัน มีพื้นที่รับแสงขนาด 1 ตารางเมตร (เป็นพื้นที่ของกระจกสำหรับตัวรับแสงอาทิตย์แบบเรียบ) ซึ่งสอดคล้องกับตัวแปรประสิทธิภาพที่ให้ด้านล่าง ตัวรังสีทั้งสองเหมือนกันและ ถูกทดสอบด้วยอัตราการไหล 40 l/h-m^2 และ ตัวแปรประสิทธิภาพที่ได้จากการทดสอบ คือ $\eta_o = 0.8$, $a_1 = 3.61 \text{ W/m}^2\text{K}$, $a_2 = 0.014 \text{ W/m}^2\text{K}^2$ โดยที่ค่าประสิทธิภาพของตัวรังสีสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\eta = \eta_o - a_1 \frac{T_i - T_a}{G} - a_2 \frac{(T_i - T_a)^2}{G}; \quad \eta = \frac{\dot{Q}}{A_a G}$$

โดยที่ η คือ ประสิทธิภาพของตัวรังสี; η_o คือ ประสิทธิภาพสูงสุด (จุดตัด); a_1 และ a_2 คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนอันดับที่ 1 และ 2 ตามลำดับ; G คือ รังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนตัวรังสี; T_i และ T_a คือ อุณหภูมิของของเหลวที่ทางเข้าและ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ตามลำดับ; $\dot{Q}$ คือ อัตราความถ่ายความร้อนที่นำไปใช้; A_a คือ พื้นที่รับแสงของตัวรังสี

ขั้นตอนการจำลองระบบ



รูปที่ 7. แผนภาพการจำลองระบบทำน้ำร้อน โดย TRNSYS

1.1 จำแนกส่วนประกอบ (Components) หรืออุปกรณ์ ต่างๆ จากรูปที่ 7 ระบบที่จำลองมีอุปกรณ์ทั้งหมด 8 อุปกรณ์ ดังนี้

- 1) Type109-TMY2 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้อ่านและ ประมวลผลข้อมูลรังสีแสงอาทิตย์ อุปกรณ์นี้อยู่ใน “Weather data reading and processing”
- 2) Type3b เป็นอุปกรณ์ปั๊มชนิดหนึ่ง อุปกรณ์นี้อยู่ใน “Hydronics\Pump\Single speed\Type3b
- 3) Type6 เป็นตัวทำความร้อนเสริม อุปกรณ์นี้อยู่ใน “HVAC\Auxiliary Heater\Type6”
- 4) Type1b เป็นตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบชนิดหนึ่ง อุปกรณ์นี้อยู่ใน “Solar Thermal Collectors\Quadratic Efficiency Collector\2nd-Order Incidence Angle Modifiers\Type1b”
- 5) Type14h เป็นอุปกรณ์การเปิด-ปิดปั๊มน้ำ อุปกรณ์นี้อยู่ใน “Utility\Forcing-Functions\General\Type14h”
- 6) Type24 เป็นอุปกรณ์ใช้ในการอินทิเกรตค่าที่ป้อนเข้า อุปกรณ์นี้อยู่ใน “Utility\Integrators\Quantity Integrator\Type24”
- 7) Type65d เป็นอุปกรณ์วาดกราฟชนิดหนึ่ง อุปกรณ์นี้อยู่ใน “Output\Online Plotter\Online Plotter Without File\Type65d”
- 8) Type25a เป็นอุปกรณ์บันทึกข้อมูลลงไฟล์ อุปกรณ์นี้อยู่ใน “Output\Printer\Units\Type25a

1.2 สร้างแบบจำลองใหม่ โดยการเลือกเมนูบนโปรแกรม TRNSYS simulation studio ดังนี้
File>New>Empty Project

1.3 ลากและปล่อยส่วนประกอบต่างๆ ดังรูปที่ 7

1.4 ลากเส้นเชื่อมต่อส่วนประกอบต่างๆ พร้อมตั้งค่าตัวแปร ดังรูปที่ 7

1) Type109-TMY2

รายละเอียดของ Parameters

Number	Parameter Name	Value Used	Units	Info
1	Data Reader Mode	2	-	Type 109 will read a Standard weather file in the TMY2 format.
2	Logical Unit	35	-	This parameter sets the Fortran Logical Unit (File reference number) of the output file.
3	Sky Model for Diffuse Radiation	4	-	This parameter selects the sky model used to calculate diffuse radiation on tilted surfaces. 1: Isotropic sky model 2: Hay and Davies model 3: Reindl model 4: Perez model Note: The Perez model is usually considered to be the best available model
4	Tracking Mode	1	-	This parameter is used to indicate that the surfaces on which the tilted surface radiation is calculated are tracking the sun. 1: Fixed surface 2: Single axis tracking, vertical axis (fixed slope, variable azimuth) 3: Single-axis tracking, axis is in the plane of the surface 4: Two-axis tracking

รายละเอียดของ Inputs

Number	Parameter Name	Value Used	Units	Info
1	Ground Reflectance	0.2	-	The reflectance of the ground above which the surface is located. Typical values are 0.2 for ground not covered by snow and 0.7 for ground covered by snow.
2	Slope of Surface	13.75	degrees	The slope of the surface or tracking axis. The slope is positive when tilted in the direction of the azimuth. 0 = Horizontal 90 = Vertical facing toward azimuth Refer to the abstract for details on slope specification for tracking surfaces.
3	Azimuth of Surface	0	degrees	The solar azimuth angle is the angle between the local meridian and the projection of the line of sight of the sun onto the horizontal plane 0 = Facing equator 90 = Facing west 180 = Facing north 270 = Facing east Refer to the abstract for details on the azimuth parameter for tracking surfaces.

2) Type3b

รายละเอียดของ Parameters

Number	Parameter Name	Value Used	Units	Info
1	Maximum Flow Rate	50	kg/hr	The maximum flow rate through the pump. The outlet flow rate is simply the maximum flow rate (this parameter) multiplied by the inlet control signal (Input 3).
2	Fluid Specific Heat	4.19	kJ/kg K	The specific heat of the fluid flowing through the pump. The specific heat is used to determine the temperature rise of the fluid through the pump using the following relation: $T_{out} = T_{in} + (f \cdot \text{Power}) / (\dot{m} \cdot C_p)$ Where: T_{in} = inlet fluid temperature (Input 1) f = fraction of pump power converted to fluid thermal energy (Parameter 4) Power = calculated power of the pump (Output 3) $\dot{m}$ = flow rate of fluid leaving pump (Output 2) C_p = fluid specific heat (Parameter 2)
3	Maximum Power	60	kJ/hr	The maximum pump power consumption. The actual pump power will be the maximum pump power multiplied by a function of the input control signal. See the abstract for more details on calculated pump power.
4	Conversion Coefficient	0.05		The fraction of pump power that is converted to fluid thermal energy. $T_{out} = T_{in} + (f \cdot \text{Power}) / (\dot{m} \cdot C_p)$ where: T_{out} = outlet fluid temperature (Output 1) f = conversion coefficient (this Parameter) Power = power consumed by the pump (Output 3) $\dot{m}$ = outlet flow rate of the pump (Output 2) C_p = fluid specific heat (Parameter 2)
5	Power Coefficient	0.5		Power coefficient: To specify a non-linear relationship between pump power and fluid flow rate, the user must enter the coefficients of the polynomial: $\text{Power} = P_{max} \cdot (c_0 + c_1 \cdot \gamma + c_2 \cdot \gamma^2 + c_3 \cdot \gamma^3 + c_i \cdot \gamma^i)$ where: P_{max} = maximum pump power (Parameter 3) γ = input control signal between 0 and 1 (Input 3) c_0, c_i = coefficients relating power to flow rate (Parameters 5 through 5+(i+1)) Power = calculated pump power consumption (Output 3) If the calculated value of pump power is greater than the maximum pump power, the pump power will be set to the maximum power and a warning issued.

รายละเอียดของ Inputs

Number	Parameter Name	Value Used	Units	Info
1	Inlet Fluid Temperature	29	C	The temperature of the fluid entering the pump.
2	Inlet Mass Flow Rate	40	Kg/hr	The flow rate of the fluid entering the pump. This input is not used by this component except for convergence checking. The outlet flow rate depends on the maximum flow rate and the input control signal. This input is just for visualization purposes.
3	1	0	-	The input control signal to the pump. The flow rate and power are calculated from knowledge of this input: $m_{out} = m_{max} * \gamma$ $Power = f(P_{max}, \gamma)$ where: m_{out} = outlet pump flow rate (Output 2) m_{max} = maximum pump flow rate (Parameter 1) γ = input control signal between 0 and 1 (this Input) Power = calculated pump power from linear relationship or polynomial expression (Output 3) P_{max} = maximum pump power (Parameter 3)

3) Type6

รายละเอียดของ Parameters

Number	Parameter Name	Value Used	Units	Info
1	Maximum Heating Rate	5000	kJ/hr	Maximum heating rate: The maximum possible energy transfer to the fluid stream. The maximum available energy transfer to the fluid stream will be the product of the maximum possible energy transfer and the conversion efficiency.
2	Specific Heat of Fluid	4.19	kJ/kg K	Specific heat of fluid:
3	Overall Loss Coefficient for Heater During Operation	0	kJ/hr K	The loss coefficient (UA) from the heater during operation: During operation: $Q_{loss} = UA * (T - T_{env}) + (1 - \text{efficiency}) * Q_{max}$ During non-operation: $Q_{loss} = 0$
4	Efficiency of Auxiliary Heater	1	-	The thermal conversion efficiency of the auxiliary heater. Typical values: Electric Heater = 1.0 Natural Gas = 0.79

รายละเอียดของ Inputs

Number	Parameter Name	Value Used	Units	Info
1	Inlet Fluid Temperature	20	C	Inlet fluid temperature:
2	Fluid Mass Flow Rate	100	kg/hr	Inlet flow rate:
3	Control Function	1	-	Control function: Control function = 1 ----> Heater is on and providing energy to stream Control function = 0 ----> Heater is off The heater control function input requires either 1 or 0; proportional control signals (e.g. CF=0.53) will be interpreted as heater=off
4	Set Point Temperature	60	C	Temperature of surroundings (T_{env}): $Q_{loss} = UA * (T - T_{env}) + (1 - \text{efficiency}) * Q_{max}$
5	Temperature of Surrounding	20	C	

4) Type1b

รายละเอียดของ Parameters

Number	Parameter Name	Value Used	Units	Info
1	Number in Series	1	-	The solar collector model can simulate an array of identical solar collectors hooked up in series. This parameter is used to specify how many collectors are hooked up in a series arrangement (outlet of first collector = inlet of second collector etc.). To account for a series arrangement, the efficiency parameters are multiplied by a modifying function as described in equation 4.2.1.12 of Volume 1 of the TRNSYS documentation set.
2	Collector Area	2	m ²	The total area of the solar collector array consistent with the supplied efficiency parameters (typically gross area and not net area).
3	Fluid Specific Heat	4.190	kJ/kg K	The specific heat of the fluid flowing through the solar collector array.
4	Efficiency Mode	1	-	The solar collector efficiency equation can be written as either a function of the collector inlet temperature, the collector outlet temperature, or the collector average temperature. If the efficiency parameters are given as a function of the inlet temperature; specify 1. If the efficiency parameters are given as a function of the average temperature; specify 2. If the efficiency parameters are given as a function of the outlet temperature; specify 3. Refer to pages 4.2.1-4 through 4.2.1-8 of Volume 1 of the TRNSYS documentation set.
5	Tested Flow Rate	40.0	Kg/hr m ²	The flow rate per unit area at which the collector was tested in order to determine the collector efficiency parameters. If no test was performed to get the efficiency parameters, set the tested flow rate equal to the flow rate under current operating conditions.
6	Intercept Efficiency	0.80	-	ASHRAE collector tests are often presented as curves of efficiency vs. (Tin-Tamb)/It with intercept FrTan, slope FrUL and curvature FrUL/T. This parameter is the y-intercept of the collector efficiency vs. the temperature difference/radiation ratio curve (FrTan). In equation form, this parameter is a0 in the collector efficiency equation: $Eff. = a_0 - a_1 * (Tin-Tamb)/Radiation - a_2 * ((Tin-Tamb)^2)/Radiation$ Refer to page 4.2.1-4 of Volume 1 of the TRNSYS documentation set for more details.
7	Efficiency Slope	13.0	kJ/hr m ² K	ASHRAE collector tests are often presented as plots of efficiency vs. (Tin-Tamb)/It with intercept of FrTan, slope of FrUL and curvature of FrUL/T. This parameter is the slope of the slope of the efficiency vs. (Tin-Tamb)/It curve. In equation form, this parameter is a1 in the equation: $Eff. = a_0 - a_1 * (Tin-Tamb)/It - a_2 * ((Tin-Tamb)^2)/It$ Refer to page 4.2.1-4 of Volume 1 of the TRNSYS documentation set for more details.
8	Efficiency Curvature	0.05	kJ/hr m ² K ²	ASHRAE collector tests are often presented as plots of efficiency vs. (Tin-Tamb)/It with intercept FrTan, slope FrUL, and curvature FrUL/T. This parameter is the curvature of the efficiency curve. In equation form this parameter is a2 of the collector efficiency equation: $Eff. = a_0 - a_1 * (Tin-Tamb)/It - a_2 * ((Tin-Tamb)^2)/It$

				If the plot of efficiency is a straight line, set this parameter to 0.0. Refer to page 4.2.1-4 of Volume 1 of the TRNSYS documentation set for more details.
9	Optical Mode 2	2	-	The solar collector model can modify the efficiency parameters by 1 of 4 methods. This parameter specifies that the second-order ASHRAE incidence angle modifiers should be used. This parameter should not be changed.
10	1 st -Order IAM	0.2	-	Collector tests are usually performed on clear days at normal incidence so that the transmittance-absorptance product is nearly the normal incidence value for beam radiation. The intercept efficiency is corrected for non-normal solar incidence by the use of a modifying factor of the form: $\text{Modifier} = 1 - b_0 * S - b_1 * S^2$ This parameter is b_0 in the above equation.
11	2 nd -Order IAM	0.0	-	Collector tests are generally performed on clear days at normal incidence so that the transmittance-absorptance product is nearly the normal incidence value for beam radiation. The intercept efficiency is corrected for non-normal solar incidence by a modifying factor of the form: $\text{Modifier} = 1 - b_0 * S - b_1 * S^2$ where $S = 1/\cos(\text{incidence angle}) - 1$ This parameter is b_1 in the above equation.

รายละเอียดของ Inputs

Number	Parameter Name	Value Used	Units	Info
1	Inlet Temperature	20.0	C	The temperature of the fluid entering the solar collector.
2	Inlet Flowrate	100.0	kg/hr	The flow rate of the fluid entering the solar collector.
3	Ambient Temperature	10.0	C	The temperature of the environment in which the solar collector is located. This temperature will be used for loss calculations.
4	Incident Radiation	0	kJ/hr m2	The total (beam + diffuse) radiation incident on the plane of the solar collector per unit area. This input is commonly hooked up to the TYPE 16 'total radiation on surface 1' output.
5	Total Horizontal Radiation	0	kJ/hr m2	The total horizontal radiation (beam + diffuse) per unit area. This input is typically hooked to the fourth output of the TYPE 16 radiation processor.
6	Horizontal Diffuse Radiation	0	kJ/hr m2	The horizontal diffuse radiation. This input is typically hooked up to the fifth output of the TYPE 16 solar radiation processor.
7	Ground Reflectance	0.2	-	
8	Incidence Angle	13.75	degrees	Angle of incidence of beam radiation on surface.
9	Collector Slope	0	degrees	The slope of the collector surface. The slope is defined as the angle between the surface and the horizontal. 0 = Horizontal Slope is positive when surface is tilted in the direction of the surface azimuth. As a general rule, performance is somewhat optimized when the collector slope is set to the latitude.

5) Type14h

รายละเอียดของ Parameters

Number	Parameter Name	Value Used	Units	Info
1	Initial Value of Time	0	hr	The initial value of time for the function. If the cycle is to repeat, this initial value of time must be set to 0.0.
2	Initial Value of Function	0	-	The value of the function at the initial value of time.
3	Time at point-1	8	hr	The value of time at the specified data point.
4	Value at point-1	0	-	The value of the function at the specified data point.
5	Time at point-2	8	hr	The value of time at the specified data point.
6	Value at point-2	1	-	The value of the function at the specified data point.
7	Time at point-3	18	hr	The value of time at the specified data point.
8	Value at point-3	1	-	The value of the function at the specified data point.
9	Time at point-4	18	hr	The value of time at the specified data point.
10	Value at point-4	0	-	The value of the function at the specified data point.
11	Time at point-5	24	hr	The value of time at the specified data point.
12	Value at point-5	0	-	The value of the function at the specified data point.

