

การศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ  
โดยใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน



ภาณุวัฒน์ ทิมอยู่

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน  
มหาวิทยาลัยแม่โจ้  
พ.ศ. 2562

การศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ  
โดยใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ  
โดยใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน

ภาณุวัฒน์ ทิมอยู่

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารุช พลวงษ์ศรี)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ ดร.สุรศักดิ์ กุยมาลี)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑาภรณ์ ชนะถาวร)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ ไชยชนะ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ เม่งอำพัน)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

ชื่อเรื่อง	การศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ โดยใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน
ชื่อผู้เขียน	นายภานุวัฒน์ ทิมอยู่
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารุช พลวงษ์ศรี

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบและระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนและน้ำเป็นสารทำงาน โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 5 ส่วน ประกอบด้วย การศึกษาสมบัติของของไหลกราฟีนนาโน ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อทองแดงที่มีการให้ความร้อนต่อพื้นที่ผิวท่อสม่ำเสมอ สมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ สมรรถนะทางความร้อนของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ และความเสถียรของของไหลกราฟีนนาโนภายในระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

ในการศึกษาใช้อนุภาคกราฟีนนาโนแบบแผ่นขนาด  $2 \mu\text{m} \times 2 \text{nm}$  ผสมกับน้ำปราศจากไอออนที่ความเข้มข้น 0wt% 0.050wt% 0.075wt% และ 0.100wt% ที่อุณหภูมิสารทำงานตั้งแต่  $20-80 \text{ }^{\circ}\text{C}$  จากคำนำหนาสมบัติของของไหลกราฟีนนาโน พบว่า กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนจะมีค่าความหนาแน่น ค่าความหนืด และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงกว่ากรณีที่ใช้ น้ำ ส่วนค่าความจุความร้อนจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้ น้ำ ในส่วนของศึกษาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อทองแดงจะใช้ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 8 mm ยาว 1 m และใช้ขดลวดไฟฟ้าขนาด 80 W ให้ความร้อนต่อพื้นที่อย่างสม่ำเสมอ ทำการปรับอุณหภูมิของของไหลกราฟีนนาโนที่ความเข้มข้นต่างๆ และน้ำบริเวณทางเข้าท่อทองแดงให้มีค่า  $35 \text{ }^{\circ}\text{C}$   $45 \text{ }^{\circ}\text{C}$   $55 \text{ }^{\circ}\text{C}$  และ  $65 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ที่อัตราการไหล  $120 \text{ cm}^3/\text{min}$   $170 \text{ cm}^3/\text{min}$  และ  $220 \text{ cm}^3/\text{min}$  จากการศึกษาพบว่า อุณหภูมิในถังพักสารทำงานมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อทองแดงเล็กน้อย อัตราการไหลสารทำงานเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อมีค่าเพิ่มขึ้นตาม โดยค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้น้ำเป็นสารทำงานที่มีค่าเท่ากับ  $699.25 \text{ W/m}^2\text{K}$  หรือเพิ่มขึ้น 15.67% ที่อัตราการไหล  $220 \text{ cm}^3/\text{min}$  และความเข้มข้นกราฟีนนาโน 0.100wt% จากการศึกษาสามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

## ร้อนภายในท่อได้

สำหรับการทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบตามมาตรฐานการทดสอบ ASHRAE Standard 93-2003 เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบกรณีที่ใช้ของไหลนาโนที่ความเข้มข้น 0.100wt% เป็นสารทำงานเปรียบเทียบกับการใช้การใช้น้ำ ทำการทดสอบที่อัตราการไหล 220 cm<sup>3</sup>/min ผลการทดสอบพบว่า การใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงานสามารถเพิ่มสมรรถนะของตัวเก็บรังสีชนิดแผ่นเรียบได้และมีค่า  $F_R(\tau\alpha)_e$  และ  $F_{RUL}$  จากการทดสอบเท่ากับ 0.7790 และ 7.084 W/m<sup>2</sup>·K ตามลำดับ ในขณะที่กรณีใช้น้ำเป็นสารทำงานมีค่า  $F_R(\tau\alpha)_e$  และค่า  $F_{RUL}$  เท่ากับ 0.6885 และ 7.1098 W/m<sup>2</sup>·K ส่วนของการทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ จะใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบต่อเข้ากับถังเก็บน้ำร้อนขนาด 12 ลิตร เก็บข้อมูลตลอดทั้งวันจากการศึกษา พบว่าในวันท้องฟ้าแจ่มใสกรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงานจะให้ประสิทธิภาพระบบ 62.54% สูงกว่ากรณีใช้น้ำเป็นสารทำงานที่มีประสิทธิภาพระบบเท่ากับ 45.04% หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 38.85%

เมื่อพิจารณาความเสถียรและการตกตะกอนของของไหลกราฟีนนาโนพบว่า จะมีการตกตะกอนหลังการทำงานของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ใน 40 นาที โดยสามารถสังเกตได้จากความใสของของไหลกราฟีนนาโน และประสิทธิภาพระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จะมีค่าลดลงจนมีค่าใกล้เคียงกับกรณีใช้น้ำเป็นสารทำงาน

คำสำคัญ : ของไหลกราฟีนนาโน, สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ, ระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์, ความเสถียร

<b>Title</b>	THERMAL PERFORMANCE STUDY OF FLAT-PLATE SOLAR COLLECTOR USING GRAPHENE NANO-FLUID AS WORKING FLUID
<b>Author</b>	Mr. Panuwat Timoiu
<b>Degree</b>	Master of Engineering in Renewable Energy Engineering
<b>Advisory Committee Chairperson</b>	Assistant Professor Dr. Sarawut Polvongsri

### ABSTRACT

The objective of this research was to investigate the thermal performance of flat plate solar collector and the solar hot water system using graphene nano-fluid and water as a working fluid. The study was divided into five parts: the properties study of graphene nano-fluid; the convective heat transfer coefficients in copper tube in the case of uniform heat flux; the performance study of flat plate solar collector; the performance study of solar hot water system; and the stability study of graphene nano-fluid inside the solar water heating systems.

In the experiment, the plate configuration of graphene nano-fluid was 2  $\mu\text{m} \times 2 \text{ nm}$  mixed the deionized water at concentration 0wt% 0.050wt% 0.075wt% and 0.100wt% at the working temperature of 20-80 °C. According to the computation, it was found that in the case of using graphene nano-fluid as a working fluid obtained the density, the viscosity, and the thermal conductivity was higher than using water as a working fluid while the specific heat was slightly decreased. For the convective heat transfer coefficients study, the diameter of copper tube was 8 mm, 1 m of length, and used 80 W of electric heater supplied heat to copper tube. The working temperatures of using graphene nano-fluid and water were adjusted at 35 °C 45 °C 55 °C and 65 °C at flow rate 120  $\text{cm}^3/\text{min}$  170  $\text{cm}^3/\text{min}$  and 220  $\text{cm}^3/\text{min}$ . The results showed that the temperature in the working fluid tank slightly affected on the convective heat transfer coefficient inside the copper tube. When the flow rate increased, the convective heat transfer coefficient was also increased. The



highest convective heat transfer coefficient when compared to the case of water as a working fluid was  $699.25 \text{ W/m}^2\text{K}$  which increased about 15.67% at the flow rate of  $220 \text{ cm}^3/\text{min}$  and concentration of 0.100wt%. The relationship equation was investigated for finding the convection coefficient inside the copper tube.

For the performance testing of flat plate solar collector, it was followed the ASHRAE Standard 93-2003 in the case of using nano-fluid at the concentration of 0.100wt% as a working fluid comparing to using only water. The flow rate testing was  $220 \text{ cm}^3/\text{min}$ . The results showed that using graphene nanofluid could increase the performance of the collector and  $F_R(\tau\alpha)_e$  and  $F_RU_L$  from testing were equal to 0.7790 and  $7.084 \text{ W/m}^2$ , respectively. Meanwhile, the using water as a working fluid provided 0.6885 of  $F_R(\tau\alpha)_e$  and  $7.1098 \text{ W/m}^2$  of  $F_RU_L$ . For the solar water heating systems performance testing, the flat plate solar collector was attached the 12 liter of hot water storage tank. In the clear sky day, the case of using graphene nano-fluid got the system efficiency of 62.54% or made a percentage up to 38.85%.

When considering the stability and sedimentation of graphene nano-fluid, the sedimentation occurred in 40 minutes after operation system that observed from the clarity of graphene nan-ofluid and the efficiency of the solar water heating system would be reduced to similar to using water as a working fluid.

Keywords : graphene nano-fluid, convective heat transfer coefficients, flat plate solar collector, solar water heating system, stability

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องการศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบโดยใช้ของไหล กราฟีนนาโนเป็นสารทำงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์จากหลายฝ่าย ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ ที่ให้ความกรุณาเสียสละเวลาอันมีค่า สำหรับการมาเป็นประธานกรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์และให้คำปรึกษาคำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ชิ้นนี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรารุช พลวงษ์ศรี ที่ได้รับเป็นประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆ ตลอดจนให้ความดูแลเอาใจใส่จนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จเสร็จสมบูรณ์ลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.สุรศักดิ์ กุยมาลี และอาจารย์ ดร.จุฑาภรณ์ ชนะถาวร ที่ให้เกียรติเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ซึ่งให้ความกรุณาสำหรับคำแนะนำ การให้ความรู้ คำปรึกษา ในส่วนของปัญหาต่างๆ ของงานวิจัยเพื่อให้เกิดความสำเร็จ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้ประสบผลสำเร็จ

ขอกราบขอบพระคุณคณะอาจารย์ และทุกท่านที่คอยให้คำปรึกษา อบรมสั่งสอน คอยแนะนำผู้วิจัย จนกระทั่งผู้วิจัยมีความสำเร็จในวันนี้

ขอขอบพระคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ในการให้ความสนับสนุนเครื่องมือ อุปกรณ์ในการทดลอง สถานที่สำหรับทำวิจัย รวมทั้งทุนสนับสนุนจาก “โครงการผลิตและพัฒนาศัภภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา” ประจำปีการศึกษา 2559

ขอขอบพระคุณ ทุนอุดหนุนการวิจัยแก่นักศึกษาระดับอุดมศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2560 กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน (สนพ.)

ท้ายที่สุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ นายทองใบ ทิมอยู่ นางกาวิล ทิมอยู่ และป้าสมจิตร ทิมอยู่ ที่คอยอบรมเลี้ยงดู ให้กำลังใจ สนับสนุนทุกด้านเป็นอย่างดีสำหรับการต่อสู้กับอุปสรรคต่างๆ ที่มีอยู่เสมอมาตลอดการทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งครอบครัวและเพื่อนๆ ที่คอยช่วยเหลือสนับสนุน พร้อมทั้งคำแนะนำ และเป็นกำลังใจจนทำให้สำเร็จการศึกษาไปได้ด้วยดี

ภาณุวัฒน์ ทิมอยู่



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	๗
สารบัญตาราง.....	๗
สัญลักษณ์และตัวห้อย.....	ฅ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญ.....	1
วัตถุประสงค์.....	3
ขอบเขตงานวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
รังสีอาทิตย์บนพื้นโลก.....	5
1. รังสีตรง.....	5
2. รังสีกระจาย.....	5
3. รังสีรวม.....	5
ปริมาณรังสีอาทิตย์ในประเทศไทย.....	6
ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat-plate solar collectors).....	7
สมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Performances of Solar collector).....	9
ระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar water heating system).....	12

การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ .....	16
ของไหลนาโน (Nanofluids) และกราฟีน (Graphene).....	17
1.การสังเคราะห์กราฟีน.....	19
2.สมบัติทางความร้อน (Thermal properties) .....	19
3.การหาสมบัติต่างๆของกราฟีนนาโน.....	20
การวิเคราะห์ความไม่แน่นอน (Uncertainty analysis) .....	22
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	23
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ .....	32
วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือ .....	32
สารเคมี ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 6 .....	32
อุปกรณ์ ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 7 .....	33
เครื่องมือวัด ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 8.....	34
วิธีการทดลอง .....	35
1.การเตรียมสารทำงาน.....	36
2.การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อทองแดงของของไหลกราฟีนนาโน และน้ำ .....	39
3.การทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐานทดสอบ ASHRAE Standard 93- 2003.....	42
4.การทดสอบสมรรถนะระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ .....	46
5.การศึกษาความเสถียรของของไหลกราฟีนนาโน .....	48
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	48
1.สมบัติของกราฟีนนาโน .....	48
ค่าความหนาแน่น และค่าความหนืด .....	48
ค่าความจุความร้อนจำเพาะ .....	50

ค่าการนำความร้อน.....	51
2.คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อทองแดงที่ให้ความร้อนสม่ำเสมอ ใช้สารทำงานเป็นของไหลกราฟีนาโนและน้ำ.....	52
ความร้อนที่ของไหลกราฟีนาโนได้รับที่อุณหภูมิเริ่มต้นแตกต่างกัน.....	52
ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากการทดลองเปรียบเทียบกับสมการ.....	55
ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน.....	58
ความสัมพันธ์ของเลขเรย์โนลด์ส์กับสัมประสิทธิ์การพาความร้อน.....	60
ความสัมพันธ์ของเลขเรย์โนลด์ส์กับเลขนัสเซิลท์ (Nusselt number).....	63
ค่าความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์ (Nusselt number) ที่ได้จากการทดลองและสมการ.....	65
การวิเคราะห์ความไม่แน่นอน (Uncertainty Analysis).....	67
3.สมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ.....	68
4.สมรรถนะทางความร้อนของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์.....	71
5.วิเคราะห์ความเสถียรและการตกตะกอนของของไหลกราฟีนาโน.....	80
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	81
บรรณานุกรม.....	87
ภาคผนวก.....	90
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณ.....	91
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดสอบ.....	102
ภาคผนวก ค ผลงาน และการเผยแพร่งานวิจัย.....	217
ประวัติผู้วิจัย.....	245

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับประเทศไทย จัดทำในปีพ.ศ. 2542.....	7
ภาพที่ 2 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (กระทรวงพลังงาน, 2554).....	8
ภาพที่ 3 สมดุลพลังงานที่ตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (ทงนเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, 2537)10	
ภาพที่ 4 เส้นแสดงสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (ทงนเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, 2537).....	11
ภาพที่ 5 ระบบทำน้ำร้อนแบบชนิดไหลเวียนแบบธรรมชาติ .....	13
ภาพที่ 6 ระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดไหลเวียนแบบบังคับ .....	13
ภาพที่ 7 สมดุลพลังงานในถังเก็บสะสมน้ำร้อนในระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ .....	14
ภาพที่ 8 ตัวอย่างของไหลนาโนที่ความเข้มข้นต่างกัน (NANO-FLUIDS) (OPENI, 2560).....	18
ภาพที่ 9 รูปแผ่นกราฟีนขนาดใหญ่จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (วิศณุสรณ์ ชาติ อารยะวดี, 2555).....	18
ภาพที่ 10 ไดอะแกรมแสดงรูปแบบการสังเคราะห์กราฟีน (วิศณุสรณ์ ชาติอารยะวดี, 2555) .....	19
ภาพที่ 11 ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์สำหรับ MWCNT NANOFUID และน้ำที่มีอัตราการ ไหลเชิงมวล 0.05 kg/s.....	24
ภาพที่ 12 ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์สำหรับ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O NANOFUID และน้ำที่มีอัตราการ ไหลเชิงมวล 3 L/MIN.....	25
ภาพที่ 13 ไดอะแกรมระบบที่ใช้ในการทดสอบ (SENTHILRAJA AND VIJAYAKUMAR, 2013) ....	26
ภาพที่ 14 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโน CUO/WATER (SENTHILRAJA AND VIJAYAKUMAR, 2013).....	26
ภาพที่ 15 แสดงสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในแต่ละความเข้มข้น.....	27
ภาพที่ 16 ประสิทธิภาพของตัวเก็บพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ใช้ของไหล CUO NANOFUID เป็นสารทำงานที่อัตราการไหลของมวลต่างๆ (MOGHADAM ET AL., 2014)....	28
ภาพที่ 17 ประสิทธิภาพของตัวเก็บพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานที่อัตรา การไหลของมวลต่างๆ (MOGHADAM ET AL., 2014) .....	28
ภาพที่ 18 ชุดทดสอบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของ SILVER NANOFUID (LAZARUS ET AL., 2015).....	29
ภาพที่ 19 ลักษณะการทำงานของระบบ.....	30

ภาพที่ 20	ผลของ $Al_2O_3$ ที่ความเข้มข้น 0.1% - 0.4% ต่อเลขนัสเซลท์เปรียบเทียบกับน้ำ .....	31
ภาพที่ 21	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....	36
ภาพที่ 22	ลักษณะของอนุภาคกราฟีนนาโนจากเทคนิค TEM (เกษมณี คำอ่อง, 2561).....	37
ภาพที่ 23	ลักษณะของชุดทดสอบและจุดเก็บข้อมูลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ภายในท่อทองแดง .....	40
ภาพที่ 24	ลักษณะการถ่ายเทความร้อนจากผนังด้านในท่อสู่สารทำงานในระบบ .....	41
ภาพที่ 25	ขั้นตอนทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อทองแดงของของไหล .....	42
ภาพที่ 26	ลักษณะการทำงานของระบบที่ใช้ทดสอบตามมาตรฐานและจุดเก็บข้อมูล .....	44
ภาพที่ 27	ขั้นตอนการทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐานทดสอบ ASHRAE STANDARD 93-2003 .....	45
ภาพที่ 28	ลักษณะการทดสอบสมรรถนะระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ .....	46
ภาพที่ 29	ขั้นตอนการทดสอบสมรรถนะระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ .....	47
ภาพที่ 30	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความหนาแน่น .....	50
ภาพที่ 31	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความหนืด .....	50
ภาพที่ 32	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าความจุความร้อน .....	51
ภาพที่ 33	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าการนำความร้อน.....	52
ภาพที่ 34	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและความร้อนที่สารทำงานได้รับ .....	55
ภาพที่ 35	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของสาร ทำงานจากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากสมการ .....	57
ภาพที่ 36	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของสาร ทำงาน.....	60
ภาพที่ 37	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์กับสัมประสิทธิ์การพาความร้อน .....	62
ภาพที่ 38	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์กับเลขนัสเซลท์ .....	65
ภาพที่ 39	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลท์ (NUSSELT NUMBER) ที่ได้จากการทดลองและ จากสมการ .....	66
ภาพที่ 40	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของเลขนัสเซลท์ (NUSSELT NUMBER) ของของไหล กราฟีนนาโนต่อเลขนัสเซลท์ (NUSSELT NUMBER) ของน้ำ ที่ได้จากการทดลองและจากสมการ .....	67



ภาพที่ 41	ผลต่างอุณหภูมิสารทำงานเข้าและออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ .....	68
ภาพที่ 42	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเข้าตัวรับรังสีอาทิตย์กับผลต่างอุณหภูมิเข้าและออกตัวรับรังสีอาทิตย์.....	69
ภาพที่ 43	ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนที่สามารถผลิตได้กับอุณหภูมิเข้าตัวรับรังสีอาทิตย์.....	70
ภาพที่ 44	สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ กรณีใช้น้ำ และของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ....	71
ภาพที่ 45	ลักษณะการแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหลกราฟีนนาโนกับน้ำในถังเก็บน้ำร้อน .....	72
ภาพที่ 46	ค่า UA จากกรณีใช้น้ำและกรณีใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน .....	72
ภาพที่ 47	อุณหภูมิเข้าและออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม และความเข้มรังสีอาทิตย์ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส.....	74
ภาพที่ 48	อุณหภูมิเข้าและออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม และความเข้มรังสีอาทิตย์ในวันที่ท้องฟ้ามีเมฆมาก .....	75
ภาพที่ 49	ความร้อนที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ผลิตได้ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม และความเข้มรังสีอาทิตย์ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส.....	76
ภาพที่ 50	ความร้อนที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ผลิตได้ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม และความเข้มรังสีอาทิตย์ในวันที่ท้องฟ้ามีเมฆมาก .....	76
ภาพที่ 51	อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน และค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ กรณีวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส .....	77
ภาพที่ 52	อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน และค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ กรณีวันที่ท้องฟ้ามีเมฆมาก.....	78
ภาพที่ 53	ค่าความร้อนที่สะสมในถังเก็บน้ำร้อน.....	79
ภาพที่ 54	ประสิทธิภาพระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ .....	79
ภาพที่ 55	พลังงานความร้อนที่ได้ต่อเดือน.....	80
ภาพที่ 56	ลักษณะของไหลกราฟีนนาโนหลังจากทำการผสม .....	81
ภาพที่ 57	ลักษณะของไหลกราฟีนนาโนขณะเป็นสารทำงานในระบบ.....	82
ภาพที่ 58	ความร้อนที่ผลิตได้ในหนึ่งวัน.....	83



## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1	เงื่อนไขในการทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐาน ASHRAE STANDARD 93-2003 (ทงงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, 2537).....	12
ตารางที่ 2	ค่าการนำความร้อนของวัสดุต่างๆ (วิศณุสรรค์ชาติอารยะวัต, 2555).....	19
ตารางที่ 3	ผลการทดสอบค่า $F_R(\tau\alpha)_e$ และ $F_{R,U_L}$ ที่อัตราการไหลเชิงมวล 3 L/MIN.....	25
ตารางที่ 4	ผลการทดสอบค่า $F_R(\tau\alpha)_e$ และ $F_{R,U_L}$ (LAZARUS ET AL., 2015).....	29
ตารางที่ 5	สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
ตารางที่ 6	รายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	32
ตารางที่ 7	รายละเอียดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	33
ตารางที่ 8	รายละเอียดเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง.....	34
ตารางที่ 9	สมบัติทั่วไปของอนุภาคกราฟีนนาโนและน้ำ (GHOZATLOO ET AL., 2014).....	37
ตารางที่ 10	สมบัติทั่วไปของสารทำงานที่อุณหภูมิ 30 °C.....	39
ตารางที่ 11	สมบัติค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัด.....	68
ตารางที่ 12	สมบัติค่าความไม่แน่นอนของการทดลอง (UNCERTAINTY ANALYSIS).....	68

## สัญลักษณ์และตัวห้อย

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$Q_{coll}$	ความร้อนที่ได้รับจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์	W
$A_c$	พื้นที่ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์	$m^2$
$U_L$	สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวมของตัวเก็บรังสีอาทิตย์	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
$I_T$	ค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกลงบนระนาบตัวเก็บรังสีอาทิตย์	$W/m^2$
$T_p$	อุณหภูมิเฉลี่ยของผิวดูดกลืนรังสีอาทิตย์	$^\circ C$
$T_a$	อุณหภูมิอากาศแวดล้อม	$^\circ C$
$(\tau\alpha)_e$	ผลคูณประสิทธิภาพของค่าส่งผ่านและค่าดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์	-
$F'$	แฟกเตอร์ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสี	-
$T$	อุณหภูมิ	$^\circ C$
$\eta$	ประสิทธิภาพการนำสาร HFC มาใช้ใหม่	%
$F_R$	Heat removal factor	-
$\dot{m}$	อัตราการไหลเชิงมวล	kg/s
$C_p$	ความจุความร้อนจำเพาะของสารทำงาน	$kJ/kg^\circ C$
$Q_{storage}$	อัตราความร้อนสะสมที่ถังเก็บสะสมน้ำร้อน	W
$Q_{load}$	อัตราความร้อนที่ดึงออกจากถังเก็บสะสมน้ำร้อน	W
$Q_{loss}$	อัตราความร้อนสูญเสียออกจากถังน้ำร้อน	W
$T_s$	อุณหภูมิของน้ำที่ถังเก็บสะสมน้ำร้อน	$^\circ C$
$T_s^{t+\Delta t}$	อุณหภูมิของน้ำที่ถังเก็บสะสมน้ำร้อนที่เวลาเปลี่ยนไป	$^\circ C$
$(MC_p)_s$	ผลคูณของมวลและความจุความร้อนจำเพาะ	$J/^\circ C$
$\Delta t$	ผลต่างช่วงระยะเวลา	s
$\eta_{system}$	ประสิทธิภาพของระบบ	%
$k_{wf}$	สภาพการนำความร้อนของของไหล	$W/m \cdot K$
$D_{tube}$	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ	m
$h$	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน	$W/m^2 \cdot K$
$Nu$	เลขนัสเซลท์ (Nusselt number)	-

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$T_{\text{surface}}$	อุณหภูมิผนังด้านในของท่อ	$^{\circ}\text{C}$
$T_{\text{wf}}$	อุณหภูมิของไหลเฉลี่ยก่อนและหลังเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์	$^{\circ}\text{C}$
$q''$	ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นจริง	$^{\circ}\text{C}$
$k_{\text{nf}}$	การนำความร้อนของของไหลนาโน	$\text{W/m}\cdot\text{K}$
$k_f$	การนำความร้อนของของไหลฐาน	$\text{W/m}\cdot\text{K}$
$k_p$	การนำความร้อนของอนุภาคนาโน	$\text{W/m}\cdot\text{K}$
$n$	ตัวประกอบรูปร่าง	-
$\Phi$	ค่าความเป็นทรงกลมของอนุภาค	-
$\alpha$	ส่วนปริมาตร (Volume Fraction) ของอนุภาคนาโน	-
$m$	จำนวนของอนุภาคต่อปริมาตร	-
$d_p$	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค	$\text{m}$
$\rho_{\text{nf}}$	ความหนาแน่นของของไหลนาโน	$\text{kg/m}^3$
$\rho_p$	ความหนาแน่นของอนุภาคนาโน	$\text{kg/m}^3$
$\rho_w$	ความหนาแน่นของของไหลฐาน	$\text{kg/m}^3$
$C_{p_{\text{nf}}}$	ความร้อนจำเพาะของของไหลนาโน	$\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$
$C_{p_p}$	ความร้อนจำเพาะของอนุภาคนาโน	$\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$
$C_{p_w}$	ความร้อนจำเพาะของของไหลฐาน	$\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$
$\mu_{\text{nf}}$	ความหนืดของของไหลนาโน	$\text{kg/m}\cdot\text{K}$
$\mu_w$	ความหนืดของของฐาน	$\text{kg/m}\cdot\text{K}$
$\omega_R$	uncertainty	

ตัวห้อย	ความหมาย	ตัวห้อย	ความหมาย
a	อากาศ	nf	ของไหลนาโน
p	ผิวดูดกลืนรังสีตัวเก็บรังสีอาทิตย์	f	ของไหลฐาน
c	ตัวเก็บรังสีอาทิตย์	wf	สารทำงาน
fi	สารทำงานเข้า	p	อนุภาคนาโน
fo	สารทำงานออก	w	น้ำปราศจากไอออน
G	ของไหลกราฟีนนาโน		

## บทที่ 1

### บทนำ

#### ที่มาและความสำคัญ

ประเทศไทยมีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีและอุตสาหกรรม ทำให้ประเทศไทยต้องนำเข้าเชื้อเพลิงด้านพลังงาน เช่น น้ำมัน ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ เป็นจำนวนมาก และราคาสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงได้มีความพยายามพัฒนาเทคโนโลยี และเลือกหาพลังงานจากแหล่งอื่นมาทดแทน พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนรูปแบบหนึ่งที่มีความสนใจมาโดยตลอด เนื่องจากมีปริมาณมหาศาลและมีอยู่อย่างไม่จำกัด อีกทั้งยังไม่ก่อให้เกิดปัญหาทางด้านมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อเทียบกับการใช้พลังงานจากฟอสซิล โดยได้มีการศึกษาและพัฒนาการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทน และนำมาใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่างๆ เช่น ระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ การทำอากาศร้อนเพื่อใช้ในการอบแห้งและกระบวนการกลั่น เป็นต้น ซึ่งปัจจุบันในบ้านพักอาศัย โรงแรมหรือโรงงานอุตสาหกรรม สถานพยาบาลมีความจำเป็นที่จะต้องใช้น้ำร้อนเพื่อทำกิจกรรมต่างๆ โดยนิยมติดตั้งระบบทำน้ำร้อนที่ใช้พลังงานจากไฟฟ้า หรือระบบทำน้ำร้อนจากหม้อต้มน้ำหรือหม้อไอน้ำซึ่งใช้น้ำมันหรือก๊าซเป็นแหล่งเชื้อเพลิงในการเพิ่มอุณหภูมิน้ำให้สูงขึ้น แต่เนื่องจากต้นทุนราคาพลังงานไฟฟ้าที่สูงขึ้นและยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นทางเลือกที่ดีในการแก้ปัญหาดังกล่าว และจากแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย (พ.ศ. 2542) โดยกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงานและคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร พบว่าการกระจายของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ตามบริเวณต่างๆ ในแต่ละเดือนของประเทศ ได้รับอิทธิพลสำคัญจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ และลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดระหว่างเดือนเมษายน และพฤษภาคม โดยมีค่าอยู่ในช่วง 20 ถึง 23 MJ/m<sup>2</sup>-day (กระทรวงพลังงาน, 2561) แสดงให้เห็นว่าประเทศไทยมีศักยภาพด้านพลังงานแสงอาทิตย์ จึงเหมาะที่จะนำพลังงานแสงอาทิตย์มาแปลงเป็นพลังงานความร้อน เพื่อที่จะลดการใช้พลังงานไฟฟ้า และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ปัจจุบันระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ถังเก็บน้ำร้อน และปั๊มน้ำ ซึ่งการผลิตน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์สามารถแบ่งออกได้ 2 ระบบ คือระบบ Active และระบบ Passive ซึ่งระบบ Active จะแตกต่างจาก Passive ที่มีการใช้ปั๊มในการไหลเวียนสารทำงานในระบบผ่านแผงรับรังสีอาทิตย์เพื่อถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำ ซึ่งเรียกว่า

ระบบไหลเวียนแบบบังคับ โดยตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบชนิดการไหลเวียนแบบบังคับมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง เป็นการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในรูปความร้อนโดยใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์เป็นตัวแปลงและเก็บพลังงานความร้อนแล้วถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำ ทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูง การใช้การผลิตน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์นิยมแพร่หลายมากขึ้นทั่วโลก ประเทศไทยมีการใช้เครื่องผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มากขึ้น โดยทั่วไประบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบชนิดไหลเวียนแบบบังคับ มีประสิทธิภาพประมาณ 40-60% ที่อัตราการไหลต่อพื้นที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์  $0.02 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$  ตามค่ามาตรฐาน (ASHRAE Standard 93-2003, 2003) (keopunya, 2559) แต่เนื่องจากประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบยังมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับชนิดสุญญากาศแต่มีข้อดีในเรื่องราคาที่ถูก จึงเกิดงานวิจัยต่างๆที่จะพยายามแก้ไขข้อบกพร่องของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบให้มีค่าสูงขึ้น เช่น การปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของสารทำงานให้เหมาะสมกับความเข้มรังสีอาทิตย์ การพัฒนาการทำงานของระบบทำความร้อน การปรับปรุงชนิดของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ตลอดจนการพัฒนาความสามารถในการถ่ายโอนความร้อนของสารทำงาน โดยพัฒนาสารทำงานจากของไหลหนึ่งชนิดเป็นของไหลผสมอนุภาคนาโนที่มีค่าการนำความร้อนสูง ซึ่งอนุภาคนาโนที่ใช้ในการศึกษามาจากหลายกลุ่ม ได้แก่ อนุภาคโลหะ เช่น เงิน ทอง ทองแดง เป็นต้น หรือออกไซด์ของโลหะ เช่น อลูมิเนียมออกไซด์ ไนโอเบียมออกไซด์ เป็นต้น ตลอดจนกลุ่มโลหะออกไซด์ที่มีค่าการนำความร้อนสูง เช่น ซิลิกอนไดออกไซด์ เป็นต้น จากแนวคิดที่ว่าของแข็งที่มีความสามารถในการนำความร้อนได้ดีกว่าของเหลว นักวิจัยจึงได้นำของแข็งที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรผสมลงไปของไหลทำงาน เพื่อเพิ่มค่าการนำความร้อนของของไหลทำงาน เช่น ธนพันธ์ และสุรชัย (ธนพันธ์ ลือคำหาญ, 2551) ศึกษาการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน โดยใช้ของไหลที่ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ขนาด 21 nm เป็นสารทำงาน ที่ความเข้มข้น 1 mg/l 10 mg/l 50 mg/l และ 100 mg/l ตามลำดับ เพื่อเพิ่มความสามารถในการพาความร้อนของสารทำงานเดิม โดยให้ความร้อนแก่ท่อความร้อนที่ 30 – 70 W จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่ผิวของท่อความร้อนที่บรรจุของไหลนาโนมีค่าต่ำกว่าท่อความร้อนที่บรรจุน้ำปราศจากไอออน และค่าความต้านทานทางความร้อนของท่อความร้อนที่ใช้ของไหลนาโนเป็นสารทำงานที่ความเข้มข้น 50 mg/l นั้นลดลง 50% เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานทางความร้อนของท่อความร้อนที่ใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นสารทำงาน Tiwari et al. (Tiwari et al., 2013) ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ โดยใช้ของไหลนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{water}$  ที่ความเข้มข้น 0.5% - 2.0% และอัตราการไหลที่ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 l/min ผลการทดสอบพบว่า ของไหลนาโน  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{water}$  ที่อัตราการไหล 1.5 l/min และความเข้มข้น 1.5% สามารถเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนได้ 31.64% เมื่อเปรียบเทียบกับใช้น้ำเป็นสารทำงาน จะเห็นได้ว่าสารละลายนาโนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพด้านความร้อนของสารทำงานได้



อนุภาคราฟีนนาโน คือกลุ่มของอนุภาคคาร์บอนที่อยู่ร่วมกันในรูปแบบ 6 เหลี่ยม โดยมีข้อดีที่มีค่าการนำความร้อนที่สูง มีสมบัติทางความร้อนที่ดีมาก โดยมีค่าการนำความร้อนอยู่ที่ประมาณ 50 W/cm·K สำหรับทองแดงมีค่าการนำความร้อนประมาณ 4 W/cm·K ที่อุณหภูมิห้อง กราฟีนจึงนำความร้อนได้ดีกว่าทองแดงมากกว่า 10 เท่า และ Yu et al. (Yu et al., 2011) ได้ศึกษาการเพิ่มสมบัติด้านการนำความร้อนของของไหลนาโนที่ใช้กราฟีน โดยผลจากการศึกษาพบว่า graphene oxide มีค่าการนำความร้อนที่ 4.9 W/m·K และ graphene มีค่าการนำความร้อนที่ 6.8 W/m·K จะเห็นได้ว่าค่าการนำความร้อนของของไหลกราฟีนนาโนมีค่าสูงกว่าค่าการนำความร้อนของโลหะทองแดงมีค่าอยู่ที่ 4 W/m·K ตามลำดับ โดยนักวิทยาศาสตร์ต่างให้ความสนใจในการนำกราฟีนมาพัฒนาเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการนำไปใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆรวมถึงการนำไปใช้เป็นวัสดุคอมโพสิตร่วมกับวัสดุชนิดอื่นๆ เช่น พอลิเมอร์และอนุภาคนาโนของโลหะเพื่อให้ได้วัสดุคอมโพสิตชนิดใหม่ที่มีสมบัติที่ดีขึ้น

จากประโยชน์ของสารละลายนาโนข้างต้นและสมบัติทางความร้อนที่ดีของกราฟีน งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาสมบัติด้านความร้อนของสารละลายนาโนกราฟีนที่มีผลต่อสมรรถนะการทำน้ำร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ

### วัตถุประสงค์

1. เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโน และน้ำเป็นสารทำงาน
2. เพื่อศึกษาความเสถียรภาพของของไหลกราฟีนนาโนที่ใช้เป็นสารทำงานในตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ

### ขอบเขตงานวิจัย

1. การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อทองแดง จะใช้ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณ 8.6 mm
2. ใช้ลวดความร้อนให้ความร้อนสม่ำเสมอแก่พื้นผิวท่อในการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในท่อทองแดง
3. การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อทองแดงใช้อัตราการไหล 120 cm<sup>3</sup>/min 170 cm<sup>3</sup>/min และ 220 cm<sup>3</sup>/min



4. ใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบขนาดประมาณ  $0.15 \text{ m}^2$  ต่อ Riser มีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $8.6 \text{ mm}$  และ Absorber plate ขนาด  $0.15 \text{ m}^2$
5. ทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบตามค่ามาตรฐาน ASHRAE Standard 93-2003
6. ใช้ของไหลกราฟีนนาโนที่ความเข้มข้น  $0.100\text{wt}\%$  และน้ำเป็นสารทำงานในตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบเพื่อหาสมรรถนะทางความร้อน
7. ใช้ถังเก็บน้ำร้อนขนาดประมาณ 12 ลิตร และปั๊มสารทำงาน 12 VDC
8. ทดสอบที่วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

#### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถทราบประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ใช้ของไหลนาโนกราฟีน
2. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์และใช้งานได้จริง
3. ทราบระยะเวลาการตกตะกอนของอนุภาคนาโนภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### รังสีอาทิตย์บนพื้นโลก

รังสีอาทิตย์บนพื้นโลก (อริป รักเสรี, 2557) ได้ผ่านกระบวนการดูดกลืนและการแผ่รังสีอาทิตย์ โดยก๊าซในบรรยากาศเป็นผลให้สเปกตรัมแสงอาทิตย์เปลี่ยนไป ซึ่งโมเลกุลของก๊าซ ฝุ่น ละอองและเมฆ ทำให้รังสีอาทิตย์กระจัดกระจาย (Scatter) และสะท้อน (Reflect) ประเภทของรังสีสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

##### 1. รังสีตรง

รังสีตรง (Beam or Direct Radiation) คือ รังสีที่มาจากดวงอาทิตย์โดยตรงและตกบนผิวรับแสงด้วยทิศทางที่แน่นอน ณ เวลาหนึ่งเวลาใด ซึ่งทิศทางของรังสีตรงอยู่ในแนวเวลาแสงอาทิตย์ เนื่องจากรังสีตรงมีทิศทางแน่นอนและมีแสงขนานจึงสามารถรวมแสงหรือโฟกัสรังสีตรงได้

##### 2. รังสีกระจาย

รังสีกระจาย (Diffuse Radiation) คือ รังสีอาทิตย์ส่วนที่ถูกสะท้อนและกระจาย โดยก๊าซ และฝุ่นละอองรวมถึงวัตถุต่าง ๆ ที่อยู่ในทางเดินของแสงก่อนตกกระทบผิวรับแสง รังสีกระจายนี้มาจากทุกทิศทางในท้องฟ้าจึงไม่สามารถรวมแสงหรือโฟกัสรังสีกระจายได้

##### 3. รังสีรวม

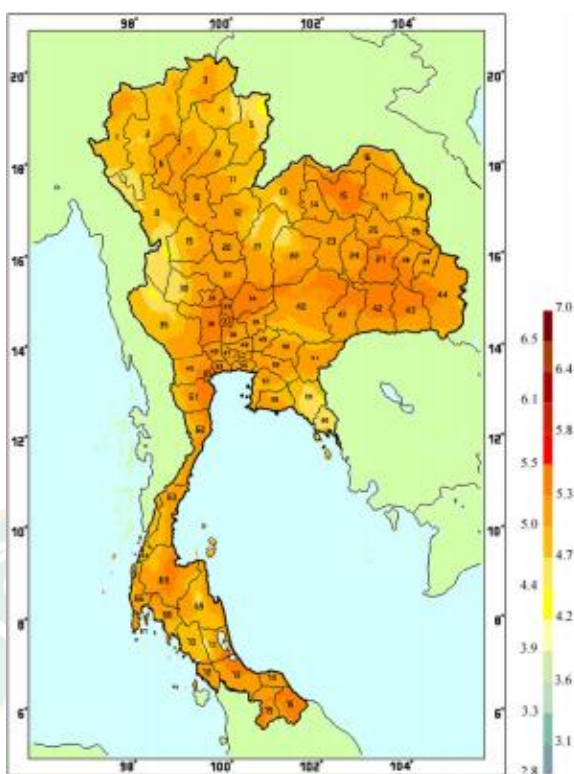
รังสีรวม (Total or Global Radiation) คือ ผลรวมของรังสีตรงและรังสีกระจายซึ่งจำกัดเฉพาะคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคลื่นสั้น (ไม่เกิน 4 ไมโครเมตร) ไม่รวมพลังงานคลื่นยาวจากการแผ่รังสีของพื้นโลกและบรรยากาศ โดยกรณีผิวรับแสงเป็นพื้นเอียง (Incline Plane) รังสีรวมจะประกอบด้วยรังสีตรงจากท้องฟ้า รังสีกระจายจากท้องฟ้าและรังสีกระจายจากพื้นโลก อาคารบ้านเรือน ซึ่งเกิดจากส่วนที่สะท้อนกลับจากพื้นโลก ในกรณีนี้เรียกว่า Total Radiation แต่กรณีผิวรับแสงเป็นพื้นแนวราบ (Horizontal Plane) รังสีรวมบนพื้นราบประกอบด้วยรังสีตรงและรังสีกระจายที่มาจากครึ่งวงกลมท้องฟ้า ไม่มีรังสีกระจายที่มาจากพื้นโลก เรียกรังสีรวมบนพื้นแนวราบว่า Global Radiation

การเปลี่ยนแปลงของรังสีรวม รังสีตรงและรังสีกระจายในวันที่ฟ้ากระจ่างและวันที่ฟ้ามีเมฆ เนื่องจากปริมาณเมฆ ฝุ่นละออง และหมอกควันมีแตกต่างกันตามฤดูกาล ดังนั้นปริมาณรังสีรวม รังสีกระจาย และรังสีตรงจะเปลี่ยนแปลงไปตลอดทั้งปี (อธิป รักเสรี, 2557)

### ปริมาณรังสีอาทิตย์ในประเทศไทย

โดยทั่วไปศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของพื้นที่แห่งหนึ่งจะสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบในพื้นที่นั้น การศึกษาเพื่อทราบปริมาณรังสีอาทิตย์บนพื้นโลกซึ่งจะใช้เป็นแนวทางการส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งนำเสนอในรูปแบบที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับประเทศไทยมีแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานจัดทำขึ้นในปีพ.ศ. 2542 โดยมหาวิทยาลัยศิลปากร ซึ่งภาพที่ 1 แสดงศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายปีในแต่ละเดือนนั้นการกระจายของความเข้มรังสีอาทิตย์ตามบริเวณต่างๆ ของประเทศได้รับอิทธิพลสำคัญจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ และลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศได้รับรังสีอาทิตย์สูงสุดระหว่างเดือนเมษายน และพฤษภาคม โดยมีค่าอยู่ในช่วง 5.54 ถึง 6.65 kWh/m<sup>2</sup>-day (กระทรวงพลังงาน, 2554)

บริเวณที่รับรังสีอาทิตย์สูงสุดเฉลี่ยทั้งปีอยู่ที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือโดยครอบคลุมบางส่วนของจังหวัดนครราชสีมา บุรีรัมย์ สุรินทร์ ศรีสะเกษ ร้อยเอ็ด ยโสธร อุบลราชธานีและบางส่วนของภาคกลางที่จังหวัดสุพรรณบุรี ชัยนาท อโยธยา และลพบุรีโดยได้รับรังสีอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปี 5.26 ถึง 5.54 kWh/m<sup>2</sup>-day พื้นที่ดังกล่าวคิดเป็น 14.3 % ของพื้นที่ทั้งหมดของประเทศ นอกจากนี้ยังพบว่า 50.2 % ของพื้นที่ทั้งหมดรับรังสีอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปีเท่ากับ 4.99 ถึง 5.26 kWh/m<sup>2</sup>-day จากการคำนวณรังสีรวมของดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ทั่วประเทศมีค่าเท่ากับ 5.04 kWh/m<sup>2</sup>-day แสดงให้เห็นว่าประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง



ภาพที่ 1 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับประเทศไทย จัดทำในปีพ.ศ. 2542  
(หน่วย : kWh/m<sup>2</sup>·day) (กระทรวงพลังงาน, 2554)

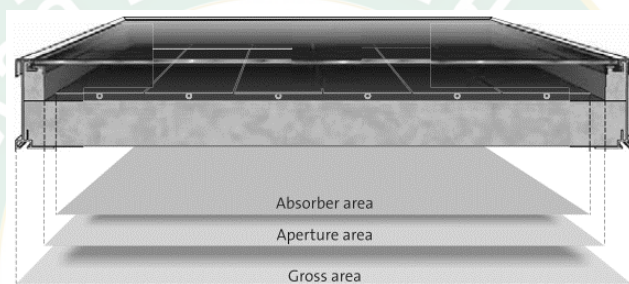
### ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat-plate solar collectors)

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Keopunya, 2559) เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนอย่างหนึ่งซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานความร้อน และถ่ายเทความร้อนให้กับของเหลวที่ไหลอยู่ภายใน ตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีอยู่หลายชนิด เช่น ตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat-plate solar collectors) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศแบบท่อความร้อน (Evacuated collector with heat pipe) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดท่อสุญญากาศแบบท่อแก้ว และตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมแสง (Concentrating collectors) เป็นต้น

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบจะประกอบด้วยส่วนหลักๆ 2 ส่วน คือ ส่วนรับรังสีอาทิตย์ และส่วนที่ป้องกันการสูญเสียความร้อน โดยปกติตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะมีการติดตั้งฉนวนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนซึ่งส่วนมากใช้ใยหิน ในปัจจุบันตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงใช้กระจกสำหรับรับรังสีอาทิตย์ที่ถูกรออกแบบอย่างพิเศษให้แข็งแรงขึ้นและมีการส่งผ่านแสงอาทิตย์สูง (มีโลหะดำ) เพื่อให้เกิดการสะท้อนรังสีอาทิตย์ดำ

โครงสร้างด้านข้างของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ประกอบขึ้นจากแผ่นอะลูมิเนียมหรือสังกะสี ด้านหลัง ปิดด้วยแผ่นอะลูมิเนียมอัดซ้อนเป็นชั้นๆ กับฉนวน วัสดุหลังคาคล้ายผ้าขนสัตว์ (roofing felt) กรอบภายนอกมีความเป็นไปได้ที่จะใช้อะลูมิเนียม พลาสติก หรือรางเหล็กสแตนเลส (กระทรวงพลังงาน, 2554)

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่นำมาวิจัยนี้เป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat-plate solar collectors) ที่ทำจากท่อทองแดง ซึ่งมีความเหมาะสมกับการใช้งานที่ไม่ต้องการอุณหภูมิสูงอีกทั้งยังมีข้อดีหลายอย่างเมื่อเทียบกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบอื่นๆ การบำรุงรักษาน้อย และมีความคุ้มค่าในการลงทุน ตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบมีส่วนประกอบดังนี้ (Polvongsri, 2011) แสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (กระทรวงพลังงาน, 2554)

1) แผ่นปิดด้านหน้า กระจกจะเป็นวัสดุที่นิยมใช้มากที่สุดเนื่องจากกระจกสามารถผลิตและหาซื้อได้ง่าย แต่สามารถใช้วัสดุโปร่งใสใดๆ ก็ได้ในการทำผิวด้านนี้ เช่น แผ่นพลาสติก เป็นต้น การผลิตตัวเก็บรังสีอาทิตย์ หรือเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์นั้น ควรเลือกกระจกที่มีความแข็งแรงทนต่อการแตกร้าวและการขีดข่วนได้พอสมควร เมื่อแสงอาทิตย์ผ่านกระจกและตกกระทบผิวภายในเครื่องทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์จะก่อให้เกิดความร้อนขึ้นและถูกกักเก็บไว้ในแผงรับรังสีอาทิตย์

2) แผ่นดูดซับความร้อน ความร้อนที่เกิดขึ้นในเครื่องทำน้ำร้อนจะถูกดูดซับไว้ โดยแผ่นดูดซับความร้อนซึ่งทำจากแผ่นโลหะ แผ่นสังกะสีหรือวัสดุชนิดอื่นๆ อาจเรียกว่า มวลกักเก็บความร้อน หรือ (Thermal mass) ควรทาสีดำหรือสีทึบเนื่องจากวัตถุสีดำหรือสีทึบจะมีความสามารถในการดูดความร้อนสูง

3) ฉนวนกันความร้อนโดยทั่วไปแล้วจะนิยมใช้ฉนวนใยแก้ว หรือใช้ไมโครโฟเบอร์แบบติดอะลูมิเนียมฟอยล์ ในการหุ้มแผงไว้ด้านข้างและด้านล่างของแผงเพื่อไม่ให้ความร้อนสูญเสียออกมาสู่บรรยากาศภายนอกที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า จึงถือว่าฉนวนกันความร้อนเป็นอุปกรณ์สำคัญในเครื่องทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์



4) โครงกรอบตัวรับรังสีอาทิตย์จะต้องมีโครงสร้างที่แข็งแรง ส่วนใหญ่วัสดุที่นิยมใช้ได้แก่ อลูมิเนียมรีดขึ้นรูปชุบไฟฟ้าด้วยสีชาทองมีความทนทาน และมีอายุการใช้งานยาวนาน

5) ท่อของเหลว ภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ นิยมทำจากโลหะเช่น ท่อทองแดงที่มีค่าการนำความร้อนสูง รีดอัดติดกับแผ่นดูดซับรังสีอาทิตย์จะทำให้มีประสิทธิภาพที่สูง ถ่ายเทความร้อนได้ดี ทนทานต่อการกัดกร่อน และไม่เป็นสนิม (Polvongsri, 2011)

### สมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Performances of Solar collector)

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่สภาวะคงตัว (Steady state) ที่เวลาใดๆ ค่ารังสีอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืนจะเท่ากับอัตราความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ และค่าอัตราความร้อนที่สูญเสียจากผิวดูดรังสี สามารถแสดงได้ดังในสมการที่ 1 (ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, 2537)

$$Q_{\text{coll}} = A_c [\tau_T (\tau \alpha)_e - U_L (T_p - T_a)]$$

สมการที่ 1

เมื่อ  $Q_{\text{coll}}$  คือ พลังงานความร้อนที่ได้รับจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (W)  
 $A_c$  คือ พื้นที่ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ( $\text{m}^2$ )  
 $U_L$  คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวมของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ )  
 $I_T$  คือ ค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกลงบนระนาบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ( $\text{W}/\text{m}^2$ )  
 $T_p$  คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของผิวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ ( $^\circ\text{C}$ )  
 $T_a$  คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม ( $^\circ\text{C}$ )  
 $(\tau \alpha)_e$  คือ ผลคูณประสิทธิภาพของค่าส่งผ่านและค่าดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

เนื่องจากอุณหภูมิผิวดูดกลืนรังสีเฉลี่ย ( $T_{\text{pm}}$ ) ในทางปฏิบัติวัดได้ยากจึงมักใช้อุณหภูมิของของไหลทำงานเฉลี่ย ( $T_{\text{fm}}$ ) ดังสมการที่ 2

$$Q_{\text{coll}} = A_c F' [\tau_T (\tau \alpha)_e - U_L (T_{\text{fm}} - T_a)]$$

สมการที่ 2



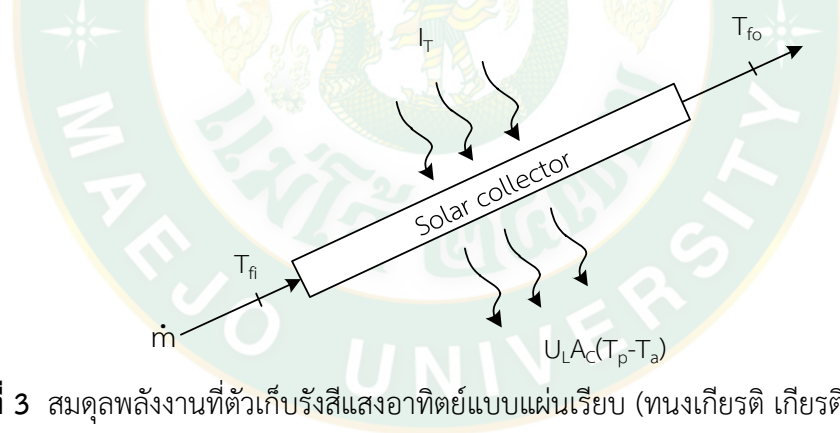
เมื่อ  $F'$  คือ แฟกเตอร์ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสี (Collector efficiency factor) เป็นอัตราส่วนของพลังงานที่ได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์จริงต่อพลังงานที่ได้เมื่ออุณหภูมิผิวมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของ ไหล ( $T_{fm}$ ) ดังสมการที่ 3

$$T_{fm} \cong \frac{(T_{fo} - T_{fi})}{2} \quad \text{สมการที่ 3}$$

ในการออกแบบจะเป็นเรื่องยากที่จะคำนวณ  $T_{fo}$  จากสมการข้างต้นดังนั้น จึงใช้ค่า  $T_{fi}$  เพียงค่าเดียวในการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนความร้อนที่ได้จากตัวเก็บรังสีจะอยู่ในรูปสมการที่ 4

$$Q_{coll} = A_c [F_R (\tau\alpha)_e I_T - F_R U_L (T_{fi} - T_a)] \quad \text{สมการที่ 4}$$

เมื่อ  $F_R$  คือ Heat removal factor  
กรณีที่สารทำงานไม่มีการเปลี่ยนสถานะ พลังงานความร้อนสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 5



ภาพที่ 3 สมดุลพลังงานที่ตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (ทงนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, 2537)

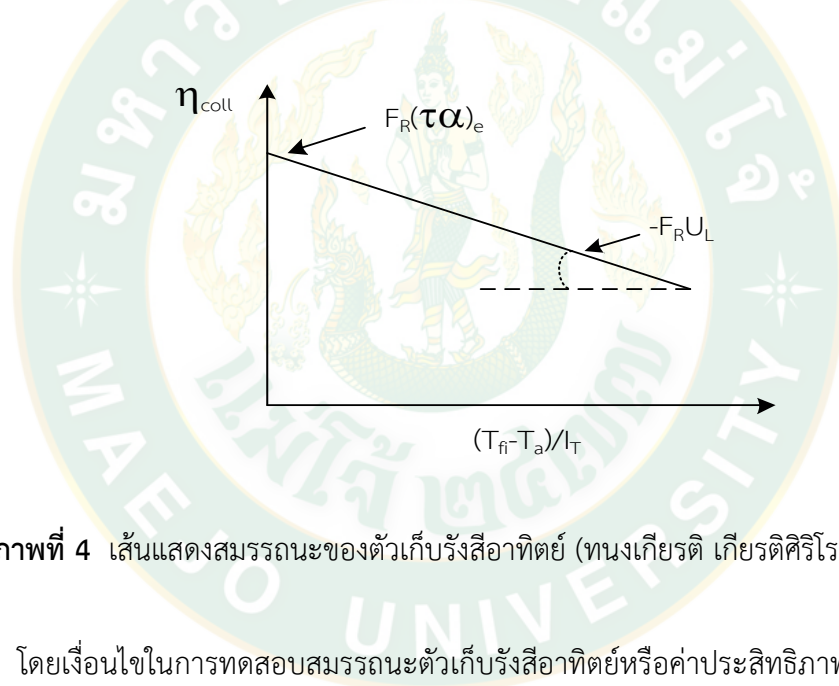
$$Q_{coll} = \dot{m} C_p (T_{fo} - T_{fi}) \quad \text{สมการที่ 5}$$

เมื่อ  $\dot{m}_f$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของของไหล (kg/s)  
 $C_p$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะของสารทำงาน (J/kg $^{\circ}$ C)  
 $T_{fo}$  คือ อุณหภูมิของของไหลขาออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ( $^{\circ}$ C)  
 $T_{fi}$  คือ อุณหภูมิของของไหลขาเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ( $^{\circ}$ C)

ค่าประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะเป็นดัชนีที่ใช้บอกความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานที่ได้จากแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งค่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6

$$\eta_{\text{coll}} = \frac{Q_{\text{coll}}}{A_c I_T} = \frac{\dot{m} C_p (T_{fo} - T_{fi})}{A_c I_T} = F_R (\tau \alpha)_e - F_R U_L \frac{T_{fi} - T_a}{I_T} \quad \text{สมการที่ 6}$$

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\eta_{\text{coll}}$  และ  $(T_{fi} - T_a)/I_T$  จะได้สมการเส้นตรง ดังแสดงในภาพที่ 4 โดยที่ค่าความชันของเส้นคือ ค่า  $F_R U_L$  ส่วนค่าที่ตัดแกนประสิทธิภาพ คือ ค่า  $F_R (\tau \alpha)_e$



ภาพที่ 4 เส้นแสดงสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (ทนนเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, 2537)

โดยเงื่อนไขในการทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์หรือค่าประสิทธิภาพ ( $\eta_{\text{coll}}$ ) ที่กล่าวมาข้างต้นจะทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASHRAE Standard 93-2003 ภายใต้สภาวะคงที่ (Steady state condition) รายละเอียดของมาตรฐานแสดงดังตารางที่ 1

**ตารางที่ 1** เงื่อนไขในการทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐาน ASHRAE Standard 93-2003 (ทงนเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, 2537)

Variable	Maximum variation		Lower limit	Upper limit
	In between data periods	Within data periods		
Total irradiance Normal to sun	-	$\pm 32 \text{ W/m}^2$	$790 \text{ W/m}^2$	-
Fraction of diffuse Radiation	-	-	-	20%
Incident angle Modifier	-	2%	-	-
Ambient Temperature	Range $<30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ( $54 \text{ }^{\circ}\text{F}$ )	$\pm 1.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $\pm 2.7 \text{ }^{\circ}\text{F}$	-	-
Wind	-	-	$2.2 \text{ m/s}$	$4.5 \text{ m/s}$
Flow rate	Sam flow rate for all data points ( $0.02 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$ )	$\pm 0.005 \text{ gpm}$	-	-
Inlet temperature	-	$\pm \text{Max of}$ ( $1.0^{\circ}\text{C}/1.8 \text{ }^{\circ}\text{F}\cdot 2\%$ )	-	-
Incident angle	-	$\pm 2.5^{\circ}$	-	-

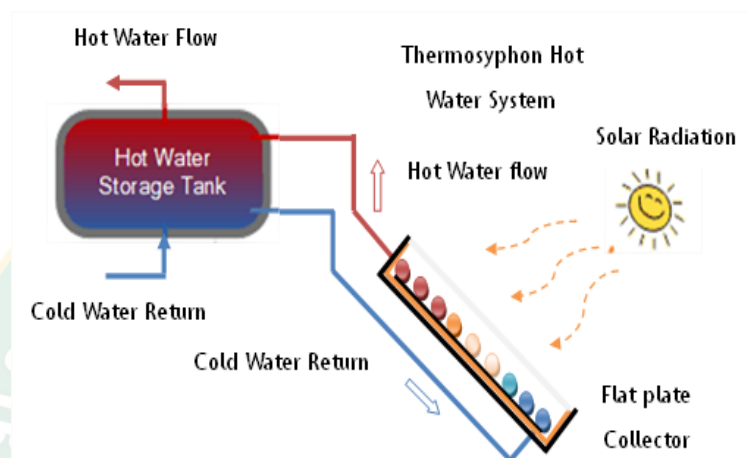
### ระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar water heating system)

ระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (ทงนเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, 2537) สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. ระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดการไหลเวียนแบบธรรมชาติ (Passive solar water heating system)

เป็นระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้สมบัติของของไหลทำงานในการทำงาน หรือเรียกอีกชื่อว่า ระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon solar water heating system) ดังแสดงในภาพที่ 5 หลักการทำงานของระบบทำน้ำร้อนแบบชนิดไหลเวียนแบบ

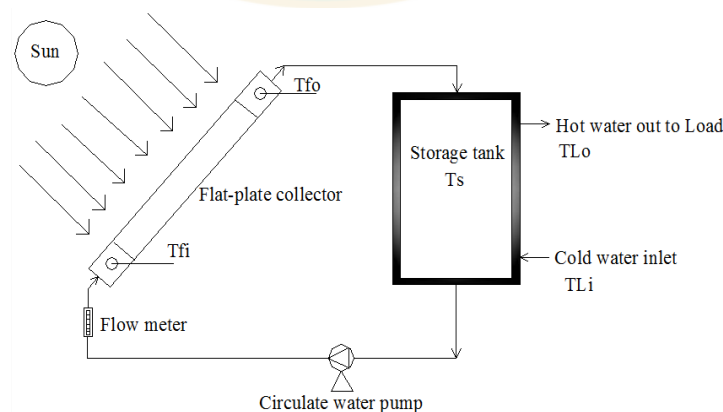
ธรรมชาตินี้ เริ่มจากน้ำเมื่อได้รับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จะมีความหนาแน่นต่ำลงและลอยตัวสูงขึ้นไปถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำในถังเก็บน้ำร้อนที่หุ้มฉนวนอย่างดี ทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนน้ำเย็นมีความหนาแน่นสูงกว่าก็จะเคลื่อนที่กลับมาแทนที่น้ำในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ข้อดีของระบบนี้คือไม่มีการใช้พลังงานไฟฟ้า ส่วนข้อเสียคือ ประสิทธิภาพของระบบต่ำ และถังเก็บน้ำร้อนต้องอยู่สูงกว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์เท่านั้น



ภาพที่ 5 ระบบทำน้ำร้อนแบบชนิดไหลเวียนแบบธรรมชาติ

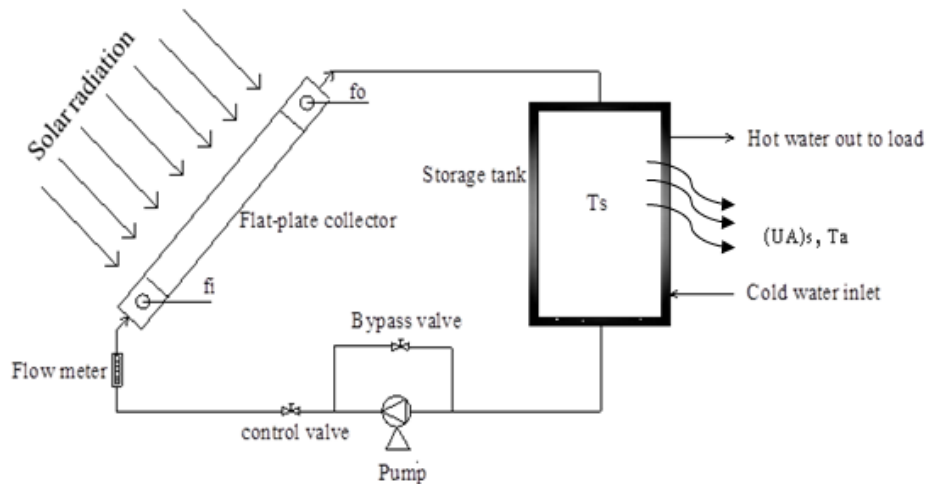
2. ระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดไหลเวียนแบบบังคับ (Active solar water heating system)

ระบบนี้จะประกอบด้วยปั๊มหมุนเวียนน้ำ (Circulate water pump) ทำหน้าที่ปั้มน้ำผ่านแผงเก็บรังสีอาทิตย์เพื่อรับความร้อนจากรังสีอาทิตย์ ถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำในถังเก็บน้ำร้อน (Storage tank) ซึ่งหุ้มฉนวนอย่างดี ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดไหลเวียนแบบบังคับ

งานวิจัยนี้ได้ทำการติดตั้งถังเก็บน้ำร้อนร่วมกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ ดังนั้นเมื่ออยากทราบอุณหภูมิของน้ำที่ถังเก็บน้ำร้อนที่เวลาผ่านไป ดังแสดงในภาพที่ 7 เมื่อสมมุติว่าไม่มีการแยกชั้นอุณหภูมิของน้ำ สามารถทำสมดุลพลังงานในถังเก็บสะสมน้ำร้อนสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 7



ภาพที่ 7 สมดุลพลังงานในถังเก็บสะสมน้ำร้อนในระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

จากภาพที่ 7 สามารถทำสมดุลพลังงานในถังเก็บสะสมน้ำร้อนได้ดังสมการที่ 7

$$Q_{\text{coll}} = Q_{\text{storage}} + Q_{\text{load}} + Q_{\text{loss}}$$

สมการที่ 7

- เมื่อ
- $Q_{\text{storage}}$  คือ อัตราความร้อนสะสมที่ถังเก็บสะสมน้ำร้อน (W)
  - $Q_{\text{load}}$  คือ อัตราความร้อนที่ดึงออกจากถังเก็บสะสมน้ำร้อน (W)
  - $Q_{\text{loss}}$  คือ อัตราความร้อนสูญเสียออกจากถังน้ำร้อน (W)

ในกรณีที่ไม่มีหรือนำน้ำร้อนไปใช้งานและถังเก็บสะสมน้ำร้อนมีการหุ้มฉนวนอย่างดี  $Q_{\text{load}}$  และ  $Q_{\text{loss}}$  มีค่าเป็น 0 ดังนั้น

$$A_c [F_R (\tau\alpha)_{eI_T} - F_R U_L (T_{fi} - T_a)] = (MC_p)_s \frac{T_s^{t+\Delta t} - T_s}{\Delta t}$$

สมการที่ 8

สมการที่ 8 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงตัวเลขได้ดังนี้

$$T_s^{t+\Delta t} = T_s + \frac{A_c \Delta t}{(MC_p)_s} [F_R (\tau\alpha)_e I_T - F_R U_L (T_{fi} - T_a)] \quad \text{สมการที่ 9}$$

เมื่อ  $T_s$  คือ อุณหภูมิของน้ำที่ถังเก็บสะสมน้ำร้อน ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_s^{t+\Delta t}$  คือ อุณหภูมิของน้ำที่ถังเก็บสะสมน้ำร้อนที่เวลาเปลี่ยนไป ( $^{\circ}\text{C}$ )

$(MC_p)_s$  คือ ผลคูณของมวลและความร้อนจำเพาะของของไหลในถัง ( $\text{J}/^{\circ}\text{C}$ )

$\Delta t$  คือ ผลต่างช่วงระยะเวลา (S)

สมรรถนะของระบบทำน้ำร้อน สามารถคำนวณได้จากอุณหภูมิน้ำร้อนในถังเก็บน้ำร้อนที่เพิ่มขึ้นในแต่ละช่วงเวลา ดังสมการที่ 10

$$Q_s = \sum_{i=1}^n (MC_p)_s \frac{dT_s}{dt} \quad \text{สมการที่ 10}$$

หรือ

$$Q_s = (MC_p)_s \frac{T_s^{t+\Delta t} - T_s}{\Delta t} \quad \text{สมการที่ 11}$$

โดยทั่วไปจะทำการทดสอบตลอดทั้งวัน ดังนั้นประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 12

$$\eta_{\text{system}} = \frac{Q_s}{\sum_{i=1}^n I_T A_c \Delta t} \quad \text{สมการที่ 12}$$

ระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์กรณีที่ใช้ของไหลนาโนเป็นสารทำงาน จำเป็นต้องมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger coil) ดังนั้นค่า UA สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 13 และสมการที่ 14



$$Q = UA\Delta T_{LMTD}$$

สมการที่ 13

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{co} - T_s) - (T_{ci} - T_s)}{\ln[(T_{co} - T_s)/(T_{ci} - T_s)]}$$

สมการที่ 14

### การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convective Heat Transfer Coefficient,  $h_{wf}$ ) (ทงง เกียรติ เกียรติศิริโรจน์, 2014) ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่มีการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) และพื้นผิวมีการให้ความร้อนที่สม่ำเสมอสามารถหาได้จากนิยามในสมการที่ 15

$$h_{wf} = \frac{Nu \times k_{wf}}{D_{tube}}$$

สมการที่ 15

เมื่อ  $k_{wf}$  คือ สภาพการนำความร้อนของของไหล (W/m·K)  
 $D_{tube}$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (m)  
 $Nu$  คือ เลขนัสเซลท์ (Nusselt number)

โดยเลขนัสเซลท์ (Nusselt number) ของของไหลที่เป็นน้ำสามารถหาได้จากสมการของ Shah ภายใต้การไหลแบบราบเรียบที่พื้นผิวมีการให้ความร้อนที่สม่ำเสมอ Uniform heat flux (Wen and Ding, 2004) ดังสมการที่ 16

$$Nu = 1.953 \left( Re Pr \frac{D_{tube}}{L} \right)^{1/3}$$

สมการที่ 16

ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นจริงหาได้จากนิยามในสมการที่ 17

$$q'' = \frac{Q}{A}$$

สมการที่ 17

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลนาโนภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Convective heat transfer coefficient,  $h_i$ ) หาได้จากสมการที่ 18

$$h_i = \frac{q''}{(T_{\text{surface}} - T_{\text{wf}})}$$

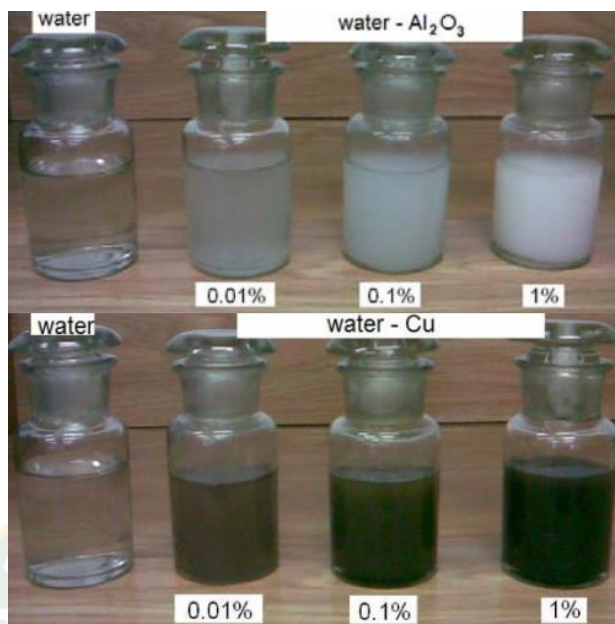
สมการที่ 18

เมื่อ	$T_{\text{surface}}$	คือ อุณหภูมิผนังด้านในของท่อ ( $^{\circ}\text{C}$ )
	$T_{\text{wf}}$	คือ อุณหภูมิของไหลเฉลี่ยก่อนและหลังเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ( $^{\circ}\text{C}$ )
	$q''$	คือ ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นจริง ( $^{\circ}\text{C}$ )

### ของไหลนาโน (Nanofluids) และกราฟีน (Graphene)

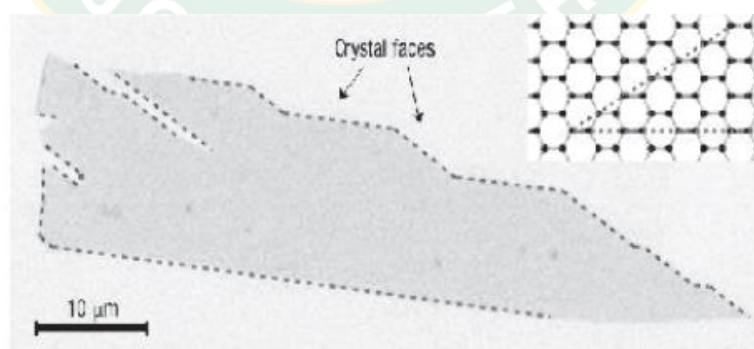
ของไหลนาโน (Nano-fluids) คือ นวัตกรรมใหม่ของของไหลที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนได้จากการใช้อนุภาคนาโนโลหะที่มีขนาดน้อยกว่า 100 nm ผสมกับของเหลวพื้นฐาน (Base fluid) อนุภาคนาโนที่ใส่ลงไปเมื่อผ่านเครื่องผสมแล้ว จะลอยตัวอยู่ได้ในของเหลวโดยอาศัยปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “Brownian motion” ซึ่งอนุภาคนาโนโลหะของแข็งที่ผสมลงไปนั้น มีค่าการนำความร้อนที่สูงกว่าของเหลวทั่วไปหลายเท่า ดังนั้นของไหลนาโนจึงได้รับความคาดหวังว่าจะเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนและนำมาใช้แทนของไหลฐาน แต่ข้อจำกัดในการนำของไหลนาโนมาใช้นั้นคือความเสถียรในการคงสภาพของอนุภาคโลหะนาโนที่กระจายตัวอยู่ในของเหลวที่เป็นตัวกลาง (Stability of nano-fluids) ซึ่งเกิดจากความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาคโลหะนาโนที่แขวนลอยในของเหลว ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเล็กลงและความหนืดของสารตัวกลางมีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาคมีค่าน้อยลง นอกจากนี้ความเข้มข้นของอนุภาคของโลหะหรือแม้แต่การกระจายตัวของอนุภาคของโลหะลงในของเหลวที่เป็นตัวกลาง ยังถือเป็นปัจจัยหนึ่งส่งผลต่อความเสถียรในการคงสภาพของอนุภาคของโลหะที่กระจายตัวอยู่ในของเหลวที่เป็นตัวกลางด้วยเช่นกัน (วิศณุสรรค์ ชาตอารยะวดี, 2555) (Chol and Estman, 1995)

สำหรับอนุภาคโลหะนาโนที่นิยมนำมาเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน ได้แก่ Cu Ag Au และ Fe เป็นต้น ส่วนอนุภาคนาโนประเภทโลหะออกไซด์ที่นิยม ได้แก่  $\text{CuO}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{TiO}_2$  เป็นต้น เมื่อพิจารณาในการจับตัวของอนุภาคนาโนที่ส่งผลต่อการตกตะกอนนั้น อนุภาคโลหะออกไซด์มีแรงดึงดูดมากกว่าอนุภาคโลหะ ทำให้แนวโน้มในการจับตัวของอนุภาคต่ำ ซึ่งส่งผลต่อการตกตะกอนของอนุภาคช้ากว่าอนุภาคโลหะ มีความเสถียรของของไหลนาโนสูง และมีค่าการนำความร้อนของของไหลนาโนสูงกว่าเมื่อเทียบกับอนุภาคโลหะ (Anandan and Rajan, 2012)



ภาพที่ 8 ตัวอย่างของไหลนาโนที่ความเข้มข้นต่างกัน (Nano-fluids) (OPENI, 2560)

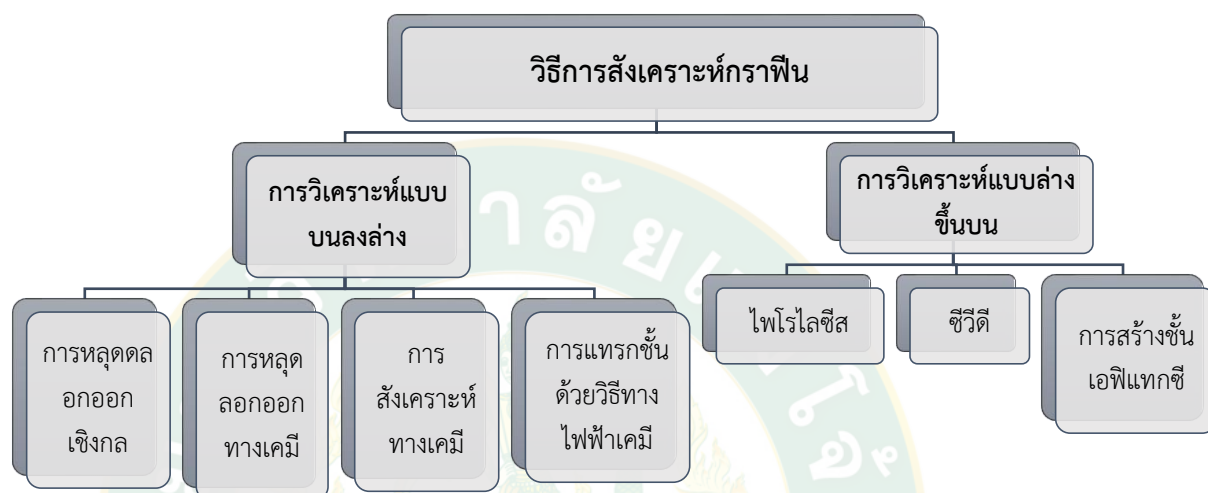
กราฟีนเป็นคาร์บอนอะตอมที่มีการจัดเรียงตัวแบบหกเหลี่ยมคล้ายกับวงแหวนเบนซีนต่อเนื่องกันไปโดยมีรูปแบบคล้ายกับรังผึ้ง กราฟีนมีความหนาเพียงชั้นอะตอมเดียวเท่านั้นซึ่งขัดกับความเชื่อของนักวิทยาศาสตร์ในสมัยก่อนที่มีความเชื่อว่าวัสดุที่มีความหนาเพียงชั้นอะตอมเดียวไม่มีอยู่จริงและเป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติที่จะสร้างวัสดุที่มีความหนาเพียงชั้นอะตอมเดียวขึ้นมาได้ ดังนั้นกราฟีนจึงเป็นวัสดุที่จะนำมาหักล้างความเชื่อเก่าๆ ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 รูปแผ่นกราฟีนขนาดใหญ่จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (วิศณุสรณ์ ชาติ อารยะวัต, 2555)

## 1. การสังเคราะห์กราฟีน

เราสามารถสังเคราะห์กราฟีนออกเป็น 2 วิธีใหญ่ๆ (วิศนุสรณ์ ชาติอารยะวดี, 2555) คือ การสังเคราะห์จากใหญ่ไปเล็ก (top-down) และการสังเคราะห์จากเล็กไปใหญ่ (bottom-up) ดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ไดอะแกรมแสดงรูปแบบการสังเคราะห์กราฟีน (วิศนุสรณ์ ชาติอารยะวดี, 2555)

## 2. สมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

กราฟีน (วิศนุสรณ์ ชาติอารยะวดี, 2555) คือกลุ่มของอนุภาคคาร์บอนที่อยู่ร่วมกันในรูปแบบ 6 เหลี่ยม โดยมีข้อดีที่มีค่าการนำความร้อนที่สูง โดยค่าการนำความร้อน (thermal conductivity,  $k$ ) ของกราฟีนมีค่าที่สูงจึงถูกเลือกมาใช้เป็นตัวช่วยระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ จากการศึกษาพบว่าค่าการนำความร้อนของกราฟีนเหนือกว่าโลหะชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2 สำหรับทองแดงมีค่าการนำความร้อนประมาณ  $4 \text{ W/cm}\cdot\text{K}$  ที่อุณหภูมิห้อง กราฟีนจึงนำความร้อนได้ดีกว่าทองแดงมากกว่า 10 เท่า

ตารางที่ 2 ค่าการนำความร้อนของวัสดุต่างๆ (วิศนุสรณ์ ชาติอารยะวดี, 2555)

Material	Thermal Conductivity (W/cm·K)
Graphene	~50
Copper	4.01
Titanium	0.219

Material	Thermal Conductivity (W/cm·K)
Platinum	0.716
Iron	0.802
Nickel	0.907
Gold	3.17
Silver	4.29

อย่างไรก็ดีเมื่อนำกราฟีนไปวางบนตัวรองรับ(substrate) เช่น SiO<sub>2</sub> จะเกิดการรั่วไหลของโฟนอนบนรอยต่อระหว่างกราฟีนและตัวรองรับ SiO<sub>2</sub> ซึ่งเมื่อทำการวัดค่าการนำ ความร้อนจะมีค่าประมาณ 6 W/cm·K ที่อุณหภูมิห้อง ค่าการนำความร้อนของกราฟีนที่วัดได้นี้แม้จะมีค่าลดลงแต่ก็ยังคงมีค่ามากกว่าค่าการนำความร้อนของทองแดง การลดลงของค่าการนำความร้อนเป็นผลมาจากชนิดของตัวรองรับ กลไกการกระจายของโฟนอนและจำนวนชั้นของกราฟีน (วิศณุสรณ์ ชาติอารยะวดี, 2013)

### 3. การหาสมบัติต่างๆของกราฟีนนาโน

ค่าการนำความร้อนของของไหลนาโนจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของปริมาณอนุภาคในน้ำ จากสมการของ Hamilton และ Crosser (1962) (เกษมณี คำอ่อง, 2561) ได้นำเสนอสมการที่ใช้ในการหาค่าการนำความร้อนของของแข็งที่ผสมกับของเหลวไว้ดังสมการที่ 19

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + (n-1)k_f + (n-1)\alpha(k_f - k_p)}{k_p + (n-1)k_f - \alpha(k_f - k_p)}$$

สมการที่ 19

เมื่อ  $k_{nf}$  คือ ค่าการนำความร้อนของของไหลนาโน (W/m·K)

$k_f$  คือ ค่าการนำความร้อนของของไหลฐาน (W/m·K)

$k_p$  คือ ค่าการนำความร้อนของอนุภาคนาโน (W/m·K)

$n$  คือ ตัวประกอบรูปร่างหาได้จากสมการที่ 20

$\varphi$  คือ ค่าความเป็นทรงกลมของอนุภาค

และค่า  $\alpha$  คือ ส่วนปริมาณ (Volume Fraction) ของอนุภาคนาโนหาได้จากสมการที่ 22



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

สมการที่ 20

โดย  $\phi$  สามารถหาได้จากสมการที่ 21

$$\phi = \frac{\text{พ.ท.ผิวทรงกลม}}{\text{พ.ท.ผิวจริงอนุภาค}}$$

สมการที่ 21

$$\alpha = \frac{V_p}{V_f + V_p} = \frac{m\pi d_p^{-3}}{6}$$

สมการที่ 22

เมื่อ  $m$  คือ จำนวนของอนุภาคต่อปริมาณ  
 $d_p$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค (m)

