

การเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของท่อความร้อนโดยใช้  
สารทำความเย็นผสมอนุภาคนาโน

ปริญญาานิพนธ์  
ของ  
ดิฐพงศ์ ทองคำ

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
เมษายน 2551

การเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของท่อความร้อนโดยใช้  
สารทำความเย็นผสมอนุภาคนาโน

ปริญญาานิพนธ์  
ของ  
ดิฐพงศ์ ทองคำ

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

เมษายน 2551

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของท่อความร้อนโดยใช้  
สารทำความเย็นผสมอนุภาคนาโน

บทคัดย่อ  
ของ  
ดิฐพงศ์ ทองคำ

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
เมษายน 2551

ดิฐพงศ์ ทองคำ.(2551).การเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของท่อความร้อนโดยใช้สารทำความเย็นผสมอนุภาคนาโน.ปริญญาโท วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล).กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม :  
อาจารย์ ดร.ไพศาล นาผล, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย อัญมมงคล.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของท่อความร้อนโดยการผสมอนุภาคนาโนลงในสารทำงานที่เป็นสารทำความเย็น ซึ่งสารทำงานที่ใช้ในการทดสอบคือสารทำความเย็น R11 และใช้อุณหภูมิของไทเทเนียม โดยท่อความร้อนสร้างจากทองแดงปลายปิดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ยาว 60 เซนติเมตร การทดสอบแบ่งออกเป็นสองส่วนคือใช้สารทำความเย็น R11 เป็นสารทำงานเพียงอย่างเดียว และใช้สารทำความเย็นผสมกับอนุภาคนาโนของไทเทเนียม ซึ่งในการทดสอบจะทำการปรับกำลังไฟฟ้าในช่วง 30-70 วัตต์ และมุมเอียงของท่อความร้อนอยู่ในช่วง 0-90 องศา จากการทดสอบพบว่า ที่มุม 60 องศาจากแนวระดับ และที่ปริมาตรสารทำความเย็นที่ 50% ของปริมาตรท่อ ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดที่ 71.2 % และเมื่อเปลี่ยนสารทำงานเป็นสารทำความเย็นผสมกับอนุภาคนาโน ที่อัตราส่วนผสมอนุภาคนาโน 0.1% โดยปริมาตรของสารทำความเย็น 50%ของปริมาตรท่อพบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของท่อความร้อนสูงสุด

คำสำคัญ (Keywords): ท่อความร้อน / สารทำความเย็น / ของไหลนาโน / การถ่ายเทความร้อน

ENHANCEMENT THERMAL EFFICIENCY OF HEAT PIPE BY  
REFRIGERANT – NANOPARTICLES MIXTURES

AN ABSTRACT

BY

DITAPONG THONGKUM

Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Master of Engineering Degree in Mechanical Engineering  
at Srinakharinwiroj University

April 2008

Ditapong Thongkum.(2008). *Enhancement Thermal Efficiency of Heat Pipe by Refrigerant – Nanoparticles mixtures*. Master thesis, M.Eng.(Mechanical Engineering).

Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University.

Advisor Committee: Dr.Paisarn Naphon, Asst. Prof. Dr. Pichai Asadamongkon,

In the present study, the enhancement of heat pipe thermal efficiency by refrigerant – nanoparticles mixtures is presented. The base working fluid of heat pipe is refrigerant 11 (R11) and titanium particles as nanoparticles. Heat pipes are fabricated from the straight copper tube with diameter and length of 15 ,600 mm, respectively. The heat pipes with pure refrigerant and nanofluid as working fluid are tested. The input power and tilt angle are various from 30 – 70 watt and 0 – 90<sup>o</sup> , respectively. At heat pipes tilt angle of 60 degree, 50% charge amount of working fluid, the heat pipes has the highest thermal efficiency. In addition, at 50% charge amount of working fluid with 0.1% nanoparticles concentration, 60 degree tilt angle, the heat pipe gives the highest thermal efficiency.

Keywords: Heat pipes / Refrigerant / Nano-fluid / Heat transfer, TiO<sub>2</sub>

ปริญญาานิพนธ์

เรื่อง

การเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของท่อความร้อนโดยใช้

สารทำความเย็นผสมอนุภาคนาโน

ของ

ดิฐพงศ์ ทองคำ

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญสิริ จีระเดชากุล)

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. 2551

คณะกรรมการควบคุมปริญญาานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

..... ประธาน

..... ประธาน

(อาจารย์ ดร.ไพศาล นาผล)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมิทธิ์ เอี่ยมสะอาด)

..... กรรมการ

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย อัมภมมงคล)

(อาจารย์ ดร.ไพศาล นาผล)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย อัมภมมงคล)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑารัตน์ คุรุเจริญ)

..... กรรมการ

(พันโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง)

## ประกาศคุณูปการ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ไพศาล นาผล ประธานกรรมการควบคุมการทำปริญญา  
นิพนธ์ ที่ให้ความรู้และคำแนะนำในการทำปริญญาานิพนธ์จนสำเร็จ และขอบพระคุณ อาจารย์  
ผศ.ดร.พิชัย อัมภมมงคล กรรมการควบคุมการทำปริญญาานิพนธ์ ที่ได้ให้โอกาสในการทำปริญญา  
นิพนธ์ ให้ความรู้พร้อมทั้งคำแนะนำในการทำวิจัย รวมทั้งช่วยแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นในการทำวิจัย  
ขอขอบพระคุณอาจารย์จาก กองวิชาวิศวกรรมเครื่องกล โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าที่ช่วยอบรม  
ป่มวิชาและสอดแทรกจริยธรรม รวมทั้งฝึกความอดทน ตลอดจนให้คำแนะนำในการทำวิจัย

ท้ายสุดที่ขาดไม่ได้เลยผู้วิจัยขอขอบพระคุณ พ่อ แม่ ที่ได้อบรมสั่งสอนและสนับสนุนรวมทั้ง  
ครอบครัวผู้วิจัยที่ให้กำลังใจและคอยช่วยเหลือ และ ขอขอบคุณ น.ส.ฐิติกานต์ ชุกิจรุ่งโรจน์ ที่เป็น  
กำลังใจที่ดีเสมอมารวมทั้งเป็นที่ปรึกษา ช่วยหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องมาให้ ตลอดจนเพื่อน พี่ และน้อง ทุก  
คนที่คอยให้คำแนะนำและขอบคุณ พี่แก่งและน้องหมอที่คอยช่วยเหลือในการสร้างอุปกรณ์ทดลองและ  
ตัวอย่างปริญญาานิพนธ์

ดิฐพงศ์ ทองคำ

## สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	1
ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	1
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
หลักการถ่ายเทความร้อน.....	3
การนำความร้อน.....	3
การพาความร้อน.....	10
การแผ่รังสี.....	11
ท่อความร้อน.....	12
ของไหลนาโน.....	21
การทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26
3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	35
อุปกรณ์ในการทดลอง.....	36
วิธีการทดลอง.....	40
ตัวแปรที่ใช้ในการเก็บข้อมูล.....	41
4 ผลและการวิเคราะห์.....	42
5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	49

## สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
บรรณานุกรม.....	51
ภาคผนวก.....	57
อภิธานศัพท์.....	64
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	66

## บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 ชนิดของไหลใช้งานที่ช่วงอุณหภูมิใช้งานต่างๆ.....	18
2 ความเข้ากันได้ระหว่างของของไหลใช้งานกับวัสดุทำท่อและวิกค์.....	19
3 การเปรียบเทียบเชิงปริมาณของสมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน แบบต่างๆ สำหรับกรณีของก๊าซร้อนและเย็น.....	20
4 แสดงคุณสมบัติของอนุภาคนาโนไทเทเนียมออกไซด์ TiO <sub>2</sub> (P – 25).....	25
5 แสดงคุณสมบัติของสารทำความเย็นไตรคลอโรฟลูออโรมีเทน (Trichlorofluoromethane ).....	26
6 แสดงประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่อความร้อนเมื่อรับมุมเอียงต่อความร้อน....	62
7 แสดงประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่อความร้อนเมื่อใช้สารทำความเย็น R11 เป็นสารทำงาน.....	62
8 แสดงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของท่อความร้อนเมื่อใช้ของไหลนาโน เป็นสารทำงาน.....	62
9 แสดงสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของท่อความร้อนเมื่อใช้ของไหลนาโนเป็นสารทำงาน...	63

## บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 แสดงทิศทางการไหลของความร้อน.....	4
2 แสดงปริมาตรฮีเลเมนต์ที่ใช้วิเคราะห์การนำความร้อนในหนึ่งมิติ.....	4
3 แสดงปริมาตรการนำความร้อนของฮีเลเมนต์ที่ใช้วิเคราะห์ การนำความร้อนสามมิติ.....	7
4 ค่าสภาพการนำความร้อนของของเหลวบางชนิด.....	9
5 แสดงลักษณะของการทำงานของฮีทไปป์แบบมีวิกค์.....	13
6 ฮีทไปป์แบบไม่มีวิกค์และแบบมีวิกค์.....	13
7 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์.....	14
8 ลักษณะการนำท่อความร้อนไปประยุกต์การใช้งาน.....	14
9 ไดอะแกรมแสดงการออกแบบฮีทไปป์.....	16
10 การพิจารณาเลือกของไหลใช้งาน.....	17
11 แสดงผงอนุภาคนาโนของ $TiO_2$ .....	24
12 ภาพถ่ายของไหลนาโน.....	25
13 แสดงไดอะแกรมของอุปกรณ์การทดลอง.....	35
14 แสดงขนาดของท่อความร้อนและตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล.....	36
15 แสดงอุปกรณ์ในการทดสอบ.....	36
16 แสดงท่อความร้อนที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลแล้วกับชุดคอนเดนเซอร์.....	37
17 แสดงส่วนให้ความร้อนของท่อความร้อน.....	37
18 แสดงชุดทดสอบท่อความร้อนเมื่อทำการติดตั้งและหุ้มฉนวน.....	38
19 แสดงเครื่องควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้ชุดทดสอบความร้อน.....	38
20 แสดงชุดทำน้ำเย็นและควบคุมอุณหภูมิน้ำเย็นในระบบ.....	39
21 แสดงอุปกรณ์ปรับอัตราการไหลของน้ำเย็นชนิด Rota meter.....	39
22 แสดงอุปกรณ์เก็บข้อมูล ( Data loggers ).....	40
23 แสดงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของท่อความร้อนที่ปรับเปลี่ยนมุมเอียง.....	43

## บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
24 แสดงผลกระทบของฟลักซ์ความร้อนต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ ท่อความร้อน.....	44
25 แสดงผลกระทบของปริมาตรสารทำงานต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ ท่อความร้อน.....	45
26 กราฟวิเคราะห์ผลกระทบของมุมเอียงและปริมาตรของสารทำงาน R11 ที่เหมาะสมต่อท่อความร้อน.....	46
27 แสดงสัดส่วนผสมของอนุภาคนาโนที่ทำให้ท่อความร้อนมีประสิทธิภาพ เชิงความร้อนสูงสุด.....	47
28 แสดงสัดส่วนการเพิ่มของประสิทธิภาพเชิงความร้อนของท่อความร้อนเมื่อใช้ ของไหลนาโน.....	48

# บทที่ 1

## บทนำ

### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ท่อความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนไปยังบริเวณที่ต้องการได้อย่างรวดเร็ว และท่อความร้อนยังสามารถทำงานได้แม้ผลต่างของอุณหภูมิไม่มาก โดยท่อความร้อนสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย เช่น การระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ระบบควบคุมอุณหภูมิ การละลายหิมะในรันเวย์สนามบิน ระบบกำจัดความชื้นในห้องควบคุมหรือระบบปรับอากาศ ระบบทำน้ำอุ่น เป็นการนำประโยชน์ของก๊าซทิ้งกลับมาใช้ให้เกิดความคุ้มค่า และเป็นความร่วมมืออนุรักษ์พลังงาน รวมทั้งยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของระบบ ดังนั้นแนวทางของการพัฒนาเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพที่ดีขึ้นของการนำความร้อนของท่อความร้อนนั้นมีหลายวิธีด้วยกัน เช่น การใส่ฉนวนในท่อความร้อน การเปลี่ยนสารทำงาน การเพิ่มจำนวนชุดของท่อความร้อน การใส่อนุภาคนาโนในสารทำงาน ซึ่งการใส่อนุภาคนาโนลงในสารทำความเย็นเป็นสารทำงานนั้นมีความสะดวก และไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนโครงสร้างหรือเพิ่มอุปกรณ์แต่อย่างใด นับว่าเป็นวิธีที่น่าสนใจและเป็นเทคโนโลยีที่มีประโยชน์อย่างมาก

### วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาสัดส่วนของอนุภาคนาโนที่ผสมกับสารทำความเย็น ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของท่อความร้อน
2. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของท่อความร้อน ในกรณีที่ใช้สารทำความเย็นเพียงอย่างเดียวกับใช้สารทำความเย็นร่วมกับเติมอนุภาคนาโน
3. เพื่อศึกษาผลของมุมเอียงที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของท่อความร้อน

### ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ใช้สารทำความเย็นชนิด R11 ( Trichlorofluoromethane ) ผสมกับอนุภาคนาโนเป็นสารทำงาน
2. ส่วนรับความร้อนใช้ขดลวดความร้อนในการให้ความร้อนแก่ท่อความร้อน โดยสามารถปรับค่าความร้อนที่ป้อนให้ได้ 30 – 70 วัตต์
3. ใช้น้ำระบายความร้อนแก่ท่อความร้อน อุณหภูมิของน้ำที่ทางเข้าชุดระบายความร้อนระหว่าง 10-25 องศาเซลเซียส

4. ท่อความร้อนทำจากวัสดุท่อทองแดง
5. ใช้ไททานเนียมออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) เป็นอนุภาคนาโนที่ใช้ในการศึกษา

### **ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ**

1. เป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่ท่อความร้อน
2. สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการนำพลังงานความร้อนกลับมาใช้ใหม่

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### หลักการถ่ายเทความร้อน (Principle of heat transfer)

ในการศึกษาเรื่องการถ่ายเทความร้อนโดยทั่วไปแล้ว จะมีรูปแบบของการถ่ายเทความร้อนอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบคือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี ซึ่งรูปแบบของการถ่ายเทความร้อนทั้ง 3 รูปแบบนี้เป็นสิ่งสำคัญยิ่งสำหรับงานทางด้านกลไกการแลกเปลี่ยนความร้อน ทั้งในวัสดุที่เป็นของแข็งและของไหล ซึ่งจะได้กล่าวถึงลักษณะของการถ่ายเทความร้อนทั้ง 3 รูปแบบต่อไปดังนี้

#### การนำความร้อน (Heat conduction)

เมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิที่ถ่ายเทจากด้านในของวัตถุหนึ่งสู่ด้านนอก กรณีนี้แสดงว่ามี การถ่ายเทพลังงานจากขอบเขตที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ขอบเขตที่มีอุณหภูมิต่ำ ลักษณะเช่นนี้เรากล่าวได้ ว่าพลังงานถ่ายเทด้วยวิธีการนำ นั่นแสดงว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เป็นสัดส่วน โดยตรงกับค่าอุณหภูมิ

$$\frac{q}{A} \sim \frac{\partial T}{\partial x}$$

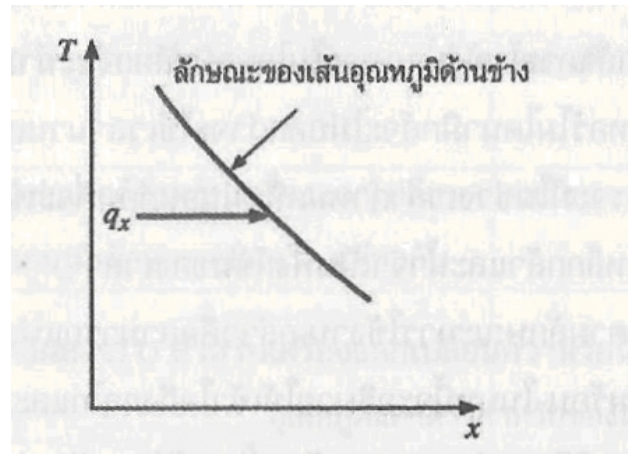
เมื่อแทนด้วยสัดส่วนที่เป็นค่าคงที่ จะได้สมการดังนี้

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial A} \quad (2-1)$$

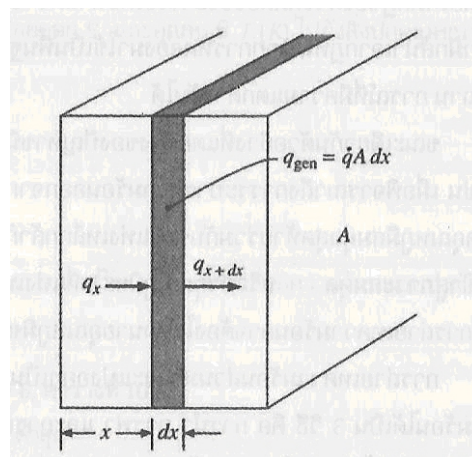
เมื่อ  $q$  คืออัตราการถ่ายเทความร้อน  $\frac{\partial T}{\partial A}$  คือค่าอุณหภูมิในทิศทางที่ความร้อนไหล ค่าคงที่  $k$  มีค่าเป็นบวก เรียกว่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ และถ้ามีค่าเป็นลบแสดงว่าเป็นไปตามหลักการของกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ ตัวอย่างเช่น ความร้อนที่ไหลจะมีค่าลดต่ำลงตามสเกลอุณหภูมิที่แสดงด้วยระบบโคออร์ดิเนต ดังภาพประกอบ 5 สมการ (2-1) เรียกว่า กฎของฟูเรียร์ของการนำความร้อนที่ได้จากนักฟิสิกส์และคณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศสชื่อ โจเซฟ ฟูเรียร์ (Joseph Fourier) เป็นผู้รวบรวมนัยสำคัญพร้อมทั้งแสดงวิธีการวิเคราะห์ปัญหาการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำ ซึ่งถือว่ามี ความสำคัญมาก จากสมการ (2-1) เป็นสมการของสภาพการนำความร้อน และค่า  $k$  มีหน่วยเป็นวัตต์ ต่อหนึ่งหน่วยความยาวเมตรต่อหนึ่งองศาเซลเซียส ในขณะที่เดียวกันค่าความร้อนมีหน่วยเป็นวัตต์

ต่อไปนี้จะเป็นการแก้ปัญหาโดยใช้สมการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนในของแข็ง ด้วยสมการ (2-1) ดังต่อไปนี้

ให้พิจารณาระบบที่เป็นหนึ่งมิติ ดังแสดงในภาพประกอบ 3 ถ้าระบบอยู่ในสภาวะคงตัว (สม่ำเสมอ) ตัวอย่างเช่น ถ้าค่าอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาแล้ว ให้นำเอาสมการ (2-1) มาทำการอินทิเกรตและแทนค่าลงไป ก็จะได้ผลลัพธ์ตามต้องการ



ภาพประกอบ 1 แสดงทิศทางการไหลของความร้อน



ภาพประกอบ 2 แสดงปริมาตรอีเลเมนต์ที่ใช้วิเคราะห์การนำความร้อนในหนึ่งมิติ

อย่างไรก็ดี ถ้าค่าอุณหภูมิของของแข็งมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กัเวลา หรือถ้ามีแหล่งกำเนิดความร้อน หรือตัวรับความร้อน (Sink) อยู่ภายในของแข็ง ก็จะทำให้ปัญหานี้ยุ่งยากมากขึ้น เราพิจารณากกรณีทั่วๆไปซึ่งอุณหภูมิอาจจะเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กัเวลาและแหล่งกำเนิดความร้อนประกอบอยู่ในวัตถุ สำหรับอีเลเมนต์นี้มีความหนา  $dx$  การสมดุลพลังงานจะได้ดังนี้

พลังงานที่ถูกนำมาที่ผิวด้านซ้าย + พลังงานความร้อนที่ผลิตขึ้นในอิลีเมนต์  
 = พลังงานภายในที่เปลี่ยนแปลง + พลังงานที่ถูกนำออกมาที่ผิวด้านขวา  
 ปริมาณของพลังงานดังกล่าว พิจารณาได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{พลังงานที่ถูกนำมาที่ผิวด้านซ้าย} &= q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \\ \text{พลังงานความร้อนที่ผลิตขึ้นในอิลีเมนต์} &= \dot{q}Adx \\ \text{พลังงานภายในที่เปลี่ยนแปลง} &= \rho cA \frac{\partial T}{\partial x} dx \\ \text{พลังงานที่ถูกนำออกมาที่ผิวด้านขวา} &= q_{x+dx} = -kA \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x+dx} \\ &= -A \left[ k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] \end{aligned}$$