6) Type24

รายละเอียดของ Parameters

Number	Parameter Name	Value Used	Units	Info
1	Integration Period	STOP	Hr	The time interval over which the inputs are to be investigated. The outputs are reset to zero after each reset time interval. If there set time is set to a negative value, then units of months are assumed (if the reset time is set to -2, then the reset time will be two months...)
2	Relative or Absolute Start Time	0	-	This parameter controls whether the integration intervals are relative or absolute 0: integrate at time intervals relative to the simulation start time 1: integrate at absolute time intervals For example, if the simulation start time is 0.5, the simulation time step is 0.25 and the integration interval (or reset time) is 1: If this parameter is set to 0, reset will occur at 0.5, 1.5, 2.5, etc. If this parameter is set to 1, reset will occur at 1, 2, 3, etc.

รายละเอียดของ Inputs

Number	Parameter Name	Value Used	Units	Info
1	Input to be integrated-1	0.0	-	Leave the initial value at zero unless you wish to add a constant to the integration results. The constant added will be the initial value.
2	Input to be integrated-1	0.0	-	Leave the initial value at zero unless you wish to add a constant to the integration results. The constant added will be the initial value.

7) Type65d

รายละเอียดของ Parameters

Number	Parameter Name	Value Used	Units	Info
1	Nb. Of left-axis variables	3	-	The number of variables that will be plotted using the left Y-axis for scaling purposes.
2	Nb. Of right-axis variables	2	-	The number of variables that will be plotted using the right axis for scaling purposes.
3	Left axis minimum	-100	-	The minimum value for the left Y-axis.
4	Left axis maximum	100	-	The maximum value for the left Y-axis.
5	Right axis minimum	0.0	-	The minimum value for the right Y-axis.
6	Right axis maximum	10000	-	The maximum value for the right Y-axis.
7	Number of plots per simulation	1	-	Number of plots per simulation. Use -1 for monthly plots.

8	X-axis gridpoints	12	-	The number of grid points that the X-axis (time) will be divided into.
9	Shut off Online w/o removing	0	-	This parameter can be used to shut off the ONLINE without removing from the assembly panel / Input file, according to the following rules: -1 : don't display online >=0 : display online
10	Logical unit for output file	-1	-	This parameter is not used in this mode since no output file is created. Please use the "online plotter with file" if you want to simultaneously plot the data and print it to a file.
11	Output file units	0	-	This parameter is not used in this mode since no output file is created
12	Output files delimiter	0	-	This parameter is not used in this mode since no output file is created

รายละเอียดของ Inputs

Number	Parameter Name	Value Used	Units	Info
1	Left axis variable-1	ToPump	-	The specified variable which is to be plotted using the left Y-axis for scaling purposes
2	Left axis variable-2	ToColl	-	The specified variable which is to be plotted using the left Y-axis for scaling purposes
3	Left axis variable-3	ToAux	-	The specified variable which is to be plotted using the left Y-axis for scaling purposes
4	Right axis variable-1	QColl	-	The specified variable which is to be plotted using the right Y-axis for scaling purposes
5	Right axis variable-2	QAux	-	The specified variable which is to be plotted using the right Y-axis for scaling purposes

8) Type25a

รายละเอียดของ Parameters

Number	Parameter Name	Value Used	Units	Info
1	Printing interval	STEP	hr	The time interval at which printing is to occur. If the time interval is less than zero, then the print interval will be measured in the absolute value of this parameter expressed in months. Examples: 1: print every hour -1: print every month The default value (STEP) is a TRNSYS parameter equal to the simulation time step
2	Start time	START	hr	The time of the year in hours at which printing is to start. The default value (START) is a TRNSYS parameter equal to the simulation start time
3	Stop time	STOP	Hr	The time of the year in hours at which printing is to stop. The default value (STOP) is a TRNSYS parameter equal to the simulation stop time
4	Logical unit	32	-	This parameter sets the Fortran Logical Unit (File reference number) of the output file. It is used internally by TRNSYS to refer to the file. This parameter will automatically be assigned to a unique

				value by the TRNSYS Studio
5	Units printing mode	2	-	This parameter is set to 2, so TRNSYS-supplied units are printed to the output file
6	Relative or absolute start time	0	-	This parameter controls whether the print intervals are relative or absolute 0: print at time intervals relative to the simulation start time 1: print at absolute time intervals For example, if the simulation start time is 0.5, the simulation time step is 0.25 and the printing time step is 1: If this parameter is set to 0, printing will occur at 0.5, 1.5, 2.5, etc. If this parameter is set to 1, printing will occur at 1, 2, 3, etc.
7	Overwrite or Append	-1	-	This parameter decides whether the file is appended to or overwritten: -1: Overwrite the output file 1: Append to the output file
8	Print header	-1	-	This parameter decides whether or not a header with input file information will be printed to the output file or not -1: Do not print header 1: Print header
9	Delimiter	0	-	This parameter controls the delimiter used in the output file: 0: use tabs to delimit columns 1: use spaces to delimit columns 2: use commas to delimit columns
10	Print labels	1	-	This parameter decides whether or not labels (variable descriptors) should be printed as column headers: -1: Do not print descriptors 1: Print descriptors

รายละเอียดของ Inputs

Number	Parameter Name	Value Used	Units	Info
1	Input to be printed-1	QColl	-	Input to be printed
2	Input to be printed-2	QAux	-	Input to be printed

1.5 ประมวลผลและ วิเคราะห์ระบบ โดยการเลือกเมนูบนโปรแกรม TRNSYS simulation studio ดังนี้

Calculate>Run Simulation

รายละเอียดโปรแกรมไฟล์อินพุตของตัวอย่างด้านบน สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ที่ภาคผนวก ก-1

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้แผ่นคอนกรีตเป็นแผงรับรังสีอาทิตย์

Rangsit Sarachitti และคณะ [6] ทดสอบสมรรถนะของการนำตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบคอนกรีต (Concrete solar collector) เพื่อการลดความร้อนเข้าสู่อาคารและผลิตน้ำร้อน ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบคอนกรีตผลิตจากท่อพีวีซีและฝังอยู่ในพื้นคอนกรีตที่มีลักษณะเป็นพื้นลาดฟ้าหรือหลังคา ไม่มีการติดกระจกที่ด้านบนแผงเก็บรังสีอาทิตย์แบบคอนกรีต หรือหุ้มฉนวนที่ด้านหลังเหมือนกับเครื่องผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ทั่วไป เพื่อเปรียบเทียบผลของการประหยัดพลังงาน ห้องทดสอบจำนวนสองห้อง ขนาดกว้าง 2.3 เมตร ยาว 2.5 เมตร และสูง 2.5 เมตร ถูกสร้างขึ้น โดยห้องแรกจะเป็นห้องที่มีหลังคาคอนกรีตเสริมแรงแบบทั่วไป และห้องที่สองจะเป็นห้องที่มีหลังคาเป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบคอนกรีต ผลการทดลองพบว่าตัวเก็บรังสีนี้สามารถผลิตน้ำร้อนได้สูงสุด 40 ลิตรต่อวัน โดยมีอุณหภูมิน้ำอยู่ในช่วง 40-50 °C และลดอุณหภูมิห้องห้องได้ต่ำกว่าห้องปกติประมาณ 2 °C จากการศึกษาผลกระทบของฤดูกาลพบว่า ไม่มีผลกระทบจากฤดูกาล (ฤดูร้อนและหนาว) เนื่องจากความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าใกล้เคียงกัน การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการคืนทุนค่อนข้างเร็ว ประหยัดพลังงานได้ประมาณ 191.2-265.7 kWh ต่อปี

อดิศักดิ์ ปัญญาสิม [7] ศึกษาสมรรถนะของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบคอนกรีตเปลือย (Concrete solar collector ; CSC) ที่มีลักษณะเป็นแผ่นคอนกรีตเรียบไม่มีกระจกครอบ โดยได้ทดสอบสมรรถนะของ CSC ตามแนวทางของ ASHRAE Standard 93-86 พบว่าการสร้างระบบทำน้ำอุ่นโดยใช้ CSC ขนาด 0.71 ตารางเมตร จำนวน 4 แผ่น ต่ออนุกรมกันเป็นแผ่นรับรังสี แล้วให้น้ำประปาอุณหภูมิ 26 °C ไหลผ่าน พบว่าระบบสามารถทำได้ให้น้ำอุ่นที่อุณหภูมิ 41 °C จำนวนประมาณ 0.24 ลูกบาศก์เมตร ในเวลา 2.5 ชั่วโมง

P.B.L. Chaurasia [8] งานวิจัยนี้ศึกษาเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ขึ้นอยู่กับตัวเก็บรังสีอาทิตย์คอนกรีตสำหรับผลิตน้ำร้อนภายในบ้าน โดยตัวเก็บรังสีอาทิตย์สร้างจากแผ่นคอนกรีต และฝังท่ออะลูมิเนียมภายในแผ่นคอนกรีตเพื่อเป็นท่อทางเดินน้ำ ไม่มีการติดกระจกที่ด้านบนของแผ่นคอนกรีตและไม่มีการนำฉนวนมาหุ้มที่ด้านหลังของแผ่นคอนกรีตเพราะใช้การพาความร้อนโดยธรรมชาติ ถึงแม้ว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์คอนกรีตจะมีประสิทธิภาพน้อย เนื่องจากไม่มีกระจกปิดที่ด้านบนแต่ระบบยังสามารถเตรียมน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 36-58 °C ในช่วงเวลากลางวันได้ดี

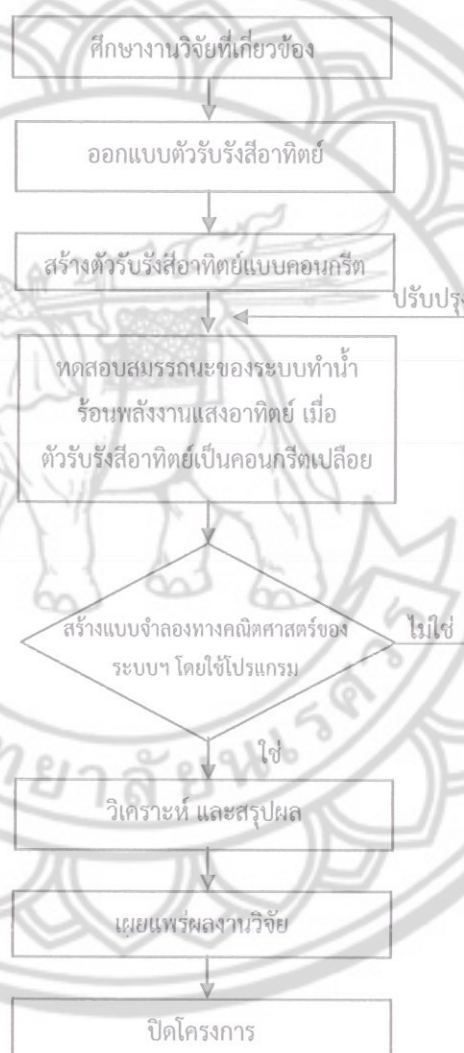
E. BILGEN และ M.A. RICHARD [9] ศึกษาแผ่นคอนกรีตบนพื้นราบสำหรับเป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ Passive โดยได้ทดสอบแผ่นคอนกรีตขนาดกว้าง 0.40 เมตร ยาว 0.78 เมตร และหนา 0.10 เมตร ให้พลังงานความร้อนคงที่ในช่วง 200 ถึง 700 W/m และเก็บค่าอุณหภูมิที่ผิวหน้าของแผ่นคอนกรีตบนพื้นราบที่เกิดการพาความร้อนแบบธรรมชาติ สมมุติฐานที่ใช้ในระบบได้วิเคราะห์จากทฤษฎีเพื่อต้องการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการนำแผ่นคอนกรีตมาเป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และเพื่อทำนายพฤติกรรมในเงื่อนไขต่างๆ ซึ่งผลการศึกษาพบว่าพลังงานที่เกิดขึ้นบนแผ่นคอนกรีตที่ไม่มีผลต่อการดูดซึมความร้อนของแผ่นคอนกรีต โดยที่การสูญเสียความร้อนของรังสีอาทิตย์อยู่ที่ประมาณ 60% ในขณะที่การพาความร้อนตามธรรมชาติอยู่ที่ 40% ซึ่งจะสามารถสะสมพลังงานความร้อนได้ประมาณ 3-4 ชั่วโมง

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

ในส่วนนี้ อธิบายขั้นตอนการดำเนินโครงการ การออกแบบ สร้างและ ทดสอบระบบผลิตน้ำร้อนแบบคอนกรีตเปลือย และการสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม TRNSYS

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยนี้จะทำการทดลอง และเก็บข้อมูลที่ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ จ.พิษณุโลก โดยมีวิธีการดำเนินการวิจัย ลำดับขั้นตอน ดังนี้



รูปที่ 8. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

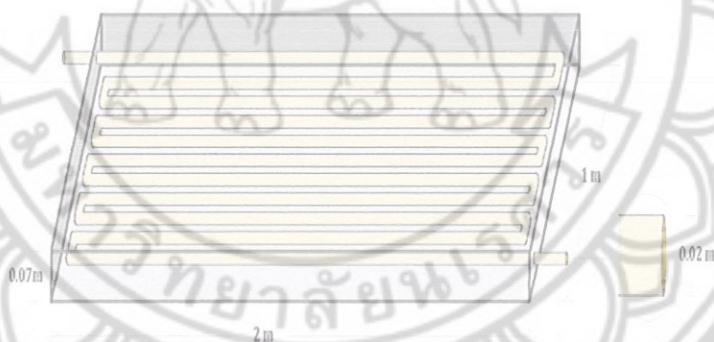
3.2 การออกแบบและ ทดสอบตัวรับรังสีแสงอาทิตย์

การศึกษาสมรรถนะของตัวรับรังสีอาทิตย์แบบคอนกรีตเปลือยสำหรับประยุกต์ใช้กับระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ จะแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วน คือ 1.) การออกแบบและสร้างตัวรับรังสีอาทิตย์แบบคอนกรีตเปลือย และ 2.) การศึกษาหาสภาวะ การทำงานของตัวรับรังสีอาทิตย์แบบคอนกรีตเปลือยที่เหมาะสมสำหรับนำมาประยุกต์ใช้กับระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ดังกล่าวจะสามารถทำอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 65-80 °C

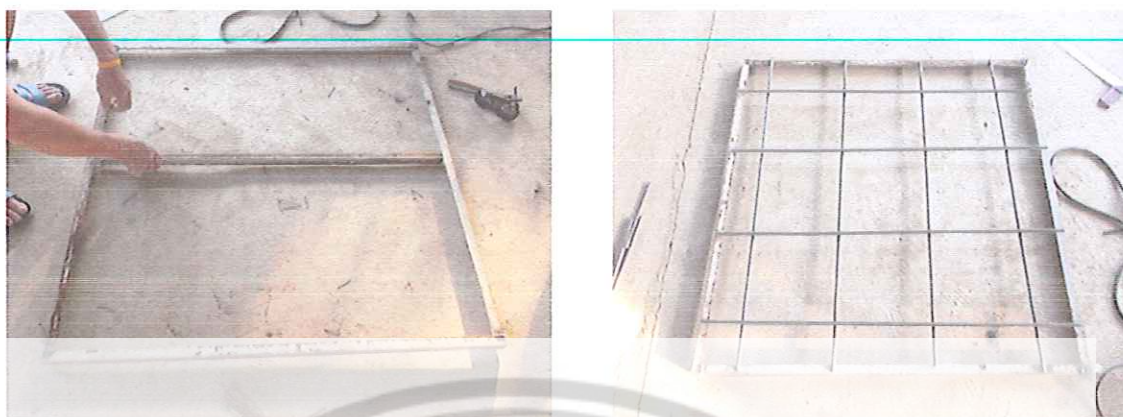
3.2.1 การออกแบบและ ทดสอบตัวรับรังสีแสงอาทิตย์

ในงานวิจัยนี้ ได้ออกตัวรับรังสีคอนกรีตแบบท่อคดเคี้ยว (Serpentine tubes) โดยตัวรับรังสีที่สร้างมีขนาดกว้าง 2 m ยาว 1 m หนา 0.07 m และท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.2 cm. โดยวางระยะห่างระหว่างท่อ 6 cm และส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ตามน้ำหนัก น้ำ: ซีเมนต์: ทราย: หิน (10: 15: 25: 50) ดังแสดงในรูปที่ 9 และ 10