ค่าความหนาแน่นของของไหลนาโน สามารถหาได้จากสมการของ Pak และ Cho (Pak and Cho, 1998) ดังแสดงในสมการที่ 23

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

สมการที่ 23

เมื่อ  $\rho_{nf}$  คือ ความหนาแน่นของของไหลนาโน ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $\rho_p$  คือ ความหนาแน่นของอนุภาคนาโน ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $\rho_w$  คือ ความหนาแน่นของของไหลฐาน ( $\text{kg/m}^3$ )

ค่าความร้อนจำเพาะของของไหลนาโนสามารถหาได้จากสมการของ Pak และ Cho (Pak and Cho, 1998) ดังแสดงในสมการที่ 24

$$C_{p_{nf}} = \alpha C_{p_p} + (1 - \alpha)C_{p_w}$$

สมการที่ 24

เมื่อ  $C_{p_{nf}}$  คือ ค่าความร้อนจำเพาะของของไหลนาโน ( $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$ )  
 $C_{p_p}$  คือ ค่าความร้อนจำเพาะของอนุภาคนาโน ( $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$ )  
 $C_{p_w}$  คือ ค่าความร้อนจำเพาะของของไหลฐาน ( $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$ )

ค่าความหนืดของของไหลนาโนสามารถคำนวณได้จากสมการของ Wang et al. (Wang et al., 1999) ดังแสดงในสมการที่ 25

$$\mu_{nf} = (1 + 7.3\alpha + 123\alpha^2)\mu_w \quad \text{สมการที่ 25}$$

เมื่อ  $\mu_{nf}$  คือ ค่าความหนืดของของไหลนาโน (kg/m·K)  
 $\mu_w$  คือ ค่าความหนืดของของไหลฐาน (kg/m·K)

### การวิเคราะห์ความไม่แน่นอน (Uncertainty analysis)

ในการวิเคราะห์ผลใดๆซึ่งได้ค่าจากการวัดข้อมูลของพารามิเตอร์แต่ละตัว (ทงนงเกียรติเกียรติศิริโรจน์, 2559) ข้อมูลที่ได้แต่ละตัวจะมีความผิดพลาดเกิดขึ้น และก่อให้เกิดความไม่แน่นอนหรือความผิดพลาดของผลรวมที่ต้องการวิเคราะห์

กำหนดผลลัพธ์ R ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ข้อมูล n ตัว คือ  $x_1, x_2, \dots, x_n$  ซึ่งแต่ละตัวเป็นพารามิเตอร์อิสระที่ได้จากการวัดดังสมการที่ 26

$$R = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad \text{สมการที่ 26}$$

และพารามิเตอร์แต่ละตัวมีค่าความผิดพลาด  $\pm\Delta x_1, \pm\Delta x_2, \dots, \pm\Delta x_n$  ตามลำดับ ค่าความผิดพลาดเหล่านี้ก่อให้เกิดความผิดพลาดรวมในผลลัพธ์  $\Delta R$  ดังนั้นอาจเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 27

$$R \pm \Delta R = f(x_1 \pm \Delta x_1, x_2 \pm \Delta x_2, \dots, x_n \pm \Delta x_n) \quad \text{สมการที่ 27}$$

เมื่อทำการกระจายฟังก์ชัน  $f$  โดยอนุกรมของเทเลอร์จะได้ (พิจารณาเฉพาะค่าบวก) ดังสมการที่ 28

$$f(x_1 \pm \Delta x_1, x_2 \pm \Delta x_2, \dots, x_n \pm \Delta x_n) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \Delta x_1 \frac{\partial f}{\partial x_1} + \Delta x_2 \frac{\partial f}{\partial x_2} + \dots + \Delta x_n \frac{\partial f}{\partial x_n} + \frac{1}{2} [(\Delta x_1)^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} + \dots] + \dots \quad \text{สมการที่ 28}$$

พิจารณาเฉพาะค่าในลำดับที่หนึ่ง จะได้

$$f(x_1 \pm \Delta x_1, x_2 \pm \Delta x_2, \dots, x_n \pm \Delta x_n) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \Delta x_1 \frac{\partial f}{\partial x_1} + \Delta x_2 \frac{\partial f}{\partial x_2} + \dots + \Delta x_n \frac{\partial f}{\partial x_n}$$

สมการที่ 29

นำสมการที่ 27 และสมการที่ 29 มาบวกกันจะได้

$$|\Delta R| = \left| \Delta x_1 \frac{\partial f}{\partial x_1} \right| + \left| \Delta x_2 \frac{\partial f}{\partial x_2} \right| + \dots + \left| \Delta x_n \frac{\partial f}{\partial x_n} \right|$$

สมการที่ 30

หรือใช้หลักของ the root-sum square จะได้ดังสมการที่ 31 และสมการที่ 32

$$\Delta R = \sqrt{\left( \Delta x_1 \frac{\partial f}{\partial x_1} \right)^2 + \left( \Delta x_2 \frac{\partial f}{\partial x_2} \right)^2 + \dots + \left( \Delta x_n \frac{\partial f}{\partial x_n} \right)^2}$$

สมการที่ 31

$$\text{หรือ } \omega_R = \left[ \left( \frac{\partial f}{\partial x_1} \omega_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial x_2} \omega_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial f}{\partial x_n} \omega_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

สมการที่ 32

$\omega_R$  คือค่า uncertainty ในผลลัพธ์และ  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$  คือค่า uncertainty ในพารามิเตอร์แต่ละตัวตามลำดับ

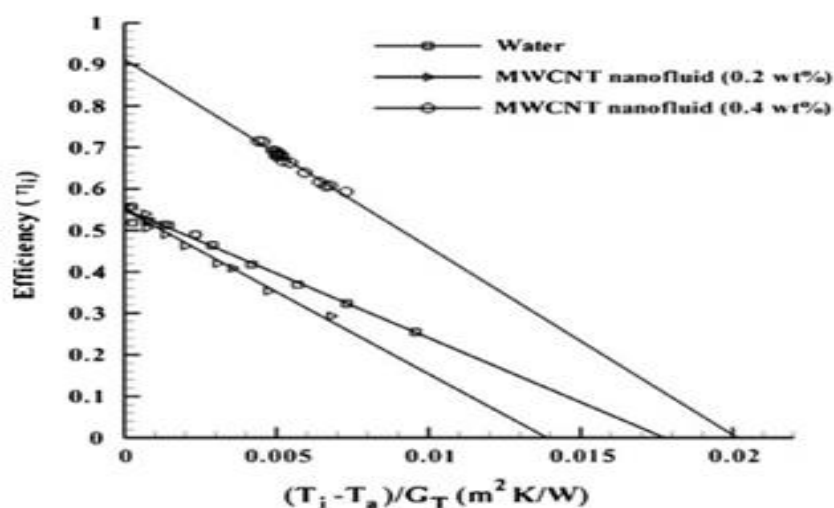
### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Polvongsri และ Kiatsiriroat (Polvongsri and Kiatsiriroat, 2011) ได้ทดสอบการใช้ของไหลเงินนาโนในตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ พบว่า เมื่อความเข้มข้นของอนุภาคเงินในของไหลเพิ่มขึ้นมาที่ 10,000 ppm สามารถเพิ่มคุณลักษณะเชิงความร้อนของตัวรับรังสีได้ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการใช้น้ำเป็นสารทำงาน ของไหลเงินนาโนที่ความเข้มข้นดังกล่าวจะมีค่าสภาพการนำความร้อน 0.852 W/m·K เทียบกับ 0.580 W/m·K ในกรณีของน้ำจึงสามารถดึงความร้อนจากตัวรับรังสีได้ดีทำให้การสูญเสียความร้อนจึงต่ำกว่า ตัวรับรังสีอาทิตย์จึงมีประสิทธิภาพสูงขึ้นค่า

$F_R(\tau\alpha)_e$  และ  $F_R U_L$  ที่อัตราการไหล  $0.02 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$  กรณีที่ใช้ของไหลนาโนเงินมีค่า  $0.816$  และ  $7.123 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  กรณีที่ใช้น้ำมีค่า  $0.723$  และ  $8.314 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  ตามลำดับ

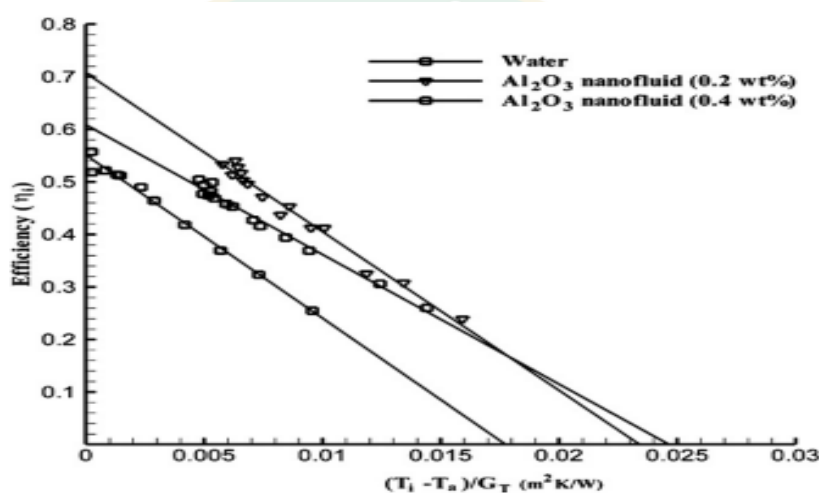
Yu และ คณะ (Yu et al., 2011) ศึกษาสมบัติการนำความร้อนของกราฟีนในเอทิลีนไกลคอล ที่มีขนาด  $0.7\text{--}1.3 \text{ nm}$  วิเคราะห์ด้วยวิธี Fourier transform infrared (FT-IR) และ Thermogravimetric Analyzer (TG analysis) ซึ่งของไหลนาโนกราฟีนในเอทิลีนไกลคอลแสดงให้เห็นว่าค่าการนำความร้อนมีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญมากกว่าของเหลวฐาน อุณหภูมิมีอิทธิพลเพียงเล็กน้อยเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพของการนำความร้อน เนื่องจากความแข็งของกราฟีนและกราฟีนออกไซด์ส่งผลที่ดีต่อการถ่ายเทความร้อนของกราฟีนนาโน จากการศึกษาพบว่าค่าการนำความร้อนของกราฟีนออกไซด์และกราฟีนนาโน มีค่าการนำความร้อนอยู่ที่  $4.9 \pm 0.6$  และ  $6.8 \pm 0.8 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  ตามลำดับ

Yousef และคณะ (Yousefi et al., Veisy et al., 2012) ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของ MWCNT-H<sub>2</sub>O nanofluid ต่อประสิทธิภาพของตัวเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ ที่ความเข้มข้น  $0.2 \text{ wt}\%$  กับ  $0.4 \text{ wt}\%$  ทดสอบภายใต้อัตราการไหลเชิงมวล  $0.05 \text{ kg/s}$  พบว่า ที่ความเข้มข้น  $0.4 \text{ wt}\%$  ให้ค่าประสิทธิภาพที่สูงกว่าความเข้มข้น  $0.2 \text{ wt}\%$  และน้ำ โดยที่ความเข้มข้น  $0.4 \text{ wt}\%$  ให้ค่า  $F_R(\tau\alpha)_e$  และ  $F_R U_L$  เพิ่มขึ้น  $65.51\%$  และ  $45.84\%$  ตามลำดับเมื่อเทียบกับน้ำ



ภาพที่ 11 ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์สำหรับ MWCNT nanofluid และน้ำที่มีอัตราการไหลเชิงมวล  $0.05 \text{ kg/s}$

Yousef และคณะ (Yousefi et al., Veysi et al., 2012) ทำการศึกษาผลของ  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$  nanofluid ที่ความเข้มข้น 0.2 wt% กับ 0.4 wt% ที่มีต่อประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ ซึ่ง  $\text{Al}_2\text{O}_3$  มีขนาดอนุภาค 15 nm ที่อัตราการไหลเชิงมวล 3 l/min พบว่า ค่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบที่ใช้  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$  nanofluid ที่ความเข้มข้น 0.2 wt% สูงกว่าที่ความเข้มข้น 0.4 wt% และน้ำ โดยพบว่าค่าประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์กรณีที่ใช้  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$  nanofluid ที่ความเข้มข้น 0.2 wt% เพิ่มขึ้น 28.3% เมื่อเทียบกับกรณีที่ใช้ น้ำเป็นสารทำงาน ดังแสดงในภาพที่ 12 และตารางที่ 3



ภาพที่ 12 ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์สำหรับ  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$  nanofluid และน้ำที่มีอัตราการไหลเชิงมวล 3 l/min

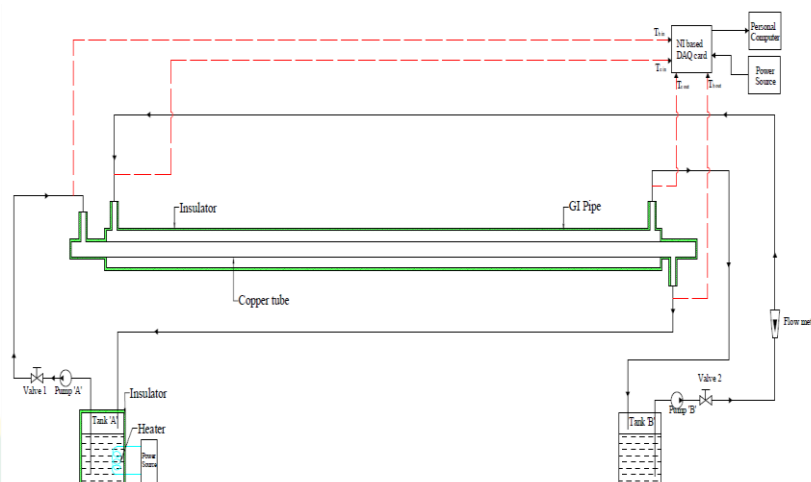
ตารางที่ 3 ผลการทดสอบค่า  $F_R(\tau\alpha)_e$  และ  $F_R U_L$  ที่อัตราการไหลเชิงมวล 3 l/min

สารทำงาน	$F_R U_L$ (W/m <sup>2</sup> K)	$F_R(\tau\alpha)_e$	R <sup>2</sup>
Water	31.04	0.551	0.989
$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ nanofluid (0.2 wt%)	30.194	0.7073	0.979
$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ nanofluid (0.4 wt%)	24.672	0.6086	0.982

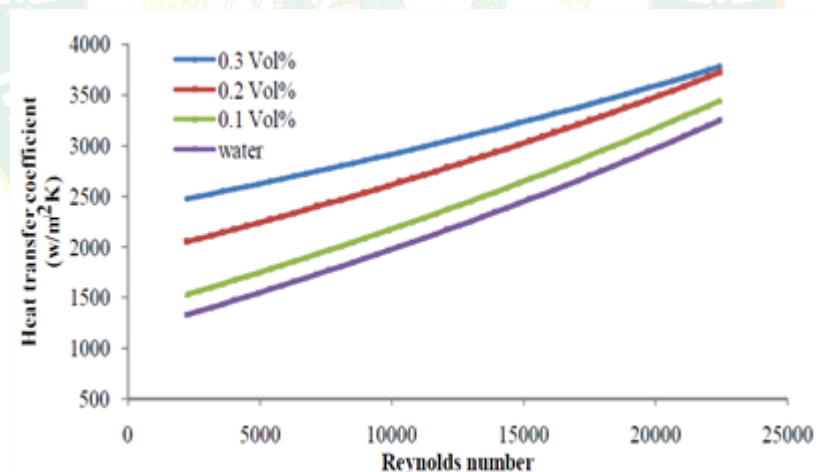
Senthilraja และ Vijayakumar (Senthilraja and Vijayakumar, 2013) ศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อคู่ดังแสดงในภาพที่ 13 ของ CuO/water ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค 27 nm ที่ความเข้มข้นที่แตกต่างกัน 0.1 - 0.3 vol% พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ Reynolds number หรือ อัตราการไหลมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ความเข้มข้น 0.3 vol% มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุด โดยที่



ค่า Reynolds number ประมาณ 2,300 กรณีที่ใช้ของไหลนาโน CuO/water ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นจากกรณีที่ใช้น้ำประมาณ 18.75 % เมื่อเฉลี่ยตลอดช่วงของค่า Reynolds number พบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเฉลี่ยประมาณ 55.53% ดังแสดงในภาพที่ 14



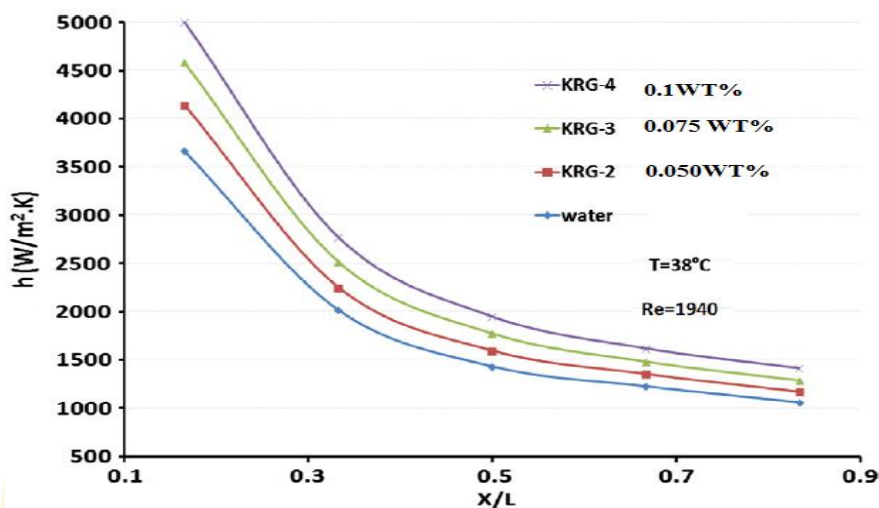
ภาพที่ 13 ไดอะแกรมระบบที่ใช้ในการทดสอบ (Senthilraja and Vijayakumar, 2013)



ภาพที่ 14 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโน CuO/water (Senthilraja and Vijayakumar, 2013)

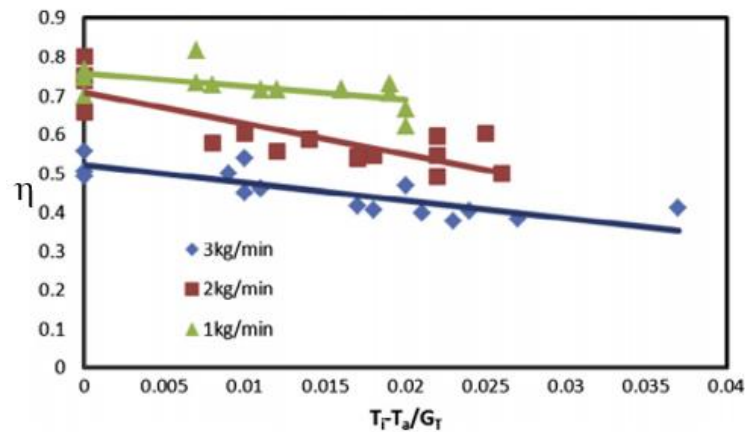
Ghozatloo และคณะ (Ghozatloo et al., 2014) ทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนของของไหลการฟิโนนาโน เพื่อพัฒนาพฤติกรรมพาความร้อนให้สูงขึ้นผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อภายใต้การไหลแบบราบเรียบ โดยของไหลการฟิโนนาโนจะถูกเตรียมขึ้นด้วยวิธี CVD method โดยมีความเข้มข้น 3 ค่าคือ 0.050 0.075 และ 0.1

wt% และศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนด้วยวิธีใช้วิธี SEM และ Raman spectroscopy จากการศึกษาได้พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลกราฟีนนาโนขึ้นอยู่กับของไหลในส่วนช่องทางเข้าภายใต้การไหลแบบราบเรียบ โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสามารถเพิ่มขึ้นได้ถึง 35.6% ที่ความเข้มข้น 0.1 wt% ที่อุณหภูมิ 38 °C เมื่อเทียบกับน้ำบริสุทธิ์ แสดงดังภาพที่ 15

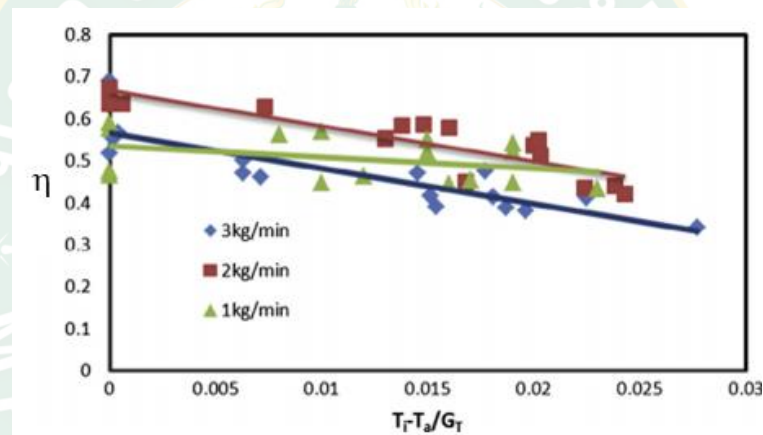


ภาพที่ 15 แสดงสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในแต่ละความเข้มข้น

Moghadam และคณะ (Moghadam et al., 2014) ศึกษาถึงผลของของไหลนาโน CuO/water ที่มีต่อประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ ในการทดลองใช้อุณหภูมิ 40 nm ความเข้มข้น 0.4 wt% โดยการควบคุมอัตราการไหลเชิงมวลที่แตกต่างกัน 1-3 kg/min จากผลการทดสอบพบว่า อุณหภูมิของไหลเชิงมวลที่ 1 kg/min ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อเทียบกับอัตราการไหล 2 kg/min และ 3 kg/min ดังแสดงในภาพที่ 16 ส่วนกรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานพบว่า ที่อัตราการไหล 2 kg/min ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุด ดังแสดงในภาพที่ 17 และเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างสารทำงานที่ใช้น้ำและสารทำงานที่ใช้ของไหลนาโน CuO/water พบว่าของไหลนาโน CuO/water ให้ค่าประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อนที่สูงกว่ากรณีที่ใช้น้ำ โดยที่อัตราการไหล 1 kg/min ให้ค่าประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นเท่ากับ 21.8% สูงกว่ากรณีใช้น้ำเป็นสารทำงาน

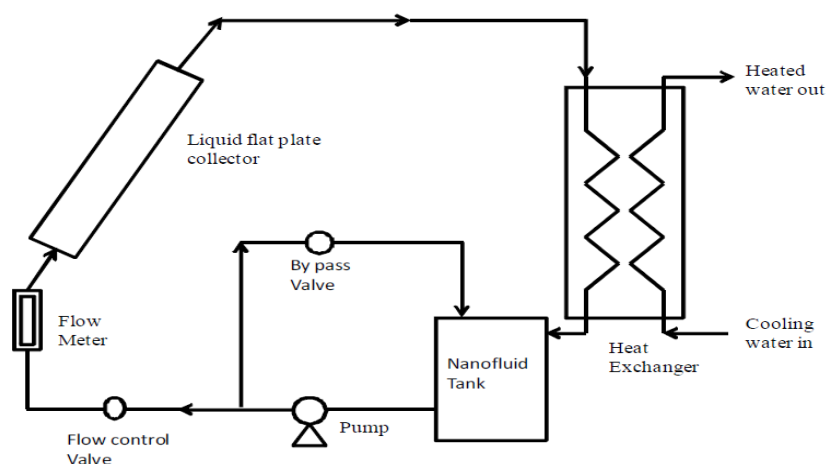


ภาพที่ 16 ประสิทธิภาพของตัวเก็บพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ใช้ของไหล CuO nanofluid เป็นสารทำงานที่อัตราการไหลของมวลต่างๆ (Moghadam et al., 2014)



ภาพที่ 17 ประสิทธิภาพของตัวเก็บพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานที่อัตราการไหลของมวลต่างๆ (Moghadam et al., 2014)

Lazarus และคณะ (Lazarus et al., 2015) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของ Silver Nanofluid ในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ โดยใช้สารทำงาน Silver/Water Nanofluid ที่ความเข้มข้น 0.01-0.04% เทียบกับน้ำ และทำการทดสอบที่มาตรฐานของ ASHRAE STANDARD 93-2003 ซึ่งมีรูปแบบของระบบดังภาพที่ 18 โดยพบว่าที่ความเข้มข้น 0.04% ของสารละลาย Silver Nanofluid ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ได้ค่า  $F_R (\tau \alpha)_e$  เท่ากับ 0.7042 เพิ่มขึ้นเทียบกับน้ำที่ได้เท่ากับ 0.67 และค่า  $F_{R,U}$  เท่ากับ  $4.04 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  ลดลงเมื่อเทียบกับน้ำที่ได้  $6.75 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  แสดงดังตารางที่ 4



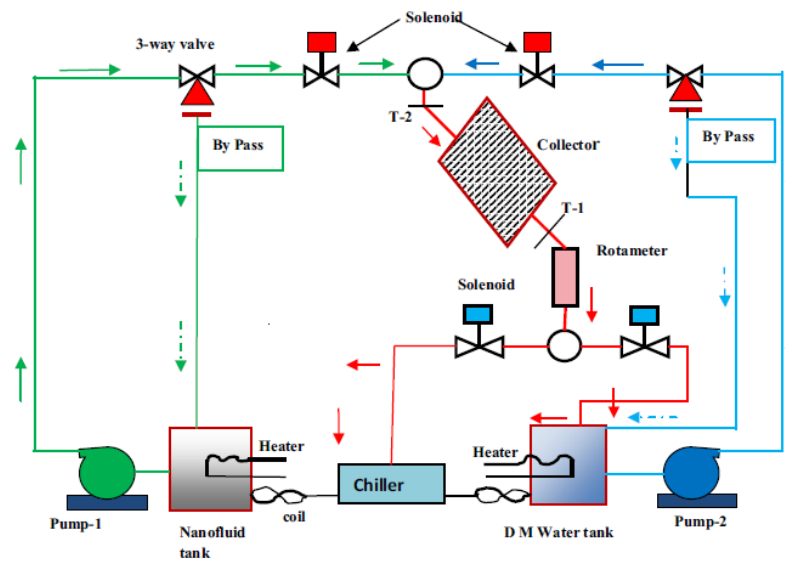
ภาพที่ 18 ชุดทดสอบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของ Silver Nanofluid (Lazarus et al., 2015)

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบค่า  $F_R(\tau\alpha)_e$  และ  $F_R U_L$  (Lazarus et al., 2015)

สารทำงาน	$F_R(\tau\alpha)_e$	$F_R U_L$ (W/m <sup>2</sup> K)
Water	0.67	6.75
0.01% Silver/Water Nanofluid	0.7212	5.02
0.02% Silver/Water Nanofluid	0.7103	4.89
0.03% Silver/Water Nanofluid	0.7042	4.04

Verma และคณะ (Verma et al., 2017) ศึกษาประสิทธิภาพทางพลังงานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบขนาด 0.375 m<sup>2</sup> โดยใช้ของไหลนาโนเป็นสารทำงาน ทำการศึกษาที่อัตราการไหล 0.025 kg/s ที่ความเข้มข้นของของไหลนาโน 0.75% ของปริมาณความเข้มข้นของอนุภาค โดยมีลักษณะของการทำงานของระบบดังแสดงในภาพที่ 19 ทำการศึกษาประสิทธิภาพของเอ็กเซอร์จี การลดลงของเอ็นโทรปี และประสิทธิภาพทางพลังงานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ โดยจากการศึกษาพบว่า Multi walled carbon nanotube/water ให้ประสิทธิภาพของเอ็กเซอร์จีเพิ่มขึ้นมากที่สุด 29.32% ตามด้วย Graphene/water 21.46% Copper oxide/water 16.67% Aluminum oxide/water 10.86% Titanium oxide/water 6.97% และ Silicon oxide/water 5.74% ตามลำดับ ในส่วนของการลดลงของเอ็นโทรปี พบว่า Multiwalled carbon nanotube/water มีการลดลงมากที่สุด 65.55% ตามด้วย Graphene/water 57.89% Copper oxide/water 48.32% Aluminum/water 36.84% Titanium oxide/water 24.49% และ Silicon oxide/water 10.04% ตามลำดับ ในส่วนของการศึกษาประสิทธิภาพทางพลังงานของตัวเก็บรังสี

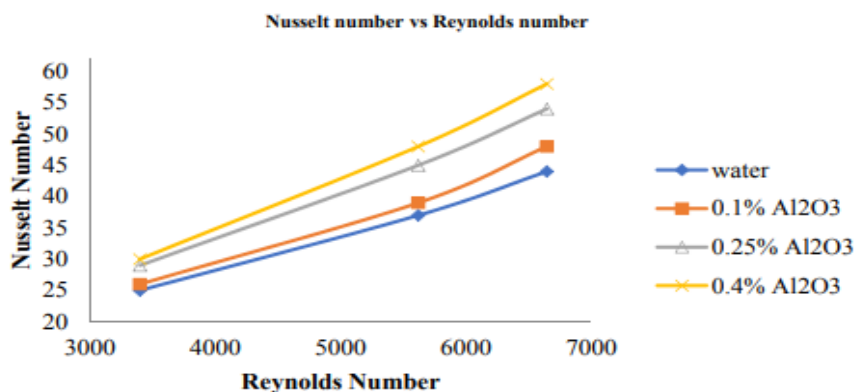
อาทิตยแบบแผ่นเรียบที่ใช้ของไหลนาโนเป็นสารทำงานพบว่า Multiwalled carbon nanotube/water ให้ประสิทธิภาพมากที่สุดที่ 23.47% ตามด้วย graphene/water 16.97% Copper Oxide/water 12.64% Aluminum oxide/water 8.28% Titanium oxide/water 5.09% และ Silicon oxide/water 4.08% ตามลำดับ



ภาพที่ 19 ลักษณะการทำงานของระบบ

Naseemaa และคณะ (NawazishMehdia et al., 2018) ทำการศึกษาการเพิ่มสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้ของไหล  $Al_2O_3$  เป็นสารทำงาน โดยมีน้ำเป็นของไหลฐาน ที่มีความเข้มข้นโดยปริมาตร 0.1% 0.25% และ 0.4%. โดยมี Reynolds number ที่แตกต่างกันในการไหลแบบปั่นป่วน พบว่า เมื่อความเข้มข้นของของไหลนาโน และ Reynolds number เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า Nusselt number เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในภาพที่ 20 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้นของ  $Al_2O_3$  เท่ากับ 0.4% ให้ค่า Nusselt number สูงที่สุด ตามด้วยความเข้มข้น 0.25% 0.1% และ น้ำ ตามลำดับ โดยที่ Reynolds number ประมาณ 6700 ส่งผลให้ค่า Nusselt number เพิ่มขึ้นประมาณ 31.81%





ภาพที่ 20 ผลของ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่ความเข้มข้น 0.1% - 0.4% ต่อเลขนัสเซลท์เปรียบเทียบกับน้ำ

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ลำดับ	ผู้วิจัย	การนำไปใช้ในงานวิจัย
1	Polvongsri และ Kiatsiriroat, 2011	ศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ
2	Yu และคณะ, 2011	การศึกษาสมบัติด้านการนำความร้อนของของไหลกราฟีนนาโนและกราฟีนออกไซด์
3	Yousefi และคณะ, 2012	ศึกษาผลของของไหลนาโนต่อตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ
4	Senthilraja และ Vijayakumar, 2013	ศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในท่อทองแดง
5	Ghozatloo และคณะ, 2014	สมบัติด้านความร้อนของของไหลกราฟีนนาโนภายในท่อทองแดงที่พันด้วยขดลวดไฟฟ้า
6	Moghadam และคณะ, 2014	ศึกษาผลของการไหลของของไหลนาโนต่อตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ
7	Lazarus และคณะ, 2015	ศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ
8	Verma และคณะ, 2017	ศึกษาประสิทธิภาพทางพลังงานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ
9	NawazishMehdia และคณะ, 2018	ศึกษาการเพิ่มสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้ของไหลนาโนเป็นสารทำงาน

### บทที่ 3

## วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ

ในงานวิจัยการศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบโดยใช้ของไหลกราฟีนนาโนมีสารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการประกอบ ตรวจสอบ และวัดผลการทดลอง มีดังนี้

### วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือ

สารเคมี ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 รายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ที่	ชื่อ	บริษัท	ลักษณะ	การใช้งาน	รูป
1.	อนุภาคกราฟีนนาโน (Graphene nanoplatelets aggregates)	Alfa Aesar	เป็นผงละเอียดสีดำ	ใช้สำหรับผสมกับน้ำกลั่นเพื่อใช้เป็นสารทำงานในระบบ	
2.	น้ำกลั่น (Distilled water)	บริษัทเพียวริตี้ (100%)	มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีกลิ่น เป็นน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูงและปราศจากไอออน	นำมาใช้เป็นของไหลฐานและใช้ในการผสมกับอนุภาคนาโนเพื่อเป็นสารทำงานในระบบ	

อุปกรณ์ ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 7


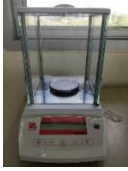

ตารางที่ 7 รายละเอียดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



ลำดับ	ชื่อ	การใช้งาน	รูป
1.	บีกเกอร์	ใช้สำหรับตวงของเหลวสำหรับใช้ในการเตรียมสารทำงานในขั้นตอนผสมสาร	
2.	ช้อนตักสาร	ใช้สำหรับตักกราฟีนนาโนในขั้นตอนผสมสาร	
3.	เครื่องล้างความถี่สูง (Ultrasonic Cleaner)	ใช้สำหรับผสมสารทำงานให้มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ	
4.	หน้ากากกันสารเคมี	ใช้สำหรับใส่เมื่อต้องทำการชั่งหรือตวงสารทำงานที่ส่งผลต่อจมูก	
5.	ไขควง	ใช้ในการถอดประกอบอุปกรณ์บันทึกข้อมูล	
6.	ปลั๊กสายเทอร์โมคัปเปิล	ใช้ในการต่อระหว่างสายเทอร์โมคัปเปิลกับเครื่องบันทึกข้อมูล	
7.	สายเทอร์โมคัปเปิล	ใช้ในการส่งสัญญาณจากจุดวัดอุณหภูมิเข้าไปยังเครื่องบันทึกข้อมูล	
8.	ฉนวนยางดำ	ใช้ป้องกันการสูญเสียความร้อนภายในระบบ	
9.	ท่อทนความร้อน และข้อต่อข้องอ	ใช้เป็นท่อที่เชื่อมต่อทางเดินของสารทำงานในระบบ	

ลำดับ	ชื่อ	การใช้งาน	รูป
10.	ประแจ	ใช้ในการขันเพื่อทำความสะอาดระบบ	
11.	ฮีตเตอร์ไฟฟ้า 400 W	ใช้ในการให้ความร้อนแก่สารทำงานในถัง พักสารทำงาน	
12.	ปั้มน้ำร้อน 12 VDC	ใช้ในการไหลเวียนสารทำงานในระบบ	

เครื่องมือวัด ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 8

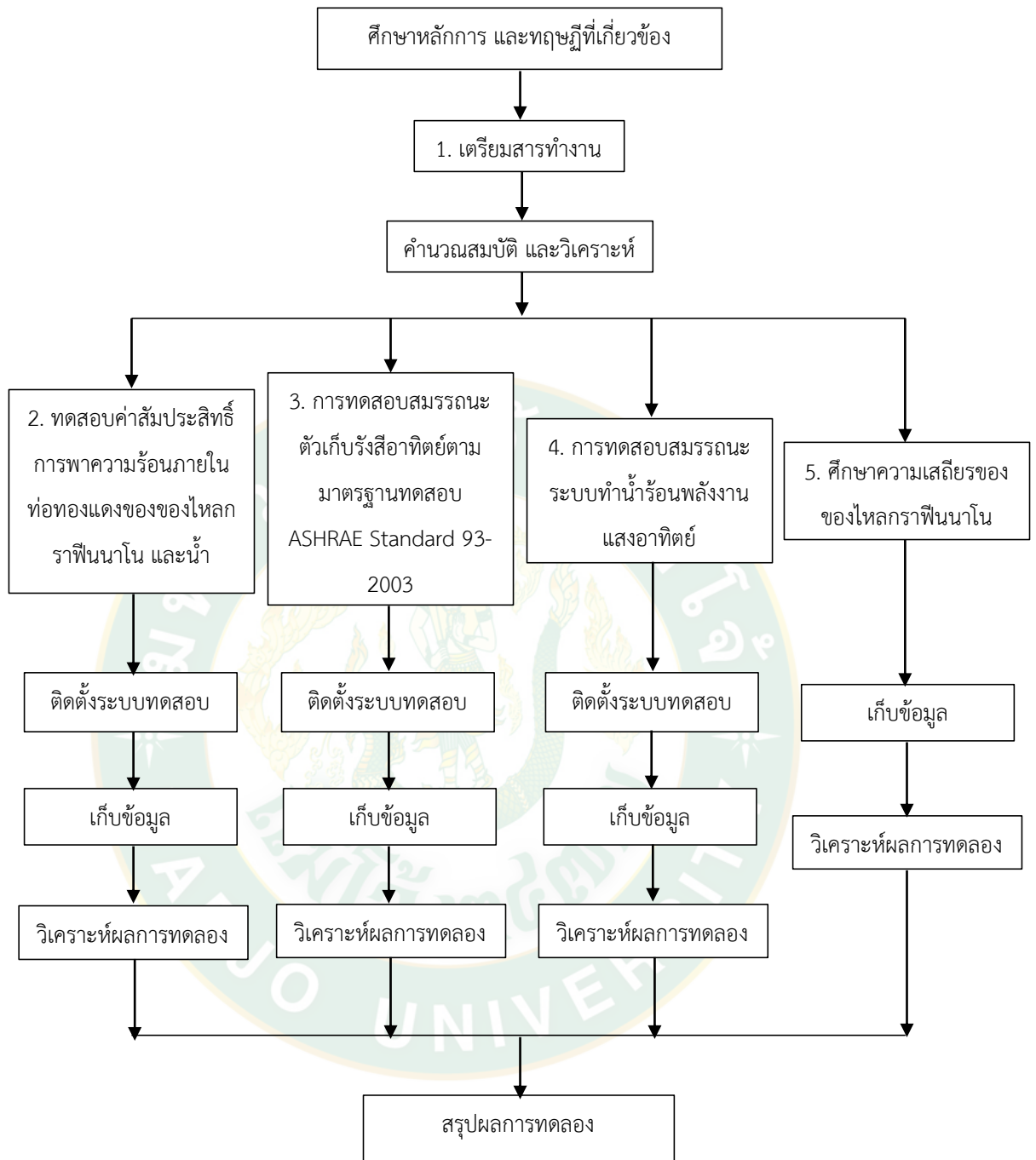
ตารางที่ 8 รายละเอียดเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง

ลำดับ	ชื่อ	รายละเอียด	รูป
1.	กระบอกตวง	ยี่ห้อ : SCHOTT ขนาด : 100 ml ความละเอียด : $\pm 1$ ml	
2.	เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง	ยี่ห้อ : OHAUS ขนาด : 0.0001 – 210 g ความละเอียด : $\pm 0.0001$ g	
3.	เครื่องวัดความเข้มรังสี อาทิติย์	ยี่ห้อ : Apogee การตอบสนองเอาต์พุต : 0.2 mV ต่อ $W/m^2$ ความไวปรับเทียบ : 5.00 $W/m^2$ ต่อ mV	

ลำดับ	ชื่อ	รายละเอียด	รูป
4.	เครื่องวัดและบันทึกข้อมูล อุณหภูมิ	ยี่ห้อ : Lutron รุ่น : TM-1947SD แบบ : 4 channels แสดงผลอุณหภูมิบนหน้าจอพร้อมกันใช้งานกับ Thermocouple Type K, J, T, E, R, S, Pt100 บันทึกข้อมูลลง SD card	
5.	เครื่องวัดอัตราการไหล	ยี่ห้อ : PLATON อัตราการไหล : 20-280 cm <sup>3</sup> /min Accuracy up to $\pm 1.6\%$ FSD	

#### วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อทองแดงของของไหลกราฟีนนาโน และน้ำ และศึกษาการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ โดยใช้ของไหลกราฟีนนาโนเปรียบเทียบกับน้ำ เนื่องจากสมบัติเด่นของของไหลนาโนที่มีความสามารถด้านความร้อนที่สูงกว่าน้ำ แต่ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของการรักษาเสถียรภาพ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาลักษณะและเวลาในการตกตะกอนของของไหลนาโนร่วมด้วย ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังแสดงในภาพที่ 21



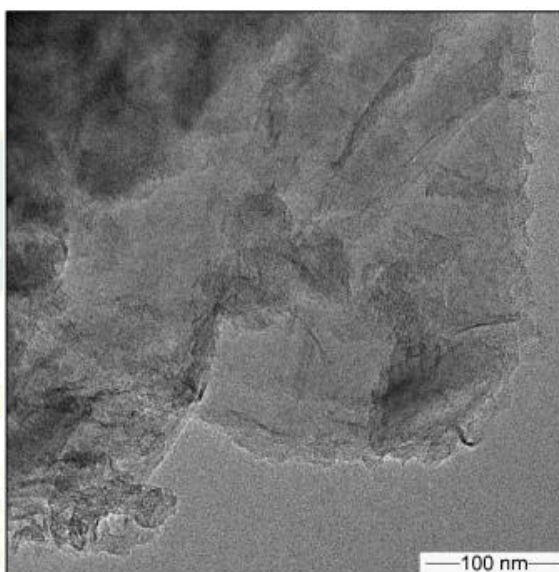
ภาพที่ 21 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 1. การเตรียมสารทำงาน

ลักษณะทั่วไปของอนุภาคกราฟีนนาโนจะมีลักษณะเป็นแผ่นกราฟีนเป็นคาร์บอนอะตอมที่มีการจัดเรียงตัวแบบหกเหลี่ยมคล้ายกับวงแหวนเบนซีนต่อเนื่องกันไปโดยมีรูปแบบคล้ายกับรังผึ้ง กราฟีนมีความหนาเพียงชั้นอะตอมเดียวเท่านั้น โดยมีลักษณะทั่วไปดังแสดงในภาพที่ 22 โดยใช้



เทคนิคภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน TEM วิเคราะห์ด้วยภาพชนิด Bright-field (BF-TEM) ปรากฏลักษณะของอนุภาค กราฟีนนาโนเป็นแผ่น ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับของเหลวตัวกลางมาก จึงเป็นลักษณะที่เหมาะสมกับการใช้งานสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการนำความร้อนของของไหลกราฟีนนาโน (เกษมณี คำอ่อง, 2561) โดยอนุภาคกราฟีนนาโนมีสมบัติพื้นฐานดังตารางที่ 9



ภาพที่ 22 ลักษณะของอนุภาคกราฟีนนาโนจากเทคนิค TEM (เกษมณี คำอ่อง, 2561)

ตารางที่ 9 สมบัติทั่วไปของอนุภาคกราฟีนนาโนและน้ำ (Ghozatloo et al., 2014)

ที่	สมบัติ	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	k [W/m.K]	Cp [J/kg.k]
1.	อนุภาคกราฟีนนาโน (Graphene nanoplatelets)	2620 (Yu et al., 2011)	5000 (Baby and Ramaprabhu, 2010)	790 (Mounet and Marzari, 2005)
2.	น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water) ที่ 30 °C	995.61	0.614	4180.08

ในการเตรียมของไหลนาโนโดยทั่วไปจะแบ่งได้ 2 วิธีคือ One-step method และ Two-step method โดยวิธี One-step method ทำได้โดยการให้ความร้อนกับอนุภาคของโลหะ ภายในห้องสุญญากาศ (Vacuum Chamber) เพื่อให้โลหะกลายเป็นไอโดยที่ในห้องสุญญากาศนั้นจะมีของ

ไหลสำหรับหล่อเย็นอยู่บริเวณผนังด้านในของห้อง เมื่อไอของโลหะมาสัมผัสกับของไหลหล่อเย็นจะเกิดการควบแน่น ก่อให้เกิดเป็นอนุภาคทรงกลมกระจายอยู่ภายในของไหลหล่อเย็น วิธีนี้จะทำให้ได้อนุภาคขนาดเล็ก ไม่มีการเกาะกันของอนุภาค อนุภาคกระจายตัวได้ดี แต่มีข้อเสียตรงที่ยากต่อการขยายขนาดสำหรับการประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ส่วนวิธี Two-step method จะแบ่งเป็นสองขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกจะเป็นการเตรียมอนุภาคของแข็ง ขั้นตอนที่สองจะเป็นการกระจายตัวของอนุภาคของแข็งลงในของเหลวตัวกลาง โดยวิธีนี้จะทำได้ง่าย ราคาไม่แพง มีการเกาะกันของอนุภาคเล็กน้อย (วิเชษฐ์ ละมัย และ เอกรัตน์ วงษ์แก้ว, 2558)

ในการทดลองนี้ใช้วิธีเตรียมของไหลกราฟีนนาโนด้วยวิธี Two-step method ซึ่งกราฟีนนาโนมีขนาดอนุภาคประมาณ  $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m} \times 2 \text{nm}$  (เกษมณี คำอ่อง, 2561) โดยการเตรียมสารทำงานจะใช้สารทำงานที่ความเข้มข้น 0.05wt% 0.075wt% และ 0.1wt% ซึ่งใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นของเหลวพื้นฐาน

- 1) ทำการชั่งผงกราฟีนนาโน 1.5 g 2.25 g และ 3 g ตามลำดับ เพื่อใช้เตรียมสารทำงานที่ความเข้มข้น 0.05wt% 0.075wt% และ 0.1wt%
- 2) ใช้น้ำปราศจากไอออนใช้เป็นของเหลวฐาน 3 ลิตร ต่ออนุภาคกราฟีนนาโน 1 ความเข้มข้น และผสมน้ำปราศจากไอออนกับอนุภาคกราฟีนนาโนที่เตรียมไว้ในเครื่องอัลตราโซนิก Cleaner VGT-1990QTD
- 3) ทำการผสมสารทำงานเป็นเวลา 90 นาที โดยทำการผสม 30 นาที หยุด 10 นาที โดยใช้เครื่องอัลตราโซนิก Cleaner VGT-1990QTD ที่ความถี่ 40 kHz กำลังไฟฟ้า 200 W เพื่อกระตุ้นให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคในระหว่างการทำงานของเครื่องจะต้องรักษาอุณหภูมิขณะผสมไม่ให้เกิน  $35 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- 4) ได้สารทำงานกราฟีนนาโนที่ความเข้มข้น 0.05wt% 0.075wt% และ 0.1wt% ตามลำดับ

หลังจากทำการเตรียมสารทำงานจะทำการคำนวณหาค่าสมบัติของสารทำงานเพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าความหนาแน่นซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 23 ความจุความร้อนจำเพาะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 24 ค่าการนำความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 19-22 และความหนืดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 25

ตารางที่ 10 สมบัติทั่วไปของสารทำงานที่อุณหภูมิ 30 °C

ที่	สมบัติ	ความเข้มข้น (wt%)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	K (W/m·K)	Cp (J/kg·K)	$\mu \cdot 10^{-6}$ (Pa.s)
1	ของไหลกราฟีนนาโน	0.05	995.92	0.629	4,179.44	798.34
		0.075	996.07	0.636	4,179.11	798.90
		0.1	996.23	0.643	4,178.79	799.46
2	น้ำกลั่น (Distilled water)	-	995.61	0.614	4,180.08	797.22

## 2. การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อทองแดงของของไหลกราฟีนนาโน และน้ำ

ในขั้นตอนของการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อทองแดง มีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังนี้

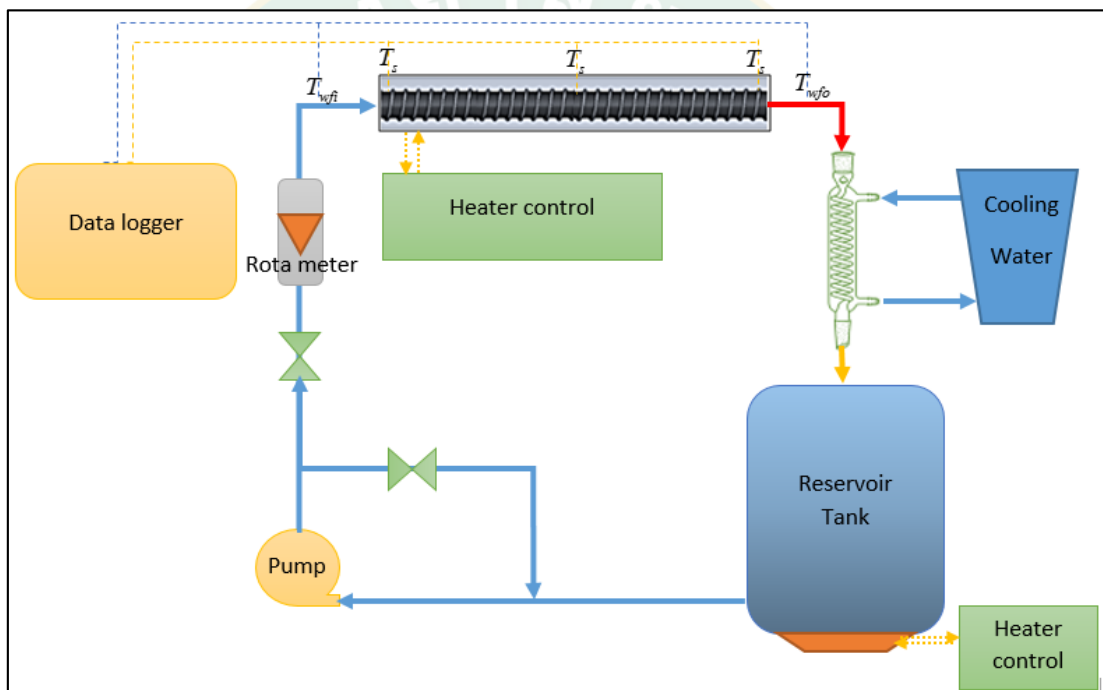
- 1) เตรียมสารทำงานที่ความเข้มข้น 0.050wt% 0.075wt% และ 0.100wt%
- 2) ใช้ปั๊มสารทำงานในการหมุนเวียนสารทำงานในระบบ ทำการปรับอัตราการไหลทั้งหมด 3 อัตราการไหล คือ ที่อัตราการไหล 120 cm<sup>3</sup>/min 170 cm<sup>3</sup>/min และ 220 cm<sup>3</sup>/min
- 3) อุณหภูมิสารทำงานก่อนเข้าท่อทองแดง จะถูกปรับอุณหภูมิในถังพักสารทำงานขนาด 3 liter ให้มีอุณหภูมิตั้งที่ 35 °C 45 °C 55 °C และ 65 °C ซึ่งจะถูกควบคุมโดยฮีตเตอร์ชนิดแผ่นได้ถึงพักสารทำงาน
- 4) ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 8 mm หุ้มฉนวนและให้ความร้อนคงที่สม่ำเสมอทั่วทั้งท่อ จากขดลวดไฟฟ้าที่พันรอบท่อทองแดงขนาด 80 W
- 5) เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่จะทำการบันทึกข้อมูลของอุณหภูมิสารทำงานเข้าและออก รวมทั้งอุณหภูมิของผิวภายนอกของท่อทองแดง เป็นเวลา 10 min เพื่อนำไปคำนวณหาค่าสมบัติทางความร้อนของสารทำงาน ซึ่งมีลักษณะของชุดทดสอบและจุดเก็บข้อมูลดังแสดงในภาพที่ 23

-การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convective heat transfer coefficient,  $h_c$ ) ของของไหลนาโนภายในท่อทองแดงเกิดจากการถ่ายเทความร้อนที่ผนังด้านนอกโดยการนำความร้อนผ่านผิวของท่อทองแดงสู่ผนังด้านใน และจะเกิดการพาความร้อนสู่สารทำงาน โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นสามารถหาได้จากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสารทำงานที่เข้าท่อทองแดง ดังแสดงใน

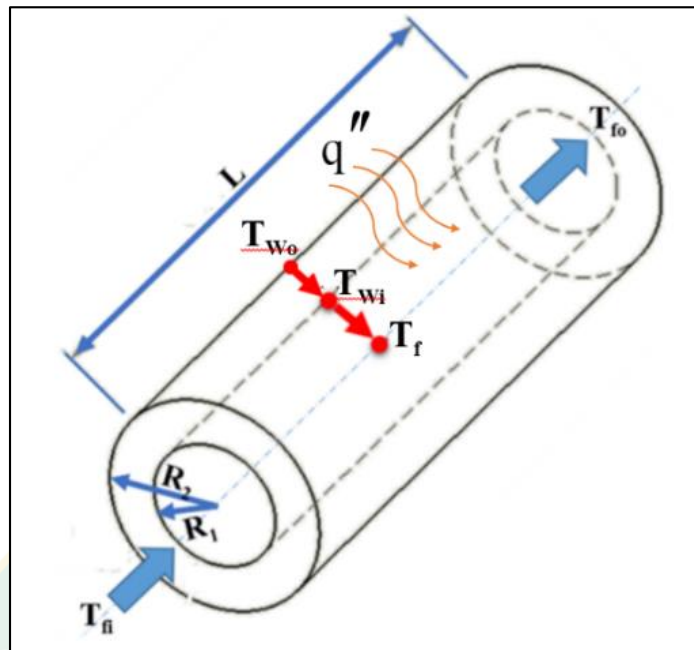
ภาพที่ 24 ซึ่งต้องทำการวัดอุณหภูมิผนังท่อทองแดง อุณหภูมิสารทำงานเข้าและออกท่อทองแดง และอัตราการไหลของสารทำงาน เพื่อวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนดังสมการที่ 18

- ความร้อนที่ของไหลกราฟีนานาได้รับที่อุณหภูมิเริ่มต้นแตกต่างกัน สามารถหาได้จากการสมการที่ 5

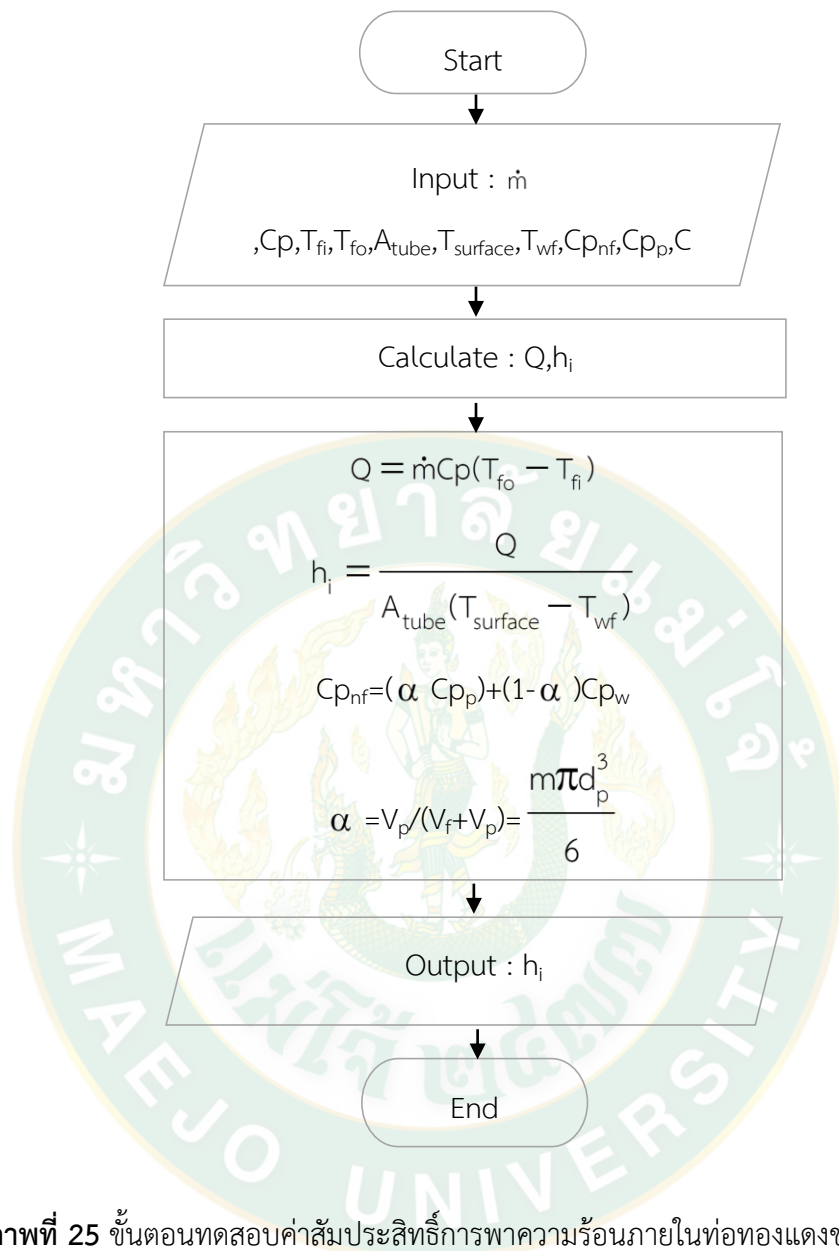
- ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากการทดลองเปรียบเทียบกับสมการ เป็นการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของสารทำงานกรณีที่ใช้ น้ำ เป็นสารทำงานเพื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดลองกับสมการว่าข้อมูลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับสมการหรือไม่ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 15 เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองจากสมการที่ 18



ภาพที่ 23 ลักษณะของชุดทดสอบและจุดเก็บข้อมูลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อทองแดง



ภาพที่ 24 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนจากผนังด้านในท่อบู่อ่างทำงานในระบบ



ภาพที่ 25 ขั้นตอนทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อทองแดงของของไหล  
กราฟีนนาโน และน้ำ

### 3. การทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐานทดสอบ ASHRAE Standard 93-2003

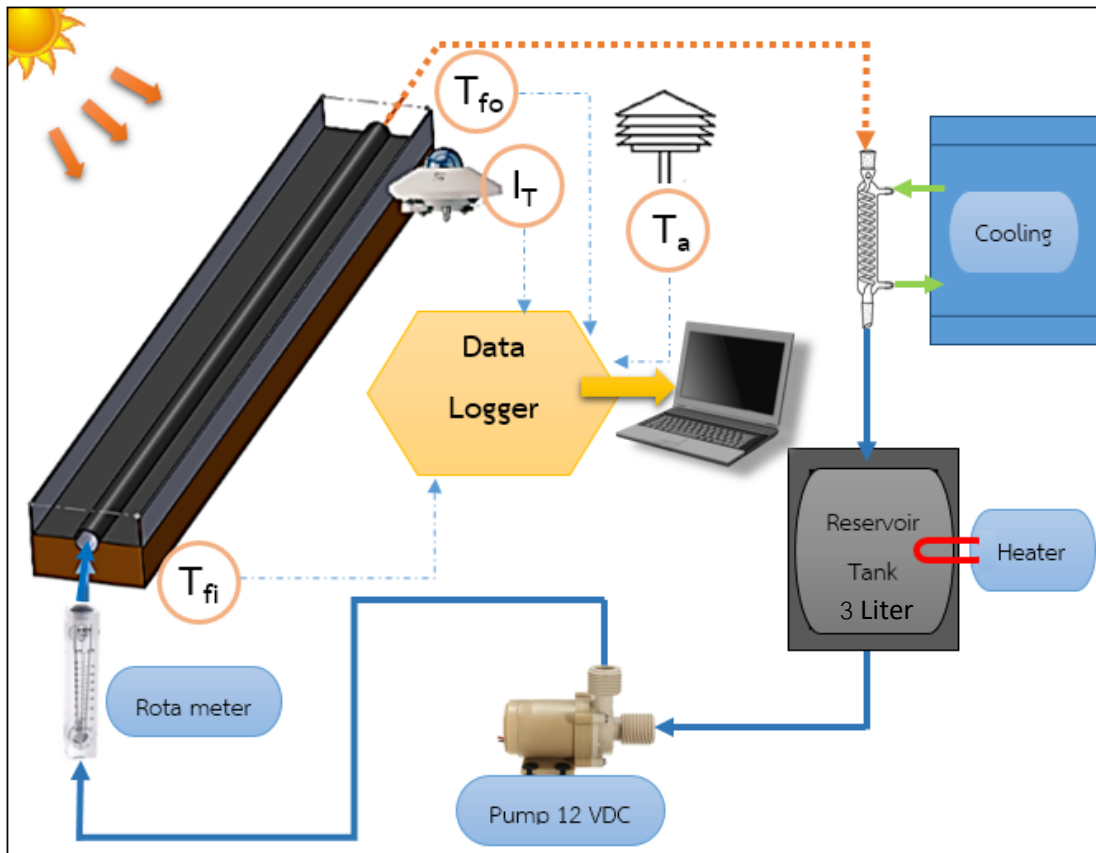
ในขั้นตอนของการทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐานทดสอบ ASHRAE Standard 93-2003 เพื่อหาค่า  $F_R(\tau\alpha)_e$  และ  $F_R U_L$  จะติดตั้งระบบตามภาพที่ 26 ซึ่งระบบจะประกอบไปด้วย ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบขนาด  $0.1 \text{ m}^2$  ( $0.1 \times 1 \text{ m}^2$ ) ติดตั้งทำมุมเอียง  $18^\circ$  ตามละติจูด หันหน้าไปทางทิศใต้ จำนวน 2 ชุด โดยชุดที่ 1 ใช้น้ำเป็นสารทำงาน ส่วนชุดที่ 2 จะใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน โดยเลือกใช้ที่ความเข้มข้นและอัตราการไหลที่ดีที่สุดจากขั้นตอน



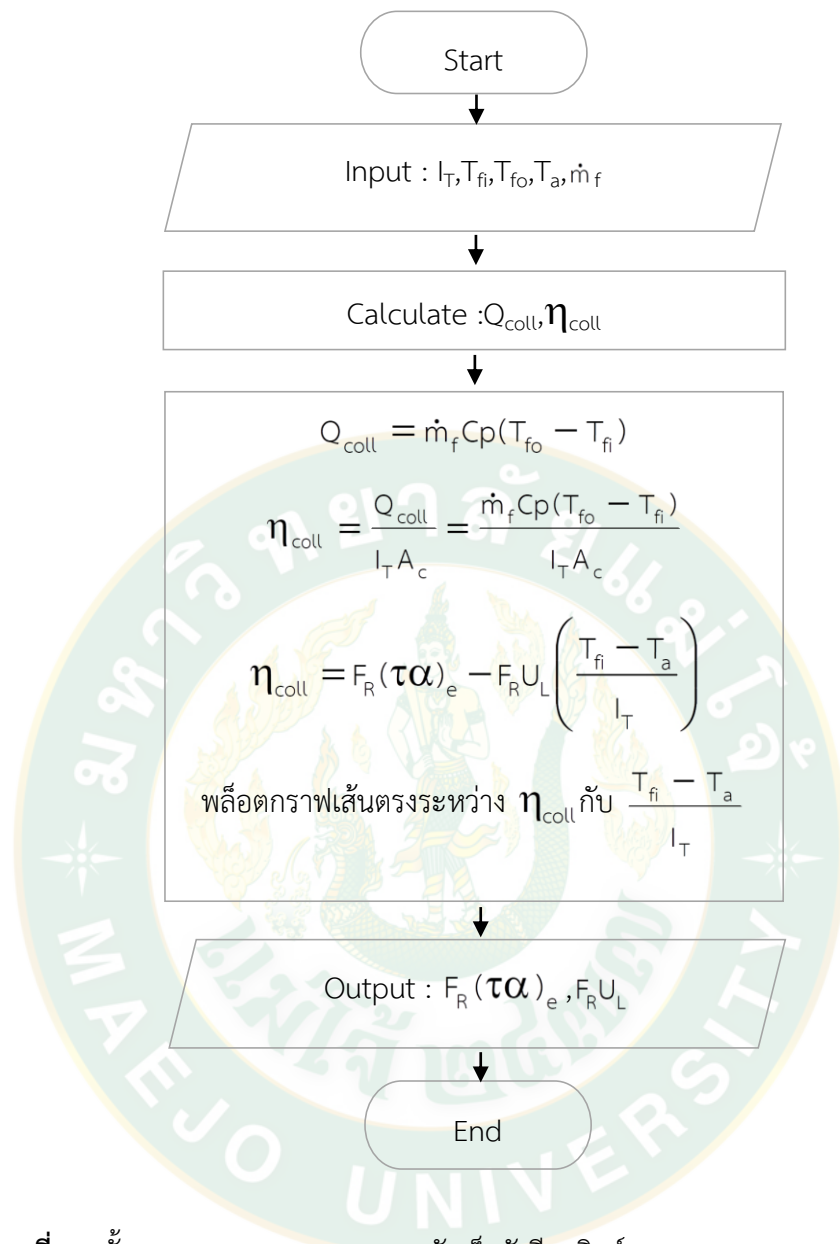
การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อทองแดง ต่อเข้ากับถังพักสารทำงานขนาด 5 liter ที่มีฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electric Heater) ขนาด 200 W ที่ติดไว้กับถังเพื่อความคุ้มครองอุณหภูมิสารทำงานตามที่ต้องการ ก่อนที่จะถูกปั๊มสารทำงานปั๊มสารทำงานผ่านเครื่องวัดอัตราการไหล โดยจะควบคุมอัตราการไหลให้คงที่ก่อนเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพื่อรับความร้อนจากแสงอาทิตย์ ทำให้อุณหภูมิสารทำงานสูงขึ้น และจะถูกดึงความร้อนออกโดยระบบระบายความร้อนแบบท่อแก้วเพื่อคุ้มครองอุณหภูมิให้ได้ตามต้องการ

การทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐานทดสอบ ASHRAE Standard 93-2003 ที่ติดตั้งชุดทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบโดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบขนาด  $0.15 \text{ m}^2$
2. ทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบตามค่ามาตรฐาน ASHRAE Standard 93-2003
  - ชุดทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ หันแผงไปทางทิศใต้ โดยเอียงทำมุมกับระนาบตามละติจูดที่ตั้งของสถานที่ทดลอง ในกรณีนี้เอียงมุม 18 องศา
  - ขณะทำการทดสอบค่ารังสีอาทิตย์ต้องมีค่า  $\geq 790 \text{ W/m}^2 \pm 32 \text{ W/m}^2$
  - ควบคุมอัตราการสูญเสียความร้อนหน้าแผงให้คงที่ โดยติดตั้งพัดลมเป่าผ่านบริเวณหน้าแผง ค่าความเร็วเฉลี่ยระหว่าง 2.2-4.5 m/s
  - ควบคุมอัตราการไหลของสารทำงานในระบบให้คงที่ที่  $220 \text{ cm}^3/\text{min}$
  - ควบคุมอุณหภูมิสารทำงานเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ด้วยขดลวดไฟฟ้าโดยอุณหภูมิในการทดสอบตั้งแต่  $35\text{-}65 \text{ }^\circ\text{C}$  เพิ่มขึ้นครั้งละ  $5 \text{ }^\circ\text{C}$
  - ระบบจะต้องเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady state condition) ก่อนทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิของไหลในถังพักสารทำงาน อุณหภูมิสารทำงานเข้าและออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม และความเข้มรังสีอาทิตย์โดยใช้ Pyranometer บันทึกข้อมูลทั้งหมดเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) ที่ต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในภาพที่ 26
3. นำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์หาสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์



ภาพที่ 26 ลักษณะการทำงานของระบบที่ใช้ทดสอบตามมาตรฐานและจุดเก็บข้อมูล



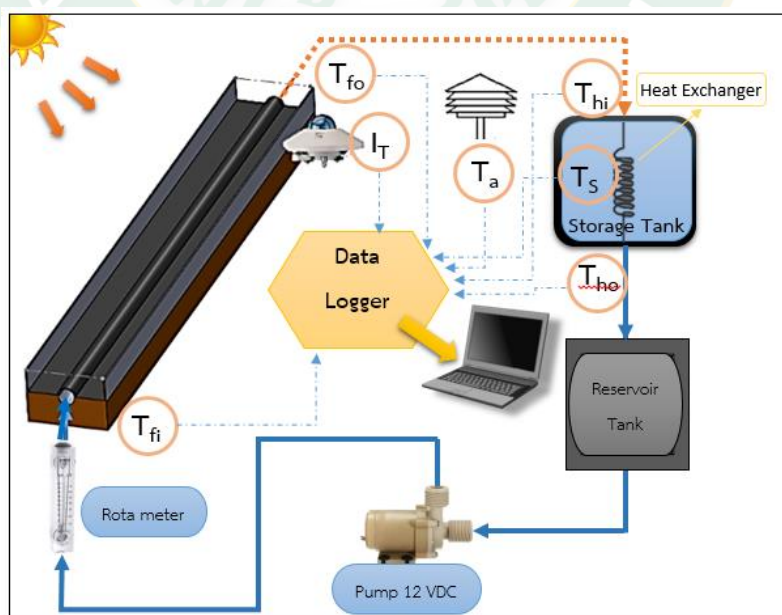
ภาพที่ 27 ขั้นตอนการทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐานทดสอบ ASHRAE Standard 93-2003

#### 4. การทดสอบสมรรถนะระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

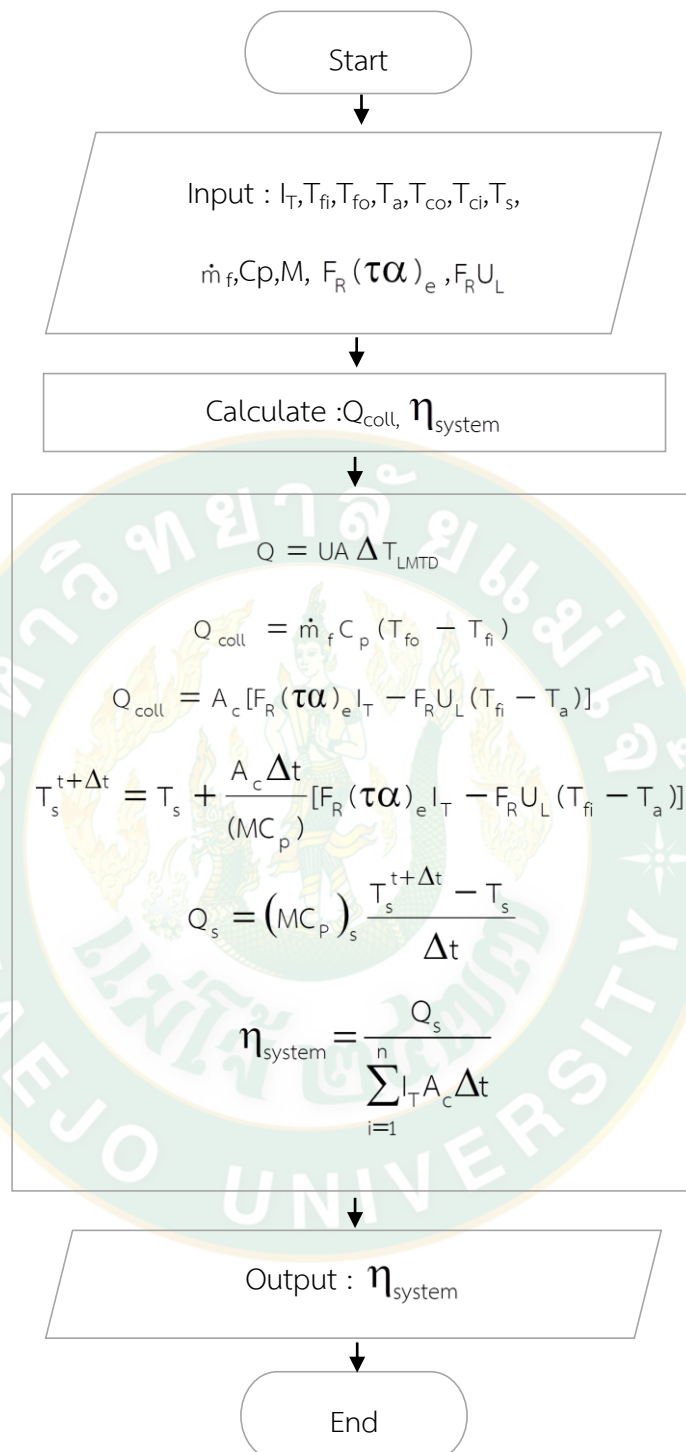
ในการทดสอบสมรรถนะระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จะต้องเพิ่มในส่วนของถังเก็บน้ำร้อนขนาด 7.5 liter ดังภาพที่ 28 ที่หุ้มฉนวนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน โดยภายในจะมีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำจากท่อทองแดงขดเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง 12 mm ยาว 1 m อยู่ภายในช่วยในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์สู่น้ำในถังเก็บน้ำร้อน โดยแบ่งการทดสอบออกเป็นสองส่วน ดังนี้

1) ทำการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมในถังเก็บน้ำร้อน (UA) โดยการเก็บบันทึกค่าอุณหภูมิสารทำงานที่เข้าและออกถังเก็บน้ำร้อน กับอุณหภูมิน้ำร้อนที่เพิ่มขึ้น เพื่อนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ของค่า (UA) กับ ผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่เข้าถังน้ำร้อนกับอุณหภูมิน้ำในถัง ( $T_{hi}-T_s$ ) ดังแสดงในภาพที่ 28

2) การทดสอบสมรรถนะระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยเริ่มทำการทดสอบที่เวลา 9:00 น. ถึง 16:00 น. ทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิสารทำงานเข้า ( $T_{fi}$ ) และออก ( $T_{fo}$ ) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน ( $T_s$ ) อุณหภูมิอากาศแวดล้อม ( $T_a$ ) และความเข้มรังสีอาทิตย์ ( $I_T$ ) โดยใช้อัตราการไหล 220  $\text{cm}^3/\text{min}$  ที่ความเข้มข้นของสารทำงานที่ 0.100wt% ทำการเก็บข้อมูลทุกๆ 5 นาที และนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการทำงานรวมของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้งานจริงทั้งวันกรณีใช้ของไหลกราฟีนนาโนและน้ำเป็นสารทำงาน ซึ่งมีขั้นตอนดังภาพที่ 29



ภาพที่ 28 ลักษณะการทดสอบสมรรถนะระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์



ภาพที่ 29 ขั้นตอนการทดสอบสมรรถนะระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

### 5.การศึกษาความเสถียรของของไหลกราฟีนนาโน

ในการศึกษาความเสถียรของของไหลกราฟีนนาโนนั้น จะทำการถ่ายรูปสารทำงานในระบบทุกๆ 40 min ขณะที่สารทำงานกำลังเคลื่อนที่ผ่าน Rotameter ที่ทำจากแก้วทำให้สามารถมองเห็นสารทำงานได้ และนำข้อมูลจากการทดลองมาหาความสัมพันธ์ของความร้อนที่ผลิตได้กับเวลาที่เปลี่ยนไปเปรียบเทียบกับน้ำ ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวจะทำพร้อมกับการทดสอบสมรรถนะระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ในวิธีทดลองหัวข้อที่ 4





## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

จากการศึกษาสมรรถนะระบบทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ของไหลกราฟีนนาโน และน้ำเป็นสารทำงาน แบ่งออกได้ 5 ส่วน

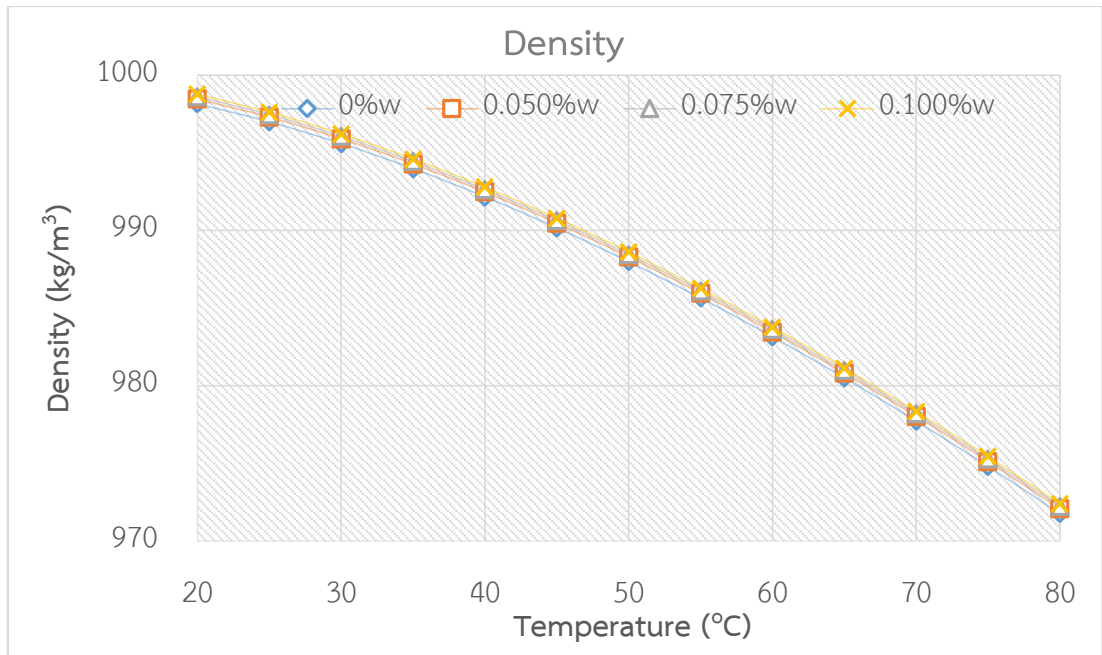
- 1.สมบัติของกราฟีนนาโน
- 2.คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อทองแดงที่ให้ความร้อนสม่ำเสมอ ใช้สารทำงานเป็นของไหลกราฟีนนาโนและน้ำ
- 3.สมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐานทดสอบ ASHRAE Standard 93-2003
- 4.สมรรถนะทางความร้อนของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
- 5.ความเสถียรของของไหลกราฟีนนาโนภายในระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

#### 1.สมบัติของกราฟีนนาโน

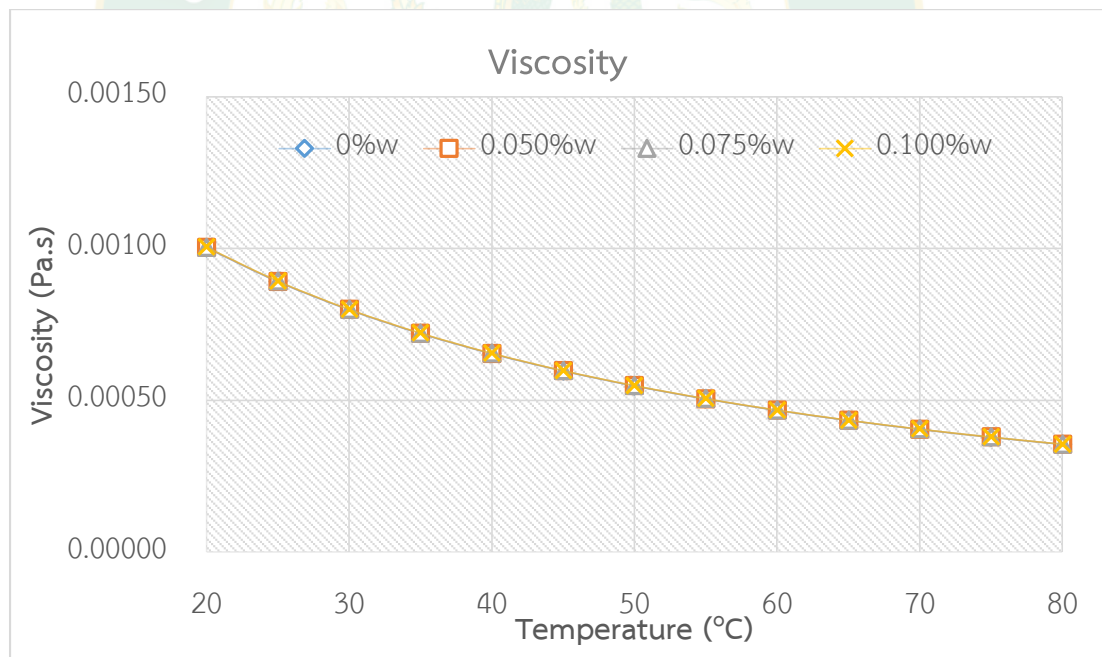
ในการทดสอบสมบัติทางความร้อนของของไหลกราฟีนนาโนนั้นสิ่งที่จำเป็นจะต้องศึกษาคือ สมบัติต่างๆในด้านความร้อนของของไหลที่อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละความเข้มข้น เช่น สมบัติของความหนาแน่น ความหนืด ค่าการนำความร้อน และค่าความจุความร้อน เป็นต้น โดยจะทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 20-80 °C โดยได้จากการคำนวณจากสมการที่ 19 ถึงสมการที่ 25