เมื่อ  $\dot{q}$  = พลังงานที่ผลิตขึ้นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร, W/m<sup>3</sup>  
 $c$  = ความร้อนจำเพาะของวัสดุ, J/kg°C  
 $\rho$  = ความหนาแน่น, kg/m<sup>3</sup>

ให้รวมความสัมพันธ์ต่างๆข้างบนนี้ลงในสมการสมดุลพลังงาน จะได้

$$-kA \frac{\partial T}{\partial x} + \dot{q}Adx = \rho cA \frac{\partial T}{\partial x} dx - A \left[ k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right]$$

หรือ

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (2-2)$$

สมการนี้เป็นการนำความร้อนหนึ่งมิติที่กำหนดให้ปริมาณความร้อนไหลเป็นจำนวนมาก ดังนั้น สิ่งที่เราต้องพิจารณาก็คือ การนำความร้อนเท่านั้น ที่ไหลเข้าและออกจากปริมาตรๆหนึ่งทั้งสามทิศทาง ที่แสดงด้วยโคออร์ดิเนต ดังภาพประกอบ 3 (a) การสมดุลพลังงาน คือ

$$q_x + q_y + q_z + q_{gen} = q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_{z+dz} + \frac{dE}{d\tau}$$

และปริมาณพลังงานที่ให้มีดังนี้

$$\begin{aligned} q_x &= -kdydz \frac{\partial T}{\partial x} \\ q_{x+dx} &= - \left[ k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] dydz \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
q_y &= -k dx dz \frac{\partial T}{\partial y} \\
q_{y+dy} &= -\left[ k \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) dy \right] dx dz \\
q_z &= -k dx dy \frac{\partial T}{\partial z} \\
q_{z+dz} &= -\left[ k \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) dz \right] dx dy \\
\dot{q}_{gen} &= \dot{q} dx dy dz \\
\frac{dE}{dT} &= \rho c dx dy dz \frac{\partial T}{\partial \tau}
\end{aligned}$$

ดังนั้นรูปทั่วไปของสมการการนำความร้อนสามมิติ จะแสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (2-3)$$

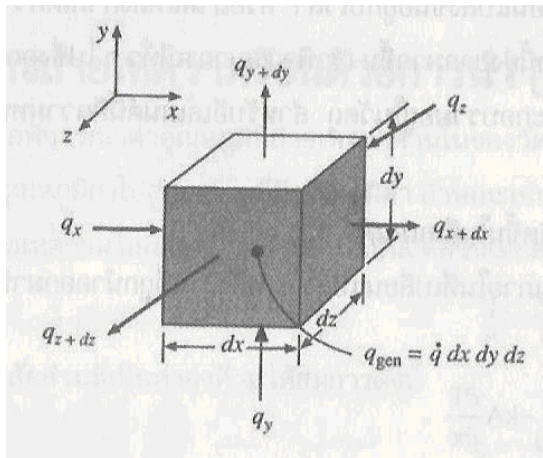
สำหรับกรณีที่ค่าสภาพการนำความร้อนมีค่าคงที่ ดังนั้นสมการ (2-3) นำมาเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (2-3a)$$

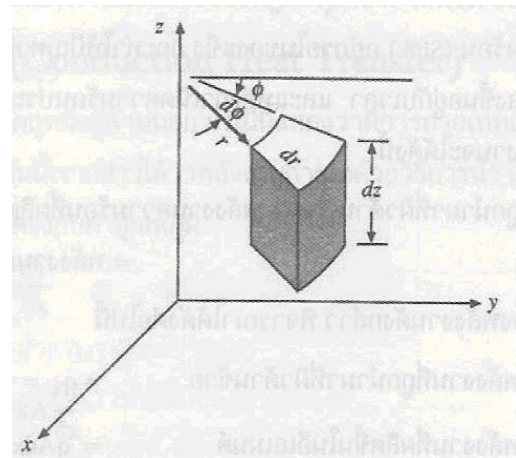
เมื่อปริมาณ  $\alpha = k / \rho c$  เรียกว่า ค่าสภาพการแพร่กระจายความร้อนของวัสดุ

สำหรับค่า  $\alpha$  ที่มีค่ามาก ความร้อนจะเกิดการแพร่กระจายผ่านวัสดุได้เร็วมากด้วย เราจะเห็นได้จากการทดสอบว่าการทำให้ค่า  $\alpha$  มีค่ามากขึ้น มักเป็นผลต่อเนื่องมาจากค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุมีค่ามากด้วย ซึ่งชี้ให้เห็นว่ามีอัตราการถ่ายเทพลังงานรวดเร็ว หรืออาจเป็นเพราะค่าความจุความร้อน ( $\rho c$ ) มีค่าต่ำ ค่าความจุความร้อนต่ำพลังงานมีการเคลื่อนที่ผ่านวัสดุน้อยจะทำให้ดูดกลืนความร้อนได้น้อย และใช้เพื่อทำให้อุณหภูมิของวัสดุเพิ่มขึ้น ดังนั้นพลังงานจำนวนมากนี้จะนำไปใช้เพื่อการถ่ายเทต่อไป ค่าสภาพการแพร่กระจายความร้อน ( $\alpha$ ) มีหน่วยเป็นตารางเมตรต่อวินาที

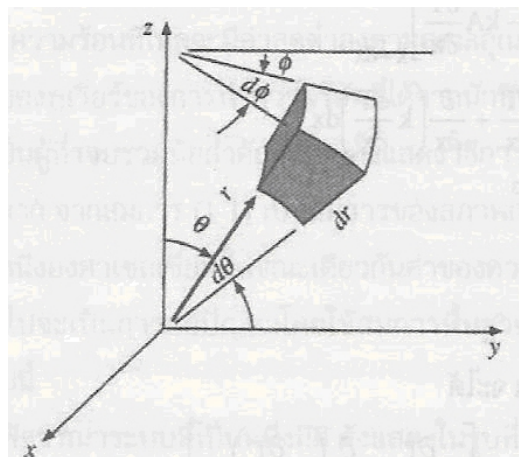
จากความสัมพันธ์ข้างบน แสดงอนุพันธ์ที่  $x + dx$  นำมาเขียนในรูปของอนุกรมเทย์เลอร์ด้วยเทอมสองเทอมแรกที่จะนำมาใช้ในการคำนวณต่อไป สมการ (2-3a) นำมาปรับเปลี่ยนได้ทั้งโคออร์ดิเนตทรงกระบอกหรือทรงกลมด้วยเทคนิคการคำนวณที่เป็นมาตรฐาน ผลเฉลยที่ได้มีดังนี้



(a)



(b)



(c)

ภาพประกอบ 3 แสดงปริมาตรการนำความร้อนของอีเลเมนต์ที่ใช้วิเคราะห์การนำความร้อนสามมิติ  
 (a) โคออร์ดิเนตของรูปทรงเรขาคณิต, (b) โคออร์ดิเนตทรงกระบอก, (c) โคออร์ดิเนตทรงกลม

โคออร์ดิเนตทรงกระบอก

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (2-3b)$$

โคออร์ดิเนตทรงกลม

$$\frac{1}{r} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} (rT) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (2-3c)$$

ระบบโคออร์ดิเนตที่ใช้กับสมการ (2-3b) และ (2-3c) แสดงดังภาพประกอบ 3b และ c ตามลำดับ

ปัญหาในทางปฏิบัติส่วนมาก รวมทั้งกรณีพิเศษเฉพาะของสมการทั่วไปที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น จะใช้เป็นแนวทางในบทต่อไป โดยภาพรวมแล้วสามารถแสดงการลดรูปได้ เพื่อให้สามารถนำไปใช้กับกรณีต่างๆ หลากๆ กรณีในทางปฏิบัติได้เป็นอย่างดี

การไหลของความร้อนหนึ่งมิติในสภาวะคงตัว (สม่ำเสมอ - ไม่มีแหล่งกำเนิดความร้อน)

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = 0 \quad (2-4)$$

สังเกตว่าสมการนี้เหมือนกับสมการ (2-1) เมื่อ  $q =$  ค่าคงที่

การไหลของความร้อนหนึ่งมิติในสภาวะคงตัวในโคออร์ดิเนตทรงกระบอก (ไม่มีแหล่งกำเนิดความร้อน)

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} = 0 \quad (2-5)$$

การไหลของความร้อนหนึ่งมิติในสภาวะคงตัวประกอบด้วยแหล่งกำเนิดความร้อน

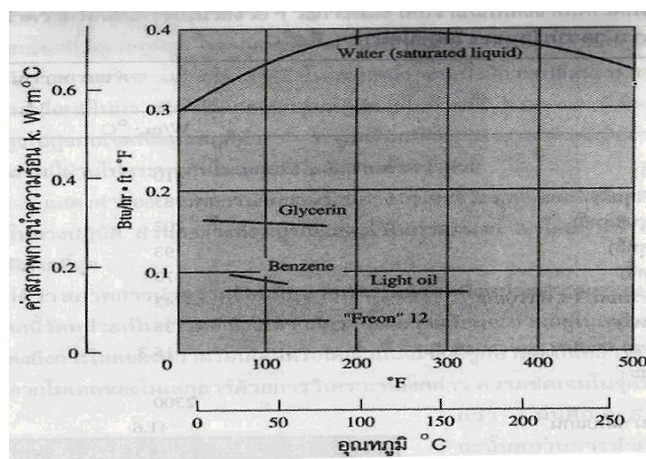
$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{\dot{q}}{k} = 0 \quad (2-6)$$