สำหรับการทดสอบ แผ่นคอนกรีตเปลือยที่สร้างแล้ว ได้นำมาติดตั้งบนฐานรองรับที่มีมุมเอียงประมาณ 15 องศา (ตามแนวละติจูดของจังหวัดพิษณุโลก) พร้อมติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าตัวแปรต่างๆ ดังนี้ 1) เทอร์โมคัปเปิลนำมาใช้วัดอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_a) อุณหภูมิน้ำขาเข้าคอนกรีต (T_{in}) อุณหภูมิน้ำขาออก (T_{out}) และอุณหภูมิในถังเก็บน้ำ (T_{tank}) 2) ไพรานอมิเตอร์และ มาตรวัดน้ำถูกใช้สำหรับวัดค่าพลังงานแสงอาทิตย์รวมบนพื้นเอียงและ อัตราการไหลของน้ำขาเข้า ตามลำดับ ตัวแปรที่วัดได้ถูกบันทึกทุก 1 นาทีและ นำมาเฉลี่ยทุก 10 นาที ระบบทดสอบติดตั้งอุปกรณ์วัดต่างๆแล้วเสร็จ ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 9. แบบตัวรับรังสีอาทิตย์คอนกรีตแบบท่อคดเคี้ยว



ทำแบบขึ้นรูปตัวรับรังสีคอนกรีต

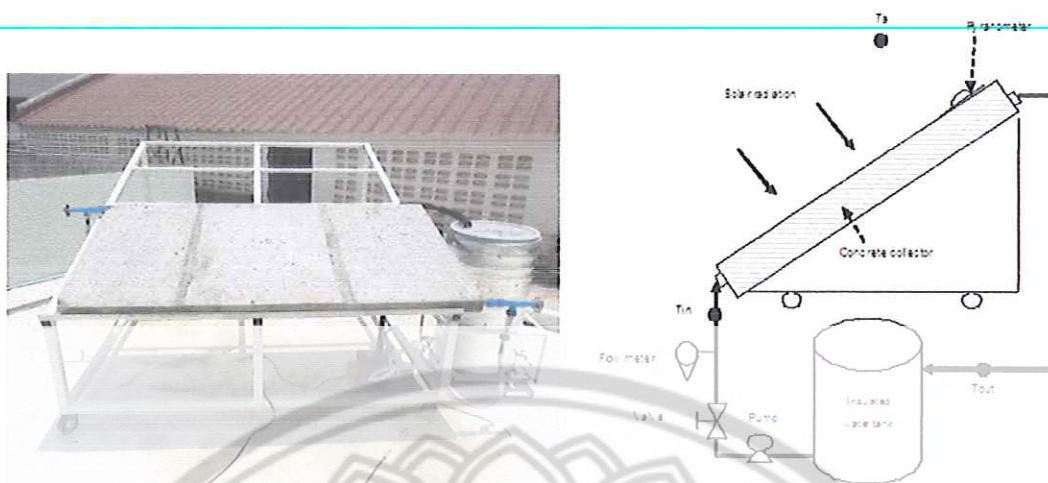


ผสมคอนกรีตตามสัดส่วน



สร้างฐานวางแผ่นคอนกรีต

รูปที่ 10. การสร้างระบบผลิตน้ำร้อนคอนกรีตเปลือย



รูปที่ 11. การติดตั้งแผ่นคอนกรีตและ เครื่องมือวัดต่างๆ เพื่อทดสอบ

3.3 การสร้างแบบจำลอง โดยใช้โปรแกรม TRNSYS

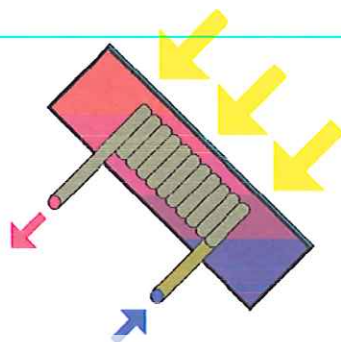
ในหัวข้อนี้กล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์ร่วมกับถังเก็บและ ขั้นตอนการจำลองระบบตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์ชนิดถังเก็บความร้อนแบบคอนกรีตเปลี่ยนด้วยโปรแกรม TRNSYS

3.3.1 รายละเอียดของระบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของส่วนประกอบต่างๆ

1) ระบบผลิตน้ำร้อนภายในบ้านร่วมกับตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์ – อุปกรณ์เลขที่ 541

(Integral collector storage (ICS) domestic hot water system – TYPE 541)

โปรแกรมย่อย หรือ อุปกรณ์เลขที่ 541 ในโปรแกรม TRNSYS ได้จำลองระบบทำน้ำร้อนภายในบ้านร่วมกับตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์ (ICS) ที่มีและ ไม่มีการติดตั้งตัวแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแช่ในภาชนะความร้อนด้านข้าง (Immersed load-side heat exchanger) ในการจำลองนี้ ระบบ ICS ทั่วไปเป็นกล่องรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากที่ถูกบรรจุด้วยของเหลว และมีแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ติดตั้งอยู่เหนือกล่อง โดยของเหลวในกล่องจะสัมผัสกับพื้นผิวดูดซับรังสีของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ ความร้อนที่ได้ถูกถ่ายเทให้กับของเหลวภายในกล่อง จากนั้นถ่ายเทของเหลวในตัวแลกเปลี่ยนความร้อนที่ฝังอยู่ภายใน (ถ้ามี) เมื่อรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบลงบนพื้นที่ผิวรับแสง



รูปที่ 12. แผนภาพระบบผลิตน้ำร้อนภายในบ้านร่วมกับตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์ (ICS) [5]

แบบจำลองระบบ ICS นี้ ของไหลภายในตัวเก็บรังสีไม่ได้ถูกผสมกับของไหลที่กำลังไหลเข้าเพื่อรับความร้อน แต่จะถ่ายเทความร้อนจากของไหลที่เก็บภายในตัวเก็บรังสีสู่ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนที่แช่/ฝังอยู่ภายใน จากนั้นส่งความร้อนเข้าสู่ถังเก็บ การพาความร้อนแบบธรรมชาติจากตัวแลกเปลี่ยนความร้อนสู่ถังเก็บเป็นปัญหาที่ยากต่อการหาคำตอบและ ได้ถูกนำมาพิจารณาในแบบจำลองนี้ด้วย ที่ซึ่งสมการเชิงอนุพันธ์คู่ (Coupled differential equations) สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{dT_{\text{tank}}}{dt} = \frac{(Q_{\text{in,tank}} - Q_{\text{out,tank}})}{C_{\text{tank}}}$$

$$\frac{dT_{\text{HX}}}{dt} = \frac{(Q_{\text{in,HX}} - Q_{\text{out,HX}})}{C_{\text{HX}}}$$

ที่ซึ่ง

$Q_{\text{in,tank}}$ และ $Q_{\text{out,tank}}$ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม รังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบ และ อุณหภูมิของตัวแลกเปลี่ยนความร้อน

$Q_{\text{in,HX}}$ และ $Q_{\text{out,HX}}$ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของของไหลที่ทางเข้าของตัวแลกเปลี่ยนความร้อนและ อุณหภูมิของถังเก็บ

การหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ของสมการเชิงอนุพันธ์คู่ สมการต่าง ๆ นั้น ต้องจัดเรียงอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\frac{dT}{dt} = aT + b$$

ที่ซึ่ง T = ตัวแปรตาม; t = เวลา; a = ค่าคงที่; b = ตัวแปรตาม; ถ้า b เป็นค่าคงที่หนึ่ง ผลเฉลยของสมการอนุพันธ์สามารถหาได้อย่างรวดเร็ว แต่ถ้า b มีค่าไม่คงที่ การประมาณค่าอย่างมีเหตุผลสำหรับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์สามารถทำได้โดยการสมมติ b ให้มีค่าคงที่ตลอดช่วงเวลาและ มีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยตลอดช่วงเวลา

ที่เวลาใดๆ (สำหรับ $a \neq 0$) จะได้

$$T_{final} = (T_{initial} + b_{ave}/a) \times e^{(a\Delta t)} - b_{ave}/a$$

ที่ซึ่ง $b_{ave} = b(T_{ave})$ และ $T_{ave} = 1/a\Delta t \times (T_{initial} + b_{ave}/a) \times (e^{(a\Delta t)} - 1) - b_{ave}/a$

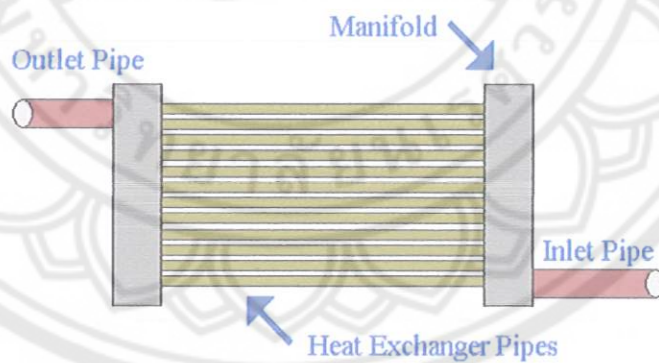
จากการสมมุติข้างต้น สมการเชิงอนุพันธ์กลายเป็นปัญหาตรงไปตรงมาเพื่อหาผลเฉลย โดยการเขียนสมการอนุพันธ์ในรูปแบบที่ถูกต้อง ทำการกำหนดค่า a และ b_{ave} เพื่อแก้สมการหาค่า T_{final} และ T_{ave} จากนั้นคำนวณค่า b_{ave} และทำซ้ำจนกระทั่งอุณหภูมิเบนเข้าหากัน

ในขณะที่สมมุติให้ค่า b คงที่ตลอดช่วงเวลา (และมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ย) ในทางเทคนิคนี้ไม่ถูกต้อง (เพราะตัวอย่างเช่น ค่า b สำหรับถังเก็บ เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิของตัวแลกเปลี่ยนความร้อน) ช่วงเวลาที่ใช้ในการประมาณค่าอย่างมีเหตุผล โดยใช้โปรแกรมจำลอง TRNSYS สูงสุดไม่เกิน 1 ชั่วโมง

โปรแกรมย่อยนี้ให้ผู้ใช้กำหนดระดับการแบ่งชั้น (Stratification) ของถังเก็บ โดยสามารถกำหนดจำนวนจุดของถังเก็บ (N) ได้ ถังเก็บถูกแบ่งเป็น N จุดในแนวนอนที่มีปริมาตรเท่ากัน (ก่อนการติดตั้งตัวแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งทำให้ปริมาตรของถังเก็บลดลง) ในแต่ละจุดของถังเก็บถูกสมมุติให้มีอุณหภูมิคงที่ (Isothermal) โดยจุดที่ 1 สมมุติให้อยู่ด้านบนของถังเก็บ การแบ่งจำนวนจุดให้เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้การแบ่งชั้นของถังเก็บมากขึ้นไปด้วย การเพิ่มจำนวนจุดอย่างไม่มีเหตุผลอาจทำให้ความเร็วในการคำนวณลดน้อยลง

ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนได้ถูกแบ่งตามจำนวนจุดที่อุณหภูมิคงที่โดยผู้ใช้ โดยที่จุดที่แบ่งถูกจัดเรียงตามทิศทางการไหลของตัวแลกเปลี่ยนความร้อน (ตามความยาวท่อ) จุดบนตัวแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใกล้กันแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างจุดเพียงอย่างเดียว

ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกลุ่มท่อในแนวนอน (Horizontal tube bank heat exchangers) ประกอบด้วยกลุ่มท่อที่ถูกแบ่งออกเป็นจำนวน N_{HX} จุด ตามทิศทางในแนวนอน ผู้ใช้ต้องป้อนสัดส่วนของจำนวนท่อแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งหมดที่ถูกเรียงอย่างสมบูรณ์ภายในแต่ละจุดของถังเก็บ

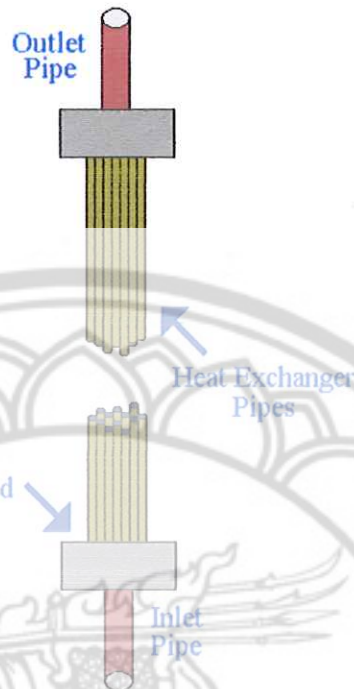


รูปที่ 13. ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกลุ่มท่อในแนวนอน

ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกลุ่มท่อในแนวตั้ง (Vertical tube bank heat exchangers) ประกอบด้วยกลุ่มท่อที่ถูกแบ่งออกเป็นจำนวน N_{HX} จุด ตามทิศทางในแนวตั้ง สำหรับจุดบนตัวแลกเปลี่ยนแต่ละจุด ผู้ใช้ต้องป้อนสัดส่วนระหว่างความยาวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่ถูกกำหนดที่จุดนั้นและจุดของถังเก็บที่

ซึ่งจุดบนตัวแลกเปลี่ยนความร้อนถูกตั้งอยู่อย่างสมบูรณ์ และความเป็นไปได้ที่จะมีจุดบนตัวแลกเปลี่ยนความร้อนมากกว่าหนึ่งจุดอยู่ในจุดของถังเก็บ

๑ ทน
๐๖๑๑๗
๖๔๖๑๕
๒๕๖๖



รูปที่ 14. ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกลุ่มท่อในแนวตั้ง

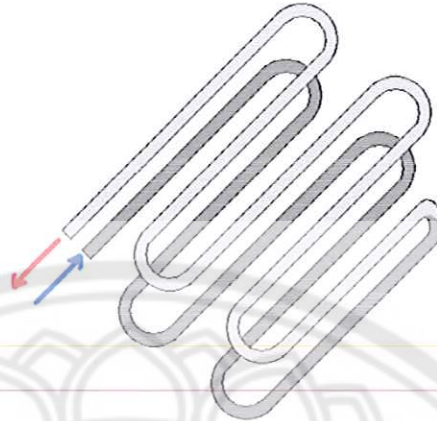
ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อวน (Coiled tube heat exchanger) ประกอบด้วยท่อมากกว่าหนึ่งท่อถูกรวมเป็นกลุ่มและ แบ่งออกเป็นจำนวน N_{HX} จุด ตามทิศทางการไหล สำหรับจุดบนตัวแลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละจุด ผู้ใช้ต้องป้อนสัดส่วนระหว่างความยาวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่ถูกกำหนดให้กับจุดนั้นต่อด้วยจุดของถังเก็บที่ซึ่งจุดบนตัวแลกเปลี่ยนความร้อนอยู่อย่างสมบูรณ์ และมีความเป็นไปได้ที่จะมีจุดบนตัวแลกเปลี่ยนความร้อนมากกว่าหนึ่งจุดอยู่ในจุดของถังเก็บ



รูปที่ 15. ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อวน

ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนแบบคดเคี้ยว (Serpentine tube heat exchanger) ประกอบด้วยกลุ่มท่อที่ถูกแบ่งออกเป็นจำนวน N_{HX} จุด ตามทิศทางการไหล สำหรับจุดบนตัวแลกเปลี่ยน ผู้ใช้ต้องป้อนสัดส่วนระหว่างความยาวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่กำหนดให้กับจุดนั้นและ จุดของถังเก็บที่ซึ่งจุดบนตัวแลกเปลี่ยนความร้อน

ถูกวางอย่างสมบูรณ์ และมีความเป็นไปได้ที่จะมีจุดบนตัวแลกเปลี่ยนความร้อนมากกว่าหนึ่งจุดอยู่ในจุดของถังเก็บ



รูปที่ 16. ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนแบบคดเคี้ยว

2) แบบจำลองตัวแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger model)

แบบจำลองนี้ ให้ผู้ใช้กำหนดหนึ่งใน 4 รูปแบบของตัวแลกเปลี่ยนความร้อนที่แช่/ฝังอยู่ในถังเก็บ ดังนี้ แบบท่อตั้งในแนวตั้ง แนวนอน คดเคี้ยว และแบบท่อวน