##### ค่าความหนาแน่น และค่าความหนืด

จากการคำนวณค่าความหนาแน่นจากสมการที่ 23 และค่าความหนืดจากสมการที่ 25 พบว่า ค่าความหนาแน่นและค่าความหนืดของของไหลกราฟีนนาโนมีแนวโน้มเดียวกันคือ เมื่ออุณหภูมิของของไหลกราฟีนนาโนเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าของความหนาแน่นและความหนืดมีค่าลดลงทุกความเข้มข้น และเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นมีผลให้ค่าความหนาแน่นและค่าความหนืดสูงขึ้นตามความเข้มข้นไปด้วย โดยที่ความเข้มข้น 0.100wt% ที่อุณหภูมิสารทำงาน 20 °C ให้ค่าความหนาแน่นสูงสุด 998.78 kg/m<sup>3</sup> และค่าความหนืดสูงสุด 1,004.43 μPa.s รองลงเป็นที่ความเข้มข้น 0.075wt% 0.05wt% และ 0wt% ตามลำดับ โดยพบว่าค่าความหนาแน่นและค่าความหนืดที่ความเข้มข้น 0.100wt% มีค่าเพิ่มขึ้น 0.06% และ 0.28% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับที่ความเข้มข้น 0wt% ที่อุณหภูมิ 20 °C จะเห็นได้ว่าทั้งความเข้มข้นและความหนืดมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังแสดงในภาพที่ 30 และภาพที่ 31



ภาพที่ 30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความหนาแน่น

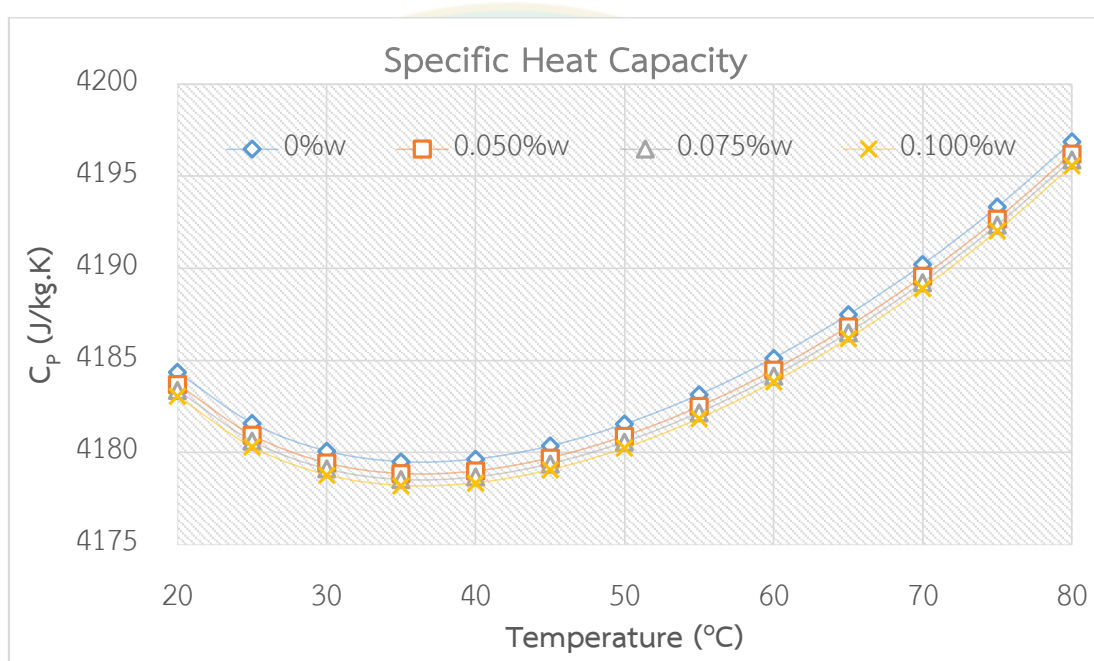


ภาพที่ 31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความหนืด

#### ค่าความจุความร้อนจำเพาะ

จากการคำนวณสมบัติของค่าความจุความร้อนจำเพาะโดยสมการที่ 24 พบว่าค่าความจุความร้อนจำเพาะจะมีค่าลดลงและเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป โดยลดลงในช่วงอุณหภูมิ

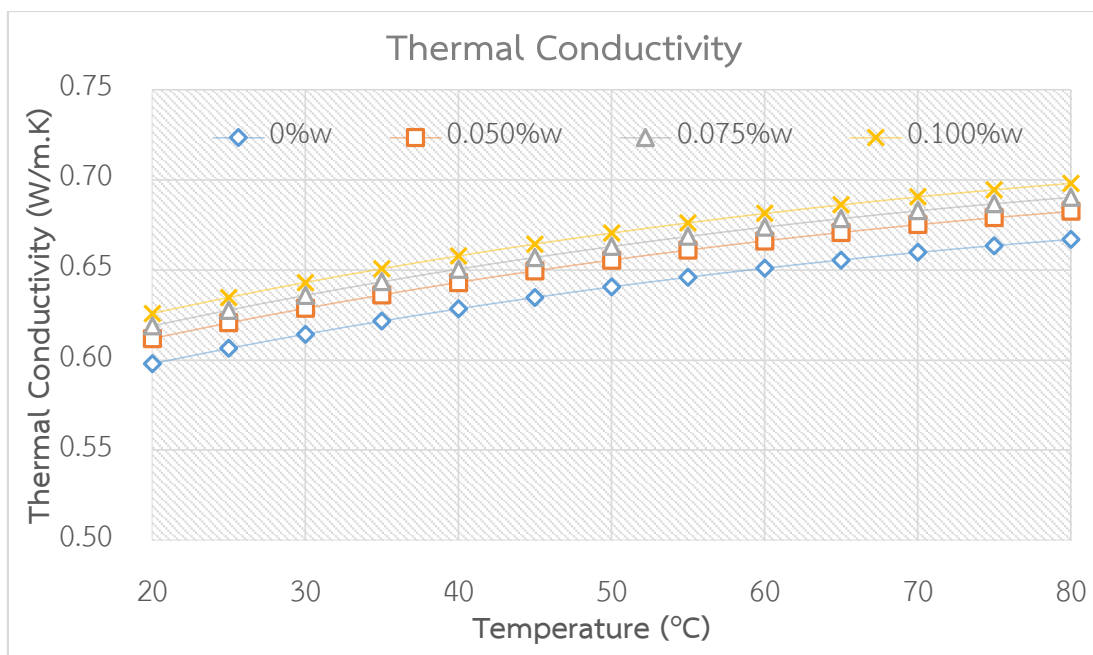
20-35 °C และเพิ่มขึ้นหลังจากนั้น และจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของของไหลกราฟีนนาโน กล่าวคือ เมื่อของไหลมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นค่าความจุความร้อนจะลดลง โดยพบว่าค่าความจุความร้อนสูงสุดจะอยู่ที่อุณหภูมิ 80 °C โดยที่ความเข้มข้น 0wt% จะให้ค่าความจุความร้อนสูงสุด 4,196.87 J/kg.K รองลงมาเป็นที่ความเข้มข้น 0.050wt% 0.075wt% และ 0.100wt% ตามลำดับ มีค่า 4,196.22 J/kg.K 4,195.89 J/kg.K และ 4,195.57 J/kg.K ตามลำดับ ดังภาพที่ 32 โดยที่ความเข้มข้น 0.100wt% มีค่าความจุความร้อนลดลง 0.03% เมื่อเปรียบเทียบกับที่ความเข้มข้น 0% ที่อุณหภูมิ 80 °C



ภาพที่ 32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าความจุความร้อน

### ค่าการนำความร้อน

จากการคำนวณสมบัติค่าการนำความร้อนโดยสมการที่ 19-22 พบว่าค่าการนำความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและความเข้มข้นของของไหลที่เพิ่มขึ้น โดยพบว่าค่าการนำความร้อนสูงสุดจะอยู่ที่อุณหภูมิ 80 °C โดยที่ความเข้มข้น 0.100wt% จะให้ค่าการนำความร้อนสูงสุด 0.698 W/m.K รองลงมาเป็นที่ความเข้มข้น 0.075wt% 0.05wt% และ 0wt% ตามลำดับ มีค่า 0.690 W/m.K 0.683 W/m.K และ 0.667 W/m.K ตามลำดับ ดังภาพที่ 33 โดยพบว่าค่าการนำความร้อนที่ความเข้มข้น 0.100wt% มีค่าเพิ่มขึ้น 4.67% เมื่อเปรียบเทียบกับที่ความเข้มข้น 0wt% ที่อุณหภูมิ 80 °C



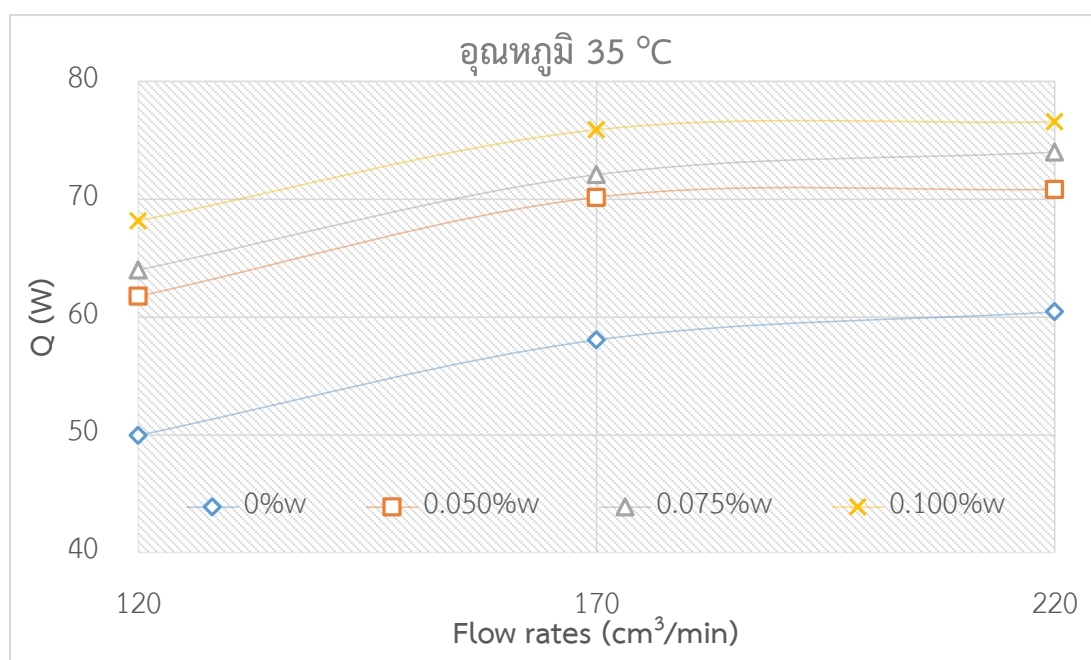
ภาพที่ 33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าการนำความร้อน

## 2.คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อทองแดงที่ให้ความร้อนสม่ำเสมอ ใช้สารทำงานเป็นของไหลกราฟีนนาโนและน้ำ

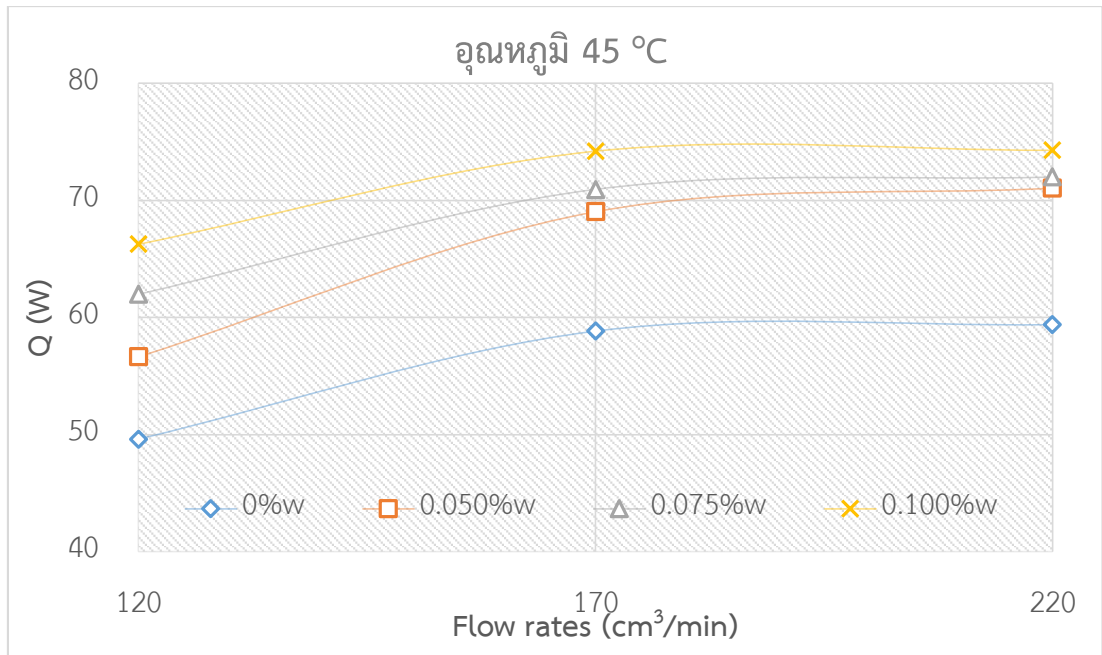
### ความร้อนที่ของไหลกราฟีนนาโนได้รับที่อุณหภูมิเริ่มต้นแตกต่างกัน

ในการทดสอบจะใช้ของไหลกราฟีนนาโนที่ความเข้มข้น 0wt% 0.05wt% 0.075wt% และ 0.1wt% ที่มีอัตราการไหลที่ใช้ในการทดสอบ 3 ค่า คือ  $120 \text{ cm}^3/\text{min}$   $170 \text{ cm}^3/\text{min}$  และ  $220 \text{ cm}^3/\text{min}$  โดยมีขดลวดไฟฟ้าให้ความร้อนสม่ำเสมอที่ผิวท่อทองแดงขนาด 80 W ซึ่งสารทำงานที่จะเข้าท่อทองแดงจะถูกปรับอุณหภูมิให้คงที่ที่  $35\text{--}65 \text{ }^\circ\text{C}$  โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าความร้อนที่สารทำงานได้รับสามารถหาได้จากการสมการที่ 5 ซึ่งสามารถดูวิธีทดลองได้ในวิธีการทดลองที่ 2 ซึ่งจากการศึกษาพบว่าค่าของความร้อนนั้นจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลและความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของสารทำงาน ซึ่งอุณหภูมิของสารทำงานที่เข้าท่อทองแดงแตกต่างกันตั้งแต่  $35\text{--}65 \text{ }^\circ\text{C}$  มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความร้อนน้อยมาก โดยที่ความเข้มข้น 0.100% และอัตราการไหล  $220 \text{ cm}^3/\text{min}$  ให้ค่าความร้อนที่สูงที่สุด  $76.57 \text{ W}$  คิดเป็น 26.68% ที่อุณหภูมิสารทำงานเข้าระบบ  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำปราศจากไอออน รองลงมาจะเป็นที่ความเข้มข้น 0.075wt% 0.050wt% และ 0wt% ตามลำดับ มีค่า  $74.00 \text{ W}$   $70.84 \text{ W}$  และ  $60.44 \text{ W}$  ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 34 (ก) เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 34 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิเริ่มต้นที่เข้าระบบมีผลต่อค่าความร้อนเพียงเล็กน้อย และเมื่ออัตราการไหลของสารทำงานกับความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้นมีผลทำให้ค่าการนำความร้อนที่เพิ่มขึ้น

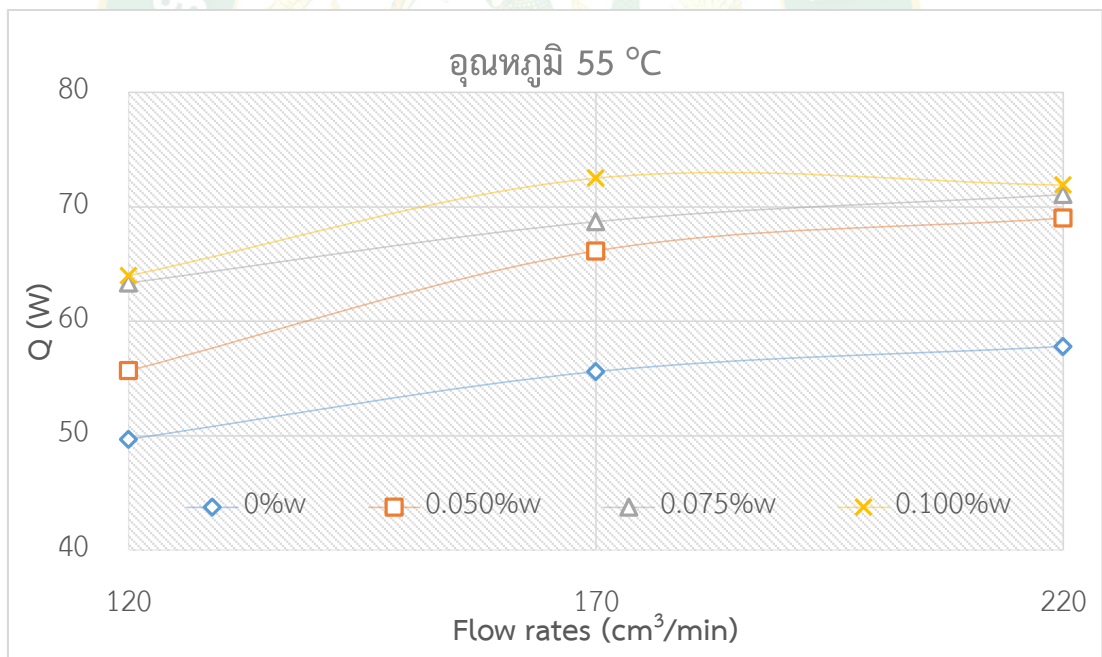
เนื่องจากผลของค่าค่าความจุความร้อนจำเพาะและอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน โดยค่าความจุความร้อนจะลดลงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นซึ่งสวนทางกับอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานที่เพิ่มขึ้นตามค่าความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น โดยค่าความจุความร้อนจำเพาะจะลดลงน้อยกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารทำงานจึงทำให้ค่าความร้อนสูงขึ้นตามไปด้วย



(ก) อุณหภูมิสารทำงานเข้าที่ห้องแดง 35 °C

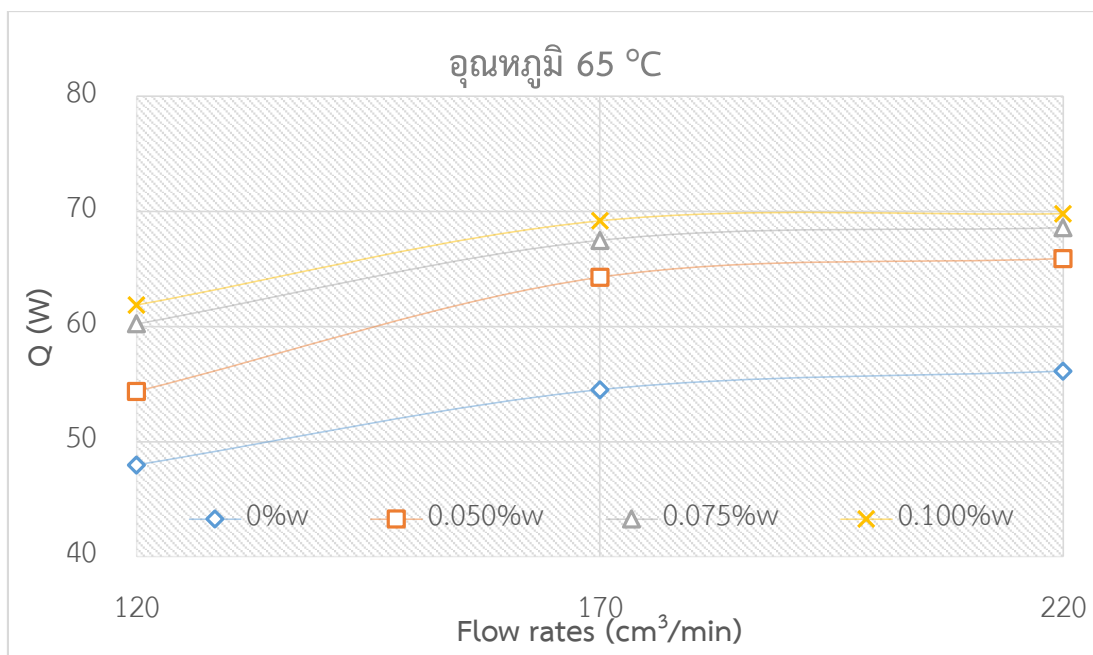


(ข) อุณหภูมิสารทำงานเข้าที่ห้องแดง 45 °C



(ค) อุณหภูมิสารทำงานเข้าที่ห้องแดง 55 °C



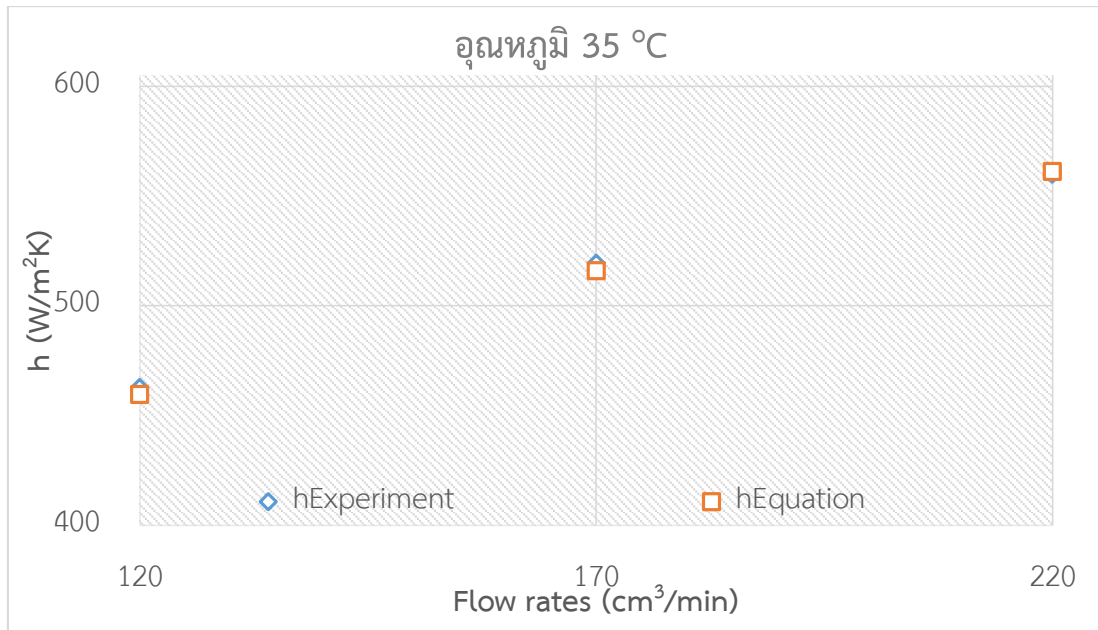


(ง) อุณหภูมิสารทำงานเข้าที่ท่อทองแดง 65 °C

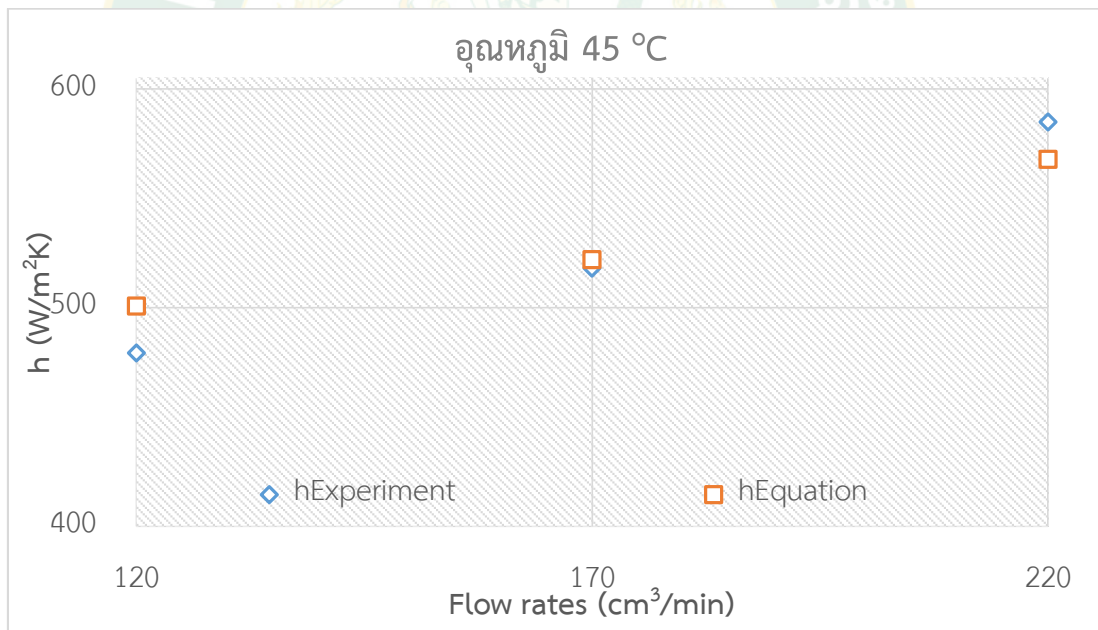
**ภาพที่ 34** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและความร้อนที่สารทำงานได้รับ

#### ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากการทดลองเปรียบเทียบกับสมการ

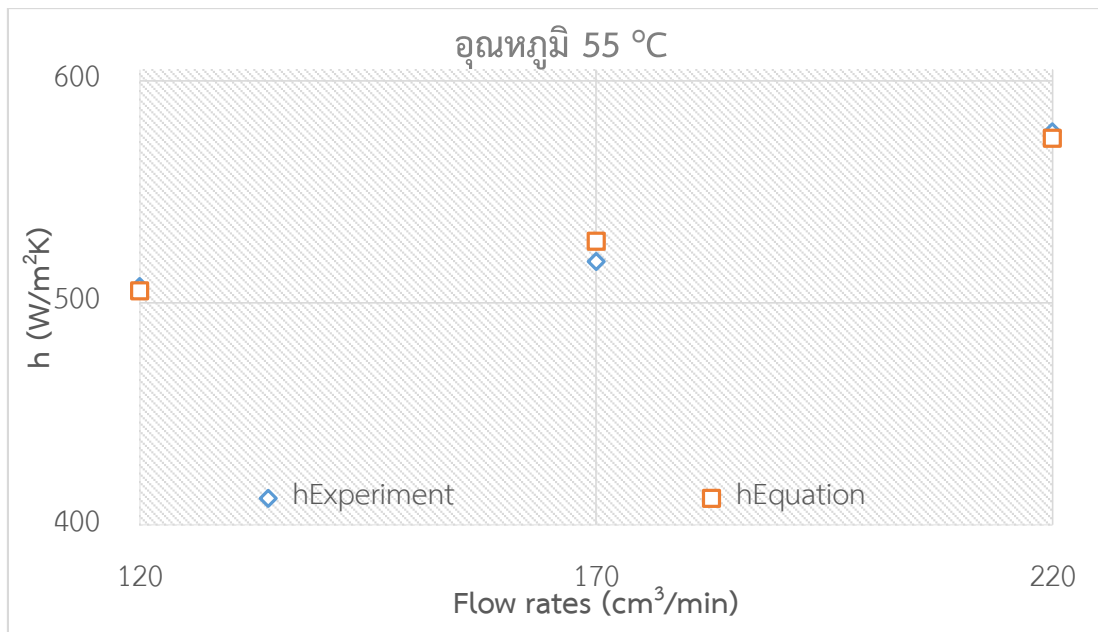
ในการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากการทดลองเปรียบเทียบกับสมการ เป็นการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของสารทำงานกรณีที่ใช้ น้ำเป็นสารทำงานเพื่อเปรียบเทียบ ข้อมูลที่ได้จากการทดลองกับสมการว่าข้อมูลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับสมการที่ได้จากทฤษฎีหรือไม่ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 15 เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองหาได้จากสมการที่ 18 จากการทดลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของสารทำงานจากสมการและจากการทดลอง นั้นมีค่าใกล้เคียงกันในทุกช่วงของอุณหภูมิสารทำงานที่เข้าระบบแสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากการทดลองมีความน่าเชื่อถือดังแสดงในภาพที่ 35



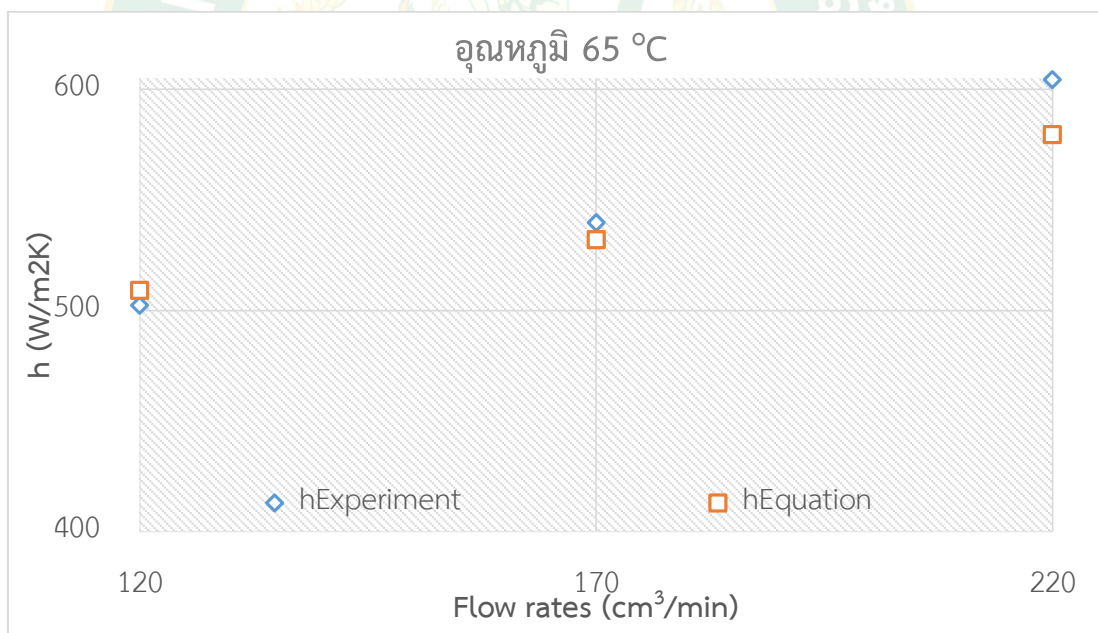
(ก) อุณหภูมิสารทำงานเข้าที่ท่อทองแดง 35 °C



(ข) อุณหภูมิสารทำงานเข้าที่ท่อทองแดง 45 °C



(ค) อุณหภูมิสารทำงานเข้าที่ท่อทองแดง 55 °C

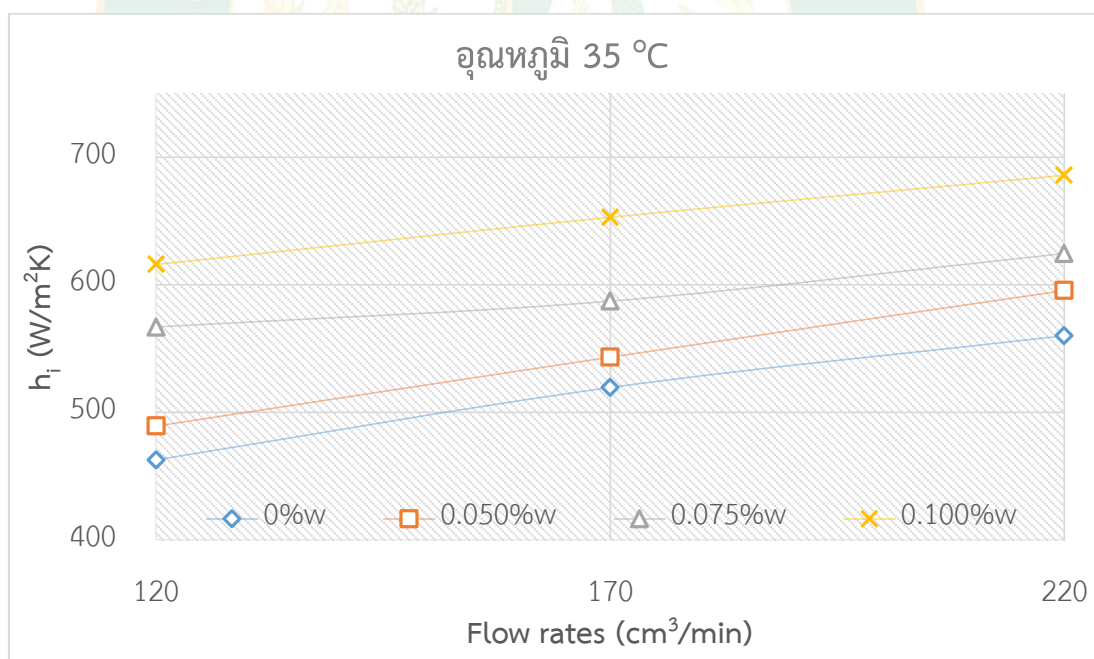


(ง) อุณหภูมิสารทำงานเข้าที่ท่อทองแดง 65 °C

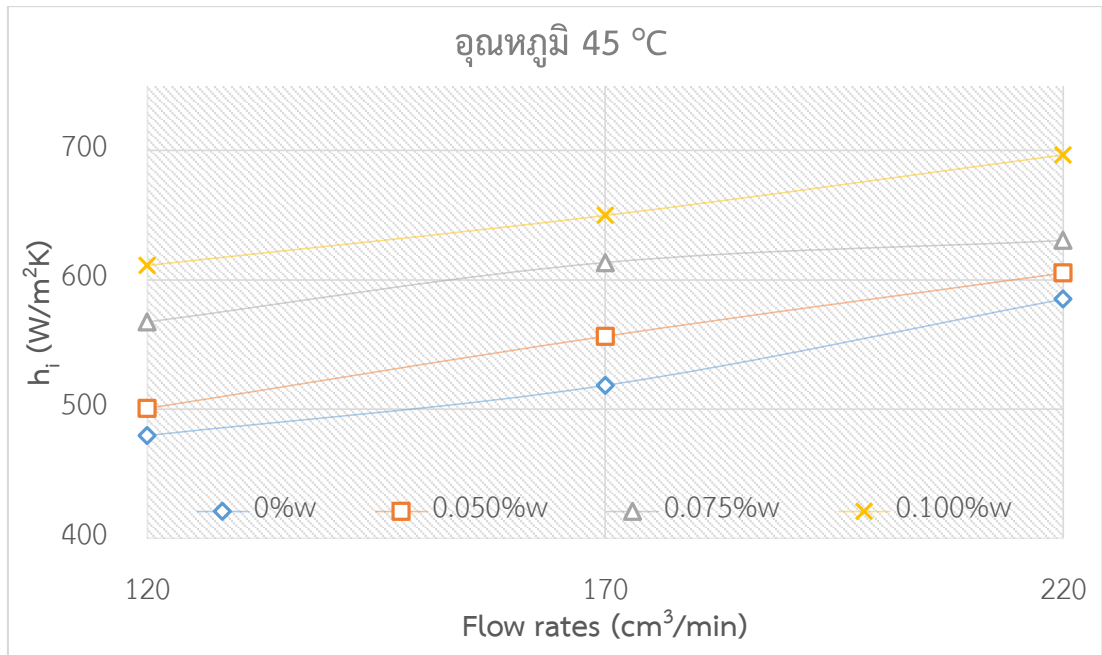
**ภาพที่ 35** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของสารทำงานจากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากสมการ

### ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

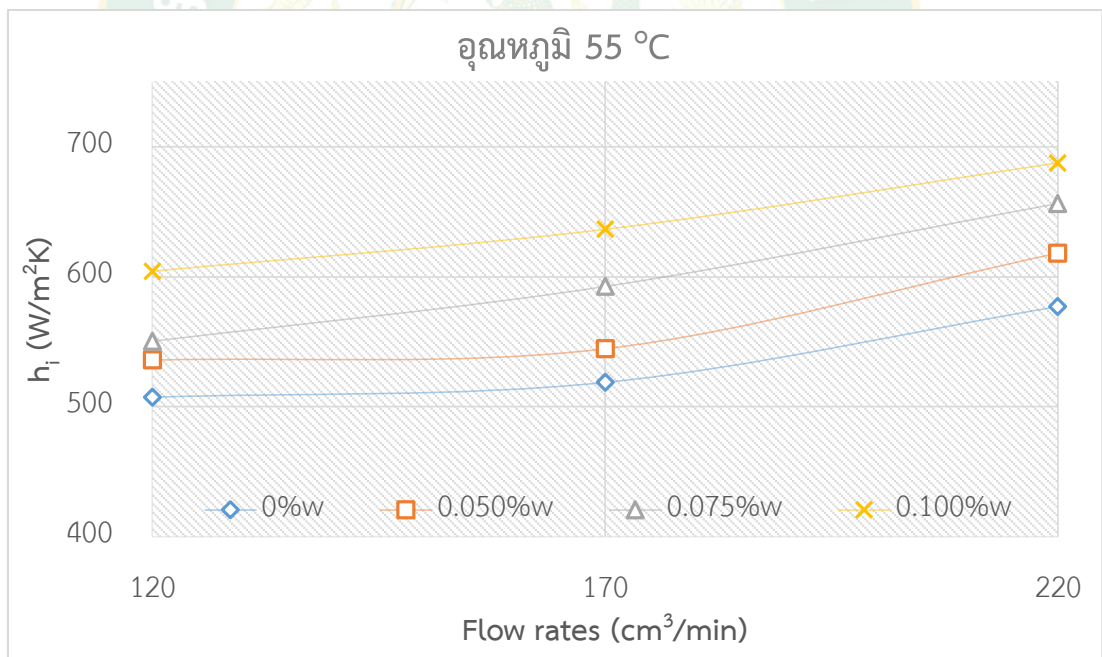
จากภาพที่ 36 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อ โดยค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสามารถหาได้จากสมการที่ 18 โดยมีการไหลอยู่ในช่วงของการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารทำงานเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของสารทำงานเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากผลของค่าการนำความร้อนของสารทำงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยที่ความเข้มข้น 0.100wt% ให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมากที่สุด รองลงมาเป็นที่ความเข้มข้น 0.075wt% 0.050wt% และ 0wt% ตามลำดับ และยังพบว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะเพิ่มขึ้นตาม ซึ่งที่อัตราการไหล 220 cm<sup>3</sup>/min ให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมากที่สุด รองลงมาเป็นที่อัตราการไหล 170 cm<sup>3</sup>/min และ 120 cm<sup>3</sup>/min ตามลำดับ โดยค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของสารทำงานมีค่าสูงสุดเท่ากับ 699.25 W/m<sup>2</sup>K ที่อัตราการไหล 220 cm<sup>3</sup>/min ความเข้มข้น 0.100wt% อุณหภูมิสารทำงานเริ่มเข้าท่อทองแดง 65 °C ซึ่งเพิ่มขึ้นจากน้ำคิดเป็น 15.67%



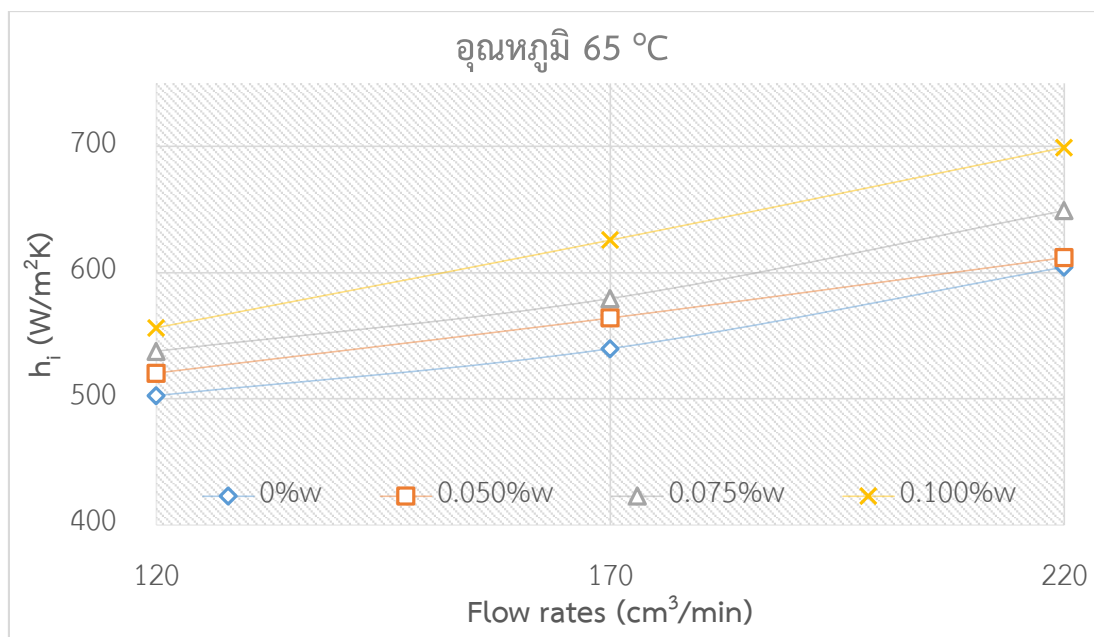
(ก) อุณหภูมิสารทำงานเข้าท่อทองแดง 35 °C



(ข) อุณหภูมิสารทำงานเข้าที่ท่อทองแดง 45 °C



(ค) อุณหภูมิสารทำงานเข้าที่ท่อทองแดง 55 °C



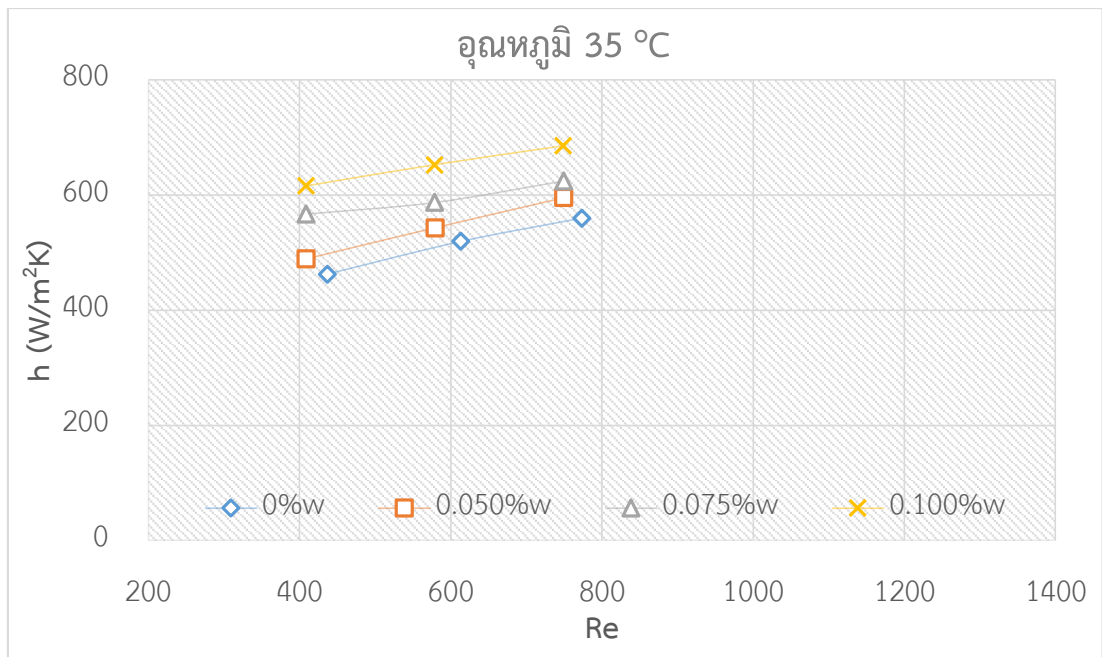
(ง) อุณหภูมิสารทำงานเข้าท่อทองแดง 65 °C

**ภาพที่ 36** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของสารทำงาน

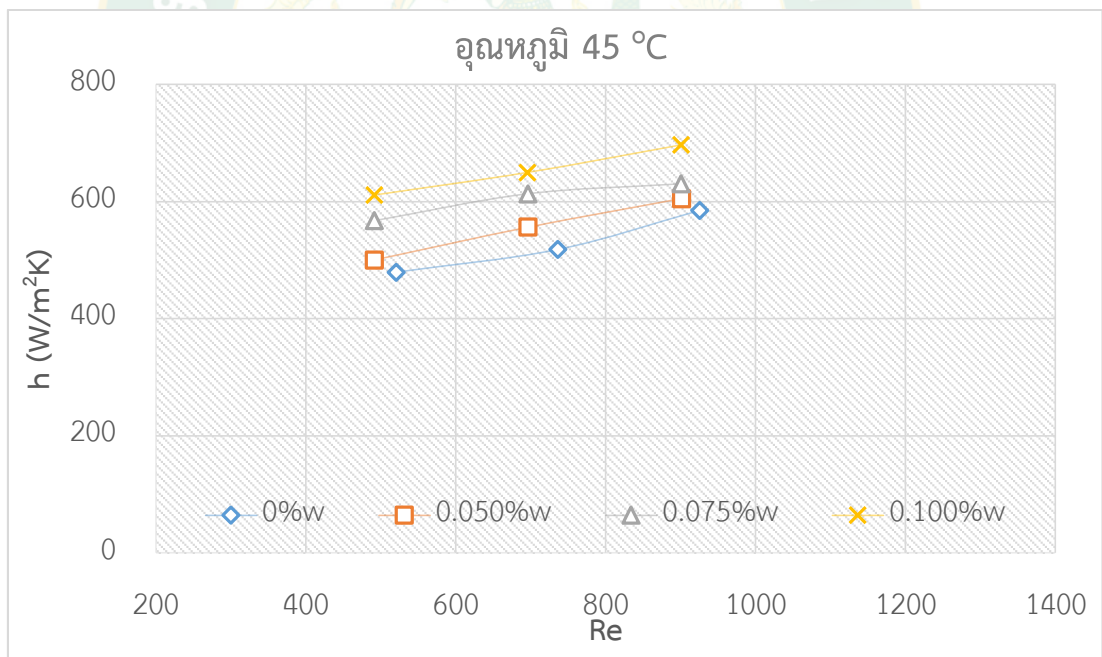
#### ความสัมพันธ์ของเลขเรย์โนลด์ส์กับสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

จากการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์กับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อ พบว่าความสัมพันธ์ของทุกอุณหภูมิสารทำงานเข้าระบบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนนั้นจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเลขเรย์โนลด์ส์มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากอัตราการไหลที่สูงขึ้น ยังพบอีกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของสารทำงานที่มีค่าความเข้มข้นสูงขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงขึ้นไปด้วย โดยทุกความเข้มข้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่สูงกว่าน้ำ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงสุดอยู่ที่ 699.25 W/m<sup>2</sup>K ที่อุณหภูมิสารทำงานเข้าสูงระบบ 65 °C ความเข้มข้นสารทำงาน 0.1% w/w ดังภาพที่ 37 (ง) โดยค่าเรย์โนลด์์นั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของสารทำงานเข้าระบบ อัตราการไหล และความเข้มข้นของสารทำงาน เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 37 จะเห็นได้ว่า สารทำงานที่ความเข้มข้นเท่ากัน อัตราการไหลเท่ากัน แต่อุณหภูมิของสารทำงานเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เลขเรย์โนลด์์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย เช่นเดียวกับอัตราการไหลที่เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นเลขเรย์โนลด์์จะเพิ่มขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามกับความเข้มข้นของสารทำงานเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเลขเรย์โนลด์์จะลดลง เพราะว่าเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นค่าความหนาแน่นและค่าความหนืดจะเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย แต่ค่าความหนืดจะเพิ่มขึ้นคิดเป็นเปอร์เซ็นต์มากกว่าดังภาพที่ 30 และภาพที่ 31 จึงทำให้เลขเรย์โนลด์์ลดลง

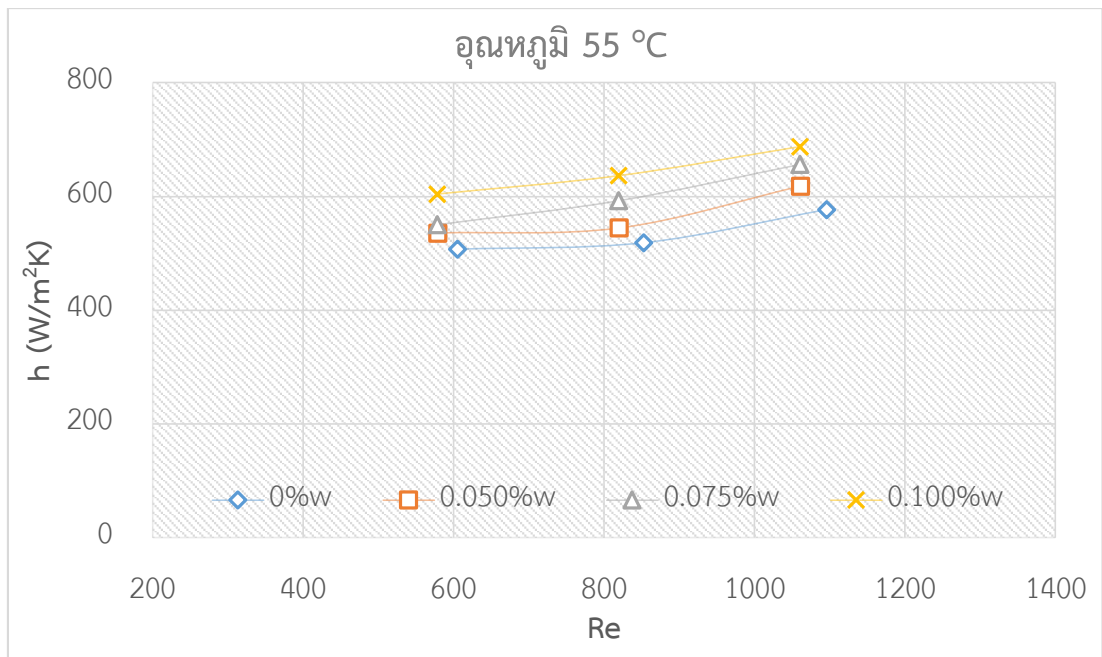




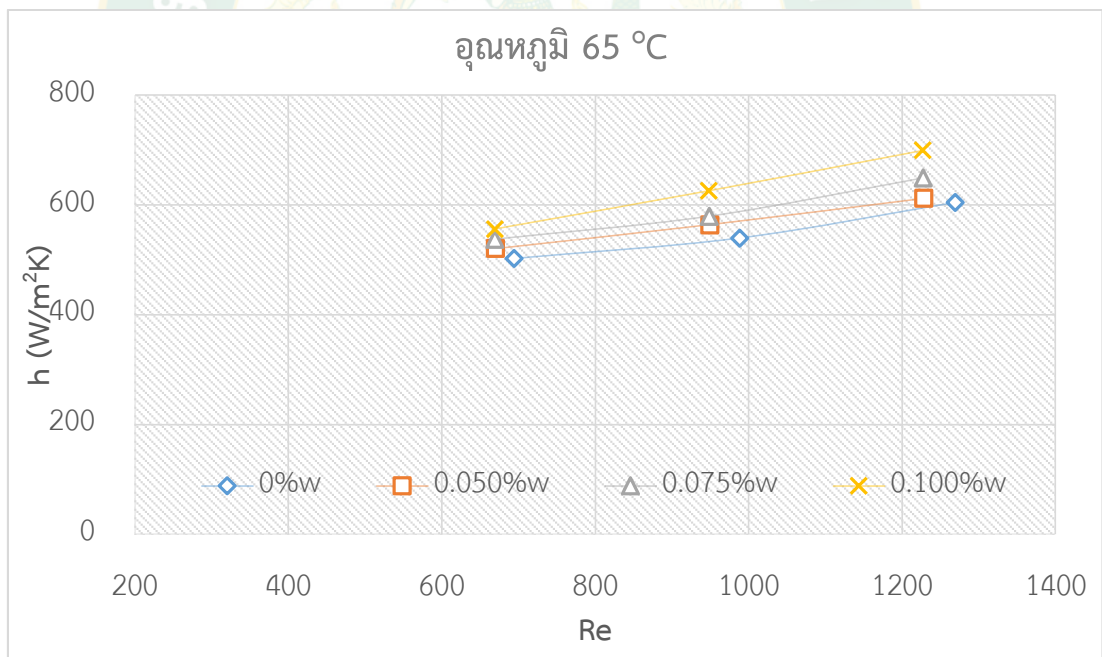
(ก) อุณหภูมิสารทำงานเข้าที่ห้องแดง 35 °C



(ข) อุณหภูมิสารทำงานเข้าที่ห้องแดง 45 °C



(ค) อุณหภูมิสารทำงานเข้าที่ท่อทองแดง 55 °C

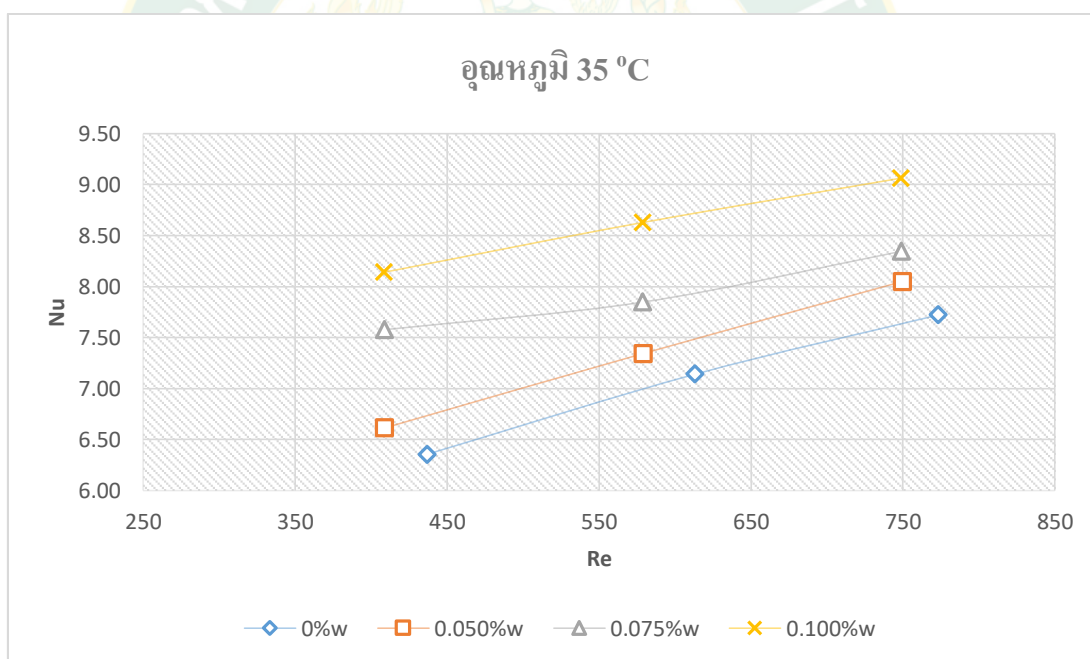


(ง) อุณหภูมิสารทำงานเข้าที่ท่อทองแดง 65 °C

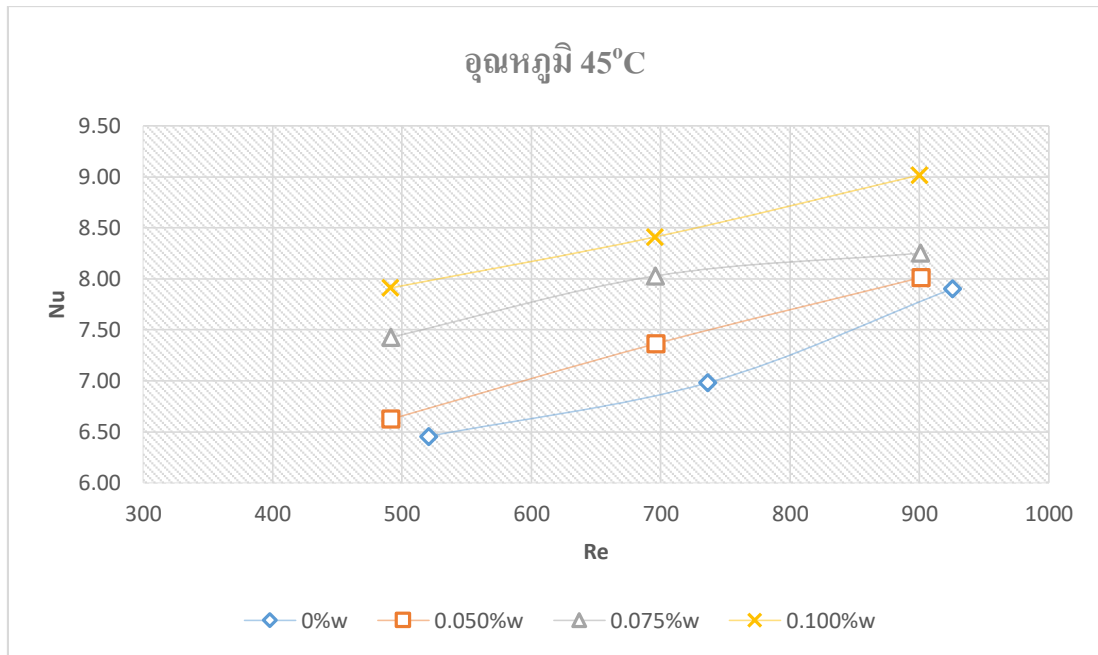
ภาพที่ 37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์กับสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

### ความสัมพันธ์ของเลขเรย์โนลด์ส์กับเลขนัสเซลท์ (Nusselt number)

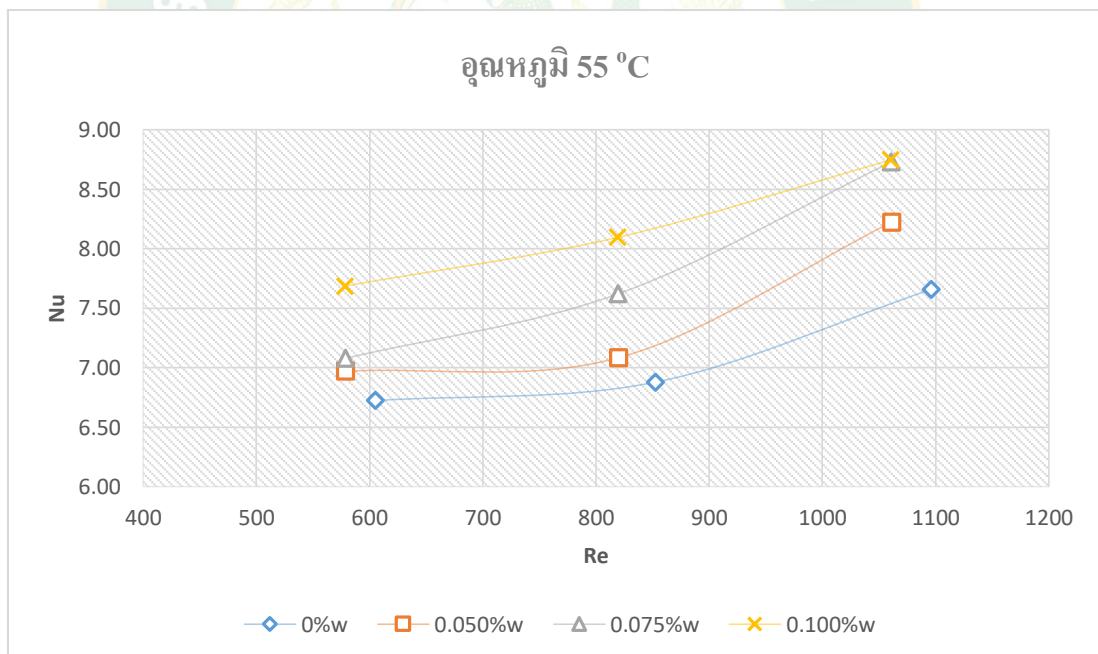
จากการทดลองหาความสัมพันธ์ของเลขเรย์โนลด์ส์กับเลขนัสเซลท์ พบว่าความสัมพันธ์ในทุกอุณหภูมิสารทำงานเข้าระบบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยที่เลขเรย์โนลด์ส์จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหล แต่เมื่อความเข้มข้นของสารทำงานเพิ่มขึ้นเลขเรย์โนลด์ส์จะลดลง เพราะว่าเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นค่าความหนาแน่นและค่าความหนืดจะเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วยแต่ค่าความหนืดจะเพิ่มขึ้นคิดเป็นเปอร์เซ็นต์มากกว่าดังภาพที่ 30 และภาพที่ 31 จึงทำให้เลขเรย์โนลด์ส์ลดลง และเมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มขึ้นจะทำให้เลขนัสเซลท์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากเลขเลขนัสเซลท์จะแปรผันตามค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน โดยเลขเรย์โนลด์ส์สูงสุดเท่ากับ 1269.06 ที่ความเข้มข้นของสารทำงาน 0wt% และทำให้เลขนัสเซลท์มีค่าเท่ากับ 8.76 ที่ความเข้มข้นของสารทำงาน 0.100wt% ที่อุณหภูมิสารทำงานเข้าระบบ 35 °C ดังภาพที่ 38 (ง) โดยที่ความเข้มข้น 0.100% w/w ให้ค่านัสเซลท์มากที่สุด รองลงมาเป็นที่ความเข้มข้น 0.075wt% 0.050wt% และ 0wt% ตามลำดับ ดังภาพที่ 38



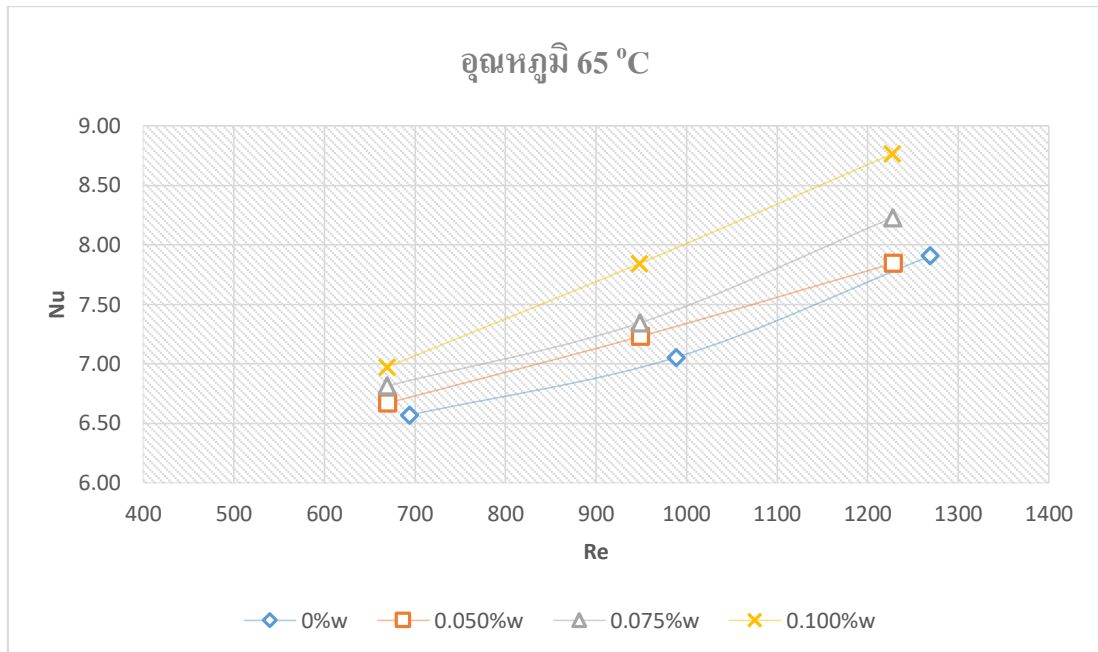
(ก) อุณหภูมิสารทำงานเข้าที่ท่อทองแดง 35 °C



(ข) อุณหภูมิสารทำงานเข้าที่ท่อแดง 45 °C



(ค) อุณหภูมิสารทำงานเข้าที่ท่อแดง 55 °C



(ง) อุณหภูมิสารทำงานเข้าท่อทองแดง 65 °C

**ภาพที่ 38** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์กับเลขนัสเซลท์

ค่าความสัมพันธ์ของเลขนัสเซลท์ (Nusselt number) ที่ได้จากการทดลองและสมการจากการทดลองได้ทำการหาความสัมพันธ์ของสมการที่มีต่อค่าเลขนัสเซลท์ (Nusselt number) โดยพบว่ามีความสัมพันธ์กับค่าเลขเรย์โนลด์ส์ (Reynolds number) ค่าเลขพรันด์เทิล (Prandtl number) และความเข้มข้น ในรูปแบบของสมการที่ 33

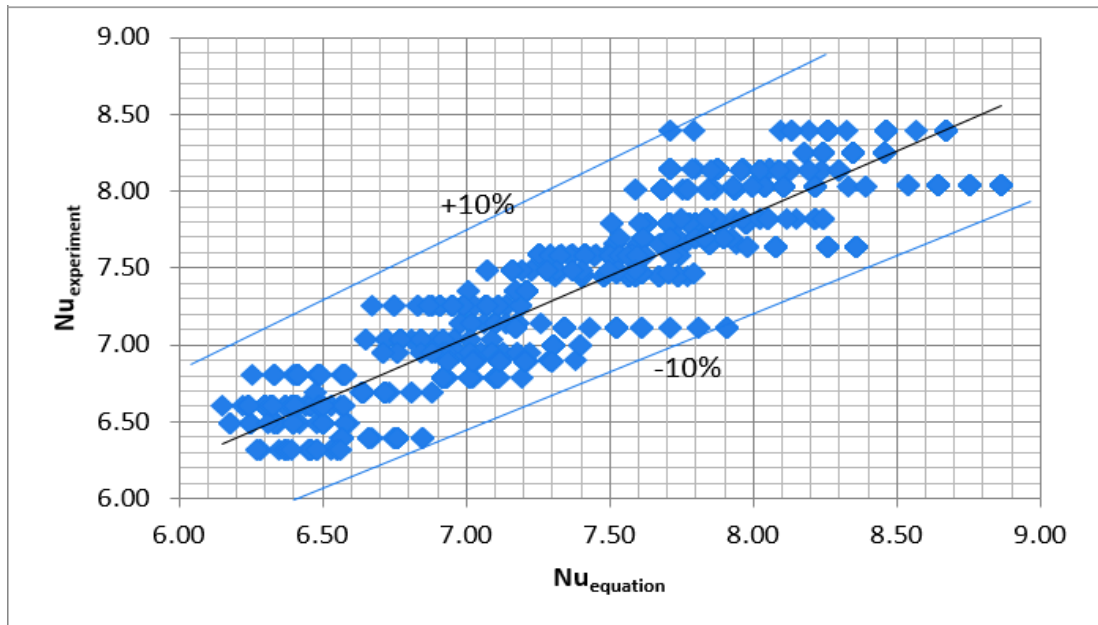
$$Nu = 1.1353 Pr^{0.32146} Re^{0.2726} \phi^{0.12454}; 0.050 < \phi < 0.100$$

สมการที่ 33

โดย Nu คือ เลขนัสเซลท์ (Nusselt number)  
 Pr คือ เลขพรันด์เทิล (Prandtl number)  
 Re คือ เลขเรย์โนลด์ส์ (Reynolds number)  
 $\phi$  คือ ความเข้มข้นของสารทำงาน (wt%)

ค่าความเข้มข้นที่ใช้ในการหาสมการใช้ค่าตั้งแต่ 0.050wt%-0.100wt% เท่านั้น ดังนั้นในการหาค่าของ Nu ควรอยู่ที่ความเข้มข้น 0.050wt%-0.100wt% โดยมีช่วงอุณหภูมิที่ 35-65 °C ที่เลขเรย์โนลด์ส์ในช่วง 350-1300

โดยเมื่อนำสมการที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการ พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อน  $\pm 10\%$  ดังแสดงในภาพที่ 39



ภาพที่ 39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลท์ (Nusselt number) ที่ได้จากการทดลองและจากสมการ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลท์ของของไหลกราฟีนานาโนต่อเลขนัสเซลท์ของน้ำ พบว่ามีความสัมพันธ์กับเลขเรย์โนลด์ส์ (Reynolds number) ของของไหลกราฟีนานาโนและน้ำ เลขพรันด์เทิล (Prandtl number) ของของไหลกราฟีนานาโนและน้ำ และความเข้มข้นของของไหลกราฟีนานาโน ในรูปแบบของสมการที่ 34

$$\frac{Nu_G}{Nu_W} = \frac{1.5026 Pr_G^{1.2632} \phi^{0.20635} Re_W^{0.2396}}{Re_G^{0.22738} Pr_W^{1.1749}}; 0.050 < \phi < 0.100 \quad \text{สมการที่ 34}$$

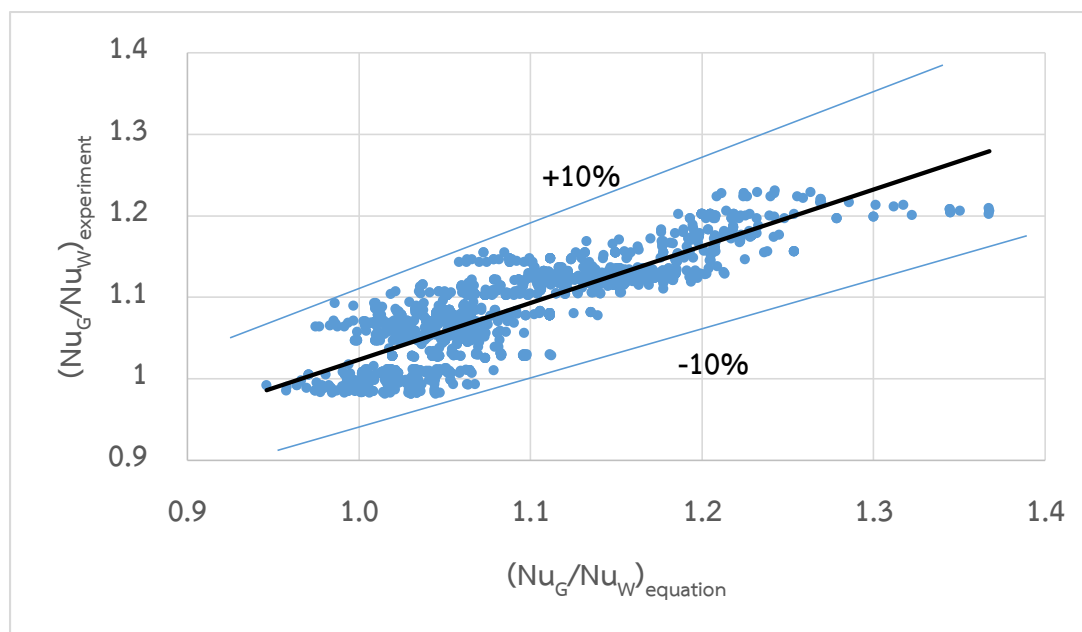
โดย  $Nu_G$  คือ เลขนัสเซลท์ (Nusselt number) ของของไหลกราฟีนานาโน  
 $Nu_W$  คือ เลขนัสเซลท์ (Nusselt number) ของน้ำ  
 $Pr_G$  คือ เลขพรันด์เทิล (Prandtl number) ของของไหลกราฟีนานาโน  
 $Pr_W$  คือ เลขพรันด์เทิล (Prandtl number) ของน้ำ  
 $Re_G$  คือ เลขเรย์โนลด์ส์ (Reynolds number) ของของไหลกราฟีนานาโน  
 $Re_W$  คือ เลขเรย์โนลด์ส์ (Reynolds number) ของน้ำ



๑ คือ ความเข้มข้นของสารทำงาน (wt%)

ค่าความเข้มข้นที่ใช้ในการหาสมการใช้ค่าตั้งแต่ 0.050wt%-0.100wt% เท่านั้น โดยมีช่วงอุณหภูมิที่ 35-65 °C ที่เลขเรย์โนลด์ส์ในช่วง 350-1300

โดยเมื่อนำสมการที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการ พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อน  $\pm 10\%$  ดังแสดงในภาพที่ 40



ภาพที่ 40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของเลขนัสเซลท์ (Nusselt number) ของของไหลกราฟีนนาโนต่อเลขนัสเซลท์ (Nusselt number) ของน้ำ ที่ได้จากการทดลองและจากสมการ

#### การวิเคราะห์ความไม่แน่นอน (Uncertainty Analysis)

ในการวิเคราะห์ผลใดๆซึ่งค่าที่ได้จากการวัดข้อมูลของพารามิเตอร์แต่ละตัว ข้อมูลที่ได้แต่ละตัวจะมีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้น และก่อให้เกิดความไม่แน่นอนหรือความผิดพลาดของผลรวมที่ต้องการจะวิเคราะห์ จากการวิเคราะห์หาค่าความไม่แน่นอนในการทดลอง โดยในการทดลองนี้จะเน้นในเรื่องของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของสารทำงาน ซึ่งสามารถหาได้จากวิธีการทางคณิตศาสตร์ของอนุกรมเทย์เลอร์จากสมการที่ 32 โดยค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดแสดงดังตารางที่ 11 และค่าความไม่แน่นอนแสดงดังตารางที่ 12

ตารางที่ 11 สมบัติค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัด

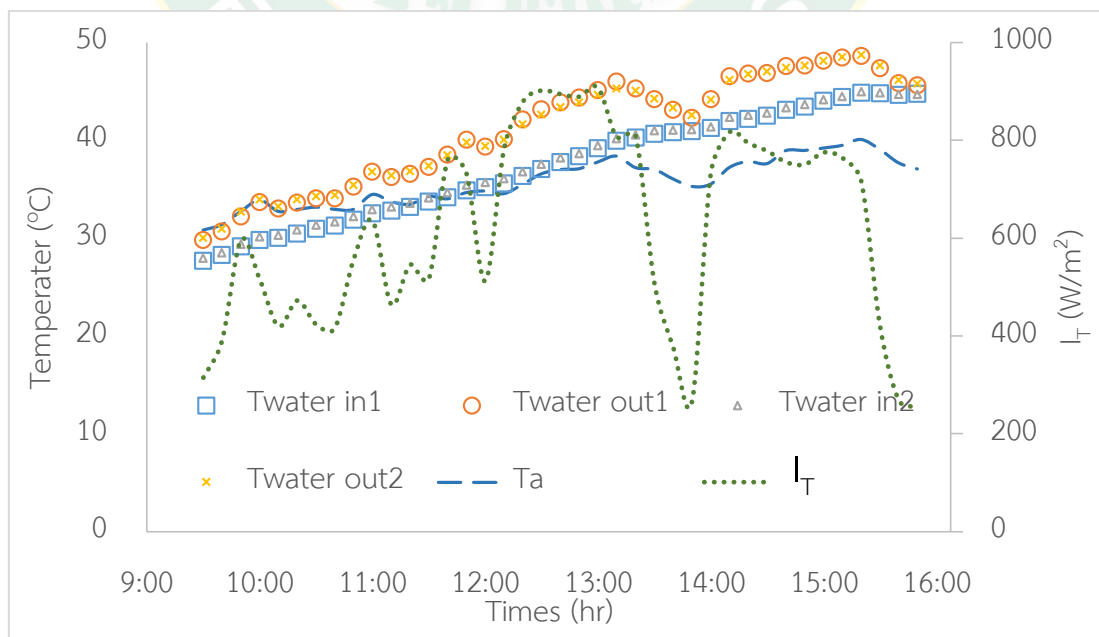
เครื่องมือ	ค่าความผิดพลาด
สายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K	$\pm 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Data logger รุ่น	$\pm 0.4\%$
Rota meter	$\pm 1.6\%$

ตารางที่ 12 สมบัติค่าความไม่แน่นอนของการทดลอง (Uncertainty Analysis)

การทดลอง	ความไม่แน่นอน
ค่าความร้อน	$\pm 0.007\%$
ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน	$\pm 10.61\%$

### 3.สมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ

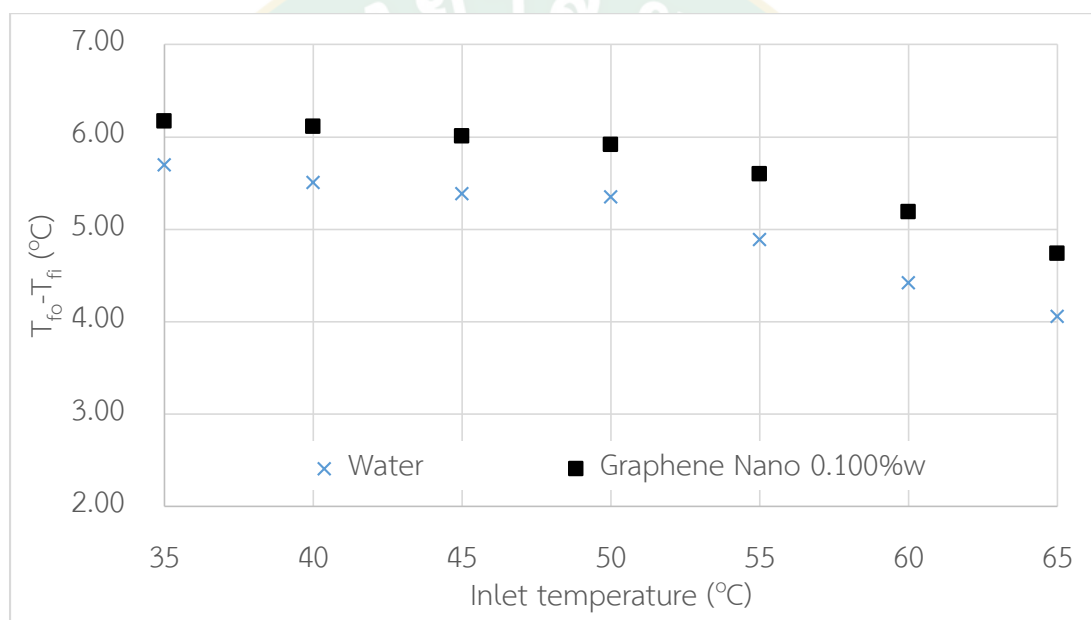
ในการทดลองจะใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบขนาด  $0.15 \text{ m}^2$  จำนวน 2 ชุด มีเส้นผ่านศูนย์กลางท่อขนาด  $8.6 \text{ mm}$  จะต้องทำการศึกษาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทั้ง 2 ชุด ว่ามีสมรรถนะใกล้เคียงกันหรือไม่ โดยทดสอบที่สภาวะแวดล้อมเดียวกัน สารทำงานชนิดเดียวกัน ที่อัตราการไหล  $220 \text{ cm}^3/\text{min}$  ภายใต้มาตรฐานทดสอบ ASHRAE Standard 93-2003 ดังแสดงในภาพที่ 41



ภาพที่ 41 ผลต่างอุณหภูมิสารทำงานเข้าและออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์

จากภาพที่ 41 พบว่า เป็นการทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์โดยใช้น้ำปราศจากไอออน เพื่อตรวจสอบสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิสารทำงานเข้าและออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทั้ง 2 ชุด มีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งแสดงว่าแผงตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทั้ง 2 ชุด มีสมรรถนะทางความร้อนเท่ากัน

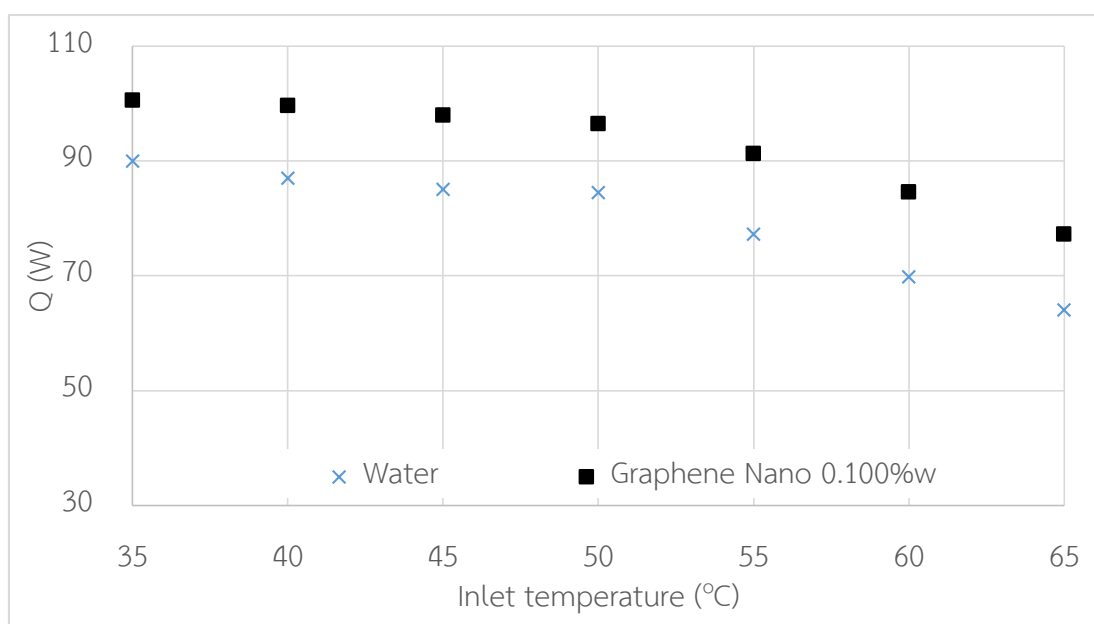
หลังจากทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของแผงรับรังสีอาทิตย์เรียบร้อยแล้วได้ทำการทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ระหว่างกรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนที่ความเข้มข้น 0.100wt% กับน้ำปราศจากไอออนเป็นสารทำงาน โดยเมื่อพิจารณาระหว่างอุณหภูมิสารทำงานเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์กับผลต่างอุณหภูมิเข้าและออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ดังภาพที่ 42



