



การศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก  
ที่ใช้ของไหลนาโนเป็นสารทำงาน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก  
ที่ใช้ของไหลนาโนเป็นสารทำงาน

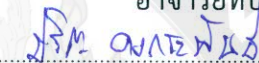
ณัฐฐา ลือชาติเมธิกุล

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการสมบูรณ์ของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญ คงกระพันธ์)

วันที่ 16 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2562

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรวิศ พลวงษ์ศรี)

วันที่ 23 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2562

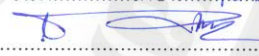
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อักรินทร์ อินทนิเวศน์)

วันที่ 23 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2562

ประธานอาจารย์ประจำหลักสูตร



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ ไชยชนะ)

วันที่ 24 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2562

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ เม่งอำพัน)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 27 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2562

ชื่อเรื่อง	การศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลาที่ใช้ของไหลนาโนเป็นสารทำงาน
ชื่อผู้เขียน	นางสาวณัฐรา ลือชาติเมธิกุล
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญ คงกระพันธ์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลาที่ใช้ของไหลนาโนเป็นสารทำงาน โดยทำการทดสอบ ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทนมหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลาที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีขนาดพื้นที่รับรังสีอาทิตย์โดยประมาณ 2 m<sup>2</sup> ทำการทดสอบโดยใช้สารทำงานนาโนกราฟีนที่มีน้ำเป็นของไหลพื้นฐาน (Graphene Nano-platelets; GNP/H<sub>2</sub>O) ที่ค่าความเข้มข้นเท่ากับ 0.050 %wt 0.075 %wt และ 0.100 %wt และอัตราการไหลของสารทำงานที่ 1.0 LPM 1.5 LPM และ 2.0 LPM ตามลำดับ ทำการทดสอบระบบที่ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยในช่วง 300 – 900 W/m<sup>2</sup> ผลจากการผสมอนุภาคนาโนกราฟีนกับน้ำทำให้ได้สารทำงานนาโนที่มีค่าความหนาแน่น ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงกว่าน้ำซึ่งเป็นของไหลฐานเท่ากับ 0.062 % 4.67 % และ 4.67 % ตามลำดับ แต่ในทางกลับกันค่าความจุความร้อนจำเพาะของสารทำงานนาโนที่ได้มีค่าต่ำกว่าน้ำเท่ากับ 0.031 % ผลการทดสอบพบว่าระบบผลิตน้ำร้อนต้นแบบที่ใช้สารทำงานนาโนมีค่าประสิทธิภาพของระบบ ค่าประสิทธิภาพและสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์สูงกว่าระบบที่ใช้ น้ำเป็นสารทำงานในทุกกรณีทดสอบ โดยสภาวะทดสอบที่ให้ผลดีที่สุดคือกรณีใช้สารทำงานนาโนเข้มข้น 0.100 %wt ที่อัตราการไหลเชิงมวลเท่ากับ 2.0 LPM ตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 55.16 % สูงกว่ากรณีใช้น้ำเท่ากับ 3.36 % โดยมีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยตลอดวันที่ทำการทดสอบเท่ากับ 43.59 % สูงกว่าระบบที่ใช้น้ำเท่ากับ 3.88 % ตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่า  $F_R (\tau\alpha)_e$  เท่ากับ 0.5795 สูงกว่ากรณีใช้น้ำในสภาวะทดสอบเดียวกันเท่ากับ 12.70 % และมีค่า  $F_{RUL}$  เท่ากับ 8.1408 ต่ำกว่ากรณีใช้น้ำในสภาวะทดสอบเดียวกันเท่ากับ 33.01 % และการใช้สารทำงานนาโนที่มีค่าความเข้มข้นและอัตราการไหลดังกล่าวยังทำให้ค่าประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อนมีค่าสูงสุดเท่ากับ 68.14 % โดยมีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยตลอดวันเท่ากับ 44.08 % ซึ่งค่าดังกล่าวสูงกว่าระบบที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานในสภาวะการทดสอบเดียวกันเท่ากับ 16.29 % และ 7.07 % ตามลำดับ โดยระบบต้นแบบที่ใช้สารทำงานนาโนสามารถผลิตน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 46 °C สูงกว่าระบบที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน 7.78 %

Title	THERMAL PERFORMANCE STUDY OF SOLAR PARABOLIC TROUGH COLLECTOR USING NANOFLUID AS A WORKING FLUID
Author	Miss Nattha Luechatmatikul
Degree	Master of Engineering in Renewable Energy
Advisor Committee Chairperson	Assist. Prof. Parin Khongkrapan, Ph.D.

### ABSTRACT

This research aims to study thermal performance of solar parabolic trough collector using nanofluid as a working fluid, held at School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai, Thailand. The experiment studied using reflector area of solar parabolic trough collector at 2 m<sup>2</sup> with Graphene nanofluid using water as a base fluid (Graphene Nano-platelets; GNP/H<sub>2</sub>O). Concentration at 0.050 %wt, 0.075 %wt, and 0.100 %wt used in this experiment, with flow rate at 1.0 LPM, 1.5 LPM and 2.0 LPM, respectively. The average solar radiation investigated around 300 – 900 W/m<sup>2</sup>. By adding graphene nanoparticles into water, called graphene nanofluid, fluid properties show higher density, heat conduction coefficient and heat convection coefficient than water by 0.062% 4.67% and 4.67%, respectively. On the other hand, nanofluid heat capacity is less than water by 0.031%. By using nanofluid, result shows higher system efficiency, collector efficiency and performance than water. The highest efficiency is 55.16%, using nanofluid concentration 0.100%wt flow rate 2.0 LPM, which is 3.36% higher than using water. The average efficiency at the test day using nanofluid is 43.59%, which is 3.88% higher than using water. Collector using nanofluid in the same conditions shows  $F_R(\tau\alpha)_e$  0.5795 which is 12.70% higher than using water, and  $F_R U_L$  8.1408 which is 33.01% lower than using water. Hot water system efficiency is 68.14% and average efficiency is 44.08% which is higher than using water 16.29% and 7.07%, respectively. Moreover, system using 0.100%wt nanofluid at 2.0 LPM shows highest hot water temperature at 46 °C which is 7.78% higher than using water.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญ คงกระพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สราวุธ พลวงษ์ศรี และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อักรินทร์ อินทนิเวศน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมทั้งสองท่าน สำหรับความช่วยเหลือและคำปรึกษาต่างๆที่มอบให้กับผู้วิจัยเป็นผลให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ สำหรับความรู้ทางด้านพลังงานทดแทนที่มอบให้กับผู้วิจัย รวมถึงบุคลากรภายในวิทยาลัยพลังงานทดแทน ที่คอยให้ความช่วยเหลือให้เรื่องต่างๆ ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.สุรศักดิ์ กุญมาลี อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ สำหรับความช่วยเหลือทางด้านอนุภาคนาโน ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ธรรณิศร์ ดีทายาท อาจารย์ประจำภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่สละเวลามาเป็นประธานสอบป้องกันวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ สำหรับทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์นี้ใน “โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียนในระดับบัณฑิตศึกษา”

ขอขอบคุณ นายพงศ์สถิตย์ ศรีภักดิ์ สำหรับความช่วยเหลือในการสร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณ นางสาวรัชฎาภรณ์ อินเกิด ที่คอยให้คำปรึกษาด้านเอกสารต่าง ๆ

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณพระเจ้าและกราบขอบพระคุณครอบครัว และมิตรสหายทุกท่าน ที่คอยสนับสนุน ช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจ รวมถึงความอดทนที่ทุกท่านมีต่อผู้วิจัยมาจนสุดทาง

ณัฐชา ลือชาติเมธิกุล

พฤษภาคม 2562

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
ABSTRACT	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
สารบัญตาราง	(8)
สารบัญภาพ	(9)
สารบัญตารางผนวก	(12)
สารบัญภาพผนวก	(13)
อักษรย่อและสัญลักษณ์	(14)
บทที่ 1 บทนำ	1
ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
ขอบเขตของงานวิจัย	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร	5
ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลา	5
ของไหลนาโน	8
การถ่ายเทความร้อน	11
สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์	13
ระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์	15
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการวิจัย	26
วัสดุอุปกรณ์ในการวิจัย	26
เครื่องมือวัด	31
วิธีดำเนินงานวิจัย	34

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	38
ผลการออกแบบและสร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลาสำหรับ ผลิตน้ำร้อนต้นแบบ	38
ผลของการผสมอนุภาคนาโนกราฟีนต่อสมบัติของสารทำงาน	40
ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์	45
สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์	52
ประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อน	61
วิจารณ์ผลการทดลอง	62
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	64
สรุปผลการทดลอง	64
ข้อเสนอแนะ	66
บรรณานุกรม	67
ภาคผนวก	71
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณ	72
ภาคผนวก ข ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	82
ภาคผนวก ค งานวิจัยที่เผยแพร่	101
ภาคผนวก ง ประวัติผู้วิจัย	115

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ประสิทธิภาพที่อัตราการไหลและความเข้มข้นต่าง ๆ	18
2	คุณสมบัติทางความร้อนของของไหลนาโน $Al_2O_3$ ที่อุณหภูมิ 300, 400 และ 500 K	19
3	ค่า zero-loss และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของสารทำงานที่อัตราการไหลต่าง ๆ	25
4	แสดงคุณสมบัติของสารนาโนกับน้ำ	35
5	ผลของการผสมอนุภาคนาโนต่อสมบัติด้านค่าความหนาแน่น ( $\rho$ ) และค่าความจุความร้อนจำเพาะ ( $c_p$ ) ของสารทำงาน	41
6	ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านค่าความหนาแน่น ( $\rho$ ) ต่อค่าอัตราการไหลเชิงมวล ( $\dot{m}$ ) ของสารทำงาน	42
7	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ) ของไหลนาโนกราฟีนในงานวิจัยนี้	44
8	ค่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ต้นแบบ	51
9	ค่าสมรรถนะของของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ต้นแบบ	60



## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย (พ.ศ. 2542)	1
2	ไดอะแกรมแสดงลักษณะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกและการรับรังสีอาทิตย์	5
3	ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก	6
4	การระบุตำแหน่งต่างๆ ของรูปพาราโบล่า	7
5	เส้นแสดงสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์	15
6	ประสิทธิภาพทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบที่ใช้น้ำปราศจากไอออนและของไหลนาโนกราฟีนที่ปริมาณอนุภาคต่างๆ	16
7	สมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศโดยใช้ของไหลนาโนกราฟีน	17
8	ค่าสมรรถนะของการทดสอบท่อรับรังสีทั้ง 4 แบบ เมื่อใช้สารทำงานเป็นของไหลนาโน MCNT-oil	20
9	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกที่ใช้ของไหลนาโน $Al_2O_3$ และ $Fe_2O_3$	21
10	สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์เมื่อใช้ของไหลนาโนและน้ำ	22
11	การไหลเวียนของสารทำงานภายในระบบผลิตน้ำร้อน 1) แผ่นสะท้อนรังสีแบบพาราโบลิก 2) ท่อรับรังสีอาทิตย์ 3) ระบบท่อลำเลียงสารทำงาน 4) ถังกักเก็บน้ำร้อน 5) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และ 6) ปั๊มน้ำ	27
12	ปั๊มสารทำงาน	28
13	อินเวอร์เตอร์	28
14	วาล์วน้ำ	29
15	อนุภาคนาโนกราฟีน	30
16	เครื่องอัลตราโซนิก	30
17	เครื่องวัดความเข้มรังสีอาทิตย์	31
18	สายวัดอุณหภูมิ	32
19	เครื่องบันทึกข้อมูล	32
20	ตัววัดอุณหภูมิแวดล้อม	33
21	เครื่องวัดอัตราการไหล	33

ภาพที่		หน้า
22	แผนผังการดำเนินงาน	34
23	สารนาโนกราฟีนที่ผสมในเครื่องอัลตราโซนิก	36
24	ตำแหน่งการเก็บข้อมูลอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆ ภายในระบบผลิตน้ำร้อนต้นแบบ	37
25	ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกต้นแบบ	38
26	โครงเหล็กรูปทรงพาราโบลิกที่ทำการออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	39
27	ผลการทดสอบเมื่อใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโน 0.050 %wt อัตราการไหล 1.0 LPM	46
28	ผลการทดสอบเมื่อใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโน 0.050 %wt อัตราการไหล 1.5 LPM	46
29	ผลการทดสอบเมื่อใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโน 0.050 %wt อัตราการไหล 2.0 LPM	47
30	ผลการทดสอบเมื่อใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโน 0.075 %wt อัตราการไหล 1.0 LPM	47
31	ผลการทดสอบเมื่อใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโน 0.075 %wt อัตราการไหล 1.5 LPM	48
32	ผลการทดสอบเมื่อใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโน 0.075 %wt อัตราการไหล 2.0 LPM	48
33	ผลการทดสอบเมื่อใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโน 0.100 %wt อัตราการไหล 1.0 LPM	49
34	ผลการทดสอบเมื่อใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโน 0.100 %wt อัตราการไหล 1.5 LPM	49
35	ผลการทดสอบเมื่อใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโน 0.100 %wt อัตราการไหล 2.0 LPM	50
36	สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก กรณีใช้ของไหลนาโนกราฟีน ที่ความเข้มข้น 0.050 %wt และน้ำเป็นสารทำงาน ที่อัตราการไหล 1.0 LPM	53
37	สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก กรณีใช้ของไหลนาโนกราฟีน ที่ความเข้มข้น 0.050 %wt และน้ำเป็นสารทำงาน ที่อัตราการไหล 1.5 LPM	54
38	สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก กรณีใช้ของไหลนาโนกราฟีน ที่ความเข้มข้น 0.050 %wt และน้ำเป็นสารทำงาน ที่อัตราการไหล 2.0 LPM	54

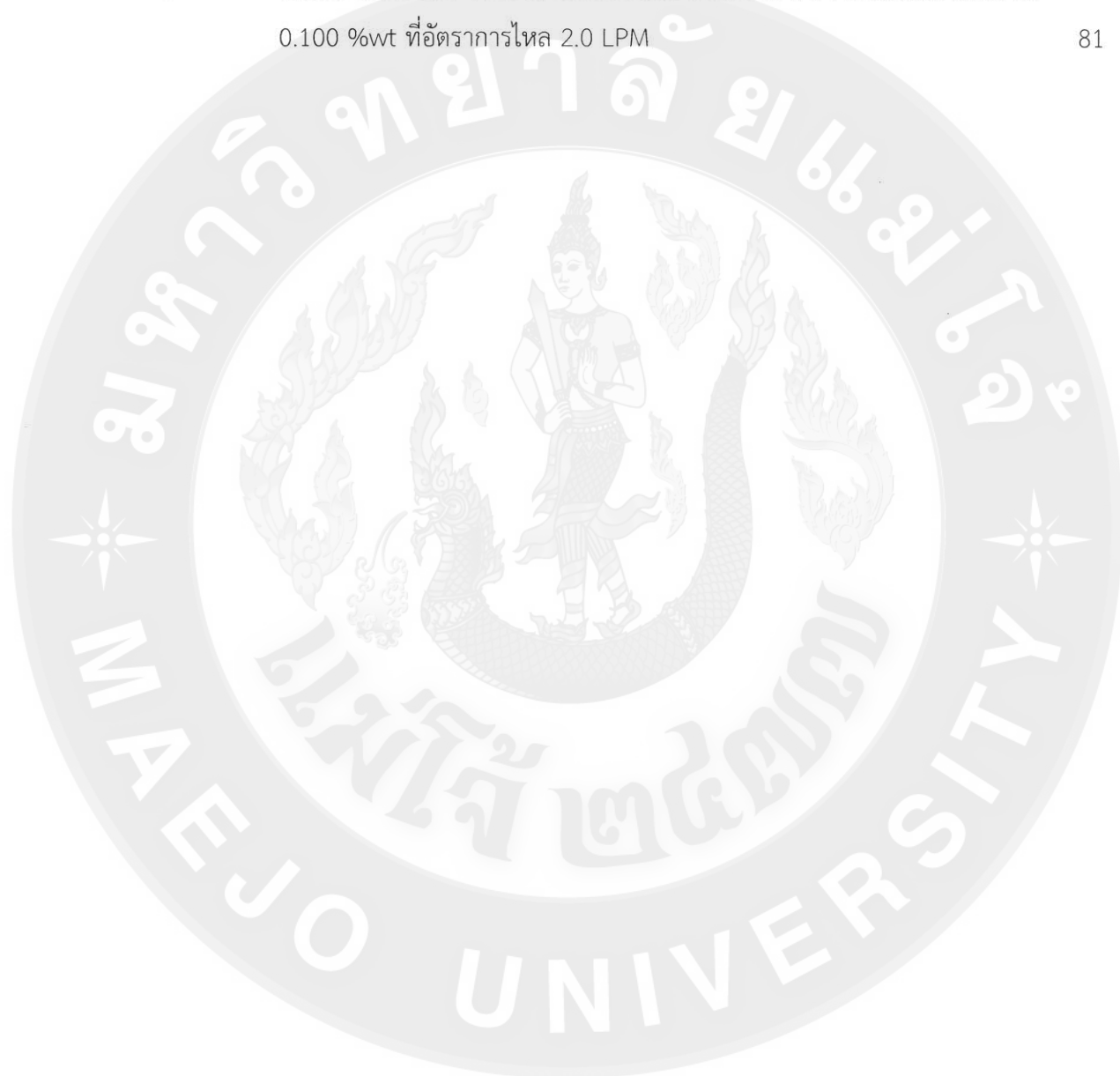
ภาพที่		หน้า
39	สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก กรณีใช้ของไหลนาโนกราฟีน ที่ความเข้มข้น 0.075 %wt และน้ำเป็นสารทำงาน ที่อัตราการไหล 1.0 LPM	55
40	สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก กรณีใช้ของไหลนาโนกราฟีน ที่ความเข้มข้น 0.075 %wt และน้ำเป็นสารทำงาน ที่อัตราการไหล 1.5 LPM	55
41	สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก กรณีใช้ของไหลนาโนกราฟีน ที่ความเข้มข้น 0.075 %wt และน้ำเป็นสารทำงาน ที่อัตราการไหล 2.0 LPM	56
42	สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก กรณีใช้ของไหลนาโนกราฟีน ที่ความเข้มข้น 0.100 %wt และน้ำเป็นสารทำงาน ที่อัตราการไหล 1.0 LPM	56
43	สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก กรณีใช้ของไหลนาโนกราฟีน ที่ความเข้มข้น 0.100 %wt และน้ำเป็นสารทำงาน ที่อัตราการไหล 1.5 LPM	57
44	สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก กรณีใช้ของไหลนาโนกราฟีน ที่ความเข้มข้น 0.100 %wt และน้ำเป็นสารทำงาน ที่อัตราการไหล 2.0 LPM	57
45	สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก กรณีใช้ของไหลนาโนกราฟีน ที่ความเข้มข้น 0.050 %wt 0.075 %wt และ 0.100 %wt ที่อัตราการไหล 1.0 LPM	58
46	สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก กรณีใช้ของไหลนาโนกราฟีน ที่ความเข้มข้น 0.050 %wt 0.075 %wt และ 0.100 %wt ที่อัตราการไหล 1.5 LPM	59
47	สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก กรณีใช้ของไหลนาโนกราฟีน ที่ความเข้มข้น 0.050 %wt 0.075 %wt และ 0.100 %wt ที่อัตราการไหล 2.0 LPM	59

## สารบัญตารางผนวก

ตารางผนวกที่		หน้า
1	แสดงสมบัติขององค์ประกอบสารทำงานนาโนกราฟีน	73
2	ผลการทดสอบเมื่อใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโน 0.050 %wt อัตราการไหล 1.0 LPM	83
3	ผลการทดสอบเมื่อใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโน 0.050 %wt อัตราการไหล 1.5 LPM	85
4	ผลการทดสอบเมื่อใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโน 0.050 %wt อัตราการไหล 2.0 LPM	87
5	ผลการทดสอบเมื่อใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโน 0.075 %wt อัตราการไหล 1.0 LPM	89
6	ผลการทดสอบเมื่อใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโน 0.075 %wt อัตราการไหล 1.5 LPM	91
7	ผลการทดสอบเมื่อใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโน 0.075 %wt อัตราการไหล 2.0 LPM	93
8	ผลการทดสอบเมื่อใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโน 0.100 %wt อัตราการไหล 1.0 LPM	95
9	ผลการทดสอบเมื่อใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโน 0.100 %wt อัตราการไหล 1.5 LPM	97
10	ผลการทดสอบเมื่อใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโน 0.100 %wt อัตราการไหล 2.0 LPM	99

## สารบัญภาพผนวก

ภาพผนวกที่		หน้า
1	เส้นแสดงสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ กรณีใช้สารทำงานนาโนความเข้มข้น 0.100 %wt ที่อัตราการไหล 2.0 LPM	81



### อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่	$m^2$
$A_a$	พื้นที่ของช่องรับแสง	$m^2$
$A_r$	พื้นที่ของตัวรับรังสี	$m^2$
$c_p$	ความจุความร้อนจำเพาะ	$kJ/kg \cdot K$
$F_R$	แฟกเตอร์การดึงความร้อนมาใช้ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์	
$I_T$	ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์	$W/m^2$
h	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน	$W/m^2 \cdot K$
k	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน	$W/m \cdot K$
$\dot{m}$	อัตราการไหลเชิงมวล	$kg/s$
S	ปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืน	$W/m^2$
T	อุณหภูมิ	$^{\circ}C, K$
$U_L$	สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม	$W/m^2 \cdot K$

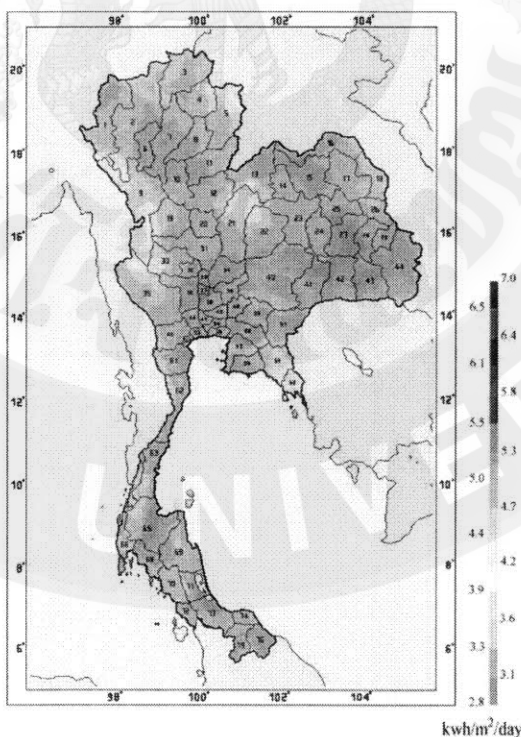
สัญลักษณ์กรีก	ความหมาย	หน่วย
$(\tau\alpha)_e$	ประสิทธิภาพเชิงแสงของตัวเก็บรังสีอาทิตย์	
$\beta$	มุมเอียง	
$\rho$	ค่าความกลม	
$\eta$	ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์	
$\mu$	ความหนืด	$kg/m \cdot s$
$\rho$	ความหนาแน่น	$kg/m^3$

## บทที่ 1

### บทนำ

#### ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ประเทศไทยมีการใช้พลังงานทดแทนในรูปของพลังงานความร้อน พลังงานไฟฟ้า และเชื้อเพลิงชีวภาพ ในปี 2558 อยู่ที่ 10,077 ktoe เพิ่มขึ้น 11.7% ซึ่งการใช้ความร้อนและไฟฟ้าที่ผลิตจากพลังงานทดแทน (ประกอบด้วย พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ ก๊าซชีวภาพ เชื้อเพลิงชีวมวล และเชื้อเพลิงขยะ) มีปริมาณ 6,579 ktoe (65.3%) และ 1,556 ktoe (15.4%) ตามลำดับ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2559) ซึ่งในส่วนของพลังงานแสงอาทิตย์นั้น ประเทศไทยมีค่าผลรวมรังสีของดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ทั่วประเทศประมาณ 18-19 MJ/m<sup>2</sup>/day แสดงให้เห็นว่าประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2542)



ภาพที่ 1 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย (พ.ศ. 2542)

ที่มา: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2542)

เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ถือเป็นพลังงานทดแทนที่ยั่งยืน สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทุกพื้นที่ ทั้งยังเป็นพลังงานที่สะอาด พลังงานแสงอาทิตย์สามารถนำไปใช้ได้ 2 รูปแบบหลัก คือ การใช้เพื่อผลิตไฟฟ้า โดยการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell หรือ photovoltaic cell (PV)) และ การใช้เพื่อผลิตความร้อน เป็นระบบเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานความร้อนผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar collector) สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น การผลิตน้ำร้อน หรือการอบแห้ง ในส่วนของการผลิตน้ำร้อนนั้น ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ มีหน้าที่สะสมพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์โดยอาศัยหลักการเบื้องต้นของแสง เช่น การสะท้อนแสง (Reflection) และการดูดกลืนแสง (Absorption) แล้วถ่ายเทความร้อนไปให้ตัวกลาง หรือสารทำงาน ที่เป็นของไหลพื้นฐาน (Base fluid) เช่น น้ำ หรือน้ำมันที่ลำเลียงไปตามระบบท่อ และในส่วนของระบบผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์นั้น มีส่วนประกอบอยู่ 2 ส่วน คือ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และถังเก็บน้ำร้อนที่ถูกออกแบบเพื่อใช้งานตามความประสงค์ของผู้ใช้งาน ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบันแบ่งตามรูปทรงของตัวเก็บรังสี เช่น ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบ (Flat plate) ตัวเก็บรังสีแบบท่อ (Evacuated tube) หรือตัวเก็บรังสีแบบรางพาราโบลา (Parabolic trough) (ทะนงศักดิ์, 2554) ซึ่งในต่างประเทศได้มีการศึกษาเกี่ยวกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลาอย่างหลากหลาย Conrado et al. (2017) ได้ทำการรายงานเกี่ยวกับสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลาจากการจำลองทางคณิตศาสตร์ Jebasingh and Herbert (2016) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพและสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบพาราโบลาในประเทศอินเดีย รวมถึงได้ทบทวนเกี่ยวกับการใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบพาราโบลาในงานต่างๆ เช่น การผลิตความร้อนสำหรับโรงไฟฟ้า หรือการกำจัดความเค็ม สำหรับการศึกษาเกี่ยวกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลาในประเทศไทยนั้น ประคบ และ อธิภัทร (2554) ได้ทำการวิเคราะห์หาขนาดในการผลิตชิ้นส่วนสำหรับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลาโดยใช้ฟังก์ชันไฮเพอร์โบลา โดยตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลาในงานวิจัยนี้ มีระยะโฟกัสอยู่ที่ 300 mm ความยาวแผงอยู่ที่ 1.52 m อัตราการไหลที่ใช้ในการทดสอบอยู่ที่ 3 LPM ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการสร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลา ซึ่งมีลักษณะของตัวสะท้อนรังสีเป็นรางพาราโบลา และมีตัวรับรังสีเป็นท่อทรงกระบอกสำหรับการศึกษาวิจัย

ของไหลที่ลำเลียงไปตามระบบท่อของตัวเก็บรังสีอาทิตย์เป็นตัวกลางสำคัญในการถ่ายเทความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ไปสู่พลังงานความร้อนที่นำมาใช้งาน จากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีในปัจจุบัน มีนวัตกรรมที่ได้ถูกพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการนำความร้อนของของไหลพื้นฐานต่างๆ โดยการผสมอนุภาคของแข็งที่มีขนาด 1-100 nm หรืออนุภาคนาโน เข้ากับของไหลพื้นฐาน ทำให้ของไหลพื้นฐานสามารถนำความร้อนได้ดีขึ้น ซึ่งอนุภาคนาโนนี้ได้รับความคาดหวังว่าจะเพิ่มค่าความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของของไหลได้ดีกว่าของของไหล



พื้นฐานทั่วไป (อดิเรก และวีระพันธ์, 2559) Sokhansefat et al. (2014) ได้ทำการศึกษาการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของท่อตูดกลืนรังสีของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิคโดยใช้ของไหลนาโนอลูมิเนียมออกไซด์ที่มีของไหลพื้นฐานเป็นน้ำมันสังเคราะห์ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบจากความเข้มข้นของของไหลนาโนที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนภายในท่อรับรังสีซึ่งสัดส่วนปริมาตรความเข้มข้นที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้อยู่ที่ 1% 3% และ 5% อุณหภูมิดำเนินการทดลองที่ 300 K 400 K และ 500 K และความเร็วขาเข้าของสารทำงานเป็น 4 m/s จากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของของไหลนาโน แต่เมื่ออุณหภูมิดำเนินการทดลองสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าต่ำลง Alireza et al.(2016) ทำการศึกษาผลกระทบของของไหลกราฟีนต่อสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ พบว่าการใช้ของไหลนาโนกราฟีนเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์เป็น 18.87% การใช้ของไหลนาโนเป็นสารทำงานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์เป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจและมีการศึกษาอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เพราะของไหลนาโนมีคุณสมบัติในการเพิ่มสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity; k) ให้กับของไหลพื้นฐาน งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลิคที่ใช้ของไหลนาโนเป็นสารทำงาน เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบและประยุกต์ใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิคที่ใช้ของไหลนาโนเป็นสารทำงานต่อไป

#### วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิคที่ใช้ของไหลนาโนเป็นสารทำงาน
2. เพื่อศึกษาความเข้มข้นของของไหลนาโนที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิค

### ขอบเขตของงานวิจัย

1. ใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกต้นแบบที่มีพื้นที่รับรังสีอาทิตย์ไม่เกิน  $3 \text{ m}^2$
2. ใช้ของไหลนาโนที่ค่าความเข้มข้น 3 ความเข้มข้น
3. ปรับอัตราการไหลของสารทำงานอย่างน้อย 3 อัตราการไหล
4. เปรียบเทียบสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกในกรณีที่ใช้ น้ำ และของไหลนาโนเป็นสารทำงาน

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

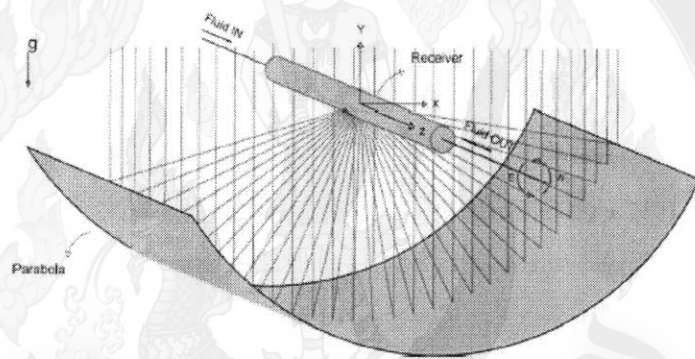
1. ทราบถึงผลกระทบต่อสมรรถนะทางความร้อนในการใช้ของไหลนาโนเป็นสารทำงานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก
2. สามารถเปรียบเทียบสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกที่ใช้น้ำและใช้ของไหลนาโนเป็นสารทำงาน
3. ทราบถึงผลกระทบต่อสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกเมื่อใช้อัตราการไหลที่แตกต่างกัน

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร

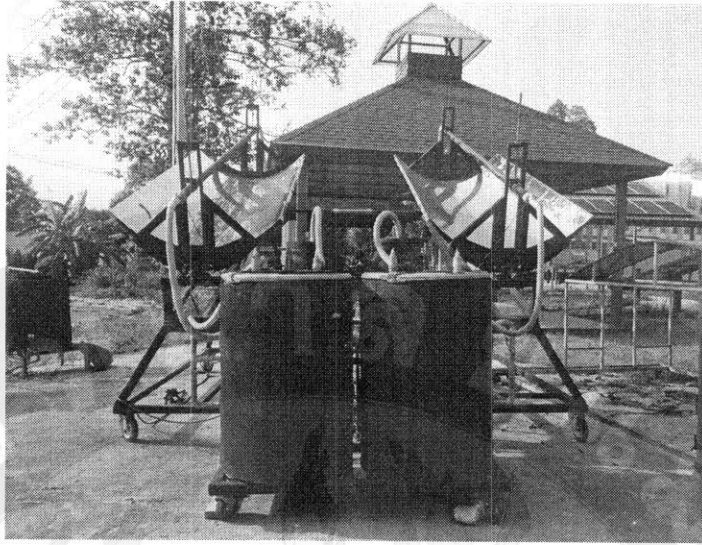
#### ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก (Solar parabolic trough collector) เป็นรูปแบบหนึ่งของตัวเก็บรังสีแบบรวมรังสี ที่ประกอบด้วยตัวรวมรังสี (Concentrator) ทรงพาราโบล่า ทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนแสงอาทิตย์ (Reflector) และตัวรับรังสี (Receiver) ลักษณะเป็นเส้นตรง (ทรงกระบอก) ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ไดอะแกรมแสดงลักษณะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกและการรับรังสีอาทิตย์  
ที่มา: Sokhansefat et al. (2014)

ในการสร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกสามารถออกแบบให้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์หมุนรอบแกนเหนือ-ใต้, ตะวันออก-ตะวันตก หรือเอียงและขนานกับแกนของโลก ซึ่งการออกแบบให้หมุนตามแกนต่าง ๆ ส่งผลให้ปริมาณรังสีที่ตกกระทบบนนั้นแตกต่างกัน โดยขึ้นกับเวลาและประสิทธิภาพในการติดตามดวงอาทิตย์ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวางตัวรับรังสีในลักษณะเอียงและขนานกับแกนของโลก และตั้งตัวรับรังสีในทิศเหนือ-ใต้ แสดงในภาพที่ 3



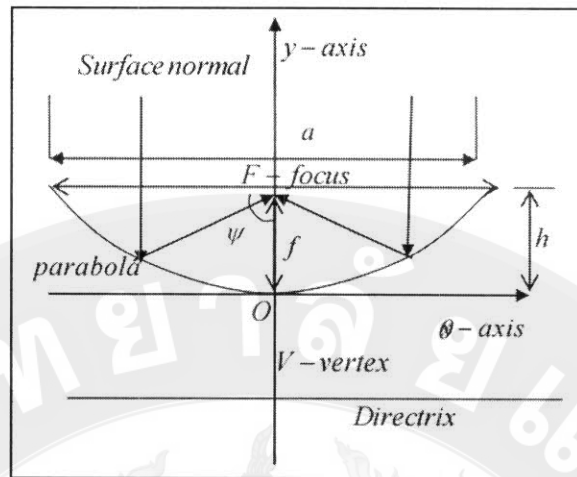
ภาพที่ 3 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลา

การสร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ใช้การวิเคราะห์หาขนาดของตัวรวมรังสีรูปพาราโบลา ซึ่งเป็นรูปทรงที่สามารถสะท้อนแสงหรือรังสีให้ตกกระทบบนกับแกนของพาราโบลาที่จุดโฟกัส ตัวรวมรังสีใช้แผ่นอะลูมิเนียมมีลักษณะเงา สามารถสะท้อนรังสีอาทิตย์ได้ดี ออกแบบโดยใช้สมการของพาราโบลาแบบหงายขึ้น (ประกอบ และธีรภัทร, 2554) คือ

$$y = \frac{x^2}{4f}$$

สมการที่ 1

ตำแหน่งและระยะต่างๆ ของรางพาราโบลาสามารถระบุได้ดังแสดงในภาพที่ 4 และการคำนวณหาระยะโฟกัส (f) ของรางพาราโบลาสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2



ภาพที่ 4 การระบุตำแหน่งต่างๆ ของรูปพาราโบลา

ที่มา: Mohammad

$$f = \frac{a^2}{16h}$$

เมื่อ  $f$  คือ ระยะโฟกัสของรางพาราโบลิก (m)  
 $a$  คือ ความกว้างของรางพาราโบลิก (m)  
 $h$  คือ ความสูงของรางพาราโบลิก (m)

สมการที่ 2

## ของไหลนาโน

ของไหลนาโน (Nanofluid) เป็นนวัตกรรมที่นำมาใช้เพื่อพัฒนาการถ่ายเทความร้อนในของไหล โดยการผสมอนุภาคของของแข็งจำพวกโลหะ หรือโลหะออกไซด์ที่มีขนาด 1-100 nm ในของไหลพื้นฐาน (Base fluid) การผสมอนุภาคของของแข็งลงในของไหลพื้นฐานนั้นมาจากแนวคิดที่ว่าของแข็งนั้นสามารถนำความร้อนได้ดีกว่าของเหลว (Omid Mahian และคณะ, 2013) ในการเตรียมสารทำงานที่เป็นของไหลนาโน (Nanofluid) มี 2 วิธี คือ แบบขั้นตอนเดียว (Single step method) ซึ่งสามารถเตรียมของไหลนาโนได้ในขั้นตอนเดียว มีข้อดีคือของไหลที่ได้มีความเสถียรในการคงสภาพของอนุภาคโลหะที่กระจายตัวอยู่ในของเหลวที่เป็นตัวกลางสูง แต่มีข้อด้อยคือมีต้นทุนสูงและยากต่อการขยายขนาดสำหรับการประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม และแบบสองขั้นตอน (Two steps method) มีขั้นตอนแรกเป็นการเตรียมอนุภาคโลหะนาโน ขั้นตอนที่สองเป็นการกระจายตัวอนุภาคนาโนที่เป็นโลหะลงในของไหลพื้นฐาน ซึ่งวิธีการเตรียมของไหลนาโนแบบสองขั้นตอนนี้มีข้อดีคือสะดวกต่อการขยายขนาดการผลิตในเชิงอุตสาหกรรม แต่ข้อด้อยคืออนุภาคโลหะนาโนมีแรงตึงผิวสูงทำให้อนุภาคโลหะนาโนที่กระจายตัวในของไหลพื้นฐานเกิดการรวมตัวและตกตะกอนได้ง่าย

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหลนาโน ขึ้นอยู่กับสัดส่วนปริมาตรของอนุภาคนาโนที่ผสมลงในของไหลพื้นฐาน ซึ่งการคำนวณค่าการนำความร้อนของของไหลนาโนนั้นจะเป็นการทำนายด้วยการคำนวณค่าการนำความร้อนของของผสม 2 สถานะ (Two-phase mixture) และสมการคุณสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหลนาโนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3

$$k_{nf} = k_f \cdot \left\{ \frac{k_p + [(n-1)k_f] - [(n-1)\alpha(k_f - k_p)]}{k_p + [(n-1)k_f] + [\alpha(k_f - k_p)]} \right\} \quad \text{สมการที่ 3}$$

เมื่อ	$k_{nf}$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหลนาโน (W/m·K)
	$k_f$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหลฐาน (W/m·K)
	$k_p$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอนุภาคนาโน (W/m·K)
	$\alpha$	คือ ค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคนาโน
	$n$	คือ ค่าตัวประกอบรูปร่าง

โดยค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคนาโน ( $\alpha$ ) และค่าตัวประกอบรูปร่าง ( $n$ ) ในสมการที่ 3 สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

ค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคนาโน ( $\alpha$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$\alpha = \frac{V_p}{V_f + V_p}$$

สมการที่ 4

เมื่อ  $\alpha$  คือ ค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคนาโน  
 $V_p$  คือ ปริมาตรของอนุภาค ( $m^3$ )  
 $V_f$  คือ ปริมาตรของไหลฐาน ( $m^3$ )

ค่าตัวประกอบรูปร่าง ( $n$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5

$$n = \frac{3}{\phi}$$

สมการที่ 5

เมื่อ  $n$  คือ ค่าตัวประกอบรูปร่าง  
 $\phi$  คือ ค่าความเป็นทรงกลมของอนุภาคนาโน

โดยค่าความเป็นทรงกลมของอนุภาคนาโนในสมการที่ 5 สามารถคำนวณได้ตั้งสมการที่ 6

$$\phi = \frac{\text{พื้นที่ผิวของทรงกลม}}{\text{พื้นที่ผิวจริงของอนุภาค}}$$

สมการที่ 6

ค่าความหนาแน่นของของไหลนาโนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 7 (Pak and Cho, 1998)

$$\rho_{nf} = \alpha\rho_p + (1-\alpha)\rho_f$$

สมการที่ 7

เมื่อ  $\rho_{nf}$  คือ ค่าความหนาแน่นของของไหลนาโน ( $kg/m^3$ )  
 $\rho_p$  คือ ค่าความหนาแน่นของอนุภาค ( $kg/m^3$ )

$\rho_f$  คือ ค่าความหนาแน่นของของไหลฐาน ( $\text{kg/m}^3$ )

$\alpha$  คือ ค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคนาโน

ค่าความร้อนจำเพาะของของไหลนาโนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 8 (Pak and Cho, 1998)

$$c_{p_{nf}} = (\alpha \cdot c_{p_p}) + [(1 - \alpha) c_{p_f}] \quad \text{สมการที่ 8}$$

เมื่อ  $c_{p_{nf}}$  คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของของไหลนาโน ( $\text{J/kg}\cdot\text{K}$ )

$c_{p_p}$  คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอนุภาค ( $\text{J/kg}\cdot\text{K}$ )

$c_{p_f}$  คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของของไหลฐาน ( $\text{J/kg}\cdot\text{K}$ )

ความหนืดของไหลนาโนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 23 (Pak and Cho, 1998)

$$\mu_{nf} = (1 + 7.3\alpha + 123\alpha^2) \mu_f \quad \text{สมการที่ 9}$$

เมื่อ  $\mu_{nf}$  คือ ค่าความหนืดของของไหลนาโน ( $\text{kg/m}\cdot\text{s}$ )

$\mu_f$  คือ ค่าความหนืดของของไหลฐาน ( $\text{kg/m}\cdot\text{s}$ )

$\alpha$  คือ ค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคนาโน



## การถ่ายเทความร้อน

งานวิจัยนี้ใช้หลักการการถ่ายเทความร้อนของสารทำงานนาโนในลักษณะของการพาความร้อนแบบบังคับประเภทการไหลภายในท่อหน้าตัดกลม โดยค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ) ของการไหลประเภทนี้จะมีค่าแปรผันตรงกับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ( $k$ ) ของสารทำงาน แต่จะแปรผกผันกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ การไหลในท่อนั้นถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ 1) การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) และ 2) การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) สมการการไหลจะถูกสร้างขึ้นในรูปของสมการความสัมพันธ์ (Empirical and Practical Relation) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน จากการศึกษาความสัมพันธ์ของการพาความร้อนแบบบังคับสามารถจัดให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรไร้มิติได้ดังต่อไปนี้

ค่าเรย์โนลส์นัมเบอร์ ( $Re$ ) สำหรับการไหลภายในท่อกรณีการพาความร้อนแบบบังคับสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 10

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu}$$

สมการที่ 10

เมื่อ  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของของไหล ( $\text{kg/m}^3$ )

$v$  คือ ความเร็วในการไหล ( $\text{m/s}$ )

$D_h$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกส์ (Hydraulic Diameter) ( $\text{m}$ )

$\mu$  คือ ความหนืดของของไหล ( $\text{kg/m}\cdot\text{s}$ )

เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกส์ (Hydraulic Diameter,  $D_h$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 11

$$D_h = \frac{4A_c}{p}$$

สมการที่ 11

เมื่อ  $D_h$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกส์ (Hydraulic Diameter) ( $\text{m}$ )

$A_c$  คือ พื้นที่หน้าตัดท่อ (Cross Section Area) ( $\text{m}^2$ )

$p$  คือ เส้นขอบเปียก (Wet Perimeter) ( $\text{m}$ )

### ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหล

กรณีการไหลภายในท่อแบบราบเรียบ (Laminar Flow in Tubes) การไหลภายในท่อจะเป็นแบบราบเรียบก็ต่อเมื่อเลขเรย์โนลด์ส (Reynolds number; Re) ของการไหลน้อยกว่า 2,300 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ของของไหลสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 12

$$h = 3.66 \left( \frac{k}{D_h} \right)$$

สมการที่ 12

กรณีการไหลในท่อแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow in Tubes) การไหลภายในท่อจะเป็นแบบปั่นป่วนก็ต่อเมื่อเลขเรย์โนลด์ส (Reynolds number; Re) ของการไหลมากกว่าหรือเท่ากับ 2,300 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ของของไหลสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 13 14 และ 15 ตามลำดับ

$$Nu = 1.25f \cdot Re \cdot Pr^{1/3}$$

สมการที่ 13

$$f = [0.79 \ln(Re - 1.64)]^{-2}$$

สมการที่ 14

$$h = Nu \cdot \left( \frac{k}{D_h} \right)$$

สมการที่ 15

เมื่อ	h	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหล ( $W/m^2 \cdot K$ )
	k	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหล ( $W/m \cdot K$ )
	$D_h$	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic Diameter) (m)
	Nu	คือ เลขนัสเซิลท์ (Nusselt number)
	Re	คือ เลขเรย์โนลด์ส (Reynolds number)
	Pr	คือ เลขพรันด์เทิล (Prandtl number)
	f	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction Factor)

### สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

การทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะพิจารณาค่าประสิทธิภาพช่วงขณะกับรังสีตกกระทบในแนวตั้งฉากกับแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์ โดยทำการวัดค่าอัตราการไหล อุณหภูมิของของไหลที่ทางเข้าและทางออกที่รับรังสีอาทิตย์ โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ประกอบการคำนวณค่าประสิทธิภาพและสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์สามารถทำได้ดังต่อไปนี้

ค่าพลังงานความร้อนที่นำไปใช้ (Output energy) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 16 และ 17 (Tzivanidis et al., 2015)

$$Q_u = \dot{m}_{nf} c_{p,nf} (T_{nf,o} - T_{nf,i}) \quad \text{สมการที่ 16}$$

เมื่อ	$Q_u$	คือ พลังงานความร้อนที่ของไหลนาโนได้รับจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (W)
	$\dot{m}_{nf}$	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของไหลนาโน (kg/s)
	$c_{p,nf}$	คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของของไหลนาโน (J/kg·K)
	$T_{nf,i}$	คือ อุณหภูมิของของไหลนาโน ณ ทางเข้าที่รับรังสี (°C)
	$T_{nf,o}$	คือ อุณหภูมิของของไหลนาโน ณ ทางออกที่รับรังสี (°C)

$$Q_u = A_c F_R [I_T (\tau\alpha) - U_L (T_i - T_a)] \quad \text{สมการที่ 17}$$

เมื่อ	$Q_u$	คือ พลังงานความร้อนที่ของไหลนาโนได้รับจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (W)
	$A_c$	คือ พื้นที่ของแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์ (m <sup>2</sup> )
	$F_R$	คือ แฟกเตอร์การดึงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์
	$I_T$	คือ ค่ารังสีอาทิตย์ (W/m <sup>2</sup> )
	$(\tau\alpha)$	คือ ค่าการส่งผ่านและดูดกลืน
	$U_L$	คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวมของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (W/m <sup>2</sup> ·K)
	$T_i$	คือ อุณหภูมิ ณ ทางเข้าของที่รับรังสีอาทิตย์ (°C)
	$T_a$	คือ อุณหภูมิแวดล้อม (°C)

ค่าพลังงานความร้อนที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ได้รับ (Input energy) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 18 (Tzivanidis et al., 2015)

$$Q_C = A_C I_T$$

สมการที่ 18

เมื่อ  $Q_C$  คือ พลังงานความร้อนที่แผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์ได้รับ (W)  
 $A_C$  คือ พื้นที่ของแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์ ( $m^2$ )  
 $I_T$  คือ ค่ารังสีอาทิตย์ ( $W/m^2$ )

ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 19 (Tzivanidis et al., 2015)

$$\eta = \frac{\text{output}}{\text{input}} = \frac{Q_U}{Q_C}$$

สมการที่ 19

จากสมการที่ 16 17 18 และ 19 สมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์สามารถสร้างความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 20 21 และ 22 ตามลำดับ

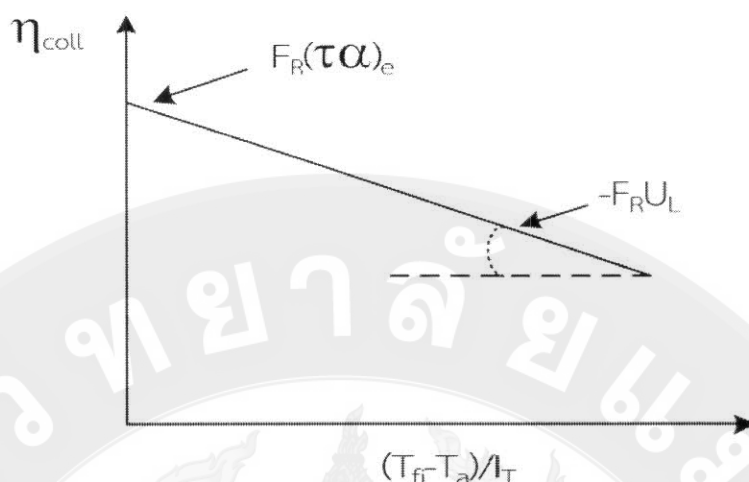
$$\eta = \frac{Q_U}{Q_C} = \frac{\dot{m}_{nf} c_{p,nf} (T_{nf,o} - T_{nf,i})}{A_C I_T} = \frac{A_C F_R [I_T (\tau\alpha) - U_L (T_i - T_a)]}{A_C I_T} \quad \text{สมการที่ 20}$$

$$\eta = \frac{A_C F_R I_T (\tau\alpha)}{A_C I_T} - \frac{A_C F_R U_L (T_i - T_a)}{A_C I_T} = F_R (\tau\alpha) - \frac{F_R U_L (T_i - T_a)}{I_T} \quad \text{สมการที่ 21}$$

$$\eta = -F_R U_L \left[ \frac{(T_i - T_a)}{I_T} \right] + F_R (\tau\alpha) \quad \text{สมการที่ 22}$$

เมื่อนำความสัมพันธ์ของค่า  $\eta_{Coll}$  และ  $\frac{(T_{fi} - T_a)}{I_T}$  จะได้สมการเส้นตรงที่มีความชัน

เท่ากับค่า  $F_R U_L$  และค่าบนแกน y (แกน  $\eta_{Coll}$ ) คือค่า  $F_R (\tau\alpha)_e$  ซึ่งกราฟเส้นดังกล่าวคือเส้นแสดงสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 เส้นแสดงสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

ที่มา: ทนงเกียรติ (2537)

### ระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

งานวิจัยนี้ได้ทำการติดตั้งถังเก็บน้ำร้อนร่วมกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบพาราโบลิกต้นแบบ โดยระบบประกอบด้วยปั๊มหมุนเวียนน้ำทำหน้าที่ปั้มน้ำผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพื่อรับความร้อนจากรังสีอาทิตย์เพื่อถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำในถังเก็บน้ำร้อนซึ่งทำการหุ้มฉนวนอย่างดี ดังนั้นเวลาผ่านไปโดยตั้งสมมุติฐานว่าไม่เกิดการแยกชั้นของอุณหภูมิของน้ำร้อนภายในถังเก็บ การสมดุลพลังงานในถังเก็บน้ำร้อนกรณีไม่มีการปั้มน้ำร้อนไปใช้ประโยชน์สามารถคำนวณได้ตั้งสมการที่ 23

$$Q_s = M C_p (T_s^{t+\Delta t} - T_s)$$

สมการที่ 23

เมื่อ	$Q_s$	คือ พลังงานความร้อนในถังเก็บน้ำร้อน (J)
	$M C_p$	คือ ผลคูณของมวลและความร้อนจำเพาะของน้ำในถังเก็บ (J/°C)
	$T_s$	คือ อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บ (°C)
	$T_{s+\Delta t}$	คือ อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บเมื่อเวลาผ่านไปเท่ากับ $\Delta t$ (°C)

โดยทั่วไปจะทำการทดสอบระบบทำน้ำร้อนตลอดทั้งวัน ดังนั้นประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จึงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 24

$$\eta_{\text{system}} = \frac{Q_s}{\sum_{i=1}^n I_T A_C \Delta t}$$

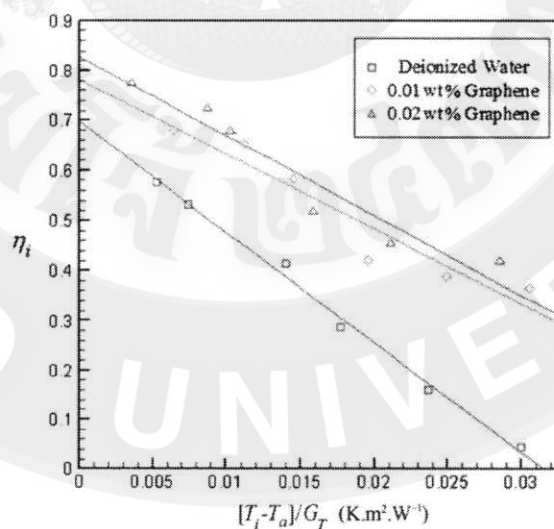
สมการที่ 24

เมื่อ  $\Delta t$  คือ ผลต่างช่วงระยะเวลา (S)

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ของไหลนาโนในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ พบว่างานวิจัยส่วนใหญ่เป็นการใช้ของไหลนาโนในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ และการใช้ของไหลนาโนนั้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ได้ ซึ่งการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

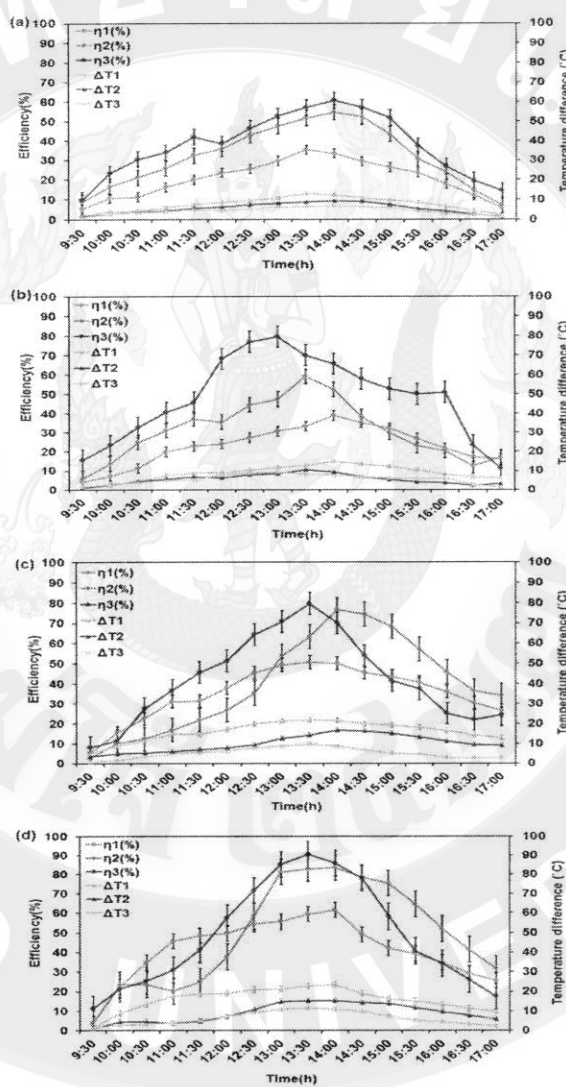
Ahmadi et al. (2016) ทำการวิเคราะห์ผลจากการใช้ของไหลนาโนกราฟีนในการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้ของไหลนาโนกราฟีนที่ความเข้มข้น 0.01 wt% ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นเป็น 12.19% และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกราฟีนเป็น 0.02 wt% ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นเป็น 18.87%



ภาพที่ 6 ประสิทธิภาพทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ ที่ใช้น้ำปราศจากไอออนและของไหลนาโนกราฟีนที่ปริมาณอนุภาคต่างๆ

ที่มา: Ahmadi et al. (2016)

Iranmanesh et al. (2017) ทำการศึกษาผลกระทบจากการใช้ของไหลนาโนกราฟีนต่อสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ evacuated tube โดยใช้ของไหลนาโนกราฟีนที่มีน้ำเป็นของไหลพื้นฐานที่อัตราความเข้มข้น 0.025, 0.005, 0.075 และ 0.1 wt% อัตราการไหล 0.5, 1.0 และ 1.5 LPM จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าสูงสุด 90.7% ที่ความเข้มข้นของของไหลกราฟีน 0.1 wt% อัตราการไหลที่ 1.5 LPM



ภาพที่ 7 สมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ โดยใช้ของไหลนาโนกราฟีนที่ความเข้มข้น (a) 0.0025 wt% (b) 0.05 wt% (c) 0.075 wt% และ (d) 0.1 wt%

ที่มา: Iranmanesh et al. (2017)

Vakili et al. (2016) ทำทดลองตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิด volumetric สำหรับผลิตระบบผลิตน้ำร้อนภายในท้องถิ่น ใช้ของไหลนาโนกราฟีนโดยมีน้ำเป็นสารทำงาน ในงานวิจัยนี้ใช้ของไหลนาโนกราฟีนที่ความเข้มข้น 0.0005, 0.001 และ 0.005 wt% อัตราการไหลของสารทำงานที่ 0.075, 0.015 และ 0.225 kg/s ผลจากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของของไหลนาโนเพิ่มขึ้น และที่อัตราการไหล 0.015 kg/s ตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงสุดทั้งจากการใช้น้ำและใช้ของไหลนาโนกราฟีนเป็นสารทำงาน

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพที่อัตราการไหลและความเข้มข้นต่าง ๆ

Samples	Flow rate (kg/s)			0.015			0.0075		
	R <sup>2</sup>	a <sub>1</sub>	η <sub>0</sub>	R <sup>2</sup>	a <sub>1</sub>	η <sub>0</sub>	R <sup>2</sup>	a <sub>1</sub>	η <sub>0</sub>
G1	0.989	28.97	0.72	0.95	29.45	0.83	0.942	26.61	0.6
	$\eta = 0.72 - 28.97T_m^*$			$\eta = 0.83 - 29.45T_m^*$			$\eta = 0.6 - 26.61T_m^*$		
G2	0.974	29.29	0.78	0.981	29.54	0.89	0.989	24.61	0.64
	$\eta = 0.78 - 29.29T_m^*$			$\eta = 0.89 - 29.54T_m^*$			$\eta = 0.64 - 24.61T_m^*$		
G3	0.992	27.68	0.86	0.976	28.06	0.93	0.967	30.44	0.78
	$\eta = 0.86 - 27.68T_m^*$			$\eta = 0.93 - 28.06T_m^*$			$\eta = 0.78 - 30.44T_m^*$		

ที่มา: Vakili et al. (2016: 128)

Sokhansefat et al. (2014) ได้ทำการศึกษาการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของท่อ ductless รังสีของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก โดยใช้ของไหลนาโนอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีของไหลพื้นฐานเป็นน้ำมันสังเคราะห์ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบจากความเข้มข้นของของไหลนาโนที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนภายในท่อรับรังสี ซึ่งสัดส่วนปริมาตรความเข้มข้นที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้อยู่ที่ 1% 3% และ 5% อุณหภูมิดำเนินการทดลองที่ 300 K 400 K และ 500 K และความเร็วน้ำเข้าของสารทำงานเป็น 4 m/s จากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของของไหลนาโน แต่เมื่ออุณหภูมิดำเนินการทดลองสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าต่ำลง

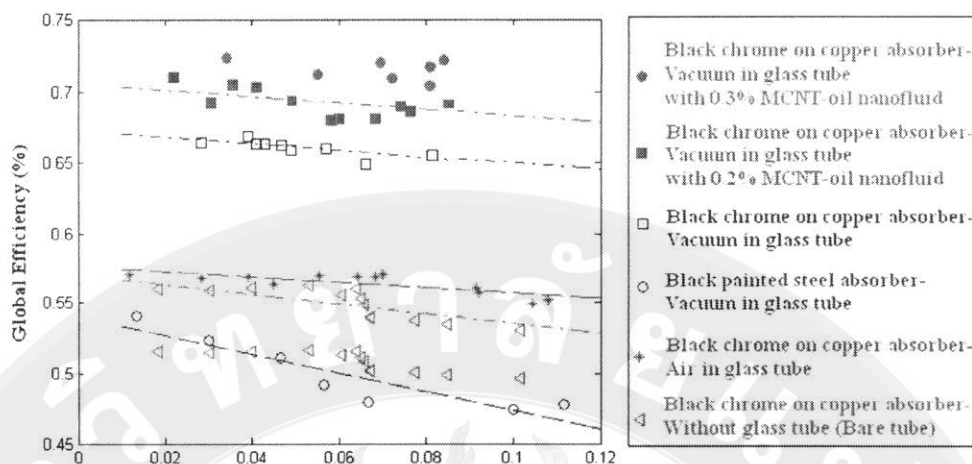


ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางความร้อนของของไหลนาโน  $Al_2O_3$  ที่อุณหภูมิ 300, 400 และ 500 K

Property	T = 300 K				T = 400 K				T = 500 K			
	0	1%	3%	5%	0	1%	3%	5%	0	1%	3%	5%
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	936.5	965.6	1,023.9	1,082.1	836.6	866.7	921.0	927.3	736.7	766.9	830.1	892.4
$C_p$ (J/kg-K)	1,620	1,612	1,595	1,578	1,791	1,782	1,765	1,748	1,962	1,952	1,934	1,915
K (W/m-K)	0.134	0.139	0.150	0.161	0.115	0.119	0.129	0.138	0.096	0.100	0.107	0.115
$\mu$ (mPas)	6.68	6.84	7.18	7.518	2.16	2.22	2.33	2.43	0.77	0.789	0.828	0.866

ที่มา: Sokhansefat et al. (2014: 643)

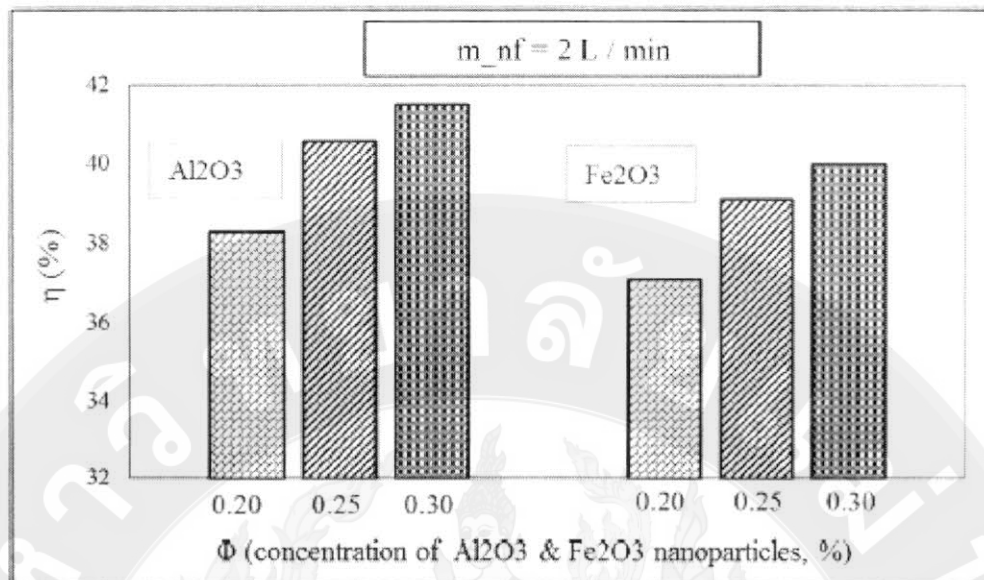
Kasaeian et al. (2015) ทำงานวิจัยเพื่อเตรียมมาตรฐานนำร่องเพื่อตรวจสอบการเพิ่มสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลา ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลาโดยใช้ steel mirror เป็นตัวสะท้อนแสง ศึกษาโดยใช้ท่อดูดกลืน 4 ชนิด คือ black painted vacuumed steel tube, copper bare tube with black chrome coating, glass enveloped non-evacuated copper tube with black chrome coating และ vacuumed copper tube with black chrome coating ของไหลนาโนคาร์บอนที่มีน้ำมันเป็นของไหลพื้นฐานที่สัดส่วนปริมาตร 0.2% และ 0.3% ได้นำมาทดลองกับท่อดูดกลืนชนิด black chrome coated vacuumed copper จากการศึกษาท่อดูดกลืนทั้ง 4 ชนิด พบว่าท่อที่สูญญากาศมีค่าประสิทธิภาพสูงกว่าท่อเปลือยประมาณ 11% และจากการใช้ของไหลนาโนเป็นสารทำงานที่สัดส่วนปริมาตร 0.2% ค่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีเพิ่มขึ้น 4-5% และที่สัดส่วนปริมาตร 0.3% ค่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 5-7%



ภาพที่ 8 ค่าสมรรถนะของการทดสอบท่อรับรังสีทั้ง 4 แบบ เมื่อใช้สารทำงานเป็นของไหลนาโน MCNT-oil ที่ความเข้มข้น 0.2% และ 0.3%

ที่มา: Kasaeian et al. (2015)

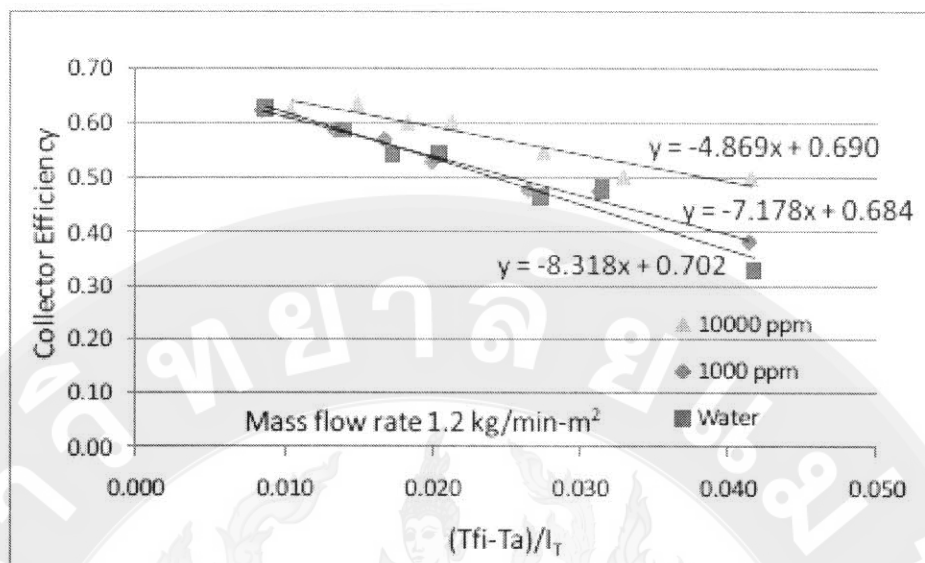
Rehan et al. (2018) ได้ทำการทดลองสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกโดยใช้ของไหลนาโนอะลูมิเนียมออกไซด์และไอออนออกไซด์ที่มีของไหลพื้นฐานคือน้ำ โดยใช้ความเข้มข้นที่ 0.20, 0.25 และ 0.30 wt% อัตราการไหลที่ใช้ในงานวิจัยนี้อยู่ที่ 1.0, 1.5 และ 2.0 LPM จากการทดลองพบว่า เมื่อใช้ของไหลนาโนทั้งสองชนิดเปรียบเทียบกับของไหลพื้นฐาน (น้ำ) ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์เมื่อใช้ของไหลนาโนทั้งสองชนิดที่อัตราการไหลสูงสุดของการทดลอง (2.0 LPM) พบว่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์เมื่อใช้ของไหลนาโนอะลูมิเนียมออกไซด์มีค่าสูงกว่าของไหลนาโนไอออนออกไซด์ในทุกระดับความเข้มข้นของของไหลนาโน ทั้งนี้การตกตะกอนของของไหลนาโนในระหว่างการทดลอง พบว่าของไหลนาโนไอออนออกไซด์มีการตกตะกอนมากกว่าของไหลนาโนอะลูมิเนียมออกไซด์ ส่งผลให้การใช้ของไหลนาโนไอออนออกไซด์มีประสิทธิภาพต่ำกว่าการใช้ของไหลนาโนอะลูมิเนียมออกไซด์



ภาพที่ 9 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลาที่ใช้ของไหลนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เป็นสารทำงาน

ที่มา: Rehan et al. (2018)

Sarawut and Tanongkiat (2011) ได้ทำการศึกษาสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบโดยใช้ของไหลนาโนเงินโดยใช้น้ำเป็นของไหลพื้นฐานเป็นสารทำงาน เปรียบเทียบกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน โดยในงานวิจัยนี้ใช้อนุภาคนาโนเงินที่ขนาด 20 nm โดยผสมกับน้ำที่ความเข้มข้น 1,000 ppm และ 10,000 ppm อัตราการไหลของสารทำงานอยู่ที่ 0.8-1.2 liter/min·m<sup>2</sup> และทำการควบคุมอุณหภูมิขาเข้าของสารทำงานอยู่ที่ 35-36°C ซึ่งผลที่ได้จากงานวิจัยพบว่า เมื่อความเข้มข้นของของไหลนาโนที่ใช้เพิ่มขึ้นที่ 10,000 ppm ค่า  $F_R(\tau\alpha)$  อยู่ที่ 0.690 W/m<sup>2</sup>K และค่า  $F_{RUL}$  อยู่ที่ 4.869 W/m<sup>2</sup>K เทียบกับเมื่อใช้ของไหลนาโนที่ความเข้มข้นที่ 1,000 ppm และเมื่อใช้น้ำ ค่า  $F_R(\tau\alpha)$  อยู่ที่ 0.684 W/m<sup>2</sup>K และ 0.720 W/m<sup>2</sup>K และค่า  $F_{RUL}$  อยู่ที่ 7.178 W/m<sup>2</sup>K และ 8.138 W/m<sup>2</sup>K ตามลำดับ เห็นได้ว่าค่าสมรรถนะทางความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากการใช้ของไหลนาโนเป็นสารทำงานช่วยลดการสูญเสียความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์มากกว่าการใช้น้ำเป็นสารทำงาน



ภาพที่ 10 สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์เมื่อใช้ของไหลนาโน ที่ความเข้มข้น 10,000 ppm 1,000 ppm และน้ำ

ที่มา: Sarawut and Tanongkiat (2011)

Yousefi et al. (2012) ได้ทำการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบที่ใช้ของไหลนาโนอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีของไหลพื้นฐานเป็น double distilled water เป็นสารทำงานอนุภาคนาโนที่ใช้ในการทดลองอยู่ที่ 0.2 wt% และ 0.4 wt% และขนาดของอนุภาคนาโนอยู่ที่ 15nm ทำการทดลองที่อัตราการไหล 1-3 LPM โดยในการทดลองนี้ ทำการทดลองทั้งแบบที่ใช้สารลดแรงตึงผิว (Triton X-100) และไม่ใช่สารลดแรงตึงผิว ผลการทดลองโดยใช้สารทำงานต่างๆ ในงานวิจัยชิ้นนี้ นำไปเปรียบเทียบกับทดลองที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน พบว่าเมื่อใช้น้ำเป็นสารทำงานในการทดลองที่อัตราการไหลที่ 1-3 LPM นั้น ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ลดลงเมื่ออัตราการไหลลดลง และเมื่อใช้ของไหลนาโนที่สัดส่วนปริมาตร 0.4 wt% ทำการทดลองที่อัตราการไหล 1-3 LPM พบว่าเมื่อช่วงผลต่างอุณหภูมิมาก ค่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ในส่วนของการทดลองที่ใช้สารทำงานเป็นของไหลนาโนโดยไม่ผสมสารลดแรงตึงผิว ทำการทดลองที่อัตราการไหล 3 LPM โดยใช้สัดส่วนน้ำหนักรวมต่อปริมาตรของของไหลนาโนที่ 0.2 wt% และ 0.4 wt% พบว่าเมื่อช่วงผลต่างของอุณหภูมิมาก ของไหลนาโนที่สัดส่วน 0.2 wt% มีค่าประสิทธิภาพสูงกว่าเมื่อใช้ของไหลนาโนที่สัดส่วน 0.4 wt% แต่เมื่อใช้สารลดแรงตึงผิวผสมกับของไหลนาโนที่สัดส่วน 0.4 wt% ผลปรากฏว่าค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนจากผิวดูตรงสี่ลดลงประมาณ 9.3% สามารถสรุปได้ว่า จากการทดลองที่ศึกษาผลกระทบต่อประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบโดยใช้ของไหลนาโนอะลูมิเนียมออกไซด์ เมื่อพิจารณา

อัตราการไหลของสารทำงาน สัดส่วนน้ำหนักต่อปริมาตรของอนุภาคนาโนที่ใช้ในสารทำงาน และการใช้สารลดแรงตึงผิว พบว่าในการใช้สารทำงานเป็นของไหลนาโนอะลูมิเนียมออกไซด์ที่สัดส่วน 0.2 wt% เมื่อเทียบกับการใช้น้ำเป็นสารทำงานแล้ว ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นประมาณ 28.3% และเมื่อมีการใช้สารลดแรงตึงผิวในของไหลนาโนที่สัดส่วน 0.4 wt% ค่าประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 15.63%

Moghadam et al. (2014) ได้ทำการศึกษาสมรรถนะและประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบเมื่อใช้สารทำงานเป็นของไหลนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่ใช้น้ำเป็นของไหลพื้นฐาน โดยใช้สัดส่วนปริมาตรของอนุภาคนาโนที่ 0.4 vol% และขนาดของอนุภาคนาโนที่ 40 nm ศึกษาที่อัตราการไหล 1-3 kg/min จากผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้น้ำเป็นสารทำงานแล้ว ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าลดลงเมื่อใช้อัตราการไหลที่ 3 kg/min ในขณะที่ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลจาก 1 kg/min เป็น 2 kg/min แต่ในกรณีที่ใช้สารทำงานเป็นของไหลนาโน ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่ามากกว่าเมื่ออัตราการไหลของสารทำงานต่ำ จากงานวิจัยนี้พบว่าเมื่อใช้ของไหลนาโนคอปเปอร์ออกไซด์โดยมีน้ำเป็นของไหลพื้นฐานเป็นสารทำงาน เมื่อเทียบกับการใช้น้ำเป็นสารทำงานในตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นประมาณ 16.7% เมื่อมีการใช้อัตราการไหลที่เหมาะสม ทั้งนี้อัตราการไหลที่เหมาะสมต่อการใช้งานนั้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะของสารทำงานที่จะนำมาใช้

Mahian et al. (2014) ได้ทำการวิเคราะห์ผลเชิงวิเคราะห์โดยพิจารณาจากข้อที่ 1 และ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์ เพื่อประเมินสมรรถนะของ minichannel-based solar collector ที่ใช้สารทำงานเป็นของไหลนาโนที่ใช้น้ำเป็นของไหลพื้นฐาน 4 ชนิด คือ ของไหลนาโนคอปเปอร์ ของไหลนาโนอะลูมิเนียมออกไซด์ ของไหลนาโนไทเทเนียมออกไซด์ และของไหลนาโนซิลิกอนออกไซด์ โดยใช้อัตราการไหลคงตัว สัดส่วนปริมาตรที่ 4% ขนาดของอนุภาคนาโนที่ใช้อยู่ที่ 25 nm และสมมติให้ inner diameter of riser of flat-plate ที่ 2 mm ซึ่งผลจากการวิเคราะห์โดยพิจารณาจากข้อที่ 1 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในท่อของของไหลนาโนอะลูมิเนียมออกไซด์มีค่าสูงสุด และของไหลนาโนซิลิกอนออกไซด์มีค่าต่ำสุด ส่วนอุณหภูมิขาออกที่ได้จากของไหลนาโนคอปเปอร์มีค่าสูงที่สุดตามด้วยของไหลนาโนไทเทเนียมออกไซด์ ของไหลนาโนอะลูมิเนียมออกไซด์ และของไหลนาโนซิลิกอนออกไซด์ ตามลำดับ ส่วนผลจากการวิเคราะห์ที่ข้อที่ 2 ชี้แจงได้ว่าของไหลนาโนคอปเปอร์มีค่าเอนโทรปีต่ำสุด เมื่อเทียบกับของไหลนาโนอีก 3 ชนิด และพบว่า ค่าการนำความร้อนของของไหลนาโนไทเทเนียมออกไซด์น้อยกว่าของไหลนาโนอะลูมิเนียมออกไซด์ แต่ค่าเอนโทรปีของของไหลนาโนไทเทเนียมออกไซด์นั้นต่ำกว่าของไหลนาโนอะลูมิเนียมออกไซด์

Bellos et al. (2016) ทำการออกแบบโครงสร้างท่อตูดกลืนรังสีอาทิตย์จากโปรแกรม Solidworks และจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของการไหล เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบราบพาราโบลาโดยการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างสารทำงานกับท่อ

ตุ๊กตารังสี ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาพารามิเตอร์ 2 ชนิด คือ ชนิดของสารทำงาน และโครงสร้างของท่อตุ๊กตารังสี ซึ่งสารทำงานที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้มี 3 ชนิด คือ น้ำมันร้อน น้ำมันร้อนที่ผสมอนุภาคนาโนอะลูมิเนียมออกไซด์ที่สัดส่วนปริมาตร 2% และน้ำอัดความดัน ในส่วนของโครงสร้างของท่อตุ๊กตารังสีที่นำมาใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ได้มีการจำลองให้ท่อตุ๊กตารังสีเป็นแบบบุเข้าในลักษณะของรูปทรงของโซ่ เนื่องจากลักษณะนี้จะเพิ่มสมบัติการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว และเพิ่มการปั่นป่วนในการไหล ซึ่งผลจากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า สองวิธีการที่ศึกษานั้นสามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และเพิ่มค่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ในการใช้ของไหลนาโนเป็นสารทำงานนั้นเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ประมาณ 4.25% ส่วนการพัฒนาโครงสร้างของท่อตุ๊กตารังสีเพิ่มประสิทธิภาพประมาณ 4.55%

Karami et al. (2016) ได้ทำการวิจัยเพื่อศึกษาสมบัติทางแสง และสมบัติทางความร้อนของของไหลนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่มีของไหลพื้นฐานเป็นน้ำผสมเอทิลีนไกลคอล (อัตราส่วน 70:30) นำมาใช้ในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีอุณหภูมิต่ำ หากค่าที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆ เมื่อใช้สัดส่วนปริมาตรของอนุภาคนาโนที่แตกต่างกัน ซึ่งผลได้แสดงว่าของไหลนาโนมีค่าสัมประสิทธิ์ในการรับพลังงานแสงอาทิตย์ได้ดีกว่า จากการผสมอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่ 100 ppm (หรือที่สัดส่วนปริมาตร 0.01%) สารทำงานสามารถดูดซับพลังงานจากรังสีอาทิตย์ได้ดีกว่าของไหลพื้นฐานที่ไม่ได้ผสมอนุภาคนาโนถึง 4 เท่า ในส่วนของความหนืดของสารทำงานเมื่อผสมอนุภาคนาโนแล้วนั้น เมื่อสัดส่วนปริมาตรเพิ่มขึ้น ความหนืดของสารทำงานก็เพิ่มขึ้น แต่จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และค่าการนำความร้อนของของไหลนาโนคอปเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น เมื่อสัดส่วนปริมาตรของอนุภาคนาโนที่ผสมเพิ่มขึ้น จากการทดลองที่ใช้สัดส่วนปริมาตรที่ 0.01% (100 ppm) พบว่าค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้นที่ประมาณ 13.7% ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น จะเป็นการเพิ่มค่าการนำความร้อน และลดความหนืดของของไหลนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ ส่งผลในการช่วยเพิ่มค่าประสิทธิภาพในการดูดซับรังสีอาทิตย์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

Colangelo et al. (2015) ได้ทำการปรับปรุงตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบและทำการหาค่าประสิทธิภาพทางความร้อนโดยใช้สารทำงาน 2 ชนิด คือ น้ำกลั่น และของไหลนาโนอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีน้ำกลั่นเป็นของไหลพื้นฐานโดยใช้ความเข้มข้นที่สัดส่วนปริมาตร 3.0% จากการศึกษาพบว่า ในการปรับปรุงตัวเก็บรังสีอาทิตย์ในงานวิจัยนี้ก็เพื่อจะรักษาความเร็วของของไหลให้คงที่ และในส่วนของการใช้สารทำงานเป็นของไหลนาโนนั้น ค่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์สูงกว่าการใช้น้ำกลั่นเป็นสารทำงาน 7%

Karami et al. (2015) ได้ทำการศึกษาการใช้ของไหลนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่มีน้ำผสมเอทิลีนไกลคอล (ที่สัดส่วนปริมาตร 70:30) เป็นของไหลพื้นฐาน ที่ความเข้มข้น 25 ppm 50 ppm และ 100 ppm ในการทดลองนี้ใช้อัตราการไหลตั้งแต่ 0.015 – 0.025 kg/s และใช้พื้นผิวภายในสองชนิด

คือชนิดสีดำ และชนิดสะท้อนแสง ซึ่งผลจากการทดลองพบว่า การใช้ของไหลนาโนเป็นสารทำงานในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทำให้ค่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับของไหลพื้นฐานที่ถูกใช้ในทุกอัตรการไหล และที่ความเข้มข้นของของไหลนาโนมากกว่า 100 ppm แสงไม่สามารถส่องผ่านได้ ทั้งนี้ที่อัตรการไหลที่ต่ำกว่าทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนมากกว่า ดังนั้นประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์จึงเพิ่มขึ้นเมื่ออัตรการไหลที่ใช้เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 3 ค่า zero-loss ( $\eta_0$ ) (%) และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน ( $\alpha_1$ ) ( $W/m^2 \cdot K$ ) ของสารทำงานที่อัตรการไหลต่าง ๆ

Working fluid	Flow rate (L/hr)(kg/s)			72 (0.22)			90 (0.025)		
	$\eta_0$	$\alpha_1$	$R^2$	$\eta_0$	$\alpha_1$	$R^2$	$\eta_0$	$\alpha_1$	$R^2$
Base fluid (Reflective internal surface)	50.2	20.18	0.984	56.9	19.98	0.992	60.3	19.85	0.996
Base fluid (Black internal surface)	58.0	18.59	0.998	66.0	17.89	0.999	71.7	17.21	0.976
CuO nanofluid (C3)	59.1	18.33	0.972	67.8	17.93	0.976	71.4	17.17	0.996
CuO nanofluid (C2)	61.6	18.66	0.964	70.7	18.24	0.977	74.9	17.82	0.996
CuO nanofluid (C1)	64.7	19.36	0.970	74.3	18.98	0.994	77.3	18.06	0.997

ที่มา: Karami et al. (2015: 800)

Gupta et al. (2015) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบโดยใช้ของไหลนาโนอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีน้ำเป็นของไหลพื้นฐาน ที่สัดส่วนปริมาตร 0.005% ขนาดอนุภาคนาโนอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ 20nm อัตรการไหลที่ศึกษาอยู่ที่ 1.5 LPM 2 LPM และ 2.5 LPM จากผลการทดลองพบว่า การใช้ของไหลนาโนอะลูมิเนียมออกไซด์เป็นสารทำงานทำให้ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นที่ทุกอัตรการไหล เมื่อเทียบกับการใช้น้ำเป็นสารทำงาน สำหรับการใช้น้ำเป็นสารทำงานเป็นสารทำงาน ที่อัตรการไหล 1.5 LPM ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้น 8.1% และที่อัตรการไหล 2 LPM และ 2.5 LPM ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นประมาณ 4.2%

### บทที่ 3

## อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

### วัสดุอุปกรณ์ในการวิจัย

#### 1. ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกต้นแบบ

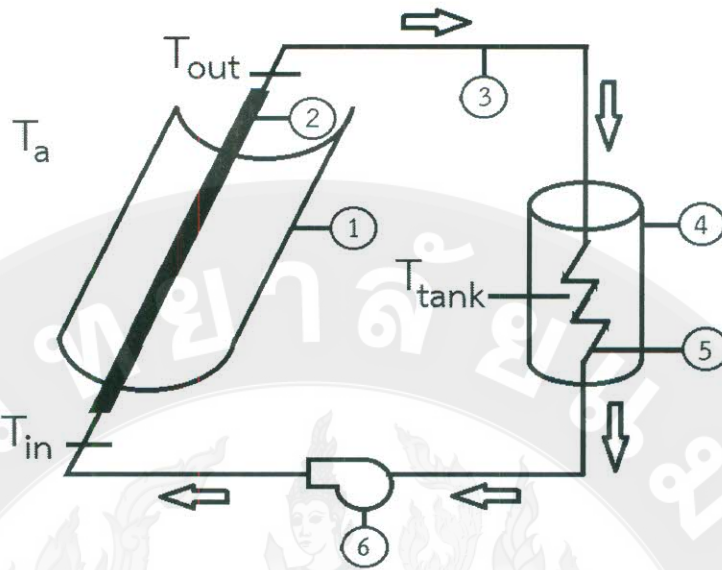
งานวิจัยนี้ได้ทำการการออกแบบระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกต้นแบบในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบส่วนโค้งของรางพาราโบลิกโดยใช้สมการพาราโบลาและสร้างแบบจำลองโครงสร้างรองรับรางพาราโบลิกด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกต้นแบบในงานวิจัยนี้มีส่วนประกอบหลักได้แก่

1. แผ่นสะท้อนรังสีมีลักษณะเป็นแผ่นโค้งพาราโบลาทำหน้าที่รับรังสีจากดวงอาทิตย์ และสะท้อนรังสีดังกล่าวสู่ตำแหน่งโฟกัสของพาราโบล่า แผ่นสะท้อนรังสีในงานวิจัยนี้สร้างจากแผ่นสแตนเลสสตีลมีความหนา 1 mm ยึดติดกับโครงเหล็กกล้าที่ขึ้นรูปให้มีความโค้งจากสมการพาราโบลา โดยกำหนดให้แผ่นสะท้อนรังสีพื้นที่รับรังสีกว้างและยาวประมาณ 1.0 m และ 2.4 m ตามลำดับ