อุณหภูมิทางออก ที่เวลาใดๆ ในช่วงการจำลองสำหรับกระแสไหลของตัวแลกเปลี่ยนความร้อน เป็น อุณหภูมิเฉลี่ยของจุดบนตัวแลกเปลี่ยนความร้อนที่บรรจุอุณหภูมิทางออกไว้ (จุดที่กำหนดสุดท้าย) ตลอดช่วงเวลา ปริมาตรสุดท้าย (ตัวแปรกำหนดโดยผู้ใช้) ถูกเพิ่มจุดแรกและสุดท้ายของตัวแลกเปลี่ยนความร้อน ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนและ ถังเก็บมีการแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านการพาความร้อนจากพื้นผิวด้านนอกของตัวแลกเปลี่ยนความร้อนเข้าสู่ของเหลวภายในถังเก็บ (หรือในกรณีนี้ จากพื้นที่ผิวด้านนอกของจุดบนตัวแลกเปลี่ยนความร้อนสู่จุดของของไหลในถังเก็บ) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (The overall heat transfer coefficient - UA) ของตัวแลกเปลี่ยนความร้อนต่อการถ่ายเทความร้อนของถังเก็บ สำหรับจุดบนตัวแลกเปลี่ยนความร้อนใดๆ สามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$\frac{n}{UA} = \frac{1}{h_o A_o} + R_w + \frac{1}{h_i A_i}$$

ที่ซึ่ง n = จำนวนท่อที่ติดตั้งภายในถังเก็บ; A_o = พื้นที่ผิวภายนอกท่อ

h_o = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนพื้นที่ผิวภายนอกท่อ; R_w = ความต้านทานความร้อนของผนังท่อ;

h_i = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนพื้นที่ผิวภายในท่อ; A_i = พื้นที่ผิวภายในท่อ;

และ

$$h_o = Nu_d \times \frac{k}{d_o}$$

ที่ซึ่ง Nu_d = ตัวเลขนัสเซิลพื้นฐานของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ

k = ค่าการนำความร้อนของของไหล

d_o = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อด้านนอก

และ

$$Nu_d = C \times (Ra)^n \times (GF)^m$$

ที่ซึ่ง Ra = ตัวเลข Rayleigh ของของเหลวในถังเก็บ (ที่มีคุณสมบัติของของเหลวที่อุณหภูมิ $(T_{surf} + T_\alpha)/2$)
 T_{surf} = อุณหภูมิของผนังด้านนอกของตัวแลกเปลี่ยนความร้อน
 T_α = อุณหภูมิของจุดบนถังเก็บที่มีจุดบนตัวแลกเปลี่ยนความร้อนด้วย
 C, n, GF , และ m = ตัวแปรที่ถูกรวบรวม

และ

$$R_w = \frac{\ln(r_o / r_i)}{2\pi L_{pipe} k_w}$$

ที่ซึ่ง r_o = รัศมีท่อภายนอก ; r_i = รัศมีท่อภายใน; L_{pipe} = ความยาวท่อ;
 k_w = ค่าการนำความร้อนของผนังท่อ

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของผิวด้านใน (h_i) ขึ้นอยู่กับชนิดตัวแลกเปลี่ยนความร้อนและ คุณสมบัติของของไหล สมมติให้การไหลแบบพัฒนาเต็มที่ (Fully developed flow) และ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในอยู่บนความยาวของท่อ (ไม่ใช่ความยาวของจุด) ในทุกกรณี ตัวเลข Reynolds (Re_{hx}) และ ตัวเลข Prandtl (Pr_{hx}) หาได้จาก

$$Re_{hx} = \frac{4 \times \dot{m}}{\pi \times d_i \times \mu}$$

$$Pr_{hx} = \frac{C_p \times \mu}{k}$$

ที่ซึ่ง $\dot{m}$ = อัตราการไหลภายในหนึ่งท่อของตัวแลกเปลี่ยนความร้อน;
 μ = ค่าความหนืด; k = ค่าการนำความร้อนของของไหล;
 C_p = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของของไหล; d_i = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อภายใน;

สำหรับตัวแลกเปลี่ยนความร้อนทุกชนิด ยกเว้น ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อวน ในช่วงการเปลี่ยนแปลงจากการไหลแบบราบเรียบเป็นการไหลแบบปั่นป่วนจะเกิดที่ตัวเลข Re เท่ากับ 2300 สำหรับตัวแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อวน ตัวเลข Re วิกฤต สำหรับช่วงการเปลี่ยนแปลง สามารถคำนวณได้จาก

$$Re_{crit} = 20000 \times \left(\frac{d_i}{d_{coil}} \right)^{0.32}$$

ที่ซึ่ง d_{coil} = เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อวน

สำหรับตัวแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อวน ความสัมพันธ์ของตัวเลข Nu สำหรับการไหลแบบราบเรียบ คือ

$$Nu_{hx} = \left[\left(\frac{48}{11} + \frac{\frac{51}{11}}{1 + \frac{\frac{1342}{Pr_{hx}}}{HE^2}} \right)^3 + 1.816 \cdot \left(\frac{HE}{1 + \frac{1.15}{Pr_{hx}}} \right)^{1.5} \right]^{(1/3)}$$

ที่ซึ่ง

$$HE = \frac{Re_{hx} \cdot \left[\frac{d_i}{d_{coil}} \right]^{-0.5}}{1 + \left[\frac{Pitch_{coil}}{\pi \cdot d_i} \right]^2}$$

และสำหรับเงื่อนไขการไหลแบบปั่นป่วน คือ

$$Nu_{hx} = 0.023 \cdot Re_{hx}^{0.85} \cdot Pr_{hx}^{0.4} \cdot \left[\frac{d_i}{d_{coil}} \right]^{0.1}$$

สำหรับตัวแลกเปลี่ยนแบบท่อคดเคี้ยว ท่อในแนวตั้งและ ท่อในแนวนอน ความสัมพันธ์ของตัวเลข Nu สำหรับการไหลแบบราบเรียบ คือ

กรณีที่ $\frac{L_{tube}}{d_i} \leq 0.0425 \times Re_{hx} \times Pr_{hx}$

$$Nu_{hx} = \left[3.66^3 + 1.61^3 \cdot Re_{hx} \cdot Pr_{hx} \cdot \frac{d_i}{L_{tube}} \right]^{(1/3)}$$

กรณีอื่นๆ

$$Nu_{hx} = 4.364$$

และ สำหรับเงื่อนไขของการไหลแบบปั่นป่วน คือ

$$Nu = 0.0214 \cdot (Re^{0.8} - 100) \cdot Pr^{0.4} \quad (Pr \leq 1.5)$$

$$Nu = 0.012 \cdot (Re^{0.87} - 280) \cdot Pr^{0.4} \quad (Pr > 1.5)$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายใน สามารถหาได้จาก

$$h_i = Nu_{hx} \cdot \frac{k}{d_i}$$

สำหรับกรณีต่างๆ ที่ไม่มีการไหลผ่านตัวแลกเปลี่ยนความร้อน ให้ตัวเลข $Nu = 1$ สำหรับการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายใน

ค่า UA ที่คำนวณได้ สำหรับแต่ละจุดบนตัวแลกเปลี่ยนความร้อนถูกปรับแก้ด้วยตัวคูณที่ผู้ใช้กำหนด (X_{mult}) และตัวประกอบเพิ่ม (X_{add}) โดยผู้ใช้ตามรูปแบบดังนี้

$$UA_{j,k} = UA_{j,k} \times X_{mult} + \frac{X_{add}}{N_{HXnodes}}$$

สุดท้าย การถ่ายเทความร้อนระหว่างจุดภายในถึง (j) และจุดบนตัวแลกเปลี่ยนความร้อน สามารถคำนวณได้จาก

$$Q_{hx,j \rightarrow k} = UA_{j,k} \times (T_{tank,j} - T_{hx,k})$$

และการถ่ายเทความร้อนออกจากตัวแลกเปลี่ยนความร้อน สามารถหาได้จาก

$$Q_{flow} = \dot{m} \times C_p \times (T_{hx,k} - T_{in})$$

ที่ซึ่ง $\dot{m}$ = อัตราการไหลของมวลผ่านจุด (ที่ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลภายในตัวแลกเปลี่ยนความร้อนและจำนวนท่อ)

C_p = ความจุความร้อนจำเพาะของของไหล; $T_{hx,k}$ = อุณหภูมิของจุดบนตัวแลกเปลี่ยนความร้อน

T_{in} = อุณหภูมิขาเข้าของตัวแลกเปลี่ยนความร้อน;

ตัวแปร a และ b สำหรับสมการอนุพันธ์ $\left(\frac{dT}{dt} = aT + b\right)$ สำหรับการถ่ายเทความร้อนของตัวแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับจุดๆ สามารถเขียนได้เป็น

$$a_{hx,k} = \frac{(\dot{m} \times C_p - UA_{j,k})}{Cap_k}; \quad b_{hx,k} = \frac{\left[(-\dot{m} \times C_p \times T_{in}) + (UA_{j,k} \times T_{tank,j})\right]}{Cap_k}$$

ที่ซึ่ง Cap_k = มวลของของไหลที่จุดบนตัวแลกเปลี่ยน $\times$ ค่าความจุความร้อนของของไหลของตัวแลกเปลี่ยน ความร้อน

3) แบบจำลองถังเก็บ (Storage tank)

ถังเก็บเป็นส่วนหนึ่งของแบบจำลอง ICS ที่ซึ่งเป็นการจำลองตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ควบคู่กับแบบจำลอง ถังเก็บ แบบจำลองของถังเก็บ ICS จะพิจารณาการถ่ายเทความร้อนในส่วนต่างๆ คือ

- การสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมผ่านด้านบนของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์
- การสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมผ่านด้านข้างของถังเก็บ
- การสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมผ่านด้านล่างของถังเก็บ
- การดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นผิวของตัวรับรังสี
- การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของของไหลที่ไหลและอยู่นิ่งในตัวแลกเปลี่ยนความร้อน
- การนำความร้อนระหว่างจุดภายในถังเก็บ
- การผสมระหว่างจุดเพื่อกำจัดความไม่สมดุลทางความร้อน
- การผสมระหว่างจุดเนื่องการไหลของภาระผ่านถังเก็บ

4) การได้รับพลังงานของตัวรับรังสี (Collector useful energy gain)

ถังเก็บจะแลกเปลี่ยนความร้อนกับสิ่งแวดล้อมผ่านการสูญเสียความร้อน (หรือการได้รับความร้อน) สู่ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมผ่านพื้นผิวของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์และ จากการดูดซับรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ ถ้าผู้ใช้ ต้องการพิจารณาการสูญเสียจากการแผ่รังสีของถังเก็บ ICS สู่ท้องฟ้า (the night sky) อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่ ป้อนให้ควรเชื่อมต่อกับแบบจำลอง Sky temperature การถ่ายเทความร้อนผ่านพื้นผิวดังกล่าวของถังเก็บ สำหรับจุดๆ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$Q_{top,i} = A_{top,i} \times G_T \times \tau\alpha \times IAM - A_{top,i} \times U_L \times (T_{tank,i} - T_{amb}) - Q_{adloss} \times A_{top,i}$$

ที่ซึ่ง $A_{top,i}$ = พื้นที่ของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ ณ จุดปัจจุบัน;

U_L = สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนด้านบนของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์;

$T_{tank,i}$ = อุณหภูมิของจุดภายในถังเก็บ ณ จุดปัจจุบัน; T_{amb} = อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม;

G_T = รังสีที่ตกกระทบบนพื้นที่ของตัวรับรังสี (รังสีตรง+กระจาย)

$\tau\alpha$ = ผลคูณของ transmittance และ absorptance ของพื้นที่ตัวรับแสง

IAM = Incidence angle modifier

Q_{adloss} = การสูญเสียความร้อนด้านบนเพิ่มเติมต่อพื้นที่

5) การสูญเสียความร้อนด้านข้างและ ด้านล่าง (Edge and bottom loss)

ถังเก็บจะแลกเปลี่ยนความร้อนกับสิ่งแวดล้อมผ่านการสูญเสียความร้อน (หรือได้รับความร้อน) สู่ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมผ่านด้านข้างและ ด้านล่างของถังเก็บ การถ่ายเทความร้อนจากด้านข้างและ ด้านล่างของ ถังเก็บ สำหรับจุดๆ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$Q_{loss,i} = [(A_{edge,i} \times U_{edge}) + (A_{bottom,i} \times U_{bottom})] \times (T_{tank,i} - T_{env})$$

ที่ซึ่ง $A_{\text{edge},i}$ = พื้นที่ด้านข้างของถังเก็บ ณ จุดปัจจุบัน; $A_{\text{bottom},i}$ = พื้นที่ด้านล่างของถังเก็บ ณ จุดปัจจุบัน
 U_{edge} = สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนด้านข้างของตัวรับรังสี
 U_{bottom} = สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนด้านล่างของตัวรับรังสี
 $T_{\text{tank},i}$ = อุณหภูมิของจุดภายในถังเก็บ ณ ปัจจุบัน
 T_{env} = อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมของถังเก็บ

6) ผลกระทบของการนำความร้อน (Conduction effects)

จุดต่างๆ ภายในถังเก็บของแบบจำลองนี้ มีการแลกเปลี่ยนความร้อนกันระหว่างจุดโดยการนำความร้อน สำหรับแบบจำลองนี้ได้พิจารณาการนำความร้อนในผนังของถังเก็บ (และอาจพิจารณาถึงการนำความร้อนในผนังของตัวแลกเปลี่ยนความร้อน) สมการการถ่ายเทความร้อนโดยการนำภายในตัวแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถเขียนได้เป็น

$$Q_{\text{cond},i} = k_i \times A_i \times (T_i - T_{i+1}) / L_i + k_{i-1} \times A_{i-1} \times (T_i - T_{i-1}) / L_{i-1}$$

ที่ซึ่ง k_i = ค่าการนำความร้อนของของเหลว ที่ จุดใดๆ (คำนวณที่อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างจุดที่อยู่ปัจจุบันและจุดอยู่ต่ำกว่า)

A_i = พื้นผิวเชื่อมต่อระหว่างจุดที่อยู่ปัจจุบันกับจุดที่อยู่ต่ำกว่า

T_i = อุณหภูมิที่จุดปัจจุบัน; T_{i+1} = อุณหภูมิที่จุดอยู่ต่ำกว่า

L_i = ระยะห่างตามแนวตั้งระหว่างจุดศูนย์กลางของจุดปัจจุบันกับจุดที่อยู่ต่ำกว่า

k_{i-1} = ค่าการนำความร้อนของของไหลที่จุดๆ (คำนวณที่อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างจุดที่อยู่ปัจจุบันและจุดที่อยู่ต่ำกว่า)

A_{i-1} = พื้นผิวเชื่อมต่อระหว่างจุดที่อยู่ปัจจุบันกับจุดที่อยู่เหนือกว่า

T_{i-1} = อุณหภูมิของจุดที่อยู่เหนือกว่า

L_{i-1} = ระยะห่างในแนวตั้งระหว่างจุดที่อยู่ปัจจุบันกับจุดที่อยู่เหนือกว่า

แบบจำลองของถังเก็บ ได้สมมติ จุดแต่ละจุดมีปริมาตรเท่ากับและอุณหภูมิเท่ากัน (ก่อนการติดตั้งตัวแลกเปลี่ยนความร้อน) จุดเหล่านี้ยังคงอยู่ในแนวนอนโดยไม่พิจารณาการเอียงของตัวรับรังสี เพื่อคำนวณหา ระยะการนำความร้อนระหว่างจุด (L_i) จุดศูนย์กลางมวลของแต่ละจุดถูกสร้าง ระยะการนำความร้อน คือ ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางมวลของจุดที่อยู่ติดกัน

7) อุปกรณ์ความปลอดภัย (Safety devices)

แบบจำลองของถังเก็บได้มีการติดตั้งอุปกรณ์ความปลอดภัยขึ้นเพื่อปล่อยความร้อนออกจากถังเก็บไปยังตัวระบายความร้อน สมการการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์ป้องกันภัย คือ

$$Q_{safe,i} = UA_{safe,i} \times (T_i - T_{safe})$$

ที่ซึ่ง $UA_{safe,i}$ = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมสำหรับการสูญเสียความร้อนเพิ่มเติมระหว่างจุดและอุณหภูมิของตัวระบายความร้อน