ภาพที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเข้าตัวรับรังสีอาทิตย์กับผลต่างอุณหภูมิเข้าและออกตัวรับรังสีอาทิตย์

จากภาพที่ 42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนที่สามารถผลิตได้กับอุณหภูมิเข้าตัวรับรังสีอาทิตย์ทั้งกรณีใช้น้ำปราศจากไอออนและของไหลกราฟีนนาโนที่ความเข้มข้น 0.100wt% เป็นสารทำงาน พบว่า เมื่ออุณหภูมิสารทำงานเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ผลต่างอุณหภูมิเข้าและออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ลดลง เนื่องมาจากเมื่ออุณหภูมิสารทำงานเข้าระบบมีค่าสูงขึ้นแต่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมีค่าคงที่ ทำให้การสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาแผงตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงานจะให้อุณหภูมิสารทำงานที่ออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์สูงกว่ากรณีใช้น้ำเป็นสารทำงานในทุกช่วงอุณหภูมิ เนื่องจากของไหลกราฟีนนาโนมีค่าการนำความร้อนที่สูงกว่าน้ำทำให้ค่าการนำความร้อนจากแสงอาทิตย์มาสู่สารทำงานได้ดีกว่าน้ำ โดย

ที่อุณหภูมิสารทำงานของไฮลกราฟีนนาโนเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 35 °C ให้ผลต่างอุณหภูมิเข้าและออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์สูงสุด 6.17 °C กรณีที่ใช้น้ำมีค่า 5.70 °C เพิ่มขึ้น 8.24% และผลต่างอุณหภูมิลดลงเรื่อยๆจนที่อุณหภูมิสารทำงานน้ำเข้าตัวเก็บรังสี 65 °C ให้ผลต่างอุณหภูมิเข้าและออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ต่ำที่สุดกรณีที่ใช้น้ำของไฮลกราฟีนนาโนมีค่า 4.74 °C กรณีที่ใช้น้ำมีค่า 4.06 °C เพิ่มขึ้น 16.75%

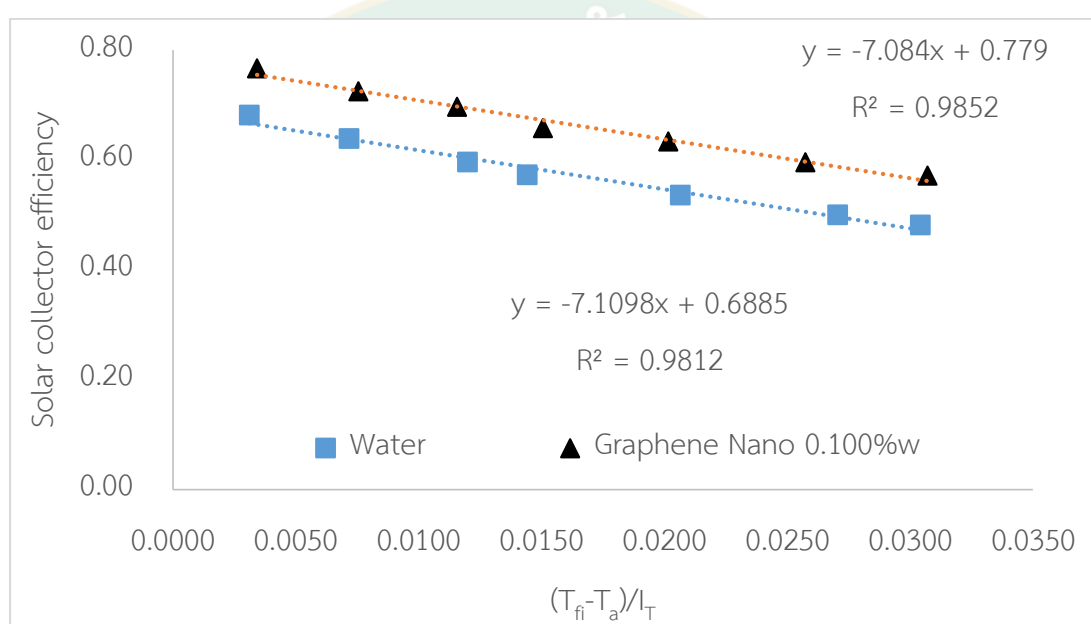


ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนที่สามารถผลิตได้กับอุณหภูมิเข้าตัวรับรังสีอาทิตย์

จากภาพที่ 43 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสารทำงานเข้าตัวรับรังสีอาทิตย์กับค่าความร้อนที่ผลิตได้จะเห็นได้ว่า ความร้อนที่ผลิตได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีของไฮลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงานมีค่าสูงกว่ากรณีที่ใช้เป็นสารทำงานอย่างชัดเจน โดยที่อุณหภูมิสารทำงานเข้าสู่ระบบ 35 °C กรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานมีค่าความร้อนที่ผลิตได้เท่ากับ 90.01 W ส่วนกรณีที่เป็นของไฮลกราฟีนนาโนให้ค่าความร้อนสูงสุดเท่ากับ 100.56 W เพิ่มขึ้นจากกรณีที่สารทำงานเป็นน้ำคิดเป็น 11.72% โดยจะสังเกตได้ว่าเมื่ออุณหภูมิของสารทำงานเข้าสู่ระบบเพิ่มสูงขึ้นมีผลทำให้ค่าความร้อนที่ผลิตได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ลดลงเป็นผลมาจากการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้นนั่นเอง

จากภาพที่ 44 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(T_f - T_a) / I_T$  กับค่าประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิสารทำงานเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์ลดลงเนื่องมาจากเกิดการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมเพิ่มมากขึ้น โดยที่อุณหภูมิสารทำงานเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 35 °C จะให้ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์สูงสุด เป็นไปใน

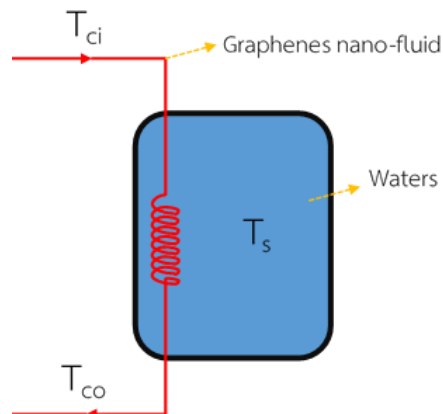
ทำนองเดียวกันของสารทำงานทั้งสองชนิด โดยจะเห็นได้ว่าสารทำงานที่เป็นของไหลกราฟีนนาโนจะให้ค่าประสิทธิภาพที่สูงกว่าน้ำตลอดทุกช่วงของอุณหภูมิ สาเหตุมาจากของไหลกราฟีนนาโนมีสมบัติด้านการนำความร้อนได้ดีกว่าน้ำ จากกราฟเมื่อพิจารณาเส้นแนวโน้มจะได้ว่า ของไหลกราฟีนนาโนมีค่า  $F_R(\tau\alpha)_e$  เท่ากับ 0.7790 และ  $F_{RU_L}$  เท่ากับ  $7.084 \text{ W/m}^2$  ในส่วนของกรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานมีค่า  $F_R(\tau\alpha)_e$  เท่ากับ 0.6885 และค่า  $F_{RU_L}$  เท่ากับ  $7.1098 \text{ W/m}^2$  โดยจะเห็นได้ว่าสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์กรณีใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงานมีค่าสูงกว่ากรณีใช้น้ำเป็นสารทำงาน



ภาพที่ 44 สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ กรณีใช้น้ำ และของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน

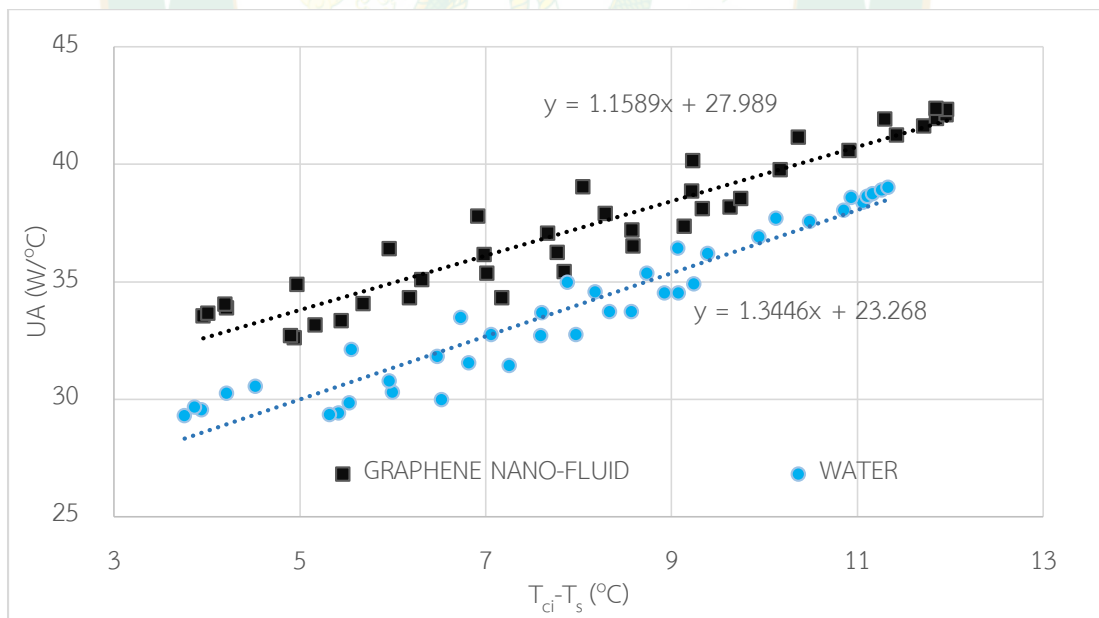
#### 4. สมรรถนะทางความร้อนของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

เนื่องจากการใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความร้อนที่ถ่ายเทให้กับน้ำในถังเก็บน้ำร้อนจะไม่สามารถถ่ายเทได้โดยตรง โดยจะต้องถ่ายเทความร้อนจากของไหลกราฟีนนาโนสู่น้ำในถังผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อทองแดงเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.6 mm ยาว 1 m แสดงดังภาพที่ 45



ภาพที่ 45 ลักษณะการแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหลกราฟีนานอกับน้ำในถังเก็บน้ำร้อน

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาค่า UA เพื่อใช้ในการหาสมการจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยจากการทดสอบพบว่า สารทำงานที่เป็นของไหลกราฟีนานอให้ค่า UA สูงกว่ากรณีที่สารทำงานเป็นน้ำ เนื่องจากสมบัติการนำความร้อนของของไหลกราฟีนานอที่สูงกว่าน้ำ โดยเมื่ออุณหภูมิสารทำงานที่เข้าถังเก็บน้ำร้อนเพิ่มสูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมก็จะสูงขึ้นตามไปด้วยดังภาพที่ 46 และสามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 34 และสมการที่ 35



ภาพที่ 46 ค่า UA จากกรณีใช้น้ำและกรณีใช้ของไหลกราฟีนานอเป็นสารทำงาน



ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมกรณีที่สารทำงานเป็นของไหลกราฟีนนาโน

$$UA = 1.1589(T_{ci} - T_s) + 27.989$$

สมการที่ 35

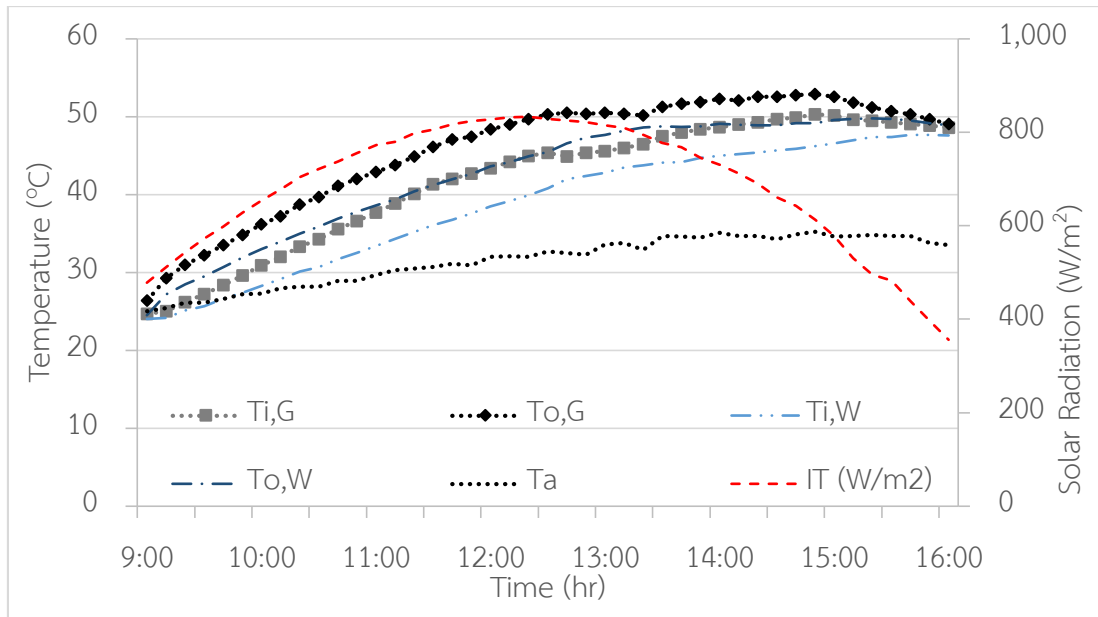
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมกรณีที่สารทำงานเป็นน้ำ

$$UA = 1.3446(T_{ci} - T_s) + 23.268$$

สมการที่ 36

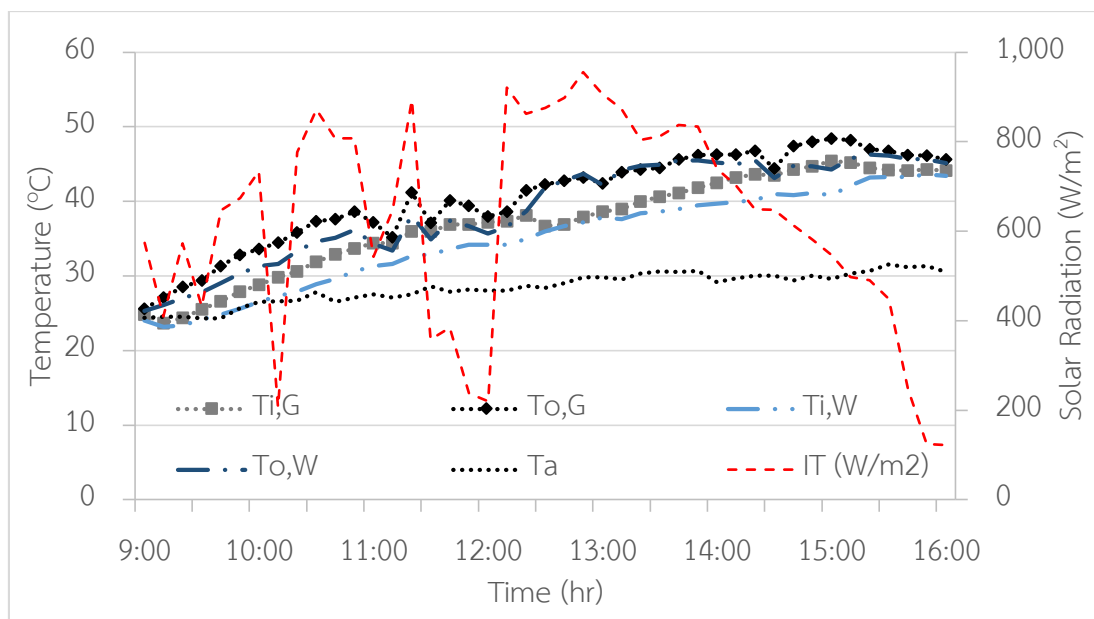
หลังจากทำการทดสอบหาค่า UA ของสารทำงานแต่ละชนิดแล้ว จึงทำการทดสอบระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จากการใช้งานจริงเปรียบเทียบกันระหว่างกรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนกับกรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสและวันที่มีเมฆมาก พบว่า

ในกรณีวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส จากภาพที่ 47 จะเห็นได้ว่าค่าของความเข้มรังสีอาทิตย์จะค่อยๆเพิ่มขึ้นและจะเริ่มลดลงในช่วงเวลาประมาณ 12:30 น. โดยมีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงสุดประมาณ  $830 \text{ W/m}^2$  อุณหภูมิสารทำงานเข้าระบบของทั้งสองชุดขณะเริ่มการทดสอบจะอยู่ที่  $24 \text{ }^\circ\text{C}$  และจะค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นตามความเข้มรังสีอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้น พบว่ากรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงานจะให้อุณหภูมิออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์สูงกว่ากรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานเนื่องจากกรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงานจะมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่สูงกว่ากรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน โดยกรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงานอุณหภูมิสารทำงานขณะออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะเพิ่มขึ้นและจะเริ่มมีการเพิ่มขึ้นน้อยลงหลังจากช่วงเวลาประมาณ 13:00 น. เนื่องจากค่ารังสีอาทิตย์ที่ลดลงและอุณหภูมิของสารทำงานที่สูงขึ้นทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนสูงสิ่งแวดล้อมมากขึ้น รวมทั้งมีการตกตะกอนของผงกราฟีนนาโนในสารทำงานทำให้ประสิทธิภาพในการพาความร้อนของสารทำงานลดลง ทำให้อุณหภูมิออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ลดลงตามค่าความเข้มแสงที่ลดลงในช่วงเวลาประมาณ 14:50 น. ส่วนในกรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานอุณหภูมิของสารทำงานที่ออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจนถึงช่วงเวลาประมาณ 14:00 น. และจะค่อยๆคงที่จนถึงช่วงเวลาประมาณ 15:30 น. และจะค่อยๆลดลงตามความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ลดลง โดยจากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิสารทำงานที่ออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงานมีค่าสูงสุดเท่ากับ  $52.9 \text{ }^\circ\text{C}$  ส่วนกรณีที่ใช้น้ำจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ  $49.8 \text{ }^\circ\text{C}$  แตกต่างกัน  $3.1 \text{ }^\circ\text{C}$  คิดเป็น  $6.22\%$  ที่เพิ่มสูงขึ้น



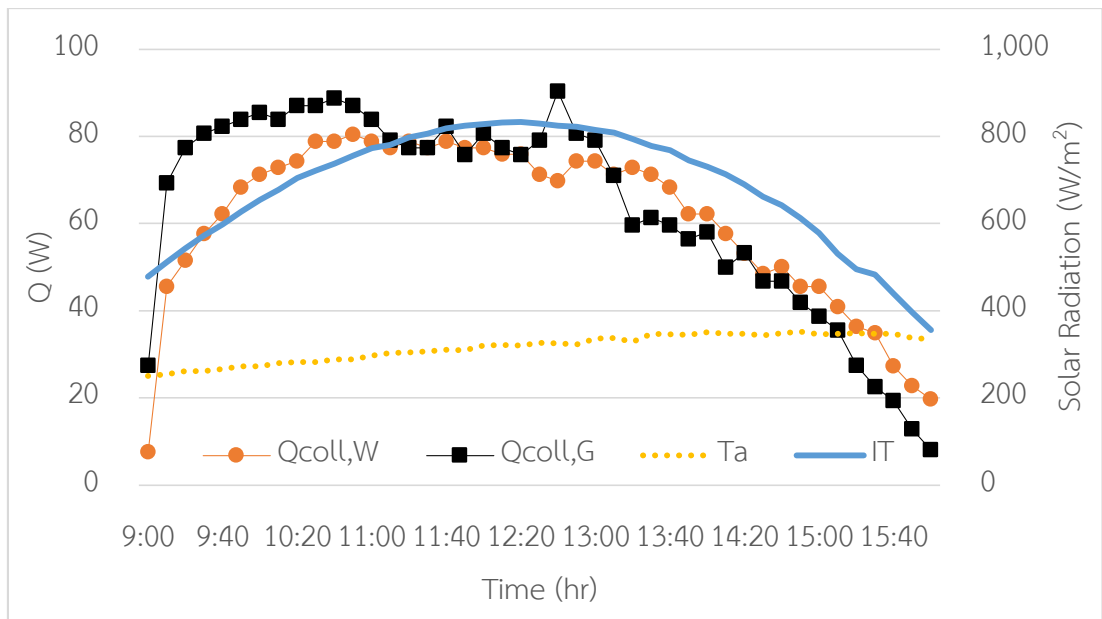
ภาพที่ 47 อุณหภูมิเข้าและออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม และความเข้มรังสีอาทิตย์ ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส

และจากภาพที่ 48 ในกรณีที่ท้องฟ้ามีเมฆมากจะเห็นว่า ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์จะเพิ่มขึ้นในตอนเช้าและจะมีบางช่วงที่ตกลงเนื่องจากผลของก้อนเมฆที่บังดวงอาทิตย์ และความเข้มรังสีอาทิตย์สูงสุดอยู่ในช่วงเวลาประมาณ 13:00 น. ในส่วนของอุณหภูมิเข้าและออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะมีลักษณะใกล้เคียงกับกรณีที่ท้องฟ้าแจ่มใส โดยจะมีบางช่วงที่อุณหภูมิลดลงเนื่องจากมีเมฆมาบัง โดยยังพบว่ากรณีที่ใช้ของไหล กราฟีนนาโนเป็นสารทำงานจะให้อุณหภูมิสูงกว่ากรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน โดยพบว่าอุณหภูมิสารทำงานออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงานจะมีอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 48.4 °C และกรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานจะมีอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 46.3 °C แตกต่างกัน 2.1 °C คิดเป็น 4.54% ที่เพิ่มสูงขึ้น

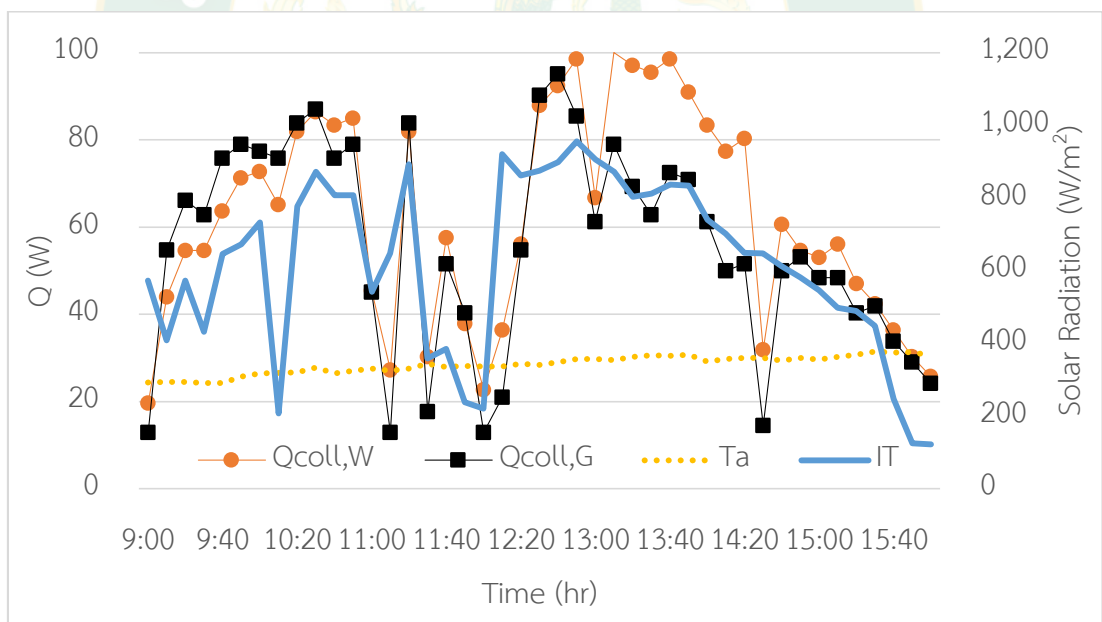


ภาพที่ 48 อุณหภูมิเข้าและออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม และความเข้มรังสีอาทิตย์ ในวันที่ท้องฟ้ามีเมฆมาก

จากภาพที่ 49 และภาพที่ 50 แสดงลักษณะของความร้อนที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ผลิตได้ในกรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนและน้ำเป็นสารทำงานของวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส และวันที่มีเมฆมากตามลำดับพบว่า ค่าความร้อนที่ผลิตได้จะแปรผันตามค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสค่าความร้อนที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ผลิตได้ในช่วงเวลา 9:00-13:10 น. กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงานจะมีค่าความร้อนที่สูงกว่ากรณีที่ใช้ น้ำเป็นสารทำงานเนื่องจากของไหลกราฟีนนาโนมีค่าการนำความร้อนที่ดีกว่าน้ำ หลังจากเวลาดังกล่าวค่าความร้อนที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ผลิตได้ในกรณีที่ใช้ น้ำเป็นสารทำงานจะสูงกว่าของไหลกราฟีนนาโนเนื่องมาจากกรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเกิดการตกตะกอนทำให้ค่าความร้อนที่ผลิตได้ลดลง ซึ่งเป็นไปในทำนองเดียวกันกับในวันที่ท้องฟ้ามีเมฆมาก



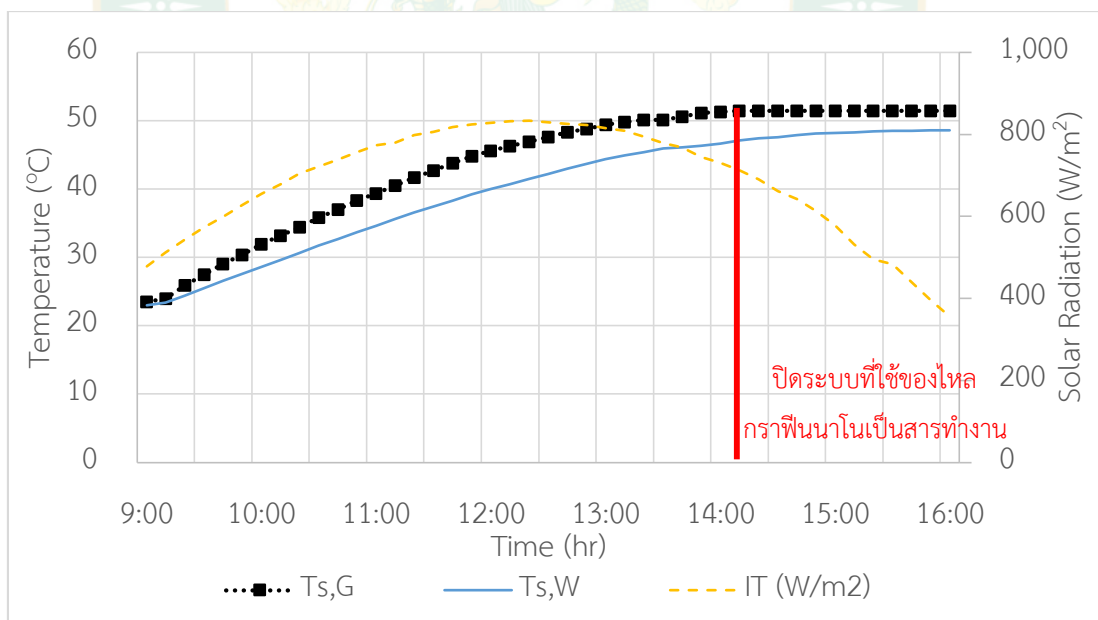
ภาพที่ 49 ความร้อนที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ผลิตได้ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม และความเข้มรังสีอาทิตย์ ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส



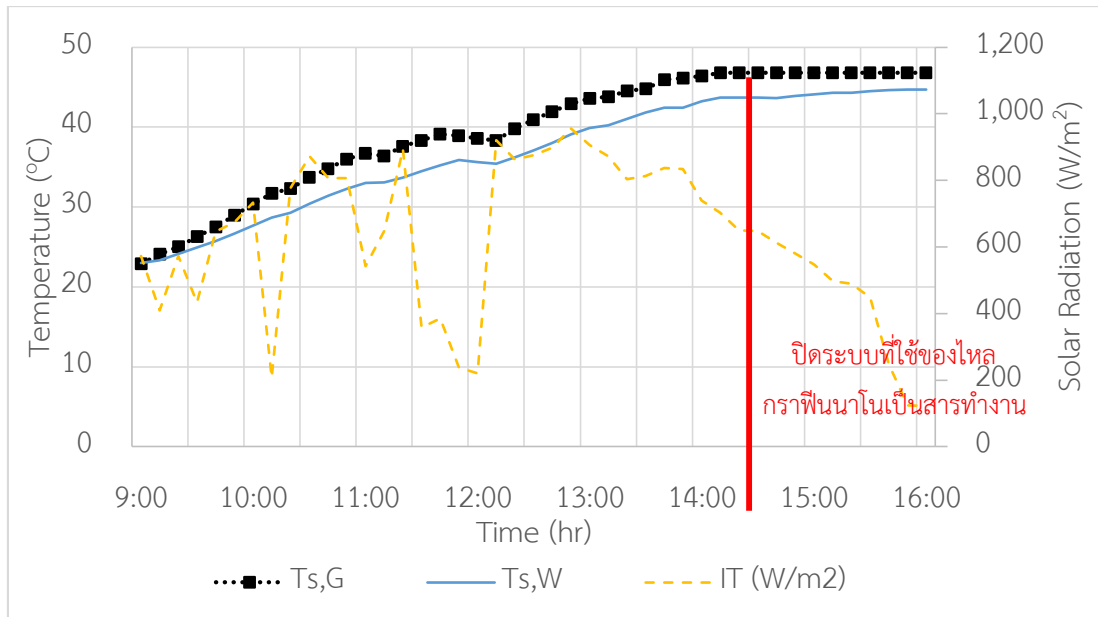
ภาพที่ 50 ความร้อนที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ผลิตได้ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม และความเข้มรังสีอาทิตย์ ในวันที่ท้องฟ้ามีเมฆมาก

จากภาพที่ 51 และภาพที่ 52 แสดงลักษณะของอุณหภูมิในถังเก็บน้ำร้อนในกรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนและน้ำเป็นสารทำงานของวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส และวันที่มีเมฆมากตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิน้ำร้อนในถังน้ำร้อนจะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามความเข้มรังสีอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้น แต่จะเห็นได้ว่า

อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงานจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเร็วกว่ากรณีที่ใช้ น้ำเป็นสารทำงาน เนื่องจากสารทำงานที่เป็นของไหลกราฟีนนาโนสามารถรับและถ่ายเทพลังงานความร้อนสู่น้ำในถังเก็บน้ำร้อนได้ดีกว่ากรณีที่ใช้ น้ำเป็นสารทำงาน แต่อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนจะเริ่มคงที่ตั้งแต่เวลาประมาณ 14:10 น. เนื่องมาจากการลดลงของค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ การตกตะกอนของอนุภาคกราฟีนนาโนในสารทำงาน รวมทั้งอุณหภูมิที่สูงขึ้นของน้ำร้อนในถังทำให้ผลต่างอุณหภูมิของน้ำร้อนกับอากาศแวดล้อมเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการสูญเสียความร้อนเพิ่มสูงขึ้น และทั้งในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสและมีเมฆมากอุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนกรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงานจะมีค่าสูงกว่ากรณีที่ใช้ น้ำเป็นสารทำงาน พบว่าในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสอุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนสูงสุดกรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงานมีค่า  $51.40\text{ }^{\circ}\text{C}$  ส่วนกรณีที่ใช้ น้ำมีค่า  $48.60\text{ }^{\circ}\text{C}$  เพิ่มขึ้น  $5.76\%$  และในวันที่ท้องฟ้ามีเมฆมากอุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนสูงสุดกรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงานมีค่า  $46.80\text{ }^{\circ}\text{C}$  ส่วนกรณีที่ใช้ น้ำมีค่า  $44.70\text{ }^{\circ}\text{C}$  เพิ่มขึ้น  $4.90\%$  โดยความแตกต่างกันระหว่างวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสและวันที่มีเมฆมากคือ ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสอุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่วนในวันที่มีเมฆมากในบางช่วงเวลาอาจจะมีการลดลง บางช่วงที่มีเมฆมาบดบังทำให้ความเข้มรังสีอาทิตย์ลดลงเป็นช่วงๆ



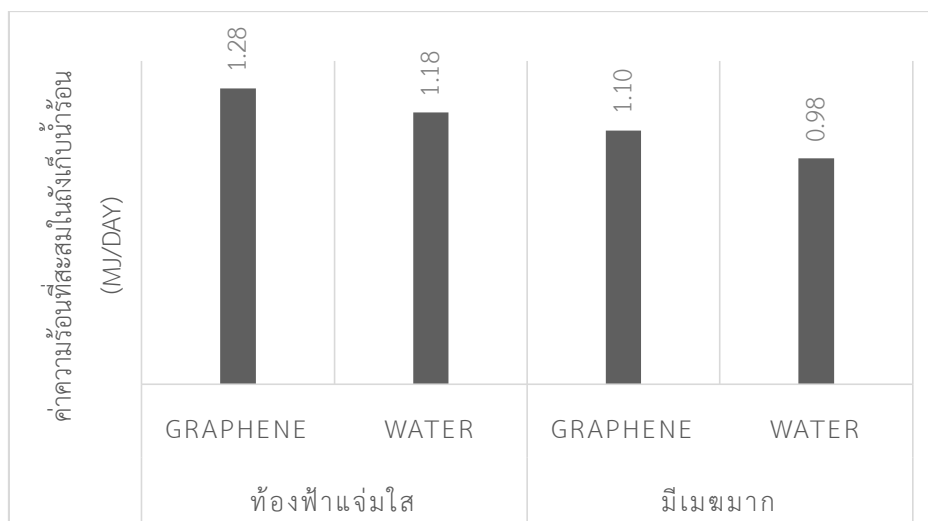
ภาพที่ 51 อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อน และค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ กรณีวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส



ภาพที่ 52 อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน และค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ กรณีวันที่ท้องฟ้ามีเมฆมาก

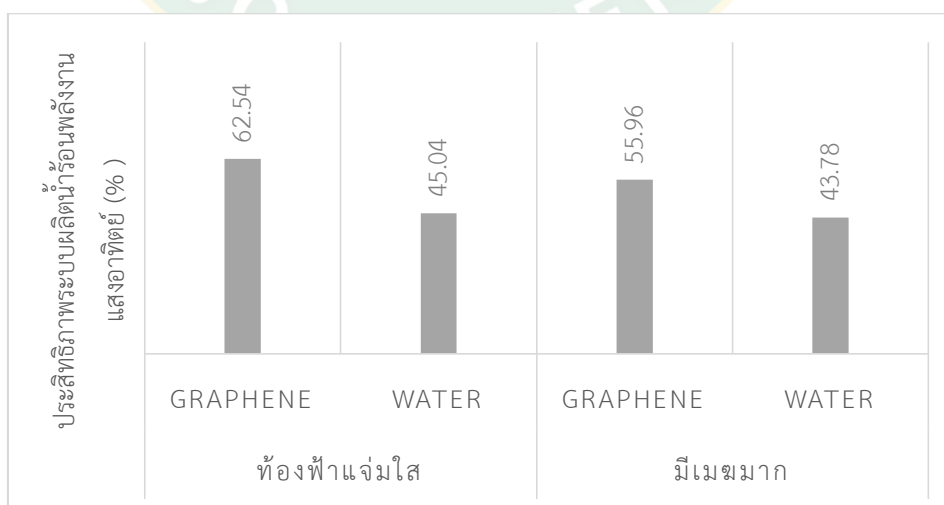
เมื่อวิเคราะห์ค่าความร้อนที่สะสมในถังเก็บน้ำร้อนต่อวันของกรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงานจะให้ค่าความร้อนที่สูงกว่ากรณีที่ใช้ น้ำเป็นสารทำงาน ทั้งกรณีของวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส และกรณีของวันที่มีเมฆมาก ดังแสดงในภาพที่ 53 โดยในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสความร้อนที่สะสมในถังเก็บน้ำร้อนต่อวันของกรณีที่ใช้ น้ำเป็นสารทำงานจะอยู่ที่ 1.18 MJ ส่วนกรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงานจะอยู่ที่ 1.28 MJ/Day เพิ่มขึ้น 0.10 MJ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้น 8.47% ซึ่งในวันที่มีเมฆมากจะเป็นไปในทำนองเดียวกัน คือกรณีที่ใช้ น้ำเป็นสารทำงานจะอยู่ที่ 0.98 MJ/Day ส่วนกรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงานมีค่าความร้อนที่ระบบผลิตได้ อยู่ที่ 1.10 MJ/Day เพิ่มขึ้น 0.12 MJ/Day คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้น 12.24%





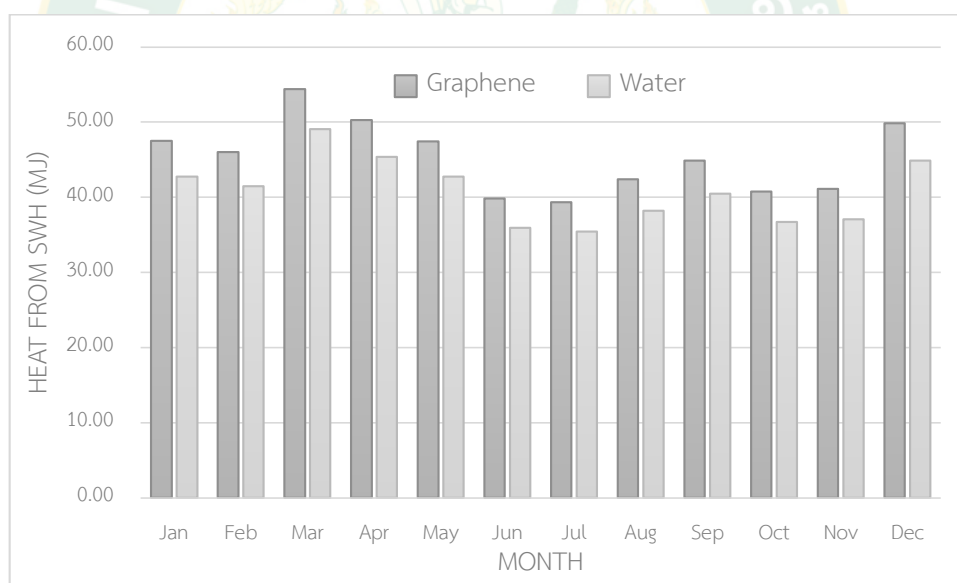
ภาพที่ 53 ค่าความร้อนที่สะสมในถังเก็บน้ำร้อน

โดยในส่วนของประสิทธิภาพระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่า กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงานจะให้ประสิทธิภาพระบบที่สูงกว่ากรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน ทั้งในกรณีที่ห้องฟ้าแจ่มใส และกรณีของวันที่ห้องฟ้ามีเมฆมาก ดังแสดงในภาพที่ 54 เมื่อพิจารณาในวันที่ห้องฟ้าแจ่มใสพบว่า สารทำงานที่เป็นน้ำทำให้ระบบมีประสิทธิภาพอยู่ที่ 45.04% ส่วนกรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนระบบผลิตน้ำร้อนจะมีประสิทธิภาพอยู่ที่ 62.54% เพิ่มขึ้น 17.50% คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นถึง 38.85% ในส่วนของวันที่มีเมฆมากพบว่า สารทำงานที่เป็นน้ำทำให้ระบบมีประสิทธิภาพอยู่ที่ 43.78% ส่วนกรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนระบบผลิตน้ำร้อนจะมีประสิทธิภาพอยู่ที่ 55.96% เพิ่มขึ้น 12.18% คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้น 27.82%



ภาพที่ 54 ประสิทธิภาพระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

หลังจากที่ทำการทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนและน้ำเป็นสารทำงาน รวมทั้งค่าของ UA ของถังน้ำร้อนแล้ว นำข้อมูลมาวิเคราะห์หาค่าความร้อนที่สามารถผลิตได้ทั้งปี โดยนำค่าความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมทั้งปีของจังหวัดเชียงใหม่มาใช้ในการวิเคราะห์ โดยมีค่าความร้อนรายเดือนแสดงดังภาพที่ 55 พบว่าในเดือนมีนาคมจะให้ค่าพลังงานความร้อนที่สูงที่สุด โดยที่กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงานจะมีค่าอยู่ที่ 54.24 MJ/Month ส่วนกรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานจะอยู่ที่ 49.09 MJ/Month รองลงมาเป็นเดือนเมษายน และเดือนธันวาคมตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าในทุกเดือนกรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงานจะสามารถผลิตความร้อนได้สูงกว่ากรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน เมื่อพิจารณารวมทั้งปีพบว่า กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงานจะให้ค่าพลังงานความร้อนได้สูงกว่ากรณีที่ใช้น้ำ โดยพบว่า กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงานสามารถผลิตความร้อนได้ 543.87 MJ/Year ส่วนกรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานจะสามารถผลิตความร้อนได้ 490.13 MJ/Year มีค่าเพิ่มขึ้น 53.74 MJ/Year คิดเป็น 10.96%

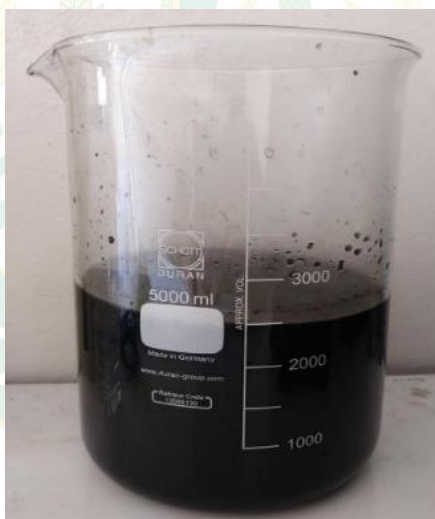


ภาพที่ 55 พลังงานความร้อนที่ได้ต่อเดือน

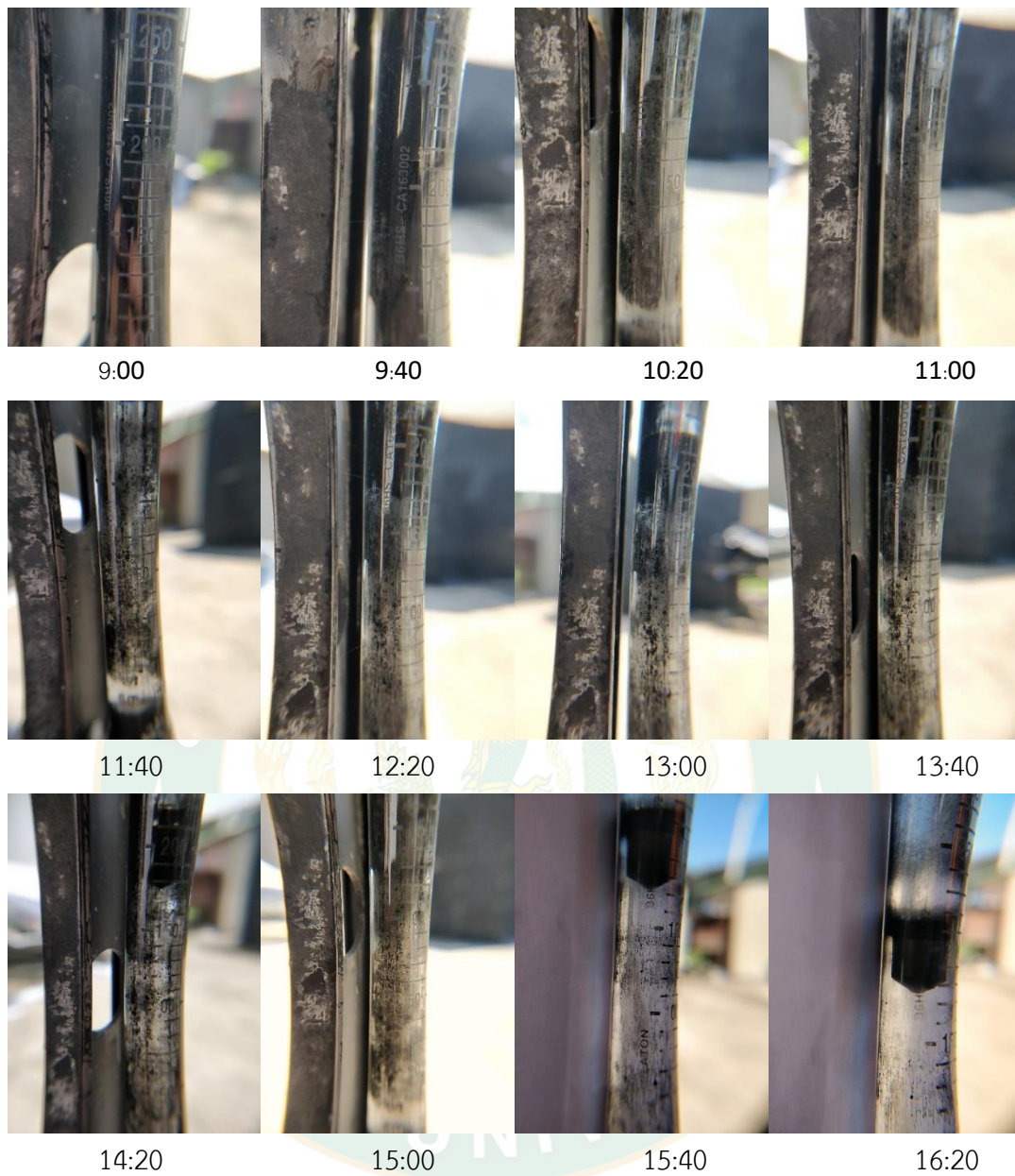
## 5. วิเคราะห์ความเสถียรและการตกตะกอนของของไหลกราฟีนนาโน

สารทำงานที่เป็นของไหลนาโนคือสารทำงานที่เกิดจากการรวมตัวของของแข็งที่มีขนาดเล็กเข้ากับของเหลวซึ่งมีข้อดีคือสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในด้านของความร้อน แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปอนุภาคกราฟีนในของไหลจะเกิดการตกตะกอน เนื่องจากของแข็งไม่สามารถรักษาการกระจายตัวใน

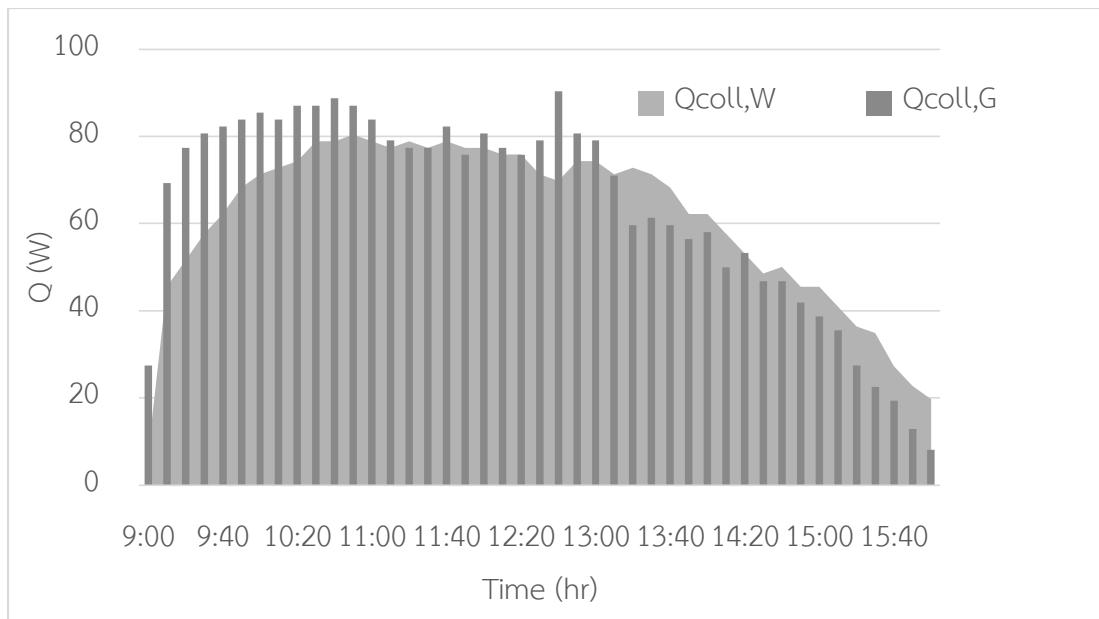
ของเหลวได้ โดยของไหลกราฟีนนาโนหลังจากทำการผสมจะมีลักษณะเป็นของเหลวสีดำทึบ ดังแสดงในภาพที่ 56 โดยเมื่อนำไปใช้เป็นสารทำงานในระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ จะพบการตกตะกอนของอนุภาคกราฟีนนาโน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากโรตاميเตอร์ (Rotameter) ซึ่งทำจากท่อแก้วจึงสามารถมองเห็นสารทำงานขณะอยู่ในระบบ แสดงดังภาพที่ 57 โดยจะสังเกตได้ว่าเมื่อเริ่มต้นระบบที่เวลา 9:00 น. สารทำงานจะมีสีดำทึบ และเมื่อระยะเวลาผ่านไป 40 นาที สีจะเริ่มจางขึ้น แสดงถึงการตกตะกอนของสารทำงานในระบบ ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนในช่วงเวลา 10:20 น. สารทำงานในระบบจะเริ่มมีลักษณะสีดําใส และสีจะค่อยๆ จางลงจนมีลักษณะใสในช่วงเวลาประมาณ 15:00 น. ซึ่งสัมพันธ์กับความร้อนที่ผลิตได้ขณะทำการทดสอบจะเห็นได้ว่าในช่วงเวลาประมาณ 9:00 น. ความร้อนที่ผลิตได้กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงานมีค่าสูงกว่ากรณีที่ใช้ น้ำเป็นสารทำงาน ซึ่งค่าความร้อนที่ผลิตได้จะค่อยๆ ลดลงจนถึงช่วงระยะเวลาประมาณ 13:00 น. จะมีค่าเข้าใกล้กับน้ำและจะลดต่ำลงเหตุผลเนื่องมาจากการตกตะกอนของของไหลกราฟีนนาโน และอนุภาคสารทำงานที่สูงกับอุณหภูมิอากาศแวดล้อมจึงเกิดการสูญเสียความร้อนสูงขึ้นทำให้ความร้อนที่ผลิตได้ลดลง ดังแสดงในภาพที่ 58



ภาพที่ 56 ลักษณะของไหลกราฟีนนาโนหลังจากทำการผสม



ภาพที่ 57 ลักษณะของไหลกราฟีนนาโนขณะเป็นสารทำงานในระบบ



ภาพที่ 58 ความร้อนที่ผลิตได้ในหนึ่งวัน





## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาสมรรถนะระบบทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ของไหลกราฟีนนาโน และน้ำเป็นสารทำงาน สามารถสรุปผลงานวิจัยได้ดังนี้

สมบัติของกราฟีนนาโน จะทำการคำนวณสมบัติของของไหลกราฟีนนาโนโดยใช้สมการในการคำนวณจากสัดส่วนปริมาตรของอนุภาคกราฟีนนาโนและน้ำ ที่อุณหภูมิสารทำงานตั้งแต่ 20-80 °C อัตราการไหลของสารทำงาน 120-220 cm<sup>3</sup>/min ที่ความเข้มข้น 0wt% 0.050wt% 0.075wt% และ 0.100wt% เพื่อหาสมบัติของค่าความหนาแน่น ค่าความหนืด ค่าความจุความร้อนจำเพาะ และค่าการนำความร้อน พบว่า กรณิที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนจะมีค่าความหนาแน่น ค่าความหนืด และค่าการนำความร้อนที่สูงกว่ากรณิที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน ส่วนค่าความจุความร้อนกรณิที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานจะให้ค่าที่สูงกว่ากรณิที่ใช่ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน

ในการทดสอบจะใช้ของไหลกราฟีนนาโนที่ความเข้มข้น 0wt% 0.050wt% 0.075wt% และ 0.100wt% ที่มีอัตราการไหลที่ใช้ในการทดสอบ 3 ค่า คือ 120 cm<sup>3</sup>/min 170 cm<sup>3</sup>/min และ 220 cm<sup>3</sup>/min ที่อุณหภูมิของสารทำงานเข้าระบบแตกต่างกันตั้งแต่ 35-65 °C สามารถสรุปได้ว่า ค่าความร้อนที่สารทำงานได้รับ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามความเข้มข้นและอัตราการไหลที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะสอดคล้องกับกรณิของเลขเรย์โนลด์ส์กับเลขนัสเซลท์ คือเมื่ออัตราการไหลเพิ่มสูงขึ้นมีผลทำให้เลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มขึ้นส่งผลให้เลขนัสเซลท์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยที่ความเข้มข้น 0.100wt% อัตราการไหล 220 cm<sup>3</sup>/min ให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ดีที่สุดเท่ากับ 699.25 W/m<sup>2</sup>·K รองลงมาเป็นที่ความเข้มข้น 0.075wt% 0.050wt% และ 0wt% ตามลำดับ

ได้สมการความสัมพันธ์ของเลขนัสเซลท์ (Nusselt number) ที่มีต่อค่า Reynolds number ค่า Prandtl number และความเข้มข้นของกราฟีนนาโนในช่วง 0.050wt% ถึง 0.100wt% ดังนี้

$$Nu=1.1353Pr^{0.32146}Re^{0.2726}\theta^{0.12454}; 0.050<\theta <0.100$$

สมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ

จากการทดสอบตามมาตรฐาน ASHRAE Standard 93-2003 พบว่า สารทำงานที่เป็นของไหลกราฟีนนาโนจะให้ค่าประสิทธิภาพที่สูงกว่าน้ำตลอดทุกช่วงของอุณหภูมิ สาเหตุมาจากของ



ไหล กราฟีนนาโนมีสมบัติด้านการนำความร้อนได้ดีกว่าน้ำ โดยของไหลกราฟีนนาโนมีค่า  $F_R(\tau\alpha)_e$  เท่ากับ 0.7790 และ  $F_{RU_L}$  เท่ากับ  $7.084 \text{ W/m}^2$  ในส่วนของกรณีที่ใช้ น้ำเป็นสารทำงานมีค่า  $F_R(\tau\alpha)_e$  เท่ากับ 0.6885 และค่า  $F_{RU_L}$  เท่ากับ  $7.1098 \text{ W/m}^2$  ดังนั้น สมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์กรณีใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงานมีค่าสูงกว่ากรณีใช้น้ำเป็นสารทำงาน

สมรรถนะทางความร้อนของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสสามารถผลิตน้ำร้อนสูงสุดเท่ากับ  $51.40 \text{ }^\circ\text{C}$  ในกรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโน ส่วนกรณีที่ใช้ น้ำเท่ากับ  $48.60 \text{ }^\circ\text{C}$  เพิ่มขึ้น 5.76% และในวันที่ท้องฟ้ามีเมฆมากสามารถผลิตน้ำร้อนสูงสุดเท่ากับ  $46.80 \text{ }^\circ\text{C}$  ส่วนกรณีที่ใช้ น้ำเท่ากับ  $44.70 \text{ }^\circ\text{C}$  เพิ่มขึ้น 4.90%

ความร้อนที่สะสมในถังเก็บน้ำร้อนต่อวันในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส กรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานมีค่า  $1.18 \text{ MJ/Day}$  กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงานมีค่า  $1.28 \text{ MJ/Day}$  เพิ่มขึ้น  $0.10 \text{ MJ}$  คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้น 8.47% และในวันที่ท้องฟ้ามีเมฆมาก กรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานมีค่า  $0.98 \text{ MJ/Day}$  กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงานมีค่าความร้อนที่ระบบผลิตได้อยู่ที่  $1.10 \text{ MJ/Day}$  เพิ่มขึ้น  $0.12 \text{ MJ/Day}$  คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้น 12.24%

ประสิทธิภาพระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงานจะให้ประสิทธิภาพระบบที่สูงกว่ากรณีที่ใช้ น้ำเป็นสารทำงาน ทั้งในกรณีวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส และกรณีของวันที่ท้องฟ้ามีเมฆมาก เมื่อพิจารณาในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสพบว่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 38.83% ในส่วนของวันที่มีเมฆมากพบว่าเพิ่มขึ้น 27.83%

ความเสถียรและการตกตะกอนของของไหลกราฟีนนาโน

จากการศึกษาพบว่า สารทำงานที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงานจะมีการตกตะกอนที่รวดเร็ว เนื่องจากผงกราฟีนนาโนมีลักษณะเป็นแผ่นยาวและมีขนาดใหญ่ เมื่อสังเกตที่ระยะเวลาหลังการทำงานของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ไปเพียง 40 min ก็ จะเห็นความแตกต่างของสารทำงานได้ โดยสามารถสังเกตลักษณะการตกตะกอนได้ชัดเจนหลังจากเวลาประมาณ 10:20 น. แต่สารทำงานที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงานสามารถให้ค่าประสิทธิภาพในการพาความร้อนได้ดีกว่าน้ำ จนถึงช่วงเวลาประมาณ 12:00 น. ประสิทธิภาพของระบบจะใกล้เคียงกับกรณีที่ใช้ น้ำเป็นสารทำงาน

ข้อเสนอแนะ

1.ควรมีการปรับปรุงค่าความเสถียรให้กับของไหลกราฟีนนาโนให้สามารถรักษาสถานะเป็นคอลลอยด์ได้นานมากขึ้น เพื่อประสิทธิภาพด้านความร้อนที่เพิ่มขึ้น

2.ควรปรับปรุงให้อนุภาคกราฟีนนาโนมีลักษณะเป็นทรงกลมเพื่อลดโอกาสการม้วนรวมตัวกันของอนุภาคกราฟีนนาโน

3.อาจจะใช้สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ช่วยเพื่อลดการตกตะกอนของอนุภาคกราฟีนนาโน



## บรรณานุกรม

- เกษมณี คำอ่อง. 2561. การเพิ่มประสิทธิภาพการนำความร้อนของของไหลนาโนกราฟีน. วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีสิ่งทอ. มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- กระทรวงพลังงาน, ก. 2554. โครงการพัฒนาบุคลากรด้านเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์.
- . 2561. คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทนชุดที่ 2 พลังงานแสงอาทิตย์. ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. 2014. HEAT TRANSFER. สถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- . 2537. การออกแบบระบบพลังงานความร้อน. กรุงเทพฯ: คณะพลังงาน และ วัสดุ; สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- . 2559. การตรวจวัดและวิเคราะห์ความผิดพลาดข้อมูลในงานวิจัย. หน่วยวิจัยระบบทางอุณหภาพ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ชนพันธ์ ลือคำหาญ. 2551. การศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนโดยใช้ของไหลนาโนเป็นสารทำงาน. ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- วิเชษฐ์ ละมัย และ เอกรัตน์ วงษ์แก้ว. 2558. การกระจายตัวของคอปเปอร์ออกไซด์ในน้ำด้วยวิธีค่าความเป็นกรดต่างและอัลตราโซนิก. วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ฉบับพิเศษ, 5(2558), 17-25.
- วิศณุสรณ์ ชาติอารยะวดี. 2013. กราฟีน ตอนที่ 2 : สมบัติและการนำไปประยุกต์ใช้. NARESUAN PHAYAO JOURNAL, 2014(7), 17-18.
- . 2555. แกรฟีน ตอนที่ 1: การสังเคราะห์คาร์บอนรูปแบบใหม่. NARESUAN PHAYAO JOURNAL, 2013(6), 10-24.
- อธิป รักเสรี. 2557. เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวเก็บรังสีแบบรวมแสงแบบพาราโบลิก. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- Anandan, D. & Rajan, K. 2012. Synthesis and stability of cupric oxide-based nanofluid: A novel coolant for efficient cooling. Asian Journal of Scientific Research, 5(4), 218-227.
- Baby, T. T. & Ramaprabhu, S. 2010. Investigation of thermal and electrical

- conductivity of graphene based nanofluids. **Journal of Applied Physics**, 108(12), 124308.
- Chol, S. & Estman, J. 1995. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. **ASME-Publications-Fed**, 231(99-106).
- Ghozatloo, A., Rashidi, A. & Shariaty-Niassar, M. 2014. Convective heat transfer enhancement of graphene nanofluids in shell and tube heat exchanger. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 53(136-141).
- Keopunya, M., . 2559. **Thermal Performance Study of Solar Water Heating System Using Nano-fluids Integrated with Ultrasonic**. Master of Engineering in Renewable Energy Engineering. Maejo University.
- Lazarus, G., Roy, S., Kunhappan, D., Cephas, E. & Wongwises, S. 2015. Heat transfer performance of silver/water nanofluid in a solar flat-plate collector. **Journal of Thermal Engineering**, 1(2), 104-112.
- Moghadam, A. J., Farzane-Gord, M., Sajadi, M. & Hoseyn-Zadeh, M. 2014. Effects of CuO/water nanofluid on the efficiency of a flat-plate solar collector. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 58(9-14).
- Mounet, N. & Marzari, N. 2005. First-principles determination of the structural, vibrational and thermodynamic properties of diamond, graphite, and derivatives. **Physical Review B**, 71(20), 205214.
- NawazishMehdia, S., Hussain, M. M., Basha, S. K. & Samad, M. A. 2018. Heat Enhancement Of Heat Exchanger Using Aluminium Oxide ( $Al_2O_3$ ), Copper Oxide (CuO) Nano Fluids With Different Concentrations. **Materials Today: Proceedings**, 5(2), 6481-6488.
- OPENI. 2560. **Pool boiling of water- $Al_2O_3$  and water-Cu nanofluids on horizontal smooth tubes**. [Online].
- Pak, B. C. & Cho, Y. I. 1998. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. **Experimental Heat Transfer an International Journal**, 11(2), 151-170.
- Polvongsri, S., . 2011. **Performance Enhancement of Flat-Plate Solar Collector at Low Mass Flow Rate Using Nano-Fluid**. Chiangmai University.
- Polvongsri, S. & Kiatsiriroat, T. 2011. **Enhancement of flat-plate solar collector**

**thermal performance with silver nano-fluid.**

- Senthilraja, S. & Vijayakumar, K. 2013. Analysis of heat transfer coefficient of CuO/water nanofluid using double pipe heat exchanger. **International Journal of Engineering**, 6(5), 675-680.
- Tiwari, A. K., Ghosh, P. & Sarkar, J. 2013. Solar water heating using nanofluids—a comprehensive overview and environmental impact analysis. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, 3(3), 221-224.
- Verma, S. K., Tiwari, A. K. & Chauhan, D. S. 2017. Experimental evaluation of flat plate solar collector using nanofluids. **Energy conversion and Management**, 134(103-115).
- Wang, X., Xu, X. & S. Choi, S. U. 1999. Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture. **Journal of thermophysics and heat transfer**, 13(4), 474-480.
- Wen, D. & Ding, Y. 2004. Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions. **International journal of heat and mass transfer**, 47(24), 5181-5188.
- Yousefi, T., Veisy, F., Shojaeizadeh, E. & Zinadini, S. 2012. An experimental investigation on the effect of MWCNT-H<sub>2</sub>O nanofluid on the efficiency of flat-plate solar collectors. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 39(207-212).
- Yousefi, T., Veysi, F., Shojaeizadeh, E. & Zinadini, S. 2012. An experimental investigation on the effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O nanofluid on the efficiency of flat-plate solar collectors. **Renewable Energy**, 39(1), 293-298.
- Yu, W., Xie, H., Wang, X. & Wang, X. 2011. Significant thermal conductivity enhancement for nanofluids containing graphene nanosheets. **Physics Letters A**, 375(10), 1323-1328.



ภาคผนวก





ภาคผนวก ก  
ตัวอย่างการคำนวณ

### การคำนวณสมบัติของของไหลกราฟีนนาโน

จากข้อมูลในตารางที่ 9 และตารางที่ 10 สมบัติทั่วไปของอนุภาคกราฟีนนาโนและน้ำ สามารถคำนวณได้ดังนี้

-ตัวอย่างการคำนวณที่ความเข้มข้น 0.100 wt% อุณหภูมิ 30 °C

#### ค่าสัดส่วนปริมาตร

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

$$\text{โดย } V = \frac{\text{มวล}}{\text{ความหนาแน่น}}$$

$$V_p = \frac{3 \times 10^{-3} \text{ kg}}{2620 \text{ kg/m}^3} = 1.145 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$V_f = \frac{3 \text{ l}}{1000 \text{ l/m}^3} = 3 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\alpha = 0.0003815$$

#### ค่าความเป็นทรงกลม

$$\text{จาก } \phi = \frac{\text{พ.ท.ผิวทรงกลม}}{\text{พ.ท.ผิวจริงอนุภาค}}$$

พื้นที่ผิวจริงอนุภาค จากข้อมูล (เกษมณี คำอ่อง, 2561) พบว่า ขนาดของแผ่นกราฟีนนาโนมีขนาดกว้าง 2  $\mu\text{m}$  ยาว 2  $\mu\text{m}$  หนา 2 nm ดังนั้น พื้นที่ผิวจริงหาได้จาก

$$\text{พื้นที่ผิวจริง} = (2 \times 2 \times 10^{-6} \times 2 \times 10^{-6}) + (4 \times 2 \times 10^{-6} \times 2 \times 10^{-9})$$

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

$$\text{ปริมาตร} = 2 \times 10^{-6} \times 2 \times 10^{-6} \times 2 \times 10^{-9}$$

$$\text{ปริมาตร} = 8 \times 10^{-21} \text{ m}^3$$

พื้นที่ผิวทรงกลมหาได้จากพื้นที่ผิวของทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากับปริมาตรแผ่นกราฟีน

$$\text{ปริมาตรทรงกลม} = \frac{4}{3} \pi r^3$$

$$8 \times 10^{-21} = \frac{4}{3} \pi r^3$$

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

ดังนั้นปริมาตรทรงกลมตามทฤษฎี หาได้จาก

$$\begin{aligned} A &= 4\pi r^2 \\ &= 4\pi(1.241 \times 10^{-7})^2 \\ &= 1.935 \times 10^{-13} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความเป็นทรงกลมจะได้

$$\phi = \frac{\text{พ.ท.ผิวทรงกลม}}{\text{พ.ท.ผิวจริงอนุภาค}}$$

$$\phi = \frac{1.935 \times 10^{-13}}{8.016 \times 10^{-12}}$$

$$\phi = 2.413 \times 10^{-2}$$

ตัวประกอบรูปร่าง

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

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

$$n = 124.302$$

ความหนาแน่น

จาก

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

$$\rho_{nf} = (0.0003815 \times 2620 \text{ kg/m}^3) + ((1 - 0.0003815) 995.61 \text{ kg/m}^3)$$

$$\rho_{nf} = 996.22 \text{ kg/m}^3$$

ความหนืด

จาก

$$\mu_{nf} = (1 + 7.3\alpha + 123\alpha^2) \mu_w$$

เมื่อ  $\mu_w$  เท่ากับ 0.000797 Pa.s

$$\mu_{nf} = (1 + (7.3 \times 0.0003815) + (123(0.0003815^2))) 0.000797 \text{ Pa.s}$$

$$\mu_{nf} = 0.000799 \text{ Pa.s}$$

### ความจุความร้อนจำเพาะ

$$\begin{aligned} \text{จาก } C_{p_{nf}} &= \alpha C_{p_p} + (1 - \alpha) C_{p_w} \\ C_{p_{nf}} &= (0.0003815 \times 790 \text{ J/Kg} \cdot \text{K}) + ((1 - 0.0003815) \times 4180.08 \text{ J/Kg} \cdot \text{K}) \\ C_{p_{nf}} &= 4178.79 \text{ J/Kg} \cdot \text{K} \end{aligned}$$

### อัตราส่วนค่าการนำความร้อนของสารทำงาน

$$\begin{aligned} \text{จาก } k_{nf} &= \frac{k_p + (n - 1)k_f + (n - 1)\alpha(k_f - k_p)}{k_f + (n - 1)k_p - \alpha(k_f - k_p)} \\ \text{แทนค่า } &= \frac{k_{nf}}{0.614 \text{ W/m} \cdot \text{K}} \\ &= \frac{5000 \text{ W/m} \cdot \text{K} + ((124.302 - 1) \times 0.614 \text{ W/m} \cdot \text{K}) + ((124.302 - 1) \times 0.0003815 \times (0.614 \text{ W/m} \cdot \text{K} - 5000 \text{ W/m} \cdot \text{K}))}{5000 \text{ W/m} \cdot \text{K} + ((124.302 - 1) \times 0.614 \text{ W/m} \cdot \text{K}) - (0.0003815 \times (0.614 \text{ W/m} \cdot \text{K} - 5000 \text{ W/m} \cdot \text{K}))} \end{aligned}$$

$$\text{จะได้ } k_{nf} = 0.643 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

การวิเคราะห์ Uncertainty analysis ของค่าความร้อนและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อทองแดง

$$\text{จาก } \omega_R = \left[ \left( \frac{\partial f}{\partial x_1} \omega_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial x_2} \omega_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial f}{\partial x_n} \omega_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

เมื่อ  $\omega_R$  คือค่า uncertainty ในผลลัพธ์และ  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$  คือค่า uncertainty ในพารามิเตอร์แต่ละตัวตามลำดับ

$$\text{จาก } Q_{wf} = \dot{m} C_{p_{wf}} \Delta T = \dot{m} C_{p_{wf}} (T_{fo} - T_{fi})$$

$$\text{และ } h_i = \frac{Q_{wf}}{A_{\text{tube}} \Delta T} = \frac{Q_{wf}}{A_{\text{tube}} (T_{\text{surface}} - T_{wf})}$$

โดยตัวแปรต่างๆมีค่า Uncertainty จากเครื่องมือวัดดังนี้ อัตราการไหล  $\dot{m} = \pm 1.6\%$  ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสารทำงาน  $C_{p_{wf}} \approx 0$  ในที่นี้ใช้ค่า  $0.01\%$  ผลต่างอุณหภูมิ  $\Delta T = \pm(0.4\% + 0.5\text{ }^{\circ}\text{C})$  พื้นที่ท่อทองแดง  $A_{\text{tube}} = \pm 0.01\%$  ใช้ข้อมูลในตารางภาคผนวกที่ 17

โดย  $\omega_Q$  คือค่า uncertainty ของความร้อนหาได้จาก

$$\omega_Q = \left[ \left( \frac{\partial Q}{\partial \dot{m}} \omega_{\dot{m}} \right)^2 + \left( \frac{\partial Q}{\partial C_{p_{wf}}} \omega_{C_{p_{wf}}} \right)^2 + \left( \frac{\partial Q}{\partial \Delta T} \omega_{\Delta T} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

นำข้อมูลในตารางภาคผนวกที่ 17 แทนค่าจะได้

$$\frac{\partial Q}{\partial \dot{m}} = \frac{\partial}{\partial \dot{m}} (\dot{m} C_{p_{wf}} \Delta T) = C_{p_{wf}} \Delta T = 4.18 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \times (43.1 - 35.6)^{\circ}\text{C} = 31.34 \text{ kJ/kg}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial C_{p_{wf}}} = \frac{\partial}{\partial C_{p_{wf}}} (\dot{m} C_{p_{wf}} \Delta T) = \dot{m} \Delta T = 0.002 \text{ kg/s} \times (43.1 - 35.6)^{\circ}\text{C} = 0.01492 \text{ kg} \cdot ^{\circ}\text{C/s}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \Delta T} = \frac{\partial}{\partial \Delta T} (\dot{m} C_{p_{wf}} \Delta T) = \dot{m} C_{p_{wf}} = 0.002 \text{ kg/s} \times 4.18 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} = 0.00831 \text{ kJ/s} \cdot \text{K}$$

$$\omega_{\dot{m}} = 0.002 \text{ kg/s} \times 1.6\% = 3.2 \times 10^{-5} \text{ kg/s}$$

$$\omega_{C_{p_{wf}}} = 4.18 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \times 0.01\% = 0.00418 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$\omega_{\Delta T} = 0.504 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

เมื่อนำผลที่ได้แทนค่าลงในสมการจะได้  $\omega_Q = 0.0043 \text{ W}$

ดังนั้น  $Q = 62.33 \pm 0.0043 \text{ W} = 62.33 \text{ W} \pm 0.0069\%$

โดย  $\omega_h$  คือค่า uncertainty ของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อทองแดง

$$\omega_h = \left[ \left( \frac{\partial h}{\partial Q} \omega_Q \right)^2 + \left( \frac{\partial h}{\partial A} \omega_A \right)^2 + \left( \frac{\partial h}{\partial \Delta T} \omega_{\Delta T} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

นำข้อมูลในตารางภาคผนวกที่ 17 แทนค่าจะได้

$$\frac{\partial h}{\partial Q} = \frac{\partial h}{\partial Q} \left( \frac{Q}{A \times \Delta T} \right) = \frac{1}{A \times \Delta T} = \frac{1}{0.027 \text{ m}^2 \times 4.8 \text{ } ^\circ\text{C}} = 7.7 \text{ m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\frac{\partial h}{\partial A} = \frac{\partial h}{\partial A} \left( \frac{Q}{A \times \Delta T} \right) = \frac{Q}{\Delta T} \times \left( -\frac{1}{A^2} \right) = \frac{62.33 \text{ W}}{4.8 \text{ } ^\circ\text{C}} \times \left( -\frac{1}{(0.027 \text{ m}^2)^2} \right) = -17,998.9 \text{ W/m}^4 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\frac{\partial h}{\partial \Delta T} = \frac{\partial h}{\partial \Delta T} \left( \frac{Q}{A \times \Delta T} \right) = \frac{Q}{A} \times \left( -\frac{1}{\Delta T^2} \right) = \frac{62.33 \text{ W}}{0.027 \text{ m}^2} \times \left( -\frac{1}{(4.8 \text{ } ^\circ\text{C})^2} \right) = -102.3 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}^2$$

$$\omega_Q = 62.33 \text{ W} \times 0.0069\% = 0.0043 \text{ W}$$

$$\omega_A = 0.027 \text{ m}^2 \times 0.01\% = 0.0000027 \text{ m}^2$$

$$\omega_{\Delta T} = 0.504 \text{ } ^\circ\text{C}$$

เมื่อนำผลที่ได้แทนค่าลงในสมการจะได้  $\omega_h = 51.56 \text{ W/m}^2 \cdot \text{k}$

$$\text{ดังนั้น } Q = 485.79 \pm 51.56 \text{ W/m}^2 \cdot \text{k} = 485.79 \text{ W/m}^2 \cdot \text{k} \pm 10.61\%$$



สมบัติด้านความร้อนของของไหลกราฟีนนาโนภายในท่อทองแดงที่พันด้วยขดลวดไฟฟ้า

จากตารางภาคผนวกที่ 49 สามารถคำนวณหาสมบัติของไหลที่ใช้ความเข้มข้น 0.100wt% อุณหภูมิสารทำงานเริ่มต้น 35 °C ได้ดังต่อไปนี้

ค่าความร้อนที่สารทำงานได้รับ

$$\text{จาก} \quad Q = \dot{m} C_p (T_{\text{outAve}} - T_{\text{inAve}})$$

อัตราการไหลเชิงมวลหาได้จากสมการ

$$\dot{m} = \dot{V} \times \rho$$

เมื่อสารทำงานมีอัตราการไหล 220 cm<sup>3</sup>/min หรือ 0.0037 l/s มีค่าความหนาแน่นประมาณ 994.61 kg/m<sup>3</sup>

$$\dot{m} = \dot{V} \times \rho = 0.0037 \text{ l/s} \times 994.61 \text{ kg/m}^3 \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}}$$

$$\dot{m} = 0.003647 \text{ kg/s}$$

โดยค่า Cp ของของไหลกราฟีนนาโนที่ความเข้มข้น 0.100wt% อุณหภูมิ 35 °C มีค่าประมาณ 4,178.21 J/kgK ดังนั้น ค่าความร้อนที่สารทำงานได้รับเท่ากับ

$$Q = \dot{m} C_p (T_{\text{outAve}} - T_{\text{inAve}})$$

$$Q = 0.003647 \text{ kg/s} \times 4,178.21 \text{ J/kg} \cdot \text{K} \times (39.62 - 34.60) \text{ K}$$

$$Q = 76.49 \text{ W}$$

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อทองแดง หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$h_i = \frac{Q}{A_{\text{tube}} (T_s - T_{\text{wf}})}$$

เมื่อ  $A_{\text{tube}}$  คือพื้นที่ของท่อทรงกระบอก หาได้จากสมการ

$$A_{\text{tube}} = 2\pi rL$$

โดยท่อทองแดงมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0086 m และมีความยาว 1 m ดังนั้น

$$A_{\text{tube}} = \pi \times 0.0086 \times 1$$

$$A_{\text{tube}} = 0.027 \text{ m}^2$$

จากตารางภาคผนวกที่ 49 อุณหภูมิผิวเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ  $T_s = 41.10 \text{ }^\circ\text{C}$  อุณหภูมิสารทำงานเฉลี่ยเท่ากับ  $T_{\text{wf}} = 37.11 \text{ }^\circ\text{C}$  ดังนั้น

$$h_i = \frac{Q}{A_{\text{tube}} (T_s - T_{\text{wf}})} = \frac{76.49 \text{ W}}{0.027 \text{ m}^2 \times (41.10 - 37.11) \text{ K}} = 710.04 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

ตัวเลขเรย์โนลด์ส หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{Re} = \frac{\rho v D}{\mu}$$

เมื่อ  $\rho$  คือค่าความหนาแน่นของของไหลกราฟีนนาโนที่ความเข้มข้น 0.100wt% อุณหภูมิ 35  $^\circ\text{C}$  มีค่าประมาณ 994.61  $\text{kg/m}^3$   $v$  คือความเร็วในการไหลมีค่าประมาณ 0.0631  $\text{m/s}$   $D$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดงมีค่าเท่ากับ 0.0086 m และ  $\mu$  คือความหนืดมีค่าเท่ากับ  $721.14 \times 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$  ดังนั้น

$$\text{Re} = 748.72$$

ตัวเลขนัสเซิลท์ หาได้จากสมการต่อไปนี้

เมื่อ  $k$  คือค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลกราฟีนนาโนที่ความเข้มข้น 0.100wt% อุณหภูมิ 35 °C มีค่าประมาณ 0.65 W/m.K

$$\text{Nu} = \frac{hD}{k} = \frac{710.04 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \times 0.0086 \text{ m}}{0.65 \text{ W/m} \cdot \text{K}} = 9.38$$

### การคำนวณสมรรถนะของตัวเก็บรังสีเก็บรังสีอาทิตย์

ข้อมูลจากตารางภาคผนวกที่ 54 การทดสอบสมรรถนะของตัวเก็บรังสีเก็บรังสีอาทิตย์ที่อัตราการไหล  $\dot{m} = 0.0039 \text{ kg/s}$  มีพื้นที่รับรังสีอาทิตย์ประมาณ  $A_c = 0.15 \text{ m}^2$  มีค่าความจุความร้อนจำเพาะ  $C_p = 4,178.21 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$  และมีค่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อม  $T_a = 31.80 \text{ }^\circ\text{C}$  อุณหภูมิเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์  $T_{fi} = 35.00 \text{ }^\circ\text{C}$  และอุณหภูมิออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์  $T_{fo} = 40.90 \text{ }^\circ\text{C}$  ความเข้มรังสีอาทิตย์  $860.77 \text{ W/m}^2$  สามารถหาค่า  $F_R(\tau\alpha)_e$  และ  $F_R U_L$  ได้ดังนี้

### อัตราความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์

$$Q_{\text{coll}} = \dot{m} C_p (T_{fo} - T_{fi})$$

$$Q_{\text{coll}} = [0.0039 \text{ kg/s} \times 0.15 \text{ m}^2 \times 4,178.21 \text{ J/kg} \cdot \text{K} \times (40.90 - 35.00) \text{ K}]$$

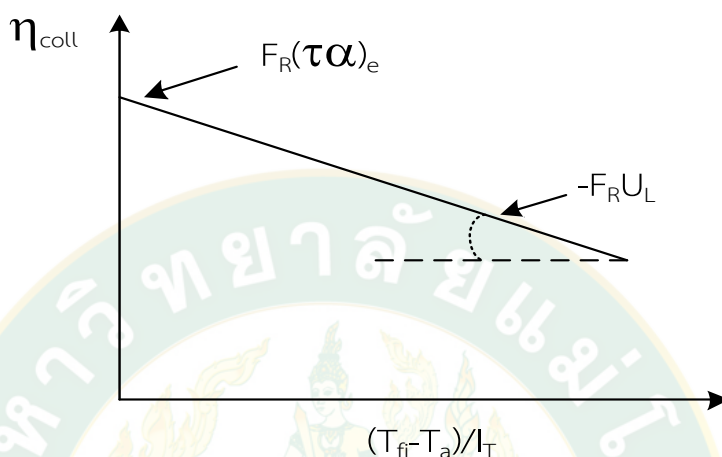
$$Q_{\text{coll}} = 96.14 \text{ W}$$

### ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

$$\eta_{\text{coll}} = \frac{Q_{\text{coll}}}{A_c I_T} = \frac{96.14 \text{ W}}{0.15 \text{ m}^2 \times 860.77 \text{ W/m}^2} = 0.74$$

$$\frac{T_{fi} - T_a}{I_T} = \frac{35.00 - 31.80}{860.77} = 0.0037$$

สามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\eta_{\text{coll}}$  และ  $(T_f - T_a)/I_T$  จะได้สมการเส้นตรง ดังแสดงในภาพผนวกที่ 1 โดยที่ค่าความชันของเส้นคือค่า  $-F_R U_L$  ซึ่งมีความชันติดลบ ส่วนค่าตัดแกนประสิทธิภาพ คือค่า  $F_R(\tau\alpha)_e$