การไหลของความร้อนสองมิติในสภาวะคงตัวโดยไม่มีแหล่งกำเนิดความร้อน

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (2-7)$$

สมการ (2-1) เป็นสมการที่กำหนดสภาพการนำความร้อน การกำหนดนี้จะขึ้นอยู่กับพื้นฐานของค่าที่วัดได้จากการทดลองโดยการหาค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุชนิดต่างๆ เราสังเกตได้ว่าสภาพการนำความร้อนมีหน่วยเป็นวัตต์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวเมตรต่อหนึ่งองศาเซลเซียส เมื่อค่าความร้อนที่ไหลนี้วัดหน่วยเป็นค่าวัตต์ สังเกตว่าอัตราของความร้อนจะรวมอยู่ในเทอมนี้ และค่าตัวเลขของสภาพการนำความร้อนแสดงถึงการไหลของความร้อนได้ดีหรือได้เร็วนั้นจะขึ้นอยู่กับวัสดุเป็นหลัก อย่างไรก็ตามอัตราของพลังงานที่ถ่ายเทที่เกิดขึ้นคิดจากโมเดลของโมเลกุลาร์ด้วยการวิเคราะห์ดังกล่าว ความชัดเจนในจุดนี้โมเลกุลจะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่า นั่นคือจะส่งพลังงานเหล่านี้ออกมาฉะนั้นสภาพการนำความร้อนของก๊าซจะต้องขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ การกำหนดวิธีการวิเคราะห์ให้ง่ายขึ้น แสดงด้วยค่าสภาพการนำความร้อนของก๊าซที่มีการเปลี่ยนแปลงด้วยรากที่สองของอุณหภูมิสัมบูรณ์ (ซึ่งต้องย้อนกลับไปที่ความเร็วของเสียงในก๊าซที่เปลี่ยนแปลงด้วยค่ารากที่สองของอุณหภูมิสัมบูรณ์ ค่าความเร็วนี้จะประมาณด้วยความเร็วเฉลี่ยของโมเลกุลเหล่านั้น)

กลไกทางกายภาพของการนำพลังงานความร้อนในของเหลวเป็นปริมาณเช่นเดียวกับก๊าซต่างๆ อย่างไรก็ตามสถานะที่พิจารณา มักจะยุ่งยากมาก เพราะว่าโมเลกุลจะมีลักษณะการจับตัวที่ใกล้กันมากและแรงของโมเลกุลาร์ที่ได้จากสนามของแรงนี้มีผลกระทบต่อ การแลกเปลี่ยนพลังงานในกระบวนการที่เกิดการชนกันของโมเลกุล ค่าสภาพการนำความร้อนของของเหลวบางชนิดดังแสดงในภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 4 ค่าสภาพการนำความร้อนของของเหลวบางชนิด

ในระบบหน่วยที่เป็นระบบอังกฤษ ปริมาณของความร้อนไหลจะมีหน่วยBtu/h โดยพื้นที่มักมีหน่วยเป็นตารางฟุต และอุณหภูมิมีหน่วยเป็นฟาเรนไฮต์ ค่าสภาพการนำความร้อนจะมีหน่วยเป็น Btu/h ft °F

พลังงานความร้อนที่ไหลผ่านของแข็งเกิดขึ้นได้ 2 วิธี คือ การสั่นของแลตทิซและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ สำหรับตัวนำความร้อนที่ดีจะมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมากเคลื่อนที่ภายในโครงสร้างของแลตทิซของวัสดุนั้น ขณะที่อิเล็กตรอนเหล่านี้อาจจะเคลื่อนที่ด้วยประจุไฟฟ้า เช่นเดียวกับพลังงานความร้อนที่เคลื่อนที่ย้ายจากขอบเขตพื้นที่ที่มีอุณหภูมิสูงไปขอบเขตที่มีอุณหภูมิต่ำ ดังเช่นในกรณีของก๊าซต่างๆ ความจริงแล้วอิเล็กตรอนเหล่านี้ก็ต้องอ้างอิงถึงก๊าซอิเล็กตรอน พลังงานมักส่งผ่านไปโดยลักษณะเกิดการสั่นตัวของโครงสร้างแลตทิซของวัสดุ โดยทั่วไป วิธีการหลังนี้ การถ่ายเทพลังงานไม่มากเท่ากับการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนและผลที่ได้นี้ก็ถือเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ซึ่งเกือบทั้งหมดมักจะเป็นตัวนำความร้อนที่ดี อันได้แก่ ทองแดง อะลูมิเนียม และเงิน และฉนวนไฟฟ้า โดยปกติแล้วจะต้องเป็นฉนวนความร้อนที่ดี สังเกตได้จากเพชร ซึ่งเป็นฉนวนไฟฟ้าแต่สามารถให้ค่าสภาพการนำความร้อนเป็นห้าเท่าซึ่งสูงเท่ากับเงินหรือทองแดง ความเป็นจริงนี้นักเจียรนัยเพชรสามารถพิจารณาข้อได้เปรียบระหว่างเพชรกับเศษหินได้ดี เครื่องมือขนาดเล็กสามารถนำมาใช้วัดผลตอบสนองของหินที่ถูกกระตุ้นด้วยความร้อน เพชรจริงจะแสดงการตอบสนองที่รวดเร็วกว่าหินที่คุณภาพไม่ดี

### การพาความร้อน (Heat convection)

การพาความร้อน คือ วิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่ระหว่างผิวของของแข็งกับของไหล ของไหลเป็นตัวพาความร้อนมาให้ หรือพาความร้อนจากผิวของของแข็ง กลไกที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพานั้นเกิดจาก ผลรวมของการนำความร้อน การสะสมพลังงานและการเคลื่อนที่ของของไหล การพาแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ การพาความร้อนโดยการบังคับ (Forced convection) และการพาแบบอิสระ (free convection)

1. การพาความร้อนโดยการบังคับ (Forced convection) คือการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของของแข็ง โดยกลไกภายนอก เช่น เครื่องสูบน้ำ พัดลม เป็นต้น

2. การพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection) คือการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยไม่มีกลไกใดๆ ที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ แล้วของไหลที่อยู่ใกล้กับผิวของของแข็งก็อาจเคลื่อนที่โดยแรงลอยตัวของของไหลเอง แรงลอยตัวนี้เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหล เมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นของของไหลขึ้น

การคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพา นั้นเป็นสิ่งยุ่งยาก เมื่อพิจารณาแล้วมีหลายสิ่งที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของความร้อนแบบการพานี้ เป็นต้นว่า คุณสมบัติต่าง ๆ ของของไหล เช่น ความหนาแน่น ความร้อนจำเพาะ ความหนืด ฯลฯ ความเร็วของของไหล ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของพื้นผิวของของแข็ง และของไหล เป็นต้น นิวตัน (Newton) ได้ตัดปัญหาความยุ่งยากเหล่านี้ โดยเสนอสมการการหาค่าอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพาดังนี้ คือ

$$Q = hA(T_h - T_c) \quad (2-8)$$

โดยที่

h	คือ	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน	(W/m <sup>2</sup> °C)
Q	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ของของแข็งที่สัมผัสกับของไหล	(W)
T <sub>h</sub>	คือ	อุณหภูมิของของไหลหรือพื้นที่ผิวของของแข็งที่ร้อนกว่า	(°C)
T <sub>c</sub>	คือ	อุณหภูมิที่เย็นกว่าของของไหลหรือพื้นที่ผิวของของแข็ง	(°C)
A	คือ	พื้นที่สัมผัสระหว่างผนังท่อกับการไหลของของไหล	(m <sup>2</sup> )

เนื่องจากอุณหภูมิ T<sub>h</sub> และ T<sub>c</sub> นี้ เปลี่ยนแปลงตลอดความยาวของท่อ ดังนั้นความแตกต่างของอุณหภูมิที่ใช้งานในสมการก็เป็นค่าความแตกต่างเฉลี่ย

### การแผ่รังสี (Radiation)

ในการแผ่รังสี ความร้อนเคลื่อนที่ได้โดยมิต้องอาศัยตัวกลางดังเช่นในการนำและการพาความร้อน ในการแผ่รังสีนี้ ความร้อนจะเคลื่อนที่ได้ดีที่สุดในสุญญากาศ การที่จะอธิบายว่าความร้อนเคลื่อนที่ได้อย่างไรนั้นเป็นสิ่งยากในการอธิบาย การแผ่รังสีในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) ซึ่งสามารถเกิดขึ้นในสถานะที่เป็นสุญญากาศ เช่นเดียวกับตัวกลางชนิดหนึ่ง ผลที่ได้จากการทดลองได้พิสูจน์ให้เห็นว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ที่ยกกำลังสี่ แต่ค่าการนำความร้อนและการพาความร้อนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ ซึ่งหาได้จาก กฎของ สเตฟาน โบลท์สมานน์ (Stefan-Boltzman's law) ขึ้นพื้นฐานดังนี้คือ

$$Q = \sigma AT^4 \quad (2-9)$$

เมื่อ

$\sigma$  คือ ค่าคงที่ของสตีฟานและโบลท์ซมานมีค่าเท่ากับ  $5.67 \times 10^{-8}$  ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{C}^4$ )

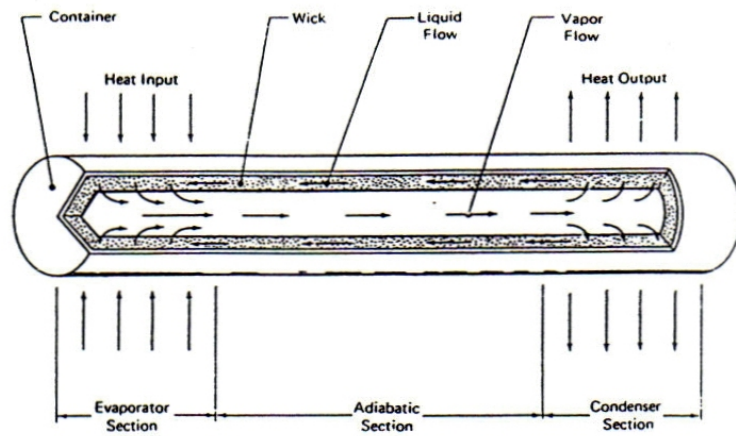
A คือ พื้นที่ผิวที่มีการแผ่รังสี (m)

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

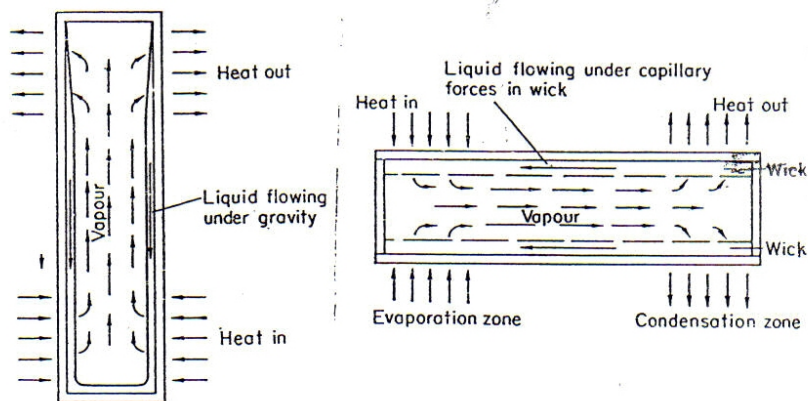
### ท่อความร้อน (Heat pipe heat exchanger)