T_i = อุณหภูมิของจุดภายในถังเก็บ

T_{safe} = อุณหภูมิของตัวแลกเปลี่ยนความร้อน สำหรับการสูญเสียความร้อนเพิ่ม

8) ผลกระทบจากการผสม (Mixing effects)

ในช่วงเวลาที่ จุดต่างๆ ของถังเก็บไม่มีค่าไม่คงที่ (หรือจุดหนึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าอีกจุดหนึ่ง) ถ้าเหตุการณ์นี้เกิดขึ้น แบบจำลองนี้จะให้ผู้ใช้กำหนดการผสมจุดที่ไม่คงที่ สมการถ่ายเทความร้อนแบบผสมระหว่างจุดภายในถังเก็บสามารถเขียนได้

$$Q_{mix,i} = m_i \times Cp_i \times (T_i - T_{i+1}) + m_{i-1} \times Cp_{i-1} \times (T_i - T_{i-1})$$

ที่ซึ่ง m_i = อัตราการไหลที่ผสมกันระหว่างจุดปัจจุบันและ จุดที่อยู่ต่ำกว่า

Cp_i = ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (ที่อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างจุดถัดไป)

T_i = อุณหภูมิของจุดปัจจุบัน ; T_{i+1} = อุณหภูมิของจุดที่ต่ำกว่า

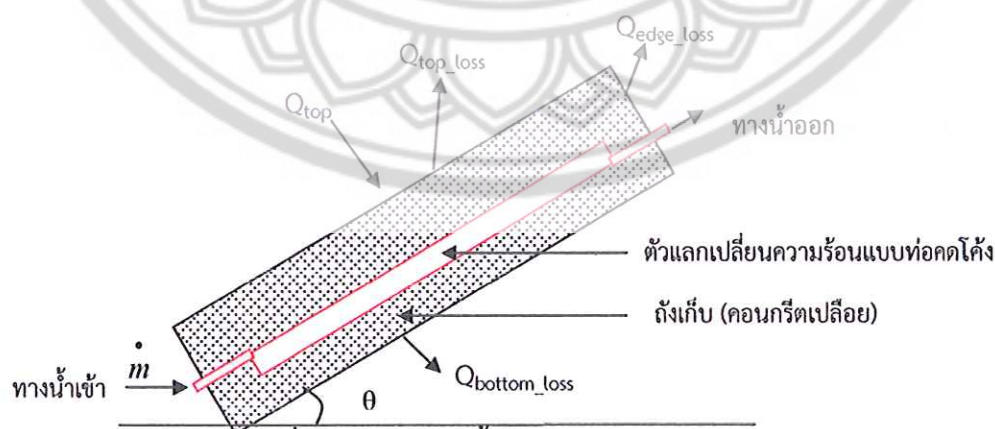
m_{i-1} = อัตราการไหลที่ผสมระหว่างจุดปัจจุบันกับจุดที่อยู่เหนือกว่า

Cp_{i-1} = ค่าความจุความร้อนของของไหล (ที่อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างจุดถัดไป)

T_i = อุณหภูมิของจุดปัจจุบัน ; T_{i-1} = อุณหภูมิของจุดที่เหนือกว่า

3.3.2 การจำลองระบบผลิตน้ำร้อนคอนกรีตเปลือย

ในงานวิจัยนี้ การจำลองพฤติกรรมเชิงความร้อนของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบคอนกรีตเปลือย (รูปที่ 17) ได้นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบร่วมกับถังเก็บความร้อน (อุปกรณ์หมายเลข 541) มาประยุกต์ใช้ รายละเอียดของแบบจำลองได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 3.3.1



รูปที่ 17. ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์อย่างง่าย

รายละเอียดของระบบ

ระบบที่จำลองนี้ เป็นระบบผลิตน้ำร้อนที่ใช้ตัวเก็บรังสีชนิดถังเก็บคอนกรีตเปลือยและ ตัวแลกเปลี่ยน ความร้อนแบบท่อคดโค้งในการนำร้อนในการผลิตน้ำร้อน โดยสมมุติตัวแปรต่างๆ ให้กับระบบดังนี้

1. ค่าคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ
2. ค่าการดูดกลืนแสงอาทิตย์จากการใช้สีดำ เท่ากับ 0.9
3. ค่าการนำความร้อนและ ความจุความร้อนของคอนกรีตเท่ากับของน้ำ
4. ไม่มีการพาความร้อนภายในคอนกรีต โดยกำหนดให้ค่า C , n , และ m เท่ากับ 1, 0 และ 0 ตามลำดับ ในสมการด้านล่าง

$$Nu = Nu_d = C \times (Ra)^n \times (GF)^m$$

โดยที่ Ra = ตัวเลข Rayleigh ของของเหลวในถังเก็บ (ที่มีคุณสมบัติของของเหลวที่อุณหภูมิ $(T_{surf} + T_{\alpha})/2$)

T_{surf} = อุณหภูมิของผนังด้านนอกของตัวแลกเปลี่ยนความร้อน

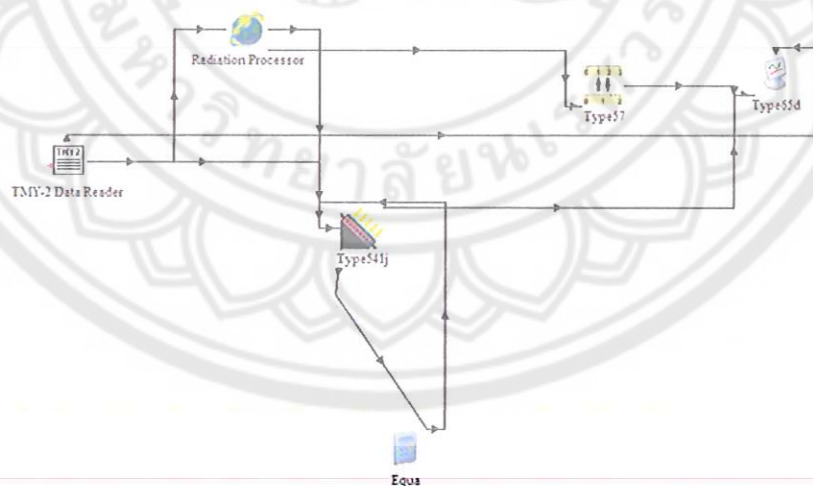
T_{α} = อุณหภูมิของจุดบนถังเก็บที่มีจุดบนตัวแลกเปลี่ยนความร้อนด้วย

C , n , GF , และ m = ตัวแปรที่ถูกป้อน

5. ระบบที่จำลองพิจารณาเฉพาะกรณีที่ระบบไม่มีการระเหยน้ำ (หรือ ระบบผลิตน้ำร้อนมีการไหลของ น้ำเป็นแบบไหลวน) ดังรูปที่ 18

ระบบตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการจำลองมีขนาดกว้าง 2 m ยาว 1 m หนา 0.07 m และ ท่อพีวีซีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.2 cm ถูกขดแบบคดโค้งฝังอยู่ในคอนกรีต โดยอุณหภูมิเริ่มต้นในการจำลอง 24 °C

ขั้นตอนการจำลองระบบ



รูปที่ 18. แผนภาพการจำลองระบบผลิตน้ำร้อนคอนกรีต โดย TRNSYS

1) จำแนกส่วนประกอบ (Components) หรืออุปกรณ์ ต่างๆ จากรูปที่ 18 ระบบที่จำลองมีอุปกรณ์ทั้งหมด 6 อุปกรณ์ ดังนี้

1. Type16g เป็นอุปกรณ์ที่ใช้อ่านและ ประมวลข้อมูลรังสีแสงอาทิตย์ จาก Type 89
2. Type89 เป็นอุปกรณ์อ่านข้อมูลสภาพอากาศในรูป TMY2
3. Type541j เป็นตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบดักเก็บร่วมตัวแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อคดโค้ง
4. Equa เป็นอุปกรณ์สำหรับการคำนวณเสริม ในที่นี้ใช้สำหรับกำหนดค่าอุณหภูมิน้ำเข้าเท่ากับ อุณหภูมิน้ำออกของตัวรับรัง (หรือ ระบบมีการไหลวนของน้ำภายในโดยไม่มีไหล)
5. Type57 เป็นอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนหน่วย ในที่นี้ใช้เปลี่ยนหน่วยพลังงานแสงอาทิตย์ จาก kJ/hr m2 เป็น W/m2
6. Type65 เป็นอุปกรณ์ใช้ในการวาดกราฟชนิดหนึ่ง

2) สร้างแบบจำลองใหม่ โดยการเลือกเมนูบนโปรแกรม TRNSYS simulation studio ดังนี้
File>New>Empty Project

3) ลากและปล่อยส่วนประกอบต่างๆ ดังรูปที่ 18

4) ลากเส้นเชื่อมต่อส่วนประกอบต่างๆ พร้อมตั้งค่าตัวแปร ดังรูปที่ 18

1) Type16g

รายละเอียดของ Parameters

Number	Parameter Name	Value Used	Units	Info
1	Horizontal radiation mode	4	-	Horizontal Radiation Mode: See the general description for an explanation of all horizontal radiation modes. This proforma corresponds to Mode 4 (Total Horizontal and Normal Beam Radiation Known)
2	Tracking mode	1	-	Surface Tracking Mode: 1 = Fixed surface 2 = Single axis tracking; vertical axis, fixed slope, variable azimuth 3 = Single axis tracking; axis parallel to surface 4 = Two-axis tracking Refer to the abstract for more details.
3	Tilted surface mode	3	-	Tilted Surface Radiation Mode: 1 = Isotropic sky model 2 = Hay and Davies model 3 = Reindl model 4 = Perez model Refer to the abstract for more details
4	Starting day	DAY	String	The day of the year corresponding to the simulation start time. Every time the simulation start time is changed, the starting day must be changed or the radiation calculations will be inaccurate. A commonly used workaround to set the starting day to the correct value in all circumstances is to add the following lines to the "simulations cards" (in "Assembly/Control Cards"):
5	Latitude	15	-	The latitude of the location being investigated.
6	Solar constant	4871.0	kJ/hr m2	The solar constant.
7	Shift in solar time	-5.27	degrees	The shift in solar time: Since many of the calculations made in transforming insolation on a horizontal surface depend on the time of day, it is important that the correct solar time be used. This parameter is used to account for the differences between solar time and local time. The equation for the shift parameter is: SHIFT = Lst - Lloc where Lst is the standard meridian for the local

				time zone, and Lloc is the longitude of the location in question. Longitude angles are positive towards West, negative towards East.
				- The shift angle should be ignored if the data was recorded in true solar time instead of official clock time (see parameter 9).
8	Not used	2	-	This parameter is not used in this mode of the radiation processor.
9	Solar time?	1	-	If the radiation data being supplied to the radiation processor is at even intervals of solar time (as the TMY data is) then this parameter should be set to a negative number so that the 7th parameter (Shift in Solar Time) is ignored. If the data being supplied is at even intervals of local time, this value should be set positive so that the seventh parameter is used.

รายละเอียดของ Inputs

Number	Parameter Name	Value Used	Units	Info
1	Total radiation on horizontal surface	0	W/m2	The total radiation on a horizontal surface.
2	Direct normal beam radiation	0	W/m2	Beam radiation on a surface oriented towards the sun
3	Time of last data read	0	hr	The time of the last reading of the external file containing the weather data. Typically from the 19th Output of the data reader component.
4	Time of next data read	1	hr	The time that the next weather information will be read from the external data file. This input is typical hooked up the 20th Output of the data reader component.
5	Ground reflectance	0.2	-	The reflectance of the ground above which the surface is located. Typical values are 0.2 for ground not covered by snow and 0.7 for ground covered by snow.
6	Slope of surface	15	degrees	The slope of the surface or tracking axis. The slope is positive when tilted in the direction of the azimuth. 0 = Horizontal 90 = Vertical facing toward azimuth Refer to the abstract for details on slope specification for tracking surfaces.
7	Azimuth of surface	0	degree	The solar azimuth angle is the angle between the local meridian and the projection of the line of sight of the sun onto the horizontal plane. The reference is as follows: 0 = Facing equator 90 = Facing West 180 (or -180) = Facing away from the equator -90 (or 270) = Facing East

2) Type89

รายละเอียดของ Parameters

Number	Parameter Name	Value Used	Units	Info
1	Mode	-2	-	Mode = -2 specifies to the general data reader component that the file to be read is a TRNSYS TMY2 weather file and that the program should skip into the data file corresponding to the simulation start time. This parameter should not be changed!
2	Logical unit	31	-	The logical unit through which the data reader will read the TMY weather file.

รายละเอียดของ External File

Number		
1	Which file contains the TMY2 weather information	Trnsys16\Weather\Meteonorm\Asian\TH-Nakhon-Sawan-484000.tmy2

3) Type541j

รายละเอียดของ Parameters

Number	Parameter Name	Value Used	Units	Info
1	No. of Tank nodes	5	-	The number of Isothermal tank nodes into which the storage tank will be divided.
2	Noding scheme	1	-	The noding scheme used to divide the storage tank into isothermal regions: 1=Horizontal noding - Recommended for almost every application 2=Perpendicular noding - Recommended only for very shallow tanks where the flow stream determines the majority of the temperature distribution.
3	Heat exchanger geometry	4	-	The geometry of the heat exchanger immersed in the storage tank of the ICS system: 0=No HX; 1=Horizontal Tube Bank; 2=Vertical Tube Bank 3=Coiled Tube HX; 4=Serpentine Tube
4	Tank length	1	m	The length of the rectangular storage tank. The length represents the edge that is rotated away from the horizontal for a sloped surface condition.
5	Tank width	2	m	The width of the rectangular storage tank.
6	Tank depth	0.07	m	The depth of the rectangular storage tank.
7	Tank fluid	1	-	The fluid contained in the storage tank: 1=Pure Water; 2=Propylene Glycol and Water Solution; 3=Ethylene Glycol and Water Solution
8	Percent volume of tank fluid	0	-	The percentage by volume of the secondary fluid contained in the storage tank (propylene glycol for example). The fluid is specified by the parameter preceding this one.
9	Initial tank temperature	24	C	The temperature of the storage tank at the beginning of the simulation. If derivatives are specified, this parameter will be ignored.
10	Edge loss coefficient	33	W/m ² K	The loss coefficient for the edges of the storage tank. (All areas except top and bottom area)
11	Bottom loss coefficient	33	W/m ² K	The loss coefficient for the bottom surface of the storage tank.
12	Additional thermal conductivity mode	1	-	the thermal conductivity heat transfer mode. If Kmode > 0, the thermal conductivity between nodes will be calculated based on the thermal conductivity of the storage fluid and the additional thermal conductivity input values. If Kmode < 0, thermal conductivity between nodes will be ignored.
13	IAM Mode	5	-	The mode for the processing of the off-normal solar radiation effects: 1=No off-normal effects considered 2=Use 1st-Order Incidence Angle Modifiers (IAM's) from ASHRAE 3=Use 2nd-Order IAM's from ASHRAE 4=Use File of Single-Axis IAM's 5=Use Cover and Absorber Properties 6=Use Multiplicative Bi-Axial Method 7=Use File of Bi-Axial IAM's
14	Plate absorptance	0.9	-	The absorptance of the plate to incident solar radiation.
15	Number of covers	1	-	The number of identical covers above the absorbing surface of the collector.
16	Cover refractive index	1.01	-	The index of refraction of the cover material. Glass=1.526
17	Extinction-thickness product	0.05	-	The product of the extinction coefficient for the cover material and the thickness of the cover material.
18	Number of HX nodes	5	-	The number of nodes into which the heat exchanger will be