ภาพผนวกที่ 1 เส้นแสดงสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

#### การคำนวณสมรรถนะทางความร้อนของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

จากข้อมูลในตารางภาคผนวกที่ 57 กรณีวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส โดยมีน้ำในถังน้ำร้อนขนาด 11 ลิ พื้นที่รับแสงอาทิตย์ 0.15 m<sup>2</sup> ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำในถังน้ำร้อน 4,180.84 J/kg·K อุณหภูมิน้ำในถังเริ่มต้น 23.50 °C และอุณหภูมิน้ำในถังเมื่อเวลาเปลี่ยนไป 10 min เท่ากับ 24.00 °C ความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 477.95 W/m<sup>2</sup> สามารถคำนวณหาค่าความร้อนในถังเก็บน้ำร้อนและประสิทธิภาพระบบได้ดังนี้

#### ความร้อนในถังเก็บน้ำร้อน

$$\begin{aligned}
 Q_s &= (MCp)_s \frac{T_s^{t+\Delta t} - T_s}{\Delta t} \\
 &= (11 \text{ l} \times 4,180.84 \text{ J/kg} \cdot \text{K}) \times \frac{(24.00 - 23.50) \text{ K}}{600 \text{ s}} \times \frac{600}{10^6} \\
 &= 0.023 \text{ MJ}
 \end{aligned}$$

$$I_T \times A_c \times \Delta t = \frac{477.95 \times 0.15 \times 600}{10^6}$$

$$= 0.043 \text{ MJ}$$

จากข้อมูลในตารางภาคผนวกที่ 57 ประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ จะใช้ความร้อนในถังเก็บน้ำร้อนรวมทั้งวัน และค่า  $I_T \times A_c \times \Delta t$  รวมทั้งวันมาคำนวณเพื่อหา ประสิทธิภาพรวมของระบบ โดยทั้งวันจะคิดที่เวลา 9:00-14:00 น. เนื่องจากหลังเวลาดังกล่าวค่า ของความเข้มรังสีอาทิตย์ลดลงและอุณหภูมิน้ำร้อนเริ่มลดลงจึงทำการปิดระบบลง โดยพบว่าค่าความ ร้อนในถังเก็บน้ำร้อนรวมทั้งวันมีค่า 1.2831 MJ และค่า  $I_T \times A_c \times \Delta t$  รวมทั้งวันเท่ากับ 2.0512 MJ

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

$$= \frac{1.2831 \text{ MJ}}{2.0512 \text{ MJ}} \times 100$$

$$= 62.55\%$$

ภาคผนวก ข  
ข้อมูลการทดสอบ





## ข้อมูลการคำนวณสมบัติของไฮลกราฟีนนาโน

## ตารางภาคผนวกที่ 1 ข้อมูลการคำนวณความหนาแน่นของสารทำงานในระบบ

Temp (°C)	Density (kg/m <sup>3</sup> )			
	0.000wt%	0.050wt%	0.075wt%	0.100wt%
20	998.16	998.47	998.63	998.78
25	997.00	997.31	997.47	997.62
30	995.61	995.92	996.07	996.23
35	993.99	994.30	994.46	994.61
40	992.18	992.49	992.64	992.80
45	990.17	990.48	990.64	990.79
50	988.00	988.31	988.46	988.62
55	985.66	985.97	986.12	986.28
60	983.16	983.47	983.63	983.78
65	980.52	980.83	980.99	981.14
70	977.73	978.05	978.20	978.36
75	974.81	975.13	975.29	975.44
80	971.77	972.08	972.24	972.40

## ตารางภาคผนวกที่ 2 ข้อมูลการคำนวณความจุความร้อนจำเพาะของสารทำงานในระบบ

Temp (°C)	Cp (J/kgK)			
	0.000wt%	0.050wt%	0.075wt%	0.100wt%
20	4,184.36	4,183.71	4,183.39	4,183.06
25	4,181.60	4,180.95	4,180.63	4,180.31
30	4,180.08	4,179.44	4,179.11	4,178.79
35	4,179.50	4,178.86	4,178.53	4,178.21
40	4,179.65	4,179.00	4,178.68	4,178.35
45	4,180.36	4,179.71	4,179.39	4,179.07
50	4,181.55	4,180.90	4,180.58	4,180.25
55	4,183.15	4,182.50	4,182.18	4,181.85
60	4,185.13	4,184.49	4,184.16	4,183.84
65	4,187.49	4,186.84	4,186.52	4,186.19
70	4,190.22	4,189.57	4,189.25	4,188.92
75	4,193.34	4,192.69	4,192.37	4,192.04
80	4,196.87	4,196.22	4,195.90	4,195.57

ตารางภาคผนวกที่ 3 ข้อมูลการคำนวณความหนืดของสารทำงานในระบบ

Temp (°C)	Viscosity (Pa.s)			
	0.000wt%	0.050wt%	0.075wt%	0.100wt%
20	0.00100163	0.00100303	0.00100373	0.00100444
25	0.00089004	0.00089128	0.00089191	0.00089253
30	0.00079722	0.00079834	0.00079890	0.00079946
35	0.00071912	0.00072012	0.00072063	0.00072114
40	0.00065272	0.00065363	0.00065409	0.00065455
45	0.00059575	0.00059659	0.00059700	0.00059742
50	0.00054650	0.00054726	0.00054765	0.00054803
55	0.00050361	0.00050431	0.00050466	0.00050502
60	0.00046602	0.00046667	0.00046699	0.00046732
65	0.00043288	0.00043349	0.00043379	0.00043410
70	0.00040353	0.00040409	0.00040438	0.00040466
75	0.00037740	0.00037793	0.00037819	0.00037846
80	0.00035404	0.00035453	0.00035478	0.00035503

ตารางภาคผนวกที่ 4 ข้อมูลการคำนวณสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของสารทำงานในระบบ

Temp (°C)	K (W/m.k)			
	0.000wt%	0.050wt%	0.075wt%	0.100wt%
20	0.598	0.612	0.619	0.626
25	0.606	0.621	0.628	0.635
30	0.614	0.629	0.636	0.643
35	0.622	0.636	0.643	0.651
40	0.628	0.643	0.650	0.658
45	0.635	0.650	0.657	0.664
50	0.641	0.656	0.663	0.671
55	0.646	0.661	0.669	0.676
60	0.651	0.666	0.674	0.681
65	0.656	0.671	0.678	0.686
70	0.660	0.675	0.683	0.691
75	0.664	0.679	0.687	0.695
80	0.667	0.683	0.690	0.698

ข้อมูลการทดสอบสมบัติด้านความร้อนของของไหลกราฟีนนาโนภายในท่อทองแดงที่พันด้วย  
ขดลวดไฟฟ้า

ตารางภาคผนวกที่ 5 กรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน อัตราการไหล 120 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อ  
ทองแดง 35 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
0:30	35.0	41.2	42.1	38.1	6.2	51.46	476.46	434.44	6.55
1:00	35.0	41.1	42.0	38.1	6.1	50.63	474.72	434.03	6.52
1:30	34.9	41.0	42.0	38.0	6.1	50.63	463.01	433.21	6.36
2:00	34.9	41.0	42.0	38.0	6.1	50.63	463.01	433.21	6.36
2:30	34.9	41.0	42.0	38.0	6.1	50.63	463.01	433.21	6.36
3:00	34.9	41.0	42.0	38.0	6.1	50.63	463.01	433.21	6.36
3:30	35.0	41.0	42.1	38.0	6.0	49.80	455.41	433.62	6.26
4:00	35.0	41.0	42.1	38.0	6.0	49.80	455.41	433.62	6.26
4:30	35.1	41.0	42.1	38.1	5.9	48.97	447.81	434.03	6.15
5:00	35.1	41.1	42.1	38.1	6.0	49.80	461.09	434.44	6.34
5:30	35.1	41.1	42.2	38.1	6.0	49.80	455.40	434.44	6.26
6:00	35.1	41.2	42.2	38.2	6.1	50.63	462.98	434.85	6.36
6:30	35.1	41.2	42.2	38.2	6.1	50.63	462.98	434.85	6.36
7:00	35.2	41.2	42.2	38.2	6.0	49.80	461.07	435.26	6.33
7:30	35.2	41.2	42.3	38.2	6.0	49.80	455.38	435.26	6.26
8:00	35.2	41.2	42.3	38.2	6.0	49.80	455.38	435.26	6.26
8:30	35.2	41.3	42.4	38.3	6.1	50.62	457.31	435.67	6.28
9:00	35.2	41.3	42.4	38.3	6.1	50.62	457.31	435.67	6.28
9:30	35.3	41.3	42.4	38.3	6.0	49.79	449.81	436.08	6.18
10:00	35.3	41.4	42.4	38.4	6.1	50.62	462.94	436.49	6.36

ตารางภาคผนวกที่ 5 (ต่อ) กรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน อัตราการไหล 120 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้า  
ท่อทองแดง 35 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	35.4	41.4	42.4	38.4	6.0	49.79	461.04	436.90	6.33
11:00	35.4	41.4	42.4	38.4	6.0	49.79	461.04	436.90	6.33
11:30	35.5	41.5	42.4	38.5	6.0	49.79	472.84	437.72	6.49
12:00	35.5	41.5	42.5	38.5	6.0	49.79	466.86	437.72	6.41
12:30	35.5	41.5	42.5	38.5	6.0	49.79	461.02	437.72	6.33
13:00	35.6	41.6	42.5	38.6	6.0	49.79	472.83	438.54	6.49
13:30	35.6	41.6	42.5	38.6	6.0	49.79	472.83	438.54	6.49
14:00	35.7	41.6	42.5	38.7	5.9	48.96	470.98	438.95	6.46
14:30	35.7	41.7	42.6	38.7	6.0	49.79	478.95	439.36	6.57
15:00	35.7	41.7	42.6	38.7	6.0	49.79	472.81	439.36	6.49
15:30	35.7	41.7	42.7	38.7	6.0	49.79	466.82	439.36	6.41
16:00	35.7	41.7	42.7	38.7	6.0	49.79	460.99	439.36	6.33
16:30	35.7	41.7	42.7	38.7	6.0	49.79	460.99	439.36	6.33
17:00	35.8	41.8	42.7	38.8	6.0	49.78	472.79	440.19	6.49
17:30	35.8	41.8	42.7	38.8	6.0	49.78	472.79	440.19	6.49
18:00	35.8	41.8	42.8	38.8	6.0	49.78	466.81	440.19	6.40
18:30	35.8	41.8	42.9	38.8	6.0	49.78	455.28	440.19	6.25
19:00	35.9	41.8	42.8	38.9	5.9	48.95	459.02	440.60	6.30
19:30	35.9	41.8	42.9	38.9	5.9	48.95	447.68	440.60	6.14
20:00	35.9	41.9	43.0	38.9	6.0	49.78	455.26	441.01	6.24

ตารางภาคผนวกที่ 6 กรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน อัตราการไหล  $120 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าท่อ  
ทองแดง  $45 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	45.3	51.3	52.1	48.3	6.0	49.61	483.52	520.51	6.51
1:00	45.3	51.3	52.2	48.3	6.0	49.61	477.24	520.51	6.43
1:30	45.3	51.3	52.1	48.3	6.0	49.61	483.52	520.51	6.51
2:00	45.3	51.3	52.1	48.3	6.0	49.61	483.52	520.51	6.51
2:30	45.3	51.3	52.2	48.3	6.0	49.61	477.24	520.51	6.43
3:00	45.3	51.3	52.1	48.3	6.0	49.61	483.52	520.51	6.51
3:30	45.3	51.3	52.2	48.3	6.0	49.61	477.24	520.51	6.43
4:00	45.3	51.3	52.1	48.3	6.0	49.61	483.52	520.51	6.51
4:30	45.3	51.3	52.2	48.3	6.0	49.61	477.24	520.51	6.43
5:00	45.3	51.3	52.2	48.3	6.0	49.61	477.24	520.51	6.43
5:30	45.3	51.3	52.2	48.3	6.0	49.61	477.24	520.51	6.43
6:00	45.3	51.3	52.2	48.3	6.0	49.61	477.24	520.51	6.43
6:30	45.3	51.3	52.2	48.3	6.0	49.61	477.24	520.51	6.43
7:00	45.3	51.3	52.2	48.3	6.0	49.61	477.24	520.51	6.43
7:30	45.3	51.3	52.2	48.3	6.0	49.61	477.24	520.51	6.43
8:00	45.3	51.3	52.2	48.3	6.0	49.61	477.24	520.51	6.43
8:30	45.3	51.3	52.1	48.3	6.0	49.61	483.52	520.51	6.51
9:00	45.3	51.3	52.1	48.3	6.0	49.61	483.52	520.51	6.51
9:30	45.3	51.3	52.2	48.3	6.0	49.61	477.24	520.51	6.43
10:00	45.3	51.3	52.2	48.3	6.0	49.61	477.24	520.51	6.43

ตารางภาคผนวกที่ 6 (ต่อ) กรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน อัตราการไหล  $120 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้า  
ท่อทองแดง  $45 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
10:30	45.3	51.3	52.2	48.3	6.0	49.61	477.24	520.51	6.43
11:00	45.3	51.3	52.2	48.3	6.0	49.61	477.24	520.51	6.43
11:30	45.3	51.3	52.1	48.3	6.0	49.61	483.52	520.51	6.51
12:00	45.3	51.3	52.2	48.3	6.0	49.61	477.24	520.51	6.43
12:30	45.3	51.3	52.1	48.3	6.0	49.61	483.52	520.51	6.51
13:00	45.3	51.3	52.1	48.3	6.0	49.61	483.52	520.51	6.51
13:30	45.3	51.3	52.1	48.3	6.0	49.61	483.52	520.51	6.51
14:00	45.3	51.3	52.1	48.3	6.0	49.61	483.52	520.51	6.51
14:30	45.3	51.3	52.1	48.3	6.0	49.61	483.52	520.51	6.51
15:00	45.3	51.3	52.1	48.3	6.0	49.61	483.52	520.51	6.51
15:30	45.3	51.3	52.2	48.3	6.0	49.61	477.24	520.51	6.43
16:00	45.3	51.3	52.2	48.3	6.0	49.61	477.24	520.51	6.43
16:30	45.3	51.3	52.2	48.3	6.0	49.61	477.24	520.51	6.43
17:00	45.3	51.3	52.2	48.3	6.0	49.61	477.24	520.51	6.43
17:30	45.3	51.3	52.2	48.3	6.0	49.61	477.24	520.51	6.43
18:00	45.3	51.3	52.2	48.3	6.0	49.61	477.24	520.51	6.43
18:30	45.3	51.3	52.2	48.3	6.0	49.61	477.24	520.51	6.43
19:00	45.3	51.3	52.2	48.3	6.0	49.61	477.24	520.51	6.43
19:30	45.3	51.3	52.2	48.3	6.0	49.61	477.24	520.51	6.43
20:00	45.3	51.3	52.2	48.3	6.0	49.61	477.24	520.51	6.43



ตารางภาคผนวกที่ 7 กรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน อัตราการไหล 120 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อ  
ทองแดง 55 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
0:30	55.1	61.1	61.6	58.1	6.0	49.41	518.47	607.43	6.87
1:00	55.0	61.0	61.5	58.0	6.0	49.42	518.49	606.52	6.87
1:30	54.9	60.9	61.5	57.9	6.0	49.42	504.22	605.62	6.68
2:00	54.8	60.9	61.5	57.9	6.1	50.24	505.67	605.16	6.70
2:30	54.8	60.9	61.5	57.9	6.1	50.24	505.67	605.16	6.70
3:00	54.8	60.9	61.5	57.9	6.1	50.24	505.67	605.16	6.70
3:30	54.8	60.9	61.5	57.9	6.1	50.24	505.67	605.16	6.70
4:00	54.8	60.9	61.5	57.9	6.1	50.24	505.67	605.16	6.70
4:30	54.8	60.8	61.5	57.8	6.0	49.42	497.39	604.71	6.59
5:00	54.8	60.9	61.5	57.9	6.1	50.24	512.64	605.16	6.79
5:30	54.8	60.9	61.5	57.9	6.1	50.24	512.64	605.16	6.79
6:00	54.8	60.9	61.5	57.9	6.1	50.24	512.64	605.16	6.79
6:30	54.8	60.8	61.5	57.8	6.0	49.42	497.39	604.71	6.59
7:00	54.8	60.9	61.4	57.9	6.1	50.24	519.80	605.16	6.89
7:30	54.8	60.8	61.5	57.8	6.0	49.42	497.39	604.71	6.59
8:00	54.8	60.8	61.4	57.8	6.0	49.42	504.25	604.71	6.68
8:30	54.8	60.8	61.4	57.8	6.0	49.42	504.25	604.71	6.68
9:00	54.8	60.9	61.4	57.9	6.1	50.24	519.80	605.16	6.89
9:30	54.8	60.9	61.4	57.9	6.1	50.24	519.80	605.16	6.89
10:00	54.8	60.8	61.5	57.8	6.0	49.42	497.39	604.71	6.59

ตารางภาคผนวกที่ 7 (ต่อ) กรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน อัตราการไหล 120 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้า  
ท่อทองแดง 55 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	54.8	60.8	61.5	57.8	6.0	49.42	497.39	604.71	6.59
11:00	54.8	60.8	61.5	57.8	6.0	49.42	497.39	604.71	6.59
11:30	54.8	60.8	61.5	57.8	6.0	49.42	497.39	604.71	6.59
12:00	54.8	60.8	61.4	57.8	6.0	49.42	504.25	604.71	6.68
12:30	54.8	60.8	61.4	57.8	6.0	49.42	504.25	604.71	6.68
13:00	54.8	60.9	61.5	57.9	6.1	50.24	512.64	605.16	6.79
13:30	54.8	60.9	61.4	57.9	6.1	50.24	519.80	605.16	6.89
14:00	54.8	60.8	61.4	57.8	6.0	49.42	504.25	604.71	6.68
14:30	54.8	60.8	61.4	57.8	6.0	49.42	504.25	604.71	6.68
15:00	54.8	60.8	61.4	57.8	6.0	49.42	504.25	604.71	6.68
15:30	54.8	60.8	61.4	57.8	6.0	49.42	504.25	604.71	6.68
16:00	54.8	60.8	61.4	57.8	6.0	49.42	504.25	604.71	6.68
16:30	54.8	60.8	61.4	57.8	6.0	49.42	504.25	604.71	6.68
17:00	54.8	60.9	61.4	57.9	6.1	50.24	519.80	605.16	6.89
17:30	54.8	60.8	61.4	57.8	6.0	49.42	504.25	604.71	6.68
18:00	54.8	60.8	61.4	57.8	6.0	49.42	504.25	604.71	6.68
18:30	54.8	60.8	61.4	57.8	6.0	49.42	504.25	604.71	6.68
19:00	54.8	60.8	61.4	57.8	6.0	49.42	511.29	604.71	6.78
19:30	54.8	60.8	61.4	57.8	6.0	49.42	511.29	604.71	6.78
20:00	54.8	60.8	61.4	57.8	6.0	49.42	511.29	604.71	6.78

ตารางภาคผนวกที่ 8 กรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน อัตราการไหล 120 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อ  
ทองแดง 65 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
0:30	65.0	70.8	71.4	67.9	5.8	47.57	510.66	697.72	6.67
1:00	64.9	70.7	71.3	67.8	5.8	47.57	510.69	696.79	6.68
1:30	64.7	70.5	71.2	67.6	5.8	47.57	496.34	694.92	6.49
2:00	64.7	70.5	71.2	67.6	5.8	47.57	496.34	694.92	6.49
2:30	64.7	70.5	71.2	67.6	5.8	47.57	496.34	694.92	6.49
3:00	64.7	70.5	71.1	67.6	5.8	47.57	503.44	694.92	6.58
3:30	64.6	70.5	71.1	67.6	5.9	48.40	504.91	694.45	6.60
4:00	64.6	70.5	71.1	67.6	5.9	48.40	512.13	694.45	6.70
4:30	64.6	70.5	71.1	67.6	5.9	48.40	512.13	694.45	6.70
5:00	64.6	70.5	71.1	67.6	5.9	48.40	512.13	694.45	6.70
5:30	64.6	70.4	71.1	67.5	5.8	47.58	496.37	693.98	6.49
6:00	64.6	70.4	71.1	67.5	5.8	47.58	496.37	693.98	6.49
6:30	64.6	70.4	71.1	67.5	5.8	47.58	496.37	693.98	6.49
7:00	64.5	70.4	71.1	67.5	5.9	48.40	497.92	693.51	6.51
7:30	64.5	70.4	71.0	67.5	5.9	48.40	504.94	693.51	6.60
8:00	64.5	70.4	71.0	67.5	5.9	48.40	504.94	693.51	6.60
8:30	64.5	70.4	71.0	67.5	5.9	48.40	504.94	693.51	6.60
9:00	64.5	70.4	71.0	67.5	5.9	48.40	504.94	693.51	6.60
9:30	64.4	70.4	71.0	67.4	6.0	49.22	513.50	693.05	6.72
10:00	64.5	70.4	71.0	67.5	5.9	48.40	504.94	693.51	6.60

ตารางภาคผนวกที่ 8 (ต่อ) กรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน อัตราการไหล 120 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้า  
ท่อทองแดง 65 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>S</sub> (°C)	T <sub>W</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	64.4	70.3	71.0	67.4	5.9	48.40	497.94	692.58	6.51
11:00	64.5	70.3	71.0	67.4	5.8	47.58	496.39	693.05	6.49
11:30	64.5	70.3	71.0	67.4	5.8	47.58	496.39	693.05	6.49
12:00	64.5	70.3	71.0	67.4	5.8	47.58	496.39	693.05	6.49
12:30	64.4	70.3	71.0	67.4	5.9	48.40	497.94	692.58	6.51
13:00	64.4	70.3	71.0	67.4	5.9	48.40	491.12	692.58	6.42
13:30	64.4	70.3	71.0	67.4	5.9	48.40	497.94	692.58	6.51
14:00	64.5	70.3	71.0	67.4	5.8	47.58	496.39	693.05	6.49
14:30	64.5	70.3	71.0	67.4	5.8	47.58	496.39	693.05	6.49
15:00	65.0	70.8	71.4	67.9	5.8	47.57	510.66	697.72	6.67
15:30	64.9	70.7	71.3	67.8	5.8	47.57	510.69	696.79	6.68
16:00	64.7	70.5	71.2	67.6	5.8	47.57	496.34	694.92	6.49
16:30	64.7	70.5	71.2	67.6	5.8	47.57	496.34	694.92	6.49
17:00	64.7	70.5	71.2	67.6	5.8	47.57	496.34	694.92	6.49
17:30	64.7	70.5	71.1	67.6	5.8	47.57	503.44	694.92	6.58
18:00	64.6	70.5	71.1	67.6	5.9	48.40	504.91	694.45	6.60
18:30	64.6	70.5	71.1	67.6	5.9	48.40	512.13	694.45	6.70
19:00	64.6	70.5	71.1	67.6	5.9	48.40	512.13	694.45	6.70
19:30	64.6	70.5	71.1	67.6	5.9	48.40	512.13	694.45	6.70
20:00	64.6	70.4	71.1	67.5	5.8	47.58	496.37	693.98	6.49

ตารางภาคผนวกที่ 9 กรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน อัตราการไหล  $170 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าท่อ  
ทองแดง  $35 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
1:00	35.6	40.5	42.2	38.1	4.9	57.61	514.18	614.87	7.07
1:30	35.5	40.4	42.2	38.0	4.9	57.62	508.08	613.71	6.98
2:00	35.5	40.4	42.1	38.0	4.9	57.62	514.20	613.71	7.07
2:30	35.5	40.4	42.1	38.0	4.9	57.62	514.20	613.71	7.07
3:00	35.5	40.4	42.1	38.0	4.9	57.62	514.20	613.71	7.07
3:30	35.5	40.4	42.1	38.0	4.9	57.62	514.20	613.71	7.07
4:00	35.5	40.4	42.1	38.0	4.9	57.62	514.20	613.71	7.07
4:30	35.5	40.4	42.1	38.0	4.9	57.62	514.20	613.71	7.07
5:00	35.5	40.4	42.1	38.0	4.9	57.62	514.20	613.71	7.07
5:30	35.5	40.4	42.1	38.0	4.9	57.62	514.20	613.71	7.07
6:00	35.5	40.4	42.1	38.0	4.9	57.62	514.20	613.71	7.07
6:30	35.5	40.4	42.1	38.0	4.9	57.62	514.20	613.71	7.07
7:00	35.5	40.4	42.1	38.0	4.9	57.62	514.20	613.71	7.07
7:30	35.5	40.4	42.1	38.0	4.9	57.62	514.20	613.71	7.07
8:00	35.5	40.4	42.1	38.0	4.9	57.62	514.20	613.71	7.07
8:30	35.5	40.4	42.1	38.0	4.9	57.62	514.20	613.71	7.07
9:00	35.5	40.4	42.1	38.0	4.9	57.62	514.20	613.71	7.07
9:30	35.5	40.4	42.1	38.0	4.9	57.62	514.20	613.71	7.07
10:00	35.5	40.4	42.1	38.0	4.9	57.62	514.20	613.71	7.07

ตารางภาคผนวกที่ 9 (ต่อ) กรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน อัตราการไหล 170 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้า  
ท่อทองแดง 35 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>S</sub> (°C)	T <sub>W</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	35.5	40.3	42.1	37.9	4.8	56.44	497.72	613.13	6.84
11:00	35.5	40.3	42.1	37.9	4.8	56.44	497.72	613.13	6.84
11:30	35.4	40.4	42.1	37.9	5.0	58.79	518.46	613.13	7.13
12:00	35.4	40.4	42.1	37.9	5.0	58.79	518.46	613.13	7.13
12:30	35.4	40.4	42.1	37.9	5.0	58.79	524.70	613.13	7.21
13:00	35.4	40.4	42.1	37.9	5.0	58.79	524.70	613.13	7.21
13:30	35.4	40.4	42.1	37.9	5.0	58.79	524.70	613.13	7.21
14:00	35.4	40.4	42.0	37.9	5.0	58.79	531.10	613.13	7.30
14:30	35.4	40.4	42.0	37.9	5.0	58.79	537.66	613.13	7.39
15:00	35.4	40.3	42.0	37.9	4.9	57.62	520.49	612.55	7.16
15:30	35.3	40.3	42.0	37.8	5.0	58.80	518.48	611.97	7.13
16:00	35.3	40.3	41.9	37.8	5.0	58.80	531.12	611.97	7.30
16:30	35.3	40.3	41.9	37.8	5.0	58.80	531.12	611.97	7.30
17:00	35.3	40.3	42.0	37.8	5.0	58.80	524.72	611.97	7.21
17:30	35.3	40.3	41.9	37.8	5.0	58.80	531.12	611.97	7.30
18:00	35.3	40.3	41.9	37.8	5.0	58.80	531.12	611.97	7.30
18:30	35.3	40.3	41.9	37.8	5.0	58.80	531.12	611.97	7.30
19:00	35.3	40.3	41.9	37.8	5.0	58.80	531.12	611.97	7.30
19:30	35.3	40.3	41.9	37.8	5.0	58.80	537.68	611.97	7.39
20:00	35.3	40.3	41.9	37.8	5.0	58.80	537.68	611.97	7.39



ตารางภาคผนวกที่ 10 กรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน อัตราการไหล 170 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อ  
ทองแดง 45 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>S</sub> (°C)	T <sub>W</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
0:30	45.5	50.4	52.0	48.0	4.9	57.40	524.94	733.10	7.07
1:00	45.4	50.3	52.0	47.9	4.9	57.40	518.56	731.87	6.99
1:30	45.3	50.3	52.0	47.8	5.0	58.58	522.78	731.26	7.05
2:00	45.4	50.3	52.1	47.9	4.9	57.40	506.21	731.87	6.82
2:30	45.4	50.3	52.1	47.9	4.9	57.40	506.21	731.87	6.82
3:00	45.5	50.4	52.1	48.0	4.9	57.40	512.29	733.10	6.90
3:30	45.5	50.4	52.1	48.0	4.9	57.40	512.29	733.10	6.90
4:00	45.5	50.4	52.1	48.0	4.9	57.40	512.29	733.10	6.90
4:30	45.5	50.5	52.2	48.0	5.0	58.57	522.74	733.71	7.04
5:00	45.5	50.5	52.2	48.0	5.0	58.57	516.52	733.71	6.96
5:30	45.6	50.5	52.2	48.1	4.9	57.40	512.27	734.32	6.90
6:00	45.6	50.5	52.3	48.1	4.9	57.40	506.18	734.32	6.82
6:30	45.6	50.5	52.3	48.1	4.9	57.40	506.18	734.32	6.82
7:00	45.6	50.5	52.3	48.1	4.9	57.40	506.18	734.32	6.82
7:30	45.7	50.6	52.3	48.2	4.9	57.40	518.50	735.55	6.98
8:00	45.7	50.6	52.4	48.2	4.9	57.40	506.16	735.55	6.82
8:30	45.7	50.7	52.4	48.2	5.0	58.57	522.70	736.16	7.04
9:00	45.7	50.7	52.4	48.2	5.0	58.57	516.48	736.16	6.96
9:30	45.7	50.7	52.4	48.2	5.0	58.57	516.48	736.16	6.96
10:00	45.7	50.7	52.4	48.2	5.0	58.57	516.48	736.16	6.96

ตารางภาคผนวกที่ 10 (ต่อ) กรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน อัตราการไหล 170 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้า  
ท่อทองแดง 45 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>S</sub> (°C)	T <sub>W</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	45.7	50.8	52.5	48.3	5.1	59.74	526.80	736.78	7.09
11:00	45.8	50.8	52.5	48.3	5.0	58.57	516.46	737.39	6.95
11:30	45.8	50.9	52.6	48.4	5.1	59.74	526.78	738.01	7.09
12:00	45.8	50.8	52.6	48.3	5.0	58.57	510.38	737.39	6.87
12:30	45.8	50.9	52.6	48.4	5.1	59.74	520.58	738.01	7.01
13:00	45.8	50.9	52.6	48.4	5.1	59.74	520.58	738.01	7.01
13:30	45.8	50.9	52.6	48.4	5.1	59.74	520.58	738.01	7.01
14:00	45.8	50.9	52.6	48.4	5.1	59.74	520.58	738.01	7.01
14:30	45.8	50.9	52.6	48.4	5.1	59.74	520.58	738.01	7.01
15:00	45.8	51.0	52.7	48.4	5.2	60.91	530.77	738.62	7.15
15:30	45.8	51.0	52.7	48.4	5.2	60.91	530.77	738.62	7.15
16:00	45.9	51.0	52.7	48.5	5.1	59.73	520.56	739.23	7.01
16:30	45.9	51.0	52.7	48.5	5.1	59.73	520.56	739.23	7.01
17:00	45.9	51.0	52.7	48.5	5.1	59.73	520.56	739.23	7.01
17:30	45.9	51.0	52.7	48.5	5.1	59.73	520.56	739.23	7.01
18:00	46.0	51.0	52.7	48.5	5.0	58.56	516.42	739.85	6.95
18:30	46.0	51.0	52.8	48.5	5.0	58.56	510.34	739.85	6.87
19:00	46.0	51.1	52.8	48.6	5.1	59.73	526.73	740.46	7.09
19:30	45.7	51.0	52.7	48.4	5.3	62.08	534.70	738.01	7.20
20:00	45.6	50.9	52.6	48.3	5.3	62.08	534.72	736.78	7.20

ตารางภาคผนวกที่ 11 กรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน อัตราการไหล  $170 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าท่อ  
ทองแดง  $55 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	55.3	60.2	61.8	57.7	4.9	56.71	522.50	855.78	6.93
1:00	55.2	60.1	61.7	57.6	4.9	56.71	522.52	854.50	6.93
1:30	55.2	60.0	61.6	57.6	4.8	55.55	518.23	853.86	6.87
2:00	55.2	60.0	61.6	57.6	4.8	55.55	518.23	853.86	6.87
2:30	55.2	60.0	61.6	57.6	4.8	55.55	518.23	853.86	6.87
3:00	55.2	60.0	61.5	57.6	4.8	55.55	524.84	853.86	6.96
3:30	55.2	60.0	61.5	57.6	4.8	55.55	524.84	853.86	6.96
4:00	55.2	59.9	61.5	57.5	4.7	54.38	507.35	853.22	6.73
4:30	55.2	59.9	61.5	57.5	4.7	54.38	507.35	853.22	6.73
5:00	55.2	59.9	61.5	57.5	4.7	54.38	507.35	853.22	6.73
5:30	55.2	59.9	61.5	57.5	4.7	54.38	507.35	853.22	6.73
6:00	55.1	59.9	61.5	57.5	4.8	55.55	511.80	852.58	6.79
6:30	55.1	59.9	61.5	57.5	4.8	55.55	518.25	852.58	6.87
7:00	55.1	59.9	61.5	57.5	4.8	55.55	518.25	852.58	6.87
7:30	55.1	59.9	61.5	57.5	4.8	55.55	518.25	852.58	6.87
8:00	55.1	59.9	61.5	57.5	4.8	55.55	518.25	852.58	6.87
8:30	55.1	59.9	61.5	57.5	4.8	55.55	518.25	852.58	6.87
9:00	55.1	59.9	61.5	57.5	4.8	55.55	518.25	852.58	6.87
9:30	55.1	59.9	61.5	57.5	4.8	55.55	518.25	852.58	6.87
10:00	55.1	59.9	61.5	57.5	4.8	55.55	518.25	852.58	6.87

ตารางภาคผนวกที่ 11 (ต่อ) กรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน อัตราการไหล 170 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้า  
ท่อทองแดง 55 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>S</sub> (°C)	T <sub>W</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	55.1	59.9	61.5	57.5	4.8	55.55	518.25	852.58	6.87
11:00	55.0	59.9	61.5	57.4	4.9	56.72	522.57	851.94	6.93
11:30	55.0	59.8	61.5	57.4	4.8	55.55	505.54	851.30	6.71
12:00	55.0	59.9	61.4	57.4	4.9	56.72	529.15	851.94	7.02
12:30	55.0	59.9	61.4	57.4	4.9	56.72	529.15	851.94	7.02
13:00	55.0	59.9	61.4	57.4	4.9	56.72	529.15	851.94	7.02
13:30	55.0	59.8	61.4	57.4	4.8	55.55	518.27	851.30	6.87
14:00	55.0	59.8	61.4	57.4	4.8	55.55	518.27	851.30	6.87
14:30	55.0	59.8	61.4	57.4	4.8	55.55	518.27	851.30	6.87
15:00	55.0	59.8	61.4	57.4	4.8	55.55	518.27	851.30	6.87
15:30	55.0	59.8	61.4	57.4	4.8	55.55	518.27	851.30	6.87
16:00	55.0	59.8	61.4	57.4	4.8	55.55	518.27	851.30	6.87
16:30	55.0	59.8	61.4	57.4	4.8	55.55	518.27	851.30	6.87
17:00	55.0	59.8	61.4	57.4	4.8	55.55	518.27	851.30	6.87
17:30	55.0	59.8	61.4	57.4	4.8	55.55	518.27	851.30	6.87
18:00	55.0	59.8	61.4	57.4	4.8	55.55	518.27	851.30	6.87
18:30	55.0	59.8	61.3	57.4	4.8	55.55	524.88	851.30	6.96
19:00	55.0	59.8	61.3	57.4	4.8	55.55	524.88	851.30	6.96
19:30	55.0	59.8	61.4	57.4	4.8	55.55	518.27	851.30	6.87
20:00	55.0	59.8	61.3	57.4	4.8	55.55	524.88	851.30	6.96

ตารางภาคผนวกที่ 12 กรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน อัตราการไหล 170 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อ  
ทองแดง 65 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>S</sub> (°C)	T <sub>W</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
0:30	65.5	70.1	71.5	67.8	4.5	52.87	532.81	986.79	6.96
1:00	65.5	70.1	71.4	67.8	4.5	52.87	547.71	986.79	7.16
1:30	65.4	70.0	71.4	67.7	4.5	52.87	532.83	985.46	6.97
2:00	65.4	70.1	71.5	67.7	4.6	54.03	537.22	986.12	7.02
2:30	65.4	70.1	71.5	67.7	4.6	54.03	537.22	986.12	7.02
3:00	65.4	70.1	71.5	67.7	4.6	54.03	537.22	986.12	7.02
3:30	65.4	70.1	71.5	67.7	4.6	54.03	530.11	986.12	6.93
4:00	65.4	70.1	71.5	67.7	4.6	54.03	530.11	986.12	6.93
4:30	65.4	70.2	71.6	67.8	4.7	55.19	541.50	986.79	7.08
5:00	65.5	70.2	71.6	67.8	4.6	54.03	537.20	987.45	7.02
5:30	65.5	70.2	71.6	67.8	4.6	54.03	537.20	987.45	7.02
6:00	65.5	70.2	71.6	67.8	4.6	54.03	537.20	987.45	7.02
6:30	65.6	70.3	71.6	67.9	4.6	54.03	551.99	988.77	7.21
7:00	65.5	70.3	71.7	67.9	4.7	55.19	541.47	988.11	7.08
7:30	65.6	70.3	71.7	67.9	4.6	54.03	537.18	988.77	7.02
8:00	65.6	70.3	71.7	67.9	4.6	54.03	537.18	988.77	7.02
8:30	65.6	70.3	71.7	67.9	4.6	54.03	537.18	988.77	7.02
9:00	65.6	70.3	71.7	67.9	4.6	54.03	537.18	988.77	7.02
9:30	65.6	70.3	71.7	67.9	4.6	54.03	530.06	988.77	6.93
10:00	65.6	70.3	71.7	67.9	4.6	54.03	530.06	988.77	6.93

ตารางภาคผนวกที่ 12 (ต่อ) กรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน อัตราการไหล  $170 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้า  
ท่อทองแดง  $65 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
10:30	65.6	70.4	71.7	68.0	4.7	55.19	548.72	989.44	7.17
11:00	65.6	70.3	71.7	67.9	4.6	54.03	530.06	988.77	6.93
11:30	65.6	70.3	71.7	67.9	4.6	54.03	530.06	988.77	6.93
12:00	65.6	70.4	71.7	68.0	4.7	55.19	548.72	989.44	7.17
12:30	65.6	70.4	71.7	68.0	4.7	55.19	548.72	989.44	7.17
13:00	65.6	70.4	71.8	68.0	4.7	55.19	541.45	989.44	7.08
13:30	65.6	70.4	71.8	68.0	4.7	55.19	541.45	989.44	7.08
14:00	65.6	70.4	71.8	68.0	4.7	55.19	541.45	989.44	7.08
14:30	65.6	70.4	71.8	68.0	4.7	55.19	541.45	989.44	7.08
15:00	65.6	70.4	71.8	68.0	4.7	55.19	541.45	989.44	7.08
15:30	65.6	70.4	71.8	68.0	4.7	55.19	541.45	989.44	7.08
16:00	65.6	70.4	71.8	68.0	4.7	55.19	541.45	989.44	7.08
16:30	65.6	70.4	71.8	68.0	4.7	55.19	541.45	989.44	7.08
17:00	65.6	70.4	71.8	68.0	4.7	55.19	541.45	989.44	7.08
17:30	65.6	70.4	71.8	68.0	4.7	55.19	541.45	989.44	7.08
18:00	65.6	70.4	71.8	68.0	4.7	55.19	541.45	989.44	7.08
18:30	65.6	70.4	71.8	68.0	4.7	55.19	541.45	989.44	7.08
19:00	65.6	70.4	71.7	68.0	4.7	55.19	548.72	989.44	7.17
19:30	65.6	70.4	71.7	68.0	4.7	55.19	548.72	989.44	7.17
20:00	65.6	70.4	71.7	68.0	4.7	55.19	548.72	989.44	7.17



ตารางภาคผนวกที่ 13 กรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน อัตราการไหล 220 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อ  
ทองแดง 35 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
0:30	34.8	38.8	40.7	36.8	4.0	60.89	578.27	777.02	7.97
1:00	34.7	38.7	40.7	36.7	4.0	60.89	563.84	775.53	7.77
1:30	34.6	38.6	40.6	36.6	4.0	60.90	563.86	774.04	7.77
2:00	34.6	38.6	40.6	36.6	4.0	60.90	563.86	774.04	7.77
2:30	34.6	38.5	40.6	36.6	3.9	59.38	542.98	773.30	7.49
3:00	34.6	38.5	40.6	36.6	3.9	59.38	542.98	773.30	7.49
3:30	34.6	38.6	40.6	36.6	4.0	60.90	563.86	774.04	7.77
4:00	34.6	38.5	40.6	36.6	3.9	59.38	542.98	773.30	7.49
4:30	34.6	38.5	40.6	36.6	3.9	59.38	542.98	773.30	7.49
5:00	34.6	38.6	40.6	36.6	4.0	60.90	563.86	774.04	7.77
5:30	34.6	38.5	40.6	36.6	3.9	59.38	542.98	773.30	7.49
6:00	34.6	38.5	40.6	36.6	3.9	59.38	542.98	773.30	7.49
6:30	34.6	38.6	40.6	36.6	4.0	60.90	570.99	774.04	7.87
7:00	34.6	38.5	40.5	36.6	3.9	59.38	556.73	773.30	7.68
7:30	34.6	38.5	40.5	36.6	3.9	59.38	556.73	773.30	7.68
8:00	34.6	38.5	40.5	36.6	3.9	59.38	556.73	773.30	7.68
8:30	34.6	38.5	40.6	36.6	3.9	59.38	549.77	773.30	7.58
9:00	34.5	38.5	40.5	36.5	4.0	60.90	563.88	772.55	7.77
9:30	34.6	38.5	40.5	36.6	3.9	59.38	556.73	773.30	7.68
10:00	34.6	38.5	40.5	36.6	3.9	59.38	556.73	773.30	7.68

ตารางภาคผนวกที่ 13 (ต่อ) กรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน อัตราการไหล 220 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้า  
ท่อทองแดง 35 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	34.5	38.5	40.5	36.5	4.0	60.90	563.88	772.55	7.77
11:00	34.5	38.5	40.5	36.5	4.0	60.90	563.88	772.55	7.77
11:30	34.5	38.5	40.5	36.5	4.0	60.90	563.88	772.55	7.77
12:00	34.5	38.5	40.5	36.5	4.0	60.90	563.88	772.55	7.77
12:30	34.5	38.5	40.5	36.5	4.0	60.90	563.88	772.55	7.77
13:00	34.5	38.5	40.5	36.5	4.0	60.90	563.88	772.55	7.77
13:30	34.5	38.5	40.5	36.5	4.0	60.90	563.88	772.55	7.77
14:00	34.5	38.5	40.5	36.5	4.0	60.90	563.88	772.55	7.77
14:30	34.5	38.5	40.5	36.5	4.0	60.90	563.88	772.55	7.77
15:00	34.5	38.5	40.5	36.5	4.0	60.90	563.88	772.55	7.77
15:30	34.5	38.5	40.5	36.5	4.0	60.90	563.88	772.55	7.77
16:00	34.5	38.5	40.5	36.5	4.0	60.90	563.88	772.55	7.77
16:30	34.5	38.5	40.5	36.5	4.0	60.90	563.88	772.55	7.77
17:00	34.5	38.5	40.5	36.5	4.0	60.90	563.88	772.55	7.77
17:30	34.5	38.5	40.5	36.5	4.0	60.90	563.88	772.55	7.77
18:00	34.5	38.5	40.5	36.5	4.0	60.90	563.88	772.55	7.77
18:30	34.5	38.5	40.5	36.5	4.0	60.90	563.88	772.55	7.77
19:00	34.5	38.5	40.5	36.5	4.0	60.90	563.88	772.55	7.77
19:30	34.5	38.5	40.5	36.5	4.0	60.90	563.88	772.55	7.77
20:00	34.5	38.5	40.5	36.5	4.0	60.90	563.88	772.55	7.77

ตารางภาคผนวกที่ 14 กรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน อัตราการไหล 220 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อ  
ทองแดง 45 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
0:30	44.6	48.5	50.4	46.5	3.8	58.40	558.18	926.18	7.54
1:00	44.5	48.5	50.3	46.5	4.0	59.92	587.85	925.39	7.94
1:30	44.4	48.4	50.2	46.4	4.0	59.92	580.19	923.82	7.84
2:00	44.4	48.4	50.2	46.4	4.0	59.92	580.19	923.82	7.84
2:30	44.5	48.4	50.2	46.4	3.9	58.40	572.98	924.61	7.74
3:00	44.5	48.4	50.2	46.4	3.9	58.40	572.98	924.61	7.74
3:30	44.5	48.4	50.2	46.4	3.9	58.40	572.98	924.61	7.74
4:00	44.5	48.5	50.2	46.5	4.0	59.92	595.75	925.39	8.05
4:30	44.5	48.4	50.2	46.4	3.9	58.40	572.98	924.61	7.74
5:00	44.5	48.5	50.2	46.5	4.0	59.92	595.75	925.39	8.05
5:30	44.5	48.5	50.2	46.5	4.0	59.92	595.75	925.39	8.05
6:00	44.5	48.5	50.2	46.5	4.0	59.92	595.75	925.39	8.05
6:30	44.5	48.4	50.2	46.4	3.9	58.40	572.98	924.61	7.74
7:00	44.5	48.4	50.3	46.4	3.9	58.40	565.49	924.61	7.64
7:30	44.5	48.5	50.2	46.5	4.0	59.92	595.75	925.39	8.05
8:00	44.5	48.5	50.2	46.5	4.0	59.92	595.75	925.39	8.05
8:30	44.5	48.5	50.3	46.5	4.0	59.92	587.85	925.39	7.94
9:00	44.5	48.5	50.3	46.5	4.0	59.92	587.85	925.39	7.94
9:30	44.5	48.5	50.3	46.5	4.0	59.92	587.85	925.39	7.94
10:00	44.5	48.5	50.3	46.5	4.0	59.92	587.85	925.39	7.94

ตารางภาคผนวกที่ 14 (ต่อ) กรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน อัตราการไหล 220 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้า  
ท่อทองแดง 45 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	44.5	48.4	50.3	46.4	3.9	58.40	565.49	924.61	7.64
11:00	44.5	48.5	50.3	46.5	4.0	59.92	587.85	925.39	7.94
11:30	44.5	48.5	50.3	46.5	4.0	59.92	580.17	925.39	7.84
12:00	44.5	48.5	50.3	46.5	4.0	59.92	587.85	925.39	7.94
12:30	44.6	48.5	50.3	46.5	3.8	58.40	580.65	926.18	7.84
13:00	44.6	48.5	50.3	46.5	3.8	58.40	580.65	926.18	7.84
13:30	44.6	48.5	50.3	46.5	3.8	58.40	580.65	926.18	7.84
14:00	44.6	48.5	50.3	46.5	3.8	58.40	572.96	926.18	7.74
14:30	44.6	48.5	50.3	46.5	3.8	58.40	572.96	926.18	7.74
15:00	44.6	48.6	50.3	46.6	4.0	59.91	595.72	926.97	8.05
15:30	44.6	48.6	50.3	46.6	4.0	59.91	595.72	926.97	8.05
16:00	44.6	48.6	50.3	46.6	4.0	59.91	595.72	926.97	8.05
16:30	44.6	48.5	50.3	46.5	3.8	58.40	572.96	926.18	7.74
17:00	44.6	48.6	50.3	46.6	4.0	59.91	595.72	926.97	8.05
17:30	44.6	48.6	50.3	46.6	4.0	59.91	595.72	926.97	8.05
18:00	44.6	48.6	50.3	46.6	4.0	59.91	595.72	926.97	8.05
18:30	44.6	48.6	50.3	46.6	4.0	59.91	595.72	926.97	8.05
19:00	44.6	48.6	50.3	46.6	4.0	59.91	595.72	926.97	8.05
19:30	44.6	48.6	50.3	46.6	4.0	59.91	595.72	926.97	8.05
20:00	44.6	48.6	50.3	46.6	4.0	59.91	595.72	926.97	8.05

ตารางภาคผนวกที่ 15 กรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน อัตราการไหล 220 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อ  
ทองแดง 55 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
0:30	55.4	59.3	61.0	57.4	3.9	58.90	597.71	1101.18	7.93
1:00	55.3	59.2	60.9	57.3	3.9	58.91	597.74	1099.53	7.93
1:30	55.2	59.1	60.9	57.2	3.9	58.91	581.82	1097.87	7.72
2:00	55.2	59.1	60.9	57.2	3.9	58.91	581.82	1097.87	7.72
2:30	55.2	59.1	60.9	57.2	3.9	58.91	581.82	1097.87	7.72
3:00	55.2	59.1	60.9	57.2	3.9	58.91	589.68	1097.87	7.82
3:30	55.2	59.0	60.9	57.1	3.8	57.40	566.91	1097.05	7.52
4:00	55.2	59.0	60.9	57.1	3.8	57.40	566.91	1097.05	7.52
4:30	55.2	59.0	60.8	57.1	3.8	57.40	574.57	1097.05	7.62
5:00	55.2	59.0	60.8	57.1	3.8	57.40	574.57	1097.05	7.62
5:30	55.2	59.0	60.8	57.1	3.8	57.40	574.57	1097.05	7.62
6:00	55.2	59.0	60.8	57.1	3.8	57.40	582.44	1097.05	7.73
6:30	55.2	58.9	60.8	57.1	3.7	55.89	559.47	1096.22	7.42
7:00	55.2	59.0	60.8	57.1	3.8	57.40	582.44	1097.05	7.73
7:30	55.1	58.9	60.8	57.0	3.8	57.40	566.94	1095.39	7.52
8:00	55.1	58.9	60.8	57.0	3.8	57.40	566.94	1095.39	7.52
8:30	55.1	59.0	60.8	57.1	3.9	58.91	589.71	1096.22	7.83
9:00	55.1	59.0	60.8	57.1	3.9	58.91	589.71	1096.22	7.83
9:30	55.1	58.9	60.7	57.0	3.8	57.40	574.60	1095.39	7.63
10:00	55.1	58.9	60.7	57.0	3.8	57.40	574.60	1095.39	7.63

ตารางภาคผนวกที่ 15 (ต่อ) กรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน อัตราการไหล 220 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้า  
ท่อทองแดง 55 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	55.1	58.9	60.7	57.0	3.8	57.40	574.60	1095.39	7.63
11:00	55.1	58.9	60.7	57.0	3.8	57.40	574.60	1095.39	7.63
11:30	55.1	58.9	60.7	57.0	3.8	57.40	574.60	1095.39	7.63
12:00	55.1	58.9	60.7	57.0	3.8	57.40	574.60	1095.39	7.63
12:30	55.1	58.9	60.7	57.0	3.8	57.40	574.60	1095.39	7.63
13:00	55.1	58.9	60.7	57.0	3.8	57.40	574.60	1095.39	7.63
13:30	55.1	58.9	60.7	57.0	3.8	57.40	574.60	1095.39	7.63
14:00	55.1	58.9	60.7	57.0	3.8	57.40	574.60	1095.39	7.63
14:30	55.1	58.9	60.7	57.0	3.8	57.40	574.60	1095.39	7.63
15:00	55.1	58.9	60.7	57.0	3.8	57.40	574.60	1095.39	7.63
15:30	55.1	58.9	60.7	57.0	3.8	57.40	574.60	1095.39	7.63
16:00	55.1	58.9	60.7	57.0	3.8	57.40	574.60	1095.39	7.63
16:30	55.0	58.9	60.7	57.0	3.9	58.91	581.87	1094.57	7.72
17:00	55.0	58.9	60.7	57.0	3.9	58.91	581.87	1094.57	7.72
17:30	55.0	58.8	60.7	56.9	3.8	57.40	566.96	1093.74	7.53
18:00	55.0	58.8	60.7	56.9	3.8	57.40	566.96	1093.74	7.53
18:30	55.0	58.9	60.7	57.0	3.9	58.91	589.73	1094.57	7.83
19:00	55.0	58.9	60.7	57.0	3.9	58.91	589.73	1094.57	7.83
19:30	55.0	58.8	60.7	56.9	3.8	57.40	566.96	1093.74	7.53
20:00	55.0	58.8	60.7	56.9	3.8	57.40	566.96	1093.74	7.53



ตารางภาคผนวกที่ 16 กรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน อัตราการไหล 220 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อ  
ทองแดง 65 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
0:30	65.9	69.5	71.1	67.7	3.6	54.13	598.50	1275.73	7.82
1:00	65.8	69.5	71.0	67.7	3.7	55.64	624.46	1274.87	8.16
1:30	65.7	69.4	71.0	67.6	3.7	55.64	606.12	1273.16	7.93
2:00	65.6	69.4	71.0	67.5	3.8	57.15	613.49	1272.30	8.02
2:30	65.6	69.4	71.0	67.5	3.8	57.15	613.49	1272.30	8.02
3:00	65.6	69.4	70.9	67.5	3.8	57.15	622.51	1272.30	8.14
3:30	65.6	69.3	70.9	67.5	3.7	55.64	606.14	1271.44	7.93
4:00	65.6	69.4	70.9	67.5	3.8	57.15	631.80	1272.30	8.26
4:30	65.6	69.4	70.9	67.5	3.8	57.15	631.80	1272.30	8.26
5:00	65.6	69.3	70.9	67.5	3.7	55.64	606.14	1271.44	7.93
5:30	65.5	69.3	70.9	67.4	3.8	57.15	613.52	1270.59	8.02
6:00	65.5	69.3	70.9	67.4	3.8	57.15	613.52	1270.59	8.02
6:30	65.5	69.3	70.9	67.4	3.8	57.15	613.52	1270.59	8.02
7:00	65.5	69.3	70.9	67.4	3.8	57.15	613.52	1270.59	8.02
7:30	65.5	69.2	70.9	67.4	3.7	55.65	588.85	1269.73	7.70
8:00	65.5	69.2	70.8	67.4	3.7	55.65	597.39	1269.73	7.81
8:30	65.5	69.2	70.9	67.4	3.7	55.65	588.85	1269.73	7.70
9:00	65.5	69.2	70.8	67.4	3.7	55.65	597.39	1269.73	7.81
9:30	65.5	69.2	70.8	67.4	3.7	55.65	606.17	1269.73	7.93
10:00	65.5	69.2	70.8	67.4	3.7	55.65	606.17	1269.73	7.93

ตารางภาคผนวกที่ 16 (ต่อ) กรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน อัตราการไหล 220 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้า  
ท่อทองแดง 65 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	65.5	69.2	70.8	67.4	3.7	55.65	606.17	1269.73	7.93
11:00	65.4	69.2	70.8	67.3	3.8	57.15	613.55	1268.87	8.02
11:30	65.4	69.1	70.8	67.3	3.7	55.65	588.88	1268.02	7.70
12:00	65.4	69.1	70.7	67.3	3.7	55.65	597.41	1268.02	7.81
12:30	65.4	69.1	70.7	67.3	3.7	55.65	597.41	1268.02	7.81
13:00	65.4	69.1	70.7	67.3	3.7	55.65	597.41	1268.02	7.81
13:30	65.3	69.0	70.7	67.2	3.7	55.65	580.61	1266.30	7.60
14:00	65.3	69.0	70.7	67.2	3.7	55.65	588.90	1266.30	7.70
14:30	65.3	69.1	70.7	67.2	3.8	57.15	613.57	1267.16	8.03
15:00	65.3	69.0	70.7	67.2	3.7	55.65	588.90	1266.30	7.70
15:30	65.3	69.0	70.7	67.2	3.7	55.65	588.90	1266.30	7.70
16:00	65.3	69.0	70.7	67.2	3.7	55.65	588.90	1266.30	7.70
16:30	65.3	69.0	70.6	67.2	3.7	55.65	597.44	1266.30	7.82
17:00	65.3	69.0	70.6	67.2	3.7	55.65	597.44	1266.30	7.82
17:30	65.2	69.0	70.6	67.1	3.8	57.16	613.60	1265.45	8.03
18:00	65.2	69.0	70.6	67.1	3.8	57.16	613.60	1265.45	8.03
18:30	65.2	69.0	70.6	67.1	3.8	57.16	613.60	1265.45	8.03
19:00	65.2	68.9	70.5	67.1	3.7	55.65	597.46	1264.59	7.82
19:30	65.2	68.9	70.5	67.1	3.7	55.65	597.46	1264.59	7.82
20:00	65.2	68.9	70.5	67.1	3.7	55.65	606.25	1264.59	7.93

ตารางภาคผนวกที่ 17 กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.050wt% อัตราการไหล  $120 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าที่ท่อแดง  $35 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	35.6	43.1	44.1	39.3	7.5	62.33	485.97	408.84	6.57
1:00	35.5	43.0	44.0	39.2	7.5	62.33	485.97	408.84	6.57
1:30	35.5	43.0	43.9	39.2	7.5	62.33	496.42	408.84	6.71
2:00	35.4	42.9	43.8	39.1	7.5	62.33	491.14	408.84	6.64
2:30	35.4	42.9	43.8	39.1	7.5	62.33	491.14	408.84	6.64
3:00	35.4	42.9	43.8	39.1	7.5	62.33	496.42	408.84	6.71
3:30	35.4	42.9	43.8	39.1	7.5	62.33	496.42	408.84	6.71
4:00	35.4	42.8	43.8	39.1	7.4	61.49	484.59	408.84	6.55
4:30	35.3	42.8	43.7	39.0	7.5	62.33	496.42	408.84	6.71
5:00	35.3	42.8	43.7	39.0	7.5	62.33	496.42	408.84	6.71
5:30	35.3	42.8	43.7	39.0	7.5	62.33	496.42	408.84	6.71
6:00	35.3	42.8	43.6	39.0	7.5	62.33	501.82	408.84	6.78
6:30	35.3	42.8	43.6	39.0	7.5	62.33	501.82	408.84	6.78
7:00	35.3	42.7	43.6	39.0	7.4	61.49	489.80	408.84	6.62
7:30	35.3	42.7	43.6	39.0	7.4	61.49	489.80	408.84	6.62
8:00	35.3	42.7	43.6	39.0	7.4	61.49	489.80	408.84	6.62
8:30	35.3	42.7	43.6	39.0	7.4	61.49	495.13	408.84	6.69
9:00	35.3	42.7	43.6	39.0	7.4	61.49	495.13	408.84	6.69
9:30	35.3	42.7	43.6	39.0	7.4	61.49	495.13	408.84	6.69
10:00	35.2	42.7	43.6	38.9	7.5	62.33	496.42	408.84	6.71

ตารางภาคผนวกที่ 17 (ต่อ) กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.050wt% อัตราการไหล 120 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อทองแดง 35 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	35.2	42.6	43.5	38.9	7.4	61.49	489.80	408.84	6.62
11:00	35.2	42.6	43.6	38.9	7.4	61.49	484.59	408.84	6.55
11:30	35.1	42.6	43.5	38.8	7.5	62.33	491.14	408.84	6.64
12:00	35.1	42.5	43.5	38.8	7.4	61.49	484.59	408.84	6.55
12:30	35.1	42.5	43.5	38.8	7.4	61.49	484.59	408.84	6.55
13:00	35.1	42.5	43.5	38.8	7.4	61.49	484.59	408.84	6.55
13:30	35.1	42.5	43.5	38.8	7.4	61.49	484.59	408.84	6.55
14:00	35.1	42.5	43.5	38.8	7.4	61.49	484.59	408.84	6.55
14:30	35.1	42.5	43.5	38.8	7.4	61.49	484.59	408.84	6.55
15:00	35.1	42.5	43.5	38.8	7.4	61.49	484.59	408.84	6.55
15:30	35.1	42.5	43.4	38.8	7.4	61.49	489.80	408.84	6.62
16:00	35.1	42.5	43.4	38.8	7.4	61.49	489.80	408.84	6.62
16:30	35.0	42.5	43.4	38.7	7.5	62.33	496.42	408.84	6.71
17:00	35.0	42.4	43.4	38.7	7.4	61.49	484.59	408.84	6.55
17:30	35.0	42.3	43.4	38.6	7.3	60.66	473.01	408.84	6.39
18:00	35.0	42.3	43.3	38.6	7.3	60.66	478.04	408.84	6.46
18:30	34.9	42.3	43.3	38.6	7.4	61.49	479.49	408.84	6.48
19:00	34.9	42.3	43.3	38.6	7.4	61.49	479.49	408.84	6.48
19:30	34.9	42.3	43.3	38.6	7.4	61.49	484.59	408.84	6.55
20:00	34.9	42.3	43.3	38.6	7.4	61.49	484.59	408.84	6.55

ตารางภาคผนวกที่ 18 กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.050wt% อัตราการไหล  $120 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าที่ท่อแดง  $45 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	44.5	51.4	52.1	48.0	6.9	57.13	516.09	491.60	6.83
1:00	44.3	51.3	52.0	47.8	7.0	57.96	517.26	491.60	6.85
1:30	44.3	51.2	52.0	47.8	6.9	57.13	503.80	491.60	6.67
2:00	44.3	51.1	52.0	47.7	6.8	56.30	490.66	491.60	6.50
2:30	44.3	51.1	52.0	47.7	6.8	56.30	490.66	491.60	6.50
3:00	44.3	51.1	52.0	47.7	6.8	56.30	490.66	491.60	6.50
3:30	44.3	51.1	52.0	47.7	6.8	56.30	490.66	491.60	6.50
4:00	44.3	51.1	52.0	47.7	6.8	56.30	490.66	491.60	6.50
4:30	44.3	51.1	52.0	47.7	6.8	56.30	490.66	491.60	6.50
5:00	44.3	51.1	52.0	47.7	6.8	56.30	490.66	491.60	6.50
5:30	44.3	51.1	52.0	47.7	6.8	56.30	484.95	491.60	6.42
6:00	44.3	51.2	52.0	47.8	6.9	57.13	497.87	491.60	6.59
6:30	44.3	51.2	52.0	47.8	6.9	57.13	497.87	491.60	6.59
7:00	44.3	51.1	52.0	47.7	6.8	56.30	484.95	491.60	6.42
7:30	44.3	51.1	52.0	47.7	6.8	56.30	484.95	491.60	6.42
8:00	44.3	51.1	52.0	47.7	6.8	56.30	484.95	491.60	6.42
8:30	44.3	51.2	52.0	47.8	6.9	57.13	497.87	491.60	6.59
9:00	44.4	51.3	52.0	47.9	6.9	57.13	509.87	491.60	6.75
9:30	44.4	51.3	52.0	47.9	6.9	57.13	509.87	491.60	6.75
10:00	44.4	51.3	52.0	47.9	6.9	57.13	509.87	491.60	6.75

ตารางภาคผนวกที่ 18 (ต่อ) กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.050wt% อัตราการไหล 120 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อทองแดง 45 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	44.4	51.3	52.0	47.9	6.9	57.13	509.87	491.60	6.75
11:00	44.4	51.2	52.0	47.8	6.8	56.30	496.50	491.60	6.57
11:30	44.4	51.3	52.0	47.9	6.9	57.13	509.87	491.60	6.75
12:00	44.4	51.3	52.0	47.9	6.9	57.13	509.87	491.60	6.75
12:30	44.4	51.2	52.0	47.8	6.8	56.30	496.50	491.60	6.57
13:00	44.4	51.2	52.0	47.8	6.8	56.30	496.50	491.60	6.57
13:30	44.4	51.2	52.0	47.8	6.8	56.30	496.50	491.60	6.57
14:00	44.5	51.3	52.0	47.9	6.8	56.30	508.61	491.60	6.73
14:30	44.4	51.3	52.0	47.9	6.9	57.13	509.87	491.60	6.75
15:00	44.4	51.3	52.0	47.9	6.9	57.13	509.87	491.60	6.75
15:30	44.5	51.2	52.0	47.9	6.7	55.48	495.09	491.60	6.55
16:00	44.4	51.3	52.0	47.9	6.9	57.13	509.87	491.60	6.75
16:30	44.5	51.3	52.1	47.9	6.8	56.30	502.48	491.60	6.65
17:00	44.5	51.3	52.1	47.9	6.8	56.30	502.48	491.60	6.65
17:30	44.5	51.3	52.1	47.9	6.8	56.30	502.48	491.60	6.65
18:00	44.5	51.4	52.1	48.0	6.9	57.13	516.09	491.60	6.83
18:30	44.5	51.3	52.1	47.9	6.8	56.30	502.48	491.60	6.65
19:00	44.5	51.3	52.1	47.9	6.8	56.30	502.48	491.60	6.65
19:30	44.5	51.3	52.1	47.9	6.8	56.30	502.48	491.60	6.65
20:00	44.5	51.3	52.1	47.9	6.8	56.30	502.48	491.60	6.65



ตารางภาคผนวกที่ 19 กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.050wt% อัตราการไหล  $120 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าที่ท่อแดง  $55 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	54.3	61.0	61.6	57.7	6.7	55.26	524.78	578.91	6.83
1:00	54.2	61.0	61.5	57.6	6.8	56.08	532.61	578.91	6.93
1:30	54.2	61.0	61.5	57.6	6.8	56.08	539.53	578.91	7.02
2:00	54.2	61.0	61.5	57.6	6.8	56.08	539.53	578.91	7.02
2:30	54.3	61.0	61.5	57.7	6.7	55.26	538.59	578.91	7.01
3:00	54.3	61.0	61.6	57.7	6.7	55.26	524.78	578.91	6.83
3:30	54.4	61.0	61.6	57.7	6.6	54.43	523.66	578.91	6.81
4:00	54.4	61.1	61.6	57.8	6.7	55.26	531.59	578.91	6.92
4:30	54.4	61.1	61.6	57.8	6.7	55.26	531.59	578.91	6.92
5:00	54.4	61.2	61.7	57.8	6.8	56.08	539.53	578.91	7.02
5:30	54.5	61.2	61.7	57.9	6.7	55.26	538.59	578.91	7.01
6:00	54.5	61.2	61.8	57.9	6.7	55.26	524.78	578.91	6.83
6:30	54.5	61.3	61.8	57.9	6.8	56.08	539.53	578.91	7.02
7:00	54.5	61.3	61.8	57.9	6.8	56.08	539.53	578.91	7.02
7:30	54.5	61.3	61.8	57.9	6.8	56.08	539.53	578.91	7.02
8:00	54.6	61.4	61.8	58.0	6.8	56.08	546.63	578.91	7.11
8:30	54.6	61.4	61.9	58.0	6.8	56.08	539.53	578.91	7.02
9:00	54.7	61.4	61.9	58.1	6.7	55.26	538.59	578.91	7.01
9:30	54.7	61.4	61.9	58.1	6.7	55.26	531.59	578.91	6.92
10:00	54.7	61.5	61.9	58.1	6.8	56.08	546.63	578.91	7.11

ตารางภาคผนวกที่ 19 (ต่อ) กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.050wt% อัตราการไหล 120 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อทองแดง 55 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	54.7	61.5	62.0	58.1	6.8	56.08	539.53	578.91	7.02
11:00	54.7	61.5	62.0	58.1	6.8	56.08	539.53	578.91	7.02
11:30	54.7	61.5	62.0	58.1	6.8	56.08	539.53	578.91	7.02
12:00	54.8	61.5	62.0	58.2	6.7	55.26	531.59	578.91	6.92
12:30	54.8	61.5	62.1	58.2	6.7	55.26	524.78	578.91	6.83
13:00	54.8	61.6	62.1	58.2	6.8	56.08	539.53	578.91	7.02
13:30	54.9	61.6	62.1	58.3	6.7	55.26	538.59	578.91	7.01
14:00	54.9	61.6	62.1	58.3	6.7	55.26	531.59	578.91	6.92
14:30	54.9	61.6	62.1	58.3	6.7	55.26	531.59	578.91	6.92
15:00	54.9	61.7	62.1	58.3	6.8	56.08	546.63	578.91	7.11
15:30	54.9	61.7	62.1	58.3	6.8	56.08	546.63	578.91	7.11
16:00	54.9	61.7	62.2	58.3	6.8	56.08	539.53	578.91	7.02
16:30	54.9	61.7	62.2	58.3	6.8	56.08	539.53	578.91	7.02
17:00	54.9	61.7	62.2	58.3	6.8	56.08	539.53	578.91	7.02
17:30	55.0	61.7	62.3	58.4	6.7	55.26	524.78	578.91	6.83
18:00	55.0	61.7	62.3	58.4	6.7	55.26	524.78	578.91	6.83
18:30	55.0	61.7	62.3	58.4	6.7	55.26	524.78	578.91	6.83
19:00	55.0	61.8	62.3	58.4	6.8	56.08	539.53	578.91	7.02
19:30	55.0	61.8	62.3	58.4	6.8	56.08	539.53	578.91	7.02
20:00	55.0	61.8	62.3	58.4	6.8	56.08	539.53	578.91	7.02

ตารางภาคผนวกที่ 20 กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.050wt% อัตราการไหล  $120 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าที่ท่อแดง  $65 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	64.9	71.5	72.0	68.2	6.6	53.88	529.31	669.97	6.79
1:00	64.8	71.4	72.0	68.1	6.6	53.88	515.63	669.97	6.61
1:30	64.7	71.3	71.9	68.0	6.6	53.88	509.05	669.97	6.53
2:00	64.7	71.4	71.9	68.0	6.7	54.70	523.49	669.97	6.71
2:30	64.8	71.4	71.9	68.1	6.6	53.88	522.38	669.97	6.70
3:00	64.9	71.4	72.0	68.1	6.5	53.06	514.42	669.97	6.59
3:30	64.9	71.5	72.1	68.2	6.6	53.88	515.63	669.97	6.61
4:00	64.9	71.5	72.1	68.2	6.6	53.88	515.63	669.97	6.61
4:30	64.9	71.5	72.1	68.2	6.6	53.88	509.05	669.97	6.53
5:00	64.9	71.5	72.1	68.2	6.6	53.88	509.05	669.97	6.53
5:30	65.0	71.5	72.1	68.2	6.5	53.06	507.77	669.97	6.51
6:00	65.0	71.5	72.1	68.2	6.5	53.06	507.77	669.97	6.51
6:30	65.0	71.6	72.1	68.3	6.6	53.88	522.38	669.97	6.70
7:00	65.0	71.7	72.2	68.3	6.7	54.70	530.34	669.97	6.80
7:30	65.1	71.7	72.2	68.4	6.6	53.88	522.38	669.97	6.70
8:00	65.1	71.7	72.2	68.4	6.6	53.88	522.38	669.97	6.70
8:30	65.1	71.7	72.3	68.4	6.6	53.88	515.63	669.97	6.61
9:00	65.1	71.7	72.3	68.4	6.6	53.88	515.63	669.97	6.61
9:30	65.1	71.7	72.3	68.4	6.6	53.88	515.63	669.97	6.61
10:00	65.1	71.8	72.3	68.4	6.7	54.70	530.34	669.97	6.80

ตารางภาคผนวกที่ 20 (ต่อ) กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.050wt% อัตราการไหล 120 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อทองแดง 65 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	65.2	71.8	72.4	68.5	6.6	53.88	515.63	669.97	6.61
11:00	65.2	71.8	72.4	68.5	6.6	53.88	515.63	669.97	6.61
11:30	65.2	71.9	72.4	68.5	6.7	54.70	530.34	669.97	6.80
12:00	65.2	71.9	72.4	68.5	6.7	54.70	523.49	669.97	6.71
12:30	65.2	71.9	72.4	68.5	6.7	54.70	523.49	669.97	6.71
13:00	65.2	71.9	72.4	68.5	6.7	54.70	523.49	669.97	6.71
13:30	65.2	71.9	72.4	68.5	6.7	54.70	523.49	669.97	6.71
14:00	65.2	71.9	72.4	68.5	6.7	54.70	523.49	669.97	6.71
14:30	65.2	71.9	72.4	68.5	6.7	54.70	523.49	669.97	6.71
15:00	65.2	71.9	72.4	68.5	6.7	54.70	523.49	669.97	6.71
15:30	65.2	71.9	72.4	68.5	6.7	54.70	523.49	669.97	6.71
16:00	65.2	71.9	72.4	68.5	6.7	54.70	523.49	669.97	6.71
16:30	65.2	71.9	72.4	68.5	6.7	54.70	523.49	669.97	6.71
17:00	65.2	71.9	72.5	68.5	6.7	54.70	516.81	669.97	6.63
17:30	65.2	72.0	72.5	68.6	6.8	55.52	531.35	669.97	6.81
18:00	65.2	72.0	72.5	68.6	6.8	55.52	524.57	669.97	6.72
18:30	65.2	72.0	72.6	68.6	6.8	55.52	517.97	669.97	6.64
19:00	65.2	72.0	72.5	68.6	6.8	55.52	524.57	669.97	6.72
19:30	65.2	72.0	72.5	68.6	6.8	55.52	524.57	669.97	6.72
20:00	65.2	72.0	72.5	68.6	6.8	55.52	524.57	669.97	6.72

ตารางภาคผนวกที่ 21 กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.050wt% อัตราการไหล 170 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าที่ห้องแดง 35 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
0:30	35.4	41.4	43.1	38.4	6.0	70.05	549.07	579.19	7.42
1:00	35.3	41.3	43.0	38.3	6.0	70.05	549.07	579.19	7.42
1:30	35.2	41.2	43.0	38.2	6.0	70.05	543.32	579.19	7.34
2:00	35.2	41.1	43.0	38.1	5.8	68.87	528.65	579.19	7.15
2:30	35.1	41.1	42.9	38.1	6.0	70.05	543.32	579.19	7.34
3:00	35.1	41.1	42.9	38.1	6.0	70.05	543.32	579.19	7.34
3:30	35.1	41.0	42.9	38.0	5.9	68.87	528.65	579.19	7.15
4:00	35.1	41.1	42.9	38.1	6.0	70.05	543.32	579.19	7.34
4:30	35.1	41.1	42.9	38.1	6.0	70.05	543.32	579.19	7.34
5:00	35.1	41.1	42.9	38.1	6.0	70.05	543.32	579.19	7.34
5:30	35.1	41.1	42.8	38.1	6.0	70.05	549.07	579.19	7.42
6:00	35.0	41.0	42.8	38.0	6.0	70.05	537.69	579.19	7.27
6:30	35.0	41.0	42.8	38.0	6.0	70.05	537.69	579.19	7.27
7:00	35.0	41.0	42.8	38.0	6.0	70.05	543.32	579.19	7.34
7:30	35.0	41.0	42.8	38.0	6.0	70.05	543.32	579.19	7.34
8:00	34.9	41.0	42.8	37.9	6.1	71.22	546.72	579.19	7.39
8:30	34.9	41.0	42.8	37.9	6.1	71.22	546.72	579.19	7.39
9:00	34.9	40.9	42.7	37.9	6.0	70.05	543.32	579.19	7.34
9:30	34.9	40.9	42.7	37.9	6.0	70.05	543.32	579.19	7.34
10:00	34.9	40.9	42.7	37.9	6.0	70.05	543.32	579.19	7.34

ตารางภาคผนวกที่ 21 (ต่อ) กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.050wt% อัตราการไหล 170 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อทองแดง 35 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	34.9	40.8	42.7	37.8	5.9	68.87	528.65	579.19	7.15
11:00	34.9	40.8	42.6	37.8	5.9	68.87	534.19	579.19	7.22
11:30	34.9	40.8	42.6	37.8	5.9	68.87	534.19	579.19	7.22
12:00	34.8	40.8	42.6	37.8	6.0	70.05	537.69	579.19	7.27
12:30	34.8	40.8	42.6	37.8	6.0	70.05	537.69	579.19	7.27
13:00	34.8	40.8	42.6	37.8	6.0	70.05	537.69	579.19	7.27
13:30	34.8	40.8	42.6	37.8	6.0	70.05	543.32	579.19	7.34
14:00	34.8	40.8	42.6	37.8	6.0	70.05	543.32	579.19	7.34
14:30	34.8	40.8	42.6	37.8	6.0	70.05	543.32	579.19	7.34
15:00	34.8	40.8	42.6	37.8	6.0	70.05	543.32	579.19	7.34
15:30	34.8	40.8	42.6	37.8	6.0	70.05	543.32	579.19	7.34
16:00	34.8	40.8	42.5	37.8	6.0	70.05	549.07	579.19	7.42
16:30	34.7	40.8	42.5	37.7	6.1	71.22	552.45	579.19	7.47
17:00	34.7	40.8	42.6	37.7	6.1	71.22	546.72	579.19	7.39
17:30	34.7	40.8	42.5	37.7	6.1	71.22	552.45	579.19	7.47
18:00	34.7	40.8	42.5	37.7	6.1	71.22	552.45	579.19	7.47
18:30	34.7	40.8	42.5	37.7	6.1	71.22	552.45	579.19	7.47
19:00	34.7	40.8	42.5	37.7	6.1	71.22	552.45	579.19	7.47
19:30	34.7	40.8	42.5	37.7	6.1	71.22	552.45	579.19	7.47
20:00	34.7	40.7	42.5	37.7	6.0	70.05	537.69	579.19	7.27



ตารางภาคผนวกที่ 22 กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.050wt% อัตราการไหล  $170 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าที่ท่อแดง  $45 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	44.2	50.0	51.7	47.1	5.8	68.03	553.79	696.44	7.33
1:00	44.1	50.0	51.6	47.1	5.9	69.21	569.60	696.44	7.54
1:30	44.0	49.9	51.6	47.0	5.9	69.21	557.21	696.44	7.38
2:00	44.0	49.9	51.6	47.0	5.9	69.21	557.21	696.44	7.38
2:30	44.0	49.9	51.6	47.0	5.9	69.21	551.22	696.44	7.30
3:00	44.0	49.9	51.6	47.0	5.9	69.21	551.22	696.44	7.30
3:30	44.0	49.9	51.6	47.0	5.9	69.21	551.22	696.44	7.30
4:00	44.0	49.9	51.6	47.0	5.9	69.21	551.22	696.44	7.30
4:30	44.0	49.9	51.6	47.0	5.9	69.21	551.22	696.44	7.30
5:00	44.0	49.9	51.6	47.0	5.9	69.21	551.22	696.44	7.30
5:30	44.0	49.9	51.6	47.0	5.9	69.21	551.22	696.44	7.30
6:00	44.0	49.9	51.6	47.0	5.9	69.21	551.22	696.44	7.30
6:30	44.1	49.9	51.6	47.0	5.8	68.03	547.77	696.44	7.25
7:00	44.1	49.9	51.6	47.0	5.8	68.03	547.77	696.44	7.25
7:30	44.1	49.9	51.6	47.0	5.8	68.03	547.77	696.44	7.25
8:00	44.1	50.0	51.7	47.1	5.9	69.21	557.21	696.44	7.38
8:30	44.1	50.0	51.7	47.1	5.9	69.21	557.21	696.44	7.38
9:00	44.1	50.0	51.7	47.1	5.9	69.21	557.21	696.44	7.38
9:30	44.1	50.0	51.7	47.1	5.9	69.21	557.21	696.44	7.38
10:00	44.1	50.0	51.7	47.1	5.9	69.21	557.21	696.44	7.38

ตารางภาคผนวกที่ 22 (ต่อ) กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.050wt% อัตราการไหล 170 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อทองแดง 45 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	44.1	50.0	51.7	47.1	5.9	69.21	557.21	696.44	7.38
11:00	44.1	50.0	51.7	47.1	5.9	69.21	557.21	696.44	7.38
11:30	44.1	50.0	51.7	47.1	5.9	69.21	557.21	696.44	7.38
12:00	44.1	50.0	51.7	47.1	5.9	69.21	557.21	696.44	7.38
12:30	44.1	50.0	51.7	47.1	5.9	69.21	557.21	696.44	7.38
13:00	44.1	50.0	51.7	47.1	5.9	69.21	557.21	696.44	7.38
13:30	44.1	50.0	51.7	47.1	5.9	69.21	557.21	696.44	7.38
14:00	44.1	50.0	51.7	47.1	5.9	69.21	557.21	696.44	7.38
14:30	44.1	50.0	51.7	47.1	5.9	69.21	557.21	696.44	7.38
15:00	44.1	50.0	51.7	47.1	5.9	69.21	557.21	696.44	7.38
15:30	44.1	50.0	51.7	47.1	5.9	69.21	551.22	696.44	7.30
16:00	44.1	50.0	51.7	47.1	5.9	69.21	551.22	696.44	7.30
16:30	44.2	50.1	51.7	47.2	5.9	69.21	563.34	696.44	7.46
17:00	44.2	50.1	51.7	47.2	5.9	69.21	563.34	696.44	7.46
17:30	44.2	50.1	51.7	47.2	5.9	69.21	563.34	696.44	7.46
18:00	44.2	50.1	51.7	47.2	5.9	69.21	563.34	696.44	7.46
18:30	44.2	50.1	51.7	47.2	5.9	69.21	563.34	696.44	7.46
19:00	44.2	50.1	51.7	47.2	5.9	69.21	563.34	696.44	7.46
19:30	44.3	50.1	51.7	47.2	5.8	68.03	559.94	696.44	7.41
20:00	44.3	50.1	51.7	47.2	5.8	68.03	559.94	696.44	7.41