2. ท่อรับรังสีอาทิตย์ ติดตั้ง ณ ตำแหน่งโฟกัสของรางพาราโบลิกทำหน้าที่รับรังสีอาทิตย์ที่สะท้อนจากแผ่นสะท้อนรังสีเพื่อแปลง เป็นพลังงานความร้อนและถ่ายเทให้กับสารทำงานที่บรรจุอยู่ภายในท่อรังสีในงานวิจัยนี้สร้างจากเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเส้น ผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.05 m ยึดติดกับโครงเหล็กกล้าที่ออกแบบให้สามารถปรับระยะห่างระหว่างท่อรับรังสีและแผ่นสะท้อนรังสีได้

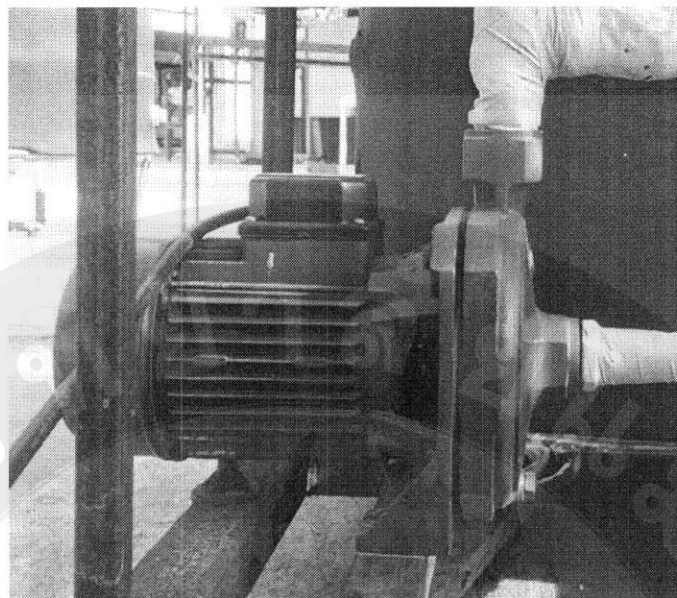
3. ถังเก็บน้ำร้อน ถังนี้จะติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนระหว่างสารทำงานและน้ำที่จะผลิตเป็นน้ำร้อน ความร้อนที่ได้จากการแลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกกักเก็บไว้ในรูปของน้ำร้อนที่จะนำไปใช้งานต่อไป ถังเก็บน้ำร้อนในงานวิจัยนี้มีความจุ 200 l ทำการติดตั้งฉนวนกันความร้อนภายในถังที่จะใช้ผลิตเป็นน้ำร้อน เมื่อสารทำงานไหลออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนก็จะถูกปั๊มส่งเข้าสู่ท่อรับรังสีอาทิตย์ต่อไปเป็นวัฏจักรดังภาพที่ 14





ภาพที่ 11 การไหลเวียนของสารทำงานภายในระบบผลิตน้ำร้อน 1) แผ่นสะท้อนรังสีแบบพาราโบลิก  
2) ท่อรับรังสีอาทิตย์ 3) ระบบท่อลำเลียงสารทำงาน 4) ถังกักเก็บน้ำร้อน  
5) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และ 6) ปั๊มน้ำ

4. ปั๊มสารทำงาน ทำหน้าที่หมุนเวียนสารทำงานในระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยปั๊มที่ใช้ในการทดสอบคือปั๊มน้ำ ขนาด 0.75 kW ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วย อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ส่งจ่ายให้กับปั๊มทำให้สามารถเปลี่ยนค่าอัตราการไหลของสารทำงานได้

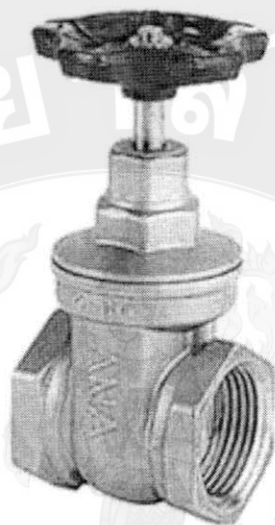


ภาพที่ 12 ปัมสารทำงาน



ภาพที่ 13 อินเวอร์เตอร์

5. วาล์ว ในการทดสอบใช้วาล์วชนิด Gate valve ในการควบคุมอัตราการไหลของสารทำงานภายในระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์คู่กับชุดอินเวอร์เตอร์ที่ต่อกับปั๊มน้ำของชุดทดสอบ

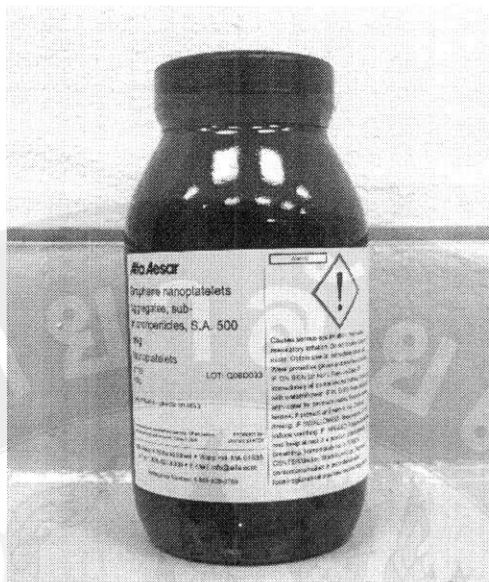


ภาพที่ 14 วาล์วน้ำ

ที่มา: <http://valves-thailand.com>

## 2. อนุภาคนาโน

อนุภาคนาโนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ อนุภาคนาโนชนิดโนกราฟีน (Graphene Nanoplatelets aggregates, sub-micron particles) เป็นอนุภาคนาโนมีองค์ประกอบหลัก คือ แกรไฟต์ (Graphite) ซึ่งเป็นธาตุคาร์บอนชนิดหนึ่ง กราฟีนเกิดจากการเรียงตัวของอะตอมแกรไฟต์ที่เป็นชั้น ๆ ซึ่งมีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบา เป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าที่ดีมีขนาดของอนุภาค (Particle size) ในช่วง 60 – 80 nm มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface Area; SSA) ประมาณ 2,630 m<sup>2</sup>/g ซึ่งมีค่าสูงกว่าท่อ นาโนคาร์บอนที่มีขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะในช่วง 100-1,000 m<sup>2</sup>/g ถึง 2.6 เท่า และยังมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนในช่วง 2,500-5,000 W/m-K ซึ่งมีค่าสูงกว่าทองแดงประมาณ 40 เท่า ทำให้อนุภาคนาโนกราฟีนมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงและมีคุณสมบัติของการเป็นตัวนำความร้อนที่ดี โดยอนุภาคนาโนชนิดโนกราฟีนที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังภาพที่ 18



ภาพที่ 15 อนุภาคนาโนกราฟีน (Graphene Nano-platelets)

### 3. เครื่องผสมแบบอัลตราโซนิก

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องอัลตราโซนิก Ultrasonic GT SONIC-P6 ขนาด 300 W ความถี่ 40 kHz  
ตั้งภาพที่ 19



ภาพที่ 16 เครื่องอัลตราโซนิก

## เครื่องมือวัด

### 1. เครื่องวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ (Pyranometer)

เครื่องวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ ยี่ห้อ CEM รุ่น DT-1307 สามารถอ่านค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ได้ตั้งแต่ 0 - 1,999 W/m<sup>2</sup> ความละเอียดของการวัดเท่ากับ  $\pm 10\text{W/m}^2$

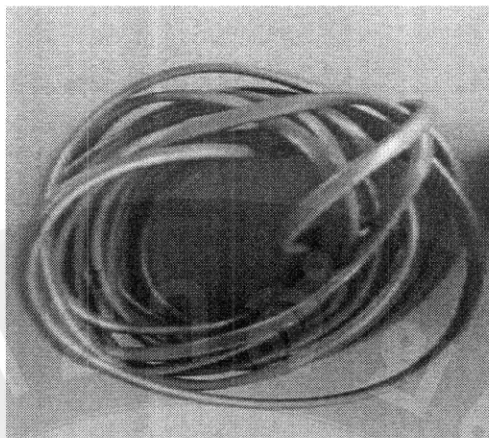


ภาพที่ 17 เครื่องวัดความเข้มรังสีอาทิตย์

ที่มา: <http://www.cem-instruments.in/product.php?pname=DT-1307>

### 2. สายวัดอุณหภูมิ (Thermocouple)

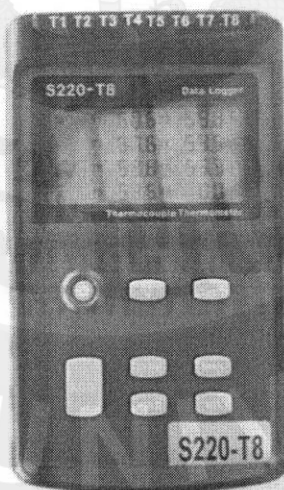
สายวัดอุณหภูมิที่ใช้เป็นสายเทอร์โมคัปเปิล Thermocouple type K 4/0.65 mm X2 สามารถทนอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 0-270 °C



ภาพที่ 18 สายวัดอุณหภูมิ

### 3. เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger)

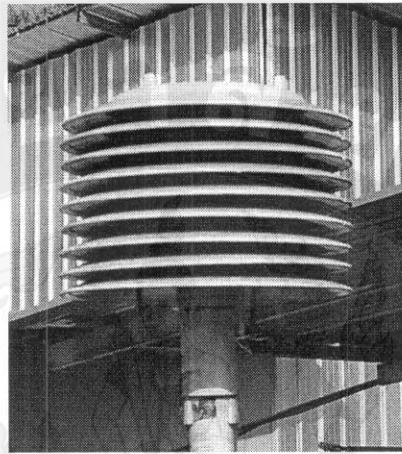
เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) ยี่ห้อ Huato แบบ 8 ช่องทาง สามารถบันทึกข้อมูลได้ถึง 24 ข้อมูล ในการใช้ต้องลงโปรแกรม Data logger กับตัวคอมพิวเตอร์ก่อนเพื่อให้บันทึกข้อมูลและแสดงผลในตัวคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 19 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger)

#### 4. ชุดวัดอุณหภูมิแวดล้อม

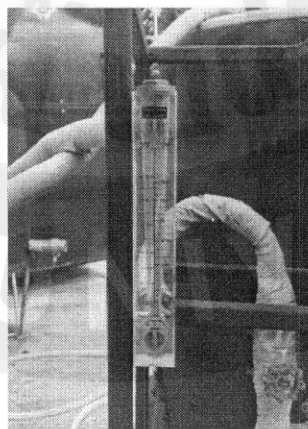
ชุดวัดอุณหภูมิแวดล้อมจะประกอบไปด้วยสายเทอร์โมคัปเปิล งานพลาสติกขนาด 11 นิ้ว ซ้อนเป็นชั้นเพื่อป้องกันไม่ให้อุณหภูมิโดนแสงอาทิตย์โดยตรงและป้องกันลม



ภาพที่ 20 ตัววัดอุณหภูมิแวดล้อม

#### 5. เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow Meter)

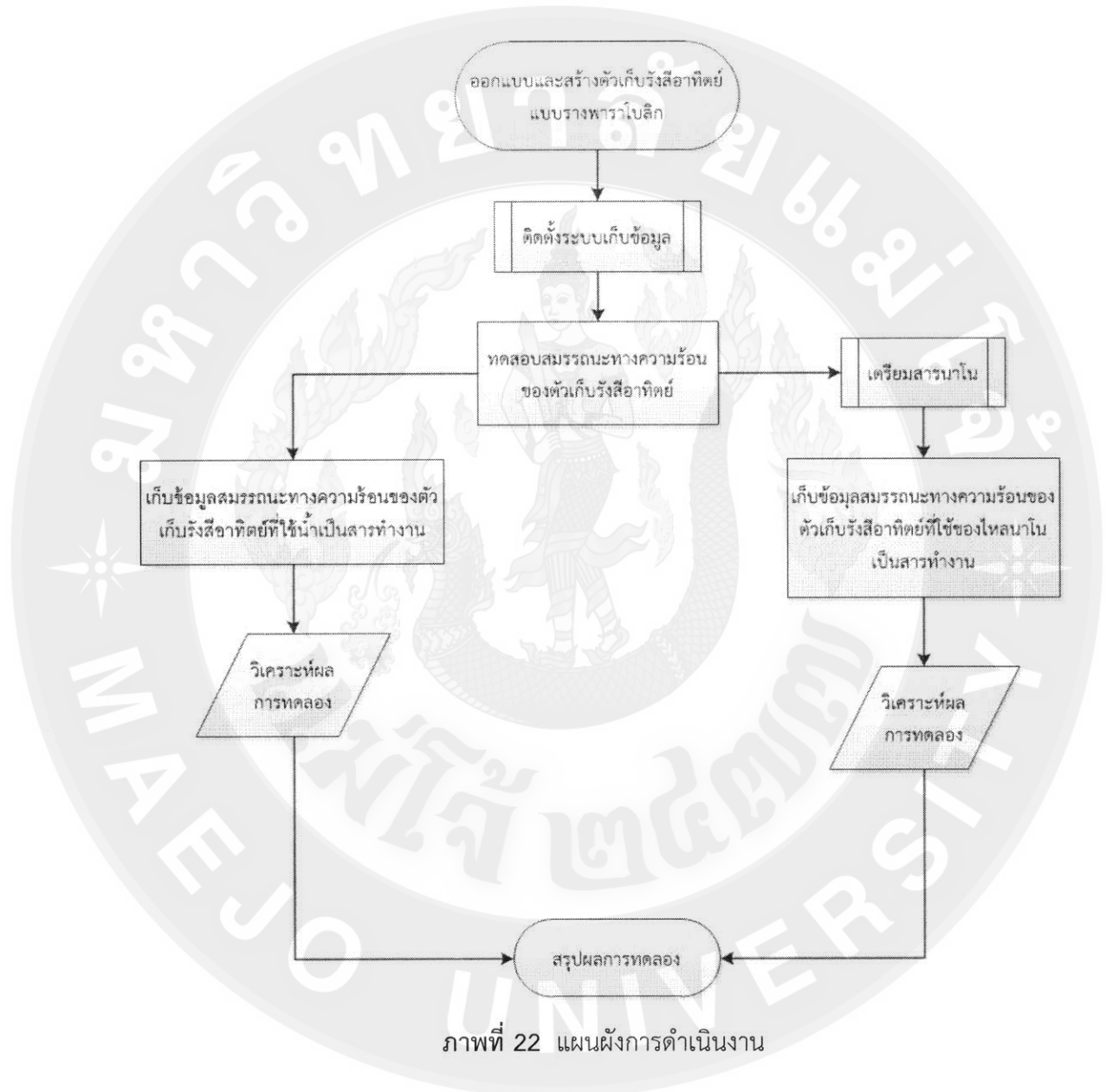
เครื่องวัดอัตราการไหล เป็นเครื่องที่ใช้สำหรับวัดอัตราการไหลสามารถวัดอัตราการไหลในช่วง 2 – 18 LPM



ภาพที่ 21 เครื่องวัดอัตราการไหล

## วิธีดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยนี้ แบ่งเป็นขั้นตอนการดำเนินงานตามแผนผังที่แสดง



ภาพที่ 22 แผนผังการดำเนินงาน



## 1. การสร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกจำนวนทั้งสิ้น 2 ชุด โดยจัดวางให้ตั้งขนานกัน และหันตัวรับรังสีอาทิตย์ไปทางทิศใต้ ทำมุมเอียง  $18^\circ$  กับระนาบตามละติจูดที่ตั้งของสถานที่ทดลอง โดยตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกที่สร้างมีส่วนประกอบหลักคือ 1) แผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์ทรงพาราโบลา สร้างจากแผ่นสแตนเลสที่ยึดกับโครงเหล็กตัดทรงพาราโบลา 2) ท่อรับรังสีอาทิตย์ ออกแบบให้สามารถปรับระยะโฟกัสได้ 3) ระบบส่งจ่ายสารทำงาน ประกอบด้วย ถังพักสารทำงาน และปั๊มสารทำงาน 4) ถังกักเก็บน้ำร้อนที่ทำการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นชุดต่อท่อแดงวางไว้ภายในถัง 5) ระบบควบคุมการทำงานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกที่สร้างนั้น ทำการติดตั้งโดยใช้อินเวอร์เตอร์ (inverter) เพื่อดำเนินการทำงานของปั๊มสารทำงาน ควบคู่กับวาล์วในการปรับอัตราการไหลของสารทำงานที่ส่งจ่ายให้กับระบบ และทำการติดตั้งระบบสำหรับเก็บข้อมูลอุณหภูมิ โดยใช้สายเทอร์โมคัปเปิลในการวัดอุณหภูมิจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกและระบบกักเก็บน้ำร้อนในงานวิจัยนี้ ทำการติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ บริเวณทางเข้าและทางออกของท่อรับรังสีอาทิตย์ ภายในถังพักสารทำงาน และติดตั้งที่ถังกักเก็บน้ำร้อนบริเวณทางเข้าและทางออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และภายในถังกักเก็บน้ำร้อน

## 2. การเตรียมสารนาโน

สำหรับสารนาโนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ใช้อนุภาคนาโนกราฟีน (Graphene nanoplatelets aggregates) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้อยกว่า 2 microns และหนาประมาณ 5 – 10 nm ลักษณะของอนุภาคมีรูปร่างเป็นเกล็ด คุณสมบัติของอนุภาคนาโนและคุณสมบัติของน้ำแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงคุณสมบัติของสารนาโนกับน้ำ

Type	Shape	Thermal conductivity (k, W/m·K)	Specific heat (Cp, J/kg·K)	Density ( $\rho$ , kg/m <sup>3</sup> )
Graphene (GNP)	Platelets	5,000	700	2,620
Water (H <sub>2</sub> O)	-	0.60	4,187	1,000

การผสมสารทำงานนาโนกราฟีนใช้ของเหลวพื้นฐานเป็นน้ำกลั่น (Distilled water) ผสมในเครื่องอัลตราโซนิก ขนาด 300 W ความถี่ 40 kHz โดยซึ่งตวงอนุภาคนาโนกราฟีนในปริมาณที่ต้องการ ผสมกับน้ำให้อยู่ในสภาพเป็นสารคอลลอยด์ เพื่อใช้เป็นสารทำงานที่ใช้ในการทดสอบในระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบโดยใช้สารนาโนที่ความเข้มข้น 0.05, 0.075 และ 0.100 %wt ในการผสมสารนาโนกราฟีนที่ใช้เป็นของไหลในการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกในงานวิจัยนี้ โดยใช้เวลาในการผสม 60 min โดยทำการผสมเป็นระยะเวลา 30 min จากนั้นพักเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 min แล้วดำเนินการผสมต่ออีก 30 min เพื่อป้องกันไม่ให้อัลตราโซนิกทำอุณหภูมิของสารนาโนที่ผสมสูงกว่า 60 °C



ภาพที่ 23 สารนาโนกราฟีนที่ผสมในเครื่องอัลตราโซนิก

### 3. การทดสอบและการเก็บข้อมูลสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบและเก็บข้อมูลสมรรถนะทางความร้อนของระบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกที่มีขนาดและองค์ประกอบเหมือนกัน ติดตั้งในสภาพแวดล้อมเดียวกัน จำนวน 2 ระบบในช่วงเวลา 9.00 – 15.00น. โดยไม่ทำการปรับแฉงรับรังสีอาทิตย์ตามดวงอาทิตย์ ทำการทดสอบระบบทั้งสองโดยกำหนดให้ระบบที่ 1 ใช้น้ำเป็นสารทำงาน และระบบที่ 2 ใช้ของไหลนาโนกราฟีนเป็นสารทำงาน ทำการปรับเปลี่ยนค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารทำงานที่ใช้กับระบบทั้งสองจำนวน 3 ค่า ได้แก่ 1.0 1.5 และ 2.0 LPM ตามลำดับ ขณะทำการทดสอบผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลต่าง ๆ ได้แก่

1) ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ ( $W/m^2$ )

2) ค่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อม ( $^{\circ}C$ )

3) ค่าอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆ ( $^{\circ}C$ ) ภายในระบบผลิตน้ำร้อนต้นแบบ โดยตำแหน่งการเก็บข้อมูล

อุณหภูมิ ณ จุดต่างๆ ภายในระบบผลิตน้ำร้อนต้นแบบดังแสดงในภาพที่ 26

3.1) อุณหภูมิสารทำงาน ณ ทางเข้าที่อรับรังสี (T1)

3.2) อุณหภูมิสารทำงาน ณ ทางออกที่อรับรังสี (T2)

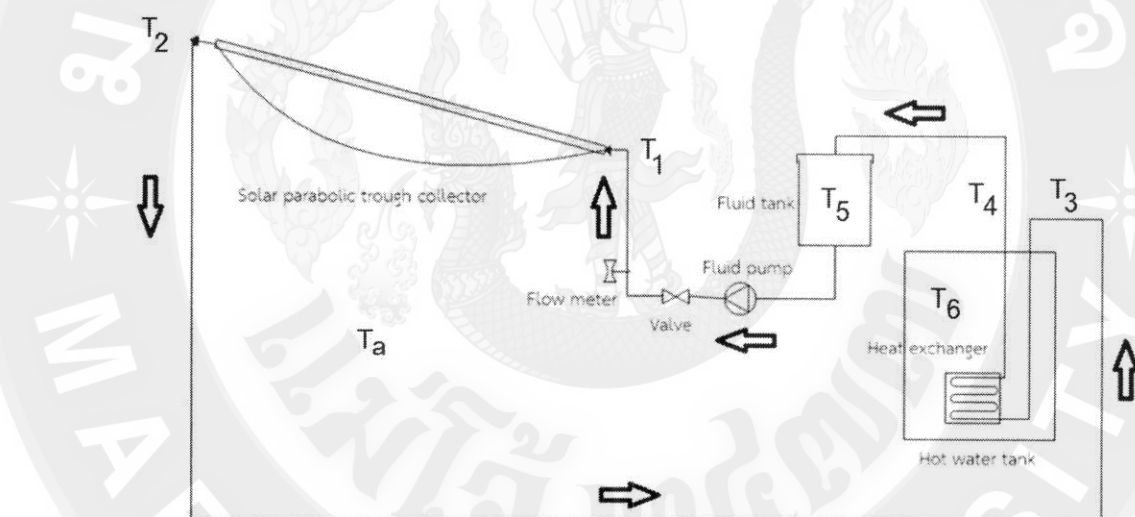
3.3) อุณหภูมิสารทำงาน ณ ทางเข้าที่อเข้าคอยล์ (T3)

3.4) อุณหภูมิสารทำงาน ณ ทางเข้าที่อออกคอยล์ (T4)

3.5) อุณหภูมิสารทำงานในถังพักสารทำงาน (T5)

3.6) อุณหภูมิน้ำร้อนภายในถังกักเก็บน้ำร้อน (T6)

3.7) อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ( $T_a$ )



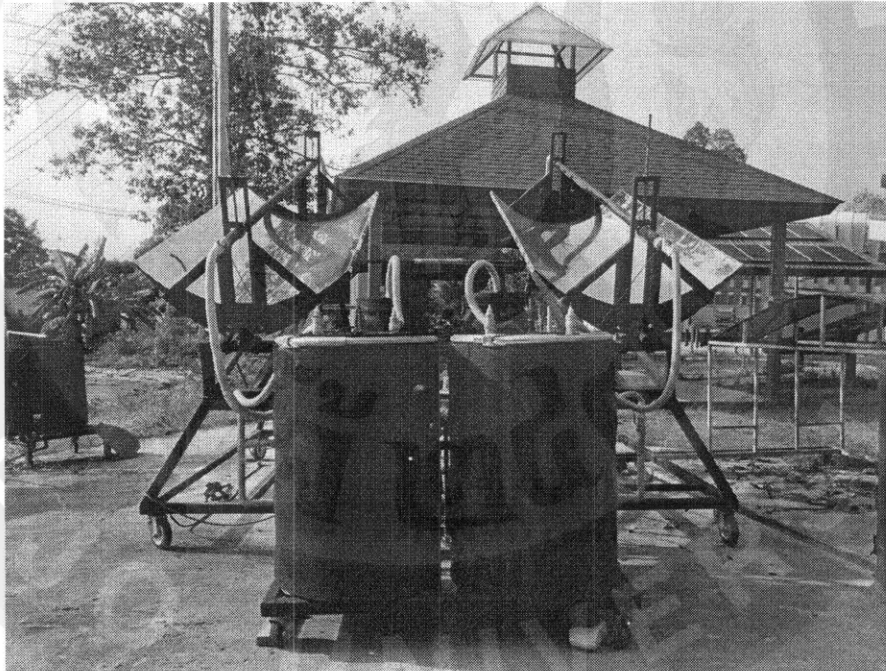
ภาพที่ 24 ตำแหน่งการเก็บข้อมูลอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆ ภายในระบบผลิตน้ำร้อนต้นแบบ

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

การศึกษาศมรรถนะทางความร้อนของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกโดยใช้ของไหลนาโนเป็นสารทำงานในงานวิจัยนี้ แบ่งผลการการศึกษาออกเป็น 1) ผลการออกแบบและสร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกสำหรับผลิตน้ำร้อนต้นแบบ 2) คุณสมบัติของสารทำงานนาโนกราฟีน 3) อุณหภูมิ ณ จุดต่าง ๆ ของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลิกต้นแบบ 4) สมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกสำหรับระบบผลิตน้ำร้อนต้นแบบ และ 5) ค่าประสิทธิภาพของระบบ โดยผลการศึกษามีรายละเอียดดังต่อไปนี้

**ผลการออกแบบและสร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกสำหรับผลิตน้ำร้อนต้นแบบ**



ภาพที่ 25 ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกต้นแบบ

จากการออกแบบสร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกสำหรับระบบผลิตน้ำร้อนต้นแบบ ในส่วนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทำการออกแบบโครงสร้างหลักรูปทรงพาราโบลาคด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สำหรับเป็นฐานติดตั้งแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่สร้างจากแผ่นสแตนเลสให้เป็นรางพาราโบลิก โดยกำหนดให้พื้นที่รับแสงมีขนาดเท่ากับ  $2 \text{ m}^2$  ทำการหาค่าเพื่อติดตั้งท่อรับรังสีอาทิตย์ที่ระยะโฟกัสของ

รางพาราโบลาโดยคำนวณจากสมการที่ 2 ความกว้างของรางพาราโบลาในงานวิจัยนี้อยู่ที่ 1.03 m และระยะไฟกัสที่ทำการติดตั้งท่อรับรังสีอาทิตย์อยู่ที่ 0.26 m



ภาพที่ 26 โครงเหล็กรูปทรงพาราโบลาที่ทำการออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ท่อรับรังสีอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้สร้างจากท่อเหล็กกลมไร้ตะเข็บที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจากภายนอกท่อเท่ากับ 3.8 cm ความยาว 3 m ทำการติดตั้งตัวลดขนาดของท่อจาก 3.8 cm ให้เหลือ 1.27 cm เนื่องจากระบบท่อของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลาสำหรับผลิตน้ำร้อนต้นแบบในงานวิจัยนี้มีขนาดอยู่ที่ 1.27 cm ในส่วนโครงเหล็กสำหรับติดตั้งตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลาในงานวิจัยนี้ ถูกสร้างให้ติดตั้งแกนเหนือ – ใต้ มีขนาดทำมุม 18 องศา จากพื้นราบเนื่องจากเป็นขนาดมุมตกกระทบของรังสีอาทิตย์ในบริเวณพื้นที่เชียงใหม่ ถึงพักสารทำงานที่ถูกติดตั้งเป็นถังพลาสติก PE (Polyethylene) ขนาด 30 L และถังกักเก็บน้ำร้อนที่ใช้เป็นถังเหล็กขนาด 200 L ทำการติดตั้งโดยรอบเพื่อลดการสูญเสียความร้อน

ผลการทดสอบการทำงานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลาต้นแบบในงานวิจัยนี้พบว่า แผงสะท้อนรังสีอาทิตย์รูปพาราโบลาสามารถรับและสะท้อนรังสีอาทิตย์ไปที่จุดไฟกัสซึ่งติดตั้งท่อรับรังสีได้เป็นอย่างดีในช่วง 11.00 น. ถึง 13.00 น. โดยประมาณ แต่นอกเหนือจากช่วงเวลาดังกล่าวแนวของรังสีสะท้อนจะเบี่ยงเบนจะแนวของท่อรับรังสี เนื่องจากแผงรับรังสีของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลาต้นแบบในงานวิจัยนี้ถูกติดตั้งแบบคงที่ ไม่มีการปรับทิศทางตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์ ทำให้ช่วงเวลาก่อน 11.00 น. และ หลัง 13.00 น. นั้น ตำแหน่งของดวงอาทิตย์จะอยู่นอกกรอบของแผงรับรังสีทำให้การสะท้อนและรวมแสงไม่ดีส่งผลต่ออุณหภูมิของสารทำงานที่ไม่สูงเท่าที่ควร ทั้งนี้จึงควรมีการปรับทิศทางของแผงรับรังสีอย่างสม่ำเสมอเพื่อประสิทธิภาพการสะท้อนที่ดีขึ้น และเมื่อพิจารณาผิวท่อรับรังสีด้านที่รังสีสะท้อนตกกระทบพบว่าในช่วงเวลาที่ความเข้มแสงสูงและการสะท้อนเกิดได้ดี (11.00 น. – 13.00 น.) พบว่าเกิดไอความร้อนขึ้นโดยรอบเนื่องจากท่อรับรังสีดังกล่าวไม่ได้ถูกรอบ

ด้วยท่อแก้วทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนของอากาศโดยรอบผิวท่อเป็นเหตุให้อุณหภูมิของสารทำงานที่ไม่สูงเท่าที่ควรเช่นกัน

### ผลของการผสมอนุภาคนาโนกราฟีนต่อสมบัติของสารทำงาน

งานวิจัยนี้ได้ทำการผสมอนุภาคนาโนกราฟีนที่อัตราความเข้มข้นโดยน้ำหนักเท่ากับ 0.05 %wt 0.075 %wt และ 0.100 %wt ตามลำดับ จากการผสมอนุภาคนาโนกราฟีนกับสารทำงานพื้นฐานสามารถนำค่ามาคำนวณสมบัติด้านต่าง ๆ ของสารทำงานนาโนกราฟีนได้ดังต่อไปนี้

#### 1. สมบัติด้านกายภาพและเคมีของสารทำงาน

##### 1.1 ค่าความหนาแน่น (Density, $\rho$ )

จากการผสมอนุภาคนาโนกราฟีนที่มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ  $2,620 \text{ kg/m}^3$  กับน้ำที่มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ  $1,000 \text{ kg/m}^3$  ด้วยอัตราส่วนความเข้มข้นโดยน้ำหนักเท่ากับ 0.05 %wt 0.075 %wt และ 0.100 %wt จะได้สารทำงานนาโนที่มีค่าความหนาแน่นสูงขึ้น โดยสารทำงานดังกล่าวมีค่าความหนาแน่นสูงกว่าน้ำซึ่งเป็นของไหลฐานเท่ากับ 0.031 % 0.046 % และ 0.062 % ตามลำดับ ดังตารางที่ 2 จากการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกต้นแบบในงานวิจัยนี้ซึ่งกำหนดค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตร ( $\dot{V}$ ; LPM) ของระบบที่ใช้น้ำและสารทำงานนาโนเท่ากันทั้งหมด 3 ค่าอัตราการไหล (1.0 LPM 1.5 LPM และ 2.0 LPM) จะพบว่าการเพิ่มขึ้นของสมบัติด้านความหนาแน่นของสารทำงานนาโนทำให้ระบบที่ใสสารทำงานนาโนมีค่าอัตราการไหลเชิงมวล ( $\dot{m}$ ; kg/s) ที่สูงกว่าระบบที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน ผลของการผสมอนุภาคนาโนต่อค่าความหนาแน่นและอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานแสดงดังตารางที่ 3

##### 1.2 ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacity, $c_p$ )

การผสมอนุภาคนาโนกราฟีนที่มีค่าความจุความร้อนจำเพาะเท่ากับ  $700 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$  กับน้ำซึ่งมีค่าความจุความร้อนจำเพาะเท่ากับ  $4,186 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$  ด้วยอัตราส่วนความเข้มข้นโดยน้ำหนักเท่ากับ 0.05 %wt 0.075 %wt และ 0.100 %wt จะได้สารทำงานนาโนที่มีค่าความจุความร้อนจำเพาะลดลง โดยสารทำงานดังกล่าวมีค่าความจุความร้อนจำเพาะต่ำกว่าน้ำซึ่งเป็นของไหลฐานเท่ากับ 0.016 % 0.023 % และ 0.031 % ตามลำดับ ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลของการผสมอนุภาคนาโนต่อสมบัติด้านค่าความหนาแน่น ( $\rho$ ) และค่าความจุความร้อนจำเพาะ ( $c_p$ ) ของสารทำงาน

ชนิด	ความหนาแน่น ( $\rho$ ; kg/m <sup>3</sup> )	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ( $c_p$ ; J/kg·K)
น้ำ	1,000	4,186.00
กราฟีน	2,620	700
สารทำงานนาโน	1,000.31 (+0.031 %)	4,185.35 (-0.016%)
	0.050 %wt 1,000.46 (+0.046 %)	4,185.03 (-0.023%)
	0.075 %wt 1,000.62 (+0.062 %)	4,184.70 (-0.031%)
	0.100 %wt 1,000.62 (+0.062 %)	4,184.70 (-0.031%)

ตารางที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านค่าความหนาแน่น ( $\rho$ ) ต่อค่าอัตราการไหลเชิงมวล ( $\dot{m}$ ) ของสารทำงาน

อัตราการไหลเชิงปริมาตร ( $\dot{V}$ ; LPM)	ชนิดสารทำงาน	ความหนาแน่น ( $\rho$ ; kg/m <sup>3</sup> )	อัตราการไหลเชิงมวล ( $\dot{m}$ ; kg/s)	$\dot{m}c_p$ (J/s-K)
1.0	น้ำ	1,000	0.016667	69.767
	0.050 %wt	1,000.31 +0.031%	0.016672 +0.029%	69.777 +0.015%
	0.075 %wt	1,000.46 +0.046%	0.016674 +0.044%	69.783 +0.022%
	0.100 %wt	1,000.62 +0.062%	0.016677 +0.060%	69.788 +0.030%
	นาโน			
	น้ำ	1,000	0.025000	104.650
1.5	0.050 %wt	1,000.31 +0.031%	0.025008 +0.031%	104.666 +0.015%
	0.075 %wt	1,000.46 +0.046%	0.025012 +0.046%	104.674 +0.023%
	0.100 %wt	1,000.62 +0.062%	0.025016 +0.062%	104.682 +0.031%
	นาโน			
	น้ำ	1,000	0.033333	139.533
	2.0	0.050 %wt	1,000.31 +0.031%	0.033344 +0.032%
0.075 %wt		1,000.46 +0.046%	0.033349 +0.047%	139.565 +0.023%
0.100 %wt		1,000.62 +0.062%	0.033354 +0.063%	139.576 +0.031%
นาโน				

จากผลของการผสมอนุภาคนาโนกราฟีนลงในน้ำเพื่อใช้เป็นสารทำงานนาโนในระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกต้นแบบ จะเห็นได้ว่าอนุภาคดังกล่าวมีส่วนในการเพิ่มสมบัติค่าความหนาแน่น ( $\rho$ ) ให้กับสารทำงานแต่ขณะเดียวกันการผสมอนุภาคนาโนก็ลดสมบัติด้านค่าความจุความร้อนจำเพาะ ( $c_p$ ) ของสารทำงานด้วย แต่เมื่อพิจารณาสมการการถ่ายเทความร้อน (



$Q = \dot{m}c_p \Delta T$ ) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการไหลเชิงมวล ( $\dot{m}$ ) ความจุความร้อนจำเพาะ ( $c_p$ ) และค่าผลต่างของอุณหภูมิสารทำงาน ณ ทางเข้า-ออก ของท่อเก็บรังสี พบว่าการเพิ่มขึ้นของสมบัติด้านค่าความหนาแน่น ( $\rho$ ) ของสารทำงานนาโนส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราการไหลเชิงมวล ( $\dot{m}$ ) ของสารทำงานดังกล่าวทำให้สามารถชดเชยค่าความจุความร้อนจำเพาะ ( $c_p$ ) ของสารทำงานนาโนที่ลดลงได้ในพจน์ของผลคูณของค่าอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานกับค่าความจุความร้อนจำเพาะ ( $\dot{m}c_p$ ) โดยระบบที่ใช้สารทำงานนาโนให้ค่าผลคูณของค่าพารามิเตอร์ทั้งสองดังกล่าวสูงกว่าระบบที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานเล็กน้อยแสดงดังตารางที่ 6 นั่นจึงเป็นข้อได้ดีของการใช้สารทำงานนาโนเมื่อเทียบกับการใช้น้ำที่ค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรเท่ากัน

## 2. สมบัติด้านการถ่ายเทความร้อนของสารทำงาน

### 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k)

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ของของไหลผสมสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3 ซึ่งเกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอนุภาคที่ใช้ในการผสมซึ่งในงานวิจัยนี้คืออนุภาคนาโนกราฟีน ( $k_{\text{กราฟีน}} = 5,000 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหลพื้นฐาน ซึ่งในงานวิจัยนี้คือน้ำ ( $k_{\text{น้ำ}} = 0.6 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) โดยสมบัติด้านการนำความร้อนของอนุภาคที่ใช้ในการผสมจะสามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหลผสม (อนุภาค+ของไหลฐาน) ซึ่งในงานวิจัยนี้เรียกของไหลผสมนี้ว่าสารทำงานนาโน หรือของไหลนาโน (อนุภาคนาโนกราฟีน+น้ำ) ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของสารทำงานนาโนที่ผลิตได้จะแปรผันตามค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคนาโนซึ่งก็คือค่าความเข้มข้นโดยน้ำหนัก (%wt) ที่ทำการผสม โดยงานวิจัยนี้ทำการผสมอนุภาคนาโนกราฟีนด้วยค่าความเข้มข้นโดยน้ำหนักทั้งสิ้น 3 ค่า เท่ากับ 0.050 %wt 0.075 %wt และ 0.100 %wt ตามลำดับ จากการคำนวณพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของสารทำงานนาโนที่ผลิตได้มีค่าเท่ากับ 0.614 W/m·K 0.621 W/m·K และ 0.628 W/m·K ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าน้ำซึ่งเป็นของไหลฐานเท่ากับ 2.34 % 3.51 % และ 4.68 % ตามลำดับ ดังตารางที่ 4

### 2.2 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h)

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ของของไหลซึ่งไหลภายในท่อสามารถวิเคราะห์ได้จากสภาพการไหลด้วยค่าเรย์โนลส์นัมเบอร์ (Re) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 ค่าเรย์โนลส์นัมเบอร์ของการไหลน้อยกว่า 2,300 สภาพการไหลประเภทนี้เรียกว่า การไหลภายในท่อแบบราบเรียบ (Laminar Flow in Tubes) และ กรณีที่ 2 ค่าเรย์โนลส์นัมเบอร์ของการไหลเท่ากับ หรือ มากกว่า 2,300 สภาพการไหลประเภทนี้เรียกว่า การไหลในท่อแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow in Tubes) โดยจากการกำหนดค่าอัตราการไหลของสารทำงานทั้ง 2 ชนิด (น้ำ และ สารทำงานนาโน) ในงานวิจัยนี้

จำนวน 3 ค่า เท่ากับ 1.0 LPM 1.5 LPM และ 2.0 LPM พบว่าทุกค่าอัตราการไหลดังกล่าวให้ค่าเรย์โนลด์สสัมเบอร์ของการไหลน้อยกว่า 2,300 ทำให้เกิดสภาพการไหลภายในท่อแบบราบเรียบ (Laminar Flow in Tubes) ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ของสารทำงานทั้งสองสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 12 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) จะมีค่าแปรผันตรงกับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ของของไหลนั้น ๆ กล่าวคือ ในกรณีการไหลภายในท่อแบบราบเรียบนั้น ถ้าของไหลใดมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) สูง จะทำให้ของไหลนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) สูงตามไปด้วย โดยสารทำงานนาโนกราฟีนที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.050 %wt 0.075 %wt และ 0.100 %wt ในงานวิจัยนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) เท่ากับ 49.94 W/m<sup>2</sup>·K 50.51 W/m<sup>2</sup>·K และ 51.08 W/m<sup>2</sup>·K ตามลำดับ มีค่าสูงกว่าน้ำซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) คงที่ในทุกอัตราการไหลเท่ากับ 48.80 W/m<sup>2</sup>·K ผลของการเพิ่มค่าความเข้มข้นเชิงน้ำหนักของอนุภาคนาโนกราฟีนลงในน้ำ ทำให้ได้สารทำงานที่มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) เพิ่มขึ้น 2.34 % 3.50 % และ 4.67 % ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ของไหลนาโนกราฟีนในงานวิจัยนี้

สารทำงาน	อัตราการไหล (LPM)	Re	k (W/m·K)	h (W/m <sup>2</sup> ·K)
น้ำ	2.0	1,184.211	0.600	48.80
	1.0	562.674		
นาโน 0.050 %wt	1.5	900.278	0.614	49.94
	2.0	1,181.615	(+2.34%)	(+2.34%)
นาโน 0.075 %wt	1.0	562.733	0.621	50.51
	1.5	900.373	(+3.50%)	(+3.50%)
นาโน 0.100 %wt	2.0	1,181.739	0.628	51.08
	1.0	562.848	(+4.67%)	(+4.67%)
	1.5	900.556		
	2.0	1,181.980		

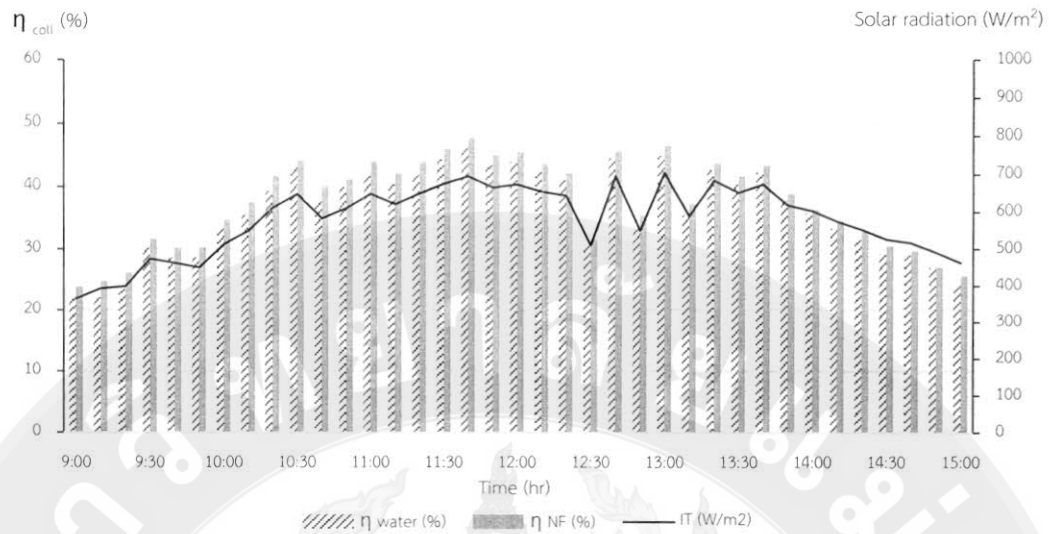
หมายเหตุ \* ค่าเรย์โนลด์สสัมเบอร์ (Re) สูงสุดของสารทำงานนาโนต่ำกว่าน้ำที่อัตราการไหลเดียวกันเนื่องจากสารทำงานนาโนมีความหนืดที่สูงกว่าน้ำ