				divided into in the flow direction. For each node, the user must specify the tank node containing the heat exchanger node and the fraction of the total heat exchanger length represented by the node.
19	Tank node for HX node-1	5	-	The tank node in which this specified heat exchanger node resides. For each HX node, the user must specify the tank node in which the HX node resides and the fraction of total HX length represented by the node. For example, if the HX is divided into equal-length segments and enters a 5-node storage tank at the bottom, travels to the top of the heat exchanger, bends over and then returns to the bottom of the storage before exiting, the parameters would be: 10 <---- Number of HX Nodes 5 0.1 <----- Tank Node and HX fraction for node 1 4 0.1 3 0.1 2 0.1 1 0.1 1 0.1 2 0.1 3 0.1 4 0.1 5 0.0
20	Fraction of HX Length for Node-1	0.2	-	The fraction of the total heat exchanger length represented by this node of the heat exchanger. Refer to the previous parameter for an example of the structure of the HX nodding scheme.
21	Tank node for HX node-2	4	-	Refer parameter 19
22	Fraction of HX Length for Node-2	0.2	-	Refer parameter 20
23	Tank node for HX node-3	3	-	Refer parameter 19
24	Fraction of HX Length for Node-3	0.2	-	Refer parameter 20
25	Tank node for HX node-4	2	-	Refer parameter 19
26	Fraction of HX Length for Node-4	0.2	-	Refer parameter 20
27	Tank node for HX node-5	1	-	Refer parameter 19
28	Fraction of HX Length for Node-5	0.2	-	Refer parameter 20
29	Heat exchanger fluid	1	-	The fluid flowing through the immersed heat exchanger: 1=Pure Water; 2=Propylene Glycol and Water Solution 3=Ethylene Glycol and Water Solution
30	Percent volume of HX fluid	0	-	The percentage by volume of the secondary fluid flowing through the heat exchanger (propylene glycol for example). The fluid is specified by the preceding parameter.
31	Multiplier for Nat. Convection Corr	1	-	The value 'c' in the following natural convection equation for the heat exchanger (constant multiplier) $\text{Nusselt } \# = C * (Ra^n) * (GF^m)$
32	Exponent for Rayleigh	0	-	The value for n in the natural convection heat transfer correlation of the form (Rayleigh number exponent): $\text{Nusselt } \# = C * (Ra^n) * (GF^m)$
33	Geometry factor	1.0	-	The value for the geometry factor (GF) in the natural convection heat transfer equation of the form: $\text{Nusselt } \# = C * (Ra^n) * (GF^m)$ The geometry factor is used to account for different heat exchanger configurations and is most often obtained from experimental data.
34	Geometry factor exponent	0	-	The value for the geometry factor exponent (m) in the natural convection heat transfer correlation of the form: $\text{Nusselt } \# = C * (Ra^n) * (GF^m)$
35	HX tube inner diameter	0.18	m	The inner diameter of one of the identical tubes comprising the heat exchanger.
36	HX tube outer diameter	0.02	m	The outer diameter of one of the identical tubes comprising the

				heat exchanger.
37	HX wall conductivity	0.21	W/m K	The thermal conductivity of the wall material comprising the tubes of the heat exchanger.
38	Length of HX tube	2	m	The length of one of the identical tubes comprising the heat exchanger.
39	Number of tubes	10	-	The number of identical tubes comprising the heat exchanger.
40	Header volume	0.0	m ³	The volume of the headers comprising the heat exchanger. The volume of the header will be added to the volume of the heat exchanger node for the first and last heat exchanger nodes for heat transfer calculations.
41	Initial HX temperature	24	C	The temperature of the fluid in the heat exchanger at the beginning of the simulation.
42	HX cross sectional area	0.0	m ²	The cross-sectional area of the heat exchanger at the tank nodal boundaries. This parameter is used only to reduce the available area for fluid conduction heat transfer.

รายละเอียดของ Inputs

Number	Parameter Name	Value Used	Units	Info
1	HX Inlet temperature	24	C	The temperature of the fluid flowing into the immersed heat exchanger in the storage tank.
2	HX inlet flowrate	0.012	kg/s	The flow rate of fluid entering the immersed heat exchanger in the storage tank.
3	Top loss temperature	24	C	The temperature of the environment for calculating losses from the top (collector surface) of the storage tank.
4	Total incident solar radiation	0	kJ/hr m ²	The rate at which total solar radiation (beam plus diffuse) strikes the sloped collector surface.
5	Horizontal diffuse radiation	0	kJ/hr m ²	The rate at which diffuse radiation strikes a horizontal surface.
6	Total solar on horizontal	0	kJ/hr m ²	The amount of total solar radiation (beams plus diffuses) that strikes a horizontal surface.
7	Incident diffuse radiation	0	kJ/hr m ²	The rate at which diffuse radiation strikes the sloped collector surface.
8	Incidence angle	0	degrees	The angle of incidence between beam radiation and the sloped collector surface.
9	Solar zenith angle	0	degrees	The solar zenith angle at the current timestep.
10	Solar azimuth angle	0	degrees	The solar azimuth angle at the current timestep.
11	Top surface slope	15	degrees	The slope of the top surface of the rectangular storage tank. 0 Degrees=Horizontal. The tank is tilted such that the length of the tank is rotated away from the horizontal.
12	Collector azimuth	0	degrees	The direction which the solar collector surface is facing: 0=Facing the Equator; 90=Facing West 180=Facing away from the equator; 270=Facing East
13	Ground reflectance	0.2	-	The reflectance of the surface upon which the ICS collector is situated.
14	Edge & Bottom loss temperature	20	C	The temperature to which the thermal losses from the edge and bottom of the storage tank occur.
15	Safety sink temperature	20	C	The temperature to which the overheat safety device dumps energy to if the safety loss coefficients are set be non-zero values.
16	Inversion mixing flow rate	-100	kg/hr	The mixing rate at which temperature inversions between adjacent nodes of the storage tank will be addressed. Setting this value to zero will allow the storage tank to remain inverted - where one node of the storage tank remains hotter than the node above it. Be careful that you don't set this flow rate to high - it may cause temperature instabilities in the program - check the energy balance error outputs from the program! Setting this value negative will result in an instantaneous mix between all offending nodes at the conclusion of each timestep.
17	Modifier for calculated Tau-alpha	1	-	This input will be multiplied by the theoretical transmittance-

	product			absorbance product (calculated from the cover and absorber properties) in order to calculate an adjusted transmittance-absorbance product.
18	Top loss coefficient	15	$\text{kJ/hr m}^2 \text{ K}$	The loss coefficient between the collector surface and the environment.
19	Additional top losses	0	kJ/hr m^2	Any additional losses from the collector cover per unit area. Losses from the system are considered to be positive inputs to this model.
20	Overall safety loss coeff-1	0	kJ/hr K	The overall loss coefficient between this tank node and the safety device sink temperature
21	Overall safety loss coeff-2	0	kJ/hr K	Refer to Input 20
22	Overall safety loss coeff-3	0	kJ/hr K	Refer to Input 20
23	Overall safety loss coeff-4	0	kJ/hr K	Refer to Input 20
24	Overall safety loss coeff-5	0	kJ/hr K	Refer to Input 20
25	Internodal thermal conduct-1	0	kJ/hr m K	additional thermal conductivity for internodal heat exchange between this node and the one below. Start with the top node and proceed downwards through the tank.
26	Internodal thermal conduct-2	0	kJ/hr m K	Refer to Input 25
27	Internodal thermal conduct-3	0	kJ/hr m K	Refer to Input 25
28	Internodal thermal conduct-4	0	kJ/hr m K	Refer to Input 25
29	Multiplier for HX UA	1	-	The theoretical UA calculated by the model for each node will be multiplied by this input in order to modify the overall heat transfer coefficient.
30	Additive term for HX UA	0	kJ/hr K	The value of this input (divided by the number of heat exchanger nodes) will be added to the theoretical UA calculated by the model for each node.

4) Equation เพิ่มอุปกรณ์นี้ได้ที่ Assembly>Insert New Equation จากนั้นกำหนด Toutlet = Tinlet

5. ประมวลผลและ วิเคราะห์ระบบ ก่อนดำเนินการประมวลผลโดยการเลือกเมนูบนโปรแกรม TRNSYS simulation studio โดย กด Calculate>Run Simulation ให้กำหนดช่วงเวลาในการคำนวณใน Assembly>Control Cards และเขียนสมการกำหนดตัวแปรในช่อง Simulation cards ดังนี้

EQUATIONS 4

DAY=INT(START/24)+1

N_DAYS=INT((STOP-START)/24.000001) + 1

N_WEEKS=INT((STOP-START)/168.000001) + 1

N_YEARS=INT((STOP-START)/8760.000001) + 1

รายละเอียดโปรแกรมไฟล์อินพุตของแบบจำลองด้านบน สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ที่ภาคผนวก ก-2

บทที่ 4

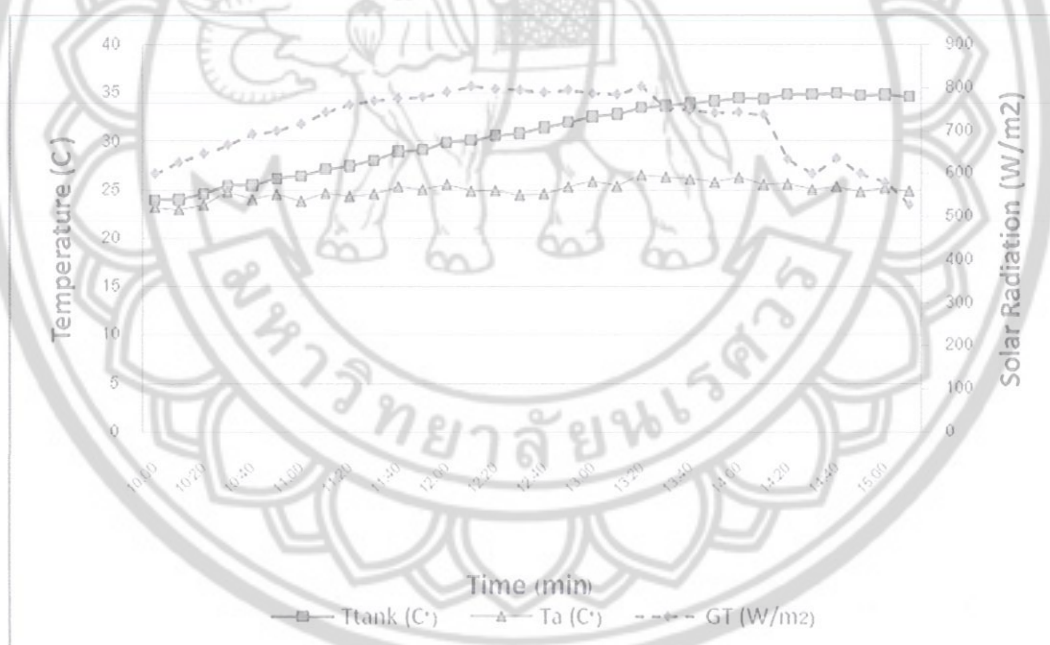
ผลการวิจัย

4.1 ผลการทดสอบระบบ

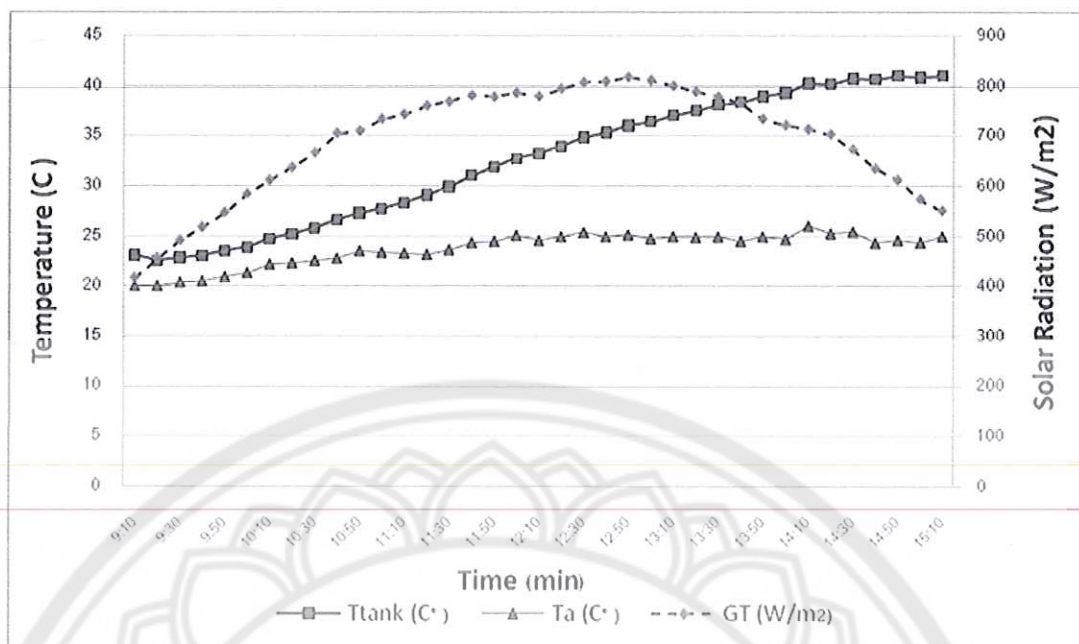
ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวรับรังสีคอนกรีตเปลือยได้ถูกแบบให้มีระยะห่างระหว่างท่อที่เหมาะสมคือ 6 cm [10] และตัวแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อคดโค้งได้ถูกเลือกเนื่องจากให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ดีกว่า ร้อยละ 4 เมื่อเปรียบเทียบกับตัวแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อขนานในแนวนอน [11]

ระบบได้ถูกทดสอบภายใต้สิ่งแวดล้อมภายนอก ที่ซึ่งพลังงานแสงอาทิตย์และ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมภายนอกเปลี่ยนแปลงตลอดทั้งวัน ผลการทดสอบระบบผลิตน้ำร้อนดังแสดงในรูปที่ 19, 20, และ 21

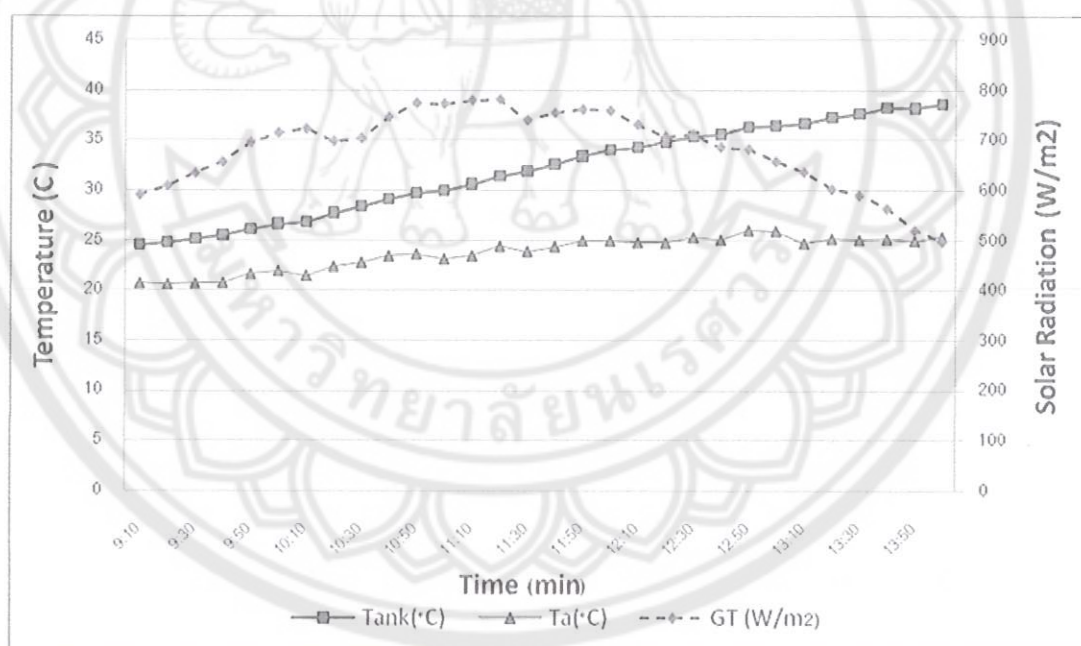
จากรูปที่ 19 แสดงผลการทดสอบระบบผลิตน้ำร้อนคอนกรีตเปลือยที่ไม่พ่นสีดำ โดยกำหนดอัตราการไหลมวล 0.012 kg/s การทดสอบนี้เป็นแบบน้ำไหลวนกลับ หรือไม่มีภาระความร้อนเกิดขึ้น จากผลการทดสอบพบว่า ระบบสามารถทำให้น้ำปริมาณ 50 ลิตร มีอุณหภูมิสูงสุด ประมาณ 35 °C ในขณะเดียวกัน ผลการทดสอบระบบผลิตน้ำร้อนที่ใช้แผ่นคอนกรีตเปลือยที่พ่นด้วยสีดำด้านสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำความให้กับระบบ โดยทำให้อุณหภูมิของน้ำสูงสุด ประมาณ ประมาณ 40 °C (ดังรูปที่ 20) และได้พบอีกว่า การเพิ่มปริมาณน้ำให้กับระบบจะมีผลกระทบต่อการลดลงของอุณหภูมิสูงสุดของน้ำร้อนที่สามารถทำได้ (ดังรูปที่ 21)