ฮีทไปป์เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนได้อย่างรวดเร็วซึ่งจะเร็วกว่าการนำความร้อนของโลหะและสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดี แม้ในสภาวะที่มีผลต่างของอุณหภูมิไม่มากนัก ฮีทไปป์เป็นท่อปลายปิดภายในเป็นสุญญากาศในแท่งฮีทไปป์บรรจุของไหลใช้งาน (Working Fluid) และอาจจะมีวิกค์หรือไม่มีก็ได้ ภาพประกอบ 5 ที่ช่วงระเหย (Evaporator Section) ความร้อนจะถูกถ่ายเทจากแหล่งให้ความร้อน (Heat Source) ผ่านผนังท่อไปยังสารทำงานเพื่อทำให้สารทำงานระเหย ไอที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ไปตามแนวช่องว่างกลางท่อไปยังช่วงของการควบแน่น (Condenser Section) ซึ่งความดันไอต่ำกว่าช่วงที่คั่นกลางระหว่างช่วงของการระเหยกับช่วงของการควบแน่นของแท่งฮีทไปป์ ช่วงที่ไม่ได้รับความร้อนหรือคายความร้อน (Adiabatic Section) ที่ช่วงการควบแน่น ไอน้ำจะควบแน่นและความร้อนแฝงของการควบแน่นจะถ่ายเทความร้อนจากฮีทไปป์ไปสู่แหล่งรับความร้อน (Heat Sink) ของเหลวที่ควบแน่นแล้วจะกลับไปยังส่วนทำระเหย กระบวนการดังกล่าวจะเกิดขึ้นเป็นวงจรอย่างต่อเนื่อง

ความแตกต่างของฮีทไปป์แบบมีวิกค์และแบบไม่มีวิกค์ ดังภาพประกอบ 6 โครงสร้างทั่วไปคล้ายคลึงกันมากโดยฮีทไปป์แบบมีวิกค์จะส่งของเหลวกลับโดยแรงดันที่อูริซึม (Capillary Action) ของวิกค์ซึ่งมีรูพรุนเล็กๆ ส่วนฮีทไปป์แบบไร้วิกค์จะส่งของเหลวควบแน่นกลับไปยังช่วงการระเหยโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก ในการใช้งานของฮีทไปป์แบบไม่มีวิกค์จะต้องวางให้ช่วงของการควบแน่นอยู่สูงกว่าช่วงของการระเหยอยู่เสมอ ข้อดีของฮีทไปป์แบบไม่มีวิกค์คือสร้างง่ายต้นทุนต่ำคุณภาพมีความแน่นหนาสูง และความต้านทานการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังท่อน้อยกว่าแบบมีวิกค์ ซึ่งท่อความร้อนแบบมีวิกค์จะเกิดการติดค้างของฟองของไอที่วิกค์ ซึ่งจะส่งผลทำให้การถ่ายเทความร้อนต่ำลง



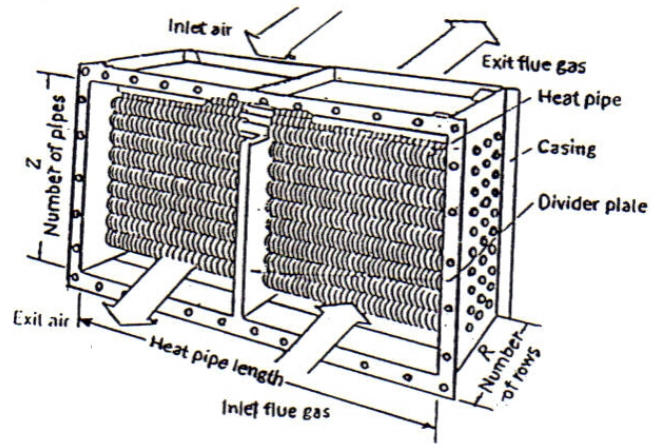
ภาพประกอบ 5 แสดงลักษณะของการทำงานของฮีทไปป์แบบมีwick



ภาพประกอบ 6 ฮีทไปป์แบบไม่มีwick และแบบมีwick

ที่มา: S.W.Chi. (1976). *Heat Pipe Theory and Practice* Washing:McGraw-Hill Book Company.

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลร้อน ( Hot Fluid ) กับของไหลเย็น ( Cool Fluid ) ที่ได้มีการนำไปประยุกต์การใช้งานในรูปแบบอย่างง่ายซึ่งของไหลทั้งสองจะเป็นอากาศ ( ภาพประกอบ 7 และภาพประกอบ 8 ) เนื่องจากประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ในปัจจุบันได้นำเอาไปประยุกต์การใช้งานต่างๆ ดังภาพ



ภาพประกอบ 7 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์

ที่มา: ปรีชา กอบเกื้อชัยพงษ์. (2533). การสร้างและทดสอบสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ที่อุณหภูมิต่ำ.

### จุดเด่นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อนมีดังต่อไปนี้

1. ไม่ต้องใช้พลังงานเสริมในการใช้งาน ยกเว้น เครื่องเป่าลมหรือเครื่องสูบของเหลว
2. อุณหภูมิที่ใช้งานมีช่วงกว้างและสามารถทำงานได้แม้อุณหภูมิระหว่างแหล่งให้ความร้อนและแหล่งรับความร้อนต่างกันไม่มาก ถ้าเลือกของเหลวใช้งานให้เหมาะสมกับช่วงอุณหภูมิ
3. อัตราของการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยมีค่าสูงกว่าและเร็วกว่าอัตราการนำความร้อนของโลหะมาก
4. ปัญหาในการใช้งานและการดูแลรักษามีน้อย เพราะไม่มีส่วนเคลื่อนไหว
5. การนำไปประยุกต์การใช้งานเชิงความร้อนและใช้งานในทางอ้อมในรูปแบบหนึ่งที่จะบังคับให้กลไกทำงานแทนที่ให้ผลการตอบแทนสูง



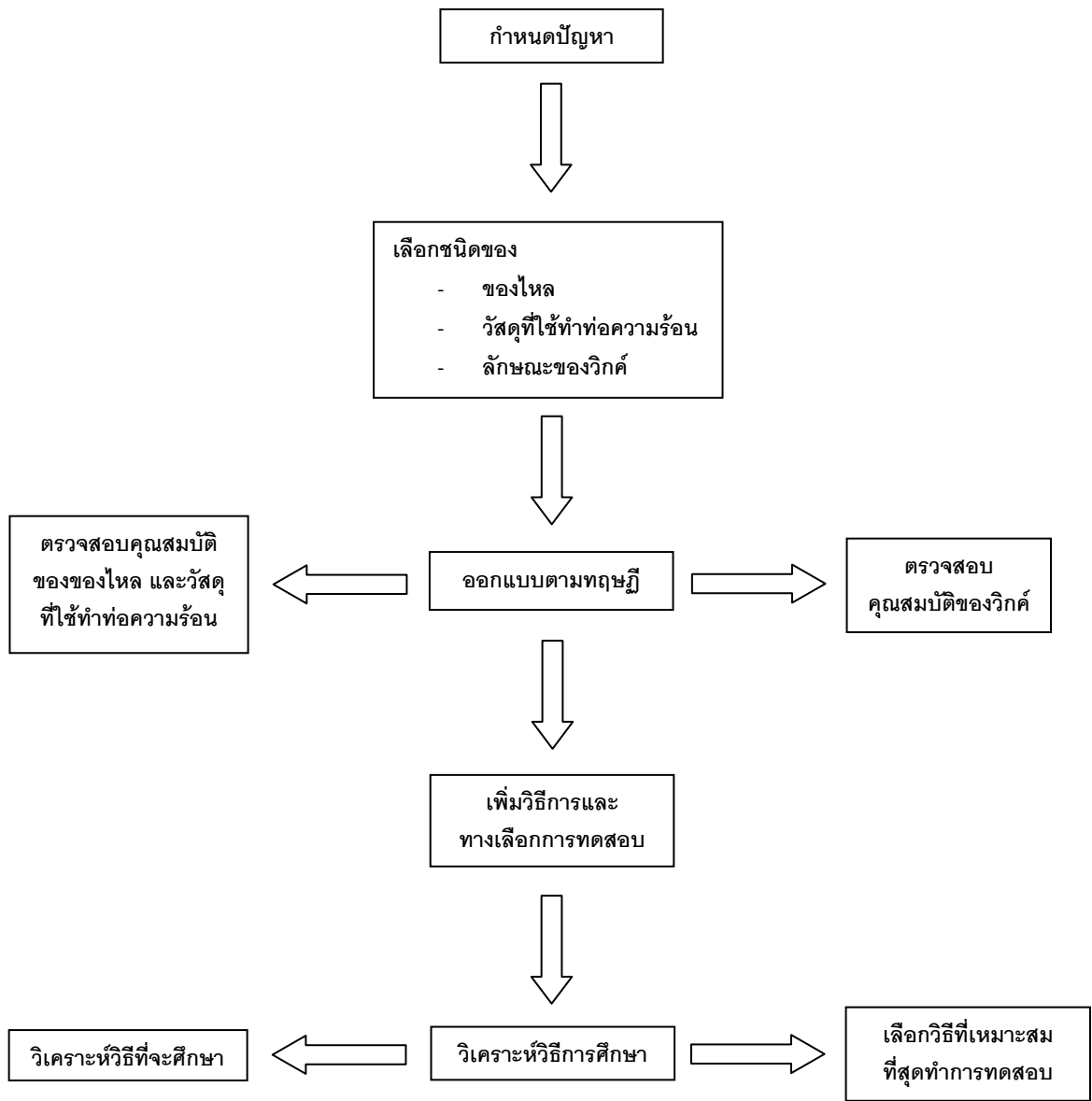
ภาพประกอบ 8 ลักษณะการนำท่อความร้อนไปประยุกต์การใช้งาน

## การเลือกองค์ประกอบต่างๆของฮีทไปป์

ในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน สิ่งที่ต้องคำนึงเป็นอันดับแรกคือ การเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเงื่อนไข เช่น ความดัน, อุณหภูมิ เป็นต้น องค์ประกอบที่สำคัญของฮีทไปป์ ทั้งแบบมีวิกค์และแบบไม่มีวิกค์นั้นสามารถแยกการใช้วัสดุ เป็นดังนี้