จากผลของการผสมอนุภาคนาโนกราฟีนต่อสมบัติของสารทำงานด้านการถ่ายเทความร้อนของสารทำงานประกอบด้วยค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ซึ่งเป็นผลการคำนวณจากสมการที่ 3 และสมการที่ 12 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการผสมอนุภาคนาโนกราฟีนทำให้สารทำงานมีสมบัติด้านค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) สูงขึ้นตามค่าอัตราส่วนโดยมวลและมีค่า

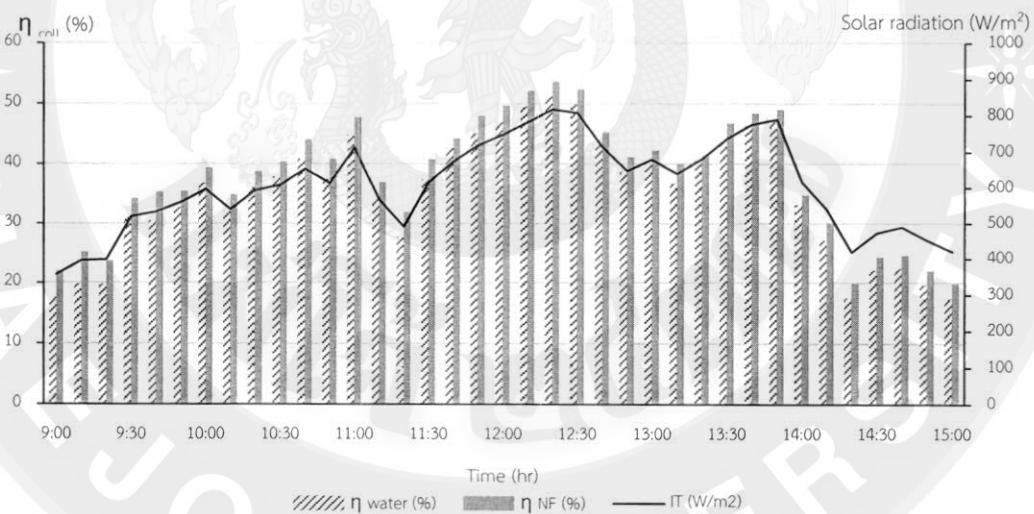
สูงกว่าน้ำซึ่งเป็นของไหลฐานซึ่งมีค่าสูงกว่าน้ำเท่ากับ 2.34 % 3.50 % และ 4.67 % เมื่อสารทำงานนาโนมีค่าความเข้มข้นเท่ากับ 0.050 %wt 0.075 %wt และ 0.100 %wt ตามลำดับ โดยการสูงขึ้นของสมบัติดังกล่าวนี้ส่งผลต่อความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของสารทำงานในรูปแบบของการนำความร้อน (Heat Conduction) และจากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ด้วยค่าอัตราการในช่วงที่ใช้ทดสอบตามสมการที่ 12 พบว่าเกิดการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) ทำให้การปรับแก้ค่าอัตราการไหลในงานวิจัยนี้ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) โดยค่าดังกล่าวจะแปรผันตามค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ของสารทำงานโดยตรงซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่ทำการผสมทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลนาโนสูงกว่าน้ำเท่ากับ ค่าสูงกว่าน้ำเท่ากับ 2.34 % 3.50 % และ 4.67 % เมื่อสารทำงานนาโนมีค่าความเข้มข้นเท่ากับ 0.050 %wt 0.075 %wt และ 0.100 %wt ตามลำดับเช่นกัน จากการเพิ่มขึ้นของสมบัติทั้งสองดังกล่าวข้างต้นจึงสามารถวิเคราะห์ได้ว่าการผสมอนุภาคนาโนสามารถเพิ่มสมบัติด้านการถ่ายเทความร้อนของสารทำงานได้และส่งผลต่อความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของสารทำงานที่ดีขึ้น ทำให้ของไหลนาโนกราฟีนในงานวิจัยนี้สามารถถ่ายเทความร้อนที่ได้รับจากรังสีอาทิตย์สู่น้ำร้อนภายในถังกักเก็บได้ดีกว่าน้ำจึงทำให้ประสิทธิภาพของระบบที่ใช้สารทำงานนาโนกราฟีนสูงกว่าระบบที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานเช่นกัน

### ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

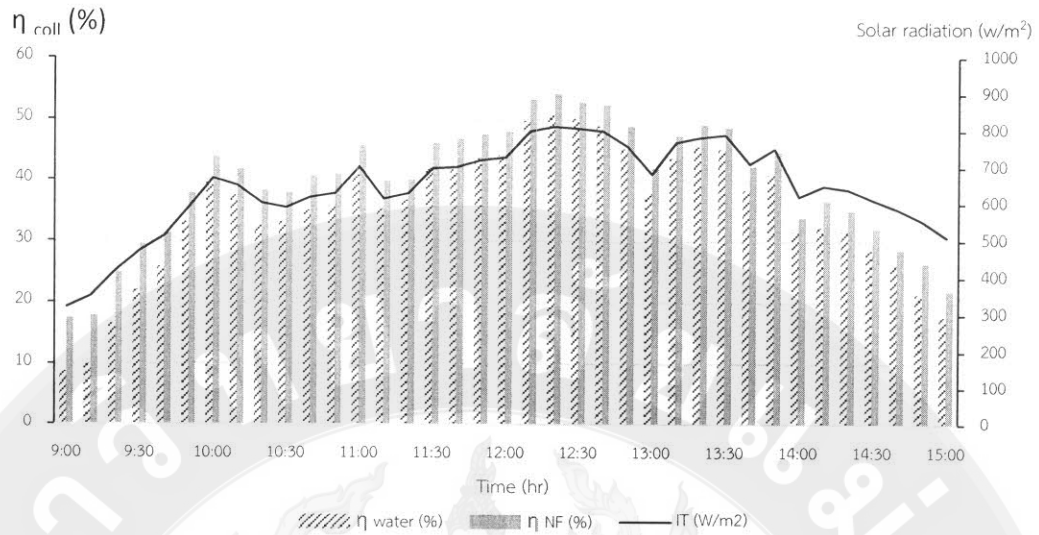
การทดสอบประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลาติดตั้งแบบในงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 2 ระบบ ได้แก่ 1) ระบบที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน และ 2) ระบบที่ใช้ของไหลนาโนกราฟีนที่มีค่าความเข้มข้น 0.050 %wt 0.075 %wt และ 0.100 %wt เป็นสารทำงานตามลำดับ ทำการปรับแก้ค่าอัตราการไหลของสารทำงานของทั้งสองระบบให้ค่าเท่ากันที่ 1.0 LPM 1.5 LPM และ 2.0 LPM เก็บข้อมูลค่าพารามิเตอร์ของระบบทุก 10 min ภายใต้สภาวะแวดล้อมเดียวกัน แล้วนำข้อมูลที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นรังสีอาทิตย์กับค่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ต้นแบบที่ใช้สารทำงานสองชนิดดังกล่าวข้างต้น โดยผลการทดสอบมีรายละเอียดดังภาพที่ 27 ถึงภาพที่ 35



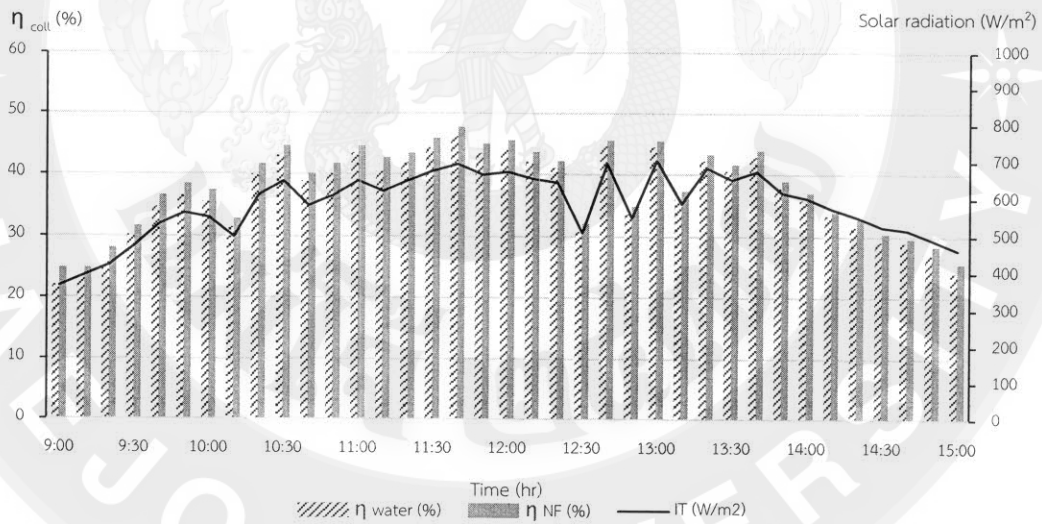
ภาพที่ 27 ผลการทดสอบเมื่อใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโน 0.050 %wt  
อัตราการไหล 1.0 LPM



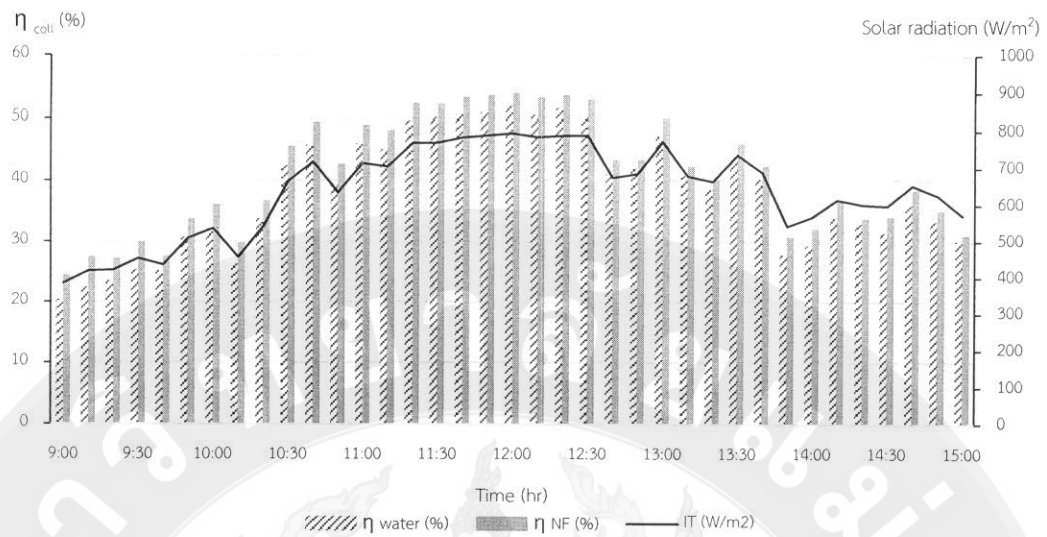
ภาพที่ 28 ผลการทดสอบเมื่อใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโน 0.050 %wt  
อัตราการไหล 1.5 LPM



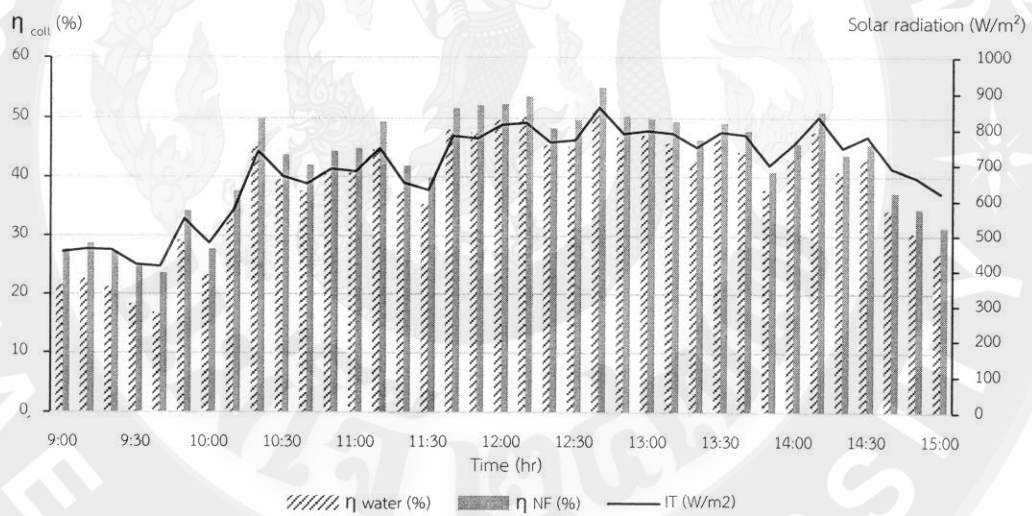
ภาพที่ 29 ผลการทดสอบเมื่อใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโน 0.050 %wt  
อัตราการไหล 2.0 LPM



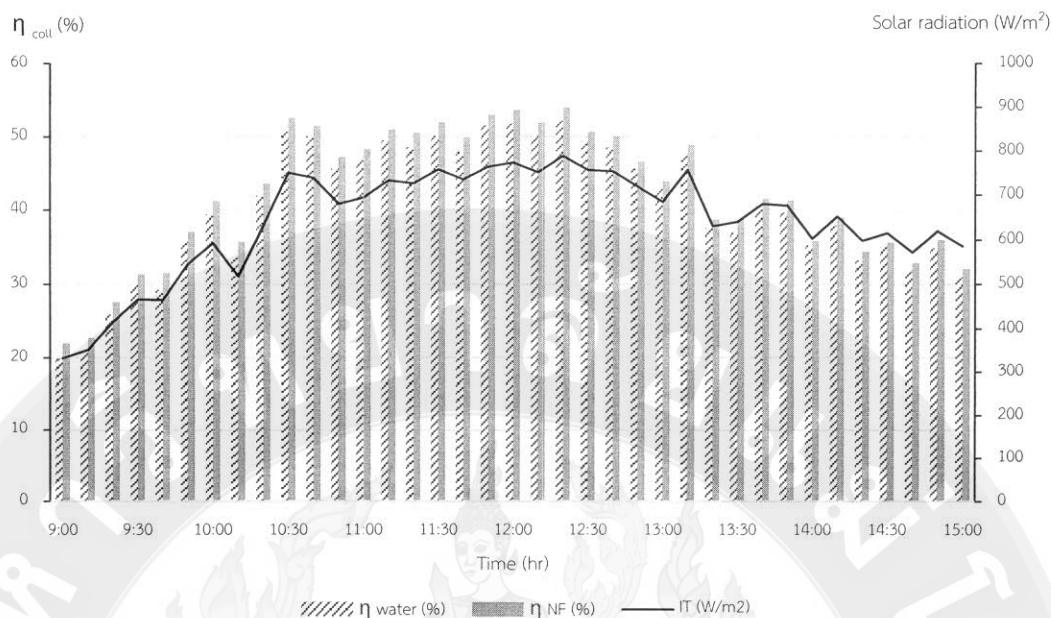
ภาพที่ 30 ผลการทดสอบเมื่อใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโน 0.075 %wt  
อัตราการไหล 1.0 LPM



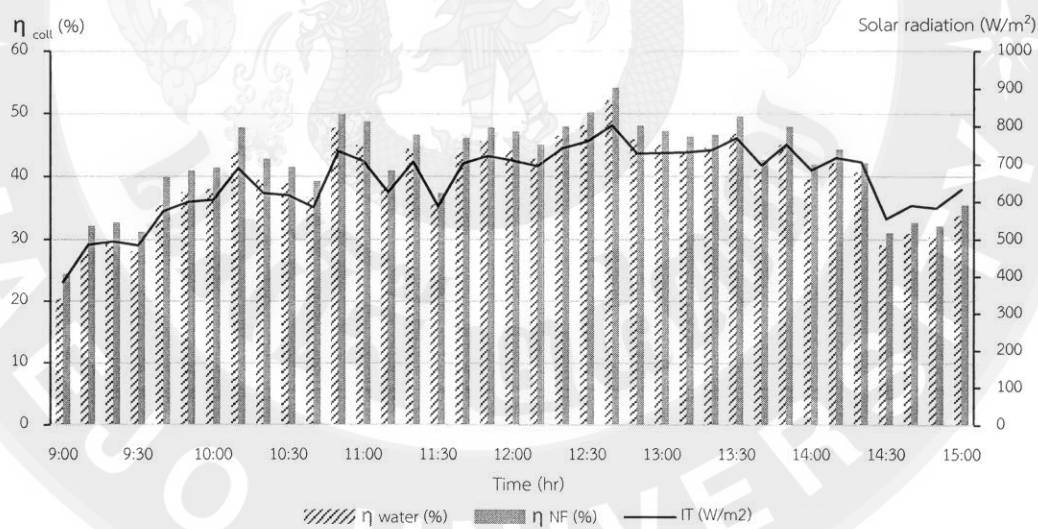
ภาพที่ 31 ผลการทดสอบเมื่อใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโน 0.075 %wt  
อัตราการไหล 1.5 LPM



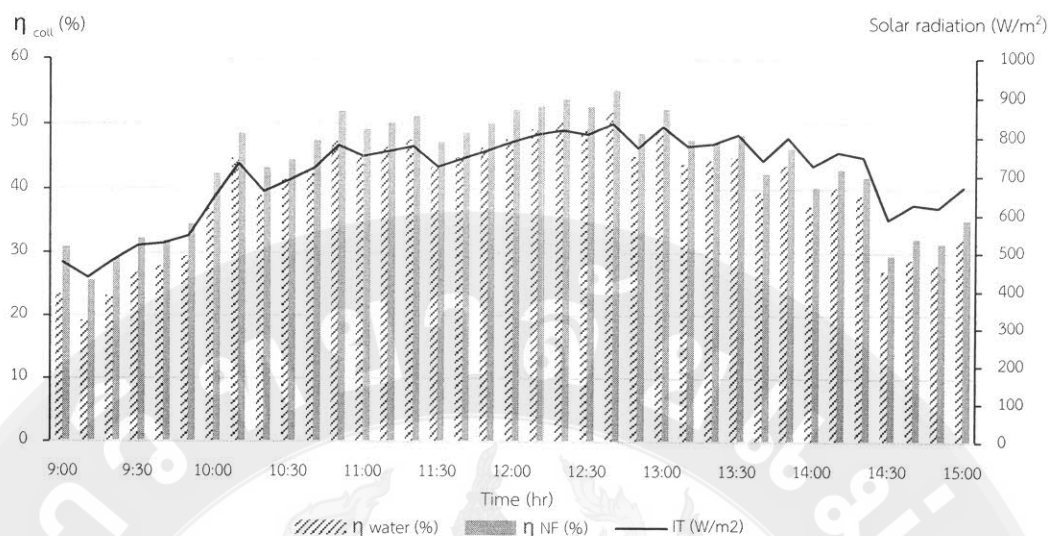
ภาพที่ 32 ผลการทดสอบเมื่อใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโน 0.075 %wt  
อัตราการไหล 2.0 LPM



ภาพที่ 33 ผลการทดสอบเมื่อใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโน 0.100 %wt  
อัตราการไหล 1.0 LPM



ภาพที่ 34 ผลการทดสอบเมื่อใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโน 0.100 %wt  
อัตราการไหล 1.5 LPM



ภาพที่ 35 ผลการทดสอบเมื่อใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโน 0.100 %wt  
อัตราการไหล 2.0 LPM

จากภาพที่ 27 ถึง 35 จะเห็นได้ว่าค่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทั้งแบบใช้น้ำและใช้ของไหลนาโนเป็นสารทำงานจะมีค่าแปรผันตามค่าความเข้มข้นของรังสีอาทิตย์ กล่าวคือ เมื่อค่ารังสีอาทิตย์มีความเข้มข้นสูงค่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ก็จะสูงตามไปด้วย โดยจะสังเกตได้ว่าค่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ต้นแบบที่ใช้สารทำงานนาโนจะมีค่าสูงกว่าค่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ต้นแบบที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน ทั้งนี้เกิดจากระบบที่ใช้สารทำงานนาโนซึ่งมีสมบัติด้านค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ( $k$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ) ที่ดีกว่าน้ำจึงทำให้เมื่อทำงานที่สภาวะแวดล้อมเดียวกันคือที่ค่าความเข้มข้นรังสีอาทิตย์เท่ากันและอุณหภูมิแวดล้อมเท่ากันระบบที่ใช้สารทำงานนาโนจะมีค่าผลต่างอุณหภูมิของสารทำงานทางเข้า ( $T_{fi}$ ) และทางออก ( $T_{fo}$ ) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์สูงกว่าระบบที่ใช้น้ำ ซึ่งในช่วงเริ่มต้นการทดสอบความแตกต่างของอุณหภูมิของทั้งสองระบบจะแตกต่างกันน้อยมาก เมื่อเวลาผ่านไปผลต่างของอุณหภูมิจะเริ่มชัดเจน และเมื่อเข้าสู่ช่วงเที่ยงวันค่าอุณหภูมิของทั้งสองระบบจะแตกต่างกันอย่างชัดเจน จากผลต่างอุณหภูมิที่สูงกว่าดังกล่าว เมื่อนำข้อมูลมาคำนวณค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ตัวเก็บรังสี ( $Q_{coll}$ ) จึงทำให้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ใช้สารทำงานนาโนมีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าระบบที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานในทุกกรณีทดสอบ ทำให้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ใช้สารทำงานนาโนมีค่าประสิทธิภาพที่สูงกว่าด้วย โดยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ในงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 55.16 % เมื่อใช้สารทำงานนาโนเข้มข้น 0.100 %wt ที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรเท่ากับ 2.0 LPM ซึ่งสูงกว่ากรณีใช้น้ำเท่ากับ 3.36 % โดยมีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยตลอดวันที่ทำการทดสอบเท่ากับ 43.59 % สูงกว่าระบบที่ใช้น้ำเท่ากับ 3.88 % ในทำนองเดียวเมื่อพิจารณาเงื่อนไข



การทดสอบอื่นก็พบว่าระบบที่ใช้สารทำงานนาโนมีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยตลอดวันสูงกว่าระบบที่ใช้น้ำ เป็นสารทำงานในทุกค่าความเข้มข้นและค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตร ผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพ ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ต้นแบบในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ค่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ต้นแบบ

สารทำงาน	อัตราการไหล	$T_s$		$Q_{coll}$ (W)		$Q_s$ (J)		$\eta_{coll}$ (%)		$\eta_{sys}$ (%)	
		MAX	AVG	MAX	AVG	MAX	AVG	MAX	AVG	MAX	AVG
นาโน 0.050 %wt	1.0	41.7	35.5	662.89	446.39	418,600	276,741	47.69	37.50	59.83	39.02
	1.5	42.7	36.0	879.21	482.60	502,320	299,997	53.74	37.91	61.60	39.85
	2.0	43.8	36.1	879.21	532.58	502,320	337,206	54.14	39.57	62.41	42.22
นาโน 0.075 %wt	1.0	41.7	35.6	662.92	454.52	418,600	276,741	47.69	37.98	63.42	38.81
	1.5	44.0	36.5	858.34	542.90	502,320	330,229	53.98	40.94	64.24	41.64
	2.0	45.8	36.9	909.05	605.42	586,040	369,763	54.99	42.55	65.12	43.56
นาโน 0.100 %wt	1.0	44.3	36.7	851.42	559.63	502,320	334,880	53.96	42.01	64.94	41.74
	1.5	44.6	36.8	868.85	567.25	502,320	341,857	54.14	42.34	65.85	42.52
	2.0	46.0	37.2	921.21	630.36	502,320	351,159	55.16	43.59	68.14	44.08

จากการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกสำหรับระบบผลิตน้ำร้อนต้นแบบพบว่า ค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์คำนวณได้จากสัดส่วนพลังงานที่ระบบได้รับนั่นก็คือความร้อนจากรังสีอาทิตย์ และ ความร้อนที่สารทำงานได้รับ ( $Q = \dot{m}c_p \Delta T$ ) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการไหลเชิงมวล ( $\dot{m}$ ) ความจุความร้อนจำเพาะ ( $c_p$ ) และค่าผลต่างของอุณหภูมิสารทำงาน ณ ทางเข้า-ออก ของท่อเก็บรังสี โดยผลของการผสมอนุภาคนาโนต่อสมบัติด้านกายภาพและสมบัติด้านความร้อนของสารทำงานที่ได้กล่าวข้างต้นพบว่า สารทำงานนาโนกราฟีนในงานวิจัยนี้มีค่าความจุความร้อนจำเพาะ ( $c_p$ ) ลดลง แต่มีค่าความหนาแน่น ( $\rho$ ) เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าอัตราการไหลเชิงมวล ( $\dot{m}$ ) ของระบบที่ใช้สารทำงานนาโนสูงกว่าระบบที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่น ( $\rho$ ) จึงทำให้ค่าผลคูณของค่าอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานกับค่าความจุความร้อนจำเพาะ ( $\dot{m}c_p$ ) ของระบบที่ใช้สารทำงานนาโนสูงกว่าระบบที่ใช้น้ำเล็กน้อย ดังนั้นพลังงานที่สารทำงานของทั้งสองระบบได้รับ ( $Q = \dot{m}c_p \Delta T$ ) จะแตกต่างกันเนื่องมาจากค่าผลต่างของอุณหภูมิสารทำงาน ณ ทางเข้า-ออกของท่อเก็บรังสีเป็นหลัก และจากผลการทดสอบพบว่า ระบบที่ใช้สารทำงานนาโนให้ผลต่างของอุณหภูมิดังกล่าวสูงกว่าระบบที่ใช้น้ำในทุกค่าความเข้มข้น และทุกค่าอัตราการไหลทดสอบ ทำให้ระบบที่ใช้สารทำงานนาโนมีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบที่ใช้น้ำ โดยค่าประสิทธิภาพสูงสุดของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ต้นแบบในงานวิจัยนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวเก็บรังสีอาทิตย์ใช้

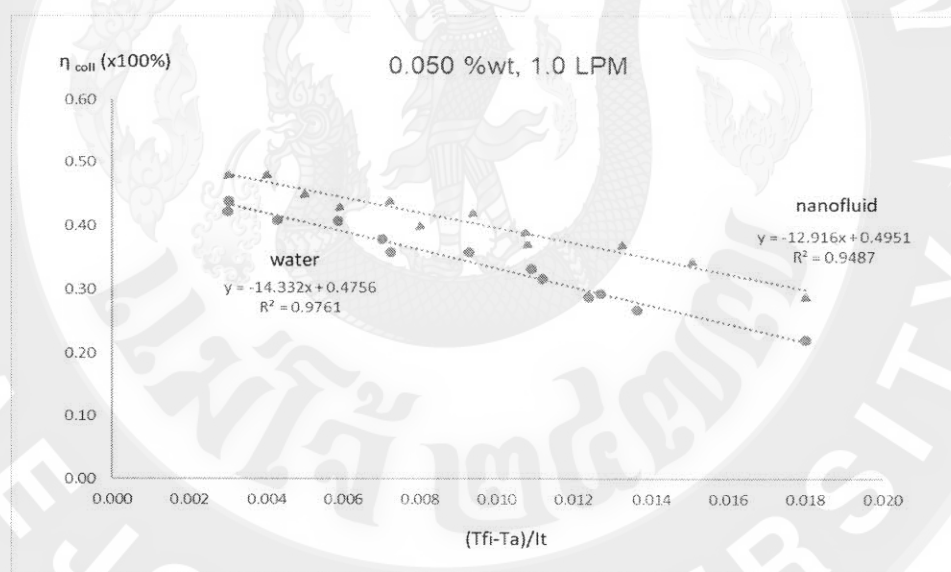
สารทำงานนาโนกราฟีนที่มีค่าความเข้มข้นและอัตราการไหลเชิงปริมาตรเท่ากับ 0.100 %wt และ 2.0 LPM ตามลำดับ

จากผลการทดสอบระบบผลิตน้ำร้อนต้นแบบที่ใช้สารทำงานนาโนและน้ำในสภาวะการทดสอบเดียวกันจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิ ณ จุดต่าง ๆ ของระบบทั้งสองจะแปรผันตามค่าความเข้มข้นของรังสีอาทิตย์ ( $I_T$ ) กล่าวคือ เมื่อรังสีอาทิตย์มีค่าความเข้มข้นรังสีอาทิตย์สูงจะทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิของสารทำงาน ณ ทางเข้าและออกที่รับรังสีสูงขึ้นตามไปด้วย และเมื่ออุณหภูมิของสารทำงาน ณ ทางออกที่รับรังสีสูงขึ้นจะทำให้อุณหภูมิของระบบทุกจุดสูงขึ้นตามไปด้วย เมื่อพิจารณาจากสมบัติของสารทำงานพบว่าระบบที่ใช้สารทำงานนาโนให้ค่าของอุณหภูมิ ณ จุดต่าง ๆ ของระบบสูงกว่าระบบที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน โดยความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของสารทำงานนาโนและน้ำใน ณ สภาวะอัตราการไหลเชิงปริมาตร (LPM) ค่าความเข้มข้นรังสีอาทิตย์ ( $I_T$ ) และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ( $T_a$ ) เดียวกันจะแปรผันตามค่าความเข้มข้นของสารทำงาน กล่าวคือ ยิ่งสารทำงานนาโนมีความเข้มข้นสูงขึ้นจะยิ่งทำให้สารทำงานดังกล่าวมีอุณหภูมิสูงกว่าน้ำที่สภาวะการทดสอบเดียวกัน ทั้งนี้เพราะสมบัติด้านค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ( $k$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ) ของสารทำงานนาโนที่มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายและมีค่าสูงกว่าน้ำส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนของสารทำงานดังกล่าวทำให้สารทำงานสามารถรับพลังงานความร้อนจากรังสีอาทิตย์ได้ดีกว่าน้ำ ดังนั้นการผสมอนุภาคนาโนกับน้ำที่ค่าความเข้มข้นสูงขึ้นจึงส่งผลดีต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อนต้นแบบอย่างมีนัยยะสำคัญ

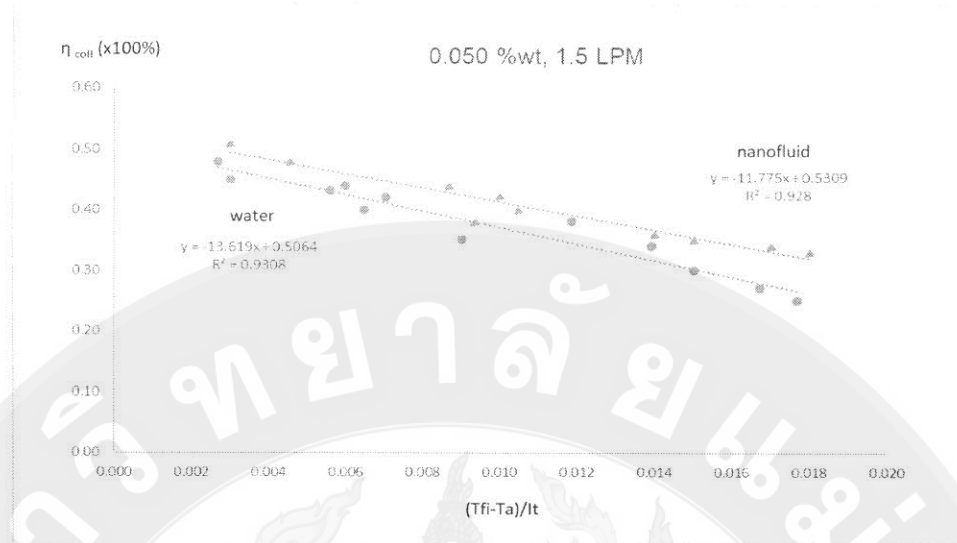
### สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

จากการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกสำหรับระบบผลิตน้ำร้อนต้นแบบเพื่อทราบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เมื่อนำความสัมพันธ์ของค่า  $\eta_{coll}$  และ  $\frac{(T_{fi} - T_a)}{I_T}$  จะได้สมการเส้นตรงที่มีความเข้มข้นเท่ากับค่า  $F_R U_L$  และค่าบนแกน y (แกน  $\eta_{coll}$ ) คือค่า  $F_R (\tau\alpha)_e$  ซึ่งกราฟเส้นดังกล่าวคือเส้นแสดงสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ในกรณีทดสอบต่าง ๆ โดยจากการสร้างกราฟเส้นตรงที่เกิดจากความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้น พบว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบที่ใช้สารทำงานนาโนจะมีค่าสมรรถนะสูงกว่ากรณีใช้น้ำเป็นสารทำงานที่ค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรเท่ากัน ซึ่งกรณีกำหนดค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารทำงานเท่ากับ 1.00 LPM ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ต้นแบบที่ใช้สารทำงานนาโนความเข้มข้น 0.050 %wt 0.075 %wt และ 0.100 %wt จะมีค่า  $F_R (\tau\alpha)_e$  สูงกว่ากรณีใช้น้ำเป็นสารทำงานที่สภาวะทดสอบเดียวกันเท่ากับ 4.10 % 10.37 % และ 11.30 % ตามลำดับ และมีค่า  $F_R U_L$  ต่ำกว่ากรณีใช้น้ำเป็นสารทำงานที่สภาวะทดสอบเดียวกันเท่ากับ 9.88 % 18.50 % และ 24.78 % ตามลำดับ และเมื่อ

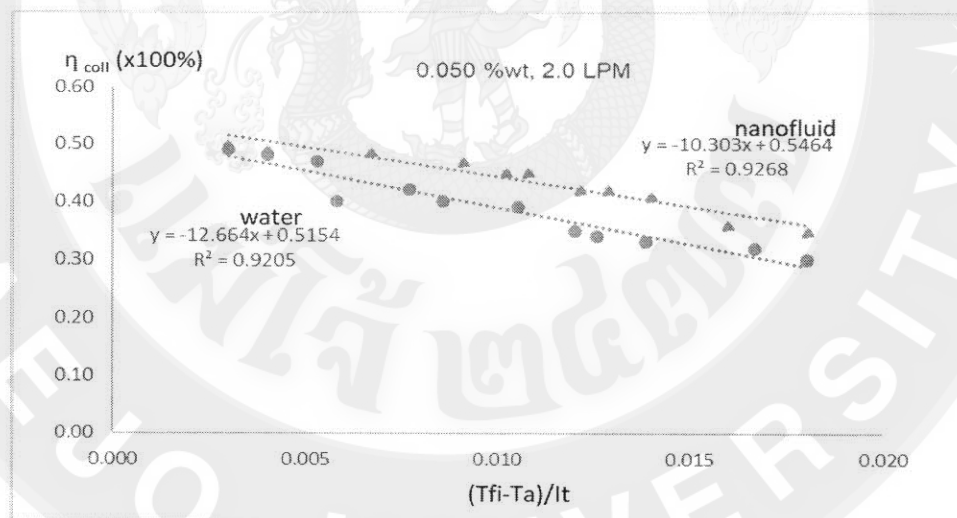
ปรับค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารทำงานเท่ากับ 1.50 LPM ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ต้นแบบที่ใช้สารทำงานนาโนความเข้มข้น 0.050 %wt 0.075 %wt และ 0.100 %wt จะมีค่า  $F_R(\tau\alpha)_e$  สูงกว่ากรณีใช้น้ำเป็นสารทำงานที่สภาวะทดสอบเดียวกันเท่ากับ 4.84 % 10.42 % และ 11.84 % ตามลำดับ และมีค่า  $F_{RUL}$  ต่ำกว่ากรณีใช้น้ำเป็นสารทำงานที่สภาวะทดสอบเดียวกันเท่ากับ 13.54 % 21.59 % และ 29.99 % ตามลำดับ ในทำนองเดียวกัน เมื่อปรับค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารทำงานเท่ากับ 2.00 LPM ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ต้นแบบที่ใช้สารทำงานนาโนความเข้มข้น 0.050 %wt 0.075 %wt และ 0.100 %wt จะมีค่า  $F_R(\tau\alpha)_e$  สูงกว่ากรณีใช้น้ำเป็นสารทำงานที่สภาวะทดสอบเดียวกันเท่ากับ 6.01 % 11.02 % และ 12.70 % ตามลำดับ และมีค่า  $F_{RUL}$  ต่ำกว่ากรณีใช้น้ำเป็นสารทำงานที่สภาวะทดสอบเดียวกันเท่ากับ 18.64 % 25.31 % และ 33.01 % ตามลำดับ จะผลการทดสอบดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการใช้สารทำงานนาโนกับตัวเก็บรังสีต้นแบบทำให้ค่า  $F_R(\tau\alpha)_e$  สูงกว่า และค่า  $F_{RUL}$  ต่ำกว่ากรณีใช้น้ำเป็นสารทำงาน โดยผลของค่าสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แสดงดังภาพที่ 36 ถึง 44 ตามลำดับ



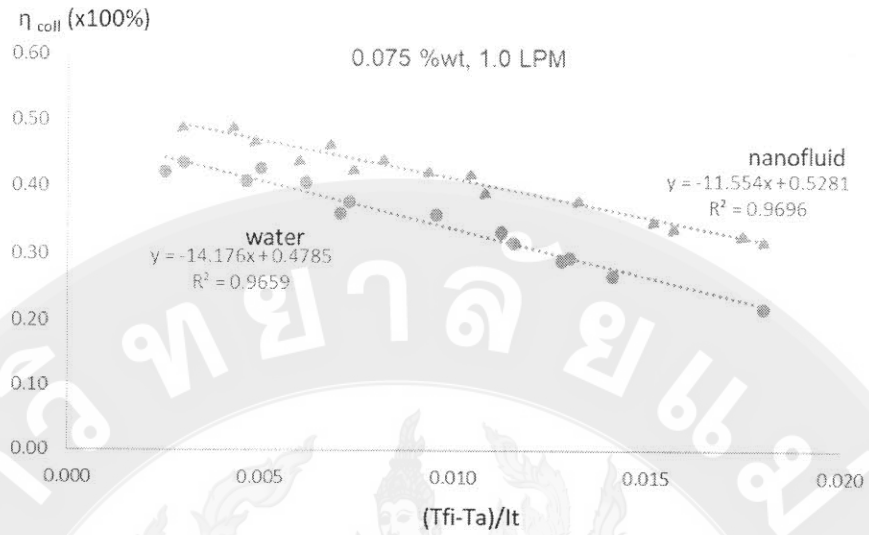
ภาพที่ 36 สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิค กรณีใช้ของไหลนาโนกราฟีนที่ความเข้มข้น 0.050 %wt และน้ำเป็นสารทำงาน ที่อัตราการไหล 1.0 LPM



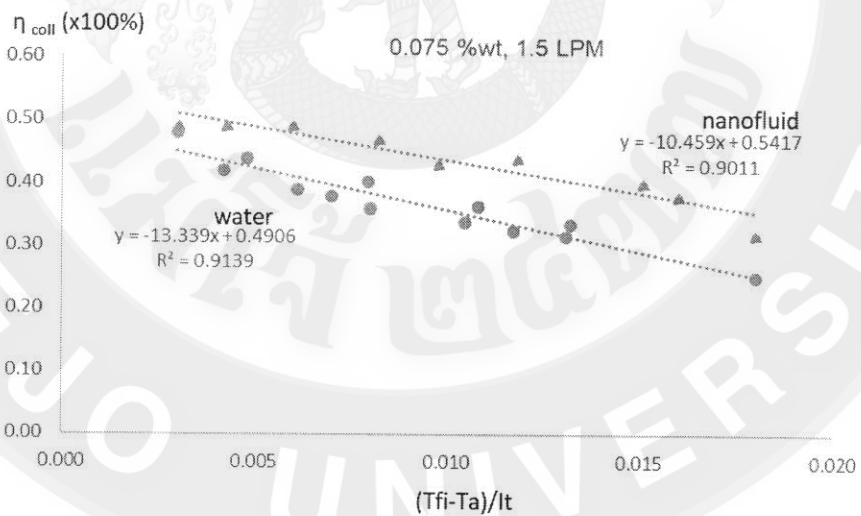
ภาพที่ 37 สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก กรณีใช้  
 ของไหลนาโนกราฟีนที่ความเข้มข้น 0.050 %wt และน้ำ  
 เป็นสารทำงาน ที่อัตราการไหล 1.5 LPM



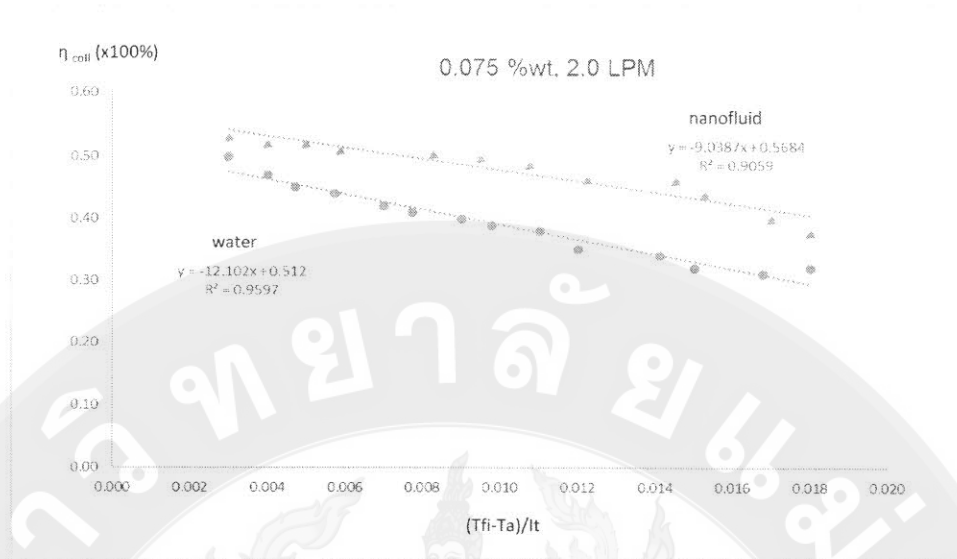
ภาพที่ 38 สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก กรณีใช้  
 ของไหลนาโนกราฟีนที่ความเข้มข้น 0.050 %wt และน้ำ  
 เป็นสารทำงาน ที่อัตราการไหล 2.0 LPM