รูปที่ 19. ผลทดสอบระบบผลิตน้ำร้อนคอนกรีตเปลือย (ไม่พ่นสีดำ) ปริมาณน้ำ 50 ลิตรต่อวัน
ณ วันที่ 27 ธันวาคม 2556



รูปที่ 20. ผลทดสอบระบบผลิตน้ำร้อนคอนกรีตเปลือย (พ่นสีดำ) ปริมาณน้ำ 50 ลิตรต่อวัน
ณ วันที่ 28 ธันวาคม 2556

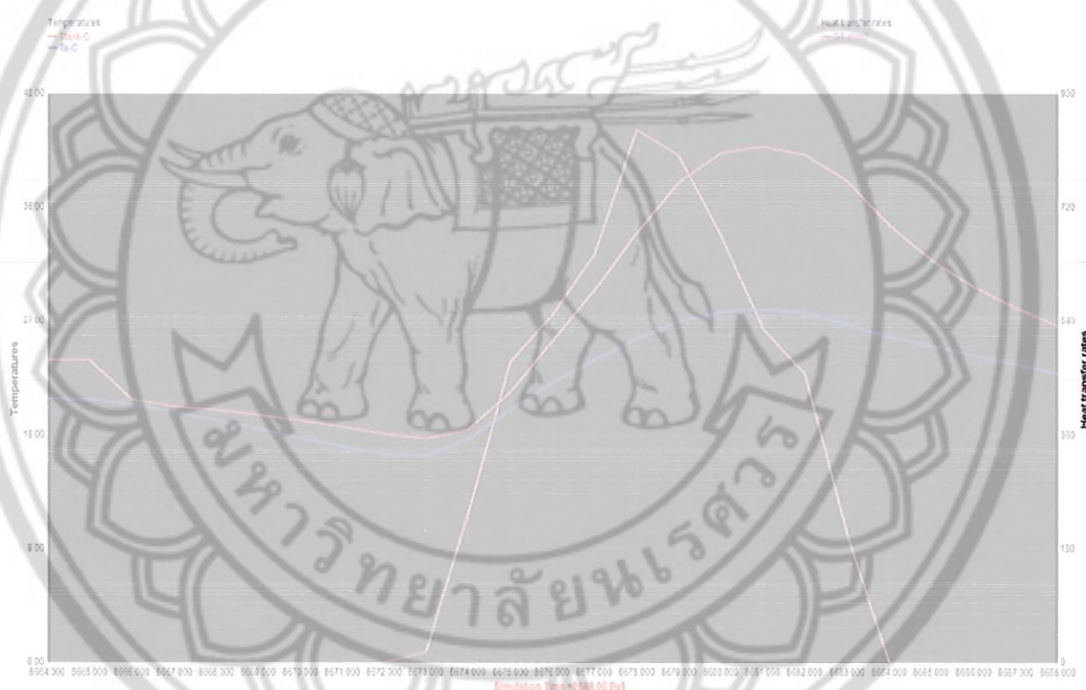


รูปที่ 21. ผลทดสอบระบบผลิตน้ำร้อนคอนกรีตเปลือย (พ่นสีดำ) ปริมาณน้ำ 100 ลิตรต่อวัน
ณ วันที่ 29 ธันวาคม 2556

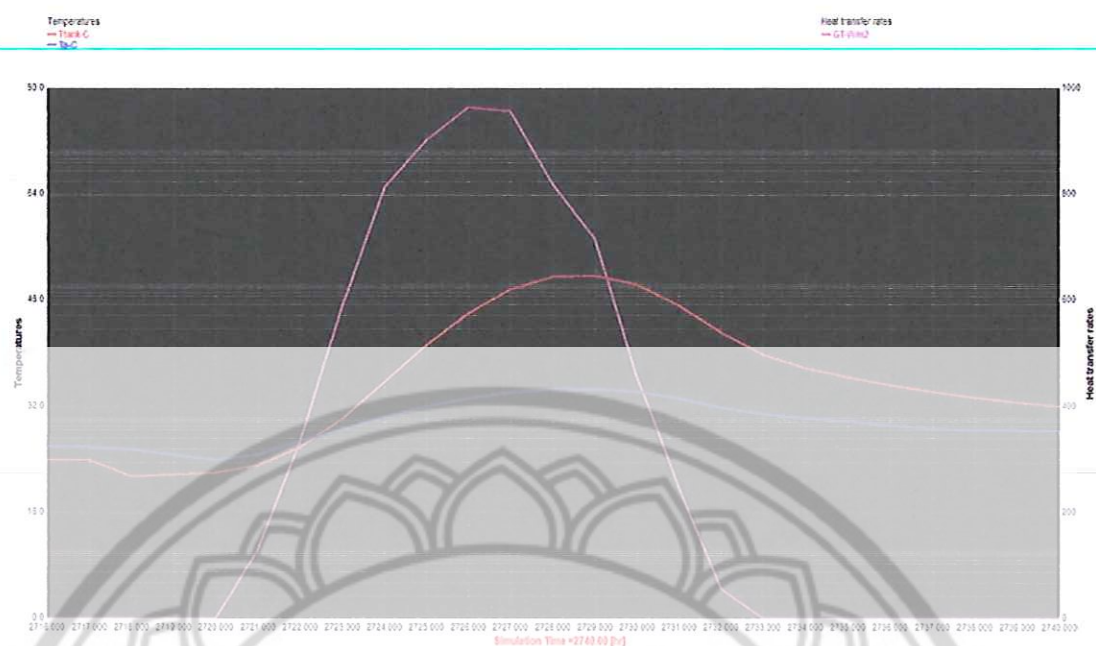
4.2 ผลการจำลองระบบ

ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวรับรังสีคอนกรีตเปลี่ยนชนิดท่อคดโค้ง (Serpentine tubes) ได้ถูกจำลองโดยใช้โปรแกรม TRNSYS การจำลองครั้งนี้ ได้พิจารณาเฉพาะกรณีที่ระบบไม่มีการระความร้อน (หรือ ระบบผลิตน้ำร้อนมีการไหลของน้ำเป็นแบบไหลวน) และได้นำข้อมูลสภาพอากาศของจังหวัดนครสวรรค์มาใช้ เช่นพลังงานแสงอาทิตย์ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ที่มีอยู่ในฐานข้อมูล TMY เป็นต้น ผลการจำลองการทำงานของระบบผลิตน้ำร้อน แสดงในรูปที่ 22, 23, 24 และ 25

จากรูปที่ 22 และ 23 แสดงผลการจำลองระบบผลิตน้ำร้อนคอนกรีตเปลี่ยนพื้นที่ผิวด้าน (สมมุติ ค่าการดูดกลืน 0.9) โดยกำหนดให้ค่าอัตราการไหลมวลที่ 0.012 kg/s และมีจำนวนท่อที่ขดภายในคอนกรีต 10 ท่อ จากผลการศึกษาพบว่า ระบบสามารถผลิตน้ำร้อนได้ที่อุณหภูมิสูงสุด 41°C และ 52°C ในช่วงวันที่ 28 ของเดือนธันวาคม และ 7 เมษายน ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกัน พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของมวล (หรือเพิ่มปริมาณน้ำ) ให้กับระบบผลิตน้ำร้อนจะทำให้อุณหภูมิของน้ำร้อนสูงสุดลดลง (ดังรูปที่ 24) ในกรณีที่เพิ่มจำนวนท่อภายในแผ่นคอนกรีต จาก 10 ท่อเป็น 15 ท่อ และมีอัตราการไหลมวลที่เท่ากัน ผลการศึกษาพบว่า ไม่ค่อยมีผลกระทบต่ออุณหภูมิสูงสุดของน้ำร้อนที่ทำได้ (ดังรูปที่ 25)



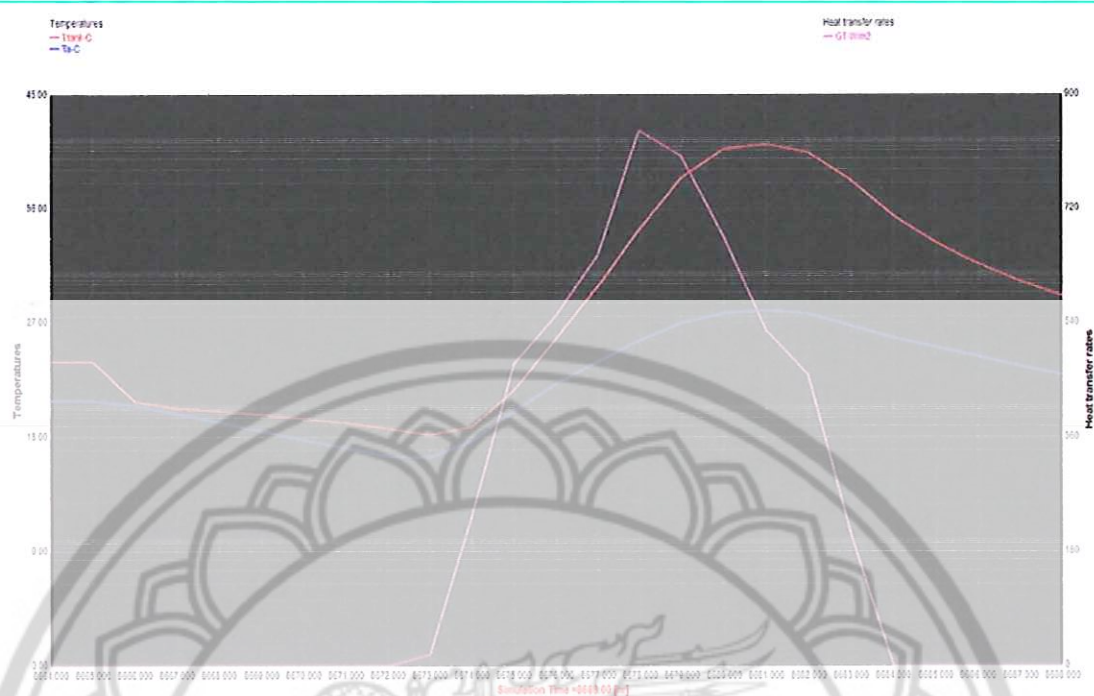
รูปที่ 22. ผลการจำลองระบบผลิตน้ำร้อนคอนกรีตเปลี่ยน (พื้นที่ผิวด้าน) พื้นที่ 2 m^2 , อัตราการไหลมวล 0.012 kg/s , จำนวนท่อ 10 ท่อ ณ วันที่ 28 ธันวาคม อุณหภูมิน้ำสูงสุดที่ได้ประมาณ 41°C



รูปที่ 23. ผลการจำลองระบบผลิตน้ำร้อนคอนกรีตเปลือย (พ่นสีดำ)
พื้นที่ 2 m², อัตราการไหลมวล 0.012 kg/s, จำนวนท่อ 10 ท่อ
ณ วันที่ 7 เมษายน อุณหภูมิน้ำสูงสุดที่ได้ประมาณ 52 °C



รูปที่ 24. ผลการจำลองระบบผลิตน้ำร้อนคอนกรีตเปลือย (พ่นสีดำ)
พื้นที่ 2 m² อัตราการไหลมวล 1 kg/s จำนวนท่อ 10 ท่อ
ณ วันที่ 28 ธันวาคม อุณหภูมิสูงสุดประมาณ 34 °C



รูปที่ 25. ผลการจำลองระบบผลิตน้ำร้อนคอนกรีตเปลือย (พื้นสีดำ)
พื้นที่ 2 m^2 อัตราการไหลมวล 0.012 kg/s จำนวนท่อ 15 ท่อ
ณ วันที่ 28 ธันวาคม อุณหภูมิสูงสุดประมาณ 41°C

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลการทดสอบ

จากการศึกษาสมรรถนะของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์คอนกรีตเปลี่ยนเพื่อผลิตน้ำร้อน โดยการทดสอบภาคสนามและ การจำลองระบบด้วยโปรแกรม TRNSYS สามารถสรุปได้ดังนี้ การพ่นด้วยสีดำด้านบนแผ่นคอนกรีตเปลี่ยนช่วยทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบผลิตน้ำร้อนสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดกลืนแสงอาทิตย์ให้กับแผ่นคอนกรีต ปริมาณของพลังงานแสงอาทิตย์ในแต่ละวันและ อัตราการไหลของน้ำในระบบมีผลกระทบต่ออุณหภูมิสูงสุดของน้ำร้อนที่ผลิตได้ นั่นคือ ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่มากทำให้อุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตสูง ในทางตรงกันข้าม อัตราการไหลของน้ำที่เพิ่มทำให้อุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้ลดลง การเพิ่มจำนวนท่อที่ขุดภายในแผ่นคอนกรีตมีผลกระทบต่ออุณหภูมิสูงสุดของน้ำที่ผลิตได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

- ศึกษาผลกระทบของส่วนผสมวัสดุคอนกรีตต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบ
- ศึกษาสมรรถนะของระบบภายใต้แสงอาทิตย์เทียมและ สภาพอากาศที่ควบคุมได้ เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่นำมาใช้ เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ศึกษาเป็นการประยุกต์ใช้แบบจำลองของตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบร่วมกับถังเก็บความร้อน (อุปกรณ์หมายเลข 541) ที่พิจารณาการทำงานภายในถังเก็บเฉพาะสารที่มีสถานะของเหลว (คือ น้ำ, โพรไพลีน ไกลคอล, เอทิลีน ไกลคอล) อีกทั้งในการจำลองมีการสมมุติค่าตัวแปรต่างๆ
- การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวรับรังสีแผ่นคอนกรีตขึ้นใหม่บนโปรแกรม TRNSYS เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปในอนาคต

ภาคผนวก ก

ก-1 : รหัสโปรแกรมของแบบจำลองตัวอย่าง

ก-2 : รหัสโปรแกรมของแบบจำลองที่ใช้ศึกษา



ก-1 รหัสโปรแกรมแบบจำลองตัวอย่าง

VERSION 16.1

*** Units

*** Control cards

* START, STOP and STEP

CONSTANTS 3

START=0

STOP=72

STEP=1

* User defined CONSTANTS

SIMULATION	START	STOP	STEP	! Start time	End time	Time step
TOLERANCES	0.001 0.001			! Integration	Convergence	
LIMITS	30 30 30			! Max iterations	Max warnings	Trace limit
DFQ	1			! TRNSYS numerical	integration solver	method
WIDTH	80			! TRNSYS output file	width, number of	characters
LIST				! NOLIST statement		
				! MAP statement		

SOLVER	0 1 1			! Solver statement	Minimum relaxation factor
	Maximum				

relaxation factor					
NAN_CHECK	0			! Nan DEBUG statement	
OVERWRITE_CHECK	0			! Overwrite DEBUG statement	
TIME_REPORT	0			! disable time report	
EQSOLVER	0			! EQUATION SOLVER statement	

* Model "Type109-TMY2" (Type 109)

*

UNIT 2 TYPE 109 Type109-TMY2

*\$UNIT_NAME Type109-TMY2

*\$MODEL .\Weather Data Reading and Processing\Standard Format\TMY2\Type109-TMY2.tmf

*\$POSITION 127 82

*\$LAYER Weather - Data Files #

PARAMETERS 4

2	! 1 Data Reader Mode
35	! 2 Logical unit
4	! 3 Sky model for diffuse radiation
1	! 4 Tracking mode

INPUTS 3

0,0	! [unconnected] Ground reflectance
0,0	! [unconnected] Slope of surface
0,0	! [unconnected] Azimuth of surface

*** INITIAL INPUT VALUES

0.2 13.75 0

*** External files

ASSIGN "E:\Program Files\Trnsys16\Weather\Meteonorm\Asia\TH-Bangkok-484550.tm2" 35

*|? Weather data file |1000

*

* Model "Type3b" (Type 3)

*

UNIT 3 TYPE 3 Type3b

*\$UNIT_NAME Type3b

*\$MODEL \Hydronics\Pumps\Single Speed\Type3b.tmf

*\$POSITION 56 192

*\$LAYER Water Loop #

PARAMETERS 5

50 ! 1 Maximum flow rate
4.19 ! 2 Fluid specific heat
60 ! 3 Maximum power
0.05 ! 4 Conversion coefficient
0.5 ! 5 Power coefficient

INPUTS 3

0,0 ! [unconnected] Inlet fluid temperature
0,0 ! [unconnected] Inlet mass flow rate
9,1 ! Type14h:Average value of function ->Control signal

*** INITIAL INPUT VALUES

29 40 1

*

* Model "Type1b" (Type 1)

*

UNIT 4 TYPE 1 Type1b

*\$UNIT_NAME Type1b

*\$MODEL \Solar Thermal Collectors\Quadratic Efficiency Collector\2nd-Order Incidence Angle
Modifiers\Type1b.tmf

*\$POSITION 202 189

*\$LAYER Main #

PARAMETERS 11

1 ! 1 Number in series
2 ! 2 Collector area
4.190 ! 3 Fluid specific heat
1 ! 4 Efficiency mode
40.0 ! 5 Tested flow rate
0.80 ! 6 Intercept efficiency
13.0 ! 7 Efficiency slope
0.05 ! 8 Efficiency curvature
2 ! 9 Optical mode 2
0.2 ! 10 1st-order IAM
0.0 ! 11 2nd-order IAM

INPUTS 9

3,1 ! Type3b:Outlet fluid temperature ->Inlet temperature
3,2 ! Type3b:Outlet flow rate ->Inlet flowrate
2,1 ! Type109-TMY2:Ambient temperature ->Ambient temperature
2,18 ! Type109-TMY2:total radiation on tilted surface ->Incident radiation
2,12 ! Type109-TMY2:total radiation on horizontal ->Total horizontal radiation
2,14 ! Type109-TMY2:sky diffuse radiation on horizontal ->Horizontal diffuse radiation
0,0 ! [unconnected] Ground reflectance
2,22 ! Type109-TMY2:angle of incidence for tilted surface ->Incidence angle
2,23 ! Type109-TMY2:slope of tilted surface ->Collector slope

*** INITIAL INPUT VALUES

20.0 100.0 10.0 0. 0.0 0.0 0.2 13.75 0.