ตารางภาคผนวกที่ 23 กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.050wt% อัตราการไหล  $170 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าที่ท่อแดง  $55 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	54.6	60.5	62.1	57.5	5.9	68.35	559.46	820.12	7.28
1:00	54.6	60.5	62.0	57.5	5.9	68.35	565.71	820.12	7.36
1:30	54.6	60.4	62.0	57.5	5.8	67.18	549.90	820.12	7.15
2:00	54.6	60.5	62.1	57.5	5.9	68.35	559.46	820.12	7.28
2:30	54.7	60.5	62.1	57.6	5.8	67.18	556.04	820.12	7.23
3:00	54.8	60.5	62.1	57.6	5.7	66.02	546.37	820.12	7.11
3:30	54.8	60.6	62.2	57.7	5.8	67.18	556.04	820.12	7.23
4:00	54.8	60.6	62.3	57.7	5.8	67.18	543.89	820.12	7.08
4:30	54.9	60.6	62.3	57.7	5.7	66.02	540.33	820.12	7.03
5:00	55.0	60.6	62.3	57.8	5.6	64.85	536.70	820.12	6.98
5:30	55.0	60.7	62.4	57.8	5.7	66.02	540.33	820.12	7.03
6:00	55.0	60.8	62.4	57.9	5.8	67.18	556.04	820.12	7.23
6:30	55.1	60.8	62.5	57.9	5.7	66.02	540.33	820.12	7.03
7:00	55.1	60.8	62.5	57.9	5.7	66.02	540.33	820.12	7.03
7:30	55.2	60.9	62.5	58.0	5.7	66.02	546.37	820.12	7.11
8:00	55.3	60.9	62.6	58.1	5.6	64.85	536.70	820.12	6.98
8:30	55.3	61.0	62.6	58.1	5.7	66.02	552.55	820.12	7.19
9:00	55.3	61.0	62.7	58.1	5.7	66.02	540.33	820.12	7.03
9:30	55.4	61.0	62.7	58.2	5.6	64.85	530.77	820.12	6.91
10:00	55.4	61.1	62.8	58.2	5.7	66.02	540.33	820.12	7.03

ตารางภาคผนวกที่ 23 (ต่อ) กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.050wt% อัตราการไหล 170 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อทองแดง 55 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	55.5	61.2	62.8	58.3	5.7	66.02	546.37	820.12	7.11
11:00	55.5	61.2	62.9	58.3	5.7	66.02	540.33	820.12	7.03
11:30	55.6	61.2	62.9	58.4	5.6	64.85	536.70	820.12	6.98
12:00	55.6	61.3	62.9	58.4	5.7	66.02	546.37	820.12	7.11
12:30	55.6	61.3	63.0	58.4	5.7	66.02	540.33	820.12	7.03
13:00	55.7	61.3	63.0	58.5	5.6	64.85	536.70	820.12	6.98
13:30	55.7	61.4	63.0	58.5	5.7	66.02	546.37	820.12	7.11
14:00	55.8	61.5	63.1	58.6	5.7	66.02	552.55	820.12	7.19
14:30	55.8	61.5	63.2	58.6	5.7	66.02	540.33	820.12	7.03
15:00	55.8	61.5	63.2	58.6	5.7	66.02	540.33	820.12	7.03
15:30	55.9	61.5	63.2	58.7	5.6	64.85	530.77	820.12	6.91
16:00	55.9	61.6	63.3	58.7	5.7	66.02	540.33	820.12	7.03
16:30	55.9	61.6	63.3	58.7	5.7	66.02	540.33	820.12	7.03
17:00	56.0	61.7	63.3	58.8	5.7	66.02	552.55	820.12	7.19
17:30	56.0	61.7	63.4	58.8	5.7	66.02	540.33	820.12	7.03
18:00	56.0	61.7	63.4	58.8	5.7	66.02	540.33	820.12	7.03
18:30	56.0	61.7	63.4	58.8	5.7	66.02	540.33	820.12	7.03
19:00	56.1	61.8	63.4	58.9	5.7	66.02	546.37	820.12	7.11
19:30	56.1	61.8	63.4	58.9	5.7	66.02	546.37	820.12	7.11
20:00	56.1	61.8	63.5	58.9	5.7	66.02	540.33	820.12	7.03

ตารางภาคผนวกที่ 24 กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.050wt% อัตราการไหล  $170 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าที่ท่อแดง  $65 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	63.9	69.6	71.2	66.8	5.7	66.32	558.26	949.13	7.16
1:00	63.9	69.6	71.1	66.8	5.7	66.32	571.24	949.13	7.32
1:30	63.9	69.6	71.0	66.8	5.7	66.32	577.96	949.13	7.41
2:00	63.9	69.6	71.0	66.8	5.7	66.32	577.96	949.13	7.41
2:30	64.0	69.6	71.1	66.8	5.6	65.16	567.82	949.13	7.28
3:00	64.0	69.7	71.1	66.9	5.7	66.32	584.84	949.13	7.50
3:30	64.1	69.7	71.1	66.9	5.6	65.16	574.58	949.13	7.37
4:00	64.2	69.7	71.2	67.0	5.5	63.99	564.32	949.13	7.23
4:30	64.2	69.7	71.2	67.0	5.5	63.99	564.32	949.13	7.23
5:00	64.3	69.7	71.2	67.0	5.4	62.83	560.74	949.13	7.19
5:30	64.3	69.7	71.3	67.0	5.4	62.83	547.54	949.13	7.02
6:00	64.4	69.8	71.3	67.1	5.4	62.83	560.74	949.13	7.19
6:30	64.5	69.8	71.4	67.2	5.3	61.67	543.80	949.13	6.97
7:00	64.5	69.9	71.4	67.2	5.4	62.83	560.74	949.13	7.19
7:30	64.5	69.9	71.5	67.2	5.4	62.83	547.54	949.13	7.02
8:00	64.6	70.0	71.5	67.3	5.4	62.83	560.74	949.13	7.19
8:30	64.7	70.0	71.6	67.4	5.3	61.67	543.80	949.13	6.97
9:00	64.7	70.1	71.7	67.4	5.4	62.83	547.54	949.13	7.02
9:30	64.8	70.1	71.7	67.5	5.3	61.67	543.80	949.13	6.97
10:00	64.8	70.2	71.7	67.5	5.4	62.83	554.06	949.13	7.10

ตารางภาคผนวกที่ 24 (ต่อ) กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.050wt% อัตราการไหล 170 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อทองแดง 65 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	64.8	70.3	71.8	67.6	5.5	63.99	564.32	949.13	7.23
11:00	64.8	70.3	71.8	67.6	5.5	63.99	557.68	949.13	7.15
11:30	64.9	70.4	71.9	67.7	5.5	63.99	564.32	949.13	7.23
12:00	64.9	70.5	72.0	67.7	5.6	65.16	567.82	949.13	7.28
12:30	65.0	70.5	72.0	67.8	5.5	63.99	564.32	949.13	7.23
13:00	65.0	70.5	72.0	67.8	5.5	63.99	564.32	949.13	7.23
13:30	65.0	70.6	72.0	67.8	5.6	65.16	581.51	949.13	7.45
14:00	65.0	70.6	72.1	67.8	5.6	65.16	567.82	949.13	7.28
14:30	65.0	70.6	72.1	67.8	5.6	65.16	567.82	949.13	7.28
15:00	65.0	70.6	72.1	67.8	5.6	65.16	561.22	949.13	7.19
15:30	65.1	70.7	72.1	67.9	5.6	65.16	574.58	949.13	7.37
16:00	65.2	70.7	72.1	68.0	5.5	63.99	571.12	949.13	7.32
16:30	65.2	70.7	72.2	68.0	5.5	63.99	564.32	949.13	7.23
17:00	65.2	70.8	72.2	68.0	5.6	65.16	581.51	949.13	7.45
17:30	65.2	70.8	72.3	68.0	5.6	65.16	567.82	949.13	7.28
18:00	65.2	70.8	72.3	68.0	5.6	65.16	567.82	949.13	7.28
18:30	65.2	70.8	72.3	68.0	5.6	65.16	567.82	949.13	7.28
19:00	65.2	70.8	72.3	68.0	5.6	65.16	561.22	949.13	7.19
19:30	65.3	70.8	72.3	68.1	5.5	63.99	557.68	949.13	7.15
20:00	65.3	70.9	72.3	68.1	5.6	65.16	574.58	949.13	7.37



ตารางภาคผนวกที่ 25 กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.050wt% อัตราการไหล  $220 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าที่ท่อแดง  $35 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	35.0	39.7	41.7	37.3	4.7	70.84	599.73	749.54	8.11
1:00	35.0	39.7	41.7	37.3	4.7	70.84	599.73	749.54	8.11
1:30	35.0	39.7	41.7	37.3	4.7	70.84	599.73	749.54	8.11
2:00	35.0	39.7	41.7	37.3	4.7	70.84	599.73	749.54	8.11
2:30	35.0	39.7	41.7	37.3	4.7	70.84	599.73	749.54	8.11
3:00	35.0	39.7	41.7	37.3	4.7	70.84	599.73	749.54	8.11
3:30	35.0	39.7	41.7	37.3	4.7	70.84	599.73	749.54	8.11
4:00	35.0	39.7	41.7	37.3	4.7	70.84	599.73	749.54	8.11
4:30	35.0	39.7	41.7	37.3	4.7	70.84	599.73	749.54	8.11
5:00	35.0	39.7	41.7	37.3	4.7	70.84	599.73	749.54	8.11
5:30	35.0	39.7	41.7	37.3	4.7	70.84	599.73	749.54	8.11
6:00	35.0	39.7	41.7	37.3	4.7	70.84	606.67	749.54	8.20
6:30	35.0	39.7	41.6	37.3	4.7	70.84	613.76	749.54	8.30
7:00	34.9	39.6	41.6	37.2	4.7	70.84	599.73	749.54	8.11
7:30	34.9	39.6	41.6	37.2	4.7	70.84	599.73	749.54	8.11
8:00	34.9	39.6	41.6	37.2	4.7	70.84	599.73	749.54	8.11
8:30	34.9	39.6	41.6	37.2	4.7	70.84	599.73	749.54	8.11
9:00	34.9	39.6	41.6	37.2	4.7	70.84	599.73	749.54	8.11
9:30	34.9	39.6	41.6	37.2	4.7	70.84	599.73	749.54	8.11
10:00	34.9	39.6	41.6	37.2	4.7	70.84	599.73	749.54	8.11

ตารางภาคผนวกที่ 25 (ต่อ) กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.050wt% อัตราการไหล 220 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อทองแดง 35 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	34.9	39.6	41.6	37.2	4.7	70.84	599.73	749.54	8.11
11:00	34.8	39.5	41.6	37.1	4.7	70.84	586.33	749.54	7.93
11:30	34.8	39.5	41.6	37.1	4.7	70.84	586.33	749.54	7.93
12:00	34.8	39.5	41.6	37.1	4.7	70.84	586.33	749.54	7.93
12:30	34.8	39.5	41.6	37.1	4.7	70.84	586.33	749.54	7.93
13:00	34.8	39.5	41.6	37.1	4.7	70.84	586.33	749.54	7.93
13:30	34.8	39.5	41.6	37.1	4.7	70.84	586.33	749.54	7.93
14:00	34.8	39.5	41.6	37.1	4.7	70.84	586.33	749.54	7.93
14:30	34.8	39.5	41.6	37.1	4.7	70.84	586.33	749.54	7.93
15:00	34.8	39.5	41.6	37.1	4.7	70.84	586.33	749.54	7.93
15:30	34.8	39.5	41.6	37.1	4.7	70.84	586.33	749.54	7.93
16:00	34.8	39.5	41.6	37.1	4.7	70.84	586.33	749.54	7.93
16:30	34.8	39.5	41.6	37.1	4.7	70.84	592.96	749.54	8.02
17:00	34.8	39.5	41.5	37.1	4.7	70.84	599.73	749.54	8.11
17:30	34.8	39.5	41.6	37.1	4.7	70.84	586.33	749.54	7.93
18:00	34.8	39.5	41.5	37.1	4.7	70.84	599.73	749.54	8.11
18:30	34.8	39.5	41.6	37.1	4.7	70.84	592.96	749.54	8.02
19:00	34.8	39.5	41.6	37.1	4.7	70.84	592.96	749.54	8.02
19:30	34.8	39.5	41.6	37.1	4.7	70.84	592.96	749.54	8.02
20:00	34.8	39.5	41.5	37.1	4.7	70.84	599.73	749.54	8.11

ตารางภาคผนวกที่ 26 กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.050wt% อัตราการไหล  $220 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าที่ท่อแดง  $45 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	44.2	48.9	50.9	46.5	4.7	70.59	603.07	901.27	7.98
1:00	44.1	48.8	50.8	46.4	4.7	70.59	603.07	901.27	7.98
1:30	44.1	48.8	50.8	46.4	4.7	70.59	603.07	901.27	7.98
2:00	44.1	48.8	50.8	46.4	4.7	70.59	596.19	901.27	7.89
2:30	44.1	48.8	50.8	46.4	4.7	70.59	596.19	901.27	7.89
3:00	44.1	48.8	50.8	46.4	4.7	70.59	596.19	901.27	7.89
3:30	44.1	48.8	50.8	46.4	4.7	70.59	596.19	901.27	7.89
4:00	44.1	48.8	50.8	46.4	4.7	70.59	596.19	901.27	7.89
4:30	44.1	48.8	50.8	46.4	4.7	70.59	596.19	901.27	7.89
5:00	44.2	48.8	50.8	46.5	4.6	69.07	590.10	901.27	7.81
5:30	44.2	48.8	50.8	46.5	4.6	69.07	590.10	901.27	7.81
6:00	44.2	48.8	50.8	46.5	4.6	69.07	590.10	901.27	7.81
6:30	44.2	48.9	50.9	46.5	4.7	70.59	603.07	901.27	7.98
7:00	44.2	48.9	50.9	46.5	4.7	70.59	603.07	901.27	7.98
7:30	44.2	48.9	50.9	46.5	4.7	70.59	603.07	901.27	7.98
8:00	44.2	48.9	50.9	46.5	4.7	70.59	603.07	901.27	7.98
8:30	44.2	48.9	50.9	46.5	4.7	70.59	603.07	901.27	7.98
9:00	44.2	48.9	50.9	46.5	4.7	70.59	603.07	901.27	7.98
9:30	44.2	48.9	50.9	46.5	4.7	70.59	603.07	901.27	7.98
10:00	44.2	48.9	50.9	46.5	4.7	70.59	603.07	901.27	7.98

ตารางภาคผนวกที่ 26 (ต่อ) กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.050wt% อัตราการไหล 220 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อทองแดง 45 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	44.2	48.9	50.9	46.5	4.7	70.59	603.07	901.27	7.98
11:00	44.2	48.9	50.9	46.5	4.7	70.59	603.07	901.27	7.98
11:30	44.2	48.9	50.9	46.5	4.7	70.59	603.07	901.27	7.98
12:00	44.2	48.9	50.9	46.5	4.7	70.59	603.07	901.27	7.98
12:30	44.2	48.9	50.9	46.5	4.7	70.59	603.07	901.27	7.98
13:00	44.2	49.0	50.9	46.6	4.8	72.10	623.22	901.27	8.25
13:30	44.2	49.0	50.9	46.6	4.8	72.10	616.04	901.27	8.16
14:00	44.2	49.0	50.9	46.6	4.8	72.10	616.04	901.27	8.16
14:30	44.2	49.0	50.9	46.6	4.8	72.10	616.04	901.27	8.16
15:00	44.2	49.0	50.9	46.6	4.8	72.10	616.04	901.27	8.16
15:30	44.2	49.0	50.9	46.6	4.8	72.10	616.04	901.27	8.16
16:00	44.2	49.0	50.9	46.6	4.8	72.10	616.04	901.27	8.16
16:30	44.2	49.0	50.9	46.6	4.8	72.10	616.04	901.27	8.16
17:00	44.2	49.0	50.9	46.6	4.8	72.10	616.04	901.27	8.16
17:30	44.2	49.0	50.9	46.6	4.8	72.10	616.04	901.27	8.16
18:00	44.2	49.0	50.9	46.6	4.8	72.10	616.04	901.27	8.16
18:30	44.2	49.0	51.0	46.6	4.8	72.10	609.01	901.27	8.06
19:00	44.2	49.0	51.0	46.6	4.8	72.10	609.01	901.27	8.06
19:30	44.2	49.0	51.0	46.6	4.8	72.10	602.15	901.27	7.97
20:00	44.2	49.0	51.0	46.6	4.8	72.10	609.01	901.27	8.06

ตารางภาคผนวกที่ 27 กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.050wt% อัตราการไหล  $220 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าที่ท่อแดง  $55 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	54.8	59.4	61.2	57.1	4.6	69.55	628.32	1061.33	8.36
1:00	54.7	59.3	61.2	57.0	4.6	69.55	620.75	1061.33	8.26
1:30	54.7	59.3	61.1	57.0	4.6	69.55	628.32	1061.33	8.36
2:00	54.7	59.3	61.1	57.0	4.6	69.55	628.32	1061.33	8.36
2:30	54.7	59.3	61.1	57.0	4.6	69.55	628.32	1061.33	8.36
3:00	54.7	59.3	61.1	57.0	4.6	69.55	628.32	1061.33	8.36
3:30	54.7	59.3	61.1	57.0	4.6	69.55	628.32	1061.33	8.36
4:00	54.7	59.3	61.2	57.0	4.6	69.55	620.75	1061.33	8.26
4:30	54.7	59.3	61.2	57.0	4.6	69.55	620.75	1061.33	8.26
5:00	54.7	59.3	61.1	57.0	4.6	69.55	628.32	1061.33	8.36
5:30	54.7	59.3	61.1	57.0	4.6	69.55	628.32	1061.33	8.36
6:00	54.7	59.3	61.2	57.0	4.6	69.55	620.75	1061.33	8.26
6:30	54.7	59.3	61.2	57.0	4.6	69.55	620.75	1061.33	8.26
7:00	54.7	59.3	61.2	57.0	4.6	69.55	620.75	1061.33	8.26
7:30	54.7	59.3	61.2	57.0	4.6	69.55	620.75	1061.33	8.26
8:00	54.7	59.3	61.2	57.0	4.6	69.55	620.75	1061.33	8.26
8:30	54.7	59.3	61.2	57.0	4.6	69.55	620.75	1061.33	8.26
9:00	54.7	59.3	61.2	57.0	4.6	69.55	620.75	1061.33	8.26
9:30	54.7	59.3	61.1	57.0	4.6	69.55	628.32	1061.33	8.36
10:00	54.7	59.3	61.1	57.0	4.6	69.55	628.32	1061.33	8.36

ตารางภาคผนวกที่ 27 (ต่อ) กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.050wt% อัตราการไหล 220 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อทองแดง 55 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	54.7	59.3	61.2	57.0	4.6	69.55	620.75	1061.33	8.26
11:00	54.7	59.3	61.1	57.0	4.6	69.55	628.32	1061.33	8.36
11:30	54.7	59.3	61.1	57.0	4.6	69.55	628.32	1061.33	8.36
12:00	54.7	59.3	61.1	57.0	4.6	69.55	628.32	1061.33	8.36
12:30	54.7	59.2	61.2	57.0	4.5	68.04	600.02	1061.33	7.98
13:00	54.7	59.2	61.2	57.0	4.5	68.04	600.02	1061.33	7.98
13:30	54.7	59.2	61.2	57.0	4.5	68.04	600.02	1061.33	7.98
14:00	54.7	59.2	61.2	57.0	4.5	68.04	600.02	1061.33	7.98
14:30	54.7	59.3	61.1	57.0	4.6	69.55	628.32	1061.33	8.36
15:00	54.7	59.3	61.1	57.0	4.6	69.55	628.32	1061.33	8.36
15:30	54.7	59.2	61.1	57.0	4.5	68.04	607.25	1061.33	8.08
16:00	54.7	59.2	61.1	57.0	4.5	68.04	607.25	1061.33	8.08
16:30	54.7	59.2	61.1	57.0	4.5	68.04	607.25	1061.33	8.08
17:00	54.7	59.2	61.1	57.0	4.5	68.04	607.25	1061.33	8.08
17:30	54.7	59.2	61.1	57.0	4.5	68.04	607.25	1061.33	8.08
18:00	54.7	59.2	61.1	57.0	4.5	68.04	607.25	1061.33	8.08
18:30	54.7	59.2	61.1	57.0	4.5	68.04	607.25	1061.33	8.08
19:00	54.7	59.2	61.1	57.0	4.5	68.04	607.25	1061.33	8.08
19:30	54.7	59.2	61.1	57.0	4.5	68.04	607.25	1061.33	8.08
20:00	54.7	59.2	61.1	57.0	4.5	68.04	607.25	1061.33	8.08



ตารางภาคผนวกที่ 28 กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.050wt% อัตราการไหล  $220 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าที่ท่อแดง  $65 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	65.6	70.0	71.7	67.8	4.4	66.25	629.18	1228.28	8.07
1:00	65.5	69.9	71.7	67.7	4.4	66.25	621.22	1228.28	7.96
1:30	65.4	69.8	71.6	67.6	4.4	66.25	613.45	1228.28	7.86
2:00	65.4	69.7	71.6	67.6	4.3	64.75	592.11	1228.28	7.59
2:30	65.5	69.8	71.6	67.7	4.3	64.75	614.88	1228.28	7.88
3:00	65.4	69.8	71.6	67.6	4.4	66.25	621.22	1228.28	7.96
3:30	65.4	69.8	71.6	67.6	4.4	66.25	621.22	1228.28	7.96
4:00	65.4	69.8	71.6	67.6	4.4	66.25	621.22	1228.28	7.96
4:30	65.4	69.8	71.6	67.6	4.4	66.25	621.22	1228.28	7.96
5:00	65.4	69.7	71.5	67.6	4.3	64.75	614.88	1228.28	7.88
5:30	65.4	69.7	71.5	67.6	4.3	64.75	614.88	1228.28	7.88
6:00	65.4	69.7	71.5	67.6	4.3	64.75	614.88	1228.28	7.88
6:30	65.4	69.7	71.5	67.6	4.3	64.75	614.88	1228.28	7.88
7:00	65.3	69.6	71.5	67.5	4.3	64.75	599.51	1228.28	7.69
7:30	65.3	69.6	71.5	67.5	4.3	64.75	599.51	1228.28	7.69
8:00	65.3	69.6	71.5	67.5	4.3	64.75	599.51	1228.28	7.69
8:30	65.3	69.6	71.5	67.5	4.3	64.75	599.51	1228.28	7.69
9:00	65.3	69.6	71.5	67.5	4.3	64.75	599.51	1228.28	7.69
9:30	65.3	69.6	71.5	67.5	4.3	64.75	599.51	1228.28	7.69
10:00	65.2	69.6	71.5	67.4	4.4	66.25	605.88	1228.28	7.77

ตารางภาคผนวกที่ 28 (ต่อ) กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.050wt% อัตราการไหล 220 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อทองแดง 65 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	65.2	69.6	71.5	67.4	4.4	66.25	605.88	1228.28	7.77
11:00	65.2	69.6	71.4	67.4	4.4	66.25	621.22	1228.28	7.96
11:30	65.1	69.6	71.4	67.4	4.5	67.76	627.39	1228.28	8.04
12:00	65.1	69.6	71.4	67.4	4.5	67.76	627.39	1228.28	8.04
12:30	65.1	69.5	71.3	67.3	4.4	66.25	613.45	1228.28	7.86
13:00	65.1	69.5	71.3	67.3	4.4	66.25	613.45	1228.28	7.86
13:30	65.1	69.5	71.3	67.3	4.4	66.25	613.45	1228.28	7.86
14:00	65.1	69.4	71.3	67.3	4.3	64.75	592.11	1228.28	7.59
14:30	65.1	69.4	71.3	67.3	4.3	64.75	599.51	1228.28	7.69
15:00	65.1	69.4	71.3	67.3	4.3	64.75	599.51	1228.28	7.69
15:30	65.0	69.4	71.3	67.2	4.4	66.25	605.88	1228.28	7.77
16:00	65.0	69.4	71.3	67.2	4.4	66.25	605.88	1228.28	7.77
16:30	65.0	69.4	71.3	67.2	4.4	66.25	605.88	1228.28	7.77
17:00	65.0	69.4	71.3	67.2	4.4	66.25	605.88	1228.28	7.77
17:30	64.9	69.4	71.3	67.2	4.5	67.76	612.09	1228.28	7.85
18:00	64.9	69.4	71.2	67.2	4.5	67.76	627.39	1228.28	8.04
18:30	64.9	69.4	71.2	67.2	4.5	67.76	627.39	1228.28	8.04
19:00	64.9	69.4	71.2	67.2	4.5	67.76	627.39	1228.28	8.04
19:30	64.9	69.3	71.1	67.1	4.4	66.25	613.45	1228.28	7.86
20:00	64.9	69.3	71.1	67.1	4.4	66.25	613.45	1228.28	7.86

ตารางภาคผนวกที่ 29 กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.075wt% อัตราการไหล  $120 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าที่ท่อแดง  $35 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	34.9	42.6	42.8	38.8	7.7	63.99	585.21	408.62	7.82
1:00	34.8	42.5	42.8	38.7	7.7	63.99	578.07	408.62	7.73
1:30	34.7	42.4	42.8	38.6	7.7	63.99	564.31	408.62	7.54
2:00	34.7	42.4	42.8	38.6	7.7	63.99	564.31	408.62	7.54
2:30	34.7	42.4	42.8	38.6	7.7	63.99	564.31	408.62	7.54
3:00	34.7	42.4	42.8	38.6	7.7	63.99	564.31	408.62	7.54
3:30	34.7	42.4	42.8	38.6	7.7	63.99	564.31	408.62	7.54
4:00	34.8	42.4	42.8	38.6	7.7	63.58	564.00	408.62	7.54
4:30	34.8	42.4	42.8	38.6	7.7	63.58	564.00	408.62	7.54
5:00	34.8	42.4	42.8	38.6	7.7	63.58	557.33	408.62	7.45
5:30	34.8	42.4	42.8	38.6	7.6	63.16	556.98	408.62	7.44
6:00	34.8	42.4	42.9	38.6	7.6	63.16	550.43	408.62	7.36
6:30	34.9	42.5	42.9	38.7	7.7	63.58	564.00	408.62	7.54
7:00	34.9	42.5	42.9	38.7	7.7	63.58	564.00	408.62	7.54
7:30	34.9	42.5	42.9	38.7	7.7	63.58	564.00	408.62	7.54
8:00	34.9	42.5	42.9	38.7	7.7	63.58	564.00	408.62	7.54
8:30	34.9	42.5	42.9	38.7	7.7	63.58	557.33	408.62	7.45
9:00	34.9	42.5	42.9	38.7	7.7	63.58	557.33	408.62	7.45
9:30	34.9	42.6	42.9	38.7	7.8	64.41	571.37	408.62	7.64
10:00	34.9	42.6	42.9	38.7	7.8	64.41	571.37	408.62	7.64

ตารางภาคผนวกที่ 29 (ต่อ) กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.075wt% อัตราการไหล 120 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อทองแดง 35 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	34.9	42.6	42.9	38.7	7.8	64.41	571.37	408.62	7.64
11:00	34.9	42.6	42.9	38.7	7.8	64.41	571.37	408.62	7.64
11:30	34.9	42.6	43.0	38.7	7.8	64.41	564.61	408.62	7.55
12:00	34.9	42.6	43.0	38.8	7.7	63.99	564.31	408.62	7.54
12:30	35.0	42.6	43.0	38.8	7.7	63.58	564.00	408.62	7.54
13:00	35.0	42.6	43.0	38.8	7.7	63.58	557.33	408.62	7.45
13:30	35.0	42.7	43.0	38.8	7.8	64.41	571.37	408.62	7.64
14:00	35.0	42.7	43.0	38.8	7.8	64.41	571.37	408.62	7.64
14:30	35.0	42.6	43.0	38.8	7.6	63.16	556.98	408.62	7.44
15:00	35.0	42.7	43.0	38.9	7.7	63.99	571.11	408.62	7.63
15:30	35.0	42.7	43.1	38.9	7.7	63.99	564.31	408.62	7.54
16:00	35.0	42.8	43.1	38.9	7.8	64.82	578.53	408.62	7.73
16:30	35.0	42.8	43.1	38.9	7.8	64.82	578.53	408.62	7.73
17:00	35.0	42.8	43.1	38.9	7.8	64.82	578.53	408.62	7.73
17:30	35.0	42.8	43.1	38.9	7.8	64.82	578.53	408.62	7.73
18:00	35.1	42.8	43.1	38.9	7.8	64.41	578.30	408.62	7.73
18:30	35.1	42.8	43.1	38.9	7.8	64.41	571.37	408.62	7.64
19:00	35.1	42.8	43.2	38.9	7.8	64.41	564.61	408.62	7.55
19:30	35.1	42.8	43.2	39.0	7.7	63.99	564.31	408.62	7.54
20:00	35.1	42.8	43.2	39.0	7.7	63.99	564.31	408.62	7.54

ตารางภาคผนวกที่ 30 กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.075wt% อัตราการไหล  $120 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าที่ท่อแดง  $45 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	45.4	52.9	53.1	49.2	7.5	62.10	582.32	491.34	7.62
1:00	45.3	52.8	53.1	49.1	7.5	62.10	575.04	491.34	7.53
1:30	45.2	52.7	53.0	49.0	7.5	62.10	567.94	491.34	7.43
2:00	45.2	52.7	53.0	49.0	7.5	62.10	575.04	491.34	7.53
2:30	45.2	52.7	53.0	49.0	7.5	62.10	575.04	491.34	7.53
3:00	45.2	52.7	53.0	49.0	7.5	62.10	575.04	491.34	7.53
3:30	45.2	52.7	53.0	49.0	7.5	62.10	575.04	491.34	7.53
4:00	45.2	52.7	53.0	49.0	7.5	62.10	575.04	491.34	7.53
4:30	45.2	52.6	53.0	48.9	7.4	61.28	560.37	491.34	7.34
5:00	45.2	52.6	53.0	48.9	7.4	61.28	560.37	491.34	7.34
5:30	45.1	52.6	53.0	48.9	7.5	62.10	561.01	491.34	7.34
6:00	45.1	52.6	53.0	48.9	7.5	62.10	561.01	491.34	7.34
6:30	45.1	52.6	53.0	48.9	7.5	62.10	561.01	491.34	7.34
7:00	45.1	52.6	52.9	48.9	7.5	62.10	567.94	491.34	7.43
7:30	45.1	52.6	53.0	48.9	7.5	62.10	561.01	491.34	7.34
8:00	45.1	52.6	52.9	48.9	7.5	62.10	567.94	491.34	7.43
8:30	45.1	52.6	52.9	48.9	7.5	62.10	567.94	491.34	7.43
9:00	45.0	52.6	52.9	48.8	7.6	62.93	568.49	491.34	7.44
9:30	45.0	52.6	52.9	48.8	7.6	62.93	575.51	491.34	7.53
10:00	45.0	52.6	52.9	48.8	7.6	62.93	575.51	491.34	7.53

ตารางภาคผนวกที่ 30 (ต่อ) กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.075wt% อัตราการไหล 120 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อทองแดง 45 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	45.0	52.5	52.9	48.8	7.5	62.10	561.01	491.34	7.34
11:00	45.0	52.5	52.9	48.8	7.5	62.10	561.01	491.34	7.34
11:30	45.0	52.4	52.8	48.7	7.4	61.28	560.37	491.34	7.34
12:00	45.0	52.4	52.8	48.7	7.4	61.28	560.37	491.34	7.34
12:30	45.0	52.4	52.8	48.7	7.4	61.28	560.37	491.34	7.34
13:00	45.0	52.4	52.8	48.7	7.4	61.28	560.37	491.34	7.34
13:30	44.9	52.4	52.8	48.7	7.5	62.10	561.01	491.34	7.34
14:00	44.9	52.4	52.7	48.7	7.5	62.10	567.94	491.34	7.43
14:30	44.9	52.4	52.7	48.7	7.5	62.10	567.94	491.34	7.43
15:00	44.9	52.3	52.7	48.6	7.4	61.28	560.37	491.34	7.34
15:30	44.9	52.3	52.7	48.6	7.4	61.28	560.37	491.34	7.34
16:00	44.9	52.3	52.7	48.6	7.4	61.28	560.37	491.34	7.34
16:30	44.9	52.3	52.7	48.6	7.4	61.28	560.37	491.34	7.34
17:00	44.9	52.3	52.7	48.6	7.4	61.28	560.37	491.34	7.34
17:30	44.8	52.3	52.6	48.6	7.5	62.10	567.94	491.34	7.43
18:00	44.8	52.3	52.6	48.6	7.5	62.10	575.04	491.34	7.53
18:30	44.8	52.3	52.6	48.6	7.5	62.10	575.04	491.34	7.53
19:00	44.8	52.3	52.6	48.6	7.5	62.10	575.04	491.34	7.53
19:30	44.7	52.3	52.6	48.5	7.6	62.93	575.51	491.34	7.53
20:00	44.7	52.3	52.6	48.5	7.6	62.93	575.51	491.34	7.53



ตารางภาคผนวกที่ 31 กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.075wt% อัตราการไหล  $120 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าที่ท่อแดง  $55 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	55.3	63.0	63.3	59.2	7.7	63.51	566.82	578.59	7.29
1:00	55.2	62.9	63.2	59.1	7.7	63.51	566.82	578.59	7.29
1:30	55.1	62.8	63.2	59.0	7.7	63.51	553.48	578.59	7.12
2:00	55.2	62.8	63.2	59.0	7.7	63.10	553.14	578.59	7.11
2:30	55.2	62.8	63.2	59.0	7.7	63.10	553.14	578.59	7.11
3:00	55.2	62.8	63.2	59.0	7.7	63.10	553.14	578.59	7.11
3:30	55.2	62.8	63.3	59.0	7.7	63.10	546.67	578.59	7.03
4:00	55.2	62.8	63.3	59.0	7.7	63.10	546.67	578.59	7.03
4:30	55.2	62.8	63.3	59.0	7.7	63.10	546.67	578.59	7.03
5:00	55.2	62.8	63.3	59.0	7.7	63.10	546.67	578.59	7.03
5:30	55.2	62.8	63.3	59.0	7.7	63.10	546.67	578.59	7.03
6:00	55.2	62.8	63.3	59.0	7.7	63.10	546.67	578.59	7.03
6:30	55.2	62.8	63.3	59.0	7.7	63.10	546.67	578.59	7.03
7:00	55.2	62.8	63.2	59.0	7.7	63.10	553.14	578.59	7.11
7:30	55.2	62.8	63.2	59.0	7.7	63.10	553.14	578.59	7.11
8:00	55.2	62.8	63.2	59.0	7.7	63.10	553.14	578.59	7.11
8:30	55.2	62.8	63.2	59.0	7.7	63.10	553.14	578.59	7.11
9:00	55.2	62.8	63.2	59.0	7.7	63.10	553.14	578.59	7.11
9:30	55.2	62.8	63.2	59.0	7.7	63.10	553.14	578.59	7.11
10:00	55.2	62.8	63.3	59.0	7.7	63.10	546.67	578.59	7.03

ตารางภาคผนวกที่ 31 (ต่อ) กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.075wt% อัตราการไหล 120 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อทองแดง 55 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	55.2	62.8	63.3	59.0	7.6	62.69	546.29	578.59	7.03
11:00	55.2	62.8	63.3	59.0	7.7	63.10	546.67	578.59	7.03
11:30	55.2	62.9	63.4	59.0	7.8	63.92	547.41	578.59	7.04
12:00	55.2	62.9	63.4	59.1	7.7	63.51	547.04	578.59	7.04
12:30	55.2	62.9	63.4	59.1	7.7	63.51	547.04	578.59	7.04
13:00	55.2	63.0	63.4	59.1	7.9	64.75	560.96	578.59	7.22
13:30	55.2	63.0	63.4	59.1	7.9	64.75	554.48	578.59	7.13
14:00	55.2	63.0	63.4	59.1	7.9	64.75	560.96	578.59	7.22
14:30	55.2	62.9	63.4	59.1	7.7	63.51	547.04	578.59	7.04
15:00	55.2	62.9	63.4	59.1	7.7	63.51	547.04	578.59	7.04
15:30	55.2	62.9	63.4	59.1	7.7	63.51	547.04	578.59	7.04
16:00	55.2	62.9	63.4	59.1	7.7	63.51	547.04	578.59	7.04
16:30	55.2	62.9	63.4	59.1	7.7	63.51	547.04	578.59	7.04
17:00	55.2	62.9	63.4	59.1	7.7	63.51	547.04	578.59	7.04
17:30	55.2	62.9	63.4	59.1	7.7	63.51	547.04	578.59	7.04
18:00	55.2	62.9	63.3	59.1	7.7	63.51	553.48	578.59	7.12
18:30	55.2	62.9	63.4	59.1	7.7	63.51	547.04	578.59	7.04
19:00	55.3	62.8	63.4	59.0	7.6	62.27	533.29	578.59	6.86
19:30	55.3	62.9	63.3	59.1	7.7	63.10	553.14	578.59	7.11
20:00	55.3	62.9	63.4	59.1	7.7	63.10	546.67	578.59	7.03

ตารางภาคผนวกที่ 32 กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.075wt% อัตราการไหล  $120 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าที่ท่อแดง  $65 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	65.2	72.5	73.0	68.9	7.3	59.96	535.13	669.61	6.78
1:00	65.1	72.4	72.9	68.8	7.3	59.96	535.13	669.61	6.78
1:30	65.1	72.4	73.0	68.8	7.3	59.96	528.76	669.61	6.70
2:00	65.1	72.4	73.0	68.8	7.3	59.96	528.76	669.61	6.70
2:30	65.2	72.4	73.0	68.8	7.2	59.14	521.51	669.61	6.61
3:00	65.2	72.4	73.0	68.8	7.2	59.14	521.51	669.61	6.61
3:30	65.3	72.5	73.0	68.9	7.2	59.14	534.23	669.61	6.77
4:00	65.3	72.5	73.0	68.9	7.2	59.14	534.23	669.61	6.77
4:30	65.3	72.5	73.0	68.9	7.2	59.14	534.23	669.61	6.77
5:00	65.3	72.5	73.1	68.9	7.2	59.14	527.80	669.61	6.69
5:30	65.3	72.6	73.1	69.0	7.3	59.96	541.65	669.61	6.87
6:00	65.3	72.6	73.0	69.0	7.3	59.96	548.34	669.61	6.95
6:30	65.3	72.6	73.1	69.0	7.3	59.96	535.13	669.61	6.78
7:00	65.3	72.6	73.2	69.0	7.3	59.96	528.76	669.61	6.70
7:30	65.3	72.6	73.2	69.0	7.3	59.96	528.76	669.61	6.70
8:00	65.3	72.7	73.2	69.0	7.4	60.78	536.00	669.61	6.79
8:30	65.4	72.7	73.2	69.1	7.3	59.96	535.13	669.61	6.78
9:00	65.4	72.7	73.2	69.1	7.3	59.96	535.13	669.61	6.78
9:30	65.4	72.7	73.2	69.1	7.3	59.96	535.13	669.61	6.78
10:00	65.4	72.8	73.2	69.1	7.4	60.78	549.07	669.61	6.96

ตารางภาคผนวกที่ 32 (ต่อ) กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.075wt% อัตราการไหล 120 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อทองแดง 65 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	65.4	72.8	73.2	69.1	7.4	60.78	549.07	669.61	6.96
11:00	65.4	72.8	73.2	69.1	7.4	60.78	549.07	669.61	6.96
11:30	65.4	72.8	73.3	69.1	7.4	60.78	542.46	669.61	6.88
12:00	65.4	72.8	73.3	69.1	7.4	60.78	542.46	669.61	6.88
12:30	65.5	72.8	73.3	69.2	7.3	59.96	541.65	669.61	6.87
13:00	65.5	72.8	73.3	69.2	7.3	59.96	535.13	669.61	6.78
13:30	65.5	72.8	73.3	69.2	7.3	59.96	535.13	669.61	6.78
14:00	65.5	72.8	73.3	69.2	7.3	59.96	535.13	669.61	6.78
14:30	65.5	72.8	73.3	69.2	7.3	59.96	535.13	669.61	6.78
15:00	65.5	72.9	73.4	69.2	7.4	60.78	542.46	669.61	6.88
15:30	65.5	72.9	73.4	69.2	7.4	60.78	542.46	669.61	6.88
16:00	65.5	72.9	73.4	69.2	7.4	60.78	542.46	669.61	6.88
16:30	65.5	72.9	73.4	69.2	7.4	60.78	542.46	669.61	6.88
17:00	65.5	72.9	73.4	69.2	7.4	60.78	542.46	669.61	6.88
17:30	65.5	72.9	73.4	69.2	7.4	60.78	542.46	669.61	6.88
18:00	65.5	72.9	73.4	69.2	7.4	60.78	542.46	669.61	6.88
18:30	65.5	72.9	73.4	69.2	7.4	60.78	542.46	669.61	6.88
19:00	65.5	72.9	73.4	69.2	7.4	60.78	542.46	669.61	6.88
19:30	65.4	72.9	73.4	69.2	7.5	61.60	543.24	669.61	6.89
20:00	65.4	72.9	73.4	69.2	7.5	61.60	543.24	669.61	6.89

ตารางภาคผนวกที่ 33 กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.075wt% อัตราการไหล  $170 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าที่ท่อแดง  $35 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	34.6	40.8	42.2	37.7	6.2	73.23	604.07	578.87	8.07
1:00	34.6	40.8	42.2	37.7	6.2	73.23	604.07	578.87	8.07
1:30	34.6	40.7	42.2	37.7	6.1	72.05	594.36	578.87	7.94
2:00	34.6	40.7	42.2	37.7	6.1	72.05	594.36	578.87	7.94
2:30	34.6	40.7	42.2	37.7	6.1	72.05	594.36	578.87	7.94
3:00	34.5	40.7	42.2	37.6	6.2	73.23	597.42	578.87	7.98
3:30	34.5	40.7	42.1	37.6	6.2	73.23	604.07	578.87	8.07
4:00	34.5	40.6	42.1	37.6	6.1	72.05	587.81	578.87	7.86
4:30	34.5	40.6	42.1	37.6	6.1	72.05	587.81	578.87	7.86
5:00	34.5	40.6	42.1	37.6	6.1	72.05	587.81	578.87	7.86
5:30	34.5	40.6	42.2	37.6	6.1	72.05	581.41	578.87	7.77
6:00	34.5	40.6	42.1	37.6	6.1	72.05	587.81	578.87	7.86
6:30	34.5	40.6	42.1	37.6	6.1	72.05	587.81	578.87	7.86
7:00	34.5	40.6	42.1	37.6	6.1	72.05	587.81	578.87	7.86
7:30	34.5	40.6	42.1	37.6	6.1	72.05	587.81	578.87	7.86
8:00	34.5	40.6	42.2	37.6	6.1	72.05	575.14	578.87	7.69
8:30	34.5	40.6	42.2	37.6	6.1	72.05	575.14	578.87	7.69
9:00	34.5	40.6	42.2	37.6	6.1	72.05	575.14	578.87	7.69
9:30	34.5	40.6	42.2	37.6	6.1	72.05	575.14	578.87	7.69
10:00	34.5	40.6	42.2	37.6	6.1	72.05	575.14	578.87	7.69

ตารางภาคผนวกที่ 33 (ต่อ) กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.075wt% อัตราการไหล 170 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อทองแดง 35 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	34.5	40.6	42.2	37.6	6.1	72.05	575.14	578.87	7.69
11:00	34.5	40.6	42.2	37.6	6.1	72.05	575.14	578.87	7.69
11:30	34.5	40.6	42.2	37.6	6.1	72.05	575.14	578.87	7.69
12:00	34.5	40.6	42.2	37.6	6.1	72.05	575.14	578.87	7.69
12:30	34.5	40.6	42.2	37.6	6.1	72.05	575.14	578.87	7.69
13:00	34.6	40.7	42.2	37.7	6.1	72.05	587.81	578.87	7.86
13:30	34.6	40.7	42.2	37.7	6.1	72.05	587.81	578.87	7.86
14:00	34.5	40.7	42.2	37.6	6.2	73.23	590.91	578.87	7.90
14:30	34.6	40.7	42.2	37.7	6.1	72.05	587.81	578.87	7.86
15:00	34.7	40.7	42.2	37.7	6.0	70.88	584.65	578.87	7.81
15:30	34.7	40.7	42.2	37.7	6.0	70.88	584.65	578.87	7.81
16:00	34.7	40.7	42.2	37.7	6.0	70.88	584.65	578.87	7.81
16:30	34.7	40.8	42.2	37.8	6.1	72.05	601.05	578.87	8.03
17:00	34.7	40.8	42.3	37.8	6.1	72.05	594.36	578.87	7.94
17:30	34.7	40.7	42.3	37.7	6.0	70.88	578.21	578.87	7.73
18:00	34.7	40.8	42.3	37.8	6.1	72.05	594.36	578.87	7.94
18:30	34.7	40.8	42.3	37.8	6.1	72.05	594.36	578.87	7.94
19:00	34.7	40.8	42.3	37.8	6.1	72.05	594.36	578.87	7.94
19:30	34.7	40.8	42.3	37.8	6.1	72.05	594.36	578.87	7.94
20:00	34.7	40.8	42.3	37.8	6.1	72.05	587.81	578.87	7.86



ตารางภาคผนวกที่ 34 กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.075wt% อัตราการไหล  $170 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าที่ท่อแดง  $45 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	44.5	50.6	51.9	47.6	6.1	71.56	616.34	696.06	8.07
1:00	44.4	50.5	51.8	47.5	6.1	71.56	616.34	696.06	8.07
1:30	44.3	50.4	51.7	47.4	6.1	71.56	616.34	696.06	8.07
2:00	44.3	50.3	51.6	47.3	6.0	70.38	606.24	696.06	7.94
2:30	44.2	50.3	51.6	47.3	6.1	71.56	609.26	696.06	7.98
3:00	44.2	50.3	51.6	47.3	6.1	71.56	609.26	696.06	7.98
3:30	44.2	50.3	51.6	47.3	6.1	71.56	609.26	696.06	7.98
4:00	44.2	50.3	51.6	47.3	6.1	71.56	616.34	696.06	8.07
4:30	44.2	50.3	51.6	47.3	6.1	71.56	616.34	696.06	8.07
5:00	44.2	50.3	51.6	47.3	6.1	71.56	616.34	696.06	8.07
5:30	44.2	50.3	51.6	47.3	6.1	71.56	616.34	696.06	8.07
6:00	44.2	50.2	51.6	47.2	6.0	70.38	599.27	696.06	7.84
6:30	44.2	50.3	51.6	47.3	6.1	71.56	616.34	696.06	8.07
7:00	44.2	50.3	51.6	47.3	6.1	71.56	616.34	696.06	8.07
7:30	44.2	50.3	51.6	47.3	6.1	71.56	616.34	696.06	8.07
8:00	44.2	50.3	51.5	47.3	6.1	71.56	623.60	696.06	8.16
8:30	44.2	50.3	51.6	47.3	6.1	71.56	616.34	696.06	8.07
9:00	44.2	50.3	51.5	47.3	6.1	71.56	623.60	696.06	8.16
9:30	44.2	50.2	51.6	47.2	6.0	70.38	599.27	696.06	7.84
10:00	44.2	50.2	51.5	47.2	6.0	70.38	606.24	696.06	7.94

ตารางภาคผนวกที่ 34 (ต่อ) กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.075wt% อัตราการไหล 170 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อทองแดง 45 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	44.2	50.3	51.5	47.3	6.1	71.56	623.60	696.06	8.16
11:00	44.2	50.2	51.5	47.2	6.0	70.38	613.37	696.06	8.03
11:30	44.2	50.3	51.5	47.3	6.1	71.56	631.02	696.06	8.26
12:00	44.2	50.3	51.5	47.3	6.1	71.56	631.02	696.06	8.26
12:30	44.2	50.2	51.5	47.2	6.0	70.38	613.37	696.06	8.03
13:00	44.2	50.2	51.5	47.2	6.0	70.38	613.37	696.06	8.03
13:30	44.2	50.2	51.5	47.2	6.0	70.38	613.37	696.06	8.03
14:00	44.2	50.2	51.5	47.2	6.0	70.38	613.37	696.06	8.03
14:30	44.2	50.2	51.5	47.2	6.0	70.38	606.24	696.06	7.94
15:00	44.2	50.2	51.5	47.2	6.0	70.38	606.24	696.06	7.94
15:30	44.2	50.2	51.5	47.2	6.0	70.38	606.24	696.06	7.94
16:00	44.2	50.2	51.5	47.2	6.0	70.38	606.24	696.06	7.94
16:30	44.2	50.2	51.5	47.2	6.0	70.38	606.24	696.06	7.94
17:00	44.2	50.2	51.5	47.2	6.0	70.38	613.37	696.06	8.03
17:30	44.2	50.2	51.5	47.2	6.0	70.38	606.24	696.06	7.94
18:00	44.2	50.2	51.5	47.2	6.0	70.38	613.37	696.06	8.03
18:30	44.2	50.2	51.5	47.2	6.0	70.38	613.37	696.06	8.03
19:00	44.2	50.2	51.5	47.2	6.0	70.38	613.37	696.06	8.03
19:30	44.2	50.2	51.5	47.2	6.0	70.38	613.37	696.06	8.03
20:00	44.2	50.2	51.5	47.2	6.0	70.38	613.37	696.06	8.03

ตารางภาคผนวกที่ 35 กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.075wt% อัตราการไหล  $170 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าที่ท่อแดง  $55 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	55.7	61.5	63.0	58.6	5.8	67.77	577.04	819.67	7.42
1:00	55.6	61.4	62.9	58.5	5.8	67.77	577.04	819.67	7.42
1:30	55.6	61.4	62.8	58.5	5.8	67.77	590.62	819.67	7.60
2:00	55.6	61.4	62.8	58.5	5.8	67.77	590.62	819.67	7.60
2:30	55.6	61.4	62.8	58.5	5.8	67.77	590.62	819.67	7.60
3:00	55.6	61.4	62.8	58.5	5.8	67.77	590.62	819.67	7.60
3:30	55.6	61.4	62.8	58.5	5.8	67.77	590.62	819.67	7.60
4:00	55.5	61.4	62.8	58.5	5.9	68.94	593.82	819.67	7.64
4:30	55.5	61.4	62.8	58.5	5.9	68.94	593.82	819.67	7.64
5:00	55.5	61.4	62.8	58.5	5.9	68.94	593.82	819.67	7.64
5:30	55.5	61.4	62.8	58.5	5.9	68.94	593.82	819.67	7.64
6:00	55.5	61.4	62.8	58.5	5.9	68.94	593.82	819.67	7.64
6:30	55.6	61.4	62.8	58.5	5.8	67.77	590.62	819.67	7.60
7:00	55.5	61.4	62.8	58.5	5.9	68.94	593.82	819.67	7.64
7:30	55.5	61.4	62.8	58.5	5.9	68.94	593.82	819.67	7.64
8:00	55.5	61.4	62.8	58.5	5.9	68.94	593.82	819.67	7.64
8:30	55.5	61.4	62.8	58.5	5.9	68.94	593.82	819.67	7.64
9:00	55.5	61.4	62.8	58.5	5.9	68.94	593.82	819.67	7.64
9:30	55.5	61.4	62.8	58.5	5.9	68.94	593.82	819.67	7.64
10:00	55.5	61.4	62.8	58.5	5.9	68.94	593.82	819.67	7.64

ตารางภาคผนวกที่ 35 (ต่อ) กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.075wt%  
อัตราการไหล 170 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อทองแดง 55 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	55.5	61.4	62.8	58.5	5.9	68.94	593.82	819.67	7.64
11:00	55.5	61.4	62.8	58.5	5.9	68.94	593.82	819.67	7.64
11:30	55.5	61.4	62.8	58.5	5.9	68.94	593.82	819.67	7.64
12:00	55.5	61.4	62.8	58.5	5.9	68.94	593.82	819.67	7.64
12:30	55.5	61.4	62.8	58.5	5.9	68.94	593.82	819.67	7.64
13:00	55.5	61.4	62.8	58.5	5.9	68.94	593.82	819.67	7.64
13:30	55.5	61.4	62.8	58.5	5.9	68.94	593.82	819.67	7.64
14:00	55.5	61.4	62.8	58.5	5.9	68.94	593.82	819.67	7.64
14:30	55.5	61.4	62.8	58.5	5.9	68.94	593.82	819.67	7.64
15:00	55.5	61.4	62.8	58.5	5.9	68.94	593.82	819.67	7.64
15:30	55.5	61.4	62.8	58.5	5.9	68.94	593.82	819.67	7.64
16:00	55.5	61.4	62.8	58.5	5.9	68.94	593.82	819.67	7.64
16:30	55.5	61.4	62.8	58.5	5.9	68.94	593.82	819.67	7.64
17:00	55.5	61.4	62.8	58.5	5.9	68.94	593.82	819.67	7.64
17:30	55.5	61.4	62.8	58.5	5.9	68.94	593.82	819.67	7.64
18:00	55.5	61.4	62.8	58.5	5.9	68.94	593.82	819.67	7.64
18:30	55.5	61.4	62.8	58.5	5.9	68.94	593.82	819.67	7.64
19:00	55.5	61.4	62.8	58.5	5.9	68.94	593.82	819.67	7.64
19:30	55.5	61.4	62.8	58.5	5.9	68.94	593.82	819.67	7.64
20:00	55.5	61.4	62.8	58.5	5.9	68.94	593.82	819.67	7.64

ตารางภาคผนวกที่ 36 กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.075wt% อัตราการไหล  $170 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าที่ท่อแดง  $65 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	64.1	69.9	71.3	67.0	5.8	67.96	590.82	948.61	7.49
1:00	64.0	69.8	71.2	66.9	5.8	67.96	590.82	948.61	7.49
1:30	63.9	69.7	71.1	66.8	5.8	67.96	583.96	948.61	7.40
2:00	63.9	69.7	71.1	66.8	5.8	67.96	583.96	948.61	7.40
2:30	63.9	69.7	71.1	66.8	5.8	67.96	583.96	948.61	7.40
3:00	63.9	69.7	71.1	66.8	5.8	67.96	583.96	948.61	7.40
3:30	63.9	69.7	71.1	66.8	5.8	67.96	583.96	948.61	7.40
4:00	63.9	69.7	71.1	66.8	5.8	67.96	583.96	948.61	7.40
4:30	63.9	69.7	71.1	66.8	5.8	67.96	583.96	948.61	7.40
5:00	63.9	69.7	71.2	66.8	5.8	67.96	577.27	948.61	7.32
5:30	63.9	69.7	71.2	66.8	5.8	67.96	577.27	948.61	7.32
6:00	63.9	69.7	71.2	66.8	5.8	67.96	577.27	948.61	7.32
6:30	63.9	69.7	71.2	66.8	5.8	67.96	570.72	948.61	7.23
7:00	63.9	69.8	71.2	66.9	5.9	69.12	587.15	948.61	7.44
7:30	63.9	69.8	71.3	66.9	5.9	69.12	580.49	948.61	7.36
8:00	64.0	69.8	71.3	66.9	5.8	67.96	577.27	948.61	7.32
8:30	64.0	69.8	71.3	66.9	5.8	67.96	577.27	948.61	7.32
9:00	64.0	69.8	71.3	66.9	5.8	67.96	577.27	948.61	7.32
9:30	64.0	69.8	71.3	66.9	5.8	67.96	577.27	948.61	7.32
10:00	64.0	69.9	71.3	67.0	5.9	69.12	593.96	948.61	7.53

ตารางภาคผนวกที่ 36 (ต่อ) กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.075wt% อัตราการไหล 170 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อทองแดง 65 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	64.0	69.9	71.3	67.0	5.9	69.12	593.96	948.61	7.53
11:00	64.1	69.9	71.3	67.0	5.8	67.96	590.82	948.61	7.49
11:30	64.1	69.9	71.3	67.0	5.8	67.96	583.96	948.61	7.40
12:00	64.1	69.9	71.3	67.0	5.8	67.96	583.96	948.61	7.40
12:30	64.1	69.9	71.4	67.0	5.8	67.96	577.27	948.61	7.32
13:00	64.2	69.9	71.4	67.1	5.7	66.79	573.96	948.61	7.28
13:30	64.3	69.9	71.4	67.1	5.6	65.63	563.96	948.61	7.15
14:00	64.3	70.0	71.4	67.2	5.7	66.79	580.70	948.61	7.36
14:30	64.3	70.0	71.4	67.2	5.7	66.79	580.70	948.61	7.36
15:00	64.3	70.1	71.5	67.2	5.8	67.96	590.82	948.61	7.49
15:30	64.4	70.1	71.5	67.3	5.7	66.79	580.70	948.61	7.36
16:00	64.4	70.1	71.6	67.3	5.7	66.79	573.96	948.61	7.28
16:30	64.5	70.1	71.6	67.3	5.6	65.63	570.58	948.61	7.23
17:00	64.5	70.1	71.6	67.3	5.6	65.63	563.96	948.61	7.15
17:30	64.5	70.2	71.6	67.4	5.7	66.79	580.70	948.61	7.36
18:00	64.5	70.2	71.6	67.4	5.7	66.79	580.70	948.61	7.36
18:30	64.6	70.2	71.7	67.4	5.6	65.63	570.58	948.61	7.23
19:00	64.6	70.2	71.7	67.4	5.6	65.63	563.96	948.61	7.15
19:30	64.6	70.2	71.8	67.4	5.6	65.63	557.50	948.61	7.07
20:00	64.6	70.3	71.8	67.5	5.7	66.79	573.96	948.61	7.28



ตารางภาคผนวกที่ 37 กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.075wt% อัตราการไหล  $220 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าที่ห้องแดง  $35 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	34.5	39.4	41.3	36.9	4.9	74.35	631.61	749.13	8.44
1:00	34.5	39.4	41.4	36.9	4.9	74.35	624.45	749.13	8.35
1:30	34.5	39.4	41.3	36.9	4.9	74.35	631.61	749.13	8.44
2:00	34.5	39.4	41.4	36.9	4.9	74.35	624.45	749.13	8.35
2:30	34.5	39.4	41.4	36.9	4.9	74.35	624.45	749.13	8.35
3:00	34.6	39.5	41.4	37.0	4.9	74.35	638.94	749.13	8.54
3:30	34.6	39.4	41.4	37.0	4.8	72.83	618.67	749.13	8.27
4:00	34.6	39.5	41.4	37.0	4.9	74.35	638.94	749.13	8.54
4:30	34.6	39.5	41.4	37.0	4.9	74.35	631.61	749.13	8.44
5:00	34.6	39.5	41.5	37.0	4.9	74.35	624.45	749.13	8.35
5:30	34.6	39.5	41.5	37.0	4.9	74.35	624.45	749.13	8.35
6:00	34.6	39.5	41.5	37.0	4.9	74.35	624.45	749.13	8.35
6:30	34.6	39.5	41.5	37.0	4.9	74.35	624.45	749.13	8.35
7:00	34.6	39.5	41.5	37.0	4.9	74.35	624.45	749.13	8.35
7:30	34.6	39.5	41.5	37.0	4.9	74.35	624.45	749.13	8.35
8:00	34.6	39.5	41.5	37.0	4.9	74.35	617.45	749.13	8.25
8:30	34.7	39.5	41.5	37.1	4.8	72.83	611.66	749.13	8.18
9:00	34.7	39.5	41.5	37.1	4.8	72.83	611.66	749.13	8.18
9:30	34.7	39.6	41.5	37.1	4.9	74.35	631.61	749.13	8.44
10:00	34.7	39.6	41.6	37.1	4.9	74.35	624.45	749.13	8.35

ตารางภาคผนวกที่ 37 (ต่อ) กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.075wt% อัตราการไหล 220 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อทองแดง 35 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	34.7	39.6	41.6	37.1	4.9	74.35	624.45	749.13	8.35
11:00	34.7	39.6	41.6	37.1	4.9	74.35	624.45	749.13	8.35
11:30	34.8	39.6	41.6	37.2	4.8	72.83	611.66	749.13	8.18
12:00	34.8	39.6	41.6	37.2	4.8	72.83	611.66	749.13	8.18
12:30	34.8	39.6	41.6	37.2	4.8	72.83	611.66	749.13	8.18
13:00	34.8	39.6	41.6	37.2	4.8	72.83	611.66	749.13	8.18
13:30	34.8	39.6	41.6	37.2	4.8	72.83	611.66	749.13	8.18
14:00	34.8	39.7	41.6	37.2	4.9	74.35	631.61	749.13	8.44
14:30	34.8	39.7	41.6	37.2	4.9	74.35	631.61	749.13	8.44
15:00	34.8	39.7	41.6	37.2	4.9	74.35	631.61	749.13	8.44
15:30	34.8	39.7	41.7	37.2	4.9	74.35	624.45	749.13	8.35
16:00	34.8	39.7	41.7	37.2	4.9	74.35	624.45	749.13	8.35
16:30	34.9	39.8	41.7	37.3	4.9	74.35	638.94	749.13	8.54
17:00	34.9	39.8	41.7	37.3	4.9	74.35	638.94	749.13	8.54
17:30	34.9	39.7	41.7	37.3	4.8	72.83	611.66	749.13	8.18
18:00	34.9	39.8	41.7	37.3	4.9	74.35	631.61	749.13	8.44
18:30	34.9	39.8	41.8	37.3	4.9	74.35	624.45	749.13	8.35
19:00	34.9	39.8	41.8	37.3	4.9	74.35	624.45	749.13	8.35
19:30	34.9	39.8	41.8	37.3	4.9	74.35	624.45	749.13	8.35
20:00	34.9	39.8	41.8	37.3	4.9	74.35	624.45	749.13	8.35

ตารางภาคผนวกที่ 38 กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.075wt% อัตราการไหล  $220 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าที่ท่อแดง  $45 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	44.4	49.1	51.0	46.8	4.7	71.35	629.19	900.78	8.24
1:00	44.2	49.0	50.9	46.6	4.8	72.87	627.64	900.78	8.22
1:30	44.2	48.9	50.8	46.6	4.7	71.35	621.79	900.78	8.14
2:00	44.2	48.9	50.8	46.6	4.7	71.35	621.79	900.78	8.14
2:30	44.2	49.0	50.8	46.6	4.8	72.87	642.58	900.78	8.41
3:00	44.2	49.0	50.8	46.6	4.8	72.87	642.58	900.78	8.41
3:30	44.3	49.0	50.8	46.7	4.7	71.35	636.77	900.78	8.34
4:00	44.2	49.0	50.8	46.6	4.8	72.87	642.58	900.78	8.41
4:30	44.3	49.0	50.8	46.7	4.7	71.35	636.77	900.78	8.34
5:00	44.3	49.0	50.9	46.7	4.7	71.35	629.19	900.78	8.24
5:30	44.3	49.0	50.9	46.7	4.7	71.35	629.19	900.78	8.24
6:00	44.3	49.0	50.9	46.7	4.7	71.35	621.79	900.78	8.14
6:30	44.3	49.0	50.9	46.7	4.7	71.35	621.79	900.78	8.14
7:00	44.3	49.0	50.9	46.7	4.7	71.35	621.79	900.78	8.14
7:30	44.3	49.0	50.9	46.7	4.7	71.35	621.79	900.78	8.14
8:00	44.3	49.0	50.9	46.7	4.7	71.35	621.79	900.78	8.14
8:30	44.3	49.0	50.9	46.7	4.7	71.35	621.79	900.78	8.14
9:00	44.3	49.0	50.9	46.7	4.7	71.35	621.79	900.78	8.14
9:30	44.3	49.0	50.9	46.7	4.7	71.35	621.79	900.78	8.14
10:00	44.3	49.0	50.9	46.7	4.7	71.35	621.79	900.78	8.14

ตารางภาคผนวกที่ 38 (ต่อ) กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.075wt% อัตราการไหล 220 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อทองแดง 45 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	44.3	49.0	51.0	46.7	4.7	71.35	614.56	900.78	8.04
11:00	44.3	49.0	51.0	46.7	4.7	71.35	614.56	900.78	8.04
11:30	44.3	49.1	51.0	46.7	4.8	72.87	635.02	900.78	8.31
12:00	44.3	49.1	51.0	46.7	4.8	72.87	635.02	900.78	8.31
12:30	44.3	49.1	51.0	46.7	4.8	72.87	635.02	900.78	8.31
13:00	44.3	49.1	51.0	46.7	4.8	72.87	635.02	900.78	8.31
13:30	44.3	49.1	51.0	46.7	4.8	72.87	627.64	900.78	8.22
14:00	44.4	49.1	51.0	46.8	4.7	71.35	629.19	900.78	8.24
14:30	44.4	49.1	51.0	46.8	4.7	71.35	629.19	900.78	8.24
15:00	44.4	49.1	51.0	46.8	4.7	71.35	629.19	900.78	8.24
15:30	44.4	49.1	51.0	46.8	4.7	71.35	621.79	900.78	8.14
16:00	44.4	49.1	51.0	46.8	4.7	71.35	621.79	900.78	8.14
16:30	44.4	49.2	51.0	46.8	4.8	72.87	642.58	900.78	8.41
17:00	44.4	49.2	51.0	46.8	4.8	72.87	642.58	900.78	8.41
17:30	44.4	49.2	51.0	46.8	4.8	72.87	642.58	900.78	8.41
18:00	44.4	49.2	51.0	46.8	4.8	72.87	642.58	900.78	8.41
18:30	44.4	49.2	51.0	46.8	4.8	72.87	642.58	900.78	8.41
19:00	44.4	49.2	51.0	46.8	4.8	72.87	642.58	900.78	8.41
19:30	44.4	49.2	51.0	46.8	4.8	72.87	642.58	900.78	8.41
20:00	44.4	49.2	51.1	46.8	4.8	72.87	635.02	900.78	8.31

ตารางภาคผนวกที่ 39 กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.075wt% อัตราการไหล  $220 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าที่ท่อทองแดง  $55 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	55.4	60.1	61.8	57.8	4.7	71.07	658.08	1060.75	8.75
1:00	55.4	60.1	61.8	57.8	4.7	71.07	658.08	1060.75	8.75
1:30	55.4	60.1	61.7	57.8	4.7	71.07	666.41	1060.75	8.86
2:00	55.4	60.1	61.7	57.8	4.7	71.07	666.41	1060.75	8.86
2:30	55.4	60.1	61.7	57.8	4.7	71.07	666.41	1060.75	8.86
3:00	55.4	60.1	61.7	57.8	4.7	71.07	666.41	1060.75	8.86
3:30	55.4	60.1	61.7	57.8	4.7	71.07	666.41	1060.75	8.86
4:00	55.4	60.1	61.7	57.8	4.7	71.07	666.41	1060.75	8.86
4:30	55.4	60.1	61.7	57.8	4.7	71.07	666.41	1060.75	8.86
5:00	55.4	60.1	61.7	57.8	4.7	71.07	666.41	1060.75	8.86
5:30	55.4	60.1	61.7	57.8	4.7	71.07	666.41	1060.75	8.86
6:00	55.4	60.1	61.7	57.8	4.7	71.07	666.41	1060.75	8.86
6:30	55.4	60.1	61.7	57.8	4.7	71.07	666.41	1060.75	8.86
7:00	55.4	60.1	61.7	57.8	4.7	71.07	666.41	1060.75	8.86
7:30	55.4	60.1	61.8	57.8	4.7	71.07	658.08	1060.75	8.75
8:00	55.4	60.1	61.8	57.8	4.7	71.07	658.08	1060.75	8.75
8:30	55.4	60.1	61.8	57.8	4.7	71.07	658.08	1060.75	8.75
9:00	55.4	60.1	61.8	57.8	4.7	71.07	658.08	1060.75	8.75
9:30	55.4	60.1	61.8	57.8	4.7	71.07	658.08	1060.75	8.75
10:00	55.4	60.1	61.8	57.8	4.7	71.07	658.08	1060.75	8.75

ตารางภาคผนวกที่ 39 (ต่อ) กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.075wt% อัตราการไหล 220 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อทองแดง 55 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	55.4	60.1	61.8	57.8	4.7	71.07	658.08	1060.75	8.75
11:00	55.4	60.1	61.7	57.8	4.7	71.07	666.41	1060.75	8.86
11:30	55.3	60.0	61.8	57.7	4.7	71.07	642.03	1060.75	8.54
12:00	55.3	60.0	61.8	57.7	4.7	71.07	642.03	1060.75	8.54
12:30	55.3	60.0	61.8	57.7	4.7	71.07	642.03	1060.75	8.54
13:00	55.3	60.0	61.8	57.7	4.7	71.07	642.03	1060.75	8.54
13:30	55.3	60.0	61.7	57.7	4.7	71.07	649.96	1060.75	8.64
14:00	55.3	60.0	61.7	57.7	4.7	71.07	649.96	1060.75	8.64
14:30	55.3	60.0	61.7	57.7	4.7	71.07	649.96	1060.75	8.64
15:00	55.3	60.0	61.7	57.7	4.7	71.07	649.96	1060.75	8.64
15:30	55.3	60.0	61.7	57.7	4.7	71.07	649.96	1060.75	8.64
16:00	55.3	60.0	61.7	57.7	4.7	71.07	649.96	1060.75	8.64
16:30	55.3	60.0	61.7	57.7	4.7	71.07	649.96	1060.75	8.64
17:00	55.3	60.0	61.7	57.7	4.7	71.07	649.96	1060.75	8.64
17:30	55.3	60.0	61.7	57.7	4.7	71.07	649.96	1060.75	8.64
18:00	55.3	60.0	61.7	57.7	4.7	71.07	649.96	1060.75	8.64
18:30	55.3	60.0	61.7	57.7	4.7	71.07	649.96	1060.75	8.64
19:00	55.3	60.0	61.7	57.7	4.7	71.07	649.96	1060.75	8.64
19:30	55.3	60.0	61.7	57.7	4.7	71.07	649.96	1060.75	8.64
20:00	55.3	60.0	61.7	57.7	4.7	71.07	649.96	1060.75	8.64



ตารางภาคผนวกที่ 40 กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.075wt% อัตราการไหล  $220 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าที่ท่อแดง  $65 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	65.2	69.7	71.4	67.5	4.5	67.76	643.53	1227.62	8.16
1:00	65.1	69.6	71.3	67.4	4.5	67.76	635.39	1227.62	8.05
1:30	65.0	69.5	71.3	67.3	4.5	67.76	627.45	1227.62	7.95
2:00	65.0	69.5	71.2	67.3	4.5	67.76	635.39	1227.62	8.05
2:30	65.0	69.5	71.3	67.3	4.5	67.76	627.45	1227.62	7.95
3:00	65.0	69.5	71.3	67.3	4.5	67.76	627.45	1227.62	7.95
3:30	65.0	69.5	71.2	67.3	4.5	67.76	635.39	1227.62	8.05
4:00	65.0	69.5	71.2	67.3	4.5	67.76	635.39	1227.62	8.05
4:30	65.0	69.5	71.2	67.3	4.5	67.76	643.53	1227.62	8.16
5:00	64.9	69.5	71.2	67.2	4.6	69.27	649.51	1227.62	8.23
5:30	64.9	69.5	71.1	67.2	4.6	69.27	657.83	1227.62	8.34
6:00	64.9	69.5	71.2	67.2	4.6	69.27	649.51	1227.62	8.23
6:30	64.9	69.5	71.1	67.2	4.6	69.27	657.83	1227.62	8.34
7:00	64.9	69.4	71.1	67.2	4.5	67.76	643.53	1227.62	8.16
7:30	64.9	69.4	71.1	67.2	4.5	67.76	643.53	1227.62	8.16
8:00	64.9	69.4	71.1	67.2	4.5	67.76	643.53	1227.62	8.16
8:30	64.9	69.4	71.1	67.2	4.5	67.76	643.53	1227.62	8.16
9:00	64.8	69.4	71.0	67.1	4.6	69.27	657.83	1227.62	8.34
9:30	64.8	69.4	71.0	67.1	4.6	69.27	657.83	1227.62	8.34
10:00	64.8	69.4	71.0	67.1	4.6	69.27	657.83	1227.62	8.34

ตารางภาคผนวกที่ 40 (ต่อ) กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.075wt% อัตราการไหล 220 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อทองแดง 65 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	64.8	69.4	71.0	67.1	4.6	69.27	657.83	1227.62	8.34
11:00	64.8	69.4	71.0	67.1	4.6	69.27	657.83	1227.62	8.34
11:30	64.8	69.4	71.0	67.1	4.6	69.27	657.83	1227.62	8.34
12:00	64.8	69.4	71.0	67.1	4.6	69.27	657.83	1227.62	8.34
12:30	64.8	69.3	71.0	67.1	4.5	67.76	643.53	1227.62	8.16
13:00	64.8	69.3	71.0	67.1	4.5	67.76	643.53	1227.62	8.16
13:30	64.8	69.3	71.0	67.1	4.5	67.76	643.53	1227.62	8.16
14:00	64.8	69.3	71.0	67.1	4.5	67.76	643.53	1227.62	8.16
14:30	64.8	69.3	71.0	67.1	4.5	67.76	643.53	1227.62	8.16
15:00	64.7	69.3	71.0	67.0	4.6	69.27	649.51	1227.62	8.23
15:30	64.7	69.3	71.0	67.0	4.6	69.27	649.51	1227.62	8.23
16:00	64.7	69.3	70.9	67.0	4.6	69.27	666.38	1227.62	8.45
16:30	64.7	69.3	70.9	67.0	4.6	69.27	666.38	1227.62	8.45
17:00	64.7	69.3	70.9	67.0	4.6	69.27	666.38	1227.62	8.45
17:30	64.7	69.3	70.9	67.0	4.6	69.27	666.38	1227.62	8.45
18:00	64.7	69.3	70.9	67.0	4.6	69.27	666.38	1227.62	8.45
18:30	64.7	69.3	70.9	67.0	4.6	69.27	666.38	1227.62	8.45
19:00	64.6	69.2	70.9	66.9	4.6	69.27	649.51	1227.62	8.23
19:30	64.6	69.2	70.9	66.9	4.6	69.27	649.51	1227.62	8.23
20:00	64.6	69.2	70.9	66.9	4.6	69.27	649.51	1227.62	8.23

ตารางภาคผนวกที่ 41 กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.100wt% อัตราการไหล  $120 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าที่ท่อแดง  $35 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	35.2	43.3	43.4	39.3	8.1	67.32	608.15	408.39	8.04
1:00	35.1	43.3	43.4	39.2	8.2	68.15	601.00	408.39	7.94
1:30	35.2	43.4	43.4	39.3	8.2	68.15	615.66	408.39	8.14
2:00	35.2	43.4	43.4	39.3	8.2	68.15	615.66	408.39	8.14
2:30	35.2	43.4	43.4	39.3	8.2	68.15	615.66	408.39	8.14
3:00	35.2	43.4	43.5	39.3	8.2	68.15	601.00	408.39	7.94
3:30	35.2	43.4	43.4	39.3	8.2	68.15	615.66	408.39	8.14
4:00	35.2	43.4	43.4	39.3	8.2	68.15	615.66	408.39	8.14
4:30	35.2	43.4	43.4	39.3	8.2	68.15	615.66	408.39	8.14
5:00	35.2	43.4	43.5	39.3	8.2	68.15	601.00	408.39	7.94
5:30	35.2	43.4	43.2	39.3	8.2	68.15	647.23	408.39	8.55
6:00	35.2	43.4	43.2	39.3	8.2	68.15	647.23	408.39	8.55
6:30	35.2	43.4	43.2	39.3	8.2	68.15	647.23	408.39	8.55
7:00	35.2	43.4	43.2	39.3	8.2	68.15	647.23	408.39	8.55
7:30	35.2	43.4	43.2	39.3	8.2	68.15	647.23	408.39	8.55
8:00	35.2	43.4	43.2	39.3	8.2	68.15	647.23	408.39	8.55
8:30	35.2	43.4	43.3	39.3	8.2	68.15	639.04	408.39	8.45
9:00	35.2	43.4	43.3	39.3	8.2	68.15	639.04	408.39	8.45
9:30	35.2	43.4	43.3	39.3	8.2	68.15	639.04	408.39	8.45
10:00	35.2	43.4	43.3	39.3	8.2	68.15	631.05	408.39	8.34

ตารางภาคผนวกที่ 41 (ต่อ) กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.100wt% อัตราการไหล 120 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อทองแดง 35 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	35.2	43.4	43.3	39.3	8.2	68.15	631.05	408.39	8.34
11:00	35.2	43.4	43.4	39.3	8.2	68.15	623.26	408.39	8.24
11:30	35.2	43.4	43.4	39.3	8.2	68.15	623.26	408.39	8.24
12:00	35.2	43.4	43.4	39.3	8.2	68.15	615.66	408.39	8.14
12:30	35.2	43.4	43.4	39.3	8.2	68.15	615.66	408.39	8.14
13:00	35.2	43.4	43.4	39.3	8.2	68.15	623.26	408.39	8.24
13:30	35.1	43.4	43.4	39.3	8.3	68.98	623.17	408.39	8.24
14:00	35.1	43.4	43.4	39.3	8.3	68.98	615.66	408.39	8.14
14:30	35.1	43.3	43.4	39.2	8.2	68.15	601.00	408.39	7.94
15:00	35.1	43.3	43.4	39.2	8.2	68.15	601.00	408.39	7.94
15:30	35.1	43.3	43.4	39.2	8.2	68.15	601.00	408.39	7.94
16:00	35.1	43.3	43.5	39.2	8.2	68.15	587.02	408.39	7.76
16:30	35.1	43.3	43.4	39.2	8.2	68.15	601.00	408.39	7.94
17:00	35.1	43.3	43.4	39.2	8.2	68.15	601.00	408.39	7.94
17:30	35.1	43.3	43.4	39.2	8.2	68.15	601.00	408.39	7.94
18:00	35.1	43.3	43.5	39.2	8.2	68.15	587.02	408.39	7.76
18:30	35.1	43.3	43.5	39.2	8.2	68.15	587.02	408.39	7.76
19:00	35.1	43.3	43.5	39.2	8.2	68.15	587.02	408.39	7.76
19:30	35.1	43.3	43.5	39.2	8.2	68.15	587.02	408.39	7.76
20:00	35.1	43.3	43.5	39.2	8.2	68.15	587.02	408.39	7.76

ตารางภาคผนวกที่ 42 กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.100wt% อัตราการไหล  $120 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าที่ท่อแดง  $45 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	618.06	491.07	8.00
1:00	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	610.37	491.07	7.90
1:30	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	610.37	491.07	7.90
2:00	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	610.37	491.07	7.90
2:30	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	610.37	491.07	7.90
3:00	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	610.37	491.07	7.90
3:30	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	610.37	491.07	7.90
4:00	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	610.37	491.07	7.90
4:30	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	610.37	491.07	7.90
5:00	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	610.37	491.07	7.90
5:30	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	610.37	491.07	7.90
6:00	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	610.37	491.07	7.90
6:30	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	610.37	491.07	7.90
7:00	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	610.37	491.07	7.90
7:30	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	610.37	491.07	7.90
8:00	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	610.37	491.07	7.90
8:30	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	610.37	491.07	7.90
9:00	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	610.37	491.07	7.90
9:30	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	610.37	491.07	7.90
10:00	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	610.37	491.07	7.90

ตารางภาคผนวกที่ 42 (ต่อ) กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.100wt% อัตราการไหล 120 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อทองแดง 45 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	610.37	491.07	7.90
11:00	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	618.06	491.07	8.00
11:30	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	618.06	491.07	8.00
12:00	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	610.37	491.07	7.90
12:30	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	610.37	491.07	7.90
13:00	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	610.37	491.07	7.90
13:30	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	618.06	491.07	8.00
14:00	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	610.37	491.07	7.90
14:30	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	610.37	491.07	7.90
15:00	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	610.37	491.07	7.90
15:30	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	610.37	491.07	7.90
16:00	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	610.37	491.07	7.90
16:30	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	610.37	491.07	7.90
17:00	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	610.37	491.07	7.90
17:30	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	610.37	491.07	7.90
18:00	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	610.37	491.07	7.90
18:30	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	610.37	491.07	7.90
19:00	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	610.37	491.07	7.90
19:30	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	610.37	491.07	7.90
20:00	45.2	53.2	53.2	49.2	8.0	66.25	610.37	491.07	7.90