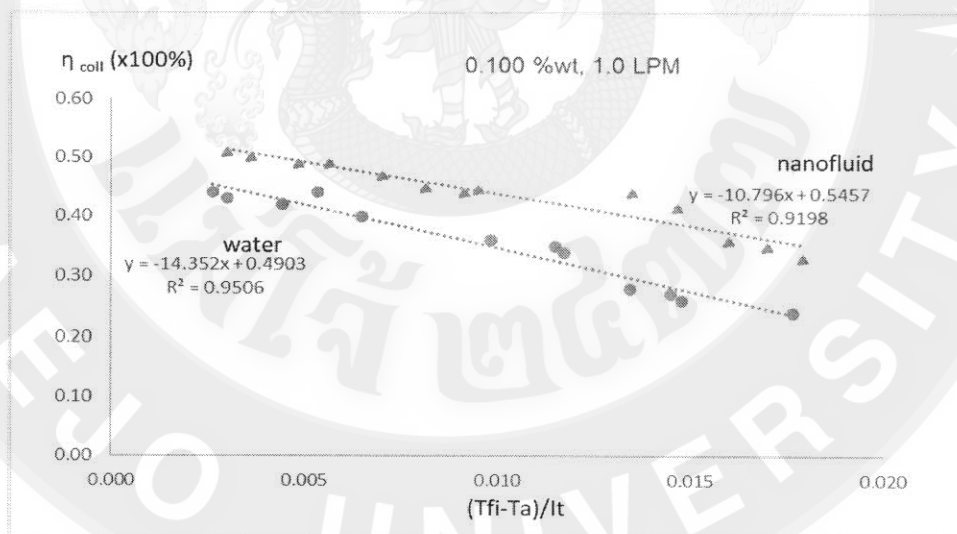
ภาพที่ 39 สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก กรณีใช้ของไหลนาโนกราฟีนที่ความเข้มข้น 0.075 %wt และน้ำ เป็นสารทำงาน ที่อัตราการไหล 1.0 LPM



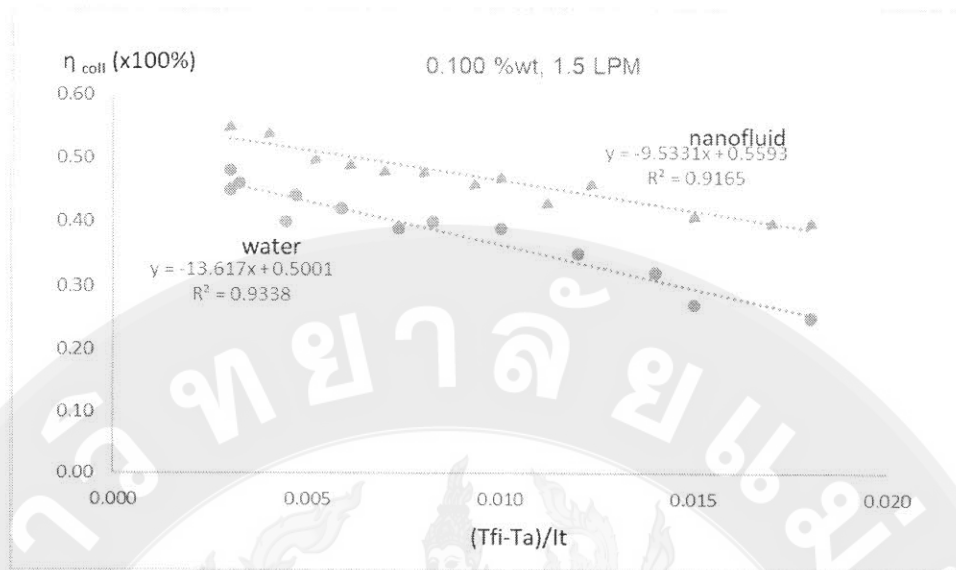
ภาพที่ 40 สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก กรณีใช้ของไหลนาโนกราฟีนที่ความเข้มข้น 0.075 %wt และน้ำ เป็นสารทำงาน ที่อัตราการไหล 1.5 LPM



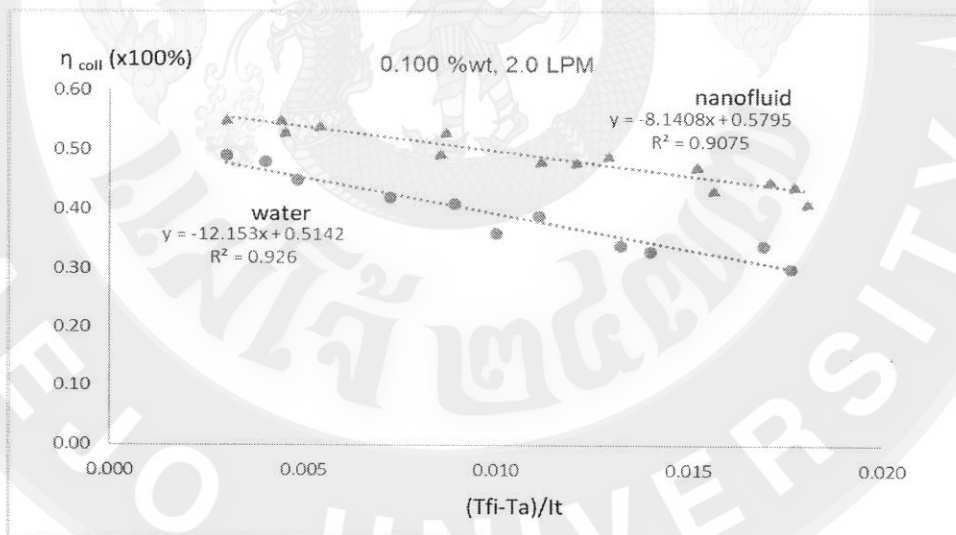
ภาพที่ 41 สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก กรณีใช้ของไหลนาโนกราฟีนที่ความเข้มข้น 0.075 %wt และน้ำ เป็นสารทำงาน ที่อัตราการไหล 2.0 LPM



ภาพที่ 42 สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก กรณีใช้ของไหลนาโนกราฟีนที่ความเข้มข้น 0.100 %wt และน้ำ เป็นสารทำงาน ที่อัตราการไหล 1.0 LPM



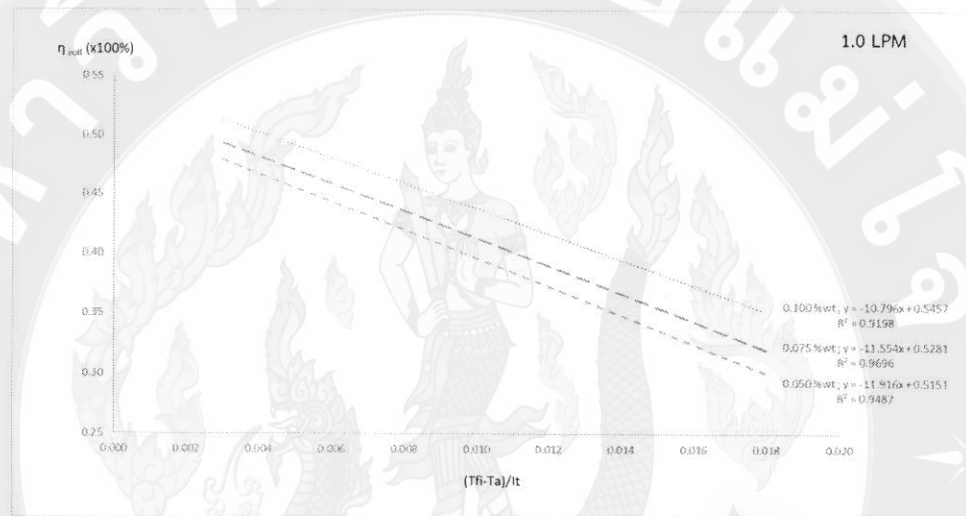
ภาพที่ 43 สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลาโบลิก กรณีใช้ของไหลนาโนกราฟีนที่ความเข้มข้น 0.100 %wt และน้ำ เป็นสารทำงาน ที่อัตราการไหล 1.5 LPM



ภาพที่ 44 สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลาโบลิก กรณีใช้ของไหลนาโนกราฟีนที่ความเข้มข้น 0.100 %wt และน้ำ เป็นสารทำงาน ที่อัตราการไหล 2.0 LPM

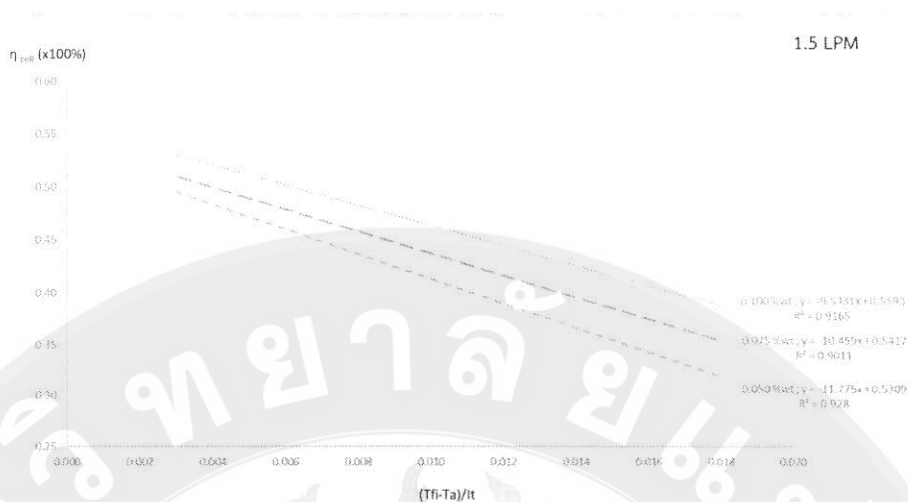
จากผลการทดสอบสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลาโบลิกต้นแบบดังภาพที่ 38 ถึง 46 พบว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ใช้สารทำงานนาโนมีค่าสมรรถนะที่สูงกว่าการใช้น้ำเป็นสารทำงานในทุกกรณีทดสอบ โดยพบว่ากรณีใช้สารทำงานนาโนกราฟีนความเข้มข้น 0.100 %wt ที่อัตราการไหล

เท่ากับ 2.0 LPM ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบจะหิ้งจะให้ค่าสมรรถนะสูงสุด โดยมีค่า  $F_R(\tau\alpha)_e$  เท่ากับ 0.5795 สูงกว่ากรณีใช้น้ำในสภาวะทดสอบเดียวกันเท่ากับ 12.70 % และมีค่า  $F_{RUL}$  เท่ากับ 8.1408 ต่ำกว่ากรณีใช้น้ำในสภาวะทดสอบเดียวกันเท่ากับ 33.01 % จึงกล่าวได้ว่าการใช้สารทำงานนาโนสามารถเพิ่มสมรรถนะให้กับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ได้ โดยเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารทำงานจะพบว่าสารทำงานนาโนที่มีค่าความเข้มข้นสูงชันสามารถเพิ่มสมรรถนะให้กับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ได้มากขึ้นในทุกค่าอัตราการไหลทดสอบดังภาพที่ 45 ถึง 47

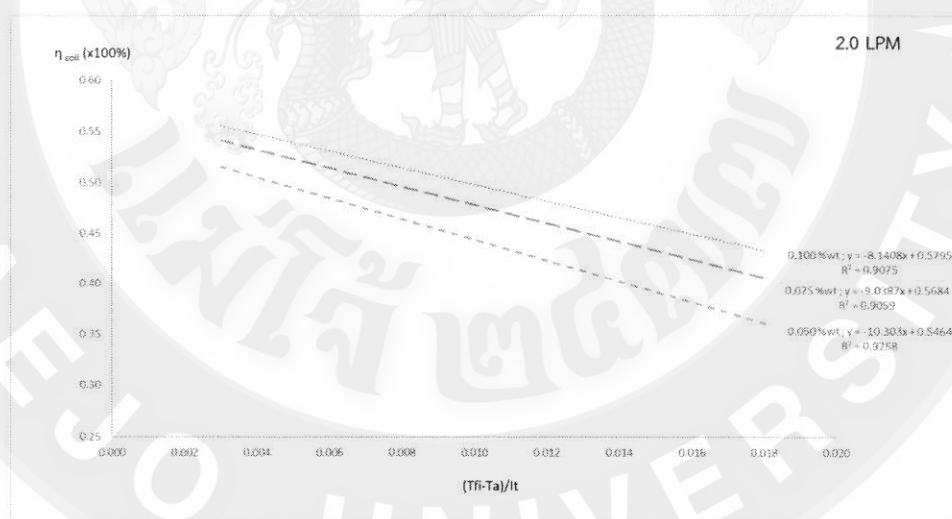


ภาพที่ 45 สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลาโบลิก กรณีใช้ของไหลนาโนกราฟีนที่ความเข้มข้น 0.050 %wt 0.075 %wt และ 0.100 %wt ที่อัตราการไหล 1.0 LPM





ภาพที่ 46 สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก กรณีใช้ของไหลนาโนกราฟีนที่ความเข้มข้น 0.050 %wt 0.075 %wt และ 0.100 %wt ที่อัตราการไหล 1.5 LPM



ภาพที่ 47 สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก กรณีใช้ของไหลนาโนกราฟีนที่ความเข้มข้น 0.050 %wt 0.075 %wt และ 0.100 %wt ที่อัตราการไหล 2.0 LPM

จากภาพที่ 45 ถึง 47 จะเห็นได้ว่าค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโนส่งผลต่อค่าสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ต้นแบบอย่างมีนัยยะสำคัญ ทั้งนี้เพราะสารทำงานนาโนที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นจะ

มีสมบัติด้านค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ( $k$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ) ที่สูงขึ้นด้วย ทำให้สารทำงานดังกล่าวสามารถถ่ายเทความร้อนที่ได้รับจากรังสีอาทิตย์ได้ดีกว่าสารทำงานนาโนที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า โดยค่าสมรรถนะของของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ต้นแบบในงานวิจัยนี้ มีค่าดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ค่าสมรรถนะของของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ต้นแบบ

อัตราการไหล	สารทำงาน	$F_{RUL}$	เทียบกับน้ำ (%)	$F_R (\tau\alpha)_e$	เทียบกับน้ำ (%)
1.0 LPM	น้ำ	14.332		0.4756	
	นาโน 0.050 %wt	12.916	-9.88	0.4951	+4.10
	น้ำ	14.176		0.4785	
	นาโน 0.075 %wt	11.554	-18.50	0.5281	+10.37
	น้ำ	14.352		0.4903	
	นาโน 0.100 %wt	10.796	-24.78	0.5457	+11.30
1.5 LPM	น้ำ	13.619		0.5064	
	นาโน 0.050 %wt	11.775	-13.54	0.5309	+4.84
	น้ำ	13.339		0.4906	
	นาโน 0.075 %wt	10.459	-21.59	0.5417	+10.42
	น้ำ	13.617		0.5001	
	นาโน 0.100 %wt	9.5331	-29.99	0.5593	+11.84
2.0 LPM	น้ำ	12.664		0.5154	
	นาโน 0.050 %wt	10.303	-18.64	0.5464	+6.01
	น้ำ	12.102		0.5120	
	นาโน 0.075 %wt	9.0387	-25.31	0.5684	+11.02
	น้ำ	12.153		0.5142	
	นาโน 0.100 %wt	8.1408	-33.01	0.5795	+12.70

จากตารางที่ 9 จะเห็นได้ว่าความแตกต่างของค่า  $F_R (\tau\alpha)_e$  ในกรณีใช้ค่าอัตราการไหลทดสอบเดียวกันเกิดจากชนิดของสารทำงานที่แตกต่างกัน โดยสมบัติด้านค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ( $k$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ) ที่สูงกว่าของสารทำงานนาโนทำให้สามารถส่งผ่านและดูดกลืนพลังงานความร้อนจากรังสีอาทิตย์ได้ดีกว่าน้ำ และเมื่อพิจารณาว่า  $F_{RUL}$  ก็จะเห็นถึงความแตกต่างของการใช้สารทำงานทั้งสองเช่นกัน โดยกรณีใช้สารทำงานนาโนจะมีค่าการสูญเสียความร้อนต่ำกว่าการใช้น้ำเนื่องจากสารทำงานนาโนมีสมบัติทางความร้อนที่ดีกว่า ทำให้สารดังกล่าวดูดกลืนความร้อนจากผนังท่อรับรังสีได้ดีกว่าน้ำ ส่งผลให้ระบบที่ใช้ของไหลนาโนจะมีอุณหภูมิของสารทำงาน ณ ทางออกของท่อรับรังสีสูงกว่าระบบที่ใช้ น้ำ ด้วยสมบัติทางความร้อนดังกล่าวแม้อุณหภูมิของสารทำงานนาโนภายในท่อจะสูงกว่าแต่ก็ไม่ทำให้อุณหภูมิที่ผิวท่อรับรังสีแตกต่างจากระบบที่ใช้ น้ำ เป็นสารทำงาน เพราะสารทำงานนาโนได้ดูดซับและส่งถ่ายพลังงาน

ความร้อนจากผิวท่อดีกว่าน้ำ ทำให้ค่าผลต่างของอุณหภูมิผิวท่อและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมของระบบที่ใช้สารทำงานทั้งสองชนิดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญ ส่งผลถึงค่าการสูญเสียความร้อนของระบบที่ใช้สารทำงานนาโนที่มีสมบัติด้านการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่ามีค่าการสูญเสียที่ต่ำกว่าด้วย

### ประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อน

ค่าประสิทธิภาพของระบบในงานวิจัยนี้ได้กำหนดเงื่อนไขขอบ (boundary condition) และสมมุติฐานในการคำนวณ ได้แก่ 1) ระบบเป็นระบบปิด มีมวลของสารทำงานและมวลของน้ำร้อนภายในถังกักเก็บคงที่ 2) พลังงานที่จ่ายให้กับระบบ (Input) คือ พลังงานจากแสงอาทิตย์ ( $Q_{\text{solar}}$ ) โดยคำนวณจากค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยในช่วงเวลา 9:00-15:00 น. และ 3) พลังงานที่กักเก็บไว้ในระบบ (Output) คือ ความร้อนที่กักเก็บไว้โดยน้ำ ( $Q_s$ ) จากผลการคำนวณดังตารางที่ 5 พบว่าค่าประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อนในงานวิจัยนี้มีค่าสูงสุดเท่ากับ 68.14 % โดยมีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยตลอดวันเท่ากับ 44.08 % เกิดขึ้นกับระบบทดสอบที่ใช้ของไหลนาโนความเข้มข้น 0.100% ที่อัตราการไหล 2 LPM ซึ่งค่าดังกล่าวสูงกว่าค่าประสิทธิภาพสูงสุดและเฉลี่ยตลอดวันของระบบที่ใช้ น้ำเป็นสารทำงานในสภาวะการทดสอบเดียวกันเท่ากับ 16.29 % และ 7.07 % ตามลำดับ โดยระบบต้นแบบที่ใช้สารทำงานนาโนสามารถผลิตน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 46 °C สูงกว่าระบบที่ใช้ น้ำเป็นสารทำงาน 7.78 % และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จะพบว่าค่าประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อนในงานวิจัยนี้จะมีค่าสูงขึ้นตามค่าอัตราการไหลและค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโนซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ช่วยเพิ่มสมบัติด้านการถ่ายเทความร้อนของสารทำงานที่ จะส่งผลต่อการกักเก็บและส่งถ่ายพลังงานความร้อนจากรังสีอาทิตย์ให้กับน้ำร้อนในถังกักเก็บ ทำให้ค่าประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อนต้นแบบที่ใช้สารทำงานนาโนในงานวิจัยนี้มีค่าสูงขึ้นตามค่าความเข้มข้นและค่าอัตราการไหลของสารทำงาน เนื่องจากค่าพลังงานที่สารทำงานได้รับ ( $Q = \dot{m}_p \Delta T$ ) จึงเกิดจากพจน์ของผลคูณของค่าอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานกับค่าความจุความร้อนจำเพาะ ( $\dot{m}_p$ ) กล่าวคือถ้าสารทำงานนาโนที่มีค่าความเข้มข้นสูงขึ้นจะทำให้ระบบมีค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่สูงขึ้นตามและสูงกว่าน้ำ จึงทำให้พจน์ของผลคูณของค่าอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานกับค่าความจุความร้อนจำเพาะ ( $\dot{m}_p$ ) มีค่าสูงขึ้นตามทำให้มีค่าประสิทธิภาพที่สูงกว่าระบบที่ใช้น้ำ ในทำนองเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบที่ใช้น้ำและสารทำงานนาโน อีกทั้งระบบที่ใช้สารทำงานนาโนมีค่าผลต่างของอุณหภูมิสารทำงาน ณ ทางเข้า-ออกของท่อเก็บรังสี ( $\Delta T$ ) สูงกว่าระบบที่ใช้น้ำและยังมีค่าอัตราการไหลเชิงมวล ( $\dot{m}$ ) ที่สูงกว่าจึงมีค่าประสิทธิภาพของระบบสูงกว่าระบบที่ใช้น้ำในทุกกรณีทดสอบ

## วิจารณ์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการการผสมอนุภาคนาโนกราฟีนกับน้ำทำให้ได้สารทำงานนาโนที่มีค่าความหนาแน่น ( $\rho$ ) ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ( $k$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ) สูงกว่าน้ำ ซึ่งเป็นของไหลฐาน แต่มีค่าความจุความร้อนจำเพาะ ( $C_p$ ) ต่ำกว่าน้ำเล็กน้อย ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของสมบัติด้านค่าความหนาแน่นของสารทำงานนาโนส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานนาโนสามารถชดเชยค่าความจุความร้อนจำเพาะของสารทำงานนาโนที่ลดลงได้ในพจน์ของผลคูณของค่าอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานกับค่าความจุความร้อนจำเพาะ ( $\dot{m}C_p$ ) โดยระบบที่ใช้สารทำงานนาโนให้ค่าผลคูณของค่าพารามิเตอร์ทั้งสองดังกล่าว (ดังตารางที่ 3) สูงกว่าระบบที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานทำให้การลดลงของค่าความจุความร้อนจำเพาะไม่ส่งผลต่อระบบที่ใช้สารทำงานนาโน โดยเมื่อพิจารณาถึงอุณหภูมิของสารทำงานพบว่าระบบที่ใช้สารทำงานนาโนและระบบที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานมีค่าของอุณหภูมิ ณ จุดที่ทำการวัดแตกต่างกันทั้งที่ทำการทดสอบในช่วงเวลาเดียวกัน โดยระบบที่ใช้สารทำงานนาโนจะมีอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบสูงกว่าระบบที่ใช้น้ำเนื่องจากระบบที่ใช้สารทำงานนาโนมีค่า  $F_R(\tau\alpha)_e$  สูงกว่าและมีค่า  $F_R U_L$  ต่ำกว่าระบบที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน จะเห็นได้ว่าความแตกต่างของค่า  $F_R(\tau\alpha)_e$  ในกรณีใช้ค่าอัตราการไหลทดสอบเดียวกันเกิดจากชนิดของสารทำงานที่แตกต่างกัน โดยสมบัติด้านค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ( $k$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ) ที่สูงกว่าของสารทำงานนาโนทำให้สามารถส่งผ่านและดูดกลืนพลังงานความร้อนจากรังสีอาทิตย์ได้ดีกว่าน้ำ และเมื่อพิจารณาค่า  $F_R U_L$  ก็จะเห็นถึงความแตกต่างของการใช้สารทำงานทั้งสองเช่นกัน โดยกรณีใช้สารทำงานนาโนจะมีค่าการสูญเสียความร้อนต่ำกว่าการใช้น้ำเนื่องจากสารทำงานนาโนมีสมบัติทางความร้อนที่ดีกว่า ทำให้สารดังกล่าวดูดกลืนความร้อนจากผนังท่อรับรังสีได้ดีกว่าน้ำ เมื่อพิจารณาถึงค่าผลต่างของอุณหภูมิสารทำงาน ณ ทางเข้าและออกท่อรับรังสีจะพบว่าค่าดังกล่าวมีค่าลดลงเมื่ออัตราการไหลของสารทำงานเพิ่มขึ้น โดยผลต่างของอุณหภูมิสารทำงาน ณ ทางเข้าและออกท่อรับรังสีของระบบที่ใช้สารทำงานนาโนสูงกว่าระบบที่ใช้น้ำแต่มีค่าไม่สูงเท่าที่ควร ทั้งนี้เกิดจากระบบท่อรับรังสีในงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการติดตั้งท่อแก้วเพื่อลดการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม แต่หากพิจารณาการเพิ่มขึ้นของผลต่างอุณหภูมิดังกล่าวซึ่งส่งผลโดยตรงต่อค่าพลังงานความร้อนที่สารทำงานได้รับจะพบว่าระบบที่ใช้สารทำงานนาโนให้ค่าผลต่างของอุณหภูมิสารทำงาน ณ ทางเข้าและออกท่อรับรังสีสูงกว่าระบบที่ใช้น้ำสูงสุดถึง 108.33 % เมื่อเทียบกับน้ำ จากผลการทดสอบดังกล่าวข้างต้นพบว่าการเพิ่มขึ้นของสมรรถนะของตัวเก็บรังสีและประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนเกิดจากสมบัติด้านความหนาแน่นและด้านการถ่ายเทความร้อนของสารทำงานนาโนที่ดีกว่าน้ำ ดังนั้นการใช้สารทำงานนาโนจึงส่งผลดีต่อระบบผลิตน้ำร้อนต้นแบบในงานวิจัยนี้อย่างมีนัยยะสำคัญ แต่ทั้งนี้ค่าสมรรถนะและประสิทธิภาพดังกล่าวก็ยังมีค่าไม่สูงนักเนื่องจากข้อจำกัดด้านงบประมาณในการสร้างระบบ ทำให้การ

ออกแบบยังขาดอุปกรณ์ที่ช่วยลดอัตราการสูญเสียพลังงานสู่ความร้อน เช่น ท่อแก้วครอบท่อรับรังสี ฉนวนกันความร้อนบางส่วน เป็นต้น ทำให้ระบบสามารถผลิตน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิไม่สูงเท่าที่ควร อีกทั้งระบบต้นแบบยังไม่สามารถสะท้อนรังสีอาทิตย์เข้าสู่ท่อรับรังสีได้ตลอดวันเนื่องจากไม่มีระบบปรับทิศทางและมุมของแผ่นสะท้อนทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบลดลงอีกด้วย



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบสมรรถนะของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกต้นแบบด้วยน้ำและสารทำงานนาโนกราฟีนเข้มข้น 0.050 %wt 0.075 %wt และ 0.100 %wt ที่ค่าอัตราการไหลทดสอบเท่ากับ 1.0 LPM 1.5 LPM และ 2.0 LPM ตามลำดับ ในช่วงเวลา 9:00-15:00 น. โดยผลการผสมอนุภาคนาโนกราฟีนกับน้ำทำให้ได้สารทำงานนาโนที่มีค่าความหนาแน่น ( $\rho$ ) สูงกว่าน้ำซึ่งเป็นของไหลฐานเท่ากับ 0.031 % 0.046 % และ 0.062 % ตามลำดับ มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ( $k$ ) สูงกว่าน้ำซึ่งเป็นของไหลฐานเท่ากับ 2.34 % 3.50 % และ 4.67 % ตามลำดับ และมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ) สูงกว่าน้ำซึ่งเป็นของไหลฐานเท่ากับ 2.34 % 3.50 % และ 4.67 % ตามลำดับ เช่นกัน แต่ในทางกลับกันค่าความจุความร้อนจำเพาะของสารทำงานนาโนในงานวิจัยนี้มีค่าต่ำกว่าน้ำซึ่งเป็นของไหลฐานเท่ากับ 0.016 % 0.023 % และ 0.031 % ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาถึงค่าความร้อนที่สารทำงานได้รับ ( $Q = \dot{m} c_p \Delta T$ ) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการไหลเชิงมวล ( $\dot{m}$ ) ความจุความร้อนจำเพาะ ( $c_p$ ) และค่าผลต่างของอุณหภูมิสารทำงาน ณ ทางเข้า-ออก ของท่อเก็บรังสี ( $\Delta T$ ) พบว่าการเพิ่มขึ้นของสมบัติด้านค่าความหนาแน่น ( $\rho$ ) ของสารทำงานนาโนส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราการไหลเชิงมวล ( $\dot{m}$ ) ของสารทำงานดังกล่าวทำให้สามารถชดเชยค่าความจุความร้อนจำเพาะ ( $c_p$ ) ของสารทำงานนาโนที่ลดลงได้ในพจน์ของผลคูณของค่าอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานกับค่าความจุความร้อนจำเพาะ ( $\dot{m} c_p$ ) โดยระบบที่ใช้สารทำงานนาโนให้ค่าผลคูณของค่าพารามิเตอร์ทั้งสองดังกล่าวสูงกว่าระบบที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานเล็กน้อย

จากการทดสอบสมรรถนะของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกต้นแบบ พบว่าระบบที่ใช้สารทำงานนาโนและระบบที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานมีค่าของอุณหภูมิ ณ จุดที่ทำการวัดค่าต่างกันทั้งที่ทำการทดสอบในช่วงเวลาเดียวกัน โดยระบบที่ใช้สารทำงานนาโนจะอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบสูงกว่าระบบที่ใช้น้ำ ซึ่งในช่วงเริ่มต้นการทดสอบความแตกต่างของอุณหภูมิของทั้งสองระบบจะแตกต่างกันน้อยมาก ทั้งนี้เมื่อเวลาผ่านไปผลต่างของอุณหภูมิจะเริ่มชัดเจน และเมื่อเข้าสู่ช่วงเที่ยงวันค่าอุณหภูมิของทั้งสองระบบจะแตกต่างกันอย่างชัดเจน ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ในงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 55.16 % เมื่อใช้สารทำงานนาโนเข้มข้น 0.100 %wt ที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรเท่ากับ 2.0 LPM ซึ่งสูงกว่ากรณีใช้น้ำเท่ากับ 3.36 % โดยมีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยตลอดวันที่

ทำการทดสอบเท่ากับ 43.59 % สูงกว่าระบบที่ใช้น้ำเท่ากับ 3.88 % โดยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ใช้สารทำงานนาโนมีค่าสมรรถนะสูงสุดในกรณีใช้สารทำงานนาโนกราฟีนความเข้มข้น 0.100 %wt ที่อัตราการไหลเท่ากับ 2.0 LPM มีค่า  $F_R (\tau\alpha)_e$  เท่ากับ 0.5795 สูงกว่ากรณีใช้น้ำในสภาวะทดสอบเดียวกันเท่ากับ 12.70 % และมีค่า  $F_{RU}$  เท่ากับ 8.1408 ต่ำกว่ากรณีใช้น้ำในสภาวะทดสอบเดียวกันเท่ากับ 33.01 % และการใช้สารทำงานนาโนที่มีค่าความเข้มข้นและอัตราการไหลดังกล่าวยังทำให้ค่าประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อนมีค่าสูงสุดเท่ากับ 68.14 % โดยมีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยตลอดวันเท่ากับ 44.08 % ซึ่งค่าดังกล่าวสูงกว่าระบบที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานในสภาวะการทดสอบเดียวกันเท่ากับ 16.29 % และ 7.07 % ตามลำดับ โดยระบบต้นแบบที่ใช้สารทำงานนาโนสามารถผลิตน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 46 °C สูงกว่าระบบที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน 7.78 %

เมื่อพิจารณาถึงผลการทดสอบระบบผลิตน้ำร้อนต้นแบบที่ใช้สารทำงานนาโนและน้ำในสภาวะการทดสอบเดียวกันจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิ ณ จุดต่าง ๆ ของระบบทั้งสองจะแปรผันตามค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์ ( $I_T$ ) กล่าวคือ เมื่อรังสีอาทิตย์มีค่าความเข้มสูงจะทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิของสารทำงาน ณ ทางเข้าและออกที่อับรังสี และเมื่ออุณหภูมิของสารทำงาน ณ ทางออกที่อับรังสีสูงขึ้นจะทำให้อุณหภูมิของระบบทุกจุดสูงขึ้นตามไปด้วย เมื่อพิจารณาด้านสมบัติของสารทำงานพบว่าระบบที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานให้ค่าของอุณหภูมิ ณ จุดต่าง ๆ ของระบบสูงกว่าระบบที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน โดยความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของสารทำงานนาโนและน้ำใน ณ สภาวะอัตราการไหลเชิงปริมาตร (LPM) ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ ( $I_T$ ) และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ( $T_a$ ) เดียวกันจะแปรผันตามค่าความเข้มข้นของสารทำงาน กล่าวคือ ยิ่งสารทำงานนาโนมีความเข้มข้นสูงขึ้นจะยิ่งทำให้สารทำงานดังกล่าวมีอุณหภูมิสูงกว่าน้ำที่สภาวะการทดสอบเดียวกัน ทั้งนี้เพราะสมบัติด้านค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ( $k$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ) ของสารทำงานนาโนที่มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายและมีค่าสูงกว่าน้ำส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนของสารทำงานดังกล่าว ทำให้สารทำงานนาโนสามารถรับพลังงานความร้อนจากรังสีอาทิตย์ได้ดีกว่าน้ำ ดังนั้นการผสมอนุภาคนาโนกับน้ำที่ค่าความเข้มข้นสูงขึ้นจึงส่งผลดีต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อนต้นแบบอย่างมีนัยยะสำคัญ

### ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากงานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการทดสอบระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาแบบที่ใช้สารทำงานสองชนิดได้แก่ น้ำสะอาดและสารทำงานนาโน โดยมุ่งเน้นถึงความแตกต่างของอุณหภูมิสารทำงานเมื่อได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์ในสถานะเดียวกันจึงไม่คำนึงถึงค่าความร้อนสูญเสียบริเวณผิวท่อรับรังสี ซึ่งควรติดตั้งท่อแก้วครอบท่อดังกล่าวไว้เพื่อลดการสูญเสียเนื่องจากการพาความร้อนจากอากาศโดยรอบท่อรับรังสี ทำให้ค่าประสิทธิภาพของระบบและอุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้ไม่สูงเท่าที่ควร ดังนั้นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบสามารถทำได้โดยการลดความร้อนสูญเสียโดยการติดตั้งอุปกรณ์เสริมดังกล่าวข้างต้น รวมไปถึงการติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์เพื่อให้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ได้รับพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ตลอดระยะเวลาในการดำเนินงาน



## บรรณานุกรม

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2559. สถานการณ์พลังงานของประเทศไทย มกราคม – ธันวาคม 2558. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา [http://www.dede.go.th/download/state\\_59/frontpagedec2558.pdf](http://www.dede.go.th/download/state_59/frontpagedec2558.pdf) (2 มีนาคม 2559).
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. 2542. ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย (พ.ศ. 2542). [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา [http://www3.egat.co.th/re/egat\\_pv/sun\\_thailand.htm](http://www3.egat.co.th/re/egat_pv/sun_thailand.htm) (5 มีนาคม 2559).
- ไกรพัฒน์ จินขจร. 2550. พลังงานหมุนเวียน. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- จงจิตร หิรัญลาภ. 2548. กระบวนการพลังงานรังสีอาทิตย์ในรูปความร้อน. กรุงเทพฯ : ดวงกลม.
- ทองเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. 2537. การออกแบบระบบพลังงานความร้อน. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ทะนงศักดิ์ วัฒนา. 2554. รู้จักและการเลือกใช้ เทคโนโลยีการผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.thailandindustry.com/guru/view.php?id=19409> (15 มีนาคม 2559).
- นัฐพร ไชยญาติ. 2556. คู่มือการใช้งานโปรแกรมจำลองการทำงานของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์. เชียงใหม่: วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ประกอบ สุรพัฒน์วารรณ และ ชีรภัทร หลิมบุญเรือง. 2554. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการออกแบบตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25 จังหวัด กระบี่.
- สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). 2558. การส่งถ่ายความร้อน (heat transfer). [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา [http://www.tpa.or.th/writer/read\\_this\\_book\\_topic.php?pageid=6&bookID=1043&read=true&count=true](http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?pageid=6&bookID=1043&read=true&count=true) (4 เมษายน 2559).
- เสริม จันทร์ฉาย. 2557. รังสีอาทิตย์. นครปฐม: หน่วยวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- อดิเรก สุริยะวงศ์ และ วีระพันธ์ ดั่งทองสุข. 2559. คุณรู้ไหมว่า Nanofluids คืออะไร?. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.chumphon.kmitl.ac.th/me/images/stories/km/km001.pdf> (25 มีนาคม 2559).

อัชรินทร์ อินทนิเวศน์. 2555. พง 410 เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์. เชียงใหม่ : วิทยาลัย  
พลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

Ahmadi, A., Ganji, D. D. & Jafarkazemi, F. 2016. Analysis of utilizing Graphene nanoplatelets to enhance thermal performance of flat plate solar collectors. *Energy Conversion and Management*, 126, 1–11.

Bellos, E., Tzivanidis, C., Antonopoulos, K. A. & Gkinis, G. 2016. Thermal enhancement of solar parabolic trough collector by using nanofluids and converging-diverging absorber tube. *Renewable Energy*, 94, 213-222.

Cengel, Y. A. & Ghajar, A. J. 2011. **Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications**. 5<sup>th</sup> ed. New York: McGraw-Hill Education.

Colangelo, G., Favale, E., Miglietta, P., Risi, A., Milanese, M. & Laforgia, D. 2015. Experimental test of an innovative high concentration nanofluid solar collector. *Applied Energy*, 154, 874-881.

Conrado, S. L., Rodriguez-Pulido, A. & Calderon, G. 2017. Thermal performance of parabolic trough solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 1,345-1,359.

Gupta, H. K., Agrawal, G. D. & Mathur, J. 2015. Investigations for effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O nanofluid flow rate on the efficiency of direct absorption solar collector. *Case Studies in Thermal Engineering*, 5, 70-78.

Iranmanesh, S., Ong, H. C., Ang, B. C., Sadeghinezhad, E., Esmaeilzadeh, A. & Mehrali, M. 2017. Thermal performance enhancement of an evacuated tube solar collector using graphene nanoplatelets nanofluid. *Journal of Cleaner Production*, 162, 121-129

Jebasingh, V. K. & Herbert, G. M. J. 2016. A review of solar parabolic trough collector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1058-1091.

Karami, M., Akhavan-Bahabadi, M.A., Delfani, S. & Raisee, M. 2015. Experimental investigation of CuO nanofluid-based Direct Absorption Solar Collector for residential applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 793-801.

- Karami, M., Akhavan-Behabadim, M. A., Raisee Dehkordi, M. & Delfani, S. 2016. Thermo-optical properties of copper oxide nanofluids for direct absorption of solar radiation. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 144, 136-142.
- Kasaeian, A., Daviran, S., Azarian, R. D. & Rashidi, A. 2015. Performance evaluation and nanofluid using capability study of a solar parabolic trough collector. *Energy Conversion and Management*, 89, 368-375.
- Kumaresan, G., Sridhar, R. & Velraj, R. 2012. Performance studies of a solar parabolic trough collector with a thermal energy storage system. *Energy*, 47, 395-402.
- Liu, X., Huang, J. & Mao, Q. 2015. Sensitive analysis for the efficiency of a parabolic trough solar collector based on orthogonal experiment. *International Journal of Photoenergy*, 2015 (151874), 1-7.
- Mahian, O., Kianifar, A., Kalogirou, S. A., Pop, I. & Wongwises, S. 2013. A review of the applications of nanofluids in solar energy. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 57, 582-594.
- Mahian, O., Kianifar, A., Sahin, A. Z. & Wongwises, S. 2014. Performance analysis of a minichannel-based solar collector using different nanofluids. *Energy Conversion and Management*, 88, 129-138.
- Moghadam, A. J., Farzane-Gord, M., Sajadi, M. & Zadeh, M. H. 2014. Effect of CuO/water nanofluid on the efficiency of a flat-plate solar collector. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 58, 9-14.
- Mohamed, S. M. & Taqiy, E. B. 2013. Parabolic trough solar thermal power plant: Potential, and projects development in Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 288-297.
- Rehan, M. A., Ali, M., Sheikh, N. A., Khali, M. S., Chaudhary, G. Q., Rashid, T. & Shehryar, M. 2018. Experimental performance analysis of low concentration ratio solar parabolic trough collectors with nanofluids in winter conditions. *Renewable Energy*, 118, 742-751.
- Sarawut Polvongsri. 2012. Performance enhancement of flat-plate solar collector at low mass flow rate using nano-fluid. Doctor of Engineering. Chiang Mai University.