*-----

* Model "Type6" (Type 6)

*

UNIT 5 TYPE 6 Type6

*\$UNIT_NAME Type6

*\$MODEL .\HVAC\Auxiliary Heaters\Type6.tmf

*\$POSITION 339 189

*\$LAYER Water Loop #

PARAMETERS 4

5000 ! 1 Maximum heating rate

4.19 ! 2 Specific heat of fluid

0 ! 3 Overall loss coefficient for heater during operation

1 ! 4 Efficiency of auxiliary heater

INPUTS 5

4,1 ! Type1b:Outlet temperature ->Inlet fluid temperature

4,2 ! Type1b:Outlet flowrate ->Fluid mass flow rate

0,0 ! [unconnected] Control Function

0,0 ! [unconnected] Set point temperature

0,0 ! [unconnected] Temperature of surroundings

*** INITIAL INPUT VALUES

20 100 1 60 20

*-----

* Model "TYPE24" (Type 24)

*

UNIT 6 TYPE 24 TYPE24

*\$UNIT_NAME TYPE24

*\$MODEL .\Utility\Integrators\Quantity Integrator\TYPE24.tmf

*\$POSITION 503 212

*\$LAYER Main #

PARAMETERS 2

STOP ! 1 Integration period

0 ! 2 Relative or absolute start time

INPUTS 2

4,3 ! Type1b:Useful energy gain ->Input to be integrated-1

5,3 ! Type6:Required heating rate ->Input to be integrated-2

*** INITIAL INPUT VALUES

0.0 0.0

*-----

* Model "Type25a" (Type 25)

*

UNIT 7 TYPE 25 Type25a

*\$UNIT_NAME Type25a

*\$MODEL .\Output\Printer\TRNSYS-Supplied Units\Type25a.tmf

*\$POSITION 641 210

*\$LAYER Outputs #

PARAMETERS 10

STEP ! 1 Printing interval

START ! 2 Start time

STOP ! 3 Stop time

```

32      ! 4 Logical unit
2      ! 5 Units printing mode
0      ! 6 Relative or absolute start time
-1     ! 7 Overwrite or Append
-1     ! 8 Print header
0      ! 9 Delimiter
1      ! 10 Print labels
INPUTS 2
6,1    ! TYPE24:Result of integration-1 ->Input to be printed-1
6,2    ! TYPE24:Result of integration-2 ->Input to be printed-2
*** INITIAL INPUT VALUES
QColl QAux
*** External files
ASSIGN "***.out" 32
*!? Output File for printed results |1000
*-----

* Model "Type65d" (Type 65)
*

UNIT 8 TYPE 65      Type65d
*$UNIT_NAME Type65d
*$MODEL \Output\Online Plotter\Online Plotter Without File\Type65d.tmf
*$POSITION 506 85
*$LAYER Main #
PARAMETERS 12
3      ! 1 Nb. of left-axis variables
2      ! 2 Nb. of right-axis variables
-100   ! 3 Left axis minimum
100    ! 4 Left axis maximum
0.0    ! 5 Right axis minimum
10000  ! 6 Right axis maximum
1      ! 7 Number of plots per simulation
12     ! 8 X-axis gridpoints
0      ! 9 Shut off Online w/o removing
-1     ! 10 Logical unit for output file
0      ! 11 Output file units
0      ! 12 Output file delimiter
INPUTS 5
3,1    ! Type3b:Outlet fluid temperature ->Left axis variable-1
4,1    ! Type1b:Outlet temperature ->Left axis variable-2
5,1    ! Type6:Outlet fluid temperature ->Left axis variable-3
4,3    ! Type1b:Useful energy gain ->Right axis variable-1
5,3    ! Type6:Required heating rate ->Right axis variable-2
*** INITIAL INPUT VALUES
ToPump ToColl ToAux QColl QAux
LABELS 3
"Temperatures"
"Heat transfer rates"
"Graph 1"
*-----

* Model "Type14h" (Type 14)
*

```

UNIT 9 TYPE 14 Type14h

*\$UNIT_NAME Type14h

*\$MODEL .\Utility\Forcing Functions\General\Type14h.tmf

*\$POSITION 55 285

*\$LAYER Main #

PARAMETERS 12

0	! 1 Initial value of time
0	! 2 Initial value of function
8	! 3 Time at point-1
0	! 4 Value at point -1
8	! 5 Time at point-2
1	! 6 Value at point -2
18	! 7 Time at point-3
1	! 8 Value at point -3
18	! 9 Time at point-4
0	! 10 Value at point -4
24	! 11 Time at point-5
0	! 12 Value at point -5

*

END



ก-2 : รหัสโปรแกรมของแบบจำลองที่ใช้ศึกษา
VERSION 16.1

```

*****
*** Units
*****
*** Control cards
*****
* START, STOP and STEP
CONSTANTS 3
START=2716
STOP=2740
STEP=1
* User defined CONSTANTS
EQUATIONS 4
DAY=INT(START/24)+1
N_DAYS=INT((STOP-START)/24.000001) + 1
N_WEEKS=INT((STOP-START)/168.000001) + 1
N_YEARS=INT((STOP-START)/8760.000001) + 1
SIMULATION START      STOP  STEP  ! Start time      End time      Time step
TOLERANCES 0.001 0.001      ! Integration      Convergence
LIMITS 50 100 50      ! Max iterations Max warnings Trace limit
DFQ 1      ! TRNSYS numerical integration solver method
WIDTH 120      ! TRNSYS output file width, number of characters
LIST      ! NOLIST statement
MAP      ! MAP statement
SOLVER 0 1 1      ! Solver statement      Minimum relaxation factor
      Maximum relaxation factor
NAN_CHECK 0      ! Nan DEBUG statement
OVERWRITE_CHECK 0      ! Overwrite DEBUG statement
TIME_REPORT 0      ! disable time report
EQSOLVER 0      ! EQUATION SOLVER statement

* Model "TMY-2 Data Reader" (Type 89)

UNIT 6 TYPE 89      TMY-2 Data Reader
*$UNIT_NAME TMY-2 Data Reader
*$MODEL \Utility\Data Readers\Standard Weather Files\Tmy2\Skip N Lines before
starting\TYPE89d.tmf
*$POSITION 148 306
*$LAYER Main #
PARAMETERS 2
-2      ! 1 Mode
31      ! 2 Logical unit
*** External files
ASSIGN "E:\Program Files\Tmsys16\Weather\Meteonorm\Asia\TH-Nakhon-Sawan-484000.tmf" 31
*|? Which file contains the TMY2 weather information? |1000
*-----
* Model "Radiation Processor" (Type 16)

UNIT 5 TYPE 16      Radiation Processor
*$UNIT_NAME Radiation Processor

```

*\$MODEL \Physical Phenomena\Radiation Processors\Total Horiz, Direct Normal Known

(Mode=4)\No Radiation Smoothing\TYPE16g.tmf

*\$POSITION 320 178

*\$LAYER Weather / Data Files #

PARAMETERS 9

4 ! 1 Horiz. radiation mode

1 ! 2 Tracking mode

3 ! 3 Tilted surface mode

DAY ! 4 Starting day

15 ! 5 Latitude

4871.0 ! 6 Solar constant

-5.27 ! 7 Shift in solar time

2 ! 8 Not used

1 ! 9 Solar time?

INPUTS 7

6,4 ! TMY-2 Data Reader:Global horizontal radiation ->Total radiation on horizontal surface

6,3 ! TMY-2 Data Reader:Direct normal radiation ->Direct normal beam radiation

6,99 ! TMY-2 Data Reader:Time of last read ->Time of last data read

6,100 ! TMY-2 Data Reader:Time of next read ->Time of next data read

0,0 ! [unconnected] Ground reflectance

0,0 ! [unconnected] Slope of surface

0,0 ! [unconnected] Azimuth of surface

*** INITIAL INPUT VALUES

0 0 0.0 1.0 0.2 15 0.0

*

* Model "Type541j" (Type 541)

UNIT 8 TYPE 541 Type541j

*\$UNIT_NAME Type541j

*\$MODEL \Solar Library (TESS)\Integral Collector Storage\Flat Plate Type\With HX\Serpentine Tube\Theoretical IAM's\Type541j.tmf

*\$POSITION 430 370

*\$LAYER Main #

*\$# Versions of this ICS model are available for different HX configurations (vertical tube bank, horizontal tube

*\$# bank, and coiled tube HX) and for different incidence angle modifier accounting (single axis data file,

*\$# bi-axial data file, cover and absorber properties, etc.) for a small upgrade fee. Contact TESS at (608) 274-

*\$# 2577 for more information.

PARAMETERS 42

5 ! 1 # of Tank Nodes

1 ! 2 Noding scheme

4 ! 3 Heat Exchanger Geometry

1 ! 4 Tank Length

2 ! 5 Tank Width

0.07 ! 6 Tank Depth

1 ! 7 Tank Fluid

0 ! 8 Percent Volume of Tank Fluid

24 ! 9 Initial Tank Temperature

118.799997 ! 10 Edge Loss Coefficient

118.799997 ! 11 Bottom Loss Coefficient

-1 ! 12 Additional Thermal Conductivity Mode

5 ! 13 IAM Mode

0.9 ! 14 Plate absorptance

1	! 15 Number of covers
1.01	! 16 Cover refractive index
0.05	! 17 Extinction-thickness product
5	! 18 # of HX Nodes
5	! 19 Tank Node for HX Node-1
0.2	! 20 Fraction of HX Length for Node-1
4	! 21 Tank Node for HX Node-2
0.2	! 22 Fraction of HX Length for Node-2
3	! 23 Tank Node for HX Node-3
0.2	! 24 Fraction of HX Length for Node-3
2	! 25 Tank Node for HX Node-4
0.2	! 26 Fraction of HX Length for Node-4
1	! 27 Tank Node for HX Node-5
0.2	! 28 Fraction of HX Length for Node-5
1	! 29 Heat Exchanger Fluid
0	! 30 Percent Volume of HX Fluid
1	! 31 Multiplier for Nat. Convection Corr.
0	! 32 Exponent for Rayleigh #
1.0	! 33 Geometry Factor
0	! 34 Geometry Factor Exponent
0.018	! 35 HX Tube Inner Diameter
0.02	! 36 HX Tube Outer Diameter
0.756	! 37 HX Wall Conductivity
2	! 38 Length of Heat Exchanger Tube
10	! 39 Number of Tubes
0.0	! 40 Header Volume
24	! 41 Initial HX Temperature
0.0	! 42 HX Cross Sectional Area
INPUTS 30	
Toutlet	! Equa:Toutlet ->HX Inlet Temperature
0,0	! [unconnected] HX Inlet Flowrate
6,5	! TMY-2 Data Reader:Dry bulb temperature ->Top Loss Temperature
5,7	! Radiation Processor:Total radiation on surface 1 ->Total Incident Solar Radiation
5,6	! Radiation Processor:Horizontal diffuse radiation ->Horizontal Diffuse Radiation
5,4	! Radiation Processor:Total horizontal radiation ->Total Solar on Horizontal
5,9	! Radiation Processor:Sky diffuse on surface 1 ->Incident Diffuse Radiation
5,10	! Radiation Processor:Incidence angle for surface 1 ->Incidence Angle
5,2	! Radiation Processor:Solar zenith angle ->Solar Zenith Angle
5,3	! Radiation Processor:Solar azimuth angle ->Solar Azimuth Angle
5,11	! Radiation Processor:Slope of surface 1 ->Top Surface Slope
0,0	! [unconnected] Collector Azimuth
0,0	! [unconnected] Ground Reflectance
6,5	! TMY-2 Data Reader:Dry bulb temperature ->Edge&Botom Loss Temperature
6,5	! TMY-2 Data Reader:Dry bulb temperature ->Safety Sink Temperature
0,0	! [unconnected] Inversion Mixing Flow Rate
0,0	! [unconnected] Modifier for Calculated Tau_Alpha Product
0,0	! [unconnected] Top Loss Coefficient
0,0	! [unconnected] Additional top losses
0,0	! [unconnected] Overall safety loss coefficient-1
0,0	! [unconnected] Overall safety loss coefficient-2
0,0	! [unconnected] Overall safety loss coefficient-3
0,0	! [unconnected] Overall safety loss coefficient-4
0,0	! [unconnected] Overall safety loss coefficient-5
0,0	! [unconnected] Internodal thermal conductivity-1
0,0	! [unconnected] Internodal thermal conductivity-2

```
0          ! 11 Output file units
0          ! 12 Output file delimiter
INPUTS 3
8,1        ! Type541j:Temperature at HX Outlet ->Left axis variable-1
6,5        ! TMY-2 Data Reader:Dry bulb temperature ->Left axis variable-2
10,1       ! Type57:Output ->Right axis variable
*** INITIAL INPUT VALUES
Ttank-C Ta-C GT-W/m2
LABELS 3
"Temperatures"
"Heat transfer rates"
"Graph 1"
*-----
END
```



บรรณานุกรม

เอกสารอ้างอิงของโครงการวิจัย

- [1] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. (17 ก.พ. 2554). รายงานสถิติพลังงานของประเทศไทย 2554. กระทรวงพลังงาน. สืบค้นจาก <http://www.eppo.go.th/info/cd-2011/pdf/cha1.pdf>
- [2] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. (6 ต.ค. 2554). รายงานประจำปี 2553. กระทรวงพลังงาน. สืบค้นจาก <http://www.eppo.go.th/doc/report-2553/annual-eppo-2553.pdf>
- [3] Doerte Laing, Wolf-Dieter Steinmann, Rainer Tamme, Christoph Richter. Solid media thermal storage for parabolic trough power plants. *Solar Energy* 80 (2006) 1283-1289.
- [4] Pilkington Solar International, GmbH. Survey of thermal storage for parabolic trough power plants. National Renewable Energy Laboratory; 2000 [SR-550-27925].
- [5] Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison: Manual of TRNSYS 16.
- [6] Rangsit Sarachitti, Chaicharn Chotetanorn, Charoenporn Lertsatitthanakorn, Montana Rungsiyopas. Thermal performance analysis and economic evaluation of roof-integrated solar concrete collector. (2011). *Energy and Buildings*. 43, 1403-1408.
- [7] อติศักดิ์ ปัญญาธิม. (2544). การศึกษาสมรรถนะของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบคอนกรีตเปลือย. วิทยานิพนธ์ วศ.ม., มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.
- [8] P.B.L. Chaurasia. Solar water heaters based on concrete collectors. (2000). *Energy*. 25, 703-716.
- [9] E. BILGEN และ M.A. RICHARD. (2001). HORIZONTAL CONCRETE SLABS AS PASSIVE SOLAR COLLECTORS. *Solar Energy*. 72(5), 405-413.
- [10] Nayak, J.K., Sukhatme, S.P., Limaye, R.G., and Bopshetty, S.V, (1989). Performance studies on solar concrete collectors. *Solar Energy* 42(1), 45-56.
- [11] Matrawy, K.K. and Farkas, I. (1997). Comparison study for three types of solar collectors for water heating. *Energy Convers. Mgmt.* 38(9), 861-869.