1. ของไหลใช้งาน
2. วัสดุที่ใช้ทำท่อฮีทไปป์
3. วิกค์หรือโครงสร้างของท่อรูเข็มสำหรับฮีทไปป์แบบมีวิกค์

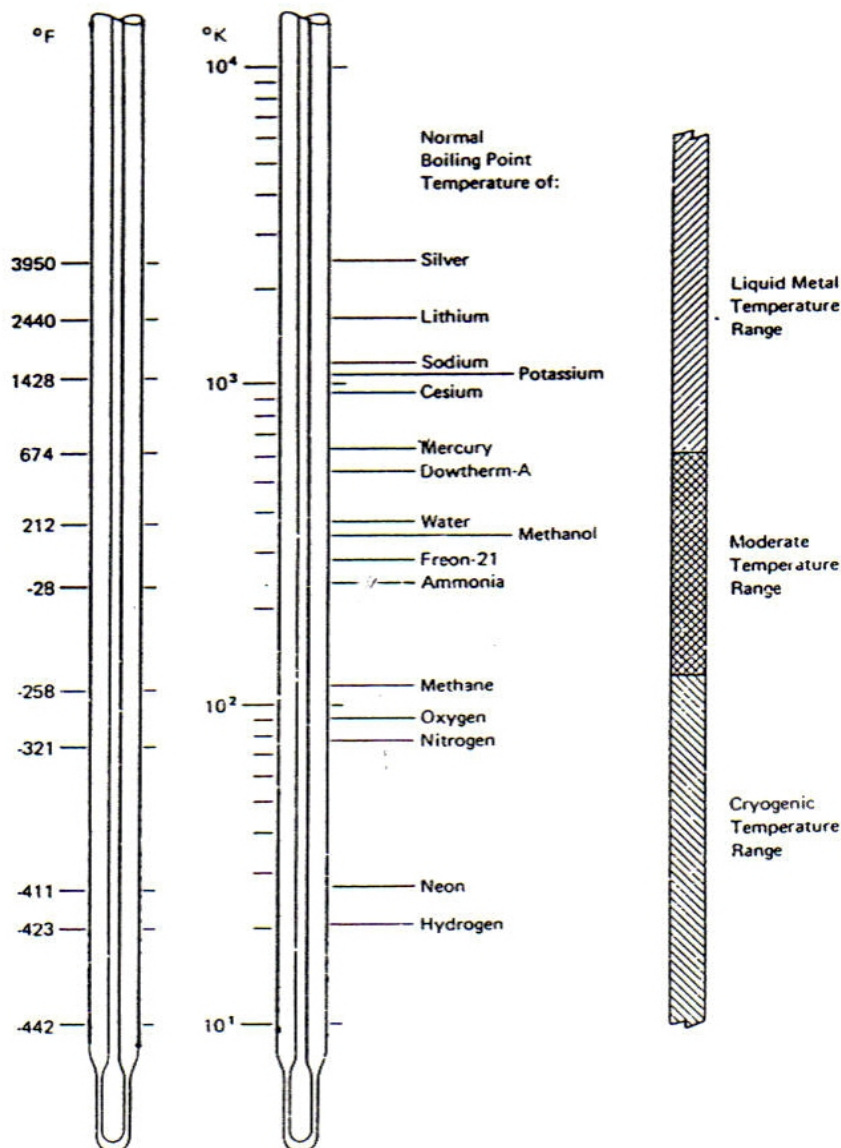
ในการพิจารณาที่จะเลือกองค์ประกอบทั้ง 3 อย่างข้างต้น เพื่อที่จะกำหนดในการออกแบบ และสร้างฮีทไปป์นั้นจะต้องให้องค์ประกอบทั้ง 3 อย่างมีความสัมพันธ์กันให้มากที่สุด ซึ่งสามารถที่จะจัดลำดับขึ้นของการออกแบบฮีทไปป์ได้ ดังภาพประกอบ 9



ภาพประกอบ 9 ไดอะแกรมแสดงการออกแบบสี่ทไปป์

## ของไหลใช้งาน

สำหรับฮีทไปป์แบบมีวิกค์มีสภาวะของเหลวอิ่มตัวที่จะนำมาใช้เป็นของไหลใช้งาน เพื่อให้มีการทำงานของฮีทไปป์เป็นไปได้ด้วยดีนั้นจะต้องเลือกให้ของไหลใช้งานมีคุณสมบัติเข้ากันได้กับโลหะที่ใช้ทำท่อ จากภาพประกอบ 10 และ ตาราง 1 จะแสดงให้เห็นถึงการเลือกใช้ของไหลในช่วง Moderate Temperature Rang ซึ่งบอกได้ว่าของเหลวชนิดใดมีจุดเดือดจุดเยือกแข็งอยู่ในช่วงใด คุณสมบัติเหล่านี้ จะนำมาพิจารณาประกอบเพื่อเลือกของไหลใช้งานที่เหมาะสมกับการใช้งานให้มากที่สุด



ภาพประกอบ 10 การพิจารณาเลือกของไหลใช้งาน

ที่มา: S.W.Chi. (1976). *Heat Pipe Theory and Prctice Washing:McGraw-Hill Book Company.*

## ปัจจัยพื้นฐานที่นำมาประกอบการพิจารณาเลือกของไหลใช้งาน

1. มีความเหมาะสมกับวัสดุที่ใช้ทำท่อ เนื่องจากจุดเดือดและจุดเยือกแข็งสามารถบ่งบอกถึงขนาดของท่อ ที่สภาวะของการระเหยและการควบแน่นของของไหลใช้งาน
2. เป็นของไหลใช้งานที่หาได้ง่ายและให้ค่าความร้อนได้สูง เมื่ออยู่ในสภาวะของไอ
3. มีความกดดันไอและการควบแน่นของของไหลใช้งานไม่สูงหรือต่ำจนเกินไป
4. เมื่ออายุการใช้งานที่ยาวนานมีการเปลี่ยนแปลงสภาพคุณสมบัติเฉพาะน้อยมาก
5. มีค่าการนำความร้อนสูง
6. ในสภาวะของเหลวและไอมีความหนืดต่ำ
7. เป็นสารที่มีจุดเยือกแข็งและจุดเดือดต่างจากอุณหภูมิใช้งานที่ยอมรับได้
8. มีค่าความร้อนแฝงของการระเหยสูง

ตาราง 1 ชนิดของไหลใช้งานที่ช่วงอุณหภูมิใช้งานต่างๆ (Dunn,[54])

Medium	Melting point (°C)	Boiling point at atmos. press. (°C)	Useful range (°C)
Helium	-272	-269	-271 - (-269)
Nitrogen	-210	-196	-203 - 160
Ammonia	-78	-33	-60- 100
Freon 11	-111	24	-40 - 120
Pentane	-130	28	-20- 120
Freon 113	-35	48	-10- 100
Acetone	-95	57	0- 120
Methanol	-98	64	10 - 130
Flutec PP	-50	76	10 - 160
Ethanol	-112	78	0- 130
Heptane	-90	98	0- 150
Water	0	100	30-200
Flutec PP	-70	160	0-225
Thermex	12	257	150-395
Mercury	-39.	361	250-650
Caesium	29	670	450-900
Potassium	62	774	500- 1000
Sodium	98	892	600- 1200
Lithium	179	1340	1000- 1800
Silver	960	2212	1800-2300

## วัสดุที่ใช้ทำท่อฮีทไปป์

หน้าที่ของฮีทไปป์คือเป็นตัวแยกของไหลใช้งานจากของไหลภายนอก มีการปกปิดอย่างมิดชิดดังนั้นท่อที่ใช้ทำฮีทไปป์จะต้องไม่รั่วและสามารถทนต่อความดันแตกต่างระหว่างบรรยากาศกับภายในท่อ และสามารถถ่ายเทความร้อนผ่านผนังท่อไปมาระหว่างของไหลใช้งานและของไหลภายนอกได้ดี

คุณสมบัติที่ใช้ในการพิจารณาในการเลือกวัสดุทำท่อฮีทไปป์ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ

1. ต้องมีความเหมาะสมกันระหว่างวัสดุที่ใช้ทำท่อกับคุณสมบัติของของไหลใช้งานทั้งภายในและภายนอกมีความสอดคล้องกันดี
2. การนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำท่อต้องมีค่าการนำความร้อนสูง
3. อัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงของวัสดุต่อน้ำหนัก
4. ความยากง่ายในการขึ้นรูปหรือการเชื่อมวัสดุ
5. ความสามารถในการที่จะให้ของไหลใช้งานเกาะจับที่ผิวของวัสดุที่ใช้ทำท่อได้ดี

ตัวแปรหลักที่จะบอกถึงการเลือกวัสดุที่จะใช้ทำท่อฮีทไปป์นั้น จะต้องเข้ากันได้ตามองค์ประกอบที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ผลกระทบอันเกิดจากการทำปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของของไหลใช้งานและการกัดกร่อนที่อาจเกิดขึ้นกับท่อ หรือ วิกค์ นั้น หากมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นแสดงว่าวัสดุที่ใช้ทำท่อหรือวิกค์นั้นไม่เหมาะสมกับของไหลใช้งาน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยจะทำให้ประสิทธิภาพฮีทไปป์ลดลง

ตาราง 2 ความเข้ากันได้ระหว่างของของไหลใช้งานกับวัสดุทำท่อและวิกค์ (Chi, [55])

Fluids	Solids					
	Al	Cu	Fe	Ni	SS <sup>3</sup> 304	Ti
ไนโตรเจน	ใช้ได้	ใช้ได้	ใช้ได้	ใช้ได้	ใช้ได้	-
มีเทน	ใช้ได้	ใช้ได้	-	-	ใช้ได้	-
แอมโมเนีย	ใช้ได้	-	ใช้ได้	ใช้ได้	ใช้ได้	-
เมทานอล	ใช้ไม่ได้	ใช้ได้	ใช้ได้	ใช้ได้	ใช้ได้	-
น้ำ	ใช้ไม่ได้	ใช้ได้	-	ใช้ได้	ใช้ได้	ใช้ได้
โปแตสเซียม	-	-	-	ใช้ได้	-	ใช้ไม่ได้
โซเดียม	-	-	-	ใช้ได้	ใช้ได้	ใช้ไม่ได้