- Sarawut Polvongsri and Tanongkiat Kiatsirirot. 2011. **Enhancement of Flat-Plate Solar Collector Thermal Performance with Silver Nano-fluid**. The Second TSME International Conference on Mechanical Engineering.
- Seager, S. 2013. **Atmospheric Radiation**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://seagerexoplanets.mit.edu/teaching-10.htm> (10 เมษายน 2559).
- Sokhansefat, T., Kasaeian, A. B. & Kowsary, F. 2014. Heat transfer enhancement in parabolic trough collector tube using  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /synthetic oil nanofluid. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 33, 636-644.
- Tzivanidis, C., Bellos, E., Korres, D., Antonopoulos, K.A. & Mitsopoulos G. 2015. Thermal and optical efficiency investigation of a parabolic trough collector. **Case Studies in Thermal Engineering**, 6, 226-237.
- Vakili, M., Hosseinalipour, S. M., Delfani, S., Khosrojerdi, S. & Karami, M. 2016. Experimental investigation of graphene nanoplatelets nanofluid-based volumetric solar collector for domestic hot water systems. **Solar Energy**, 131, 119-130.
- Yousefi, T., Veysi, F., Shojaeizadeh, E. & Zinadini, S. 2012. An experimental investigation on the effect of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{H}_2\text{O}$  nanofluid on the efficiency of flat-plate solar collector. **Renewable Energy**, 39, 293-298.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก  
ตัวอย่างการคำนวณ

### 1. การคำนวณหาระยะโฟกัสของรางพาราโบลิก

$$f = \frac{a^2}{16h}$$

สมการที่ 2

เมื่อ  $f$  คือ ระยะโฟกัสของรางพาราโบลิก  
 $a$  คือ ความกว้างของรางพาราโบลิก เท่ากับ 1.03 m  
 $h$  คือ ความสูงจากกึ่งกลางโค้งถึงขอบรางพาราโบลิก เท่ากับ 0.26 m

ดังนั้น

$$f = \frac{1.03^2}{16(0.26)}$$

$$f = \frac{1.06}{4.16}$$

$$f = 0.26\text{m}$$

### 2. การคำนวณหาค่าสมบัติด้านต่างๆ ของสารทำงานนาโนกราฟีน

ตารางผนวกที่ 1 แสดงสมบัติขององค์ประกอบสารทำงานนาโนกราฟีน

Type	Shape	Thermal conductivity (k, W/m·K)	Specific heat (cp, J/kg·K)	Density ( $\rho$ , kg/m <sup>3</sup> )
Graphene (GNP)	Platelets	5000	790	2,620
Water (H <sub>2</sub> O)	-	0.60	4,186	1,000

#### 2.1 ตัวอย่างการคำนวณค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของสารทำงานนาโนกราฟีน ( $\alpha$ )

$$\alpha = \frac{V_p}{V_f + V_p}$$

สมการที่ 4

เมื่อ  $V_f$  คือ ปริมาตรของเหลว (m<sup>3</sup>)  
 $V_p$  คือ ปริมาตรของอนุภาค (m<sup>3</sup>)

สารทำงานนาโนกราฟีนความเข้มข้น 0.1 %wt

- อนุภาคนาโนกราฟีน มีน้ำหนักเท่ากับ 0.005 kg
- น้ำ มีน้ำหนักเท่ากับ 5 kg
- อนุภาคนาโนกราฟีน มีความหนาแน่นเท่ากับ  $2,620 \text{ kg/m}^3$
- น้ำ มีความหนาแน่นเท่ากับ  $1,000 \text{ kg/m}^3$

การคำนวณปริมาตรของอนุภาคนาโนกราฟีน

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p}$$

$$V_p = \frac{m_p}{\rho_p} = \frac{0.005 \text{ kg}}{2,620 \text{ kg/m}^3} = 1.908 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

การคำนวณปริมาตรของน้ำ

$$\rho_f = \frac{m_f}{V_f}$$

$$V_f = \frac{m_f}{\rho_f} = \frac{5 \text{ kg}}{1,000 \text{ kg/m}^3} = 0.005 \text{ m}^3$$

การคำนวณค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของสารทำงานนาโนกราฟีน ( $\alpha$ )

$$\alpha = \frac{V_p}{V_f + V_p} = \frac{1.908 \times 10^{-6} \text{ m}^3}{[0.005 \text{ m}^3 + (1.908 \times 10^{-6} \text{ m}^3)]}$$

$$\alpha = 3.815 \times 10^{-4}$$

2.2 ตัวอย่างการคำนวณค่าความหนาแน่นของสารทำงานนาโนกราฟีน

$$\rho_{nf} = \alpha \rho_p + (1 - \alpha) \rho_f$$

สมการที่ 7

สารทำงานนาโนกราฟีนความเข้มข้น 0.1 %wt

- อนุภาคนาโนกราฟีน มีความหนาแน่น  $\rho_p$  เท่ากับ  $2,620 \text{ kg/m}^3$
- น้ำ มีความหนาแน่น  $\rho_f$  เท่ากับ  $1,000 \text{ kg/m}^3$
- สารทำงานนาโนกราฟีน มีค่าสัดส่วนโดยปริมาตร  $\alpha$  เท่ากับ  $3.815 \times 10^{-4}$



$$\rho_{nf} = \alpha \rho_p + (1 - \alpha) \rho_f$$

$$\rho_{nf} = [(3.815 \times 10^{-4})(2,620 \text{ kg/m}^3)] + \{[1 - (3.815 \times 10^{-4})](1,000 \text{ kg/m}^3)\}$$

$$\rho_{nf} = 1,000.61808 \text{ kg/m}^3$$

หรือ

$$\rho_{nf} = \frac{m_{nf}}{V_{nf}} = \frac{(m_p + m_f)}{(V_p + V_f)} = \frac{(5 \text{ kg} + 0.005 \text{ kg})}{[0.005 \text{ m}^3 + (1.908 \times 10^{-6} \text{ m}^3)]} = 1,000.61808 \text{ kg/m}^3$$

### 2.3 ตัวอย่างการคำนวณค่าความเป็นทรงกลมของอนุภาคนาโนกราฟีน

$$\phi = \frac{\text{พื้นที่ผิวของทรงกลม}}{\text{พื้นที่ผิวจริงของอนุภาค}}$$

สมการที่ 6

การคำนวณพื้นที่ผิวของอนุภาคนาโนกราฟีนต้องทำการเทียบมิติของอนุภาคนาโนชนิดแผ่นเพื่อคำนวณหามิติเชิงทรงกลม ทำได้ดังนี้

ข้อมูลเฉพาะของนาโนกราฟีนชนิดแผ่น

- อนุภาคนาโนกราฟีน มีความกว้างเท่ากับ  $2 \mu\text{m}$  หรือ  $2 \times 10^{-6} \text{ m}$   
มีความยาวเท่ากับ  $2 \mu\text{m}$  หรือ  $2 \times 10^{-6} \text{ m}$   
มีความหนาเท่ากับ  $2 \text{ nm}$  หรือ  $2 \times 10^{-9} \text{ m}$
- คำนวณพื้นที่ผิวจริงของอนุภาคนาโนกราฟีนแบบแผ่นได้เท่ากับ

$$A = 2 \times [(2 \times 10^{-6} \text{ m}) \times (2 \times 10^{-6} \text{ m})] + 4 \times [(2 \times 10^{-6} \text{ m}) \times (2 \times 10^{-9} \text{ m})]$$

$$A = 8.016 \times 10^{-12} \text{ m}^2$$

- คำนวณปริมาตรจริงของอนุภาคนาโนกราฟีนแบบแผ่นได้เท่ากับ

$$V = \text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times \text{สูง}$$

$$V = (2 \times 10^{-6}) \times (2 \times 10^{-6}) \times (2 \times 10^{-9})$$

$$V = 8.00 \times 10^{-21} \text{ m}^3$$

การคำนวณพื้นที่ทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของอนุภาคนาโนกราฟีนชนิดแผ่น

ให้อนุภาคนาโนกราฟีนแบบแผ่นมีปริมาตรเท่ากับอนุภาคนาโนกราฟีนแบบทรงกลม

$$V = \text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times \text{สูง} = \frac{4}{3} \pi r^3$$

$$V = 8.000 \times 10^{-21} \text{ m}^3 = \frac{4}{3} \pi r^3$$

คำนวณรัศมีทรงกลมของอนุภาคนาโนกราฟีนได้เท่ากับ

$$r = \sqrt[3]{\frac{(8.00 \times 10^{-21} \text{ m}^3) \times \frac{3}{4}}{\pi}}$$

$$r = 1.241 \times 10^{-7} \text{ m}$$

คำนวณพื้นที่ผิวทรงกลมของอนุภาคนาโนกราฟีนได้เท่ากับ

$$A = 4\pi r^2 = 4\pi (1.241 \times 10^{-7})^2$$

$$A = 1.935 \times 10^{-13} \text{ m}^2$$

คำนวณค่าความเป็นทรงกลมของอนุภาคนาโนกราฟีนได้เท่ากับ

$$\varphi = \frac{\text{พื้นที่ผิวของทรงกลม}}{\text{พื้นที่ผิวจริงของอนุภาค}} = \frac{1.935 \times 10^{-13} \text{ m}^2}{8.016 \times 10^{-12} \text{ m}^2} = 2.413 \times 10^{-2}$$

2.4 ตัวอย่างการคำนวณค่าตัวประกอบรูปร่าง (n)

$$n = \frac{3}{\varphi}$$

สมการที่ 5

คำนวณค่าตัวประกอบรูปร่าง (n) ได้เท่ากับ

$$n = \frac{3}{(2.413 \times 10^{-2})}$$

$$n = 124.302$$

2.5 ตัวอย่างการคำนวณค่าค่าความร้อนจำเพาะของสารทำงานนาโนกราฟีน

$$c_{p_{nf}} = (\alpha \cdot c_{p_p}) + [(1 - \alpha)c_{p_f}] \quad \text{สมการที่ 8}$$

$$c_{p_{nf}} = (3.815 \times 10^{-4} \times 790 \text{ J/kg} \cdot \text{K}) + [(1 - 3.815 \times 10^{-4}) \times 4,186 \text{ J/kg} \cdot \text{K}]$$

$$c_{p_{nf}} = 4,184.704 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$$

2.6 ตัวอย่างการคำนวณค่าความหนืดของสารทำงานนาโนกราฟีน

$$\mu_{nf} = (1 + 7.3\alpha + 123\alpha^2)\mu_f \quad \text{สมการที่ 9}$$

$$\mu_{nf} = [1 + 7.3(3.815 \times 10^{-4}) + 123(3.815 \times 10^{-4})^2] \times (0.798 \times 10^{-3})$$

$$\mu_{nf} = 0.0008 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$$

2.7 ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของสารทำงานนาโนกราฟีน

$$k_{nf} = k_f \cdot \left\{ \frac{k_p + [(n-1)k_f] - [(n-1)\alpha(k_f - k_p)]}{k_p + [(n-1)k_f] + [\alpha(k_f - k_p)]} \right\} \quad \text{สมการที่ 3}$$

$$k_{nf} = 0.6 \times \left\{ \frac{5,000 + [(124.302 - 1)0.6] - [(124.302 - 1)(3.815 \times 10^{-4})(0.6 - 5,000)]}{5,000 + [(124.302 - 1)0.6] + [(3.815 \times 10^{-4})(0.6 - 5,000)]} \right\}$$

$$k_{nf} = 0.628 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

2.8 ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ของสารทำงานนาโนกราฟีน

กรณีอัตราการไหลเชิงปริมาตร ( $\dot{V}$ ) เท่ากับ 2 LPM

- คำนวณความเร็วได้การไหลได้ดังต่อไปนี้

$$\dot{V} = VA$$

ที่อัตราการไหลเชิงปริมาตร ( $\dot{V}$ ) เท่ากับ 2 LPM หรือ  $3.333 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (D) เท่ากับ 4.5 cm หรือ 0.045 m

$$\text{พื้นที่หน้าตัดท่อ } A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (0.045^2)}{4} \quad \text{เท่ากับ } 1.591 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

จะได้ความเร็วในการไหล  $v = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{3.333 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}}{1.591 \times 10^{-3} \text{ m}^2} = 2.095 \times 10^{-2} \text{ m/s}$

- คำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic Diameter,  $D_h$ ) ได้ดังต่อไปนี้

$$D_h = \frac{4A_c}{p} = \frac{4 \left( \frac{\pi D^2}{4} \right)}{\pi D} = D$$

$$D_h = D = 0.045 \text{ m}$$

สมการที่ 11

- คำนวณค่าเรย์โนลส์นัมเบอร์ (Re) เมื่อสารทำงานนาโนมีความเข้มข้นเท่ากับ 0.1 %wt อัตราการไหลเชิงปริมาตรเท่ากับ 2 LPM ได้ดังต่อไปนี้

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu}$$

$$Re_{nf} = \frac{(1,000.618 \text{ kg/m}^3)(0.021 \text{ m/s})(0.045 \text{ m})}{(0.0008 \text{ kg/m} \cdot \text{s})}$$

$$Re_{nf} = 1,181.980 < 2,300 \Rightarrow \text{Laminar flow in tubes}$$

สมการที่ 10

- คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลกรณีการไหลภายในท่อแบบราบเรียบ (Laminar Flow in Tubes) เมื่อสารทำงานนาโนมีความเข้มข้นเท่ากับ 0.1 %wt อัตราการไหลเชิงปริมาตรเท่ากับ 2 L/min สามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$h = 3.66 \left( \frac{k}{D_h} \right)$$

$$h_{nf} = 3.66 \left( \frac{0.628 \text{ W/m} \cdot \text{K}}{0.045 \text{ m}} \right) = 51.077 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

สมการที่ 12

### 3. การคำนวณค่าสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

ข้อมูลจากการทดสอบกรณีใช้สารทำงานนาโนความเข้มข้น 0.100 %wt ที่อัตราการไหล 2.0 LPM ณ เวลา 12:40:00 PM มีดังต่อไปนี้

Time	$T_a$ (°C)	$I_T$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_f$ (°C)		$T_{co}$ (°C)		$T_s$ (°C)		$Q_{coll}$ (W)		$Q_s$ (J)		$\eta_{coil}$ (%)		$\eta_{system}$ (%)	
			water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF
12:30:00 PM	36.0	807.3	37.9	40.6	43.6	46.7	37.4	38.4	795.33	851.42	502,320	502,320	49.26	52.73	51.85	51.85
12:40:00 PM	37.5	835.0	38.5	41.3	44.7	47.9	37.9	38.9	865.10	921.21	418,600	418,600	51.80	55.16	41.78	41.78
12:50:00 PM	35.3	773.3	39.0	41.9	44.0	47.3	38.4	39.4	697.66	753.71	418,600	418,600	45.11	48.73	45.11	45.11

- ขนาดพื้นที่รับรังสี  $A_c = 2.0 \text{ m}^2$
  - ความเข้มรังสีอาทิตย์  $I_T = \text{W/m}^2$
  - ค่ารังสีอาทิตย์  $I_T = 835.0 \text{ W/m}^2$
  - อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม  $T_a = 37.5 \text{ }^\circ\text{C}$
  - อุณหภูมิของสารทำงาน ณ ทางเข้าตัวเก็บรังสี  $T_{fi} = 41.3 \text{ }^\circ\text{C}$
  - อุณหภูมิของสารทำงาน ณ ทางออกตัวเก็บรังสี  $T_{fo} = 47.9 \text{ }^\circ\text{C}$
  - ความจุความร้อนจำเพาะของสารทำงานนาโน  $c_p = 4,184.704 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$
  - ความหนาแน่นของสารทำงานนาโน  $\rho_{nf} = 1,000.618 \text{ kg/m}^3$
  - อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารทำงานนาโน  $\dot{V}_{nf} = 2 \text{ LPM}$
  - อุณหภูมิน้ำร้อนภายในถังกักเก็บน้ำร้อน ณ เวลา 12.30 น.  $T_s = 38.4 \text{ }^\circ\text{C}$
  - อุณหภูมิน้ำร้อนภายในถังกักเก็บน้ำร้อน ณ เวลา 12.40 น.  $T_s^{t+\Delta t} = 38.9 \text{ }^\circ\text{C}$
  - ปริมาณน้ำร้อนภายในถังกักเก็บ  $M = 200 \text{ kg}$
  - ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำร้อนภายในถังกักเก็บ  $C_p = 4,186.000 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$
- อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน

$$\dot{m}_{nf} = \rho_{nf} \times \dot{V}_{nf}$$

$$\dot{m}_{ng} = \left(1,000.618 \text{ kg/m}^3\right) \times \left(\frac{2 \text{ L/min}}{60 \text{ s/min}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1,000 \text{ L}}\right)$$

$$\dot{m}_{nf} = \left(1,000.618 \text{ kg/m}^3\right) \times \left(\frac{2 \text{ L}}{60 \text{ s}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1,000 \text{ L}}\right)$$

$$\dot{m}_{nf} = 0.033354 \text{ kg/s}$$

อัตราความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์

$$Q_{coll} = \dot{m}_f C_{p_f} (T_{fo} - T_{fi})$$

$$Q_{\text{coll}} = (0.033354 \text{ kg/s})(4,184.704 \text{ J/kg} \cdot \text{C})(47.9^\circ \text{C} - 41.3^\circ \text{C})$$

$$Q_{\text{coll}} = 921.21 \text{ W}$$

อัตราการความร้อนจากรังสีอาทิตย์

$$Q_{\text{solar}} = A_c I_T$$

$$Q_{\text{solar}} = (2 \text{ m}^2)(835 \text{ W/m}^2) = 1,670 \text{ W}$$

สมการที่ 18

ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

$$\eta_{\text{coll}} = \frac{Q_{\text{coll}}}{Q_{\text{solar}}} \times 100\%$$

สมการที่ 19

$$\eta_{\text{coll}} = \frac{921.21 \text{ W}}{1,670 \text{ W}} \times 100\% = 55.16\%$$

ความร้อนในถังเก็บน้ำร้อน

$$Q_s = MC_p (T_s^{t+\Delta t} - T_s)$$

$$Q_s = (200 \text{ kg})(4,186.000 \text{ J/kg} \cdot \text{C})(38.9^\circ \text{C} - 38.4^\circ \text{C})$$

$$Q_s = 418,600 \text{ J}$$

สมการที่ 23

ประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

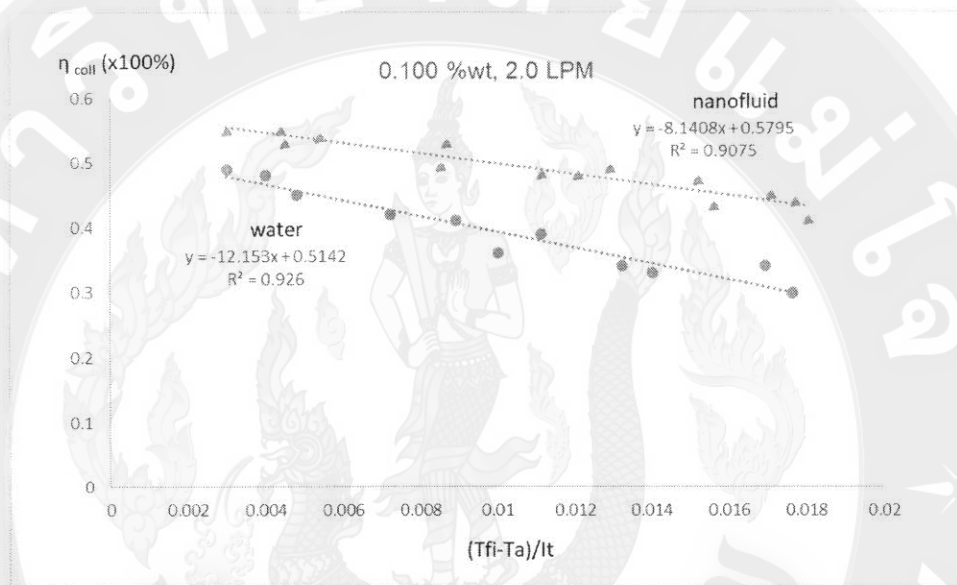
$$\eta_{\text{system}} = \frac{Q_s}{\sum_{i=1}^n I_T A_c \Delta t} \times 100\%$$

$$\eta_{\text{system}} = \left[ \frac{(418,600 \text{ J})}{(835 \text{ W/m}^2)(2 \text{ m}^2)(600 \text{ s})} \right] \times 100\%$$

$$\eta_{\text{system}} = 41.78\%$$

เมื่อนำความสัมพันธ์ของค่า  $\eta_{coll}$  และ  $\frac{(T_{fi} - T_a)}{I_T}$  จะได้สมการเส้นตรงที่มีความชัน

เท่ากับค่า  $F_R U_L$  และค่าบนแกน y (แกน  $\eta_{coll}$ ) คือค่า  $F_R (\tau\alpha)_e$  ซึ่งกราฟเส้นดังกล่าวคือเส้นแสดงสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ จะได้ค่า  $F_R U_L = 8.1408 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  และ  $F_R (\tau\alpha)_e = 0.5795$  ดังภาพผนวกที่ 1



ภาพผนวกที่ 1 เส้นแสดงสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์  
กรณีใช้สารทำงานนาโนความเข้มข้น 0.100 %wt  
ที่อัตราการไหล 2.0 LPM



ภาคผนวก ข

ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย



ตารางผนวกที่ 2 ผลการทดสอบเมื่อใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโน 0.050 %wt อัตราการไหล 1.0 LPM

Time (hr)	T <sub>a</sub> (°C)	I <sub>T</sub> (W/m <sup>2</sup> )	T <sub>fi</sub> (°C)		T <sub>fo</sub> (°C)		T <sub>s</sub> (°C)		Q <sub>coll</sub> (W)		Q <sub>s</sub> (J)		η <sub>Coll</sub> (%)		η <sub>system</sub> (%)	
			water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF
09:00:00	28.4	365.0	29.4	30.1	31.7	32.6	29.5	29.8	160.47	174.45			21.98	23.90		
09:10:00	27.6	394.0	30.3	31.3	32.8	34.1	29.6	29.9	174.42	195.38	83,720	83,720	22.13	24.79	17.71	17.71
09:20:00	29.0	400.0	30.4	31.4	33.1	34.4	29.8	30.1	188.37	209.33	167,440	167,440	23.55	26.17	34.88	34.88
09:30:00	29.7	474.0	30.5	31.6	34.6	35.9	29.9	30.2	286.05	300.05	83,720	83,720	30.17	31.65	14.72	14.72
09:40:00	29.0	463.0	30.6	31.8	34.4	35.8	30.1	30.5	265.12	279.11	167,440	251,160	28.63	30.14	30.14	45.21
09:50:00	30.3	450.0	30.8	32.0	34.5	35.9	30.3	30.7	258.14	272.13	167,440	167,440	28.68	30.24	31.01	31.01
10:00:00	30.4	513.0	31.0	32.2	35.9	37.3	30.4	30.9	341.86	355.87	83,720	167,440	33.32	34.69	13.60	27.20
10:10:00	30.9	549.0	31.2	32.5	36.8	38.4	30.7	31.2	390.70	411.69	251,160	251,160	35.58	37.49	38.12	38.12
10:20:00	30.7	611.0	31.5	32.7	38.4	40.0	30.9	31.5	481.40	509.38	167,440	251,160	39.39	41.68	22.84	34.26
10:30:00	31.4	648.0	31.7	33.1	39.7	41.3	31.3	31.8	558.14	572.18	334,880	251,160	43.07	44.15	43.07	32.30
10:40:00	31.4	583.0	32.1	33.4	38.4	40.1	31.7	32.3	439.54	467.51	334,880	418,600	37.70	40.10	47.87	59.83
10:50:00	31.6	610.0	32.4	33.9	39.4	41.1	31.9	32.6	488.38	502.40	167,440	251,160	40.03	41.18	22.87	34.31
11:00:00	31.4	649.0	32.8	34.2	40.6	42.4	32.3	32.9	544.19	572.18	334,880	251,160	41.93	44.08	43.00	32.25
11:10:00	32.5	621.0	33.1	34.6	40.3	42.1	32.6	33.4	502.33	523.34	251,160	418,600	40.45	42.14	33.70	56.17
11:20:00	32.0	650.0	33.5	35.0	41.3	43.2	33.0	33.7	544.19	572.18	334,880	251,160	41.86	44.01	42.93	32.20
11:30:00	32.7	676.0	33.8	35.4	42.4	44.3	33.4	34.1	600.01	621.03	334,880	334,880	44.38	45.93	41.28	41.28
11:40:00	33.9	695.0	34.2	35.9	43.4	45.4	33.8	34.6	641.87	662.89	334,880	418,600	46.18	47.69	40.15	50.19
11:50:00	33.3	666.0	34.6	36.3	42.9	44.9	34.2	35.1	579.07	600.09	334,880	418,600	43.47	45.05	41.90	52.38
12:00:00	33.4	674.0	35.0	36.8	43.5	45.6	34.6	35.5	593.03	614.05	334,880	334,880	43.99	45.55	41.40	41.40

ตารางผนวกที่ 2 (ต่อ)

Time (hr)	T <sub>a</sub> (°C)	I <sub>T</sub> (W/m <sup>2</sup> )	T <sub>fi</sub> (°C)		T <sub>fo</sub> (°C)		T <sub>s</sub> (°C)		Q <sub>coll</sub> (W)		Q <sub>s</sub> (J)		η <sub>coll</sub> (%)		η <sub>system</sub> (%)	
			water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF
12:10:00	33.4	655.0	35.4	37.3	43.4	45.5	35.0	35.9	558.14	572.18	334,880	334,880	42.61	43.68	42.61	42.61
12:20:00	33.1	645.0	35.8	37.7	43.4	45.5	35.3	36.3	530.24	544.27	251,160	334,880	41.10	42.19	32.45	43.27
12:30:00	32.3	510.0	36.2	38.2	40.7	42.8	35.7	36.7	313.96	320.98	334,880	334,880	30.78	31.47	54.72	54.72
12:40:00	33.9	696.0	36.6	38.6	45.5	47.7	35.9	37.0	620.94	634.98	167,440	251,160	44.61	45.62	20.05	30.07
12:50:00	33.7	550.0	36.8	38.8	42.1	44.4	36.3	37.4	369.77	390.76	334,880	334,880	33.62	35.52	50.74	50.74
13:00:00	34.2	705.0	37.2	39.3	46.3	48.7	36.6	37.7	634.89	655.91	251,160	251,160	45.03	46.52	29.69	29.69
13:10:00	33.3	589.0	37.5	39.6	43.5	45.9	37.0	38.2	418.61	439.60	334,880	418,600	35.54	37.32	47.38	59.22
13:20:00	33.3	685.0	37.9	40.1	46.3	48.7	37.3	38.5	586.05	600.09	251,160	251,160	42.78	43.80	30.55	30.55
13:30:00	34.4	653.0	38.2	40.5	45.8	48.3	37.7	38.9	530.24	544.27	334,880	334,880	40.60	41.67	42.74	42.74
13:40:00	34.7	675.0	38.6	40.9	46.8	49.3	38.0	39.3	572.10	586.14	251,160	334,880	42.38	43.42	31.01	41.34
13:50:00	34.7	618.0	39.0	41.3	45.7	48.2	38.4	39.8	467.45	481.47	334,880	418,600	37.82	38.95	45.16	56.45
14:00:00	33.8	603.0	39.4	41.8	45.6	48.1	38.7	40.1	432.56	439.60	251,160	251,160	35.87	36.45	34.71	34.71
14:10:00	33.4	575.0	39.7	42.1	45.2	47.8	39.0	40.4	383.72	397.74	251,160	251,160	33.37	34.59	36.40	36.40
14:20:00	33.8	553.0	40.0	42.5	45.0	47.7	39.3	40.7	348.84	362.85	251,160	251,160	31.54	32.81	37.85	37.85
14:30:00	33.6	526.0	40.3	42.8	44.7	47.4	39.5	41.0	306.98	320.98	167,440	251,160	29.18	30.51	26.53	39.79
14:40:00	34.1	517.0	40.5	43.1	44.8	47.5	39.7	41.3	300.00	307.02	167,440	251,160	29.01	29.69	26.99	40.48
14:50:00	34.0	491.0	40.7	43.4	44.5	47.2	40.0	41.5	265.12	265.16	251,160	167,440	27.00	27.00	42.63	28.42
15:00:00	34.0	463.0	41.0	43.6	44.2	47.0	40.1	41.7	223.26	237.25	83,720	167,440	24.11	25.62	15.07	30.14

ตารางผนวกที่ 3 ผลการทดสอบเมื่อใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโน 0.050 %wt อัตราการไหล 1.5 LPM

Time (hr)	T <sub>a</sub> (°C)	I <sub>T</sub> (W/m <sup>2</sup> )	T <sub>fi</sub> (°C)		T <sub>fo</sub> (°C)		T <sub>s</sub> (°C)		Q <sub>coll</sub> (W)		Q <sub>s</sub> (J)		η <sub>coll</sub> (%)		η <sub>system</sub> (%)	
			water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF
09:00:00	28.4	357.0	29.4	30.1	30.6	31.6	29.5	29.8	125.58	157.00			17.59	21.99		
09:10:00	29.0	396.0	30.3	31.3	31.8	33.2	29.6	29.9	156.98	198.87	83,720	83,720	19.82	25.11	17.62	17.62
09:20:00	28.4	398.0	30.3	31.4	31.8	33.2	29.7	30.1	156.98	188.40	83,720	167,440	19.72	23.67	17.53	35.06
09:30:00	29.5	519.8	30.4	31.6	33.5	35.0	29.8	30.2	324.42	355.87	83,720	83,720	31.21	34.23	13.42	13.42
09:40:00	29.0	532.6	30.6	31.7	33.7	35.3	30.1	30.5	324.42	376.80	251,160	251,160	30.46	35.37	39.30	39.30
09:50:00	28.0	560.3	30.8	32.0	34.3	35.8	30.3	30.8	366.28	397.74	167,440	251,160	32.69	35.49	24.90	37.35
10:00:00	29.7	597.0	31.0	32.3	35.2	36.8	30.5	31.1	439.53	471.00	167,440	251,160	36.81	39.45	23.37	35.06
10:10:00	29.9	539.6	31.3	32.6	34.6	36.2	30.8	31.4	345.35	376.80	251,160	251,160	32.00	34.91	38.79	38.79
10:20:00	30.7	593.0	31.6	33.0	35.7	37.4	31.1	31.7	429.07	460.54	251,160	251,160	36.18	38.83	35.30	35.30
10:30:00	31.0	607.9	31.8	33.3	36.2	38.0	31.3	32.0	460.46	491.94	167,440	251,160	37.87	40.46	22.95	34.43
10:40:00	31.2	653.4	32.1	33.6	37.2	39.1	31.7	32.4	533.72	575.67	334,880	334,880	40.84	44.05	42.71	42.71
10:50:00	31.3	613.8	32.5	34.0	36.9	38.8	32.0	32.8	460.46	502.40	251,160	334,880	37.51	40.93	34.10	45.47
11:00:00	31.7	711.8	32.8	34.4	38.9	40.9	32.3	33.1	638.37	680.34	251,160	251,160	44.84	47.79	29.40	29.40
11:10:00	32.3	566.3	33.1	34.8	36.8	38.8	32.8	33.6	387.21	418.67	418,600	418,600	34.19	36.97	61.60	61.60
11:20:00	32.7	491.0	33.6	35.3	36.2	38.3	33.0	33.9	272.09	314.00	167,440	251,160	27.71	31.98	28.42	42.63
11:30:00	32.2	615.8	33.8	35.6	38.2	40.4	33.2	34.2	460.46	502.40	167,440	251,160	37.39	40.79	22.66	33.99
11:40:00	32.9	674.2	34.0	35.9	39.5	41.6	33.5	34.5	575.58	596.60	251,160	251,160	42.69	44.25	31.04	31.04
11:50:00	33.0	719.7	34.4	36.3	40.6	42.9	33.9	35.0	648.83	690.80	334,880	418,600	45.08	47.99	38.78	48.47
12:00:00	33.3	747.5	34.8	36.7	41.5	43.8	34.3	35.4	701.16	743.14	334,880	334,880	46.90	49.71	37.33	37.33

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

Time (hr)	$T_a$ (°C)	$I_T$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_{fi}$ (°C)		$T_{fo}$ (°C)		$T_s$ (°C)		$Q_{coll}$ (W)		$Q_s$ (J)		$\eta_{coll}$ (%)		$\eta_{system}$ (%)	
			water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF
12:10:00	33.1	782.1	35.2	37.2	42.6	45.0	34.8	36.0	774.41	816.40	418,600	502,320	49.51	52.19	44.60	53.52
12:20:00	32.7	818.0	35.7	37.8	43.7	46.2	35.3	36.5	837.20	879.21	418,600	418,600	51.17	53.74	42.64	42.64
12:30:00	32.3	808.0	36.2	38.4	43.9	46.5	35.9	37.1	805.81	847.80	502,320	502,320	49.86	52.46	51.81	51.81
12:40:00	32.8	714.8	36.8	39.0	42.7	45.2	36.4	37.7	617.44	648.94	418,600	502,320	43.19	45.39	48.80	58.56
12:50:00	33.8	648.5	37.3	39.6	42.1	44.7	36.8	38.2	502.32	533.80	334,880	418,600	38.73	41.16	43.03	53.79
13:00:00	33.3	680.1	37.7	40.1	42.9	45.6	37.1	38.6	544.18	575.67	251,160	334,880	40.01	42.32	30.77	41.03
13:10:00	33.8	640.5	38.1	40.5	42.6	45.4	37.5	39.0	470.93	512.87	334,880	334,880	36.76	40.04	43.57	43.57
13:20:00	33.6	682.1	38.4	41.0	43.7	46.4	37.8	39.3	554.65	565.20	251,160	251,160	40.66	41.43	30.68	30.68
13:30:00	34.4	737.6	38.8	41.3	45.0	47.9	38.2	39.8	648.83	690.80	334,880	418,600	43.98	46.83	37.83	47.29
13:40:00	33.6	777.2	39.2	41.8	46.1	49.0	38.6	40.3	722.09	753.60	334,880	418,600	46.45	48.48	35.91	44.88
13:50:00	33.8	790.0	39.6	42.3	46.7	49.7	39.1	40.8	743.02	774.54	418,600	418,600	47.03	49.02	44.16	44.16
14:00:00	32.8	615.8	40.1	42.9	44.0	47.0	39.6	41.3	408.14	429.14	418,600	418,600	33.14	34.84	56.65	56.65
14:10:00	33.1	539.6	40.6	43.4	43.4	46.5	39.9	41.7	293.02	324.47	251,160	334,880	27.15	30.07	38.79	51.72
14:20:00	33.5	418.8	40.9	43.8	42.3	45.4	40.1	41.9	146.51	167.47	167,440	167,440	17.49	19.99	33.32	33.32
14:30:00	33.2	473.2	41.1	44.0	43.1	46.2	40.2	42.1	209.30	230.27	83,720	167,440	22.12	24.33	14.74	29.49
14:40:00	32.7	490.1	41.2	44.2	43.3	46.5	40.4	42.3	219.76	240.73	167,440	167,440	22.42	24.56	28.47	28.47
14:50:00	33.2	452.4	41.4	44.4	43.1	46.3	40.5	42.5	177.91	198.87	83,720	167,440	19.66	21.98	15.42	30.84
15:00:00	33.3	420.8	41.5	44.6	42.9	46.2	40.7	42.7	146.51	167.47	167,440	167,440	17.41	19.90	33.16	33.16

ตารางผนวกที่ 4 ผลการทดสอบเมื่อใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโน 0.050 %wt อัตราการไหล 2.0 LPM

Time (hr)	T <sub>a</sub> (°C)	I <sub>T</sub> (W/m <sup>2</sup> )	T <sub>fi</sub> (°C)		T <sub>fo</sub> (°C)		T <sub>s</sub> (°C)		Q <sub>coll</sub> (W)		Q <sub>s</sub> (J)		η <sub>coll</sub> (%)		η <sub>system</sub> (%)	
			water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF
09:00:00	28.1	320.0	29.1	29.8	29.5	30.6	29.1	29.3	55.81	111.65			8.72	17.44		
09:10:00	27.5	351.0	30.0	31.0	30.5	31.9	29.2	29.5	69.77	125.60	83,720	167,440	9.94	17.89	19.88	39.75
09:20:00	27.7	420.0	30.0	31.0	31.0	32.5	29.3	29.7	139.53	209.33	83,720	167,440	16.61	24.92	16.61	33.22
09:30:00	29.4	474.0	30.1	31.2	31.6	33.2	29.4	29.9	209.30	279.11	83,720	167,440	22.08	29.44	14.72	29.44
09:40:00	29.8	513.0	30.2	31.4	32.1	33.7	29.6	30.1	265.11	320.98	167,440	167,440	25.84	31.28	27.20	27.20
09:50:00	29.7	591.0	30.3	31.6	33.1	34.8	29.8	30.3	390.69	446.58	167,440	167,440	33.05	37.78	23.61	23.61
10:00:00	29.5	671.0	30.5	31.9	34.3	36.1	30.1	30.7	530.22	586.14	251,160	334,880	39.51	43.68	31.19	41.59
10:10:00	28.9	652.0	30.8	32.2	34.3	36.1	30.4	31.1	488.36	544.27	251,160	334,880	37.45	41.74	32.10	42.80
10:20:00	29.5	602.0	31.2	32.7	34.0	36.0	30.7	31.5	390.69	460.54	251,160	334,880	32.45	38.25	34.77	46.36
10:30:00	30.4	590.0	31.5	33.1	34.3	36.3	31.0	31.8	390.69	446.58	251,160	251,160	33.11	37.85	35.47	35.47
10:40:00	31.2	618.0	31.8	33.4	34.9	37.0	31.3	32.2	432.55	502.40	251,160	334,880	35.00	40.65	33.87	45.16
10:50:00	31.8	629.0	32.1	33.8	35.3	37.5	31.6	32.5	446.50	516.36	251,160	251,160	35.49	41.05	33.28	33.28
11:00:00	31.9	703.0	32.4	34.2	36.6	38.8	31.9	32.9	586.03	641.96	251,160	334,880	41.68	45.66	29.77	39.70
11:10:00	32.5	614.0	32.7	34.6	35.8	38.1	32.3	33.4	432.55	488.45	334,880	418,600	35.22	39.78	45.45	56.81
11:20:00	33.1	629.0	33.2	35.1	36.5	38.7	32.6	33.7	460.46	502.40	251,160	251,160	36.60	39.94	33.28	33.28
11:30:00	33.1	698.0	33.4	35.4	37.6	40.0	32.9	34.1	586.03	641.96	251,160	334,880	41.98	45.99	29.99	39.98
11:40:00	33.3	702.0	33.7	35.8	37.9	40.5	33.3	34.6	586.03	655.91	334,880	418,600	41.74	46.72	39.75	49.69
11:50:00	34.0	721.0	34.1	36.3	38.6	41.2	33.7	35.0	627.89	683.83	334,880	334,880	43.54	47.42	38.71	38.71
12:00:00	34.3	728.0	34.5	36.8	39.1	41.8	34.1	35.5	641.85	697.78	334,880	418,600	44.08	47.92	38.33	47.92

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ)

Time (hr)	$T_a$ (°C)	$I_T$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_{fi}$ (°C)		$T_{fo}$ (°C)		$T_s$ (°C)		$Q_{coll}$ (W)		$Q_s$ (J)		$\eta_{coll}$ (%)		$\eta_{system}$ (%)	
			water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF
12:10:00	34.3	800.0	34.9	37.3	40.6	43.4	34.5	36.0	795.33	851.29	334,880	418,600	49.71	53.21	34.88	43.60
12:20:00	35.2	812.0	35.4	37.8	41.3	44.1	35.0	36.6	823.24	879.21	418,600	502,320	50.69	54.14	42.96	51.55
12:30:00	35.2	807.0	35.9	38.5	41.7	44.6	35.6	37.2	809.29	851.29	502,320	502,320	50.14	52.74	51.87	51.87
12:40:00	35.7	800.0	36.5	39.1	42.1	45.1	36.1	37.8	781.38	837.34	418,600	502,320	48.84	52.33	43.60	52.32
12:50:00	34.6	758.0	37.0	39.7	41.9	45.0	36.6	38.4	683.71	739.65	418,600	502,320	45.10	48.79	46.02	55.22
13:00:00	33.0	683.0	37.5	40.3	41.2	44.4	37.0	38.9	516.27	572.18	334,880	418,600	37.79	41.89	40.86	51.07
13:10:00	33.5	769.0	38.0	40.9	42.8	46.1	37.4	39.3	669.75	725.69	334,880	334,880	43.55	47.18	36.29	36.29
13:20:00	34.2	783.0	38.3	41.3	43.4	46.8	37.8	39.9	711.61	767.56	334,880	502,320	45.44	49.01	35.64	53.46
13:30:00	33.8	790.0	38.8	41.9	43.9	47.4	38.3	40.4	711.61	767.56	418,600	418,600	45.04	48.58	44.16	44.16
13:40:00	33.8	711.0	39.3	42.4	43.2	46.7	38.8	40.9	544.17	600.09	418,600	418,600	38.27	42.20	49.06	49.06
13:50:00	33.3	751.0	39.8	43.0	44.2	47.8	39.2	41.4	613.94	669.87	334,880	418,600	40.87	44.60	37.16	46.45
14:00:00	33.6	620.0	40.1	43.5	42.9	46.5	39.6	41.9	390.69	418.67	334,880	418,600	31.51	33.76	45.01	56.26
14:10:00	33.6	650.0	40.6	44.0	43.6	47.4	39.8	42.2	418.60	474.49	167,440	251,160	32.20	36.50	21.47	32.20
14:20:00	32.8	640.0	40.8	44.3	43.7	47.5	40.1	42.6	404.64	446.58	251,160	334,880	31.61	34.89	32.70	43.60
14:30:00	32.7	611.0	41.1	44.7	43.6	47.5	40.4	42.9	348.83	390.76	251,160	251,160	28.55	31.98	34.26	34.26
14:40:00	31.7	586.0	41.4	45.1	43.6	47.5	40.7	43.2	306.97	334.94	251,160	251,160	26.19	28.58	35.72	35.72
14:50:00	30.9	554.0	41.7	45.4	43.4	47.5	40.9	43.5	237.20	293.07	167,440	251,160	21.41	26.45	25.19	37.78
15:00:00	30.7	511.0	41.9	45.7	43.2	47.3	41.1	43.8	181.39	223.29	167,440	251,160	17.75	21.85	27.31	40.96

ตารางผนวกที่ 5 ผลการทดสอบเมื่อใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโน 0.075 %wt อัตราการไหล 1.0 LPM

Time (hr)	$T_a$ (°C)	$I_T$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_{fi}$ (°C)		$T_{fo}$ (°C)		$T_s$ (°C)		$Q_{coll}$ (W)		$Q_s$ (J)		$\eta_{coll}$ (%)		$\eta_{system}$ (%)	
			water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF
09:00:00	28.4	365.0	29.4	30.1	31.7	32.7	29.5	29.8	160.47	181.43			21.98	24.85		
09:10:00	27.6	394.0	30.3	31.3	32.9	34.1	29.6	29.9	181.40	195.39	83,720	83,720	23.02	24.80	17.71	17.71
09:20:00	29.0	422.0	30.4	31.4	33.5	34.8	29.8	30.1	216.28	237.26	167,440	167,440	25.63	28.11	33.06	33.06
09:30:00	29.7	474.0	30.5	31.6	34.6	35.9	29.9	30.3	286.05	300.06	83,720	167,440	30.17	31.65	14.72	29.44
09:40:00	30.6	533.0	30.7	31.8	36.0	37.4	30.1	30.5	369.77	390.77	167,440	167,440	34.69	36.66	26.18	26.18
09:50:00	30.3	563.0	30.9	32.0	36.8	38.2	30.4	30.8	411.63	432.64	251,160	251,160	36.56	38.42	37.18	37.18
10:00:00	30.1	550.0	31.1	32.3	36.7	38.2	30.6	31.1	390.70	411.71	167,440	251,160	35.52	37.43	25.37	38.05
10:10:00	30.0	499.0	31.4	32.7	35.9	37.4	30.9	31.4	313.96	327.97	251,160	251,160	31.46	32.86	41.94	41.94
10:20:00	30.7	611.0	31.7	33.0	38.7	40.3	31.1	31.6	488.38	509.40	167,440	167,440	39.97	41.69	22.84	22.84
10:30:00	31.4	648.0	31.9	33.2	39.9	41.5	31.5	32.0	558.14	579.18	334,880	334,880	43.07	44.69	43.07	43.07
10:40:00	31.9	583.0	32.2	33.6	38.7	40.3	31.8	32.4	453.49	467.53	251,160	334,880	38.89	40.10	35.90	47.87
10:50:00	31.6	610.0	32.6	34.0	39.6	41.3	32.1	32.7	488.38	509.40	251,160	251,160	40.03	41.75	34.31	34.31
11:00:00	32.6	649.0	32.9	34.4	41.0	42.7	32.5	33.1	565.12	579.18	334,880	334,880	43.54	44.62	43.00	43.00
11:10:00	32.5	621.0	33.3	34.7	40.5	42.3	32.8	33.5	502.33	530.34	251,160	334,880	40.45	42.70	33.70	44.94
11:20:00	32.0	650.0	33.7	35.2	41.5	43.3	33.2	33.9	544.19	565.23	334,880	334,880	41.86	43.48	42.93	42.93
11:30:00	32.7	676.0	34.0	35.6	42.6	44.5	33.5	34.3	600.01	621.05	251,160	334,880	44.38	45.94	30.96	41.28
11:40:00	33.9	695.0	34.4	36.0	43.6	45.5	33.9	34.7	641.87	662.92	334,880	334,880	46.18	47.69	40.15	40.15
11:50:00	33.3	666.0	34.8	36.4	43.1	45.0	34.4	35.2	579.07	600.12	418,600	418,600	43.47	45.05	52.38	52.38
12:00:00	33.4	674.0	35.2	36.9	43.7	45.7	34.8	35.6	593.03	614.07	334,880	334,880	43.99	45.55	41.40	41.40

ตารางผนวกที่ 5 (ต่อ)