ตารางภาคผนวกที่ 43 กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.100wt% อัตราการไหล  $120 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าที่ท่อแดง  $55 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	55.3	63.0	63.0	59.2	7.7	63.52	612.62	578.28	7.79
1:00	55.2	62.9	62.9	59.1	7.7	63.52	612.62	578.28	7.79
1:30	55.2	62.8	62.9	59.0	7.6	62.69	596.90	578.28	7.59
2:00	55.2	62.8	62.9	59.0	7.6	62.69	596.90	578.28	7.59
2:30	55.2	62.9	62.9	59.1	7.7	63.52	612.62	578.28	7.79
3:00	55.2	62.9	63.0	59.1	7.7	63.52	597.08	578.28	7.59
3:30	55.2	62.9	63.0	59.1	7.7	63.52	597.08	578.28	7.59
4:00	55.3	62.9	63.0	59.1	7.6	62.69	589.32	578.28	7.50
4:30	55.3	62.9	63.0	59.1	7.6	62.69	589.32	578.28	7.50
5:00	55.3	63.0	63.0	59.2	7.7	63.52	604.75	578.28	7.69
5:30	55.3	63.0	63.0	59.2	7.7	63.52	604.75	578.28	7.69
6:00	55.3	63.1	63.1	59.2	7.8	64.34	612.60	578.28	7.79
6:30	55.3	63.0	63.1	59.2	7.7	63.52	597.08	578.28	7.59
7:00	55.3	63.1	63.1	59.2	7.8	64.34	612.60	578.28	7.79
7:30	55.3	63.1	63.1	59.2	7.8	64.34	604.83	578.28	7.69
8:00	55.3	63.1	63.2	59.2	7.8	64.34	597.25	578.28	7.60
8:30	55.3	63.1	63.2	59.2	7.8	64.34	597.25	578.28	7.60
9:00	55.3	63.1	63.1	59.2	7.8	64.34	604.83	578.28	7.69
9:30	55.3	63.1	63.2	59.2	7.8	64.34	597.25	578.28	7.60
10:00	55.3	63.1	63.2	59.2	7.8	64.34	597.25	578.28	7.60

ตารางภาคผนวกที่ 43 (ต่อ) กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.100wt% อัตราการไหล 120 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อทองแดง 55 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	55.3	63.1	63.2	59.2	7.8	64.34	597.25	578.28	7.60
11:00	55.3	63.1	63.1	59.2	7.8	64.34	604.83	578.28	7.69
11:30	55.3	63.1	63.2	59.2	7.8	64.34	597.25	578.28	7.60
12:00	55.4	63.1	63.1	59.3	7.7	63.52	604.75	578.28	7.69
12:30	55.4	63.1	63.2	59.3	7.7	63.52	597.08	578.28	7.59
13:00	55.4	63.1	63.2	59.3	7.7	63.52	597.08	578.28	7.59
13:30	55.4	63.1	63.2	59.3	7.7	63.52	597.08	578.28	7.59
14:00	55.4	63.1	63.2	59.3	7.7	63.52	597.08	578.28	7.59
14:30	55.4	63.1	63.2	59.3	7.7	63.52	597.08	578.28	7.59
15:00	55.4	63.2	63.2	59.3	7.8	64.34	612.60	578.28	7.79
15:30	55.4	63.2	63.2	59.3	7.8	64.34	612.60	578.28	7.79
16:00	55.4	63.2	63.2	59.3	7.8	64.34	612.60	578.28	7.79
16:30	55.4	63.2	63.2	59.3	7.8	64.34	612.60	578.28	7.79
17:00	55.4	63.2	63.2	59.3	7.8	64.34	604.83	578.28	7.69
17:30	55.4	63.2	63.2	59.3	7.8	64.34	604.83	578.28	7.69
18:00	55.4	63.3	63.2	59.4	7.9	65.17	620.46	578.28	7.89
18:30	55.4	63.3	63.2	59.4	7.9	65.17	620.46	578.28	7.89
19:00	55.4	63.3	63.2	59.4	7.9	65.17	620.46	578.28	7.89
19:30	55.4	63.3	63.3	59.4	7.9	65.17	612.58	578.28	7.79
20:00	55.4	63.3	63.3	59.4	7.9	65.17	612.58	578.28	7.79

ตารางภาคผนวกที่ 44 กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.100wt% อัตราการไหล  $120 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าที่ท่อแดง  $65 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	64.6	72.1	72.5	68.3	7.5	61.44	552.36	669.25	6.92
1:00	64.6	72.0	72.4	68.3	7.4	60.62	551.67	669.25	6.91
1:30	64.6	72.1	72.4	68.3	7.5	61.44	566.10	669.25	7.10
2:00	64.6	72.1	72.4	68.3	7.5	61.44	559.15	669.25	7.01
2:30	64.7	72.1	72.4	68.4	7.4	60.62	558.53	669.25	7.00
3:00	64.7	72.2	72.5	68.4	7.5	61.44	566.10	669.25	7.10
3:30	64.7	72.2	72.5	68.4	7.5	61.44	559.15	669.25	7.01
4:00	64.7	72.2	72.5	68.4	7.5	61.44	559.15	669.25	7.01
4:30	64.7	72.2	72.5	68.4	7.5	61.44	559.15	669.25	7.01
5:00	64.7	72.2	72.6	68.4	7.5	61.44	545.74	669.25	6.84
5:30	64.7	72.2	72.7	68.4	7.5	61.44	539.27	669.25	6.76
6:00	64.8	72.3	72.7	68.5	7.5	61.44	552.36	669.25	6.92
6:30	64.8	72.3	72.7	68.5	7.5	61.44	545.74	669.25	6.84
7:00	64.8	72.3	72.7	68.5	7.5	61.44	545.74	669.25	6.84
7:30	64.8	72.3	72.7	68.5	7.5	61.44	545.74	669.25	6.84
8:00	64.8	72.4	72.7	68.6	7.6	62.27	559.74	669.25	7.02
8:30	64.8	72.4	72.8	68.6	7.6	62.27	553.03	669.25	6.93
9:00	64.8	72.4	72.8	68.6	7.6	62.27	553.03	669.25	6.93
9:30	64.9	72.4	72.8	68.6	7.5	61.44	545.74	669.25	6.84
10:00	64.9	72.5	72.8	68.7	7.6	62.27	559.74	669.25	7.02

ตารางภาคผนวกที่ 44 (ต่อ) กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.100wt% อัตราการไหล 120 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อทองแดง 65 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	64.9	72.5	72.9	68.7	7.6	62.27	553.03	669.25	6.93
11:00	64.9	72.5	72.9	68.7	7.6	62.27	553.03	669.25	6.93
11:30	64.9	72.5	72.9	68.7	7.6	62.27	553.03	669.25	6.93
12:00	64.9	72.5	72.9	68.7	7.6	62.27	553.03	669.25	6.93
12:30	65.0	72.6	72.9	68.8	7.6	62.27	566.62	669.25	7.10
13:00	65.0	72.5	72.9	68.7	7.5	61.44	552.36	669.25	6.92
13:30	65.0	72.5	72.9	68.7	7.5	61.44	552.36	669.25	6.92
14:00	65.0	72.6	72.9	68.8	7.6	62.27	566.62	669.25	7.10
14:30	65.0	72.5	72.9	68.7	7.5	61.44	552.36	669.25	6.92
15:00	65.0	72.5	72.9	68.7	7.5	61.44	552.36	669.25	6.92
15:30	65.0	72.6	72.9	68.8	7.6	62.27	566.62	669.25	7.10
16:00	65.0	72.6	72.9	68.8	7.6	62.27	566.62	669.25	7.10
16:30	65.0	72.6	72.9	68.8	7.6	62.27	559.74	669.25	7.02
17:00	65.0	72.6	72.9	68.8	7.6	62.27	559.74	669.25	7.02
17:30	65.0	72.6	72.9	68.8	7.6	62.27	559.74	669.25	7.02
18:00	65.0	72.6	73.0	68.8	7.6	62.27	553.03	669.25	6.93
18:30	65.0	72.6	73.0	68.8	7.6	62.27	553.03	669.25	6.93
19:00	65.0	72.7	73.0	68.8	7.7	63.09	567.13	669.25	7.11
19:30	65.0	72.7	73.0	68.8	7.7	63.09	567.13	669.25	7.11
20:00	65.0	72.7	73.0	68.8	7.7	63.09	567.13	669.25	7.11

ตารางภาคผนวกที่ 45 กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.100wt% อัตราการไหล  $170 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าที่ท่อแดง  $35 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	35.2	41.6	42.7	38.4	6.4	75.36	649.07	578.56	8.58
1:00	35.1	41.5	42.7	38.3	6.4	75.36	634.32	578.56	8.38
1:30	35.1	41.5	42.7	38.3	6.4	75.36	634.32	578.56	8.38
2:00	35.1	41.5	42.6	38.3	6.4	75.36	641.61	578.56	8.48
2:30	35.1	41.5	42.6	38.3	6.4	75.36	641.61	578.56	8.48
3:00	35.1	41.5	42.6	38.3	6.4	75.36	641.61	578.56	8.48
3:30	35.1	41.5	42.6	38.3	6.4	75.36	641.61	578.56	8.48
4:00	35.1	41.5	42.6	38.3	6.4	75.36	641.61	578.56	8.48
4:30	35.1	41.5	42.6	38.3	6.4	75.36	641.61	578.56	8.48
5:00	35.0	41.5	42.6	38.2	6.5	76.53	644.23	578.56	8.51
5:30	35.0	41.5	42.6	38.2	6.5	76.53	644.23	578.56	8.51
6:00	35.0	41.5	42.6	38.2	6.5	76.53	644.23	578.56	8.51
6:30	35.0	41.5	42.6	38.2	6.5	76.53	644.23	578.56	8.51
7:00	35.0	41.5	42.6	38.2	6.5	76.53	644.23	578.56	8.51
7:30	35.0	41.5	42.6	38.2	6.5	76.53	644.23	578.56	8.51
8:00	35.1	41.5	42.6	38.3	6.4	75.36	641.61	578.56	8.48
8:30	35.1	41.5	42.6	38.3	6.4	75.36	641.61	578.56	8.48
9:00	35.0	41.5	42.6	38.2	6.5	76.53	651.63	578.56	8.61
9:30	35.0	41.5	42.6	38.2	6.5	76.53	651.63	578.56	8.61
10:00	35.0	41.5	42.6	38.2	6.5	76.53	651.63	578.56	8.61

ตารางภาคผนวกที่ 45 (ต่อ) กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.100wt% อัตราการไหล  $170 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าท่อทองแดง  $35 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
10:30	35.0	41.4	42.6	38.2	6.4	75.36	634.32	578.56	8.38
11:00	35.0	41.4	42.5	38.2	6.4	75.36	641.61	578.56	8.48
11:30	35.0	41.5	42.5	38.2	6.5	76.53	659.21	578.56	8.71
12:00	35.1	41.5	42.5	38.3	6.4	75.36	656.70	578.56	8.68
12:30	35.1	41.5	42.5	38.3	6.4	75.36	656.70	578.56	8.68
13:00	35.0	41.5	42.5	38.2	6.5	76.53	659.21	578.56	8.71
13:30	35.0	41.5	42.5	38.2	6.5	76.53	659.21	578.56	8.71
14:00	35.0	41.5	42.5	38.2	6.5	76.53	666.96	578.56	8.81
14:30	35.0	41.5	42.4	38.2	6.5	76.53	674.90	578.56	8.92
15:00	35.1	41.5	42.4	38.3	6.4	75.36	672.53	578.56	8.89
15:30	35.1	41.5	42.5	38.3	6.4	75.36	664.52	578.56	8.78
16:00	35.0	41.5	42.4	38.2	6.5	76.53	674.90	578.56	8.92
16:30	34.9	41.4	42.4	38.1	6.5	76.53	659.21	578.56	8.71
17:00	34.9	41.4	42.4	38.1	6.5	76.53	659.21	578.56	8.71
17:30	34.9	41.4	42.4	38.1	6.5	76.53	659.21	578.56	8.71
18:00	35.1	41.5	42.4	38.3	6.4	75.36	672.53	578.56	8.89
18:30	35.1	41.5	42.4	38.3	6.4	75.36	672.53	578.56	8.89
19:00	35.1	41.5	42.4	38.3	6.4	75.36	672.53	578.56	8.89
19:30	35.1	41.5	42.4	38.3	6.4	75.36	672.53	578.56	8.89
20:00	35.0	41.5	42.4	38.2	6.5	76.53	674.90	578.56	8.92



ตารางภาคผนวกที่ 46 กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.100wt% อัตราการไหล  $170 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าที่ท่อแดง  $45 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	44.9	51.2	52.4	48.1	6.3	73.91	629.29	695.68	8.15
1:00	44.8	51.2	52.3	48.0	6.4	75.08	646.71	695.68	8.37
1:30	44.8	51.1	52.2	48.0	6.3	73.91	644.09	695.68	8.34
2:00	44.8	51.1	52.2	48.0	6.3	73.91	644.09	695.68	8.34
2:30	44.8	51.1	52.3	48.0	6.3	73.91	636.60	695.68	8.24
3:00	44.8	51.1	52.3	48.0	6.3	73.91	636.60	695.68	8.24
3:30	44.8	51.1	52.3	48.0	6.3	73.91	636.60	695.68	8.24
4:00	44.8	51.1	52.3	48.0	6.3	73.91	636.60	695.68	8.24
4:30	44.8	51.1	52.3	48.0	6.3	73.91	636.60	695.68	8.24
5:00	44.8	51.2	52.3	48.0	6.4	75.08	654.32	695.68	8.47
5:30	44.8	51.1	52.3	48.0	6.3	73.91	636.60	695.68	8.24
6:00	44.8	51.1	52.3	48.0	6.3	73.91	636.60	695.68	8.24
6:30	44.8	51.1	52.3	48.0	6.3	73.91	636.60	695.68	8.24
7:00	44.8	51.2	52.3	48.0	6.4	75.08	654.32	695.68	8.47
7:30	44.8	51.2	52.2	48.0	6.4	75.08	662.11	695.68	8.57
8:00	44.8	51.1	52.2	48.0	6.3	73.91	644.09	695.68	8.34
8:30	44.8	51.1	52.2	48.0	6.3	73.91	644.09	695.68	8.34
9:00	44.8	51.2	52.2	48.0	6.4	75.08	662.11	695.68	8.57
9:30	44.8	51.1	52.2	48.0	6.3	73.91	644.09	695.68	8.34
10:00	44.8	51.1	52.2	48.0	6.3	73.91	651.76	695.68	8.44

ตารางภาคผนวกที่ 46 (ต่อ) กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.100wt% อัตราการไหล 170 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อทองแดง 45 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	44.8	51.1	52.2	48.0	6.3	73.91	651.76	695.68	8.44
11:00	44.8	51.1	52.2	48.0	6.3	73.91	651.76	695.68	8.44
11:30	44.8	51.1	52.2	48.0	6.3	73.91	651.76	695.68	8.44
12:00	44.8	51.1	52.2	48.0	6.3	73.91	651.76	695.68	8.44
12:30	44.8	51.1	52.2	48.0	6.3	73.91	651.76	695.68	8.44
13:00	44.8	51.1	52.2	48.0	6.3	73.91	651.76	695.68	8.44
13:30	44.8	51.1	52.1	48.0	6.3	73.91	659.61	695.68	8.54
14:00	44.8	51.1	52.1	48.0	6.3	73.91	659.61	695.68	8.54
14:30	44.8	51.1	52.1	48.0	6.3	73.91	659.61	695.68	8.54
15:00	44.8	51.1	52.1	48.0	6.3	73.91	659.61	695.68	8.54
15:30	44.8	51.1	52.1	48.0	6.3	73.91	659.61	695.68	8.54
16:00	44.8	51.1	52.1	48.0	6.3	73.91	659.61	695.68	8.54
16:30	44.8	51.1	52.1	48.0	6.3	73.91	659.61	695.68	8.54
17:00	44.8	51.1	52.1	48.0	6.3	73.91	659.61	695.68	8.54
17:30	44.8	51.1	52.1	48.0	6.3	73.91	659.61	695.68	8.54
18:00	44.8	51.2	52.3	48.0	6.4	75.08	654.32	695.68	8.47
18:30	44.8	51.2	52.3	48.0	6.4	75.08	654.32	695.68	8.47
19:00	44.8	51.2	52.3	48.0	6.4	75.08	654.32	695.68	8.47
19:30	44.8	51.2	52.3	48.0	6.4	75.08	654.32	695.68	8.47
20:00	44.8	51.2	52.3	48.0	6.4	75.08	654.32	695.68	8.47

ตารางภาคผนวกที่ 47 กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.100wt% อัตราการไหล  $170 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าที่ท่อแดง  $55 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	54.4	60.8	61.8	57.6	6.4	74.21	658.29	819.22	8.37
1:00	54.4	60.7	61.7	57.5	6.3	73.04	655.78	819.22	8.34
1:30	54.3	60.6	61.7	57.4	6.3	73.04	640.26	819.22	8.14
2:00	54.3	60.6	61.7	57.4	6.3	73.04	632.77	819.22	8.05
2:30	54.3	60.6	61.8	57.4	6.3	73.04	625.46	819.22	7.96
3:00	54.4	60.6	61.8	57.5	6.2	71.87	622.65	819.22	7.92
3:30	54.5	60.6	61.8	57.5	6.1	70.70	619.77	819.22	7.88
4:00	54.5	60.7	61.8	57.6	6.2	71.87	630.02	819.22	8.01
4:30	54.5	60.7	61.9	57.6	6.2	71.87	622.65	819.22	7.92
5:00	54.5	60.8	61.9	57.6	6.3	73.04	632.77	819.22	8.05
5:30	54.6	60.8	62.0	57.7	6.2	71.87	622.65	819.22	7.92
6:00	54.7	60.9	62.0	57.8	6.2	71.87	630.02	819.22	8.01
6:30	54.7	60.9	62.0	57.8	6.2	71.87	630.02	819.22	8.01
7:00	54.7	60.9	62.1	57.8	6.2	71.87	622.65	819.22	7.92
7:30	54.7	61.0	62.1	57.8	6.3	73.04	632.77	819.22	8.05
8:00	54.8	61.0	62.2	57.9	6.2	71.87	622.65	819.22	7.92
8:30	54.8	61.1	62.2	57.9	6.3	73.04	640.26	819.22	8.14
9:00	54.9	61.1	62.2	58.0	6.2	71.87	637.56	819.22	8.11
9:30	54.9	61.2	62.3	58.0	6.3	73.04	640.26	819.22	8.14
10:00	55.0	61.2	62.3	58.1	6.2	71.87	637.56	819.22	8.11

ตารางภาคผนวกที่ 47 (ต่อ) กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.100wt% อัตราการไหล 170 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อทองแดง 55 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	55.0	61.2	62.3	58.1	6.2	71.87	630.02	819.22	8.01
11:00	55.0	61.3	62.4	58.1	6.3	73.04	640.26	819.22	8.14
11:30	55.1	61.3	62.4	58.2	6.2	71.87	630.02	819.22	8.01
12:00	55.1	61.4	62.5	58.2	6.3	73.04	640.26	819.22	8.14
12:30	55.2	61.4	62.5	58.3	6.2	71.87	637.56	819.22	8.11
13:00	55.2	61.4	62.5	58.3	6.2	71.87	630.02	819.22	8.01
13:30	55.2	61.4	62.6	58.3	6.2	71.87	622.65	819.22	7.92
14:00	55.3	61.5	62.6	58.4	6.2	71.87	637.56	819.22	8.11
14:30	55.3	61.6	62.6	58.4	6.3	73.04	647.93	819.22	8.24
15:00	55.3	61.6	62.7	58.4	6.3	73.04	640.26	819.22	8.14
15:30	55.3	61.6	62.7	58.4	6.3	73.04	640.26	819.22	8.14
16:00	55.4	61.6	62.7	58.5	6.2	71.87	637.56	819.22	8.11
16:30	55.4	61.7	62.8	58.5	6.3	73.04	640.26	819.22	8.14
17:00	55.5	61.7	62.8	58.6	6.2	71.87	637.56	819.22	8.11
17:30	55.5	61.8	62.8	58.6	6.3	73.04	647.93	819.22	8.24
18:00	55.5	61.8	62.9	58.6	6.3	73.04	640.26	819.22	8.14
18:30	55.5	61.9	63.0	58.7	6.4	74.21	642.90	819.22	8.18
19:00	55.6	62.0	63.0	58.8	6.4	74.21	658.29	819.22	8.37
19:30	55.7	62.0	63.0	58.8	6.3	73.04	655.78	819.22	8.34
20:00	55.8	62.0	63.0	58.9	6.2	71.87	645.29	819.22	8.21

ตารางภาคผนวกที่ 48 กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.100wt% อัตราการไหล  $170 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าที่ท่อแดง  $65 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	64.1	70.2	71.1	67.1	6.1	70.41	654.35	948.10	8.20
1:00	63.9	70.1	71.1	67.0	6.2	71.57	648.89	948.10	8.13
1:30	63.9	70.0	71.0	66.9	6.1	70.41	638.34	948.10	8.00
2:00	63.8	69.9	71.0	66.8	6.1	70.41	623.08	948.10	7.81
2:30	63.8	69.9	71.0	66.8	6.1	70.41	623.08	948.10	7.81
3:00	63.8	69.9	71.0	66.8	6.1	70.41	623.08	948.10	7.81
3:30	63.8	69.9	71.0	66.8	6.1	70.41	630.62	948.10	7.90
4:00	63.8	69.9	71.0	66.8	6.1	70.41	630.62	948.10	7.90
4:30	63.8	69.9	71.0	66.8	6.1	70.41	630.62	948.10	7.90
5:00	63.9	69.9	71.0	66.9	6.0	69.24	627.78	948.10	7.87
5:30	63.9	69.9	71.0	66.9	6.0	69.24	627.78	948.10	7.87
6:00	63.9	69.9	71.0	66.9	6.0	69.24	627.78	948.10	7.87
6:30	63.9	69.9	71.0	66.9	6.0	69.24	627.78	948.10	7.87
7:00	63.9	69.9	71.0	66.9	6.0	69.24	627.78	948.10	7.87
7:30	63.9	69.9	71.0	66.9	6.0	69.24	627.78	948.10	7.87
8:00	63.9	69.9	71.0	66.9	6.0	69.24	627.78	948.10	7.87
8:30	63.9	69.9	71.0	66.9	6.0	69.24	627.78	948.10	7.87
9:00	63.9	69.9	71.0	66.9	6.0	69.24	620.19	948.10	7.77
9:30	64.0	69.9	71.0	66.9	5.8	68.08	617.23	948.10	7.74
10:00	64.0	69.9	71.0	66.9	5.8	68.08	617.23	948.10	7.74

ตารางภาคผนวกที่ 48 (ต่อ) กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.100wt% อัตราการไหล 170 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อทองแดง 65 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	64.0	69.9	71.0	66.9	5.8	68.08	617.23	948.10	7.74
11:00	64.0	69.9	71.1	66.9	5.8	68.08	609.77	948.10	7.64
11:30	64.0	70.0	71.1	67.0	6.0	69.24	620.19	948.10	7.77
12:00	64.1	70.0	71.1	67.0	5.9	68.08	617.23	948.10	7.74
12:30	64.1	70.0	71.1	67.0	5.9	68.08	617.23	948.10	7.74
13:00	64.1	70.1	71.1	67.1	6.0	69.24	635.56	948.10	7.97
13:30	64.2	70.1	71.2	67.1	5.8	68.08	617.23	948.10	7.74
14:00	64.2	70.1	71.2	67.1	5.8	68.08	617.23	948.10	7.74
14:30	64.2	70.1	71.2	67.1	5.8	68.08	617.23	948.10	7.74
15:00	64.2	70.1	71.3	67.1	5.8	68.08	609.77	948.10	7.64
15:30	64.2	70.2	71.3	67.2	5.9	69.24	627.78	948.10	7.87
16:00	64.2	70.3	71.3	67.2	6.1	70.41	646.25	948.10	8.10
16:30	64.3	70.3	71.3	67.3	6.0	69.24	635.56	948.10	7.97
17:00	64.3	70.3	71.3	67.3	6.0	69.24	635.56	948.10	7.97
17:30	64.3	70.3	71.4	67.3	6.0	69.24	627.78	948.10	7.87
18:00	64.4	70.3	71.4	67.3	5.8	68.08	617.23	948.10	7.74
18:30	64.4	70.3	71.4	67.3	5.8	68.08	617.23	948.10	7.74
19:00	64.4	70.3	71.5	67.3	5.8	68.08	609.77	948.10	7.64
19:30	64.4	70.4	71.5	67.4	5.9	69.24	627.78	948.10	7.87
20:00	64.4	70.4	71.5	67.4	5.9	69.24	627.78	948.10	7.87



ตารางภาคผนวกที่ 49 กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.100wt% อัตราการไหล  $220 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าที่ท่อแดง  $35 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	34.6	39.6	41.1	37.1	5.0	76.49	710.04	748.72	9.38
1:00	34.6	39.6	41.1	37.1	5.0	76.49	710.04	748.72	9.38
1:30	34.6	39.6	41.1	37.1	5.0	76.49	710.04	748.72	9.38
2:00	34.6	39.6	41.1	37.1	5.0	76.49	710.04	748.72	9.38
2:30	34.6	39.6	41.1	37.1	5.0	76.49	710.04	748.72	9.38
3:00	34.6	39.6	41.1	37.1	5.0	76.49	710.04	748.72	9.38
3:30	34.6	39.6	41.1	37.1	5.0	76.49	710.04	748.72	9.38
4:00	34.6	39.6	41.1	37.1	5.0	76.49	710.04	748.72	9.38
4:30	34.6	39.6	41.1	37.1	5.0	76.49	710.04	748.72	9.38
5:00	34.6	39.6	41.1	37.1	5.0	76.49	710.04	748.72	9.38
5:30	34.6	39.6	41.1	37.1	5.0	76.49	710.04	748.72	9.38
6:00	34.6	39.6	41.2	37.1	5.0	76.49	701.25	748.72	9.27
6:30	34.6	39.6	41.2	37.1	5.0	76.49	692.68	748.72	9.15
7:00	34.6	39.6	41.2	37.1	5.0	76.49	692.68	748.72	9.15
7:30	34.6	39.6	41.2	37.1	5.0	76.49	692.68	748.72	9.15
8:00	34.6	39.5	41.2	37.1	4.9	74.97	670.68	748.72	8.86
8:30	34.6	39.6	41.2	37.1	5.0	76.49	692.68	748.72	9.15
9:00	34.6	39.6	41.2	37.1	5.0	76.49	692.68	748.72	9.15
9:30	34.6	39.6	41.2	37.1	5.0	76.49	692.68	748.72	9.15
10:00	34.6	39.6	41.2	37.1	5.0	76.49	692.68	748.72	9.15

ตารางภาคผนวกที่ 49 (ต่อ) กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.100wt% อัตราการไหล 220 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อทองแดง 35 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	34.6	39.6	41.2	37.1	5.0	76.49	692.68	748.72	9.15
11:00	34.6	39.6	41.2	37.1	5.0	76.49	692.68	748.72	9.15
11:30	34.6	39.5	41.3	37.1	4.9	74.97	662.68	748.72	8.76
12:00	34.6	39.6	41.3	37.1	5.0	76.49	676.15	748.72	8.94
12:30	34.6	39.6	41.3	37.1	5.0	76.49	676.15	748.72	8.94
13:00	34.4	39.5	41.3	37.0	5.1	78.02	665.78	748.72	8.80
13:30	34.4	39.5	41.3	37.0	5.1	78.02	665.78	748.72	8.80
14:00	34.5	39.6	41.3	37.1	5.1	78.02	681.48	748.72	9.01
14:30	34.4	39.5	41.3	37.0	5.1	78.02	665.78	748.72	8.80
15:00	34.4	39.4	41.4	36.9	5.0	76.49	638.08	748.72	8.43
15:30	34.4	39.4	41.4	36.9	5.0	76.49	630.97	748.72	8.34
16:00	34.4	39.4	41.4	36.9	5.0	76.49	630.97	748.72	8.34
16:30	34.4	39.4	41.1	36.9	5.0	76.49	676.15	748.72	8.94
17:00	34.4	39.4	41.1	36.9	5.0	76.49	676.15	748.72	8.94
17:30	34.4	39.4	41.1	36.9	5.0	76.49	676.15	748.72	8.94
18:00	34.4	39.4	41.1	36.9	5.0	76.49	676.15	748.72	8.94
18:30	34.4	39.4	41.1	36.9	5.0	76.49	676.15	748.72	8.94
19:00	34.4	39.4	41.1	36.9	5.0	76.49	676.15	748.72	8.94
19:30	34.4	39.4	41.1	36.9	5.0	76.49	676.15	748.72	8.94
20:00	34.4	39.4	41.1	36.9	5.0	76.49	676.15	748.72	8.94

ตารางภาคผนวกที่ 50 กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.100wt% อัตราการไหล  $220 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าที่ท่อแดง  $45 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	44.5	49.4	50.9	47.0	4.9	74.39	706.48	900.29	9.14
1:00	44.5	49.4	50.9	47.0	4.9	74.39	706.48	900.29	9.14
1:30	44.5	49.4	50.9	47.0	4.9	74.39	706.48	900.29	9.14
2:00	44.5	49.3	50.9	46.9	4.8	72.87	683.31	900.29	8.84
2:30	44.5	49.4	50.9	47.0	4.9	74.39	706.48	900.29	9.14
3:00	44.5	49.4	50.9	47.0	4.9	74.39	706.48	900.29	9.14
3:30	44.5	49.3	50.9	46.9	4.8	72.87	683.31	900.29	8.84
4:00	44.5	49.4	50.9	47.0	4.9	74.39	706.48	900.29	9.14
4:30	44.5	49.4	50.9	47.0	4.9	74.39	706.48	900.29	9.14
5:00	44.5	49.4	50.9	47.0	4.9	74.39	706.48	900.29	9.14
5:30	44.5	49.3	50.9	46.9	4.8	72.87	683.31	900.29	8.84
6:00	44.5	49.4	50.9	47.0	4.9	74.39	697.54	900.29	9.03
6:30	44.5	49.4	50.9	47.0	4.9	74.39	706.48	900.29	9.14
7:00	44.5	49.4	50.9	47.0	4.9	74.39	697.54	900.29	9.03
7:30	44.5	49.4	50.9	47.0	4.9	74.39	697.54	900.29	9.03
8:00	44.5	49.4	50.9	47.0	4.9	74.39	697.54	900.29	9.03
8:30	44.5	49.4	50.9	47.0	4.9	74.39	697.54	900.29	9.03
9:00	44.5	49.4	50.9	47.0	4.9	74.39	697.54	900.29	9.03
9:30	44.5	49.4	50.9	47.0	4.9	74.39	697.54	900.29	9.03
10:00	44.5	49.4	50.9	47.0	4.9	74.39	697.54	900.29	9.03

ตารางภาคผนวกที่ 50 (ต่อ) กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.100wt% อัตราการไหล 220 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อทองแดง 45 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	44.5	49.4	50.9	47.0	4.9	74.39	697.54	900.29	9.03
11:00	44.5	49.4	50.9	47.0	4.9	74.39	697.54	900.29	9.03
11:30	44.5	49.4	50.9	47.0	4.9	74.39	697.54	900.29	9.03
12:00	44.5	49.4	50.9	47.0	4.9	74.39	697.54	900.29	9.03
12:30	44.5	49.4	50.9	47.0	4.9	74.39	697.54	900.29	9.03
13:00	44.5	49.4	50.9	47.0	4.9	74.39	697.54	900.29	9.03
13:30	44.5	49.4	50.9	47.0	4.9	74.39	697.54	900.29	9.03
14:00	44.5	49.4	50.9	47.0	4.9	74.39	697.54	900.29	9.03
14:30	44.5	49.4	50.9	47.0	4.9	74.39	697.54	900.29	9.03
15:00	44.5	49.4	50.9	47.0	4.9	74.39	697.54	900.29	9.03
15:30	44.5	49.4	50.9	47.0	4.9	74.39	697.54	900.29	9.03
16:00	44.5	49.4	50.9	47.0	4.9	74.39	697.54	900.29	9.03
16:30	44.5	49.4	51.0	47.0	4.9	74.39	688.82	900.29	8.92
17:00	44.5	49.4	51.0	47.0	4.9	74.39	688.82	900.29	8.92
17:30	44.5	49.4	51.0	47.0	4.9	74.39	688.82	900.29	8.92
18:00	44.5	49.4	51.0	47.0	4.9	74.39	688.82	900.29	8.92
18:30	44.5	49.4	51.0	47.0	4.9	74.39	688.82	900.29	8.92
19:00	44.5	49.4	51.0	47.0	4.9	74.39	688.82	900.29	8.92
19:30	44.5	49.4	51.0	47.0	4.9	74.39	688.82	900.29	8.92
20:00	44.5	49.4	51.0	47.0	4.9	74.39	688.82	900.29	8.92

ตารางภาคผนวกที่ 51 กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.100wt% อัตราการไหล  $220 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าที่ท่อแดง  $55 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	54.1	58.9	60.4	56.5	4.8	73.04	696.36	1060.17	8.86
1:00	54.1	58.9	60.4	56.5	4.8	73.04	696.36	1060.17	8.86
1:30	54.1	58.9	60.5	56.5	4.8	73.04	687.51	1060.17	8.74
2:00	54.1	58.9	60.5	56.5	4.8	73.04	687.51	1060.17	8.74
2:30	54.2	59.0	60.5	56.6	4.8	73.04	705.44	1060.17	8.97
3:00	54.2	59.0	60.6	56.6	4.8	73.04	687.51	1060.17	8.74
3:30	54.3	59.0	60.6	56.7	4.7	71.53	681.94	1060.17	8.67
4:00	54.3	59.1	60.6	56.7	4.8	73.04	705.44	1060.17	8.97
4:30	54.4	59.1	60.7	56.8	4.7	71.53	681.94	1060.17	8.67
5:00	54.5	59.2	60.7	56.9	4.7	71.53	690.83	1060.17	8.79
5:30	54.5	59.2	60.8	56.9	4.7	71.53	681.94	1060.17	8.67
6:00	54.6	59.2	60.8	56.9	4.6	70.02	667.52	1060.17	8.49
6:30	54.6	59.3	60.9	57.0	4.7	71.53	681.94	1060.17	8.67
7:00	54.6	59.4	60.9	57.0	4.8	73.04	705.44	1060.17	8.97
7:30	54.7	59.4	61.0	57.1	4.7	71.53	681.94	1060.17	8.67
8:00	54.8	59.5	61.0	57.2	4.7	71.53	699.96	1060.17	8.90
8:30	54.8	59.5	61.1	57.2	4.7	71.53	681.94	1060.17	8.67
9:00	54.9	59.5	61.1	57.2	4.6	70.02	676.23	1060.17	8.60
9:30	55.0	59.6	61.2	57.3	4.6	70.02	676.23	1060.17	8.60
10:00	55.0	59.7	61.2	57.4	4.7	71.53	699.96	1060.17	8.90

ตารางภาคผนวกที่ 51 (ต่อ) กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.100wt% อัตราการไหล 220 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อทองแดง 55 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	55.0	59.7	61.3	57.4	4.7	71.53	681.94	1060.17	8.67
11:00	55.1	59.7	61.3	57.4	4.6	70.02	667.52	1060.17	8.49
11:30	55.1	59.8	61.4	57.5	4.7	71.53	681.94	1060.17	8.67
12:00	55.1	59.8	61.4	57.5	4.7	71.53	681.94	1060.17	8.67
12:30	55.2	59.9	61.5	57.6	4.7	71.53	681.94	1060.17	8.67
13:00	55.3	59.9	61.5	57.6	4.6	70.02	676.23	1060.17	8.60
13:30	55.3	60.0	61.5	57.7	4.7	71.53	690.83	1060.17	8.79
14:00	55.3	60.0	61.6	57.7	4.7	71.53	681.94	1060.17	8.67
14:30	55.3	60.0	61.6	57.7	4.7	71.53	681.94	1060.17	8.67
15:00	55.4	60.1	61.6	57.8	4.7	71.53	690.83	1060.17	8.79
15:30	55.4	60.2	61.7	57.8	4.8	73.04	705.44	1060.17	8.97
16:00	55.5	60.2	61.7	57.9	4.7	71.53	690.83	1060.17	8.79
16:30	55.5	60.2	61.8	57.9	4.7	71.53	681.94	1060.17	8.67
17:00	55.5	60.2	61.8	57.9	4.7	71.53	681.94	1060.17	8.67
17:30	55.5	60.3	61.9	57.9	4.8	73.04	687.51	1060.17	8.74
18:00	55.5	60.3	61.9	57.9	4.8	73.04	687.51	1060.17	8.74
18:30	55.6	60.4	61.9	58.0	4.8	73.04	705.44	1060.17	8.97
19:00	55.6	60.4	61.9	58.0	4.8	73.04	696.36	1060.17	8.86
19:30	55.6	60.4	62.0	58.0	4.8	73.04	687.51	1060.17	8.74
20:00	55.6	60.4	62.0	58.0	4.8	73.04	687.51	1060.17	8.74



ตารางภาคผนวกที่ 52 กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.100wt% อัตราการไหล  $220 \text{ cm}^3/\text{min}$  อุณหภูมิเข้าที่ท่อแดง  $65 \text{ }^\circ\text{C}$

Time (min)	$T_{inAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{outAve}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_w$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{in}-T_{out}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Q (W)	h ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Re	Nu
0:30	65.2	69.8	71.2	67.5	4.6	68.67	693.04	1226.95	8.69
1:00	65.1	69.7	71.1	67.4	4.6	68.67	693.04	1226.95	8.69
1:30	65.1	69.7	71.1	67.4	4.6	68.67	693.04	1226.95	8.69
2:00	65.1	69.7	71.1	67.4	4.6	68.67	693.04	1226.95	8.69
2:30	65.1	69.7	71.1	67.4	4.6	68.67	693.04	1226.95	8.69
3:00	65.1	69.7	71.1	67.4	4.6	68.67	693.04	1226.95	8.69
3:30	65.1	69.7	71.1	67.4	4.6	68.67	693.04	1226.95	8.69
4:00	65.0	69.7	71.1	67.3	4.7	70.18	698.72	1226.95	8.76
4:30	65.0	69.7	71.1	67.3	4.7	70.18	698.72	1226.95	8.76
5:00	65.0	69.7	71.1	67.3	4.7	70.18	698.72	1226.95	8.76
5:30	65.0	69.7	71.0	67.3	4.7	70.18	708.24	1226.95	8.88
6:00	65.0	69.7	71.0	67.3	4.7	70.18	708.24	1226.95	8.88
6:30	65.0	69.7	71.0	67.3	4.7	70.18	718.02	1226.95	9.00
7:00	64.9	69.7	71.0	67.3	4.8	71.69	723.44	1226.95	9.07
7:30	64.9	69.7	71.0	67.3	4.8	71.69	723.44	1226.95	9.07
8:00	64.9	69.6	71.0	67.2	4.7	70.18	698.72	1226.95	8.76
8:30	64.9	69.6	71.0	67.2	4.7	70.18	698.72	1226.95	8.76
9:00	64.9	69.6	71.0	67.2	4.7	70.18	698.72	1226.95	8.76
9:30	64.9	69.6	70.9	67.2	4.7	70.18	708.24	1226.95	8.88
10:00	64.9	69.6	70.9	67.2	4.7	70.18	708.24	1226.95	8.88

ตารางภาคผนวกที่ 52 (ต่อ) กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความเข้มข้น 0.100wt% อัตราการไหล 220 cm<sup>3</sup>/min อุณหภูมิเข้าท่อทองแดง 65 °C

Time (min)	T <sub>inAve</sub> (°C)	T <sub>outAve</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> (°C)	Q (W)	h (W/m <sup>2</sup> )	Re	Nu
10:30	64.9	69.5	70.9	67.2	4.6	68.67	683.72	1226.95	8.57
11:00	64.9	69.6	70.9	67.2	4.7	70.18	708.24	1226.95	8.88
11:30	64.9	69.6	70.9	67.2	4.7	70.18	708.24	1226.95	8.88
12:00	64.8	69.5	70.9	67.1	4.7	70.18	689.45	1226.95	8.64
12:30	64.8	69.5	70.9	67.1	4.7	70.18	689.45	1226.95	8.64
13:00	64.8	69.5	70.9	67.1	4.7	70.18	689.45	1226.95	8.64
13:30	64.8	69.5	70.9	67.1	4.7	70.18	698.72	1226.95	8.76
14:00	64.8	69.5	70.9	67.1	4.7	70.18	698.72	1226.95	8.76
14:30	64.8	69.5	70.9	67.1	4.7	70.18	698.72	1226.95	8.76
15:00	64.8	69.5	70.8	67.1	4.7	70.18	708.24	1226.95	8.88
15:30	64.8	69.4	70.8	67.1	4.6	68.67	693.04	1226.95	8.69
16:00	64.8	69.4	70.8	67.1	4.6	68.67	693.04	1226.95	8.69
16:30	64.7	69.4	70.7	67.0	4.7	70.18	708.24	1226.95	8.88
17:00	64.7	69.4	70.7	67.0	4.7	70.18	708.24	1226.95	8.88
17:30	64.7	69.3	70.7	67.0	4.6	68.67	683.72	1226.95	8.57
18:00	64.7	69.3	70.7	67.0	4.6	68.67	683.72	1226.95	8.57
18:30	64.6	69.3	70.7	66.9	4.7	70.18	689.45	1226.95	8.64
19:00	64.6	69.3	70.7	66.9	4.7	70.18	698.72	1226.95	8.76
19:30	64.6	69.3	70.7	66.9	4.7	70.18	698.72	1226.95	8.76
20:00	64.6	69.3	70.7	66.9	4.7	70.18	698.72	1226.95	8.76

ข้อมูลการทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ

ตารางภาคผนวกที่ 53 ข้อมูลทดสอบสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ กรณีใช้น้ำเป็นสารทำงาน

$T_{in(Setup)}$ (°C)	$I_T$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_a$ (°C)	$T_{fi}$ (°C)	$T_{fo}$ (°C)	$I_T A_c$ (W)	$Q_{coll}$ (W)	Efficiency	$\frac{(T_{fi}-T_a)}{I_T}$
35	888.30	31.80	34.50	40.20	133.25	90.01	0.68	0.0030
	890.25	31.80	34.50	40.30	133.54	91.59	0.69	0.0030
	892.40	31.80	34.50	40.20	133.86	90.01	0.67	0.0030
	889.35	31.80	34.50	40.30	133.40	91.59	0.69	0.0030
	893.00	31.80	34.50	40.30	133.95	91.59	0.68	0.0030
	908.44	31.80	34.50	40.30	136.27	91.59	0.67	0.0030
	909.95	31.80	34.50	40.30	136.49	91.59	0.67	0.0030
	880.95	31.80	34.60	40.20	132.14	88.43	0.67	0.0032
	860.00	31.80	34.60	40.30	129.00	90.01	0.70	0.0033
	874.29	32.90	35.70	41.40	131.14	90.01	0.69	0.0032
	892.63	32.90	35.90	41.60	133.89	90.01	0.67	0.0034
	868.34	32.90	35.80	41.50	130.25	90.01	0.69	0.0033
	834.60	32.90	35.50	41.00	125.19	86.85	0.69	0.0031
	856.59	32.90	35.50	41.00	128.49	86.85	0.68	0.0030
<b>Average</b>	<b>881.36</b>	<b>32.19</b>	<b>34.94</b>	<b>40.64</b>	<b>132.20</b>	<b>90.01</b>	<b>0.68</b>	<b>0.0031</b>
40	895.27	33.60	40.80	46.20	134.29	85.27	0.63	0.0080
	896.86	33.60	40.50	45.90	134.53	85.27	0.63	0.0077
	899.02	33.80	40.40	45.80	134.85	85.27	0.63	0.0073
	903.64	33.80	40.30	45.90	135.55	88.43	0.65	0.0072
	908.50	34.00	40.70	46.10	136.27	85.27	0.63	0.0074
	921.82	34.00	40.80	46.30	138.27	86.85	0.63	0.0074
	912.89	33.90	40.50	46.00	136.93	86.85	0.63	0.0072
	916.77	33.80	40.20	45.70	137.52	86.85	0.63	0.0070
	918.61	33.80	40.10	45.70	137.79	88.43	0.64	0.0069
	916.18	33.70	39.90	45.50	137.43	88.43	0.64	0.0068

$T_{in(Setup)}$ (°C)	$I_T$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_a$ (°C)	$T_{fi}$ (°C)	$T_{fo}$ (°C)	$I_T A_C$ (W)	$Q_{coll}$ (W)	Efficiency	$(T_{fi}-T_a)$ $I_T$
	912.73	33.90	39.80	45.30	136.91	86.85	0.63	0.0065
	911.43	34.20	40.00	45.70	136.71	90.01	0.66	0.0064
	915.35	34.20	40.40	45.90	137.30	86.85	0.63	0.0068
	894.25	33.60	40.90	46.40	134.14	86.85	0.65	0.0082
<b>Average</b>	<b>908.81</b>	<b>33.85</b>	<b>40.38</b>	<b>45.89</b>	<b>136.32</b>	<b>86.96</b>	<b>0.64</b>	<b>0.0072</b>
45	944.14	32.90	45.60	50.90	141.62	83.69	0.59	0.0135
	948.24	33.20	45.50	50.90	142.24	85.27	0.60	0.0130
	939.19	33.60	45.20	50.50	140.88	83.69	0.59	0.0124
	928.49	33.70	44.90	50.30	139.27	85.27	0.61	0.0121
	932.75	33.80	44.80	50.10	139.91	83.69	0.60	0.0118
	963.57	33.90	44.70	50.10	144.54	85.27	0.59	0.0112
	971.57	33.80	44.70	50.20	145.74	86.85	0.60	0.0112
	988.58	33.70	45.40	50.90	148.29	86.85	0.59	0.0118
	960.11	33.70	45.70	51.10	144.02	85.27	0.59	0.0125
	955.19	33.90	45.80	51.10	143.28	83.69	0.58	0.0125
	956.48	34.40	45.80	51.20	143.47	85.27	0.59	0.0119
	954.76	35.00	45.70	51.10	143.21	85.27	0.60	0.0112
	949.18	35.10	45.70	51.10	142.38	85.27	0.60	0.0112
945.76	34.30	45.50	50.90	141.86	85.27	0.60	0.0118	
<b>Average</b>	<b>952.71</b>	<b>33.93</b>	<b>45.36</b>	<b>50.74</b>	<b>142.91</b>	<b>85.05</b>	<b>0.60</b>	<b>0.0120</b>
50	942.30	35.40	50.60	55.70	141.35	80.53	0.57	0.0161
	946.25	35.70	50.00	55.10	141.94	80.53	0.57	0.0151
	959.20	35.70	49.60	54.80	143.88	82.11	0.57	0.0145
	963.38	35.70	49.70	54.80	144.51	80.53	0.56	0.0145
	964.59	35.70	50.60	55.80	144.69	82.11	0.57	0.0154
	978.57	35.60	50.30	55.50	146.79	82.11	0.56	0.0150
	992.30	35.90	50.20	55.50	148.84	83.69	0.56	0.0144

$T_{in(Setup)}$ (°C)	$I_T$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_a$ (°C)	$T_{fi}$ (°C)	$T_{fo}$ (°C)	$I_T A_C$ (W)	$Q_{coll}$ (W)	Efficiency	$(T_{fi}-T_a)$ $I_T$
	997.98	35.70	49.90	55.20	149.70	83.69	0.56	0.0142
	1009.62	35.70	49.80	55.10	151.44	83.69	0.55	0.0140
	1012.31	35.70	49.70	54.90	151.85	82.11	0.54	0.0138
	1012.11	35.70	49.50	54.90	151.82	85.27	0.56	0.0136
	1009.02	35.70	49.50	55.00	151.35	86.85	0.57	0.0137
	1000.93	35.70	49.40	54.70	150.14	83.69	0.56	0.0137
	992.09	35.70	49.30	54.60	148.81	83.69	0.56	0.0137
<b>Average</b>	<b>984.33</b>	<b>35.69</b>	<b>49.86</b>	<b>55.11</b>	<b>147.65</b>	<b>82.90</b>	<b>0.56</b>	<b>0.0144</b>
55	913.81	35.00	55.80	60.50	137.07	74.22	0.54	0.02276
	913.65	34.90	55.50	60.30	137.05	75.80	0.55	0.02255
	915.15	35.20	55.40	60.20	137.27	75.80	0.55	0.02207
	916.43	35.20	55.40	60.20	137.46	75.80	0.55	0.02204
	917.29	35.20	55.30	60.00	137.59	74.22	0.54	0.02191
	917.71	35.30	55.40	60.20	137.66	75.80	0.55	0.02190
	990.06	35.20	55.70	60.60	148.51	77.38	0.52	0.02071
	1000.79	35.60	55.50	60.50	150.12	78.96	0.53	0.01988
	1000.76	36.00	55.30	60.20	150.11	77.38	0.52	0.01929
	979.56	36.20	54.90	59.80	146.93	77.38	0.53	0.01909
	1004.71	35.70	55.40	60.40	150.71	78.96	0.52	0.01961
	1007.94	35.70	55.60	60.70	151.19	80.53	0.53	0.01974
	998.93	36.30	55.30	60.30	149.84	78.96	0.53	0.01902
994.72	36.60	55.10	60.20	149.21	80.53	0.54	0.01860	
<b>Average</b>	<b>962.25</b>	<b>35.58</b>	<b>55.40</b>	<b>60.29</b>	<b>144.34</b>	<b>77.26</b>	<b>0.54</b>	<b>0.02066</b>
60	902.99	33.90	60.30	64.70	135.45	69.48	0.51	0.0292
	905.12	34.10	59.70	64.00	135.77	67.90	0.50	0.0283
	926.48	34.60	60.60	65.00	138.97	69.48	0.50	0.0281
	925.75	34.60	60.20	64.50	138.86	67.90	0.49	0.0277

$T_{in(Setup)}$ (°C)	$I_T$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_a$ (°C)	$T_{fi}$ (°C)	$T_{fo}$ (°C)	$I_T A_C$ (W)	$Q_{coll}$ (W)	Efficiency	$(T_{fi}-T_a)$ $I_T$
	927.17	34.70	60.00	64.50	139.07	71.06	0.51	0.0273
	930.88	35.20	59.90	64.40	139.63	71.06	0.51	0.0265
	931.85	35.60	59.70	64.10	139.78	69.48	0.50	0.0259
	930.79	35.80	60.00	64.30	139.62	67.90	0.49	0.0260
	937.36	35.60	60.70	65.10	140.60	69.48	0.49	0.0268
	943.36	35.30	60.80	65.30	141.50	71.06	0.50	0.0270
	944.46	35.40	60.80	65.30	141.67	71.06	0.50	0.0269
	948.57	35.50	60.80	65.30	142.29	71.06	0.50	0.0267
	951.66	35.30	60.40	64.80	142.75	69.48	0.49	0.0264
	951.85	35.40	60.40	64.90	142.78	71.06	0.50	0.0263
<b>Average</b>	<b>932.73</b>	<b>35.07</b>	<b>60.31</b>	<b>64.73</b>	<b>139.91</b>	<b>69.82</b>	<b>0.50</b>	<b>0.0271</b>
	905.63	36.90	65.00	69.10	135.84	64.74	0.48	0.0310
	928.14	37.20	65.10	69.30	139.22	66.32	0.48	0.0301
	940.01	37.30	65.30	69.50	141.00	66.32	0.47	0.0298
	939.99	37.40	64.60	68.80	141.00	66.32	0.47	0.0289
	929.10	37.70	64.40	68.50	139.37	64.74	0.46	0.0287
	879.82	38.10	65.30	69.40	131.97	64.74	0.49	0.0309
	862.86	38.10	64.80	68.70	129.43	61.59	0.48	0.0309
	865.08	37.80	64.30	68.20	129.76	61.59	0.47	0.0306
	862.87	38.30	64.10	68.10	129.43	63.16	0.49	0.0299
	859.81	38.40	64.70	68.70	128.97	63.16	0.49	0.0306
	852.45	38.30	65.40	69.40	127.87	63.16	0.49	0.0318
	846.85	38.10	65.00	69.00	127.03	63.16	0.50	0.0318
	867.00	37.90	64.70	68.70	130.05	63.16	0.49	0.0309
	887.08	37.70	64.20	68.30	133.06	64.74	0.49	0.0299
<b>Average</b>	<b>887.62</b>	<b>37.80</b>	<b>64.78</b>	<b>68.84</b>	<b>133.14</b>	<b>64.07</b>	<b>0.48</b>	<b>0.0304</b>



ตารางภาคผนวกที่ 54 ข้อมูลทดสอบสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ กรณีใช้ของไหลกราฟีนนาโนที่ความเข้มข้น 0.100wt% เป็นสารทำงาน

$T_{in(Setup)}$ (°C)	$I_T$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_a$ (°C)	$T_{fi}$ (°C)	$T_{fo}$ (°C)	$I_{TAc}$ (W)	$Q_{coll}$ (W)	Efficiency	$(T_{fi}-T_a)$ $I_T$
35	860.77	31.80	35.00	40.90	129.11	96.14	0.74	0.0037
	883.32	31.80	35.00	41.00	132.50	97.77	0.74	0.0036
	891.72	31.90	35.00	40.90	133.76	96.14	0.72	0.0035
	889.47	31.90	35.00	40.90	133.42	96.14	0.72	0.0035
	901.96	31.90	35.00	40.90	135.29	96.14	0.71	0.0034
	912.59	31.90	35.00	41.10	136.89	99.40	0.73	0.0034
	898.01	32.00	35.00	41.10	134.70	99.40	0.74	0.0033
	869.68	32.10	35.00	41.00	130.45	97.77	0.75	0.0033
	856.86	32.10	35.00	40.90	128.53	96.14	0.75	0.0034
	895.29	32.10	35.00	41.00	134.29	97.77	0.73	0.0032
	885.70	32.10	35.00	41.10	132.86	99.40	0.75	0.0033
	816.98	32.10	35.00	41.00	122.55	97.77	0.80	0.0035
	890.76	32.20	35.00	41.10	133.61	99.40	0.74	0.0031
	809.28	32.20	35.00	40.70	121.39	92.88	0.77	0.0035
<b>Average</b>	<b>875.88</b>	<b>32.01</b>	<b>35.00</b>	<b>40.97</b>	<b>131.38</b>	<b>97.30</b>	<b>0.74</b>	<b>0.0034</b>
40	914.17	33.10	40.30	46.20	137.13	96.14	0.70	0.0079
	900.39	33.10	40.40	46.20	135.06	94.51	0.70	0.0081
	905.12	33.50	40.40	46.30	135.77	96.14	0.71	0.0076
	915.11	33.60	40.40	46.30	137.27	96.14	0.70	0.0074
	919.68	33.90	40.30	46.40	137.95	99.40	0.72	0.0070
	919.99	33.90	40.10	46.00	138.00	96.14	0.70	0.0067
	920.57	34.00	39.90	45.80	138.08	96.14	0.70	0.0064
	921.31	33.80	40.40	46.20	138.20	94.51	0.68	0.0072
	921.63	33.70	40.90	46.80	138.24	96.14	0.70	0.0078
	920.65	32.70	40.10	46.00	138.10	96.14	0.70	0.0080
	921.70	32.80	40.10	46.10	138.26	97.77	0.71	0.0079

$T_{in(Setup)}$ (°C)	$I_T$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_a$ (°C)	$T_{fi}$ (°C)	$T_{fo}$ (°C)	$I_{TAc}$ (W)	$Q_{coll}$ (W)	Efficiency	$(T_{fi}-T_a)$ $I_T$
	919.70	32.80	40.10	46.00	137.96	96.14	0.70	0.0079
	920.10	32.90	40.10	46.10	138.02	97.77	0.71	0.0078
	917.50	32.90	40.10	46.00	137.63	96.14	0.70	0.0078
<b>Average</b>	<b>916.97</b>	<b>33.34</b>	<b>40.26</b>	<b>46.17</b>	<b>137.55</b>	<b>96.37</b>	<b>0.70</b>	<b>0.0075</b>
45	918.22	33.40	44.30	50.00	137.73	92.88	0.67	0.0119
	915.13	33.40	44.50	50.20	137.27	92.88	0.68	0.0121
	910.71	33.60	44.50	50.20	136.61	92.88	0.68	0.0120
	922.12	33.70	44.50	50.10	138.32	91.25	0.66	0.0117
	926.81	33.60	45.50	51.30	139.02	94.51	0.68	0.0128
	927.74	34.00	45.70	51.40	139.16	92.88	0.67	0.0126
	944.68	33.70	45.30	51.20	141.70	96.14	0.68	0.0123
	947.34	34.00	45.20	51.10	142.10	96.14	0.68	0.0118
	939.55	34.50	45.00	50.90	140.93	96.14	0.68	0.0112
	928.12	34.50	44.80	50.50	139.22	92.88	0.67	0.0111
	933.91	34.60	44.60	50.50	140.09	96.14	0.69	0.0107
	964.43	34.70	44.50	50.40	144.66	96.14	0.66	0.0102
	972.02	34.60	44.80	50.80	145.80	97.77	0.67	0.0105
	988.52	34.50	45.40	51.40	148.28	97.77	0.66	0.0110
<b>Average</b>	<b>938.52</b>	<b>34.06</b>	<b>44.9</b>	<b>50.71</b>	<b>140.78</b>	<b>94.74</b>	<b>0.67</b>	<b>0.0116</b>
50	927.94	35.70	50.50	56.00	139.19	89.62	0.64	0.0159
	929.67	35.80	49.80	55.30	139.45	89.62	0.64	0.0151
	962.80	35.30	50.20	55.70	144.42	89.62	0.62	0.0155
	958.34	35.20	50.30	55.90	143.75	91.25	0.63	0.0158
	979.60	34.90	50.40	56.00	146.94	91.25	0.62	0.0158
	919.58	34.60	49.90	55.30	137.94	87.99	0.64	0.0166
	1012.53	34.50	50.00	55.70	151.88	92.88	0.61	0.0153
	1013.28	35.10	50.70	56.40	151.99	92.88	0.61	0.0154
	975.89	35.70	50.70	56.30	146.38	91.25	0.62	0.0154

$T_{in(Setup)}$ (°C)	$I_T$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_a$ (°C)	$T_{fi}$ (°C)	$T_{fo}$ (°C)	$I_{TA_C}$ (W)	$Q_{coll}$ (W)	Efficiency	$(T_{fi}-T_a)$ $I_T$
	989.88	35.80	50.40	56.10	148.48	92.88	0.63	0.0147
	996.82	35.90	50.30	56.00	149.52	92.88	0.62	0.0144
	1007.45	35.90	50.00	55.80	151.12	94.51	0.63	0.0140
	1012.17	36.10	49.90	55.60	151.83	92.88	0.61	0.0136
	1012.27	36.20	49.70	55.40	151.84	92.88	0.61	0.0133
<b>Average</b>	<b>978.44</b>	<b>35.48</b>	<b>50.20</b>	<b>55.82</b>	<b>146.77</b>	<b>91.60</b>	<b>0.62</b>	<b>0.0151</b>
55	912.35	35.30	54.80	59.90	136.85	83.10	0.61	0.0214
	986.98	35.40	55.00	60.50	148.05	89.62	0.61	0.0199
	978.69	35.50	54.80	60.10	146.80	86.36	0.59	0.0197
	920.20	35.50	54.30	59.40	138.03	83.10	0.60	0.0204
	922.16	35.50	54.40	59.60	138.32	84.73	0.61	0.0205
	923.14	35.50	54.80	60.10	138.47	86.36	0.62	0.0209
	925.24	35.50	55.00	60.10	138.79	83.10	0.60	0.0211
	967.72	35.60	55.60	60.90	145.16	86.36	0.59	0.0207
	1000.70	35.60	55.50	60.90	150.10	87.99	0.59	0.0199
	994.94	35.60	55.30	60.60	149.24	86.36	0.58	0.0198
	986.98	35.60	55.00	60.40	148.05	87.99	0.59	0.0197
	973.33	35.70	54.70	60.10	146.00	87.99	0.60	0.0195
	982.23	35.70	54.60	60.00	147.33	87.99	0.60	0.0192
978.69	35.70	54.80	60.20	146.80	87.99	0.60	0.0195	
<b>Average</b>	<b>960.95</b>	<b>35.55</b>	<b>54.90</b>	<b>60.20</b>	<b>144.14</b>	<b>86.36</b>	<b>0.60</b>	<b>0.0202</b>
60	903.35	34.00	60.40	65.20	135.50	78.22	0.58	0.0292
	912.57	34.30	59.90	64.60	136.88	76.59	0.56	0.0281
	939.17	35.00	60.40	65.40	140.87	81.48	0.58	0.0270
	939.41	35.30	59.70	64.60	140.91	79.85	0.57	0.0260
	938.58	35.60	59.20	64.00	140.79	78.22	0.56	0.0251
	944.37	35.60	60.10	65.00	141.65	79.85	0.56	0.0259
	945.01	35.80	59.90	64.90	141.75	81.48	0.57	0.0255

$T_{in(Setup)}$ (°C)	$I_T$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_a$ (°C)	$T_{fi}$ (°C)	$T_{fo}$ (°C)	$I_{TAc}$ (W)	$Q_{coll}$ (W)	Efficiency	$(T_{fi}-T_a)$ $I_T$
	941.46	35.60	60.00	64.90	141.22	79.85	0.57	0.0259
	938.83	35.40	60.00	64.90	140.82	79.85	0.57	0.0262
	940.22	35.30	59.50	64.30	141.03	78.22	0.55	0.0257
	953.41	36.30	59.80	64.70	143.01	79.85	0.56	0.0246
	974.71	37.10	60.40	65.40	146.21	81.48	0.56	0.0239
	990.47	36.90	60.30	65.30	148.57	81.48	0.55	0.0236
	1007.24	36.50	60.10	65.00	151.09	79.85	0.53	0.0234
<b>Average</b>	<b>947.77</b>	<b>35.62</b>	<b>59.98</b>	<b>64.87</b>	<b>142.17</b>	<b>79.73</b>	<b>0.56</b>	<b>0.0257</b>
65	900.88	36.20	65.40	69.90	135.13	73.33	0.54	0.0324
	902.54	36.60	65.40	69.80	135.38	71.70	0.53	0.0319
	905.01	36.90	65.10	69.50	135.75	71.70	0.53	0.0312
	916.83	37.10	64.70	69.20	137.52	73.33	0.53	0.0301
	942.98	37.60	65.50	70.10	141.45	74.96	0.53	0.0296
	941.31	37.50	64.60	69.10	141.20	73.33	0.52	0.0288
	915.06	38.10	64.30	68.80	137.26	73.33	0.53	0.0286
	898.15	38.50	64.50	68.90	134.72	71.70	0.53	0.0289
	881.11	38.40	65.30	69.70	132.17	71.70	0.54	0.0305
	867.74	38.40	64.70	69.00	130.16	70.07	0.54	0.0303
	863.58	38.20	64.30	68.60	129.54	70.07	0.54	0.0302
	901.70	36.20	65.40	69.90	135.26	73.33	0.54	0.0324
	899.20	36.20	65.40	69.90	134.88	73.33	0.54	0.0325
	901.65	36.20	65.40	69.80	135.25	71.70	0.53	0.0324
<b>Average</b>	<b>902.70</b>	<b>37.29</b>	<b>65.00</b>	<b>69.44</b>	<b>135.40</b>	<b>72.40</b>	<b>0.53</b>	<b>0.0307</b>

ข้อมูลการทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

ตารางภาคผนวกที่ 55 ข้อมูลทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์กรณีใช้น้ำเป็นสารทำงาน ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส

Time	$I_T$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_a$ (°C)	$T_{fi}$ (°C)	$T_{fo}$ (°C)	$T_s$ (°C)	$Q_{coll}$ (W)	$T_s^{t+\Delta t}$ (°C)	$I_T A_c \Delta t$ (MJ)	$Q_s$ (MJ)
9:00	477.95	25.0	24.0	24.5	23.0	7.58	23.4	0.0430	0.0184
9:10	511.30	25.4	24.2	27.2	23.4	45.51	24.4	0.0460	0.0460
9:20	543.05	26.1	25.1	28.5	24.4	51.58	25.5	0.0489	0.0506
9:30	572.90	26.1	25.7	29.5	25.5	57.64	26.6	0.0516	0.0506
9:40	598.45	26.6	26.6	30.7	26.6	62.19	27.6	0.0539	0.0460
9:50	628.05	27.2	27.4	31.9	27.6	68.26	28.6	0.0565	0.0460
10:00	654.45	27.3	28.3	33.0	28.6	71.30	29.6	0.0589	0.0460
10:10	678.10	28.0	29.2	34.0	29.6	72.81	30.6	0.0610	0.0460
10:20	703.95	28.2	30.1	35.0	30.6	74.33	31.7	0.0634	0.0506
10:30	721.10	28.2	30.7	35.9	31.7	78.88	32.7	0.0649	0.0460
10:40	737.70	28.9	31.7	36.9	32.7	78.88	33.7	0.0664	0.0460
10:50	756.00	28.9	32.5	37.8	33.7	80.40	34.6	0.0680	0.0414
11:00	773.00	29.7	33.4	38.6	34.6	78.88	35.6	0.0696	0.0460
11:10	780.00	30.3	34.3	39.4	35.6	77.36	36.6	0.0702	0.0460
11:20	798.05	30.5	35.2	40.4	36.6	78.88	37.4	0.0718	0.0368
11:30	805.90	30.7	36.1	41.2	37.4	77.36	38.3	0.0725	0.0414
11:40	817.85	31.1	36.8	42.0	38.3	78.88	39.2	0.0736	0.0414
11:50	824.05	30.9	37.6	42.7	39.2	77.36	40.0	0.0742	0.0368
12:00	827.95	32.0	38.5	43.6	40.0	77.36	40.7	0.0745	0.0322
12:10	831.90	32.1	39.2	44.2	40.7	75.85	41.5	0.0749	0.0368
12:20	833.50	32.0	39.9	44.9	41.5	75.85	42.2	0.0750	0.0322
12:30	829.30	32.7	40.8	45.5	42.2	71.30	43.0	0.0746	0.0368
12:40	825.05	32.5	42.0	46.6	43.0	69.78	43.7	0.0743	0.0322
12:50	822.35	32.3	42.4	47.3	43.7	74.33	44.4	0.0740	0.0322

Time	$I_T$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_a$ (°C)	$T_{fi}$ (°C)	$T_{fo}$ (°C)	$T_s$ (°C)	$Q_{coll}$ (W)	$T_s^{t+\Delta t}$ (°C)	$I_T A_c \Delta t$ (MJ)	$Q_s$ (MJ)
13:00	815.20	33.6	42.8	47.7	44.4	74.33	44.9	0.0734	0.0230
13:10	808.85	33.8	43.5	48.2	44.9	71.30	45.4	0.0728	0.0230
13:20	794.20	32.9	43.8	48.6	45.4	72.81	45.9	0.0715	0.0230
13:30	777.90	34.7	44.1	48.8	45.9	71.30	46.1	0.0700	0.0092
13:40	768.65	34.6	44.2	48.7	46.1	68.26	46.3	0.0692	0.0092
13:50	745.15	34.5	44.7	48.8	46.3	62.19	46.6	0.0671	0.0138
14:00	730.10	35.1	45.0	49.1	46.6	62.19	47.1	0.0657	0.0230
14:10	712.50	34.7	45.2	49.0	47.1	57.64	47.4	0.0641	0.0138
14:20	690.30	34.7	45.4	48.9	47.4	53.09	47.6	0.0621	0.0092
14:30	661.25	34.3	45.7	48.9	47.6	48.54	47.9	0.0595	0.0138
14:40	642.15	34.9	45.9	49.2	47.9	50.06	48.1	0.0578	0.0092
14:50	613.10	35.2	46.2	49.2	48.1	45.51	48.2	0.0552	0.0046
15:00	578.15	34.6	46.6	49.6	48.2	45.51	48.3	0.0520	0.0046
15:10	531.00	34.7	47.0	49.7	48.3	40.96	48.4	0.0478	0.0046
15:20	495.15	34.8	47.4	49.8	48.4	36.41	48.5	0.0446	0.0046
15:30	482.70	34.7	47.4	49.7	48.5	34.89	48.5	0.0434	0.0000
15:40	439.60	34.7	47.7	49.5	48.5	27.30	48.6	0.0396	0.0046
15:50	396.70	33.8	47.7	49.2	48.6	22.75	48.6	0.0357	0.0000
16:00	355.80	33.5	47.6	48.9	48.6	19.72	45.0	0.0320	-0.1656



ตารางภาคผนวกที่ 56 ข้อมูลทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์กรณีใช้น้ำเป็นสารทำงาน ในวันที่ท้องฟ้ามีเมฆมาก

Time	$I_T$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_a$ (°C)	$T_{fi}$ (°C)	$T_{fo}$ (°C)	$T_s$ (°C)	$Q_{coll}$ (W)	$T_s^{t+\Delta t}$ (°C)	$I_T A_c \Delta t$ (MJ)	$Q_s$ (MJ)
9:00	573.46	24.4	24.0	25.3	23.0	19.72	23.3	0.0516	0.0138
9:10	408.78	24.5	23.2	26.1	23.3	43.99	24.1	0.0368	0.0368
9:20	572.93	24.5	23.4	27.0	24.1	54.61	24.9	0.0516	0.0368
9:30	432.50	24.3	24.2	27.8	24.9	54.61	25.7	0.0389	0.0368
9:40	647.03	24.3	24.8	29.0	25.7	63.71	26.7	0.0582	0.0460
9:50	673.49	25.7	25.6	30.3	26.7	71.30	27.7	0.0606	0.0460
10:00	733.71	26.5	26.5	31.3	27.7	72.81	28.7	0.0660	0.0460
10:10	206.73	26.6	27.3	31.6	28.7	65.23	29.3	0.0186	0.0276
10:20	776.81	26.7	27.9	33.3	29.3	81.91	30.4	0.0699	0.0506
10:30	871.88	27.8	28.9	34.6	30.4	86.46	31.4	0.0785	0.0460
10:40	807.42	26.5	29.6	35.1	31.4	83.43	32.3	0.0727	0.0414
10:50	807.28	27.1	30.6	36.2	32.3	84.95	33.0	0.0727	0.0322
11:00	542.54	27.5	31.3	34.3	33.0	45.51	33.1	0.0488	0.0046
11:10	648.09	27.1	31.6	33.4	33.1	27.30	33.7	0.0583	0.0276
11:20	892.86	27.5	32.7	38.1	33.7	81.91	34.5	0.0804	0.0368
11:30	358.69	28.6	32.9	34.9	34.5	30.34	35.2	0.0323	0.0322
11:40	384.69	27.9	33.6	37.4	35.2	57.64	35.9	0.0346	0.0322
11:50	238.10	28.2	34.2	36.7	35.9	37.92	35.6	0.0214	-0.0138
12:00	219.83	28.0	34.2	35.7	35.6	22.75	35.4	0.0198	-0.0092
12:10	920.82	28.0	34.2	36.6	35.4	36.41	36.2	0.0829	0.0368
12:20	862.56	28.7	35.0	38.7	36.2	56.13	37.1	0.0776	0.0414
12:30	875.82	28.4	36.0	41.8	37.1	87.98	38.0	0.0788	0.0414
12:40	898.70	29.0	36.7	42.8	38.0	92.53	39.1	0.0809	0.0506
12:50	955.86	29.8	37.2	43.7	39.1	98.60	39.9	0.0860	0.0368
13:00	906.03	29.8	37.8	42.2	39.9	66.74	40.2	0.0815	0.0138

Time	$I_T$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_a$ (°C)	$T_{fi}$ (°C)	$T_{fo}$ (°C)	$T_s$ (°C)	$Q_{coll}$ (W)	$T_s^{t+\Delta t}$ (°C)	$I_T A_c \Delta t$ (MJ)	$Q_s$ (MJ)
13:10	873.08	29.5	37.6	44.2	40.2	100.12	41.0	0.0786	0.0368
13:20	803.99	30.3	38.4	44.8	41.0	97.08	41.8	0.0724	0.0368
13:30	812.43	30.6	38.6	44.9	41.8	95.57	42.4	0.0731	0.0276
13:40	837.16	30.5	39.0	45.5	42.4	98.60	42.4	0.0753	0.0000
13:50	834.02	30.7	39.5	45.5	42.4	91.02	43.2	0.0751	0.0368
14:00	739.93	29.2	39.7	45.2	43.2	83.43	43.7	0.0666	0.0230
14:10	701.82	29.7	39.9	45.0	43.7	77.36	43.7	0.0632	0.0000
14:20	648.89	30.0	40.2	45.5	43.7	80.40	43.7	0.0584	0.0000
14:30	647.96	30.0	41.0	43.1	43.7	31.86	43.6	0.0583	-0.0046
14:40	613.13	29.4	40.8	44.8	43.6	60.68	43.9	0.0552	0.0138
14:50	581.50	30.0	41.1	44.7	43.9	54.61	44.1	0.0523	0.0092
15:00	546.94	29.6	40.8	44.3	44.1	53.09	44.3	0.0492	0.0092
15:10	497.77	30.3	42.1	45.8	44.3	56.13	44.3	0.0448	0.0000
15:20	489.94	30.7	43.2	46.3	44.3	47.02	44.5	0.0441	0.0092
15:30	448.50	31.5	43.3	46.1	44.5	42.47	44.6	0.0404	0.0046
15:40	247.61	31.2	43.3	45.7	44.6	36.41	44.7	0.0223	0.0046
15:50	124.39	31.3	43.6	45.6	44.7	30.34	44.7	0.0112	0.0000
16:00	121.78	30.5	43.4	45.1	44.7	25.79	45.0	0.0110	0.0138

ตารางภาคผนวกที่ 57 ข้อมูลทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์กรณีใช้ของไหลกราฟีนนาโนที่ความเข้มข้น 0.100wt% เป็นสารทำงาน ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส

Time	$I_T$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_a$ (°C)	$T_{fi}$ (°C)	$T_{fo}$ (°C)	$T_s$ (°C)	$Q_{coll}$ (W)	$T_s^{t+\Delta t}$ (°C)	$I_T A_c \Delta t$ (MJ)	$Q_s$ (MJ)
9:00	477.95	25.0	24.7	26.4	23.5	27.42	24.0	0.0430	0.0230
9:10	511.30	25.4	25.0	29.3	24.0	69.35	25.9	0.0460	0.0874
9:20	543.05	26.1	26.2	31.0	25.9	77.41	27.5	0.0489	0.0736
9:30	572.90	26.1	27.2	32.2	27.5	80.64	29.0	0.0516	0.0690
9:40	598.45	26.6	28.4	33.5	29.0	82.25	30.4	0.0539	0.0644
9:50	628.05	27.2	29.6	34.8	30.4	83.86	31.9	0.0565	0.0690
10:00	654.45	27.3	30.9	36.2	31.9	85.48	33.2	0.0589	0.0598
10:10	678.10	28.0	32.0	37.2	33.2	83.86	34.4	0.0610	0.0552
10:20	703.95	28.2	33.3	38.7	34.4	87.09	35.8	0.0634	0.0644
10:30	721.10	28.2	34.3	39.7	35.8	87.09	37.0	0.0649	0.0552
10:40	737.70	28.9	35.6	41.1	37.0	88.70	38.3	0.0664	0.0598
10:50	756.00	28.9	36.6	42.0	38.3	87.09	39.3	0.0680	0.0460
11:00	773.00	29.7	37.7	42.9	39.3	83.86	40.5	0.0696	0.0552
11:10	780.00	30.3	38.9	43.8	40.5	79.03	41.7	0.0702	0.0552
11:20	798.05	30.5	40.1	44.9	41.7	77.41	42.7	0.0718	0.0460
11:30	805.90	30.7	41.3	46.1	42.7	77.41	43.8	0.0725	0.0506
11:40	817.85	31.1	42.0	47.1	43.8	82.25	44.8	0.0736	0.0460
11:50	824.05	30.9	42.7	47.4	44.8	75.80	45.6	0.0742	0.0368
12:00	827.95	32.0	43.4	48.4	45.6	80.64	46.3	0.0745	0.0322
12:10	831.90	32.1	44.2	49.0	46.3	77.41	46.9	0.0749	0.0276
12:20	833.50	32.0	45.0	49.7	46.9	75.80	47.6	0.0750	0.0322
12:30	829.30	32.7	45.4	50.3	47.6	79.03	48.3	0.0746	0.0322
12:40	825.05	32.5	44.9	50.5	48.3	90.32	48.8	0.0743	0.0230
12:50	822.35	32.3	45.4	50.4	48.8	80.64	49.4	0.0740	0.0276

Time	$I_T$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_a$ (°C)	$T_{fi}$ (°C)	$T_{fo}$ (°C)	$T_s$ (°C)	$Q_{coll}$ (W)	$T_s^{t+\Delta t}$ (°C)	$I_T A_c \Delta t$ (MJ)	$Q_s$ (MJ)
13:00	815.20	33.6	45.6	50.5	49.4	79.03	49.8	0.0734	0.0184
13:10	808.85	33.8	46.0	50.4	49.8	70.96	50.1	0.0728	0.0138
13:20	794.20	32.9	46.5	50.2	50.1	59.67	50.1	0.0715	0.0000
13:30	777.90	34.7	47.5	51.3	50.1	61.29	50.6	0.0700	0.0230
13:40	768.65	34.6	48.0	51.7	50.6	59.67	51.1	0.0692	0.0230
13:50	745.15	34.5	48.4	51.9	51.1	56.45	51.3	0.0671	0.0092
14:00	730.10	35.1	48.7	52.3	51.3	58.06	51.4	0.0657	0.0046
14:10	712.50	34.7	49.0	52.1	51.4	50.00	51.4	0.0641	0.0000
14:20	690.30	34.7	49.3	52.6	51.4	0.00	0.00	0.0000	0.0000
14:30	661.25	34.3	49.3	52.6	51.4	0.00	0.00	0.0000	0.0000
14:40	642.15	34.9	49.3	52.6	51.4	0.00	0.00	0.0000	0.0000
14:50	613.10	35.2	49.3	52.6	51.4	0.00	0.00	0.0000	0.0000
15:00	578.15	34.6	49.3	52.6	51.4	0.00	0.00	0.0000	0.0000
15:10	531.00	34.7	49.3	52.6	51.4	0.00	0.00	0.0000	0.0000
15:20	495.15	34.8	49.3	52.6	51.4	0.00	0.00	0.0000	0.0000
15:30	482.70	34.7	49.3	52.6	51.4	0.00	0.00	0.0000	0.0000
15:40	439.60	34.7	49.3	52.6	51.4	0.00	0.00	0.0000	0.0000
15:50	396.70	33.8	49.3	52.6	51.4	0.00	0.00	0.0000	0.0000
16:00	355.80	33.5	49.3	52.6	51.4	0.00	0.00	0.0000	0.0000

ตารางภาคผนวกที่ 58 ข้อมูลทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์กรณีใช้ของไหลกราฟีนนาโนที่ความเข้มข้น 0.100wt% เป็นสารทำงาน ในวันที่ท้องฟ้ามีเมฆมาก

Time	$I_T$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_a$ (°C)	$T_{fi}$ (°C)	$T_{fo}$ (°C)	$T_s$ (°C)	$Q_{coll}$ (W)	$T_s^{t+\Delta t}$ (°C)	$I_T A_c \Delta t$ (MJ)	$Q_s$ (MJ)
9:00	573.46	24.4	24.8	25.6	22.9	12.90	24.1	0.0516	0.0552
9:10	408.78	24.5	23.7	27.1	24.1	54.83	25.0	0.0368	0.0414
9:20	572.93	24.5	24.4	28.5	25.0	66.12	26.3	0.0516	0.0598
9:30	432.50	24.3	25.5	29.4	26.3	62.90	27.5	0.0389	0.0552
9:40	647.03	24.3	26.6	31.3	27.5	75.80	29.0	0.0582	0.0690
9:50	673.49	25.7	27.9	32.8	29.0	79.03	30.4	0.0606	0.0644
10:00	733.71	26.5	28.8	33.6	30.4	77.41	31.7	0.0660	0.0598
10:10	206.73	26.6	29.8	34.5	31.7	75.80	32.3	0.0186	0.0276
10:20	776.81	26.7	30.6	35.8	32.3	83.86	33.7	0.0699	0.0644
10:30	871.88	27.8	31.9	37.3	33.7	87.09	34.8	0.0785	0.0506
10:40	807.42	26.5	32.9	37.6	34.8	75.80	36.0	0.0727	0.0552
10:50	807.28	27.1	33.7	38.6	36.0	79.03	36.7	0.0727	0.0322
11:00	542.54	27.5	34.4	37.2	36.7	45.16	36.4	0.0488	-0.0138
11:10	648.09	27.1	34.4	35.2	36.4	12.90	37.6	0.0583	0.0552
11:20	892.86	27.5	36.0	41.2	37.6	83.86	38.3	0.0804	0.0322
11:30	358.69	28.6	36.0	37.1	38.3	17.74	39.1	0.0323	0.0368
11:40	384.69	27.9	36.9	40.1	39.1	51.61	38.9	0.0346	-0.0092
11:50	238.10	28.2	36.9	39.4	38.9	40.32	38.6	0.0214	-0.0138
12:00	219.83	28.0	37.2	38.0	38.6	12.90	38.3	0.0198	-0.0138
12:10	920.82	28.0	37.3	38.6	38.3	20.97	39.8	0.0829	0.0690
12:20	862.56	28.7	38.1	41.5	39.8	54.83	40.9	0.0776	0.0506
12:30	875.82	28.4	36.7	42.3	40.9	90.32	41.9	0.0788	0.0460
12:40	898.70	29.0	36.9	42.8	41.9	95.15	42.9	0.0809	0.0460
12:50	955.86	29.8	37.9	43.2	42.9	85.48	43.6	0.0860	0.0322

Time	$I_T$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_a$ (°C)	$T_{fi}$ (°C)	$T_{fo}$ (°C)	$T_s$ (°C)	$Q_{coll}$ (W)	$T_s^{t+\Delta t}$ (°C)	$I_T A_c \Delta t$ (MJ)	$Q_s$ (MJ)
13:00	906.03	29.8	38.6	42.4	43.6	61.29	43.8	0.0815	0.0092
13:10	873.08	29.5	39.0	43.9	43.8	79.03	44.5	0.0786	0.0322
13:20	803.99	30.3	40.0	44.3	44.5	69.35	44.8	0.0724	0.0138
13:30	812.43	30.6	40.6	44.5	44.8	62.90	45.9	0.0731	0.0506
13:40	837.16	30.5	41.1	45.6	45.9	72.57	46.1	0.0753	0.0092
13:50	834.02	30.7	41.8	46.2	46.1	70.96	46.4	0.0751	0.0138
14:00	739.93	29.2	42.5	46.3	46.4	61.29	46.8	0.0666	0.0184
14:10	701.82	29.7	43.2	46.3	46.8	50.00	46.8	0.0632	0.0000
14:20	648.89	30.0	43.2	46.3	46.8	0.00	0.00	0.0000	0.0000
14:30	647.96	30.0	43.2	46.3	46.8	0.00	0.00	0.0000	0.0000
14:40	613.13	29.4	43.2	46.3	46.8	0.00	0.00	0.0000	0.0000
14:50	581.50	30.0	43.2	46.3	46.8	0.00	0.00	0.0000	0.0000
15:00	546.94	29.6	43.2	46.3	46.8	0.00	0.00	0.0000	0.0000
15:10	497.77	30.3	43.2	46.3	46.8	0.00	0.00	0.0000	0.0000
15:20	489.94	30.7	43.2	46.3	46.8	0.00	0.00	0.0000	0.0000
15:30	448.50	31.5	43.2	46.3	46.8	0.00	0.00	0.0000	0.0000
15:40	247.61	31.2	43.2	46.3	46.8	0.00	0.00	0.0000	0.0000
15:50	124.39	31.3	43.2	46.3	46.8	0.00	0.00	0.0000	0.0000
16:00	121.78	30.5	43.2	46.3	46.8	0.00	0.00	0.0000	0.0000





ภาคผนวก ค  
ผลงาน และการเผยแพร่งานวิจัย


การเผยแพร่ผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการทั้งหมดมีสองเรื่อง ดังนี้

1. เผยแพร่ผลงานวิจัยหัวข้อ เรื่อง สมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบโดยใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ในการประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา (ครั้งที่ 3) ระหว่างวันที่ 30 สิงหาคม 2561 ตีพิมพ์หน้า 282-292 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา จังหวัดชลบุรี

2. เผยแพร่ผลงานวิจัยหัวข้อ เรื่อง การศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในท่อที่มีการไหลแบบราบเรียบโดยใช้น้ำและของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ในการประชุมวิชาการ เรื่อง การประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 11 วันที่ 28 - 30 พฤศจิกายน พ.ศ. 2561 ตีพิมพ์หน้า 265-272 ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ จังหวัดชัยภูมิ




การประชุมวิชาการ ครั้งที่ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี




**The 3<sup>rd</sup> KU SRC Annual Conference**

30 สิงหาคม 2561

The 3<sup>rd</sup> KU SRC Annual Conference

ผู้ร่วมจัดงาน: 

ผู้ร่วมสนับสนุน: 





มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน  
 2561 วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม

Topic: Engineering	หน้า
by using Water Cooling	
<b>ID067 Thermal Performance of Flat Plate Solar Collectors using Graphene Nano-Fluid as a Working Fluid</b>	<b>282</b>
ID091 Strength Characteristics of Bottom Ash Stabilized Soft Clayey Soil	293
ID094 Simulation of an Indoor Air Ventilation System for the Carbon Dioxide Control	303
ID100 Effect of aramid fiber on chloride penetration resistance and electrical resistivity of concrete	313
ID110 The study of Slope Stability by Limit Equilibrium Method using KUSlope program : Case Study of Kasetsart University Sriracha Campus	320
ID0112 Applied Genetic Algorithm for selection variety of economic crops for intercropping	327
Topic: Economics and Applied Economics	หน้า
ID002 Consumer Behavior and Factors Affecting Decision to Buy Organic Shrimp in Bangkok	333
ID040 Design and Development of Chantaboon's reed mat products for chantaburi reed mat weaving housewife group	340
ID047 Environment Valuation for Eco-Tourism Management, Samae San Island, Chonburi Province	350
ID058 Analysis of Determinants of Online Goods and Services Consumption in Digital Economy Era of Resident in Thailand	363
ID096 Human development on the labor productivity in plastics industry	377
ID097 Analysis of Debt on Royal Thai Armed Forces Headquarters Savings and Credit Cooperative Limited of Noncommissioned Officers	386
Topic: Finance and Accounting	หน้า
ID020 Performance of Fixed Income Mutual Fund in Thailand	397
ID022 An ability to forecast market liquidity – Evidence from South East Asia Mutual fund industry	407
ID054 The Development of Accounting Knowledge Using Project-Based Learning	419



การวิจัยทางวิทยาศาสตร์ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เชียงใหม่  
วันที่ 30 สิงหาคม พ.ศ. 2561 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เชียงใหม่

ID067

สมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโน  
เป็นสารทำงาน  
Thermal Performance of Flat Plate Solar Collectors using Graphene Nano-  
Fluid as a Working Fluid

กานูวัฒน์ ทิมอู<sup>1</sup> และสารวุธ พอลวงศ์ศรี<sup>2\*</sup>  
วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290  
\*E-mail: Saravooth@hotmail.com

Panuwat Timoiu<sup>1</sup> and Sarawut Polvongsri<sup>2\*</sup>  
<sup>1</sup>School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai Province 50290  
\*E-mail: Saravooth@hotmail.com

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ใน การทดลองใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบขนาด 0.15 m<sup>2</sup> จำนวน 2 ชุด ชุดแรกใช้ของไหลกราฟีนนาโนที่ความเข้มข้น 0.1% w/w เป็นสารทำงาน และชุดที่สองใช้เป็นสารทำงานเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง ทำการทดสอบตามมาตรฐานการ ทดสอบ ASHRAE Standard 93-2003 ที่อัตราการไหลสารทำงาน 0.0367 kg/s.m<sup>2</sup> จากการทดสอบพบว่า ความร้อนที่ได้รับ จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์และสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงานมีค่าสูงกว่า กรณีใช้น้ำเป็นสารทำงานทุกช่วงอุณหภูมิสารทำงานเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ใช้ของไหล กราฟีนนาโน มีค่า  $F_R(\tau\alpha)_e = 0.734$  และ  $F_R U_L = 7.360 \text{ W/m}^2\text{K}$

**คำหลัก** ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ ของไหลกราฟีนนาโน สมรรถนะทางความร้อน

**Abstract**

This research study the performance of flat-plate solar collector using graphene nano-fluid as a working fluids. The experiment used two sets of 0.15 m<sup>2</sup> flat plate solar collector area. The first set used graphene nano-fluid at the concentration 0.1% w/w and the second set used water as a working fluid for comparison result. The testing procedure was followed ASHRAE Standard 93-2003 at the mass flow rate of 0.0367 kg/s.m<sup>2</sup>. It was found that the obtained heat and solar collector performance in the case of graphene nano-fluid as a working fluid were higher than using water at all the inlet temperature range. The solar collector performance of graphene nano-fluid as a working fluid obtained  $F_R(\tau\alpha)_e$  and  $F_R U_L$  that was 0.734 and 7.360 W/m<sup>2</sup>K, respectively.