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อนสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในลักษณะต่างๆ เช่นในการรักษาอุณหภูมิในยานอวกาศให้มีค่าสม่ำเสมอทุกจุด ในการกำจัดความร้อนออกจากชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์สื่อสารกึ่งตัวนำและวงจรรวมไอซี ในการถ่ายเทความร้อนระหว่างก๊าซร้อนและก๊าซเย็นเพื่อประหยัดพลังงาน ในการควบคุมอุณหภูมิภายในปฏิกรณ์เคมี ในการอบแห้ง ในการเก็บความร้อนทิ้งจากหม้อไอน้ำ ในการระบายความร้อนจากเบรกของเครื่องบิน เป็นต้น

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้สำหรับการถ่ายเทความร้อนระหว่างก๊าซร้อนและก๊าซเย็นในอดีตมีหลายประเภท การเปรียบเทียบเชิงปริมาณระหว่างสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบอื่นๆ กับฮีตไปป์ค่อนข้างยากแต่ขอยกตัวอย่างเพื่อนำมาสรุปเปรียบเทียบกันพอสังเขปดังตาราง

ตาราง 3 การเปรียบเทียบเชิงปริมาณของสมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่างๆ สำหรับกรณีของก๊าซร้อนและเย็น

ประเภทของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	ความดันที่สูญเสีย	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	การบำรุงรักษา	ราคา	พลังงานเสริม	การรั่วซึมของของไหล	พื้นที่ถ่ายเทความร้อนต่อปริมาตรหนึ่งหน่วย	คะแนนรวม
regeneration	ปานกลาง	สูง	ยาก	สูง	ไม่จำเป็น	มี	มาก	15
shell and tube	สูง	สูง	ธรรมดา	ปานกลาง	ไม่จำเป็น	ไม่มี	น้อย	19
plate fin	ต่ำ	ปานกลาง	ธรรมดา	สูง	ไม่จำเป็น	ไม่มี	มากพิเศษ	22
Recirculating	ต่ำ	ต่ำ	ยาก	สูง	จำเป็น	ไม่มี	ปานกลาง	18
Secondary medium								
Heat-pipe	ต่ำ	สูง	ง่าย	ปานกลาง	ไม่จำเป็น	ไม่มี	มาก	25

อย่างไรก็ดี ถ้าการเลือกวัสดุและการออกแบบท่อความร้อนกระทำอย่างไม่ถูกต้อง ก็อาจจะเกิดปัญหาในการใช้งานได้ เช่น การผุของผนังท่อ การอุดตันของท่อ การเสื่อมสภาพของวิกค์ ในบางครั้งวิกค์อาจเกิดการแห้งตัวได้ถ้าแรงคาพิลลารีมีไม่เพียงพอที่จะถ่ายเทของเหลวควบแน่นกลับไปยังส่วนการระเหยได้ทัน สารทำงานนั้นอาจเสื่อมสภาพได้ที่อุณหภูมิสูงเกินไป

## ของไหลนาโน (Nanofluids)

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาถึงนาโนเทคโนโลยีกันอย่างมากรวมทั้งมีการพัฒนาในส่วนหนึ่งของของไหลที่เรียกว่า “ของไหลนาโน” กันมากขึ้นโดยของไหลนาโนนั้นจะมีลักษณะเป็นสารแขวนลอยซึ่งประกอบด้วยอนุภาคที่เป็นโลหะหรือไม่ใช่โลหะ มีขนาดน้อยกว่า 100 nm นำไปผสมกับของเหลวเพื่อให้มีค่าการนำความร้อนที่สูงกว่าของเหลวนั้น เช่น อนุภาคนาโนของทองแดงผสมกับน้ำ อนุภาคนาโนของอลูมิเนียมผสมกับเอทิลีน ซึ่งเมื่อใส่อนุภาคนาโนเข้าไปผสมกับของเหลวแล้วจะได้ของเหลวที่มีอนุภาคแขวนลอย ที่เรียกกันว่า ของไหลนาโน

คำว่า “ของไหลนาโน” ถูกใช้ครั้งแรกโดยกลุ่มของ Argonne National Laboratory, USA เมื่อประมาณ 10 ปีที่ผ่านมาแล้ว

### การเพิ่มขีดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนด้วยของไหลนาโน (Nanofluid)

การที่สารทำงานในระบบมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำนั้นจะไปขัดขวางเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แม้ว่าจะมีการปรับปรุงเทคนิคมากมายเพื่อเพิ่มการถ่ายเทความร้อนก็ตาม การพัฒนาคุณสมบัติทางความร้อนให้กับของไหลที่ทำหน้าที่ส่งผ่านความร้อน อาจเป็นวิธีการหนึ่งในการเพิ่มความร้อนให้กับระบบทางเลือกหนึ่งของวิธีการเพิ่มค่าการนำความร้อนของของไหลนี้ก็คือการผสมอนุภาคของแข็งเข้ากับของไหล มีผงอนุภาคมากมาย เช่น โลหะ อโลหะ และสารโพลีเมอร์ ที่สามารถผสมกับของไหลเพื่อทำให้ของไหลเข้มข้นได้ ค่าการนำความร้อนของของไหลที่มีอนุภาคเหล่านี้แขวนลอยอยู่ถูกคาดว่าจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นกว่าของไหลธรรมดา การทดสอบวิธีการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมนี้ ถูกนำไปใช้โดย Liu และ Ahuja (56) ซึ่งผลของปริมาณอนุภาคคิดเป็นปริมาตร, ขนาด, อัตราการไหล, Pressure drop ของสารผสมนี้ และพฤติกรรมถ่ายเทความร้อนได้ถูกศึกษาไว้ด้วย ซึ่งการนำไปใช้ที่ได้กล่าวไว้ นั้น อนุภาคที่ถูกแขวนลอยอยู่จะมีสเกลอยู่ในหน่วย ไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ ) หรือ มิลลิเมตร (mm) ซึ่งอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดที่กล่าวมานั้นอาจเกิดปัญหาร้ายแรง เช่น การสึกกร่อน และการอุดตันเกิดขึ้นได้ในระบบ ดังนั้น ของไหลที่ผสมด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ จึงมีการนำไปประยุกต์ใช้น้อยมาก ในการเพิ่มขีดความสามารถการถ่ายเทความร้อนให้กับระบบ

การประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนทำให้เกิดหนทางที่มีประสิทธิภาพของการปรับปรุงคุณภาพการถ่ายเทความร้อนของของไหล อนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 100 นาโนเมตร จะแสดงคุณสมบัติที่ต่างจากตอนที่อยู่ในสถานะของแข็งธรรมดา เมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคนาโนนี้มีพื้นที่ผิวสัมผัสที่สูงกว่า และมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น ได้มีนักวิจัยมากมายพยายามผสมอนุภาคนาโนลงในของไหลต่างๆ เพื่อสร้างของไหลที่มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน

Choi (57) เป็นนักวิจัยคนแรกที่ใช้คำว่า “ Nanofluids” เพื่ออ้างถึงถึงของไหลที่มีอนุภาคนาโนแขวนลอยอยู่ ผลการทดลองเบื้องต้นส่วนหนึ่งแสดงให้เห็นค่าการนำความร้อนที่สามารถเพิ่มขึ้นประมาณ 60% ซึ่งได้จากของไหลนาโนที่ประกอบด้วยน้ำและอนุภาคนาโน 5 Vol% ของ CuO

ด้วยการผสมอนุภาคนาโนในสารทำงาน ในระบบทำความร้อน หรือ ระบบทำความเย็น คุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนสามารถที่จะพัฒนาได้อย่างมากมาย เหตุผลสำคัญสามารถแบ่งเป็นข้อๆได้ ดังนี้

1. การผสมอนุภาคนาโน จะเพิ่มพื้นที่ผิว และความจุความร้อนของของไหล
2. การผสมอนุภาคนาโน จะเพิ่มประสิทธิภาพการนำความร้อนให้กับของไหล
3. ปฏิกริยาการชนกันท่ามกลางอนุภาคของไหลและการไหลผ่านผิวหน้าจะเกิดขึ้นรุนแรงและหนาแน่นมากขึ้น
4. การเปลี่ยนแปลงการผสมกัน และ ความปั่นป่วนของของไหลจะรุนแรงมากขึ้น
5. การกระจายตัวของอนุภาคนาโนจะทำให้อุณหภูมิของของไหลเท่ากันทั่วทุกตำแหน่ง

#### ค่าการนำความร้อนของของไหลนาโน (Nanofluid)

ดังที่กล่าวข้างต้นของไหลนาโนจะแสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าของไหลที่ถ่ายเทความร้อนทั่วไป หนึ่งในสาเหตุนั้นคือ การแขวนลอยของอนุภาคอย่างดีเยี่ยม จะไปเพิ่มค่าการนำความร้อนของของไหลนาโน ค่าการนำความร้อนของของไหลนาโนจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนทางปริมาตรของอนุภาคนาโนอย่างมาก เป็นเวลานานแล้วที่การพัฒนาทฤษฎีที่สลับซับซ้อน ในการทำนายค่าการนำความร้อนของของไหลนาโนเป็นปัญหาที่ไม่สามารถแก้ไขได้ แต่ยังคงมีการคำนวณความสัมพันธ์ต่างๆ ที่เกิดจากประสบการณ์ เพื่อที่จะคำนวณค่าการนำความร้อนของของผสม 2 สถานะ (two-phase mixture) บนพื้นฐานของการจำกัดความของประสิทธิภาพการนำความร้อนของของผสม 2 สถานะ

$$k_{eff} = \frac{k_p \alpha_p (dT/dx)_p + k_f \alpha_f (dT/dx)_f}{\alpha_p (dT/dx)_p + \alpha_f (dT/dx)_f} \quad (2-10)$$

Hamilton และ Crosser (58) เสนอแบบจำลองของของผสมระหว่างของเหลวและของแข็ง ซึ่งมีอัตราส่วนของค่าการนำความร้อน ของทั้งสองสมการที่มากกว่า 100

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = \frac{k_p + (n-1)k_f - (n-1)\alpha(k_f - k_p)}{k_p + (n-1)k_f + \alpha(k_f - k_p)} \quad (2-11)$$