Time (hr)	$T_a$ (°C)	$I_T$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_{fi}$ (°C)		$T_{fo}$ (°C)		$T_s$ (°C)		$Q_{coll}$ (W)		$Q_s$ (J)		$\eta_{coll}$ (%)		$\eta_{system}$ (%)	
			water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF
12:10:00	33.4	655.0	35.6	37.4	43.5	45.6	35.2	36.0	551.17	572.21	334,880	334,880	42.07	43.68	42.61	42.61
12:20:00	33.1	645.0	36.0	37.8	43.6	45.6	35.5	36.4	530.24	544.29	251,160	334,880	41.10	42.19	32.45	43.27
12:30:00	32.8	510.0	36.4	38.2	40.9	42.9	35.9	36.8	313.96	327.97	334,880	334,880	30.78	32.15	54.72	54.72
12:40:00	33.9	696.0	36.8	38.7	45.7	47.8	36.1	37.0	620.94	635.01	167,440	167,440	44.61	45.62	20.05	20.05
12:50:00	33.7	550.0	37.0	38.9	42.3	44.4	36.5	37.5	369.77	383.80	334,880	418,600	33.62	34.89	50.74	63.42
13:00:00	33.3	705.0	37.4	39.4	46.4	48.6	36.8	37.8	627.91	641.99	251,160	251,160	44.53	45.53	29.69	29.69
13:10:00	33.5	589.0	37.7	39.7	43.8	46.0	37.2	38.2	425.59	439.62	334,880	334,880	36.13	37.32	47.38	47.38
13:20:00	33.2	685.0	38.1	40.2	46.4	48.7	37.5	38.5	579.07	593.14	251,160	251,160	42.27	43.29	30.55	30.55
13:30:00	34.4	653.0	38.4	40.5	46.0	48.3	37.9	39.0	530.24	544.29	334,880	418,600	40.60	41.68	42.74	53.42
13:40:00	35.4	675.0	38.8	40.9	47.1	49.4	38.2	39.4	579.07	593.14	251,160	334,880	42.89	43.94	31.01	41.34
13:50:00	34.7	618.0	39.2	41.3	45.9	48.2	38.6	39.8	467.45	481.49	334,880	334,880	37.82	38.96	45.16	45.16
14:00:00	33.8	603.0	39.6	41.8	45.8	48.2	38.9	40.1	432.56	446.60	251,160	251,160	35.87	37.03	34.71	34.71
14:10:00	33.4	575.0	39.9	42.2	45.4	47.8	39.2	40.4	383.72	390.77	251,160	251,160	33.37	33.98	36.40	36.40
14:20:00	33.8	553.0	40.2	42.5	45.2	47.7	39.5	40.7	348.84	362.86	251,160	251,160	31.54	32.81	37.85	37.85
14:30:00	33.6	526.0	40.5	42.8	44.9	47.4	39.7	41.0	306.98	320.99	167,440	251,160	29.18	30.51	26.53	39.79
14:40:00	34.1	517.0	40.7	43.1	45.0	47.5	39.9	41.3	300.00	307.04	167,440	251,160	29.01	29.69	26.99	40.48
14:50:00	34.0	491.0	40.9	43.3	44.7	47.3	40.1	41.5	265.12	279.12	167,440	167,440	27.00	28.42	28.42	28.42
15:00:00	34.0	463.0	41.2	43.6	44.4	47.0	40.3	41.7	223.26	237.26	167,440	167,440	24.11	25.62	30.14	30.14



ตารางผนวกที่ 6 ผลการทดสอบเมื่อใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโน 0.075 %wt อัตราการไหล 1.5 LPM

Time (hr)	T <sub>a</sub> (°C)	I <sub>T</sub> (W/m <sup>2</sup> )	T <sub>fi</sub> (°C)		T <sub>fo</sub> (°C)		T <sub>s</sub> (°C)		Q <sub>coll</sub> (W)		Q <sub>s</sub> (J)		η <sub>coll</sub> (%)		η <sub>system</sub> (%)	
			water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF
09:00:00	28.4	385.0	29.4	30.1	30.9	31.9	29.5	29.8	156.98	188.42			20.39	24.47		
09:10:00	29.0	419.0	30.3	31.3	32.1	33.5	29.6	29.9	188.37	230.29	83,720	83,720	22.48	27.48	16.65	16.65
09:20:00	29.2	422.0	30.3	31.4	32.2	33.6	29.7	30.1	198.84	230.29	83,720	167,440	23.56	27.29	16.53	33.06
09:30:00	30.0	454.0	30.5	31.6	32.7	34.2	29.9	30.3	230.23	272.16	167,440	167,440	25.36	29.97	30.73	30.73
09:40:00	29.6	436.0	30.6	31.8	32.7	34.1	30.1	30.5	219.77	240.75	167,440	167,440	25.20	27.61	32.00	32.00
09:50:00	30.4	510.0	30.8	32.0	33.8	35.3	30.2	30.7	313.95	345.43	83,720	167,440	30.78	33.87	13.68	27.36
10:00:00	30.7	537.0	31.0	32.2	34.3	35.9	30.4	30.9	345.35	387.30	167,440	167,440	32.16	36.06	25.98	25.98
10:10:00	31.0	457.0	31.2	32.5	33.5	35.1	30.7	31.2	240.70	272.16	251,160	251,160	26.33	29.78	45.80	45.80
10:20:00	31.0	542.0	31.4	32.8	34.9	36.6	30.8	31.4	366.28	397.77	83,720	167,440	33.79	36.69	12.87	25.74
10:30:00	31.4	665.0	31.6	33.0	37.0	38.8	31.1	31.7	565.11	607.12	251,160	251,160	42.49	45.65	31.47	31.47
10:40:00	31.5	719.0	31.9	33.3	38.2	40.1	31.5	32.2	659.30	711.80	334,880	418,600	45.85	49.50	38.81	48.52
10:50:00	32.0	635.0	32.3	33.8	37.1	39.0	31.9	32.7	502.32	544.31	334,880	418,600	39.55	42.86	43.95	54.93
11:00:00	32.3	715.0	32.7	34.3	39.0	41.0	32.2	33.1	659.30	701.33	251,160	334,880	46.10	49.04	29.27	39.03
11:10:00	32.8	706.0	33.1	34.7	39.2	41.2	32.7	33.5	638.37	680.39	418,600	334,880	45.21	48.19	49.41	39.53
11:20:00	33.1	769.0	33.5	35.2	40.8	42.9	33.1	34.0	763.95	806.00	334,880	418,600	49.67	52.41	36.29	45.36
11:30:00	33.4	770.0	33.9	35.7	41.3	43.4	33.6	34.6	774.41	806.00	418,600	502,320	50.29	52.34	45.30	54.36
11:40:00	34.0	784.0	34.5	36.3	42.1	44.3	34.1	35.1	795.34	837.41	418,600	418,600	50.72	53.41	44.49	44.49
11:50:00	34.5	790.0	35.0	36.9	42.7	45.0	34.6	35.7	805.81	847.87	418,600	502,320	51.00	53.66	44.16	52.99
12:00:00	35.0	795.0	35.5	37.5	43.4	45.7	35.2	36.3	826.74	858.34	502,320	502,320	52.00	53.98	52.65	52.65

ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ)

Time (hr)	$T_a$ (°C)	$I_T$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_{fi}$ (°C)		$T_{fo}$ (°C)		$T_s$ (°C)		$Q_{coll}$ (W)		$Q_s$ (J)		$\eta_{coll}$ (%)		$\eta_{system}$ (%)	
			water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF
12:10:00	35.6	785.0	36.1	38.1	43.7	46.1	35.7	36.9	795.34	837.41	418,600	502,320	50.66	53.34	44.44	53.32
12:20:00	36.4	789.0	36.6	38.8	44.4	46.9	36.2	37.5	816.27	847.87	418,600	502,320	51.73	53.73	44.21	53.05
12:30:00	36.0	790.0	37.2	39.4	44.8	47.4	36.8	38.1	795.34	837.41	502,320	502,320	50.34	53.00	52.99	52.99
12:40:00	34.9	675.0	37.7	40.0	43.0	45.6	37.3	38.6	554.65	586.19	418,600	418,600	41.08	43.42	51.68	51.68
12:50:00	35.0	685.0	38.2	40.6	43.7	46.3	37.7	39.1	575.58	596.65	334,880	418,600	42.01	43.55	40.74	50.92
13:00:00	34.7	774.0	38.6	41.0	45.6	48.4	38.1	39.5	732.55	774.60	334,880	334,880	47.32	50.04	36.06	36.06
13:10:00	34.9	679.0	39.0	41.5	44.3	47.0	38.5	40.0	554.65	575.72	334,880	418,600	40.84	42.39	41.10	51.37
13:20:00	34.2	664.0	39.5	42.1	44.4	47.2	38.9	40.5	512.79	533.85	334,880	418,600	38.61	40.20	42.03	52.54
13:30:00	35.2	738.0	39.9	42.5	46.1	49.0	39.3	40.8	648.83	680.39	334,880	251,160	43.96	46.10	37.81	28.36
13:40:00	34.8	689.0	40.2	42.9	45.5	48.5	39.7	41.3	554.65	586.19	334,880	418,600	40.25	42.54	40.50	50.63
13:50:00	34.2	543.0	40.7	43.4	43.6	46.6	40.1	41.8	303.49	334.96	334,880	418,600	27.95	30.84	51.39	64.24
14:00:00	33.8	569.0	41.1	43.9	44.3	47.4	40.3	42.0	334.88	366.37	167,440	167,440	29.43	32.19	24.52	24.52
14:10:00	34.9	615.0	41.3	44.1	45.3	48.4	40.5	42.3	418.60	450.11	167,440	251,160	34.03	36.59	22.69	34.03
14:20:00	34.5	602.0	41.5	44.5	45.3	48.4	40.8	42.7	397.67	408.24	251,160	334,880	33.03	33.91	34.77	46.36
14:30:00	34.0	598.0	41.8	44.8	45.4	48.7	41.1	43.0	376.74	408.24	251,160	251,160	31.50	34.13	35.00	35.00
14:40:00	35.1	653.0	42.1	45.1	46.6	49.9	41.3	43.3	470.93	502.44	167,440	251,160	36.06	38.47	21.37	32.05
14:50:00	34.1	627.0	42.4	45.5	46.4	49.7	41.7	43.7	418.60	439.64	334,880	334,880	33.38	35.06	44.51	44.51
15:00:00	35.1	572.0	42.7	45.9	46.0	49.3	42.0	44.0	345.35	355.90	251,160	251,160	30.19	31.11	36.59	36.59

ตารางผนวกที่ 7 ผลการทดสอบเมื่อใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโน 0.075 %wt อัตราการไหล 2.0 LPM

Time (hr)	T <sub>a</sub> (°C)	I <sub>T</sub> (W/m <sup>2</sup> )	T <sub>fi</sub> (°C)		T <sub>fo</sub> (°C)		T <sub>s</sub> (°C)		Q <sub>coll</sub> (W)		Q <sub>s</sub> (J)		η <sub>coll</sub> (%)		η <sub>system</sub> (%)	
			water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF
09:00:00	28.5	454.0	29.5	30.2	30.9	32.0	29.6	29.9	195.34	251.22			21.51	27.67		
09:10:00	29.9	462.0	30.4	31.4	31.9	33.3	29.7	30.0	209.30	265.18	83,720	83,720	22.65	28.70	15.10	15.10
09:20:00	30.0	460.0	30.5	31.6	31.9	33.4	29.9	30.3	195.34	251.22	167,440	251,160	21.23	27.31	30.33	45.50
09:30:00	29.4	418.0	30.6	31.8	31.7	33.3	30.0	30.5	153.49	209.35	83,720	167,440	18.36	25.04	16.69	33.38
09:40:00	28.2	413.0	30.8	32.0	31.8	33.4	30.1	30.7	139.53	195.39	83,720	167,440	16.89	23.66	16.89	33.79
09:50:00	28.6	549.0	30.9	32.2	33.2	34.9	30.3	30.8	320.92	376.83	167,440	83,720	29.23	34.32	25.42	12.71
10:00:00	28.5	479.0	31.0	32.4	32.6	34.3	30.5	31.1	223.25	265.18	167,440	251,160	23.30	27.68	29.13	43.70
10:10:00	31.0	574.0	31.2	32.7	33.9	35.8	30.6	31.3	376.74	432.66	83,720	167,440	32.82	37.69	12.15	24.31
10:20:00	31.1	741.0	31.4	32.9	36.2	38.2	30.9	31.7	669.75	739.70	251,160	334,880	45.19	49.91	28.25	37.66
10:30:00	31.3	669.0	31.7	33.3	35.5	37.5	31.4	32.2	530.22	586.18	418,600	418,600	39.63	43.81	52.14	52.14
10:40:00	31.0	648.0	32.1	33.8	35.6	37.7	31.7	32.6	488.36	544.31	251,160	334,880	37.68	42.00	32.30	43.07
10:50:00	31.5	690.0	32.5	34.3	36.5	38.7	32.0	33.0	558.13	614.09	251,160	334,880	40.44	44.50	30.33	40.44
11:00:00	32.0	683.0	32.8	34.7	36.8	39.1	32.4	33.5	558.13	614.09	334,880	418,600	40.86	44.96	40.86	51.07
11:10:00	31.0	749.0	33.2	35.1	38.0	40.4	32.8	33.9	669.75	739.70	334,880	334,880	44.71	49.38	37.26	37.26
11:20:00	32.5	651.0	33.6	35.6	37.1	39.5	33.2	34.4	488.36	544.31	334,880	418,600	37.51	41.81	42.87	53.58
11:30:00	31.9	630.0	34.0	36.1	37.2	39.7	33.5	34.8	446.50	502.44	251,160	334,880	35.44	39.88	33.22	44.30
11:40:00	33.6	784.0	34.4	36.6	39.8	42.4	33.8	35.2	753.47	809.49	251,160	334,880	48.05	51.63	26.70	35.60
11:50:00	34.1	777.0	34.7	36.9	40.0	42.7	34.3	35.8	739.52	809.49	418,600	502,320	47.59	52.09	44.89	53.87
12:00:00	32.8	815.0	35.2	37.6	41.0	43.7	34.8	36.3	809.29	851.36	418,600	418,600	49.65	52.23	42.80	42.80

ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

Time (hr)	T <sub>a</sub> (°C)	I <sub>T</sub> (W/m <sup>2</sup> )	T <sub>fi</sub> (°C)		T <sub>fo</sub> (°C)		T <sub>s</sub> (°C)		Q <sub>coll</sub> (W)		Q <sub>s</sub> (J)		η <sub>coll</sub> (%)		η <sub>system</sub> (%)	
			water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF
12:10:00	33.7	820.0	35.7	38.1	41.6	44.4	35.4	36.9	823.24	879.27	502,320	502,320	50.20	53.61	51.05	51.05
12:20:00	33.4	766.0	36.2	38.8	41.2	44.1	35.9	37.5	697.66	739.70	418,600	502,320	45.54	48.28	45.54	54.65
12:30:00	33.7	772.0	36.8	39.4	41.8	44.9	36.3	38.0	697.66	767.62	334,880	418,600	45.19	49.72	36.15	45.19
12:40:00	33.6	863.0	37.3	40.0	43.7	46.8	36.8	38.6	893.00	949.05	418,600	502,320	51.74	54.99	40.42	48.51
12:50:00	34.0	790.0	37.7	40.5	43.0	46.2	37.4	39.3	739.52	795.53	502,320	586,040	46.81	50.35	52.99	61.82
13:00:00	33.9	798.0	38.3	41.2	43.7	46.9	37.9	39.8	753.47	795.53	418,600	418,600	47.21	49.85	43.71	43.71
13:10:00	34.3	791.0	38.8	41.8	44.0	47.4	38.4	40.4	725.57	781.57	418,600	502,320	45.86	49.40	44.10	52.92
13:20:00	34.6	752.0	39.3	42.4	43.9	47.4	38.8	40.9	641.85	697.83	334,880	418,600	42.68	46.40	37.11	46.39
13:30:00	35.2	795.0	39.8	43.0	45.1	48.6	39.3	41.4	739.52	781.57	418,600	418,600	46.51	49.16	43.88	43.88
13:40:00	35.1	787.0	40.3	43.5	45.3	48.9	39.8	42.0	697.66	753.66	418,600	502,320	44.32	47.88	44.32	53.19
13:50:00	35.0	700.0	40.8	44.1	44.6	48.2	40.2	42.5	530.22	572.22	334,880	418,600	37.87	40.87	39.87	49.83
14:00:00	35.3	762.0	41.2	44.7	45.9	49.7	40.6	42.9	655.80	697.83	334,880	334,880	43.03	45.79	36.62	36.62
14:10:00	35.2	835.0	41.6	45.1	47.3	51.2	41.0	43.4	795.33	851.36	334,880	418,600	47.62	50.98	33.42	41.78
14:20:00	34.2	750.0	42.0	45.6	46.4	50.3	41.6	44.1	613.94	655.96	502,320	586,040	40.93	43.73	55.81	65.12
14:30:00	35.0	781.0	42.6	46.3	47.4	51.4	41.9	44.5	669.75	711.79	251,160	334,880	42.88	45.57	26.80	35.73
14:40:00	33.3	691.0	43.0	46.8	46.4	50.5	42.4	45.0	474.41	516.40	418,600	418,600	34.33	37.37	50.48	50.48
14:50:00	32.3	665.0	43.5	47.3	46.4	50.6	42.7	45.4	404.64	460.57	251,160	334,880	30.42	34.63	31.47	41.96
15:00:00	32.3	621.0	43.8	47.7	46.2	50.5	43.0	45.8	334.88	390.79	251,160	334,880	26.96	31.46	33.70	44.94

ตารางผนวกที่ 8 ผลการทดสอบเมื่อใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโน 0.100 %wt อัตราการไหล 1.0 LPM

Time (hr)	T <sub>a</sub> (°C)	I <sub>T</sub> (W/m <sup>2</sup> )	T <sub>fi</sub> (°C)		T <sub>fo</sub> (°C)		T <sub>s</sub> (°C)		Q <sub>coll</sub> (W)		Q <sub>s</sub> (J)		η <sub>coll</sub> (%)		η <sub>system</sub> (%)	
			water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF
09:00:00	28.5	332.5	29.5	30.2	31.4	32.3	29.6	29.9	132.56	146.56			19.93	22.04		
09:10:00	28.7	352.0	30.4	31.4	32.5	33.7	29.7	30.0	146.51	160.51	83,720	83,720	20.81	22.80	19.82	19.82
09:20:00	29.4	416.5	30.4	31.5	33.5	34.8	29.8	30.1	216.28	230.30	83,720	83,720	25.96	27.65	16.75	16.75
09:30:00	29.0	466.6	30.5	31.6	34.5	35.8	30.0	30.3	279.07	293.11	167,440	167,440	29.90	31.41	29.90	29.90
09:40:00	29.5	464.9	30.7	31.8	34.6	36.0	30.1	30.5	272.10	293.11	83,720	167,440	29.26	31.52	15.01	30.01
09:50:00	30.0	546.0	30.9	32.1	36.5	37.9	30.3	30.7	390.70	404.77	167,440	167,440	35.78	37.07	25.56	25.56
10:00:00	31.0	592.8	31.1	32.3	37.8	39.3	30.6	31.0	467.45	488.52	251,160	251,160	39.43	41.20	35.31	35.31
10:10:00	31.1	517.8	31.4	32.6	36.4	37.9	30.9	31.4	348.84	369.88	251,160	334,880	33.68	35.72	40.42	53.89
10:20:00	31.2	632.5	31.7	33.0	39.3	40.9	31.2	31.6	530.24	551.33	251,160	167,440	41.92	43.58	33.09	22.06
10:30:00	31.9	750.7	31.9	33.2	42.8	44.5	31.5	32.0	760.47	788.61	251,160	334,880	50.65	52.52	27.88	37.17
10:40:00	32.3	739.2	32.3	33.7	42.9	44.6	32.0	32.6	739.54	760.69	418,600	502,320	50.02	51.45	47.19	56.63
10:50:00	32.7	680.1	32.8	34.2	41.7	43.4	32.5	33.1	620.94	642.05	418,600	418,600	45.65	47.20	51.29	51.29
11:00:00	33.2	693.9	33.3	34.8	42.6	44.4	32.9	33.6	648.84	669.97	334,880	418,600	46.75	48.28	40.22	50.27
11:10:00	33.7	733.0	33.7	35.3	44.1	46.0	33.4	34.0	725.59	746.73	418,600	334,880	49.49	50.94	47.59	38.07
11:20:00	34.0	726.0	34.2	35.7	44.3	46.2	33.8	34.5	704.66	732.78	334,880	418,600	48.53	50.47	38.44	48.05
11:30:00	33.5	758.6	34.7	36.3	45.6	47.6	34.3	35.0	760.47	788.61	418,600	418,600	50.12	51.98	45.98	45.98
11:40:00	33.2	735.1	35.2	36.8	45.3	47.3	34.8	35.6	704.66	732.78	418,600	502,320	47.93	49.84	47.45	56.94
11:50:00	35.5	764.5	35.7	37.4	47.0	49.0	35.3	36.1	788.38	809.54	418,600	418,600	51.56	52.95	45.63	45.63
12:00:00	35.7	774.3	36.2	37.9	47.7	49.8	35.8	36.7	802.33	830.48	418,600	502,320	51.81	53.63	45.05	54.06

ตารางผนวกที่ 8 (ต่อ)

Time (hr)	T <sub>a</sub> (°C)	I <sub>T</sub> (W/m <sup>2</sup> )	T <sub>fi</sub> (°C)		T <sub>fo</sub> (°C)		T <sub>s</sub> (°C)		Q <sub>coll</sub> (W)		Q <sub>s</sub> (J)		η <sub>coll</sub> (%)		η <sub>system</sub> (%)	
			water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF
12:10:00	36.0	752.0	36.7	38.5	47.5	49.7	36.3	37.2	753.50	781.63	418,600	418,600	50.10	51.97	46.39	46.39
12:20:00	35.9	789.0	37.3	39.1	49.1	51.3	36.8	37.8	823.26	851.42	418,600	502,320	52.17	53.96	44.21	53.05
12:30:00	35.4	756.8	37.8	39.7	48.5	50.7	37.4	38.4	746.52	767.67	502,320	502,320	49.32	50.72	55.31	55.31
12:40:00	35.0	754.2	38.3	40.3	48.8	51.1	37.9	38.9	732.56	753.71	418,600	418,600	48.57	49.97	46.25	46.25
12:50:00	35.0	718.9	38.8	40.9	48.2	50.5	38.4	39.4	655.82	669.97	418,600	418,600	45.61	46.60	48.52	48.52
13:00:00	34.9	684.5	39.3	41.4	47.7	50.0	38.8	39.9	586.05	600.18	334,880	418,600	42.81	43.84	40.77	50.96
13:10:00	35.0	756.8	39.8	41.9	50.1	52.5	39.2	40.3	718.61	739.76	334,880	334,880	47.48	48.87	36.87	36.87
13:20:00	34.0	630.7	40.2	42.3	47.0	49.3	39.7	40.8	474.42	488.52	418,600	418,600	37.61	38.73	55.31	55.31
13:30:00	33.3	640.4	40.7	42.9	47.5	50.0	40.0	41.2	474.42	495.50	251,160	334,880	37.04	38.69	32.68	43.58
13:40:00	34.1	680.1	41.0	43.3	48.9	51.4	40.3	41.5	551.17	565.29	251,160	251,160	40.52	41.56	30.77	30.77
13:50:00	33.7	676.6	41.3	43.6	49.0	51.6	40.7	41.9	537.21	558.31	334,880	334,880	39.70	41.26	41.25	41.25
14:00:00	34.7	603.3	41.7	44.1	47.8	50.3	41.1	42.3	425.59	432.69	334,880	334,880	35.27	35.86	46.26	46.26
14:10:00	34.5	652.7	42.1	44.5	49.2	51.8	41.3	42.7	495.35	509.45	167,440	334,880	37.95	39.03	21.38	42.76
14:20:00	33.7	598.8	42.4	44.8	48.1	50.7	41.7	43.0	397.68	411.75	334,880	251,160	33.21	34.38	46.60	34.95
14:30:00	34.5	615.7	42.7	45.2	48.9	51.5	42.0	43.3	432.56	439.67	251,160	251,160	35.13	35.70	33.99	33.99
14:40:00	34.6	571.6	43.0	45.5	48.2	50.9	42.3	43.7	362.79	376.86	251,160	334,880	31.73	32.97	36.62	48.82
14:50:00	34.8	620.1	43.3	45.9	49.5	52.3	42.5	43.9	432.56	446.65	167,440	167,440	34.88	36.01	22.50	22.50
15:00:00	33.2	585.7	43.6	46.2	48.8	51.6	42.8	44.3	362.79	376.86	251,160	334,880	30.97	32.17	35.74	47.65

ตารางผนวกที่ 9 ผลการทดสอบเมื่อใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโน 0.100 %wt อัตราการไหล 1.5 LPM

Time (hr)	T <sub>a</sub> (°C)	I <sub>T</sub> (W/m <sup>2</sup> )	T <sub>fi</sub> (°C)		T <sub>fo</sub> (°C)		T <sub>s</sub> (°C)		Q <sub>coll</sub> (W)		Q <sub>s</sub> (J)		η <sub>Coll</sub> (%)		η <sub>system</sub> (%)	
			water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF
09:00:00	28.5	385.0	29.5	30.2	31.0	32.0	29.6	29.9	156.98	188.42			20.39	24.47		
09:10:00	29.3	487.1	30.4	31.4	33.0	34.4	29.7	30.0	272.09	314.04	83,720	83,720	27.93	32.24	14.32	14.32
09:20:00	29.5	495.0	30.4	31.5	33.2	34.6	29.9	30.3	293.02	324.51	167,440	251,160	29.60	32.78	28.19	42.28
09:30:00	29.5	485.0	30.7	31.8	33.3	34.7	30.1	30.5	272.09	303.57	167,440	167,440	28.05	31.30	28.77	28.77
09:40:00	30.8	575.2	30.9	32.0	34.8	36.4	30.3	30.7	408.14	460.59	167,440	167,440	35.48	40.04	24.26	24.26
09:50:00	31.0	600.0	31.1	32.3	35.4	37.0	30.6	31.1	450.00	492.00	251,160	334,880	37.50	41.00	34.88	46.51
10:00:00	31.1	605.5	31.4	32.6	35.8	37.4	30.9	31.4	460.46	502.47	251,160	251,160	38.02	41.49	34.57	34.57
10:10:00	31.6	689.9	31.7	33.0	37.5	39.3	31.2	31.8	606.97	659.49	251,160	334,880	43.99	47.80	30.34	40.45
10:20:00	31.9	622.9	32.0	33.4	36.7	38.5	31.6	32.3	491.86	533.87	334,880	418,600	39.48	42.85	44.80	56.00
10:30:00	32.0	617.1	32.4	33.9	37.0	38.8	31.9	32.6	481.39	512.93	251,160	251,160	39.00	41.56	33.92	33.92
10:40:00	32.5	585.1	32.7	34.3	36.8	38.7	32.3	33.0	429.06	460.59	334,880	334,880	36.67	39.36	47.70	47.70
10:50:00	33.0	734.5	33.1	34.7	39.8	41.7	32.6	33.3	701.16	732.76	251,160	251,160	47.73	49.88	28.50	28.50
11:00:00	33.0	708.3	33.4	35.0	39.5	41.6	33.0	33.9	638.37	690.89	334,880	502,320	45.06	48.77	39.40	59.10
11:10:00	32.0	625.8	33.9	35.6	38.5	40.5	33.4	34.3	481.39	512.93	334,880	334,880	38.46	40.98	44.59	44.59
11:20:00	32.4	706.4	34.3	36.1	40.3	42.4	33.8	34.7	627.90	659.49	334,880	334,880	44.44	46.68	39.51	39.51
11:30:00	32.2	588.0	34.6	36.5	38.6	40.7	34.2	35.2	418.60	439.66	334,880	418,600	35.60	37.39	47.46	59.33
11:40:00	32.7	702.5	35.0	37.0	40.9	43.2	34.5	35.5	617.44	649.02	251,160	251,160	43.95	46.19	29.79	29.79
11:50:00	33.7	721.9	35.3	37.3	41.6	43.9	34.9	36.0	659.30	690.89	334,880	418,600	45.66	47.85	38.66	48.32
12:00:00	34.2	710.3	35.8	37.8	41.8	44.2	35.3	36.5	627.90	669.95	334,880	418,600	44.20	47.16	39.29	49.11

ตารางผนวกที่ 9 (ต่อ)

Time (hr)	$T_a$ (°C)	$I_T$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_{ri}$ (°C)		$T_{ro}$ (°C)		$T_s$ (°C)		$Q_{coll}$ (W)		$Q_s$ (J)		$\eta_{coll}$ (%)		$\eta_{system}$ (%)	
			water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF
12:10:00	33.4	695.7	36.2	38.3	41.9	44.3	35.7	36.9	596.51	628.08	334,880	334,880	42.87	45.14	40.11	40.11
12:20:00	33.3	742.3	36.6	38.8	43.2	45.6	36.1	37.4	690.69	711.83	334,880	418,600	46.52	47.95	37.59	46.99
12:30:00	34.6	760.7	37.0	39.3	44.0	46.6	36.6	37.9	732.55	764.17	418,600	418,600	48.15	50.23	45.86	45.86
12:40:00	36.4	802.4	37.5	39.8	45.5	48.1	37.1	38.4	837.20	868.85	418,600	418,600	52.17	54.14	43.47	43.47
12:50:00	36.1	728.7	38.0	40.4	44.4	47.1	37.6	39.0	669.76	701.36	418,600	502,320	45.96	48.12	47.87	57.44
13:00:00	35.2	730.6	38.6	41.0	44.9	47.6	38.1	39.5	659.30	690.89	418,600	418,600	45.12	47.28	47.75	47.75
13:10:00	34.7	732.6	39.0	41.5	45.2	48.0	38.5	40.0	648.83	680.42	334,880	418,600	44.28	46.44	38.09	47.62
13:20:00	35.2	738.4	39.5	42.0	45.8	48.6	38.9	40.5	659.30	690.89	334,880	418,600	44.64	46.78	37.79	47.24
13:30:00	35.3	770.4	39.9	42.5	46.8	49.8	39.4	41.0	722.09	764.17	418,600	418,600	46.86	49.60	45.28	45.28
13:40:00	35.2	697.6	40.4	43.1	45.9	48.8	39.9	41.5	575.58	596.68	418,600	418,600	41.25	42.77	50.00	50.00
13:50:00	36.1	753.0	40.9	43.6	47.4	50.5	40.2	42.0	680.23	722.29	251,160	418,600	45.17	47.96	27.80	46.33
14:00:00	35.6	685.0	41.3	44.1	46.5	49.6	40.7	42.5	544.18	575.74	418,600	418,600	39.72	42.02	50.92	50.92
14:10:00	35.8	718.0	41.7	44.6	47.5	50.7	41.1	42.9	606.97	638.55	334,880	334,880	42.27	44.47	38.87	38.87
14:20:00	35.5	706.4	42.1	45.1	47.6	50.8	41.5	43.3	575.58	596.68	334,880	334,880	40.74	42.23	39.51	39.51
14:30:00	34.7	555.0	42.5	45.5	45.6	48.8	41.9	43.8	324.42	345.45	334,880	418,600	29.23	31.12	50.28	62.85
14:40:00	34.2	590.9	42.9	46.0	46.4	49.7	42.1	44.0	366.28	387.32	167,440	167,440	30.99	32.77	23.61	23.61
14:50:00	34.5	584.1	43.1	46.3	46.5	49.9	42.3	44.4	355.81	376.85	167,440	334,880	30.46	32.26	23.89	47.78
15:00:00	34.2	633.6	43.4	46.6	47.5	50.9	42.6	44.6	429.07	450.13	251,160	167,440	33.86	35.52	33.03	22.02



ตารางผนวกที่ 10 ผลการทดสอบเมื่อใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำงานนาโน 0.100 %wt อัตราการไหล 2.0 LPM

Time (hr)	$T_a$ (°C)	$I_T$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_{fi}$ (°C)		$T_{fo}$ (°C)		$T_s$ (°C)		$Q_{coll}$ (W)		$Q_s$ (J)		$\eta_{coll}$ (%)		$\eta_{system}$ (%)	
			water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF
09:00:00	28.7	474.7	29.7	30.4	31.3	32.5	29.0	29.2	223.25	293.11			23.51	30.87		
09:10:00	28.4	435.0	30.6	31.7	31.8	33.3	29.1	29.5	167.44	223.32	83,720	251,160	19.25	25.67	16.04	48.11
09:20:00	28.7	480.0	30.7	31.8	32.3	33.8	29.4	29.9	223.25	279.15	251,160	334,880	23.26	29.08	43.60	58.14
09:30:00	28.9	519.0	30.8	32.0	32.8	34.4	29.6	30.3	279.06	334.98	167,440	334,880	26.88	32.27	26.89	53.77
09:40:00	29.4	525.1	31.0	32.3	33.1	34.7	29.8	30.5	293.02	334.98	167,440	167,440	27.90	31.90	26.57	26.57
09:50:00	30.0	545.0	31.2	32.5	33.5	35.2	30.0	30.7	320.92	376.86	167,440	167,440	29.44	34.57	25.60	25.60
10:00:00	30.1	642.5	31.4	32.8	34.8	36.7	30.3	31.0	474.41	544.35	251,160	251,160	36.92	42.36	32.58	32.58
10:10:00	30.6	732.1	31.6	33.1	36.3	38.2	30.8	31.4	655.80	711.84	418,600	334,880	44.79	48.62	47.65	38.12
10:20:00	30.9	661.1	32.0	33.5	35.7	37.6	31.2	31.6	516.27	572.26	334,880	167,440	39.05	43.28	42.21	21.11
10:30:00	31.3	689.0	32.4	34.1	36.5	38.5	31.5	32.0	572.08	614.14	251,160	334,880	41.52	44.57	30.38	40.50
10:40:00	31.7	720.0	32.8	34.5	37.2	39.4	32.0	32.6	613.94	683.93	418,600	502,320	42.63	47.49	48.45	58.14
10:50:00	32.0	779.5	33.2	35.0	38.5	40.8	32.5	33.1	739.52	809.54	418,600	418,600	47.44	51.93	44.75	44.75
11:00:00	32.4	751.7	33.6	35.5	38.5	40.8	32.9	33.6	683.71	739.76	334,880	418,600	45.48	49.21	37.12	46.41
11:10:00	33.0	764.0	34.1	36.1	39.2	41.6	33.4	34.0	711.61	767.67	418,600	334,880	46.57	50.24	45.66	36.53
11:20:00	33.2	777.0	34.5	36.6	39.8	42.3	33.8	34.5	739.52	795.59	334,880	418,600	47.59	51.20	35.92	44.89
11:30:00	33.3	724.0	35.0	37.2	39.5	42.1	34.3	35.0	627.89	683.93	418,600	418,600	43.36	47.23	48.18	48.18
11:40:00	33.7	745.5	35.5	37.8	40.3	43.0	34.8	35.6	669.75	725.80	418,600	502,320	44.92	48.68	46.79	56.15
11:50:00	34.0	766.1	35.9	38.3	41.0	43.8	35.3	36.1	711.61	767.67	418,600	418,600	46.44	50.10	45.53	45.53
12:00:00	34.5	789.0	36.4	38.8	41.8	44.7	35.8	36.7	753.47	823.50	418,600	502,320	47.75	52.19	44.21	53.05

ตารางผนวกที่ 10 (ต่อ)

Time (hr)	$T_a$ (°C)	$I_T$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_{fi}$ (°C)		$T_{fo}$ (°C)		$T_s$ (°C)		$Q_{coll}$ (W)		$Q_s$ (J)		$\eta_{coll}$ (%)		$\eta_{system}$ (%)	
			water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF	water	NF
12:10:00	35.0	808.0	36.9	39.4	42.6	45.5	36.3	37.2	795.33	851.42	418,600	418,600	49.22	52.69	43.17	43.17
12:20:00	35.6	818.0	37.4	40.0	43.3	46.3	36.8	37.8	823.24	879.33	418,600	502,320	50.32	53.75	42.64	51.17
12:30:00	36.0	807.3	37.9	40.6	43.6	46.7	37.4	38.4	795.33	851.42	502,320	502,320	49.26	52.73	51.85	51.85
12:40:00	37.5	835.0	38.5	41.3	44.7	47.9	37.9	38.9	865.10	921.21	418,600	418,600	51.80	55.16	41.78	41.78
12:50:00	35.3	773.3	39.0	41.9	44.0	47.3	38.4	39.4	697.66	753.71	418,600	418,600	45.11	48.73	45.11	45.11
13:00:00	35.4	827.0	39.6	42.6	45.4	48.8	38.8	39.9	809.29	865.38	334,880	418,600	48.93	52.32	33.74	42.18
13:10:00	34.5	777.4	40.1	43.1	45.0	48.4	39.2	40.3	683.71	739.76	334,880	334,880	43.97	47.58	35.90	35.90
13:20:00	34.3	783.6	40.6	43.8	45.6	49.1	39.7	40.8	697.66	739.76	418,600	418,600	44.52	47.20	44.52	44.52
13:30:00	33.9	807.0	41.1	44.3	46.3	49.9	40.0	41.2	725.57	781.63	251,160	334,880	44.95	48.43	25.94	34.58
13:40:00	33.3	740.3	41.5	44.9	45.7	49.4	40.3	41.5	586.03	628.09	251,160	251,160	39.58	42.42	28.27	28.27
13:50:00	33.3	799.0	42.0	45.5	47.0	50.8	40.7	41.9	697.66	739.76	334,880	334,880	43.66	46.29	34.93	34.93
14:00:00	32.8	727.0	42.4	46.0	46.3	50.2	41.1	42.3	544.17	586.22	334,880	334,880	37.43	40.32	38.39	38.39
14:10:00	33.5	762.0	42.9	46.5	47.3	51.2	41.3	42.7	613.94	656.01	167,440	334,880	40.28	43.05	18.31	36.62
14:20:00	33.7	749.6	43.3	47.0	47.5	51.5	41.7	43.0	586.03	628.09	334,880	251,160	39.09	41.90	37.23	27.92
14:30:00	33.8	589.0	43.7	47.5	46.0	50.0	42.0	43.3	320.92	348.94	251,160	251,160	27.24	29.62	35.53	35.53
14:40:00	33.5	627.1	44.1	48.0	46.7	50.9	42.3	43.7	362.78	404.77	251,160	334,880	28.93	32.27	33.38	44.50
14:50:00	33.4	619.9	44.3	48.3	46.8	51.1	42.5	43.9	348.83	390.81	167,440	167,440	28.14	31.52	22.51	22.51
15:00:00	33.3	672.4	44.6	48.6	47.7	52.0	42.8	44.3	432.55	474.56	251,160	334,880	32.16	35.29	31.13	41.50



ภาคผนวก ค

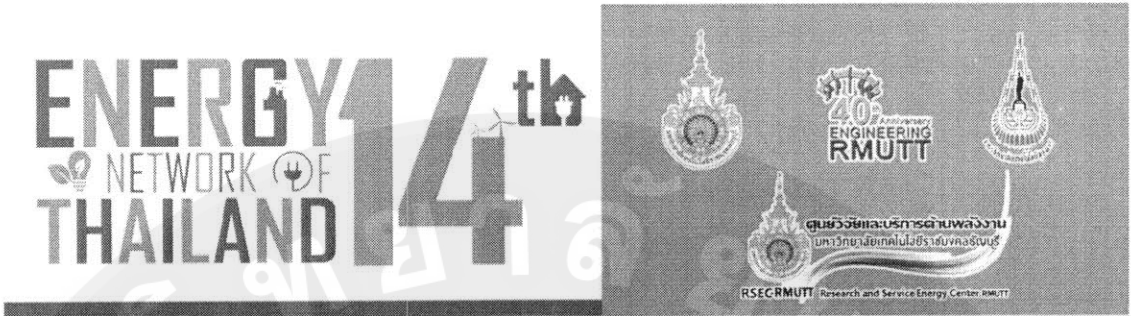
งานวิจัยที่เผยแพร่

### การเผยแพร่ผลงานวิจัยในงานประชุมวิชาการ

การเผยแพร่ผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการมีทั้งหมด 2 เรื่อง ดังนี้

1. เผยแพร่ผลงานวิจัยในหัวข้อเรื่อง การออกแบบและสร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบ-  
ลิกสำหรับระบบผลิตน้ำร้อน ในการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14 ระหว่าง  
วันที่ 13 – 15 มิถุนายน พ.ศ. 2561 ณ โรงแรมโนโวเทล จังหวัด ระยอง

2. เผยแพร่ผลงานวิจัยในหัวข้อเรื่อง การใช้ของไหลนาโนกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบ-  
ลิก ในการประชุมวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 9  
ในวันที่ 7 กันยายน พ.ศ. 2561 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น



14th Conference on Energy Network of Thailand  
การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14

13 - 15 มิถุนายน 2561 ณ โนโวเทล ระยอง

# Proceeding



การศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันหมูโดยใช้เถ้ากานะพร้าวร่วมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	808
การศึกษาเปรียบเทียบระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาขนาด 3 kWp เพื่อรองรับระบบโซลาร์เสรีสำหรับเมืองไทย.....	815
การออกแบบและสร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลาสำหรับระบบผลิตน้ำร้อน.....	822
การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันหมูโดยใช้เถ้าไม้ร่วมกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	826
การใช้ประโยชน์เถ้ากะลาป่นเป็นสารเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล.....	833
ตู้บ่มรังสีอาทิตย์แบบความร้อนหมุนเวียนตามธรรมชาติ.....	841
การศึกษาและออกแบบวงจรควบคุมการชาร์จแบตเตอรี่ด้วยเซลล์เชื้อเพลิงชนิดโปรตรอนแลกเปลี่ยนเมมเบรน ขนาด 1.2 kW.....	847
การประเมินสมรรถนะเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงเมื่อใช้ป้อนขี้ข้าวโพดอัดเม็ดต่อเนื่อง.....	852
การผลิตถ่านอัดแท่งจากถ่านยูคาลิปตัสและพีทที่เกิดจากการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุในหนองน้ำ.....	857
ผลกระทบของไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วต่อสมรรถนะและคุณลักษณะการเผาไหม้ ของเครื่องยนต์ดีเซลคู่เบียวที่มีการปรับอัตราส่วนกำลังอัด.....	863
การจัดลดการไหลอากาศและการออกแบบเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์แบบถาดหมุนร่วมกับรังสีอินฟราเรดสำหรับผลิตก้อนขี้ปลา.....	870
การศึกษาสมบัติทางจุลโครงสร้างและทางแสงของฟิล์มบางซิลิกนาในเชิงค็อกอไซด์ที่เจือด้วยบิสมท์ สำหรับการประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์.....	879
ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งหลังคาโรงงานในประเทศไทย.....	886
การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพระบบปิดแบบไม่ใช้อากาศดีดและโรงไฟฟ้า.....	889
สมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่งเมื่อใช้ตัวประสานธรรมชาติ.....	893
การสังเคราะห์ฟิล์มบางซิลิคอนคอปเปอร์ในเมตริกซ์ของซิงค์ออกไซด์ได้บิสมท์จากหมึกคอมพิวเตอร์โพลีซิลิคอน และคุณสมบัติทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดวัสดุชั้นสูง.....	899
เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากผักตบชวาผสมกับชีวมวล.....	906
การศึกษาเชื้อเพลิงชีวมวลที่เหลือทิ้งจากการผลิตมะพร้าวแก้วในจังหวัดเลย.....	910
การสืบสวนผลกระทบของการบังเงาบางส่วนที่มีต่อกำลังไฟฟ้าสูงสุดและประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว.....	917
การเพิ่มผลผลิตและความสัมพันธ์ทางด้านพลังงานขาเข้ากับยัลด์เม็ดและการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ ของโรงเรือนทำความเย็นแบบระเหยและพ่นหมอก.....	923
ผลกระทบเทคนิคการอุ่นชีวมวลที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพเชื้อเพลิงอัดแท่ง.....	931
การพัฒนาถังหมักผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กแบบหลายใบสำหรับอัตราเร็วลมต่ำ.....	936
วิเคราะห์ผลกระทบจากความเข้มข้นของรังสีแสงอาทิตย์ของเครื่องกลั่นน้ำพลังงานแสงอาทิตย์แบบพลาสมา.....	944
อิทธิพลของเผาไหม้เครื่องยนต์เผาไหม้ภายในที่มีต่อสมรรถนะเครื่องยนต์ไปรติวเซอร์แก๊ส.....	948
การพัฒนาโรงอบแห้งแสงอาทิตย์แบบโรงเรือนกระจกสำหรับอบแห้งปลาตากและปลาหมึกไทย.....	954
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและความชื้นของดิน.....	962
การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากต้นปาล์มหมากผสมกะลาป่นและกากตะกอนน้ำมันปาล์ม.....	966
คุณลักษณะมลพิษของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมด้วยการฉีดแก๊สไอโซซัลที่เทอร์ท.....	974

การออกแบบและสร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกสำหรับระบบผลิตน้ำร้อน  
Design and Construction of a Parabolic Trough Solar Collector for Hot Water Production System

ณัฐฐา ลือชาติเมธิกุล และ ปวีญ คงกระพันศรี\*

\*วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

\*อีเมลผู้ติดต่อ: [pann.khobprajakorn@ajms.ac.th](mailto:pann.khobprajakorn@ajms.ac.th), เบอร์โทรศัพท์ 053875590, เบอร์โทรสาร 053875599

บทคัดย่อ

RE-01-140

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์ประเภทรวมแสงแบบรางพาราโบลิกสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ รางพาราโบลิกที่สร้างขึ้นมีขนาดพื้นที่รับแสงโดยประมาณ  $2 \text{ m}^2$  ใช้น้ำเป็นสารทำงาน ทำการทดสอบระบบต้นแบบที่ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ในช่วง  $441 \text{ W/m}^2$  ถึง  $793 \text{ W/m}^2$  จากผลการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์โดยใช้อัตราการไหลของสารทำงานเท่ากับ  $1.0 \text{ lpm}$  และ  $1.5 \text{ lpm}$  พบว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ต้นแบบสามารถสร้างอุณหภูมิของสารทำงาน ณ ทางออกของท่อรับรังสีได้สูงสุดเท่ากับ  $56.6 \text{ }^\circ\text{C}$  และ  $50.0 \text{ }^\circ\text{C}$  ตามลำดับ และระบบสามารถผลิตน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ  $55.4 \text{ }^\circ\text{C}$  และ  $49.3 \text{ }^\circ\text{C}$  ตามลำดับ จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าค่าอัตราการไหลของสารทำงานส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้อย่างมีนัยยะสำคัญในทุกค่าความเข้มแสง

**คำหลัก:** ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ รางพาราโบลิก ระบบผลิตน้ำร้อน

Abstract

This research presented a design and construction of a concentrating solar collector with parabolic trough for applying in solar water heater. Parabolic trough with aperture area of  $2 \text{ m}^2$  using water as working fluid was produced. The prototype parabolic trough solar collector with solar intensity ranging from  $441\text{-}793 \text{ W/m}^2$  was tested. The results showed that the prototype solar collector could provide the highest temperature of working fluid at the receiver outlet with  $56.6 \text{ }^\circ\text{C}$  and  $50.0 \text{ }^\circ\text{C}$ , and the highest temperature of hot water with  $55.4 \text{ }^\circ\text{C}$  and  $49.3 \text{ }^\circ\text{C}$  when flow rates of working fluid were  $1.0 \text{ lpm}$  and  $1.5 \text{ lpm}$ , respectively. Based on the testing results, it could be concluded that the flow rate of working fluid exhibited significantly direct effect on an increase or decrease in the temperature of produced hot water for all cases of solar intensity.