**Keywords:** Flat-plate solar collector, Graphene nano-fluids, Thermal performance

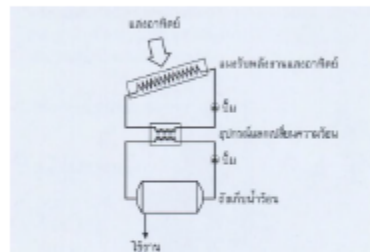




1. บทนำ

จากปัญหาความไม่คงตัวของพลังงานและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งสาเหตุหลักมาจากการเพิ่มขึ้นของประชากรโลก ทำให้หลายๆ ฝ่ายต่างมาให้ความสนใจกับพลังงานทดแทนมากขึ้น และปัจจุบันมีบ้านพักอาศัย โรงแรม หรือโรงงานอุตสาหกรรมเกิดขึ้นจำนวนมาก ซึ่งจะต้องใช้พลังงานไฟฟ้าจำนวนมากซึ่งเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นเครื่องทำน้ำร้อนไฟฟ้าจึงมีบทบาทสำคัญมากขึ้น ซึ่งเครื่องทำน้ำร้อนไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าสูงมากและได้รับความนิยมแล้ว ส่วนมากกับราคาค่าพลังงานไฟฟ้าที่สูงขึ้น ดังนั้นการผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์จึงตอบโจทย์ปัญหาด้วยพลังงานดังกล่าวเนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนใกล้เส้นศูนย์สูตร ทำให้ภูมิอากาศของประเทศไทยมีลักษณะเป็นแบบร้อนชื้นมีศักยภาพด้านพลังงานแสงอาทิตย์ที่สูง โดยทั่วไประบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบชนิดโพลีเอทิลีนแบบบิกัมมีประสิทธิภาพประมาณ 40-60% ที่อัตราการไหลเฉลี่ย 1.20 Liter/min.m<sup>2</sup> ตามค่ามาตรฐาน (ASHRAE Standard 95-2003, 2003) [1]

ระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ [2] มีส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วน คือ แผงรับรังสีอาทิตย์ ถังเก็บน้ำร้อน และ ปั๊มน้ำ โดยแผงรับรังสีอาทิตย์ทำหน้าที่รับพลังงานแสงอาทิตย์ และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนแล้วถ่ายเทให้กับสารพาความร้อน เพื่อนำพลังงานความร้อนไปเก็บไว้ในถังเก็บน้ำร้อนที่มีการหุ้มฉนวนอย่างดีเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการสูญเสียความร้อนและนำน้ำร้อนไปใช้งาน โดยการไหลเวียนสารทำงานของระบบจะใช้เป็นการขับเคลื่อนสารทำงานเพื่อไปแลกเปลี่ยนความร้อนจากแผงรับรังสีอาทิตย์อยู่ติดกับน้ำร้อน ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบบิกัมมีในระบบปิด Closed Loop Active [2]

แต่เนื่องจากประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับชนิดสูญญากาศมีข้อดีในเรื่องราคาที่ถูก จึงมักมีวิสัยทัศน์ว่าหากหาแนวทางที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ดังกล่าว เช่น การปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของสารทำงานให้เหมาะสมกับความเข้มรังสีอาทิตย์ การออกแบบแผ่นรับรังสีอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น หรือการเพิ่มค่าการนำความร้อนของสารทำงาน โดยการเปลี่ยนชนิดของสารทำงานให้สามารถนำความร้อนได้ดีขึ้น เช่นการใช้เอทานอลเป็นสารทำงาน โดยจอร์จวีร์ และคณะ [3] ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบโดยใช้เอทานอลเป็นสารแลกเปลี่ยนความร้อน โดยมีแผงรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบติดตั้งแผงคอนเดนเซอร์ จำนวน 4 แผง มีขนาดพื้นที่ 0.914 m<sup>2</sup> ฉนวนบิกัมมีฉนวนกระจก โดยมีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนขดลวดอยู่ภายในถังน้ำร้อน เมื่อสารทำงานไหลเวียนในระบบแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำในสภาพที่เดือดกลายเป็นไอทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้นตามลำดับและสารเอทานอลจะเกิดการควบแน่นกลายเป็นของเหลวเมื่อผ่านน้ำ จากผลการศึกษาสามารถทำให้สารทำงานมีอุณหภูมิ 82 °C และทำให้น้ำในถังมีอุณหภูมิ 69 °C โดยได้ค่าประสิทธิภาพแสงอาทิตย์อยู่ที่ 77% และได้ประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนอยู่ที่ 30% หรือการใช้สารละลายยาบอที่มีค่าการนำความร้อนที่สูงเติมลงไปใ้ในสารทำงาน จากแนวคิดที่ว่าของแข็งมีความสามารถในการนำความร้อนได้



ดีกว่าของเหลว นักวิจัยจึงได้นำของแข็งที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรผสมลงไปในของไหลทำงาน เพื่อเพิ่มค่าการนำความร้อนของของไหลทำงาน เช่น Tawari et al. [4] ได้ทำการทดสอบผลของการใช้ของไหลนาโน  $Al_2O_3/water$  ที่มีต่อประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ โดยใช้ความเข้มข้นที่ต่างกัน 0.5 1.0 1.5 และ 2.0% และอัตราการไหลต่างกันที่ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 Liter/min ผลการทดสอบพบว่า ของไหลนาโน  $Al_2O_3/water$  ที่อัตราการไหล 1.5 Liter/min และความเข้มข้น 1.5% สามารถเพิ่มประสิทธิภาพพาความร้อนได้ 31.64% เมื่อเปรียบเทียบกับใช้น้ำเป็นสารทำงาน จะเห็นได้ว่าสารละลายนาโนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพด้านความร้อนของสารทำงานได้ Polvongsi และ Katsirirat [5] ได้ทดสอบการใช้สารละลายเงินนาโน ในตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบพบว่า เมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโนของไหลที่ 10,000 ppm สามารถเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของตัวรับรังสีอาทิตย์ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการใช้น้ำเป็นสารทำงาน สารละลายเงินนาโน ที่ความเข้มข้นดังกล่าว จะมีค่าสภาพการนำความร้อน 0.852 W/m-K เทียบกับ 0.580 W/m-K ในกรณีของน้ำจึงสามารถตีความรับรังสีได้ดี การสูญเสียความร้อนจึงต่ำกว่า ตัวรับรังสีอาทิตย์จึงมีประสิทธิภาพสูงขึ้นค่า  $F_d(T_{a,i})$  และ  $F_{g,i}$  ที่อัตราการไหล  $0.02 \text{ kg/m}^2\text{s}$  มีค่า 0.816 และ  $7.123 \text{ W/m}^2\text{K}$  ในกรณีสารละลายเงินนาโน และมีค่า 0.723 และ  $8.314 \text{ W/m}^2\text{K}$  ในกรณีที่ใช้สารทำงานเป็นน้ำ

กราฟเป็นวัสดุคาร์บอนรูปแบบใหม่ที่มีสมบัติทางความร้อนที่ดีมาก โดยมีค่าการนำความร้อนอยู่ที่ประมาณ  $50 \text{ W/cm-K}$  สำหรับท่อเคมีค่าการนำความร้อนประมาณ  $4 \text{ W/cm-K}$  ที่อุณหภูมิห้อง กราฟเป็นจึงนำความร้อนได้ดีกว่าทองแดงมากกว่า 10 เท่า โดยนักวิทยาศาสตร์ต่างให้ความสนใจในการนำกราฟีนมาพัฒนาเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการนำไปใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ รวมไปถึงการนำไปใช้เป็นวัสดุคอมโพสิตร่วมกับวัสดุชนิดอื่นๆ เช่น พอลิเมอร์และอนุภาคนาโนของโลหะเพื่อให้ได้วัสดุคอมโพสิตชนิดใหม่ที่มีสมบัติที่ขึ้น โดย Ghazizadeh et al. [6] ทำการศึกษาความสัมพันธ์การถ่ายเทความร้อนโดยการ

พาความร้อนของของไหลกราฟีนนาโน เพื่อพัฒนาการพาความร้อนให้สูงขึ้นผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อภายใต้การไหลแบบราบเรียบ โดยของไหลกราฟีนนาโนจะถูกเตรียมขึ้นด้วยวิธี CVD method โดยมี ความเข้มข้น 3 ค่าคือ 0.050 0.075 และ 0.1 wt% ศึกษาความสัมพันธ์การพาความร้อนด้วยวิธีใช้ SEM และ Raman spectroscopy จากการศึกษาได้พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลกราฟีนนาโนขึ้นอยู่กับของไหล โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสามารถเพิ่มขึ้นได้ถึง 35.6% ที่ความเข้มข้น 0.1 wt% ที่อุณหภูมิ  $38 \text{ }^\circ\text{C}$  เมื่อเทียบกับน้ำบริสุทธิ์

จากข้อมูลงานวิจัยข้างต้น ทำให้ทราบถึงประโยชน์ของสารละลายนาโนและคุณสมบัติทางความร้อนที่ดีของกราฟีน งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษานำมาปรับใช้กับความร้อนของสารละลายนาโนกราฟีนที่มีผลต่อสมรรถนะการนำความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ และระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

2. อุปกรณ์และวิธีการเตรียมสารทำงาน

2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือวัด

อุปกรณ์และเครื่องมือวัดแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อุปกรณ์และเครื่องมือวัด

อุปกรณ์และเครื่องมือวัด	รายละเอียด
เครื่องวัดความชื้น Clearer VGT-1990QTD	ความถี่ 40MHz กำลัง 200 W
เครื่องบันทึกข้อมูล Data logger Lubron TM-1947SD	Thermometer 4 Channels Accuracy $\pm (0.4\% + 0.5^\circ\text{C})$
เครื่องวัดความเข้มข้นของตัวรับรังสีอาทิตย์ Finical meter	Output Responsivity : $0.2 \text{ mV per W/m}^2$ Sensitivity Calibrated to exactly $5.00 \text{ W/m}^2$ per mV
สายลมชนิดไม่โอโร	ชนิด k ขนาด $2 \times 1/0.32 \text{ mm}$
Rotameter Platon BGHS	อัตราการไหล 20-280 $\text{cm}^3/\text{min}$



**2.2 การเตรียมสารทำงาน**

ในการเตรียมของไหลนาโนโดยทั่วไปจะแบ่งได้ 2 วิธีคือ One-step method และ Two-step method โดยวิธี One-step method ทำได้โดยการให้ความร้อนกับอนุภาคของโลหะ ภายในห้องสุญญากาศ (Vacuum Chamber) เพื่อให้โลหะกลายเป็นไอโดยที่ในห้องสุญญากาศนั้นจะมีของไหลสำหรับหล่อเย็นอยู่บริเวณผนังด้านในของห้อง เมื่อไอของโลหะมาสัมผัสกับของไหลหล่อเย็นจะเกิดการควบแน่น ก่อให้เกิดเป็นอนุภาคทรงกลมกระจายอยู่ภายในของไหลหล่อเย็น วิธีนี้จะทำให้ได้อนุภาคนาขนาดเล็ก ไม่มีการเกาะกันของอนุภาค อนุภาคกระจายตัวได้ดี แต่มีข้อเสียตรงที่ขาดการขยายขนาดสำหรับการประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ส่วนวิธี Two-step method จะแบ่งเป็นสองขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกจะเป็นการเตรียมอนุภาคของแข็งขั้นตอนที่สองจะเป็นการกระจายตัวของอนุภาคของแข็งลงในของเหลวตัวกลาง โดยวิธีนี้จะทำได้ง่าย ราคาไม่แพง มีการเกาะกันของอนุภาคน้อย [7]

ในการทดลองนี้ใช้วิธีเตรียมของไหลนาโนด้วยวิธี Two-step method ดังนี้

- 1) ทำการชั่งผงกราฟีนนาโน 3 กรัม และเตรียมน้ำปราศจากไอออนใช้เป็นของเหลวฐาน 3 ลิตร และผสมรวมกันในเครื่องอัลตราโซนิก Cleaner VGT-1990QTD เพื่อทำการผสมสารทำงานที่มีความเข้มข้น 0.1% w/w
- 2) ทำการผสมสารทำงานเป็นเวลา 90 นาที โดยทำการผสม 30 นาที หยุด 10 นาที โดยใช้เครื่องอัลตราโซนิก Cleaner VGT-1990QTD ที่ความถี่ 40kHz กำลังไฟฟ้า 200 W เพื่อกระตุ้นให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคนา ระหว่างการทำงานของเครื่องจะต้องรักษาอุณหภูมิของผสมไม่ให้เกิน 35 °C



รูปที่ 2 ลักษณะของของไหลนาโนจากการผสมด้วยวิธี Two-step method

**2.3 สมบัติของกราฟีนนาโน**

ค่าการนำความร้อนของของไหลนาโนจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของปริมาณอนุภาคนาในน้ำ โดย Wasp. [8] ได้นำเสนอสมการที่ใช้ในการหาค่าการนำความร้อนของของแข็งที่สัมพันธ์กับของเหลวไว้ดังสมการที่ 1

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f - 2\alpha(k_f - k_p)}{k_p + 2k_p + \alpha(k_f - k_p)} \quad (1)$$

เมื่อ  $k_{nf}$  คือ ค่าการนำความร้อนของของไหลนาโน (W/m-K)  $k_f$  คือ ค่าการนำความร้อนของของไหลฐาน (W/m-K)  $k_p$  คือ ค่าการนำความร้อนของอนุภาคนาโน (W/m-K) และค่า  $\alpha$  คือ สัดส่วนโดยปริมาตร (Volume Fraction) ของอนุภาคนาในหาได้จากสมการที่ 2

$$\alpha = \frac{V_p}{V_f + V_p} = \frac{nm_d \rho_p}{\rho_f} \quad (2)$$

เมื่อ  $n$  คือ จำนวนของอนุภาคต่อปริมาตร และ  $d_p$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค (m)  $V_p$  คือปริมาตรของอนุภาคนาโน (m<sup>3</sup>)  $V_f$  คือปริมาตรของของไหลฐาน (m<sup>3</sup>)

ค่าความหนาแน่นของของไหลนาโน สามารถหาได้จากสมการของ Pak และ Cho [9] ดังแสดงในสมการที่ 3

$$\rho_{nf} = \alpha \rho_p + (1 - \alpha) \rho_w \quad (3)$$

เมื่อ  $\rho_{nf}$  คือ ความหนาแน่นของของไหลนาโน (kg/m<sup>3</sup>)  $\rho_p$  คือ ความหนาแน่นของอนุภาคนาโน (kg/m<sup>3</sup>)  $\rho_w$  คือ ความหนาแน่นของของไหลฐาน (kg/m<sup>3</sup>)

ค่าความร้อนจำเพาะของของไหลนาโนสามารถหาได้จากสมการของ Pak และ Cho [9] ดังแสดงในสมการที่ 4

$$Cp_{nf} = \alpha Cp_p + (1 - \alpha) Cp_w \quad (4)$$

เมื่อ  $Cp_{nf}$  คือ ค่าความร้อนจำเพาะของของไหลนาโน (kJ/kg-K)  $Cp_p$  คือ ค่าความร้อนจำเพาะของอนุภาคนาโน (kJ/kg-K)  $Cp_w$  คือ ค่าความร้อนจำเพาะของของไหลฐาน (kJ/kg-K)



ค่าความหนืดของไฮดรอนาโนสามารถคำนวณได้จากสมการของ Wang et al. [10] ดังแสดงในสมการที่ 5

$$\mu_{nf} = (1 + 7.3\alpha + 123\alpha^2)\mu_w \quad (5)$$

เมื่อ  $\mu_{nf}$  คือ ค่าความหนืดของไฮดรอนาโน ( $kg/m \cdot K$ )  $\mu_w$  คือ ค่าความหนืดของฐาน ( $kg/m \cdot K$ )

สมบัติด้านความร้อนของสารทำงานน้ำและของไฮดรอนาโนที่อุณหภูมิ 25 °C แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สมบัติด้านความร้อนของสารทำงาน

Working Fluids	Water	Graphene Nanofluids
Density ( $kg/m^3$ )	997.00	1,058.95
Viscosity (Pa.s)	0.000890	0.001298
K (W/m.K)	0.606460	0.706662
Cp (J/kg.K)	4,181.60	4,051.00

2.4 สมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Performances of Solar collector)

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่สภาวะคงที่ (Steady state) ที่เวลาใด ๆ ค่ารังสีอาทิตย์ที่ถูกดูดซับจะเท่ากับอัตราความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ และค่าอัตราความร้อนที่อยู่ภายในตัวดูดซับ สามารถแสดงได้ดังในสมการที่ 6 [11]

$$Q_{coll} = A_c [I_T F_R (\tau\alpha)_e - F_R U_L (T_{fi} - T_a)] \quad (6)$$

เมื่อ  $Q_{coll}$  คือ พลังงานความร้อนที่ได้รับจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (W)  $A_c$  คือ พื้นที่ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ( $m^2$ )  $U_L$  คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวมของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )  $I_T$  คือ ค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกลงบนระนาบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ( $W/m^2$ )  $F_R$  คือ อุณหภูมิสารทำงานในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ( $^\circ C$ )  $T_a$  คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม ( $^\circ C$ )  $(\tau\alpha)_e$  คือ ผลคูณประสิทธิภาพของแผงและค่าดูดซับรังสีอาทิตย์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์  $F_R$  คือ Heat removal factor

กรณีที่สารทำงานไม่มีการเปลี่ยนสถานะ ค่าพลังงานความร้อนสามารถคำนวณได้ดังในสมการที่ 7

$$Q_{coll} = \dot{m} C_p (T_{fo} - T_{fi}) \quad (7)$$

เมื่อ  $\dot{m}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของของไหล ( $kg/s$ )

$C_p$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะของสารทำงาน ( $J/kg \cdot ^\circ C$ )

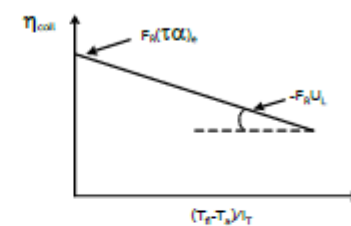
$T_{fo}$  คือ อุณหภูมิของของไหลขาออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ( $^\circ C$ )

$T_{fi}$  คือ อุณหภูมิของของไหลขาเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ( $^\circ C$ )

ค่าประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะเป็นดัชนีที่บอกความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานที่ได้จากแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งค่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 8

$$\eta_{coll} = \frac{Q_{coll}}{A_c I_T} = \frac{\dot{m} C_p (T_{fo} - T_{fi})}{A_c I_T} = F_R (\tau\alpha)_e - F_R U_L \frac{T_{fi} - T_a}{I_T} \quad (8)$$

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\eta_{coll}$  และ  $\frac{T_{fo} - T_a}{I_T}$  จะได้สมการเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยที่ค่าความชันของเส้นคือ ค่า  $F_R U_L$  ส่วนค่าที่ตัดแกนประสิทธิภาพคือ ค่า  $F_R (\tau\alpha)_e$



รูปที่ 3 สมการของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ [11]

โดยเงื่อนไขในการทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์หรือค่าประสิทธิภาพ ( $\eta_{coll}$ ) ที่กล่าวมาข้างต้นจะทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASHRAE Standard 93-2003 ภายใต้สภาวะคงที่ (Steady state condition)



2.5 ระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Water Heating System)

พิจารณาระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ค่าความร้อนที่สามารถผลิตได้จากระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถหาได้จากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของน้ำร้อนในถังเก็บน้ำร้อนที่เวลาเปลี่ยนไป โดยสามารถหาได้จากสมการที่ 9 และ 10

$$T_s^{t+\Delta t} = T_s + \frac{\Delta t}{M C_p} Q_{\text{cool}} \quad (9)$$

เมื่อ  $T_s^{t+\Delta t}$  คือ อุณหภูมิน้ำร้อนในถังเก็บน้ำร้อนที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเปลี่ยนไป (°C)

$T_s$  คือ อุณหภูมิน้ำร้อนในถังเก็บน้ำร้อน (°C)

$\Delta t$  คือ เวลาที่เปลี่ยนไป (sec)

$M$  คือ มวลของน้ำร้อนในถังเก็บน้ำร้อน (kg)

$$Q_s = M C_p (T_s^{t+\Delta t} - T_s) / \Delta t \quad (10)$$

เมื่อ  $Q_s$  คือ ความร้อนที่ได้รับจากระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (W)

โดยระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ต่อสู้อันเนื่องกับน้ำร้อนจากสารทำงานที่วิ่งผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยสามารถหาค่า UA ของสารทำงานแต่ละชนิด ทำได้โดยการเก็บข้อมูลค่าอุณหภูมิเข้าและออกของถังแลกเปลี่ยนความร้อนในถังเก็บน้ำร้อน และอุณหภูมิน้ำร้อนในถังเก็บน้ำร้อนแสดงดังสมการที่ 11 และสมการที่ 12

$$Q_{\text{cool}} = UA \Delta T_{LMTD} \quad (11)$$

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{co}-T_c)-(T_{ci}-T_{ci})}{\ln[(T_{co}-T_c)/(T_{ci}-T_{ci})]} \quad (12)$$

เมื่อ UA คือค่าผลคูณของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากท่อแลกเปลี่ยนความร้อนในถังและพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนความร้อนในถัง (W/°C)

$\Delta T_{LMTD}$  คือ ผลค่าอุณหภูมิเชิงล็อก (°C)

$T_{ci}$  คืออุณหภูมิสารทำงานเข้าของถังแลกเปลี่ยนความร้อน (°C)

$T_{co}$  คืออุณหภูมิสารทำงานออกของถังแลกเปลี่ยนความร้อน (°C)

$T_c$  คืออุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน

3. วิธีการทดลอง

การทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพื่อหาค่า  $F_R(\tau\alpha)_e$  และ  $F_R U_L$  จะคิดตั้งระบบตามรูปที่ 4 ซึ่งระบบจะประกอบไปด้วย ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบขนาด 0.15 m<sup>2</sup> (0.15 X 1 m<sup>2</sup>) ติดตั้งหันมาเมือง 18° ตามองทิศจุด ทิศหน้าไปทางทิศใต้ จำนวน 2 ชุด โดยชุดที่ 1 ใช้เป็นเป็นสารทำงาน ส่วนชุดที่ 2 จะใช้ของไหลทราฟิโนนาโม ที่ความเข้มข้น 0.1% w/w เป็นสารทำงาน ต่อเข้ากับถังพักสารทำงานขนาด 5 liter ที่มีฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electric Heater) ขนาด 200 W ที่ติดไว้กับถังเพื่อควบคุมอุณหภูมิสารทำงานตามที่ต้องการ ก่อนที่จะถูกปั๊มสารทำงานเป็นสารทำงานผ่านเครื่องวัดอัตราการไหลก่อนเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพื่อรับความร้อนจากแสงอาทิตย์ ทำให้อุณหภูมิสารทำงานสูงขึ้น และจะถูกดึงความร้อนออกโดยระบบระบายความร้อนแบบท่อน้ำเพื่อควบคุมอุณหภูมิให้ได้ตามต้องการ

- 1) ในการทดสอบจะต้องควบคุมให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady State Condition) ตามมาตรฐาน ASHRAE Standard 93-2003 โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 3
- 2) ใช้ของไหลทราฟิโนนาโมที่ความเข้มข้น 0.1% w/w เปรียบเทียบกับน้ำเป็นสารทำงาน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady State Condition) จะทำการเก็บข้อมูลค่า (1) อุณหภูมิสารทำงานเข้าและออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (2) ความเข้มข้นรังสีอาทิตย์ (3) อุณหภูมิถังเก็บน้ำร้อน (4) อุณหภูมิสารทำงานภายในถังพักสารทำงาน โดยค่าแห่งจุดเก็บข้อมูลแสดงดังรูปที่ 4 และนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์โดยใช้สมการที่ 6 สมการที่ 7 และ สมการที่ 8



กองควบคุมอาคาร สำนักวิชาสิ่งแวดล้อมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
วันที่ 30 สิงหาคม พ.ศ. 2561 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร

ตารางที่ 3 เงื่อนไขในการทดสอบระบบระดัดกับรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐาน ASHRAE Standard 93-2003 [11]

Variable	Maximum variation		Lower limit	Upper limit
	In between data periods	Within data periods		
Total irradiance normal to sun	-	± 32 W/m <sup>2</sup>	790 W/m <sup>2</sup>	-
Fraction of diffuse radiation	-	-	-	20%
Incident angle modifier	-	2%	-	-
Ambient temperature	Range <30 °C (84 °F)	±1.5 °C ±2.7 °F	-	-
Wind	-	-	2.2 m/s	4.5 m/s
Flow rate	See flow rate for all data points (0.02 kg/s-m <sup>2</sup> )	± 0.005 gpm	-	-
Inlet temperature	-	± Max of (1.0°C/1.8 °F, 2.9%)	-	-
Incident angle	-	±2.5°	-	-

การทดสอบสัปรดระดัดกับรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐานทดสอบ ASHRAE Standard 93-2003 คือตั้งจุดทดสอบสัปรดระดัดจากความร้อนของตัวกับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบโดยมีรายละเอียดดังนี้

- ใช้ตัวกับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบขนาด 0.15 m<sup>2</sup>

- ทดสอบสัปรดระดัดจากความร้อนของตัวกับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบตามค่ามาตรฐาน ASHRAE Standard 93-2003

- ชุดทดสอบตัวกับรังสีอาทิตย์ ที่นํ้าแรงไปทางทิศใต้ โดยเอียงทำมุมกับระนาบตามละติจูดที่ตั้งของสถานที่ทดสอบ ในกรณีนี้คือเอียงมุม 18 องศา

- ขณะทำการทดสอบค่ารังสีอาทิตย์ต้องมีค่า  $\geq 790 \text{ W/m}^2 \pm 32 \text{ W/m}^2$

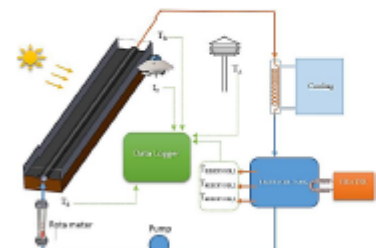
- ควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่ความดันคงที่ โดยติดตั้งที่คอมเปาผ่านบริเวณหน้าแผงค่าความเร็วเฉลี่ยระหว่าง 2.2-4.5 m/s

- ควบคุมอัตราการไหลของสารทำงานในระบบให้คงที่ที่ 0.0367 kg/s-m<sup>2</sup>

- ควบคุมอุณหภูมิสารทำงานเข้าตัวกับรังสีอาทิตย์ด้วยหลอดไฟที่้าโดยอุณหภูมิในการทดสอบตั้งแต่ 35-65 °C เพิ่มขึ้นหรือลง 5 °C

- ระบบจะต้องเข้าสภาวะคงที่ (Steady state condition) ก่อนทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิของไหลในถึงทุกสารทำงาน 3 จุด อัตราการไหลของสารทำงานด้วย Rota meter อุณหภูมิสารทำงานเข้าและออกตัวกับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม 1 จุด และความเข้มรังสีอาทิตย์ 1 จุด โดยใช้ Pyranometer บันทึกข้อมูลทั้งหมดเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) ที่ต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ทุกๆ 1 นาที ตลอดการทดลอง ตั้งแสดงในรูปแบบที่ 4

- นำข้อมูลที่ได้นำไปวิเคราะห์หาสัปรดระดัดของตัวกับรังสีอาทิตย์



รูปที่ 4 ลักษณะการทำงานของระบบและจุดเก็บข้อมูล

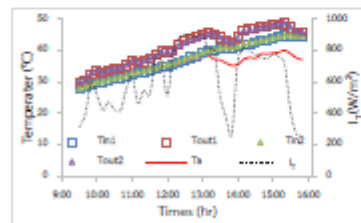




4. ผลการทดลอง

4.1 สมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิด

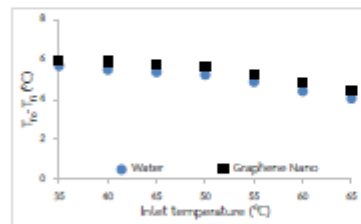
ในการทดลองจะใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบขนาด 0.15 m<sup>2</sup> จำนวน 2 ชุด จะต้องทำการศึกษาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทั้ง 2 ชุด ว่ามีสมรรถนะใกล้เคียงกันหรือไม่ โดยทดสอบที่สภาวะแวดล้อมในการทดสอบเดียวกัน สารทำงานชนิดเดียวกัน คัดแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ผลค่าอุณหภูมิสารทำงานเข้าและออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์

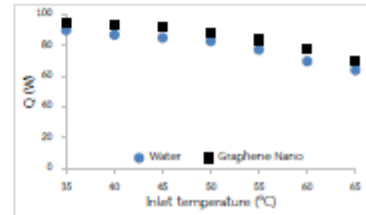
จากรูปที่ 5 พบว่า ผลค่าของอุณหภูมิสารทำงานเข้าและออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทั้ง 2 ชุด มีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งแสดงว่าแผงตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทั้ง 2 ชุด มีสมรรถนะทางความร้อนเท่ากัน

หลังจากทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของแผงรับรังสีอาทิตย์เรียบร้อยแล้วได้ทำการทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ระหว่างกรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนกับน้ำเป็นสารทำงาน โดยเมื่อพิจารณาระหว่างอุณหภูมิสารทำงานเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์กับผลค่าอุณหภูมิเข้าและออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์กับผลค่าอุณหภูมิเข้าและออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์

จากรูปที่ 6 พบว่า เมื่ออุณหภูมิสารทำงานเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ผลค่าอุณหภูมิเข้าและออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ลดลง เนื่องมาจากเมื่ออุณหภูมิสารทำงานเข้าระบบมีค่าสูงขึ้นแต่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมีค่าคงที่ ทำให้การสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาผลค่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงานจะให้อุณหภูมิสารทำงานที่ออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์สูงกว่ากรณีที่ใช้เป็นสารทำงานในรูปของอุณหภูมิโดยที่อุณหภูมิสารทำงานของไหลกราฟีนนาโนเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 35 °C ให้ผลค่าอุณหภูมิเข้าและออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์อยู่ที่ 4.37 °C และผลค่าอุณหภูมิของไหลกราฟีนนาโนที่อุณหภูมิสารทำงานเข้าตัวเก็บรังสี 65 °C ให้ผลค่าอุณหภูมิเข้าและออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ค่าที่ 2.36 °C

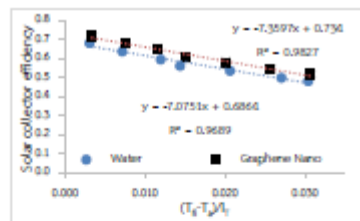


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนที่สภาวะผลิตได้กับอุณหภูมิเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์

จากรูปที่ 7 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสารทำงานเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์กับค่าความร้อนที่ผลิตได้จะเห็นได้ว่า ความร้อนที่ผลิตได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงานมีค่าสูงกว่ากรณีที่ใช้เป็นสารทำงานอย่างชัดเจน โดยที่อุณหภูมิสารทำงานเข้าระบบ 35 °C กรณีที่ใช้เป็นสารทำงานมีค่าความร้อนที่ผลิตได้เท่ากับ 61.36 W ส่วนกรณีที่ใช้เป็นของไหลกราฟีนนาโนให้ค่าความร้อนสูงสุดเท่ากับ 64.96 W เพิ่มขึ้นจากกรณีที่สารทำงานเป็นน้ำคิดเป็น 5.9% โดยจะสังเกตได้ว่าเมื่ออุณหภูมิของสารทำงานเข้าระบบเพิ่มสูงขึ้นมีผลทำให้ค่าความร้อนที่ผลิตได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ลดลงเป็นผลมาจากการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง



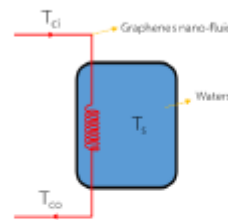
จากรูปที่ 8 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(T_f - T_a)/T_a$  กับค่าประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิสารทำงานเข้าสู่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์ลดลง เนื่องจากเกิดการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมเพิ่มมากขึ้น โดยที่อุณหภูมิสารทำงานเข้าสู่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 35 °C จะให้ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์อยู่ที่จุด เป็นไปในทำนองเดียวกันของสารทำงานทั้งสองชนิด โดยจะเห็นได้ว่าสารทำงานที่เป็นของไหลกราฟีนนาโนจะให้ค่าประสิทธิภาพที่สูงกว่าน้ำตลอดทุกช่วงของอุณหภูมิ สาเหตุมาจากของไหลกราฟีนนาโนมีสมบัติการนำความร้อนได้ดีกว่าน้ำ จากกราฟเมื่อพิจารณาเส้นแนวโน้มจะได้ว่า ของไหลกราฟีนนาโนมีค่า  $F_R(tc)_s$  เท่ากับ 0.7340 และ  $F_R U_L$  เท่ากับ 7.3597 W/m<sup>2</sup> ในส่วนของกรณีที่ใช้เป็นสารทำงานมีค่า  $F_R(tc)_s$  เท่ากับ 0.6864 และค่า  $F_R U_L$  เท่ากับ 7.0751 W/m<sup>2</sup> โดยจะเห็นได้ว่าสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์กรณีใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงานมีค่าสูงกว่ากรณีใช้น้ำเป็นสารทำงาน



รูปที่ 8 สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ กรณีใช้น้ำ และของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน

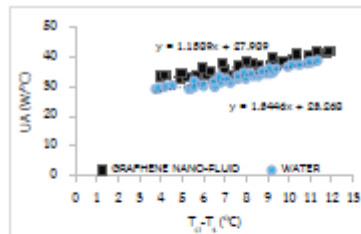
4.2 สมรรถนะระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

เนื่องจากการใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน ความร้อนที่ถ่ายเทให้กับน้ำในถังเก็บน้ำร้อนจะไม่สามารถถ่ายเทได้โดยตรง โดยจะต้องถ่ายเทความร้อนจากของไหลกราฟีนนาโนสู่น้ำในถัง ผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบจุ่มท่อของคณะผู้จัดรูปที่ 9



รูปที่ 9 ลักษณะการแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหลกราฟีนนาโนกับน้ำในถังเก็บน้ำร้อน

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาค่า UA เพื่อใช้ในการหาสมการจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยจากการทดสอบพบว่าสารทำงานที่เป็นของไหลกราฟีนนาโนให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมสูงกว่ากรณีที่สารทำงานเป็นน้ำ เนื่องจากสมบัติการนำความร้อนของของไหลกราฟีนนาโนที่สูงกว่าน้ำ โดยเมื่ออุณหภูมิสารทำงานที่เข้าถังเก็บน้ำร้อนเพิ่มสูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมก็จะสูงขึ้นตามไปด้วยดังรูปที่ 10 และสามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 13 และสมการที่ 14



รูปที่ 10 ค่า UA จากกรณีใช้น้ำและกรณีใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมกรณีที่สารทำงานเป็นของไหลกราฟีนนาโน

$$UA = 1.1589(T_d - T_a) + 27.989 \quad (13)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมกรณีที่สารทำงานเป็นน้ำ

$$UA = 1.3446(T_d - T_a) + 23.268 \quad (14)$$



กองประชุมวิชาการ ครั้งที่ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
วันที่ 30 ธันวาคม พ.ศ. 2561 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

### 5. สรุป

จากการศึกษาสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบโดยใช้ของไหลกราทินนาโนที่ความเข้มข้น 0.1 wt% และน้ำเป็นสารทำงาน ที่อัตราการไหลเชิงมวล 0.00367 kg/s สามารถสรุปได้ว่าของไหลกราทินนาโนสามารถช่วยเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบได้เมื่อเทียบกับน้ำ โดยสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์กรณีใช้สารทำงานเป็นของไหลกราทินนาโนมีค่า  $F_R(T_{in})_n$  เท่ากับ 0.7340 และ  $F_R U_L$  เท่ากับ 7.3597  $W/m^2$  ในส่วนของกรณีที่ใช้เป็นสารทำงานมีค่า  $F_R(T_{in})_n$  เท่ากับ 0.6864 และค่า  $F_R U_L$  เท่ากับ 7.0751  $W/m^2$

นอกจากนี้ยังสามารถหาค่า UA ของขดท่อความร้อนในถังเก็บน้ำร้อน โดยกรณีใช้ของไหลกราทินนาโนจะได้ค่า  $UA = 1.1509(T_{in} - T_c) + 27.989$  และกรณีใช้น้ำได้ค่า  $UA = 1.3446(T_{in} - T_c) + 23.268$

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ในการให้ความสนับสนุนเครื่องมืออุปกรณ์ในการทดลอง สถานที่สำหรับทำวิจัย รวมทั้งทุนสนับสนุนจากโครงการผลิตและพัฒนาบุคลากรบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียน สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ของวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ประจำปีการศึกษา 2559 และทุนอุดหนุนการวิจัยแก่นักศึกษาระดับอุดมศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2560 กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน (สนพ.) รวมทั้งขอขอบคุณหน่วยวิจัยด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม (SEE-U) วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษาในทุกด้าน

### เอกสารอ้างอิง

[1] Keopunya, M., 2559. การศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ของไหลนาโนร่วมกับอัลตราโซนิค. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

- [2] กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. การใช้ระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ Solar Water Heating. สำนักพิมพ์ บริษัท อีซี-อีเบอร์ ซิตี้ จำกัด, กรุงเทพฯ.
- [3] จรุงศักดิ์ ศรีจันทร์, ทวีวัฒน์ สุการส, สุจินต์ จิระชีวะรัตน์ และ มานนท์ สัจจกัณฑ์. 2545. เครื่องผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบโดยใช้เอทานอลเป็นสารแลกเปลี่ยนความร้อน A Flat Plate Solar Hot Water Using Ethanol for Heat Exchange. น. 12-20. ในรายงานการประชุมวิชาการ ครั้งที่ 1 มหาวิทยาลัยกรุงเทพ, กรุงเทพฯ.
- [4] Tiwari, A.K., Ghosh, P., Sarkar, J. 2013. Solar Water Heating Using Nano-fluids—A comprehensive Overview and Environmental Impact Analysis. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2014(3), 221-224.
- [5] Polvongsri, S. and T. Kiatirakot. 2010. Enhancement of Flat-Plate Solar Collector Thermal Performance with Silver Nano-fluid. The Second TSME International Conference on Mechanical Engineering, 2011.
- [6] Ghazatloo A., R.A.A.N.M.S. 2013. Convective heat transfer enhancement of graphene nanofluids in shell and tube heat exchanger. Experimental Thermal and Fluid Science, 2015(53), 136-141.
- [7] วิเชียร อดมณี และ เกียรติ นวชนก. 2558 การกระจายตัวของคอลลอยด์ออกไซด์ในน้ำด้วยวิธีค่าความเป็นกรดค่าและอัลตราโซนิค, น. 17-25. ในรายงานการประชุมวิชาการ ครั้งที่ 5 วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ฉบับพิเศษ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [8] Wasp, F.J., Solid-Liquid Flow Slurry Pipeline Transportation. Trans. Tech. Pub., Berlin., 1977.
- [9] Pak, B.C. and Y.J. Cho. 1997. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. Experimental Heat Transfer, 11(2), 151-170.



คณะวิศวกรรมศาสตร์ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
วันที่ 30 สิงหาคม พ.ศ. 2561 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

- [10] Wang, X., Choi, S.U.S. 1999. Thermal conductivity of nanoparticles-fluid mixture, *J. Thermophys. Heat Transfer*, 2000(13), 474-480.
- [11] ทนเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. 2537. การออกแบบระบบพลังงานความร้อน. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: คณะพลังงาน และ วัสดุ; สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.



The poster features a green background with a large white sun-like graphic in the center. On the left, there is a photograph of wind turbines in a field of pink flowers. The main text is in Thai, with 'TREC 11' in large letters at the top right. Below it, the text reads 'รายงานสืบเนื่อง Proceeding การประชุมสัมมนาวิชาการ รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 11'. A pink banner contains the theme: '“รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชน ตามหลักปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง”'. The dates and location are listed as 'วันที่ 28-30 พฤศจิกายน 2561 ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ'. The event is organized by three institutions, whose logos are shown below. At the bottom, there are logos of various sponsors and partners, including NIA, E@FT, IRPC, and others.

การประชุมสัมมนาวิชาการ รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 11

# TREC 11

รายงานสืบเนื่อง  
Proceeding

## การประชุมสัมมนาวิชาการ รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 11

**“รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชน ตามหลักปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง”**

วันที่ 28-30 พฤศจิกายน 2561 ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ  
The 11<sup>th</sup> Thailand Renewable Energy for Community Conference : TREC-11  
November 28-30,2018 Chaiyaphum Rajabhat University

ร่วมจัดโดย

สนับสนุนโดย



ขอมอบเกียรติบัตรนี้ให้ไว้เพื่อแสดงว่า

ภาณุวัฒน์ ทิมอยู่ สราวุธ พลวงษ์ศรี และสุรศักดิ์ กุยมาลี

บทความเรื่อง

“การศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในท่อที่การไหลแบบราบเรียบ  
โดยใช้หน้าและของไหล กราฟิคนาโนเป็นสารทำงาน”

ได้เข้าร่วมการนำเสนอบทความ

งานประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 11

ระหว่างวันที่ 28 – 30 พฤศจิกายน 2561

ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ

รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล  
อธิการบดีมหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิรัชย์ โยชนรินทร์  
นายกสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย

นายมนตรี ชาลีเครือ  
นายกองค์การบริหารส่วนจังหวัดชัยภูมิ



สารบัญ

NC99	การปล่อยละอองและฝุ่นที่ปล่อยจากท่อส่งแก๊สกับชุมชน การจัดการผลิตภัณฑ์ 80 แยกวัดดี สมพล ชิมชองการดี ชนะ จันทน์อ่ำ และจณนภา แนวคิดดี	184
E04	การศึกษาผลกระทบจากการก่อสร้างโรงไฟฟ้าชีวมวลโดยใช้วัสดุขี้เถ้าจากคนไฉ่ วัชรุณศรี วรณนท และสุวิทย์ วิเศษเกียรติ์	192
E17	การศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการพัฒนาโรงไฟฟ้าชีวมวลร่วมกับแปรรูปแอมโมเนียจากขี้เถ้าใน แนวคิด ชัยยุทธ ไชยธรรม วัฒนชัย โพธิ์นทร์ และณัฐภัทร ทรัพย์นันทน์	200
E18	การเปรียบเทียบการลดคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพโดยใช้แอมโมเนียจากขี้เถ้าและขี้เถ้า เจริญรัตน์ ฝอยพิชัย และวัฒนชัย โพธิ์นทร์	208
E20	สถานการณ์เชิงนิเวศจากบริษัทผลิตน้ำตาลอินทรีย์ นิตยธรรมา นนท์วิญญู พงศกร เตชะพิเชษฐ และรุ่งตะวัน วิวัฒน์ศิริกุล	215
E21	การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้สารในแปลงเกษตร ฤกษ์นิรันดร์ แซ่ท้าว และรุ่งตะวัน วิวัฒน์ศิริกุล	223
E22	การศึกษาผลกระทบจากการเจริญเติบโตของระบบเกษตรเพื่อการประยุกต์ใช้พลังงาน พนมพิภพศรี สุวดี นนทรรัตน์ ศาศิ ปวีณา สุวรรณรัตน์ ชูพงศ์ ไชยพลา ฤกษ์นิรันดร์ พงศกร และธีระพงษ์ บุญวิภา	231
E27	บทบาทของไม้ในการผลิตชีวมวล พวงนง และณิชา	238
E36	การศึกษาเทคโนโลยีการแปรรูปกากเคมีควรมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการผลิตเอธิลเอทิลชีวภาพ ปรางค์ทิพย์ แก้วเพ็ญทอง และอรุณฤทัย วันมิ่งใจ	243
E37	การวิเคราะห์ผลกระทบและการใช้ระบบชีวภาพกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม พิศนภพ แสงธม จิตต์ศักดิ์ ชูศักดิ์ และวิภาดา แก้วสุริยวดี	250
E39	การผลิตประติมากรรมจากเศษชีวมวลระดับชุมชนด้วยอุปกรณ์รีไซเคิล สารดา พงสุวิทย์พันธ์ วิสุทธ์ อธิพัฒน์ และพรชัย ไชยม	258
E42	การศึกษาประเมินประสิทธิภาพการนำเศษขี้เถ้าจากโรงผลิตเอธิลเอทิลชีวภาพมาใช้เป็นปุ๋ยและของเล่น การศึกษาในเป็น สาขาวิชา <b>ภาควิชา วัฒนฤ สรรค์ พวงนง และสุวิทย์ ฤกษ์นิรันดร์</b>	265
E44	การศึกษาผลกระทบของมลพิษของแก๊สต่อประสิทธิภาพการทำงานของกังหันลมขนาดเล็กแบบชนิดพัดลมบ้าน วรกร วิเศษจิตต์ วิรัช ไรชวินทร์ และศุภา จันทน์ทิพย์	273
E46	สู่บทบาทพลังงานสะอาดที่ช่วยลดมลพิษด้วยเทคโนโลยีพลังงานทดแทน ไชยธรรม วัฒนชัย และณัฐภัทร ทรัพย์นันทน์	286
E48	ปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนการผลิตเอธิลเอทิลชีวภาพ กรณีศึกษา โรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก จังหวัดกำแพงเพชร พิสุทธิ สุวฤกษ์พงศ์ และประสิทธิ์ นนทรรัตน์	293
E53	Efficiency of the vertical axis wind turbine pump a case studies: Bung Bonaphet nature and wildlife education center at the Bung Bonaphet waterfowls park in Nakhon Sawan Province Thingyu Pirithong Komain maimun and Piyalap Manakit	301
E55	การผสมผสานพลังงานทดแทนใช้ในระบบพลังงานชุมชน สันมา แจ่มจ่า วรรณิศา วรรณภท แก้วธม และสนธิ์กร ชลาธิ์	313



IE42

การศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในท่อที่การไหลแบบราบเรียบโดยใช้น้ำและของไหล  
กราฟีนนาโนเป็นสารทำงาน  
The Study of Convective Heat Transfer Coefficient inside Circular Tube with Laminar  
Flow by using Water and GrapheneNanofluid as a Working Fluid

ภาณุวัฒน์ วัฒนอยู่<sup>1</sup> สราวุธ พวงวงศ์<sup>1\*</sup> และสุศักดิ์ กุศลมาลี<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ.เชียงใหม่ 50290

<sup>2</sup> สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ.เชียงใหม่ 50290

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อของหลอดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 8 mm ยาว 1 m ให้ความร้อนที่ผิวท่อสม่ำเสมอ (Uniform heat flux) ใช้ของไหลกราฟีนนาโนที่ความเข้มข้น 0.1%w เป็นสารทำงานเปรียบเทียบกับน้ำปราศจากไอออน โดยทำการศึกษากายใต้สภาวะการไหลแบบราบเรียบที่อัตราการไหลของสารทำงาน 120 170 และ 220 cm<sup>3</sup>/min จากภาพทดลองพบว่า การใช้สารทำงานที่เป็นของไหลกราฟีนนาโนสามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อ 40% เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นสารทำงาน โดยการไหลของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงานมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนอยู่ในช่วงประมาณ 600-800 W/m<sup>2</sup>·K สูงกว่ากรณีที่สารทำงานเป็นน้ำปราศจากไอออนเป็นสารทำงานทุกอัตราการไหลโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในอยู่ในช่วงประมาณ 400-600 W/m<sup>2</sup>·K

**คำสำคัญ:** ของไหลกราฟีนนาโน สัมประสิทธิ์การพาความร้อน การไหลแบบราบเรียบ การให้ความร้อนที่ผิวท่อสม่ำเสมอ

\*Corresponding author: Tel: 086-657-0186, E-mail address: Saeavooth@hotmail.com

#### บทนำ

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีการนำไปใช้อย่างแพร่หลายทั้งใน ภาคอุตสาหกรรม โรงไฟฟ้า กระบวนการผลิต การขนส่งและอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น สารทำงานที่นิยมใช้ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับรูปแบบ และช่วงอุณหภูมิการใช้งาน เช่น น้ำ เอทิลีนไกลคอลน้ำเป็นต้น ในการพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นมีหลายวิธี วิธีหนึ่งคือการเลือกใช้สารทำงานที่มีสมบัติด้านการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสม ตัวอย่าง เช่นในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ต้องการออกแบบให้มีขนาดเล็กหรือต้องการลดขนาดพื้นที่การถ่ายเทความร้อนให้เหมาะสมกับพื้นที่การใช้งาน ประกอบกับในอนาคตพลังงานจะเป็นสิ่งที่หาได้ยากและมีมูลค่าสูงขึ้น มีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยการเลือกใช้สารทำงานให้เหมาะสม เช่น การเติมอนุภาคของโลหะที่มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตรลงไปในของไหลพื้นฐานซึ่งทำให้ได้ของไหลที่มีค่าการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น[1] อนุภาคของแข็งระดับนาโนจะถูกแขวนลอยในสารทำงานเร็วกว่าของไหลนาโน การใช้อนุภาคนาโนในของไหลเพื่อเพิ่มสมบัติทางความร้อนให้สูงขึ้นได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก สารแขวนลอยดังกล่าวเร็วกว่า Nanofluids เนื่องจากมีขนาดระดับนาโนเมตรมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่เปลี่ยนแปลง โดยมีค่าการนำความร้อนที่ดีเช่นเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ดี ทำให้เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานทางด้านความร้อน โดย Phanindra



และคณะ [2] ทำการศึกษาเชิงทดลองเกี่ยวกับการถ่ายโอนความร้อนและการไหลเวียนของของเหลวนาโนที่ประกอบด้วยน้ำกับอนุภาคเงิน และอนุภาคของ  $Al_2O_3/Cu$  ความเข้มข้น 0.10 % นำไปใช้ในห้องแล็บเปลี่ยนความร้อนแบบท่อ ซึ่งท่อด้านในทำด้วยทองแดงที่มีการนำความร้อนสูง จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนในตัวแลกเปลี่ยนความร้อนโดยรวมจะเพิ่มขึ้นเท่ากับ 10.34% เมื่อเทียบกับน้ำมีนบริสุทธิ์ ส่วน Siva Eswara Rao และ คณะ [3] ได้ทำการศึกษาการถ่ายโอนความร้อนของไหล  $Al_2O_3$  /water nano fluid ที่มีลักษณะการไหลแบบเป็นป่วน ผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (shell and tube heat exchanger) พบว่า เมื่อความเข้มข้นโดยปริมาตรเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าการนำความร้อน ความหนาแน่นและความหนืดของของเหลวนาโนเพิ่มขึ้น และเมื่อจำนวน Reynolds number คง มีผลทำให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (friction factor) ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยรวมสูงที่สุดเท่ากับ  $1190.76 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  สำหรับ  $Al_2O_3$  /water nano fluid ที่ความเข้มข้น 2.5% ที่อัตราการไหลของมวล  $0.946 \text{ L/s}$  และอัตราการถ่ายโอนความร้อนโดยรวมของน้ำเท่ากับ  $218.29 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  ที่อัตราการไหลของมวล  $0.113 \text{ L/s}$

นอกจากอนุภาคนาโนต่างๆ เช่น อะลูมินา โพลีเอทิลีน ท่อนคาร์บอนนาโนและซิลิคอนไดออกไซด์ที่ถูกนำมาใช้ในการเตรียมสารนาโนฟลูอิดแล้ว พบว่ากราฟีนนาโนสามารถให้ค่าการนำความร้อนสูงกว่าเมื่อเทียบกับสารนาโนฟลูอิดอื่น ๆ [4] เมื่อพิจารณาจากค่าการนำความร้อนของโลหะพบว่า ทองแดงมีค่าการนำความร้อน  $4 \text{ W/cm} \cdot \text{K}$  ส่วนกราฟีนจะมีค่าการนำความร้อนอยู่ที่  $50 \text{ W/cm} \cdot \text{K}$  [5] ซึ่งสูงกว่าทองแดงประมาณ 12.5 เท่า โดย Hossain Alkhatib-Zarjani และ คณะ [6] ได้ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของไหลกราฟีนนาโน ในลักษณะการไหลแบบราบเรียบภายในท่อ มีการให้ฟลักซ์ความร้อนที่ผนังท่ออย่างสม่ำเสมอ พบว่าที่ความเข้มข้น 0.02% โดยปริมาตร ที่ Reynolds Number เท่ากับ 1,850 สามารถเพิ่มค่าการนำความร้อน 10.3% และเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน 14.2% เมื่อเทียบกับน้ำ

จากประโยชน์ของของเหลวนาโนที่ช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของไหล และศักยภาพการนำความร้อนที่สูงกว่าโลหะของกราฟีนนาโน งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาคุณลักษณะในการถ่ายโอนความร้อนของไหลกราฟีนนาโนภายใต้ภาวะการไหลแบบราบเรียบ ในท่อทรงกลมภายใต้การให้ความร้อนที่ผิวท่อของท่ออย่างสม่ำเสมอ (uniform heat flux) ที่อุณหภูมิของสารทำงานเริ่มต้นเข้าระบบแตกต่างกัน และศึกษาผลของอุณหภูมิสารทำงานและอัตราการไหลที่มีผลต่อค่าการพาความร้อนของไหลกราฟีนนาโนเทียบกับน้ำ

#### วิธีการวิจัย

การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อทองแดงนี้ จะต้องทำการเตรียมสารทำงานกราฟีนนาโนที่ความเข้มข้น 0.10%w โดยใช้วิธีการเตรียม 2 ขั้นตอน โดยการเตรียมผงกราฟีนนาโนที่มีขนาดอนุภาคประมาณ  $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m} \times 2 \text{nm}$  จำนวน 3 กรัมผสมเข้ากับน้ำปราศจากไอออน 3 Liter ด้วยเครื่องอัลตราโซนิกที่มีความถี่ 40kHz เป็นเวลา 90 min รักษาอุณหภูมิสารทำงานไม่ให้นเกิน  $35^\circ\text{C}$  จะได้สารทำงานที่มีความเข้มข้น 0.10 %w หลังจากนั้นนำสารทำงานที่ได้เทลงในถังพักสารทำงาน (Reservoir tank) ขนาด 5 Liter ที่มีอุณหภูมิคงที่ป้องกันการสูญเสียความร้อนด้วยฮีตเตอร์ชนิดแผ่นขนาด 400W ภายใต้ถังเพื่อช่วยควบคุมอุณหภูมิสารทำงานไว้ที่  $35 \pm 0.5$  และ  $65^\circ\text{C}$  สารทำงานจะไหลเวียนในระบบโดยปั๊ม DV ขนาด  $12 \text{ V}$  ซึ่งควบคุมอัตราการไหลให้คงที่ที่ 120 170 และ 220  $\text{cm}^3/\text{min}$  ด้วยชุดวัดอัตราการไหล (Rotameter) เมื่อสารทำงานไหลผ่านเข้าชุดท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 8 mm ที่พื้นผิวของท่อไฟฟ้าขนาด 80 W เพื่อให้ความร้อนต่อพื้นที่ผิวท่อสม่ำเสมอ (Uniform heat flux) และมีการหมุนวนบริเวณผิวท่อเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนหลังจากผ่านชุดท่อทองแดงสารทำงานจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น จากนั้นจะทำการลดอุณหภูมิสารทำงานด้วยชุดระบายความร้อนแบบท่อแก้วเพื่อให้สารทำงานมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับสารทำงานในถังพัก เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady state condition) จะทำการบันทึกข้อมูลทุกๆ 30 วินาที เช่น

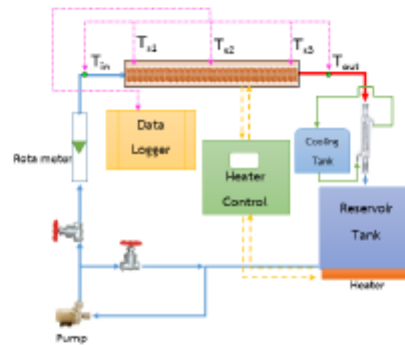


อุณหภูมิสารทำงานที่เข้าและออกจากท่อทองแดง อุณหภูมิผิวภายนอกท่อทองแดง อัตราการไหลของสารทำงาน โดย  
ตำแหน่งการวัดแสดงดังภาพที่ 1 เปรียบเทียบกับชุดทดสอบอีก 1 ชุด ที่ใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นสารทำงาน เพื่อนำ  
ข้อมูลต่างๆไปวิเคราะห์ค่าผลต่างอุณหภูมิสารทำงานเข้าและออกท่อทองแดง ค่าความร้อนที่สารทำงานได้รับ  
ขึ้นประสิทธิภาพการพาความร้อนภายในท่อทองแดงของสารทำงาน

การให้ความร้อนด้วยชุดทดสอบสม่ำเสมอที่ท่อทองแดง (Uniform heat flux) ดังภาพที่ 2 ความร้อน  
จะถ่ายเทจากชุดทดสอบไฟฟ้าสู่ผนังด้านนอกท่อทองแดง และเกิดการถ่ายเทไปยังด้านใน จากนั้นสารทำงานก็จะรับ  
พลังงานความร้อนจากผนังด้านในโดยการพาความร้อน โดยสารทำงานไหลเข้าท่อทองแดงด้วยอุณหภูมิ  $T_p$  และออกจาก  
ท่อทองแดงด้วยอุณหภูมิ  $T_o$  ความร้อนที่สารทำงานได้รับสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 6 ของ Duffie and Beckman  
[7]

$$Q = \dot{m}C_p(T_o - T_p) \tag{1}$$

โดย  $Q$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)  $\dot{m}$  คือ อัตราการไหลของสารทำงานในระบบ (kg/s)  $T_o$  คือ  
อุณหภูมิสารทำงานก่อนเข้าท่อทองแดง (°C)  $T_p$  คือ อุณหภูมิสารทำงานหลังออกจากท่อทองแดง (°C)

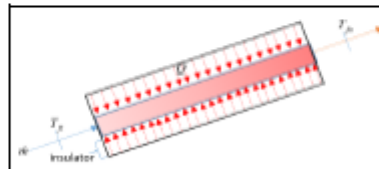


ภาพที่ 1 ระบบทดสอบขึ้นประสิทธิภาพการพาความร้อน

ขึ้นประสิทธิภาพการพาความร้อนสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของความร้อนที่เกิดจากการพาความร้อนในท่อ  
ทรงกลม[8] ดังสมการที่ 2

$$h = \frac{Q}{(A_s)(T_s - T_f)} \tag{2}$$

โดย  $h$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของสารทำงานในท่อ (W/m<sup>2</sup>×K)  $A_s$  คือ พื้นที่ภายในท่อทองแดง  
(m<sup>2</sup>)  $T_s$  คือ อุณหภูมิผิวท่อทองแดงด้านนอกเฉลี่ย (°C)  $T_f$  คืออุณหภูมิสารทำงานเฉลี่ย (°C)

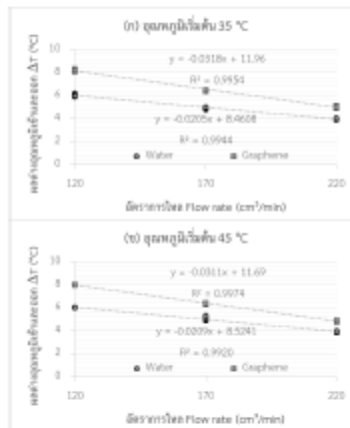


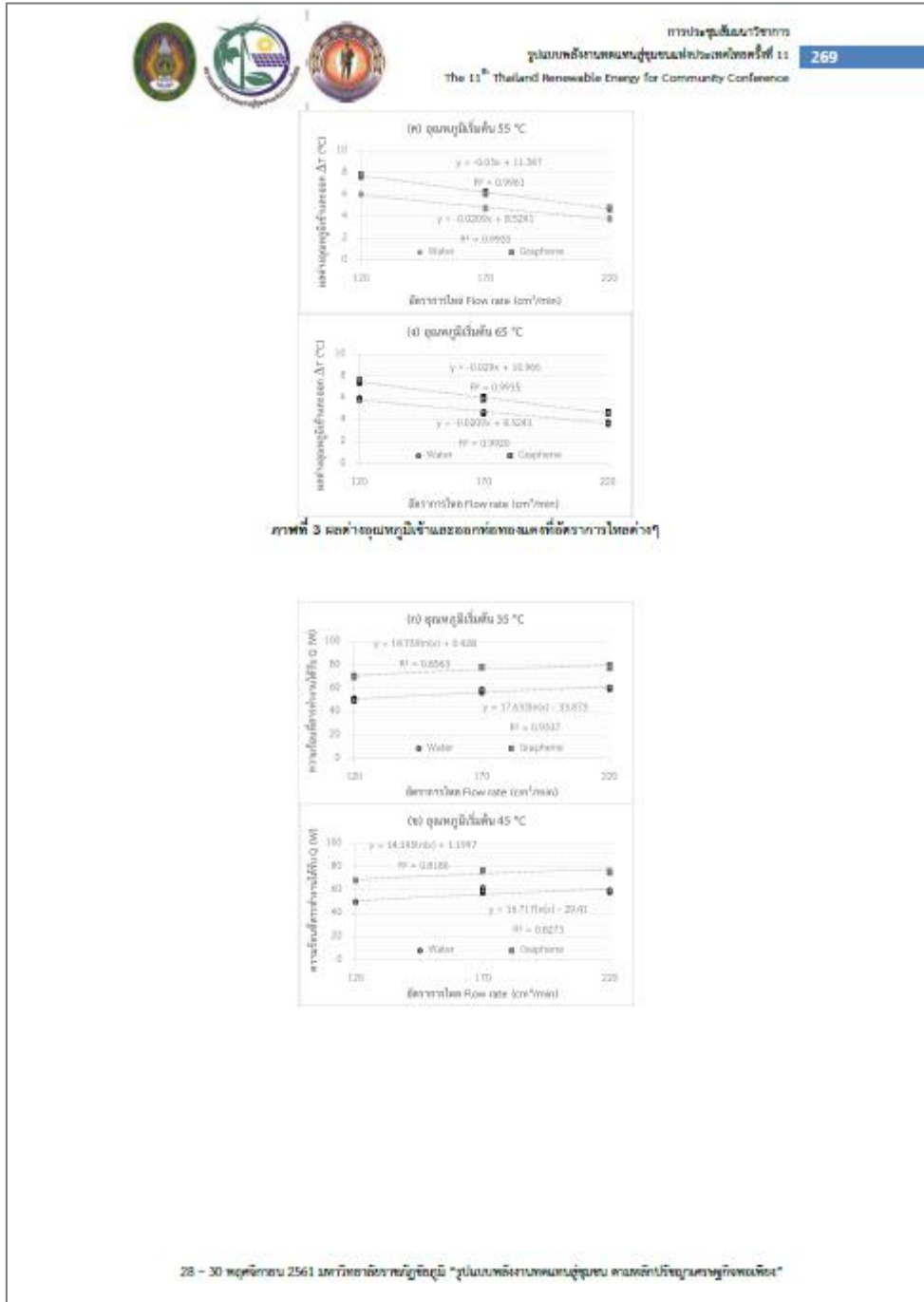
ภาพที่ 2 มีลักษณะการถ่ายเทความร้อนจากฮีตเตอร์สู่สารทำงานภายในท่อทองแดงทรงกลม



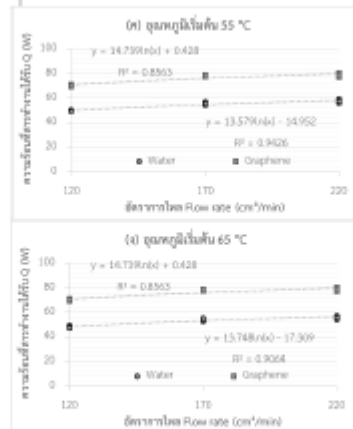
**ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย**

ในการทดสอบเพื่อหาผลต่างอุณหภูมิเข้าและออกที่ท่อทองแดง จะใช้ของไหลกราฟีนนาโนที่มีความเข้มข้น 0.10%w ที่อัตราการไหล 120 170 และ 220 cm<sup>3</sup>/min โดยทำการเพิ่มอุณหภูมิของสารทำงานเริ่มต้นเข้าที่ท่อทองแดงที่ 35 45 55 และ 65 °C เปรียบเทียบกับน้ำ คัดเลือกภาพที่ 3 จะเห็นได้ว่า ผลต่างอุณหภูมิของสารทำงานที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนให้ค่าสูงกว่ากรณีที่ใช้เป็นสารทำงานในทุกช่วงของอุณหภูมิสารทำงานเริ่มต้น ซึ่งผลต่างอุณหภูมิจะลดลงตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น โดยพบว่าอุณหภูมิสารทำงานเริ่มต้นเข้าที่ท่อทองแดง 35°C ที่อัตราการไหล 120 cm<sup>3</sup>/min กรณีที่เป็นของไหลกราฟีนนาโนให้ผลต่างอุณหภูมิเข้าและออกที่สูงที่สุดเท่ากับ 8.20 °C เพิ่มขึ้นถึง 36.21% เมื่อเทียบกับน้ำมีค่าเท่ากับ 6.02 °C ดังภาพที่ 3(ก) และเมื่อพิจารณาตามอุณหภูมิเริ่มต้นที่เพิ่มขึ้นที่ 35 45 55 และ 65 °C ที่อัตราการไหล 120 cm<sup>3</sup>/min ผลต่างของอุณหภูมิสารทำงานที่เข้าและออกที่ท่อทองแดงในกรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนนาโนจะลดลงจาก 8.20 8.00 7.76 และ 7.53 °C ตามลำดับ เนื่องจากอุณหภูมิสารทำงานสูงขึ้นทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น และจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสารทำงานเพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงผลต่างอุณหภูมิเข้าและออกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น












ภาพที่ 4 ความร้อนที่ได้รับ และอัตราการไหลของสารทำงาน

จากภาพที่ 4 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนที่สารทำงานได้รับตามอัตราการไหลของสารทำงานที่เพิ่มขึ้น พบว่า เมื่ออัตราการไหลของสารทำงานเพิ่มขึ้นค่าความร้อนที่สารทำงานได้รับจะเพิ่มขึ้นตาม เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสารทำงานที่เป็นของไหลกราฟีนกับน้ำจะเห็นได้ว่ากรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนเป็นสารทำงานความร้อนที่สารทำงานได้รับสูงกว่ากรณีที่ใช้เป็นสารทำงานทุกช่วงอุณหภูมิของสารทำงานเริ่มต้น โดยที่อุณหภูมิสารทำงานเริ่มต้นเท่ากับ 35°C ที่อัตราการไหล 220 cm<sup>3</sup>/min กรณีที่ใช้ของไหลกราฟีนเป็นสารทำงานความร้อนที่สารทำงานได้รับสูงสุดมีค่าเท่ากับ 78.79 W เพิ่มขึ้นจากกรณีที่ใช้เป็นสารทำงาน 30.36 % โดยกรณีที่ใช้เป็นสารทำงานมีค่าเท่ากับ 60.44 W ดังแสดงในภาพที่ 4(ก) และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิสารทำงานที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความร้อนที่สารทำงานได้รับลดลงเนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 35°C ให้ค่าความร้อนสูงสุดที่อุณหภูมิตั้งแต่ 45-55 และ 65 °C ตามลำดับ

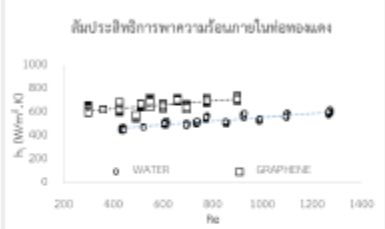
จากภาพที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อของแฉกแต่ละชนิดในเชิงการไหลแบบราบเรียบ โดยพบว่า เมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น(อัตราการไหลเพิ่มขึ้น)ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อเพิ่มขึ้นตาม และยังพบว่ากรณีที่ใช้สารทำงานเป็นของไหลกราฟีนกับน้ำให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อสูงกว่ากรณีที่ใช้สารทำงานเป็นน้ำปราศจากไอออน โดยกรณีที่ใช้สารทำงานเป็นของไหลกราฟีนกับน้ำจะมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนอยู่ในช่วงประมาณ 600-800 W/m<sup>2</sup>·K ส่วนกรณีที่ใช้สารทำงานเป็นน้ำปราศจากไอออนจะมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนอยู่ในช่วงประมาณ 400-600 W/m<sup>2</sup>·K เพิ่มขึ้นประมาณ 200 W/m<sup>2</sup>·K คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้น 40% โดยเฉลี่ย และจะสังเกตได้ว่าสารทำงานที่เป็นของไหลกราฟีนกับน้ำจะมีช่วงของเลขเรย์โนลด์ต่ำกว่าน้ำ เนื่องจากของไหลกราฟีนกับน้ำมีความหนืดที่ต่ำกว่าน้ำและมีความหนาแน่นมากกว่า ทำให้มีช่วงของเลขเรย์โนลด์ที่ต่ำกว่า

การประชุมวิชาการ  
รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 11  
The 11<sup>th</sup> Thailand Renewable Energy for Community Conference

271

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อทองแดง



ภาพที่ 5 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อทองแดง

**สรุปผลการวิจัย**

งานวิจัยนี้เป็นการทดสอบการใช้ของไหลกราฟีนนาโนขนาดอนุภาคประมาณ 2 ไมครอน x 2 ไมครอน x 2 ไมครอน ที่ความเข้มข้น 0.10 %w และนำปราศจากไอออนเป็นสารทำงานในท่อทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 8 มม. ให้ความร้อนคงที่ที่ผิวท่อสม่ำเสมอ (Uniform heat flux) ด้วยหลอดไฟฟ้าขนาด 80 W ทดสอบที่อัตราการไหลแบบราบเรียบ 120 170 และ 220 cm<sup>3</sup>/min ควบคุมอุณหภูมิสารทำงานเริ่มต้นให้อยู่ที่ 35 45 55 และ 65 °C เพื่อหาคุณสมบัติของไหลการถ่ายเทความร้อนภายในท่อ โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ว่า

เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นความร้อนที่สารทำงานได้รับจะเพิ่มสูงขึ้นไปด้วย โดยกรณีใช้ของไหลกราฟีนนาโนเป็นสารทำงานที่อัตราการไหล 220 cm<sup>3</sup>/min สารทำงานได้รับความร้อนสูงสุดที่จุดที่ 78.79 W รองลงมาเป็นที่อัตราการไหล 170 cm<sup>3</sup>/min และ 120 cm<sup>3</sup>/min และมีค่าสูงกว่ากรณีการใช้น้ำเป็นสารทำงาน เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อพบว่า ของไหลกราฟีนนาโนมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อประมาณ 600-800 W/m<sup>2</sup>.K สูงกว่ากรณีใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นสารทำงานที่มีค่า 400-600 W/m<sup>2</sup>.K ซึ่งคิดเป็นค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อเพิ่มขึ้น 40%

**กิตติกรรมประกาศ**

ขอขอบพระคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ในการให้ความสนับสนุนเครื่องมือ อุปกรณ์ในการทดลอง สถานที่สำหรับทำวิจัย รวมทั้งสนับสนุนจากโครงการผลิตและพัฒนาศึกษาศึกษาบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียน สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ขอวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ประจำปีการศึกษา 2559 และทุนอุดหนุนการวิจัยแก่นักศึกษาระดับอุดมศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2560 กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน (สพท.) รวมทั้งขอขอบคุณนายวิจัยด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมจังหวัดยะลา (SEE-U) วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ที่ให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษาในทุกด้าน

**เอกสารอ้างอิง**

- [1] Dongsheng Wen, Y. D. (2004). Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions. *Heat and Mass Transfer*. 47, 5181–5188.
- [2] Phanindra, Y. Kumar, S. D. and Pugalazhendi, S. (2018). Experimental Investigation on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Cu/Oil Hybrid Nano fluid using Concentric Tube Heat Exchanger. *Materials Today*. 5 (15), 12142-12150.

28 - 30 พฤศจิกายน 2561 มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ "รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชน ตามหลักปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง"



- [3] Siva Eswara Rao, M.Sreeramulu, D. Rao,C.J. and Ramana, M.V. (2017). Experimental Investigation on Forced Convective Heat Transfer. **International Conference on Advancements in Aeromechanical Materials for Manufacturing**. 4 (11), 8717-8723.
- [4] Bahraei, M.Heshmatian, S.and Keshavarzi, M. (2018). Multi-attribute optimization of a novel micro liquid block working with green graphene nanofluid regarding preferences of decision maker. **Applied Thermal Engineering**. 143 (11), 11-21.
- [5] วิเศษสุวรรณคำชาติสารธชาติ. (2013). แกรฟีน ตอนที่ 1: การสังเคราะห์คาร์บอนรูปแบบใหม่. **NARESUAN PHAYAO JOURNAL**. 6, 10-24
- [6] Hossein, A.Z. Majid, S.A. Mohsen, M. Farhad, S.and Ahad, M. (2016). Experimental investigation of laminar forced convective heat transfer of Graphene-water nanofluid inside a circular tube. **International Journal of Thermal Sciences**.100 (11), 316-323.
- [7] John A. Duffie and William A. Beckman. (1980). **Solar Engineering of Thermal Process**.New York, USA: John Wiley & Sone.
- [8] พงษ์เกียรติ์ เกียรติศิริโรจน์. (2014). **HEAT TRANSFER**.เชียงใหม่: สถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.



## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล นายภาณุวัฒน์ ทิมอยู่  
เกิดเมื่อ 30 กันยายน 2536  
ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2559 ปริญญาตรี สาขาพลังงานทดแทน  
วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้  
จังหวัดเชียงใหม่  
พ.ศ. 2555 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสุโขทัยวิทยาคม  
จังหวัดสุโขทัย  
Email: Panuwattimoiu@gmail.com