**Keywords:** Solar Collector, Parabolic Trough, Hot Water Production System

## 1. บทนำ

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานหมุนเวียนที่มีศักยภาพสูง เป็นพลังงานสะอาด สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทุกพื้นที่ ซึ่งการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตความร้อนนั้นสามารถทำได้โดยการใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (solar collector) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อน โดยเทคโนโลยีที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย เช่น การผลิตน้ำร้อน หรือ การอบแห้ง ซึ่งในส่วนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์สำหรับผลิตน้ำร้อน ที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบันแบ่งตามรูปร่างของตัวเก็บรังสี ได้แก่ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat Plate Solar Collector) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ (Evacuated Tube Solar Collector) และตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์ชนิดรวมแสง (Concentration Solar Collector) ซึ่งตัวเก็บรังสีอาทิตย์แต่ละชนิดมีหน้าที่รวบรวมพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์เพื่อถ่ายเทให้กับสารทำงาน (Working Fluid) ที่ลำเลียงผ่านระบบท่อ เช่น น้ำ หรือน้ำมัน เป็นต้น [1-5]

งานวิจัยนี้จะนำเสนอการออกแบบและสร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก (Parabolic Trough Solar Collector: PTSC) ซึ่งจัดอยู่ในประเภทของตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์ชนิดรวมแสงที่สามารถสร้างอุณหภูมิให้กับสารทำงานได้สูงและมีต้นทุนในการสร้างต่อพื้นที่รับแสงต่ำเพื่อประยุกต์ใช้กับระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานในการผลิตน้ำร้อนต่อไป

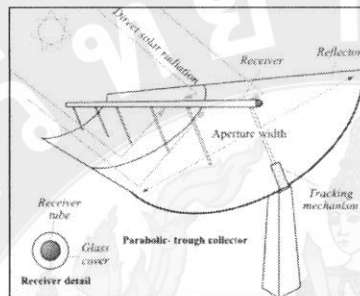
## 2. หลักการและทฤษฎี

### 2.1 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก

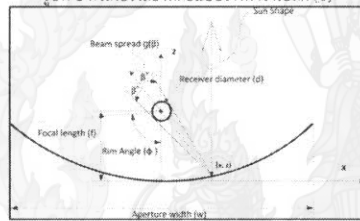
ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกจัดอยู่ในประเภทของตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์ชนิดรวมแสง มีหลักการทำงานคือ เมื่อรังสีแสงอาทิตย์แสงตกกระทบแผ่นสะท้อนรังสี รังสีดังกล่าวจะเคลื่อนที่ไปยังท่อรับรังสีซึ่งติดตั้ง ณ จุดโฟกัสเพื่อแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อนและถ่ายเทให้กับสารทำงานและนำความร้อนดังกล่าวไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 4 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกมีส่วนประกอบหลักดังนี้

- 1) แผ่นสะท้อนรังสี มีลักษณะเป็นแผ่นโค้งพาราโบลิกทำหน้าที่รับรังสีจากดวงอาทิตย์และสะท้อนรังสีดังกล่าวสู่ตำแหน่งโฟกัสของพาราโบลิก ดังแสดงในรูปที่ 1
- 2) ท่อรับรังสี ติดตั้ง ณ ตำแหน่งโฟกัสของรางพาราโบลิกทำหน้าที่รับรังสีอาทิตย์ที่สะท้อนจากแผ่นสะท้อนรังสีเพื่อแปลงเป็นพลังงานความร้อนและถ่ายเทให้กับสารทำงานที่บรรจุอยู่ภายใน
- 3) ระบบส่งจ่ายสารทำงาน มีหน้าที่ส่งจ่ายสารทำงานให้เคลื่อนที่ผ่านท่อรับรังสีเพื่อรับพลังงานความร้อนจากรังสีอาทิตย์และเคลื่อนที่สู่อุปกรณ์เก็บความร้อน
- 4) ถังเก็บกับน้ำร้อน ถังนี้จะติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนระหว่างสารทำงานและน้ำที่จะผลิต

เป็นน้ำร้อน ความร้อนที่ได้จากการแลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกกักเก็บไว้ในรูปของน้ำร้อนที่จะนำไปใช้งานต่อไป



รูปที่ 1 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก [6]



รูปที่ 2 การระบุตำแหน่งต่างๆ ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก [7]

2.2 หลักการออกแบบรางพาราโบลิก

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยรางพาราโบลิกที่ทำการออกแบบโดยใช้สมการพาราโบลาคงสมการที่ (1) [8]

$$y = x^2/4f \tag{1}$$

การคำนวณความยาวโฟกัส (f) ของรางพาราโบลิก ความกว้าง (a) ของรางพาราโบลิก ความสูง (h) ของรางพาราโบลิก และความยาวส่วนโค้ง (s) ของรางพาราโบลิก สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) [8]

$$f = w^2/16z \tag{2}$$

เมื่อ f คือ ความยาวโฟกัสของรางพาราโบลิก, m  
w คือ ความกว้างของรางพาราโบลิก, m  
z คือ ความสูงของรางพาราโบลิก, m

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 การออกแบบและสร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกจำนวนทั้งสิ้น 2 ชุด ดังรูปที่ 3 แต่ละชุดประกอบด้วยอุปกรณ์หลักดังนี้ 1) แผ่นสะท้อนรังสี มีลักษณะเป็นแผ่นโค้งพาราโบลาคำหน้าที่ทำหน้าที่รับรังสีจากดวงอาทิตย์และสะท้อนรังสี

ดังกล่าวสู่ตำแหน่งโฟกัสของพาราโบลิก แผ่นสะท้อนรังสีในงานวิจัยนี้สร้างจากแผ่นสแตนเลสสตีลมีความหนา 1 mm ยึดติดกับโครงเหล็กกล้าที่ขึ้นรูปให้มีความโค้งตามสมการพาราโบลิก โดยกำหนดให้แผ่นสะท้อนรังสีมีพื้นที่รับรังสีกว้างและยาวประมาณ 1.0 m และ 2.4 m ตามลำดับ และ 2) ท่อรับรังสีอาทิตย์ ติดตั้ง ณ ตำแหน่งโฟกัสของรางพาราโบลิกทำหน้าที่รับรังสีอาทิตย์ที่สะท้อนจากแผ่นสะท้อนรังสีเพื่อแปลงเป็นพลังงานความร้อนและถ่ายเทให้กับสารทำงานที่บรรจุอยู่ภายใน ท่อรังสีในงานวิจัยนี้สร้างจากเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.05 m ยึดติดกับโครงเหล็กกล้าที่ออกแบบให้สามารถปรับระยะห่างระหว่างท่อรับรังสีและแผ่นสะท้อนรังสีได้

3.2 การออกแบบและสร้างระบบส่งจ่ายสารทำงานและถังกักเก็บน้ำร้อน

ระบบส่งจ่ายสารทำงานมีหน้าที่ส่งจ่ายสารทำงานให้เคลื่อนที่ผ่านท่อรับรังสีเพื่อรับพลังงานความร้อนจากรังสีอาทิตย์ และเคลื่อนที่สู่อุปกรณ์กักเก็บความร้อน ระบบดังกล่าวถูกออกแบบให้สามารถปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของสารทำงานได้โดยใช้อุปกรณ์อินเวอร์เตอร์ในการปรับรอบของมอเตอร์

ถังกักเก็บน้ำร้อน ถังนี้จะติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนระหว่างสารทำงานและน้ำที่จะผลิตเป็นน้ำร้อน ความร้อนที่ได้จากการแลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกกักเก็บไว้ในรูปของน้ำร้อนที่จะนำไปใช้งานต่อไป ถังเก็บน้ำร้อนในงานวิจัยนี้มีความจุ 200 l ทำการติดตั้งฉนวนกันความร้อน



รูปที่ 3 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกสำหรับระบบผลิตน้ำร้อนในงานวิจัยนี้

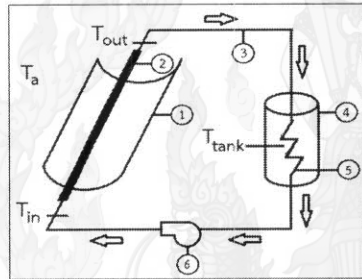
3.3 วิธีการทดสอบ

การทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกสำหรับระบบผลิตน้ำร้อนต้นแบบในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างชุดทดสอบทั้งสิ้น 2 ชุดทดสอบ แต่ละชุดประกอบด้วยอุปกรณ์หลักๆ ได้แก่ 1) แผ่นสะท้อนรังสีแบบพาราโบลิก 2) ท่อรับรังสีอาทิตย์ 3) ระบบท่อลำเลียงสารทำงาน 4) ถังกักเก็บน้ำร้อน 5) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และ 6) ปั๊มน้ำ โดยชุดทดสอบแต่ละชุดจะมีหลักการดำเนินงานเหมือนกันคือ สารทำงานจะไหลผ่านระบบท่อลำเลียงเข้าสู่ท่อรับรังสีอาทิตย์ที่ถูกติดตั้งไว้ ณ จุดโฟกัสของแผ่นสะท้อนรังสีแบบพาราโบลิกเพื่อรับความร้อนจากแสงอาทิตย์แล้วไหลเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งไว้ภายในถังกักเก็บน้ำร้อนสำหรับถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำภายในถังที่จะใช้ผลิตเป็นน้ำร้อน เมื่อสาร



ทำงานไหลออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนก็จะถูกปั๊มส่งเข้าสู่ท่อรับรังสีอาทิตย์ต่อไปเป็นวัฏจักรดังรูปที่ 4

การดำเนินการทดลองจะหันแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์ของชุดทดสอบทั้งสองไปทางทิศใต้และเอียงทำมุม 20° โดยประมาณกับแนวระนาบเพื่อรับแสงจากดวงอาทิตย์ได้ตลอดทั้งวัน ทำการส่งจ่ายสารทำงานภายในท่อลำเลียงโดยปรับค่าอัตราการไหลของสารทำงานภายในชุดทดสอบที่ 1 และ 2 เท่ากับ 1.0 U/min และ 1.5 U/min ตามลำดับ ทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ 1) อุณหภูมิสารทำงาน ณ ทางเข้าท่อรับรังสี ( $T_{in}$ ) 2) อุณหภูมิสารทำงาน ณ ทางออกท่อรับรังสี ( $T_{out}$ ) 3) อุณหภูมิน้ำร้อนภายในถังกักเก็บน้ำร้อน ( $T_{tank}$ ) 4) อุณหภูมิแวดล้อม ( $T_a$ ) และ 5) ค่าความเข้มแสงอาทิตย์



รูปที่ 4 การทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิคสำหรับระบบผลิตน้ำร้อน: 1) แผ่นสะท้อนรังสีแบบพาราโบลิค 2) ท่อรับรังสีอาทิตย์ 3) ระบบท่อลำเลียงสารทำงาน 4) ถังกักเก็บน้ำร้อน 5) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และ 6) ปั๊มน้ำ

4. ผลการวิจัย

การทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิคสำหรับระบบผลิตน้ำร้อนในงานวิจัยนี้ทำการทดลองผลิตน้ำร้อนในเดือนมกราคม ปี พ.ศ. 2561 ในช่วงเวลา 9.00 น. ถึง 16.00น. จากการดำเนินงานวิจัยพบว่าในช่วงเวลาที่ทำการทดลองมีค่าความเข้มแสงอาทิตย์สูงสุดและต่ำสุดเท่ากับ 793 W/m<sup>2</sup> และ 441 W/m<sup>2</sup> ตามลำดับ คิดเป็นค่าความเข้มแสงเฉลี่ยประมาณ 660 W/m<sup>2</sup> และอุณหภูมิแวดล้อมในช่วงเวลาที่ทำการทดลองมีค่าต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับ 26.3 °C และ 37.7 °C ตามลำดับ คิดเป็นค่าอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยประมาณ 33 °C เมื่อดำเนินการกระบวนการพบว่าอุณหภูมิของสารทำงานและอุณหภูมิของน้ำภายในถังกักเก็บน้ำร้อนจะเพิ่มขึ้นแบบแปรผันตามค่าความเข้มแสงอาทิตย์โดยอุณหภูมิทั้งสองจะมีค่าสูงสุดในช่วงเที่ยงวันและลดลงตามค่าความเข้มแสงอาทิตย์ในช่วงบ่าย การปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของสารทำงานส่งผลต่ออุณหภูมิของสารทำงาน ณ ทางออกของท่อรับรังสี กล่าวคือ เมื่ออัตราการไหลของสารทำงานมีค่าสูงจะทำให้อุณหภูมิดังกล่าวลดลง

ผลการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิคโดยใช้อัตราการไหลของสารทำงานเท่ากับ 1.0 lpm และ 1.5 lpm พบว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ต้นแบบสามารถสร้างอุณหภูมิของสารทำงาน ณ ทางออกของท่อรับรังสีได้สูงสุดเท่ากับ 56.6 °C และ 50.0 °C ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ และเมื่อ

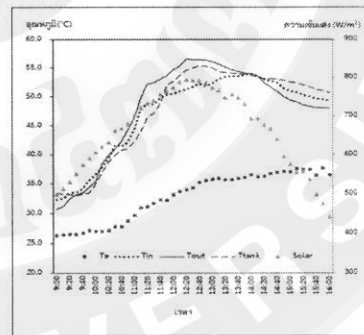
พิจารณาอุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้จากชุดทดสอบพบว่าชุดทดสอบที่ 1 (1.0 lpm) สามารถผลิตน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 55.4°C และ ชุดทดสอบที่ 2 (1.5 lpm) สามารถผลิตน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 49.3 °C ดังแสดงในรูปที่ 7

5. สรุปและวิเคราะห์ผลการวิจัย

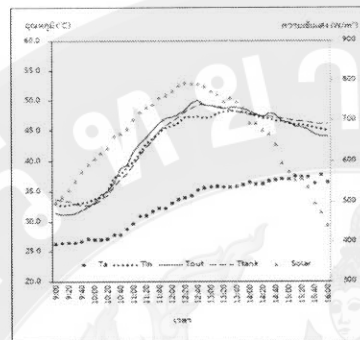
จากผลการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิคสำหรับระบบผลิตน้ำร้อนในงานวิจัยนี้พบว่าอุณหภูมิของสารทำงานและอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ผลิตได้จะแปรผันตามค่าความเข้มแสงอาทิตย์และแปรผกผันกับค่าอัตราการไหลของสารทำงาน กล่าวคือ เมื่อค่าความเข้มแสงอาทิตย์มีค่าสูงอุณหภูมิทั้งสองจะสูงด้วย และเมื่ออัตราการไหลของสารทำงานมีค่าสูงจะทำให้อุณหภูมิดังกล่าวลดลง เมื่อพิจารณาอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆ พบว่าชุดทดสอบสามารถสร้างอุณหภูมิของสารทำงาน ณ ทางออกของท่อรับรังสีได้สูงสุดเท่ากับ 56.6 °C ที่อัตราการไหลของสารทำงานเท่ากับ 1.0 lpm ซึ่งสูงกว่ากรณีใช้อัตราการไหลเท่ากับ 1.5 lpm ประมาณ 13 % และในทำนองเดียวกับพบว่าการใช้อัตราการไหลของสารทำงานเท่ากับ 1.0 lpm ชุดทดสอบสามารถผลิตน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 55.4°C ซึ่งสูงกว่ากรณีใช้อัตราการไหลเท่ากับ 1.5 lpm ประมาณ 15% จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าอัตราการไหลของสารทำงานส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้อย่างมีนัยยะสำคัญในทุกค่าความเข้มแสง

6. กิตติกรรมประกาศ

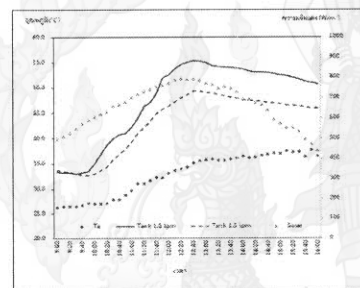
งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณอย่างยิ่งมา ณ โอกาสนี้



รูปที่ 5 อุณหภูมิของสารทำงาน ณ ทางเข้าและทางออกท่อรับรังสี กรณีอัตราการไหลของสารทำงานเท่ากับ 1 lpm



รูปที่ 6 อุณหภูมิของสารทำงาน ณ ทางเข้าและทางออกห้องรับรังสีกรณีอัตราการไหลของสารทำงานเท่ากับ 1.5 lpm

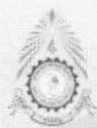


รูปที่ 7 การเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในถังเก็บน้ำร้อน

#### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] จงจิตร์ ทิพย์ลาภ (2520). *ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรวมรังสี*, กระบวนการพลังงานรังสีอาทิตย์ในรูปความร้อน, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ดวงกมล, หน้า 171-172.
- [2] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน (2559). *สถานการณ์พลังงานของประเทศไทย มกราคม - ธันวาคม ค.ศ. 2558*. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา [http://www.dede.go.th/download/state\\_59/frontpage/c2558.pdf](http://www.dede.go.th/download/state_59/frontpage/c2558.pdf). เข้าดูเมื่อวันที่ 02/03/2559.
- [3] esat\_pv/sun\_thailand.htm, เข้าดูเมื่อวันที่ 05/03/2559.
- [3] ทะนงศักดิ์ วิวัฒนา (2554). *รู้จักและการเลือกใช้เทคโนโลยีการผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์*, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.thailandindustry.com/view.php?id=19409>, เข้าดูเมื่อวันที่ 15/03/2559.
- [4] ประกอบ สุวัฒน์วารณ และ ชีรภัทร หลิมบุญเรือง (2554). *แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการออกแบบตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25, 19-21 ตุลาคม, จังหวัดกระบี่*.
- [5] จารุวัฒน์ เจริญจิต และ คมกฤษณ์ ศรีสุวรรณ (2013). *ทิศทางงานวิจัยด้านระบบความร้อนรังสีอาทิตย์ในภาคอุตสาหกรรมพลังงาน*, KKU Research Journal, ฉบับที่ 18, หน้า 83.

- [6] Cabrera F.J., Garcia A.F., R.M.P. Silva and Garcia M. P. (2013). *Use of parabolic trough solar collectors for solar refrigeration and air-conditioning applications*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 20, pp. 103-118.
- [7] Zhu G. and Lewandowski A. (2012). *A New Optical Evaluation Approach for Parabolic Trough Collectors: First-Principle OPTICAL Intercept Calculation*, *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 134 (4).
- [8] Mohamed S.M. and Taqiy E.B. (2013). *Parabolic trough solar thermal power plant: Potential, and projects development in Algeria*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, vol. 21, pp. 288-297.



**บทความฉบับเต็ม**

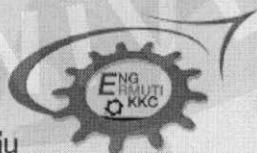
**การประชุมวิชาการ  
วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี  
และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 9**

The 9<sup>th</sup> Engineering Science Technology and Architecture Conference 2018

**9<sup>th</sup> ESTA  
CON 2018**

**เทคโนโลยีและนวัตกรรม เพื่ออุตสาหกรรมแห่งอนาคต  
Technology and Innovation for Future Industry**

**7 กันยายน 2561**



ณ อาคาร 50 ปี เทคนิค ไทย-เยอรมัน ขอนแก่น  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น



Design  
**วิศวกรรม**



<input type="checkbox"/>	ME206 การใช้ของไหลนาโนกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก	783
<input type="checkbox"/>	ME218 ผลกระทบของความดันต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ	787
<input type="checkbox"/>	ME227 การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะการระบายความร้อนระหว่างครีบบีมรูปตัววาย และครีบบีมทรงกระบอกในอุปกรณ์ระบายความร้อนแบบครีบบีมผสม	794
<input type="checkbox"/>	ME229 การศึกษาการสันสะเทือนของชุดจ่ายลมโบกี้	801
<input type="checkbox"/>	ME237 อิทธิพลของอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางครีบบีมกับความกว้างช่องทางการไหลต่อการระบายความร้อนของอุปกรณ์ระบายความร้อนแบบครีบบีมผสม	808
<input type="checkbox"/>	ME251 การทำการปลอมปนในผงมันซินแบบรวดเร็วด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรด	815
<input type="checkbox"/>	ME253 การตรวจสอบการปลอมปนน้ำมันถั่วเหลืองในน้ำมันมะพร้าวแบบรวดเร็ว ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรด	821
<input type="checkbox"/>	ME259 การตรวจสอบคุณภาพและการเจือปนในน้ำมันดิบแบบรวดเร็วด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรด	827
<input type="checkbox"/>	ME260 การศึกษาจลนศาสตร์การอบแห้งลำไยด้วยลมร้อนในอุโมงค์ลมแบบปิด	833
<input type="checkbox"/>	ME261 การพัฒนาอุโมงค์ลมสำหรับศึกษาลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง	839
<input type="checkbox"/>	ME262 การจำลองการถ่ายเทความร้อนและความดันสูญเสียภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น	844
<input type="checkbox"/>	ME268 ผลของปริมาณน้ำมันที่มีต่อค่าความร้อนสูง(HHV) ในเปลือกมะม่วงหิมพานต์ที่ผ่านกระบวนการทอดแช่แข็ง	851
<input type="checkbox"/>	ME274 การพัฒนาระบบอบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด	857
<input type="checkbox"/>	ME275 การศึกษาการไหลของน้ำที่ผ่านถังระบายความร้อนในกระบวนการดัดขึ้นรูปลวดแบบแห้งโดยใช้การจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ	864
<input type="checkbox"/>	ME280 การคัดแยกพันธุ์ข้าวแบบเมล็ดเดี่ยวอย่างรวดเร็วด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรด	872
<input type="checkbox"/>	ME286 การออกแบบ และพัฒนาเครื่อง Mini CNC 5 แกน	878
<input type="checkbox"/>	ME288 แนวทางการสร้างเกณฑ์การพิจารณาการคลุกเคล้าของอาหารผสมและฮอโรมันตันแบบ	884
<input type="checkbox"/>	ME289 อิทธิพลจำนวนช่องว่างต่อหนึ่งนิ้วของตาข่ายสแตนเลส (PPI) ที่มีผลต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งผสมกับอากาศก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ของหัวพันไฟวัสดุพูน	890
<input type="checkbox"/>	ME295 การคำนวณเชิงตัวเลขของงานกระแทกล้ออัลลอย	895
<input type="checkbox"/>	ME298 การศึกษาการลดอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าคอนเดนเซอร์โดยใช้แผงทำความเย็นในเครื่องปรับอากาศขนาดใหญ่	900
<input type="checkbox"/>	ME300 การออกแบบและสร้างเครื่องตีเส้นใยโพลีเอสเตอร์	905

## การใช้ของไหลนาโนกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก Use of Nano-Fluid with Parabolic Trough Solar Collector

ณัฐรา ลือชาติเมธิกุล<sup>1</sup> และ ปริญญ์ คงกระพันธุ์<sup>2</sup>

<sup>1</sup>วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ 63 หมู่ 4 ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

\*ผู้ติดต่อ: parin.khongkrapan@gmail.com

เบอร์โทรศัพท์ 053875590, เบอร์โทรสาร 053875599

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการใช้ของไหลนาโนเป็นสารทำงานให้กับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ประเภทรวมแสงแบบรางพาราโบลิกขนาดพื้นที่รับแสงโดยประมาณ 2 m<sup>2</sup> เพื่อประยุกต์ใช้กับระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยทำการทดสอบระบบที่ค่าความเข้มข้นรังสีอาทิตย์เฉลี่ยในช่วง 300 W/m<sup>2</sup> ถึง 900 W/m<sup>2</sup> และค่าความเข้มข้นของสารละลายนาโนกราฟีนที่ใช้เป็นสารทำงานเท่ากับ 0.1% w/w จากผลการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ด้วยสารทำงานดังกล่าวที่อัตราการไหลคงที่เท่ากับ 1 LPM พบว่าอุณหภูมิของสารทำงานนาโน ณ ทางออกของท่อรับรังสีมีค่าสูงสุดเท่ากับ 59.3 °C ซึ่งสูงกว่าการใช้ น้ำสะอาดเป็นสารทำงานเท่ากับ 4.77% ทำให้ระบบสามารถผลิตน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 58.1 °C ซึ่งมีค่าสูงกว่า การใช้ น้ำสะอาดเป็นสารทำงานเท่ากับ 6.80% จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าการใช้นาโนกราฟีนผสมใน สารทำงานช่วยเพิ่มอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ผลิตได้จากระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกได้อย่างมี นัยสำคัญในทุกค่าความเข้มข้นรังสีอาทิตย์

**คำหลัก:** ตัวเก็บรังสีอาทิตย์, รางพาราโบลิก, ระบบผลิตน้ำร้อน, อนุภาคนาโน, ของไหลนาโน

### Abstract

This research presented using nano-fluid as a working fluid of a parabolic trough solar collector with aperture size of 2 m<sup>2</sup>. The system was performed at average solar intensity of 400–900 W/m<sup>2</sup> with graphene-water solution concentration of 0.1%w/w. The results showed that the maximum temperature of nano-fluid at the exit of the solar collector with a constant flow rate of 1 LPM was 59.3 °C. The produced maximum temperature of using graphene-water solution was higher than using of pure water as the working fluid about 4.77%. The system using nano-fluid produced the highest temperature of hot water of 58.1 °C, higher than using the pure water about 6.80%. It was also summarized that using nano-fluid as the working fluid significantly increased water temperature produced from parabolic trough solar collector for all solar intensity levels.

**Keywords:** Solar collector, Parabolic trough solar collector, Hot water generation system, Nano particle, Nano-fluid

### 1. บทนำ

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ประเภทรวมแสงแบบราง พาราโบลิก (Parabolic Trough Solar Collector; PTSC) เป็นเทคโนโลยีการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็น พลังงานความร้อน โดยเทคโนโลยีนี้สามารถนำไป ประยุกต์ใช้ในการผลิตน้ำร้อน โดยตัวเก็บรังสีอาทิตย์มี

หน้าที่รวบรวมพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์เพื่อ ถ่ายเทให้กับสารทำงาน (Working Fluid) ที่ลำเลียงผ่าน ระบบท่อ เช่น น้ำ น้ำมัน เอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol) เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติของสารทำงานจะส่งผลต่อ ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์โดยตรง เนื่องจาก สารทำงานแต่ละชนิดมีจุดเดือด ความหนืด ค่าความจุ

ความร้อนจำเพาะ และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนแตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกใช้สารทำงานจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการออกแบบระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ [1-4]

งานวิจัยนี้จะนำเสนอการใช้สารละลายนาโนเป็นสารทำงานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ประเภทรวมแสงแบบรางพาราโบลิก ซึ่งสารดังกล่าวมีคุณสมบัติในการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity;  $k$ ) ให้กับสารทำงานไม่ว่าจะเป็นน้ำหรือน้ำมันอย่างมีนัยสำคัญ จึงทำให้สารละลายที่ได้รับการผสมจากอนุภาคนาโนมีคุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนดีขึ้น ส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ได้อีกด้วย

## 2. หลักการและทฤษฎี

### 2.1 อนุภาคนาโน (Nano particle)

อนุภาคนาโน คือ วัสดุที่มีขนาดเล็กมากในระดับ 1-100 nm วัสดุนาโนสามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และเกิดจากการกระทำของมนุษย์ วัสดุนาโนที่มีคุณสมบัติเหมาะสมเชิงวิศวกรรม ได้แก่ วัสดุนาโนที่มีธาตุคาร์บอนเป็นหลัก (Carbon based materials) และวัสดุนาโนที่เป็นสารกึ่งตัวนำและโลหะ (Semiconductor and metal nanomaterials) โดยวัสดุนาโนทั้ง 2 ชนิดนี้จะช่วยเพิ่มคุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนให้กับสารทำงานในระบบความร้อนและความเย็นได้ การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทำได้จากทั้งกระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางความร้อน อนุภาคนาโนที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์ของไหลนาโนได้แก่ อนุภาคโลหะ (Metallic particles), อนุภาคออกไซด์ (Oxide particle), ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube) และอนุภาคกราฟีน (Graphene)

กราฟีน (Graphene) เป็นอนุภาคนาโนมีองค์ประกอบหลัก คือ แกรไฟต์ (Graphite) ซึ่งเป็นธาตุคาร์บอนชนิดหนึ่ง กราฟีนเกิดจากการเรียงตัวของอะตอมแกรไฟต์ที่เป็นชั้น ๆ ซึ่งมีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบา เป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าที่ดี โดยในทางทฤษฎีนั้น กราฟีนมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface Area; SSA) ประมาณ  $2,630 \text{ m}^2/\text{g}$  ซึ่งมีค่าสูงกว่าท่อนาโนคาร์บอนที่มีขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะในช่วง 100-

$1,000 \text{ m}^2/\text{g}$  ถึง 2.6 เท่า และยังมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนในช่วง 1,500-2,500 W/mK ซึ่งมีค่าสูงกว่าทองแดงประมาณ 40 เท่า ทำให้อนุภาคนาโนมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงและมีคุณสมบัติของการเป็นตัวนำความร้อนที่ดี

### 2.2 ของไหลนาโน (Nano fluid)

ของไหลนาโน คือ สารละลายหรือของไหลที่เกิดจากการผสมอนุภาคนาโน (Nano particle) ชนิดต่าง ๆ กับของไหลฐาน (Base fluid) เช่น น้ำ น้ำมัน เอทิลีนไกลคอล เป็นต้น ด้วยวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนให้กับสารทำงาน ของไหลนาโนสามารถผลิตได้โดยการผสมอนุภาคนาโนดังกล่าวกับของไหลฐานในอัตราส่วนต่าง ๆ ภายในอ่างผสมอัลตราโซนิค (Ultrasonic bath) ในระยะเวลาที่กำหนด โดยค่าความหนาแน่น (Density) ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity) และค่าประสิทธิภาพการนำความร้อน (Effective thermal conductivity) ของของไหลนาโนที่ผลิตขึ้นสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (1) [5] (2) [6] และ (3) [6] ตามลำดับ

$$\rho_{nf} = \rho_{bf} \left\{ 1 + \left[ \frac{\rho_p(\rho_p - \rho_{bf})}{\rho_{bf}} \right] \right\} \quad (1)$$

$$(c_p)_{nf} = \frac{(c_p)_{bf} \left\{ 1 - \frac{\rho_p(c_p)_{bf} - (c_p)_p \rho_{bf}}{(c_p)_{bf} \rho_{bf}} \right\}}{\left\{ 1 + \left[ \frac{\rho_p(\rho_p - \rho_{bf})}{\rho_{bf}} \right] \right\}} \quad (2)$$

$$(k_{eff})_{nf} = k_{bf} \left\{ \frac{k_p + 2k_{bf} - [2\rho(k_{bf} - k_p)]}{k_p + 2k_{bf} + [\rho(k_{bf} - k_p)]} \right\} \quad (3)$$

เมื่อ

$\rho_{nf}$  คือ ความหนาแน่นของของไหลนาโน,  $\text{kg}/\text{m}^3$

$\rho_{bf}$  คือ ความหนาแน่นของของไหลฐาน,  $\text{kg}/\text{m}^3$

$\rho_p$  คือ ความหนาแน่นของอนุภาคนาโน,  $\text{kg}/\text{m}^3$

$(c_p)_{nf}$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะของของไหลนาโน,  $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$

$(c_p)_{bf}$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะของของไหลฐาน,  $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$

$(c_p)_p$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะของอนุภาคนาโน,  $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$

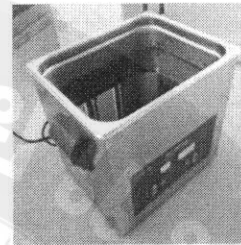
- $(k_{eff})_{nf}$  คือ ค่าประสิทธิภาพการนำความร้อนของ  
ของไหลนาโน, W/m.k
- $k_{bf}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของ  
ของไหลฐาน, W/m.k
- $k_p$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของ  
อนุภาคนาโน, W/m.k
- $\phi$  คือ อัตราส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคนาโน  
ต่อของไหลฐาน

### 3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบการใช้ของไหลนาโนเป็นสารทำงานในระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ประเภทรวมแสงแบบรางพาราโบลาที่มีขนาดพื้นที่รับแสงโดยประมาณ  $2 \text{ m}^2$  จำนวน 2 ชุด ดังรูปที่ 1 โดยชุดแรกใช้น้ำสะอาดเป็นสารทำงานและชุดที่สองใช้ของไหลนาโนเป็นสารทำงาน ทำการส่งจ่ายสารทำงานของระบบทั้งสองด้วยอัตราการไหลคงที่ 1 LPM เท่ากัน การเตรียมสารทำงานนาโนทำได้โดยการผสมอนุภาคนาโนกราฟีนกับน้ำสะอาดด้วยอัตราส่วนโดยมวลเท่ากับ 0.1% w/w ทำการเตรียมของไหลนาโนด้วยอย่างผสมอัลตราโซนิคดังรูปที่ 2 ที่ค่าความถี่คงที่ 43 kHz เป็นระยะเวลา 60 min แล้วทำการบรรจุสารทำงานนาโนในระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์และทำการเก็บข้อมูลต่าง ๆ ทำในช่วงเวลา 9.00 น. ถึง 16.00 น.



รูปที่ 1 ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ประเภทรวมแสงแบบรางพาราโบลา



รูปที่ 2 การเตรียมของไหลนาโนด้วยอย่างผสมแบบอัลตราโซนิค

### 4. ผลการวิจัย

จากผลการทดสอบระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ 2 ระบบ ในวัน เวลา สภาพแวดล้อม และค่าความเข้มข้นรังสีอาทิตย์เดียวกัน โดยระบบที่ 1 และ 2 ใช้น้ำสะอาด และของไหลนาโน (กราฟีนผสมน้ำสะอาด 0.1% w/w) เป็นสารทำงานที่อัตราการไหลคงที่ 1 LPM เท่ากัน ตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิของสารทำงาน ณ ทางออกของท่อรับรังสีของระบบที่ 1 และ 2 มีค่าสูงสุดเท่ากับ  $56.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$  และ  $59.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ และจากการทดลองยังพบว่าระบบทั้งสองสามารถผลิตน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ  $54.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$  และ  $58.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ ผลของอุณหภูมิของสารทำงานและอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ผลิตได้แสดงดังรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

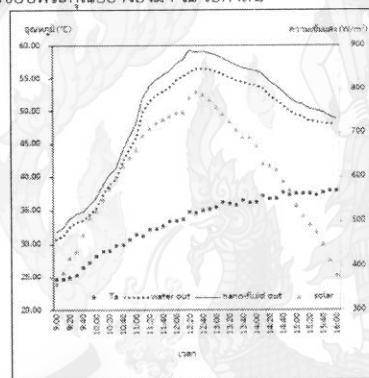
### 5. สรุปและวิเคราะห์ผลการวิจัย

จากการทดสอบระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ต้นแบบที่ใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลาด้วยสารทำงาน 2 ชนิด คือ น้ำสะอาด และของไหลนาโนชนิดกราฟีนผสมน้ำสะอาดที่ความเข้มข้นโดยมวลเท่ากับ 0.1% w/w โดยในช่วงเวลาทำการทดสอบมีอุณหภูมิแวดล้อมต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับ  $24.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$  และ  $37.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ ค่าความเข้มข้นรังสีอาทิตย์ต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับ  $360 \text{ W/m}^2$  และ  $794 \text{ W/m}^2$  ตามลำดับ พบว่าระบบที่ใช้ของไหลนาโนสามารถสร้างอุณหภูมิสารทำงาน ณ ทางออกของท่อรับรังสีได้สูงสุดเท่ากับ  $59.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งสูงกว่าการใช้น้ำสะอาดเป็นสารทำงานเท่ากับ 4.77% และระบบดังกล่าวสามารถผลิตน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ  $58.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งมีค่าสูงกว่าการใช้น้ำสะอาดเป็นสารทำงานเท่ากับ 6.80% จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าการใช้อนุภาคนาโนกราฟีนผสมในสาร

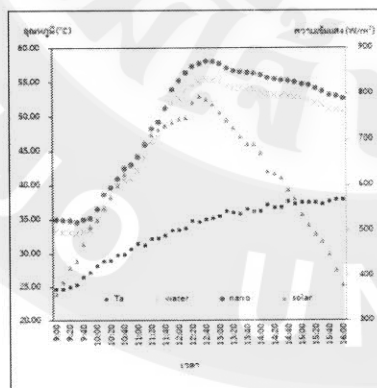
ทำงานช่วยเพิ่มอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ผลิตได้จากระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกได้อย่างมีนัยสำคัญในทุกค่าความเข้มข้นสีอาทิตย์

#### 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากวิทยาลัยพลังงานทดแทนมหาวิทยาลัยแม่โจ้ และการสนับสนุนเครื่องมือในการทำวิจัยจากสาขาวิชาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ โดย ดร.สุรศักดิ์ กุยมาลี คณะผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณอย่างยิ่งมา ณ โอกาสนี้



รูปที่ 3 อุณหภูมิของน้ำและของไหลนาโน ทางออกของท่อรับรังสี



รูปที่ 4 อุณหภูมิของน้ำร้อนที่ผลิตได้จากระบบที่ใช้น้ำ และของไหลนาโนเป็นสารทำงาน

#### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Cabrera F.J., Garcia A.F., R.M.P. Silva and Garcia M. P. (2013). *Use of parabolic trough solar collectors for solar refrigeration and air-conditioning applications*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 20, pp. 103-118.
- [2] Zhu G. and Lewandowski A. (2012). *A New Optical Evaluation Approach for Parabolic Trough Collectors: First-Principle OPTICAL Intercept Calculation*, Journal of Solar Energy Engineering, vol. 134 (4).
- [3] Mohamed S.M. and Taqiy E.B. (2013), *Parabolic trough solar thermal power plant: Potential, and projects development in Algeria*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, vol. 21, pp. 288-297.
- [4] Yu W. and Xie H. (2011). *A Review on Nanofluids: Preparation, Stability Mechanisms, and Applications*. *Journal of Nanomaterials*, Vol.
- [5] Choi P. (2007). *Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluid with Submicron Metallic Oxide Particles*. *A Journal of Thermal Energy Generation, Transport, Storage, and Conversion*, pp. 151-170.
- [6] Xuana Y. and Roetzel W. (2000). *Conceptions for heat transfer correlation of Nanofluids*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 3701-3707.





ภาคผนวก ง

ประวัติผู้วิจัย

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-นามสกุล นางสาวณัฐชา ลือชาติเมธิกุล  
เกิดเมื่อ 18 กรกฎาคม 2534  
ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2557 ปริญญาตรี คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ  
พ.ศ. 2552 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนพระหฤทัยคอนแวนต์ กรุงเทพฯ  
อีเมล nattha.lue@gmail.com