โดยที่

$k_p$  คือค่าการนำความร้อนของอนุภาค,  $k_f$  คือค่าการนำความร้อนของของไหล,  $\alpha$  คือสัดส่วนปริมาตรของอนุภาค,  $n$  คือตัวประกอบรูปร่างที่เกิดจากการทดลองกำหนดให้เป็น

$$n = \frac{3}{\phi} \quad (2-12)$$

$\phi$  คือค่าความกลม ซึ่งอธิบายได้ว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวของทรงกลม ซึ่งมีปริมาตรเท่ากับอนุภาคนั้น เทียบกับพื้นที่ผิวกลมจริงๆ ของอนุภาค

ผลการทดลองของการวิจัยเหล่านั้นแสดงให้เห็นผลที่บังเอิญตรงกันอย่างน้อยน่าพอใจระหว่างการทำนายด้วยทฤษฎี และข้อมูลจากการทดลอง สำหรับอนุภาคพิเศษ ในช่วงของสัดส่วนปริมาตรจนถึง 30% สำหรับอนุภาคอื่นๆ ค่าตัวประกอบ  $n$  สามารถเปลี่ยนไปได้ตั้งแต่ 0.5 ถึง 0.6

อีกทางเล็อกหนึ่งในการคำนวณหาประสิทธิภาพค่าการนำความร้อนของ Solid-Liquid mixture ได้ถูกแสดงโดย Wasp (59)

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f - 2\alpha(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f + \alpha(k_f - k_p)} \quad (2-13)$$

สัดส่วนปริมาตร  $\alpha$  ของอนุภาคสามารถหาได้จาก

$$\alpha = \frac{V_p}{V_f + V_p} = m \frac{\pi \bar{d}_p^3}{6} \quad (2-14)$$

โดย  $m$  คือปริมาณของอนุภาคต่อหน่วยปริมาตร,  $\bar{d}_p$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของอนุภาค

การเปรียบเทียบระหว่างสมการ(2-11) และ 2-14) แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองของ Wasp เป็นกรณีพิเศษ ที่ค่าความกลม (Sphericity) เท่ากับ 1.0 ในแบบจำลอง Hamilton และ Crosser (58)

สูตรการคำนวณของทั้งสองกรณีนี้ ถูกนำไปประยุกต์ใช้สำหรับของผสมสองสถานะ (Two-phase mixture) ซึ่งผสมอยู่ด้วยผงของอนุภาคที่มีขนาดไมโครมิเตอร์ หรือแม้แต่มิลลิเมตร ในกรณีที่ไม่มีการที่เหมาะสมในการทำนายค่าการนำความร้อนของของไหลนาโน สมการด้านบนนี้สามารถนำไปประมาณหาค่าการนำความร้อน ในลักษณะหยาบๆ ได้

จากการนำแบบจำลองของ Hamilton และ Crosser (58) ไปประยุกต์ใช้กับของผสมระหว่างน้ำและอนุภาคนาโนของอลูมิเนียม สัมประสิทธิ์การนำความร้อน  $k_{eff}$  ถูกประมาณค่าได้ สำหรับค่า  $\phi$  ที่มีค่าตั้งแต่ 0.3 ถึง 1.0 จากที่กล่าวมา ผลการคำนวณถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองเบื้องต้น ด้วยค่าความกลมที่กำหนด ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหลที่มีการผสมของอนุภาคของแข็งจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนปริมาตรของอนุภาคของแข็ง หากค่าความกลมของอนุภาคนาโนของอลูมิเนียมเท่ากับ 0.3 การเพิ่มขึ้นอย่างมากมาของค่าการนำความร้อนของของไหลนาโน จะเกิดขึ้นโดยค่าสัดส่วนการนำความร้อน ( $k_{eff}/k_f$ ) ที่สัดส่วนปริมาตร 2% ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.2 จะเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 ที่สัดส่วนปริมาตร 5% นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหลนาโน ยังถูกเพิ่มขึ้นได้โดยการลดค่าความกลมของอนุภาค ภายใต้เงื่อนไขที่สัดส่วนปริมาตรเดียวกัน ที่สัดส่วนปริมาตร 5% ค่าการนำความร้อนของของไหลนาโนสามารถเพิ่มขึ้น จากสัดส่วนการนำความร้อน ( $k_{eff}/k_f$ ) ที่ 1.2 (ค่าความกลม 1) ไปเป็น 1.5 (ค่าความกลม 0.3) ขนาดและคุณสมบัติของอนุภาคนาโน จะส่งผลกระทบต่อค่าการนำความร้อนของของไหลนาโนซึ่งผลเหล่านี้ทำให้สามารถทำนายได้ในที่สุดว่าอนุภาคนาโนจะเพิ่มค่าการนำความร้อนให้กับของไหลธรรมดาที่อยู่ในระบบการถ่ายเทความร้อน



ภาพประกอบ 11 แสดงผงอนุภาคนาโนของ  $TiO_2$



ภาพประกอบ 12 ภาพถ่ายของไหลนาโน

ตาราง 4 แสดงคุณสมบัติของอนุภาคนาโนไทเทเนียมออกไซด์ TiO<sub>2</sub> (P – 25)

คุณสมบัติของอนุภาคนาโนไทเทเนียมออกไซด์ TiO <sub>2</sub> (P – 25)	
ขนาดอนุภาค	21 nm
ชนิดของอนุภาค	กลม
ความหนาแน่น	130 g/L
พื้นที่ผิวต่อน้ำหนัก	63 m <sup>2</sup> /g
ค่าการนำความร้อน	11.7 Wm/K

ตาราง 5 แสดงคุณสมบัติของสารทำความเย็น ไตรคลอโรฟลูออโรมีเทน (Trichlorofluoromethane )

คุณสมบัติของสาร ไตรคลอโรฟลูออโรมีเทน ( R 11 )	
น้ำหนักโมเลกุล	137.37 g/mol
จุดเดือด	23.77 °C
ความหนาแน่น	1.494 g/cm <sup>3</sup>
ความดันไอ	89 kPa at 20 °C 131 kPa at 30 °C
อุณหภูมิวิกฤติ	198 °C
ความดันวิกฤติ	4.410 MPa
ความหนาแน่นวิกฤติ	4.151 mol.l <sup>-1</sup>
ค่าการนำความร้อน	0.087 (W/m/C)
ค่าความจุความร้อน	0.08 kJ/(mol.K)
ความหนืด	0.21 CentiStokes

### การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนโดยใช้ท่อความร้อนนั้น มีการศึกษามากแล้วและมีการพัฒนาเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการนำความร้อนที่ทิ้งกลับมาใช้ใหม่ จึงได้รวบรวมข้อมูลซึ่งเป็นประโยชน์ในการวิจัยไว้ดังนี้

ณัฐวุฒิ ธรรมศักดิ์ และทองเกียรติ ( Natthawud, Tammasak; & Tanongkiat. 2006 ). ศึกษาการควบคุมอุณหภูมิภายในไซโลเก็บข้าวเปลือกโดยใช้ท่อความร้อน ต้นแบบของไซโลที่มีขนาด 1000 กิโลกรัม ซึ่งท่อความร้อนนี้ทำจากทองแดงและมีครีบทำจากเหล็ก โดยพื้นที่ที่มีการถ่ายเทความร้อนรวมคือ 16 ตารางเมตร ความชื้นในไซลอนั้นถูกควบคุมไว้ที่ 12.8 % และอุณหภูมิภายในไซโลอยู่ที่ 28 °C และได้ทำการประเมินศักยภาพของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนในการควบคุมคุณภาพเมล็ดพันธุ์ข้าวเหลืองโดยเปรียบเทียบคุณภาพเมล็ดข้าวเหลืองด้วยการเก็บในถัง 4 แบบคือ ถังเก็บแบบท่อความร้อน ถังเก็บในห้องเย็น ถังเก็บแบบที่มีการระบายอากาศ และถังเก็บแบบธรรมชาติ โดยถังเก็บแบบท่อความร้อนที่ใช้เป็นแบบเทอร์โมไซฟอนภายในบรรจุด้วยเมทานอล มีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของอีวาเปอร์เรเตอร์ 1.95 ตารางเมตร และส่วนของคอนเดนเซอร์ 1 ตารางเมตร จำกัด

ความชื้นในถึงที่ 12% wb น้ำหนักของถั่วเหลืองแต่ละถังเท่ากับ 100 กิโลกรัม และจากการทดสอบ การเก็บรักษา พบว่า ถังแบบท่อความร้อนมีประสิทธิภาพในการเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์มากที่สุด

ณรงค์ และคณะ ( Narong; et al. ). ได้ศึกษาโดยใช้เทอร์โมไซฟอนช่วยลดการใช้พลังงาน ในระบบเรือนเพาะชำโดยการจำลองทางคณิตศาสตร์ ในรายงานนั้นได้อธิบายถึงการใส่เทอร์โมไซ ฟอนติดไว้บริเวณผนังภายนอกของเรือนเพาะชำ เพื่อดูดซับความร้อนทำให้การใช้พลังงานในระบบ ปรับอากาศลดลงไป 14.23 kW หรือประมาณ 36.45 % และประสิทธิภาพด้านพลังงานความเย็น ของระบบเพิ่มขึ้น 2.0 Btu/h/W หรือ 14.28 %

ฮวง และคณะ ( Huang; et al. 1998 ). ศึกษาการทำความเย็นแบบดูดกลืนอินทรีย์ใช้หัวพัน ใช้สารทำความเย็น R141b การทดสอบระบบแบบเฟสเดียวจะได้ค่า cop ประมาณ 0.5 อุณหภูมิที่ คอนเดนเซอร์อยู่ที่ 28 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิอีวาเปอเรเตอร์อยู่ที่ 8 องศาเซลเซียส และหากมี การใช้ระบบหัวพันเพื่อช่วยการทำความเย็นค่า cop จะเพิ่มขึ้นอีก 0.22

ลิน แก้ว และ คอนเวลล์ ( Lin, Kew; & Cornwell. 2000 ). ศึกษาการถ่ายเทความร้อนให้กับ สารทำความเย็นภายในท่อ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร โดยใช้สารทำความเย็นชนิด R141b เป็นสารทำงาน ลักษณะของการถ่ายเทความร้อนได้ถูกทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงขนาดความร้อนที่ ให้เข้าไป และให้ความเร็วของมวลหรืออัตราการไหลของมวลที่  $510 \text{ kg/m}^2\text{s}$  อัตราการถ่ายเทความร้อน อยู่ที่  $18-72 \text{ kW/m}^2$  โดยที่ป้อนความร้อนเข้าไป  $72 \text{ kW/m}^2$  จะทำให้คุณภาพไอดีที่สุด

ลิน พรนพวรรณ และรีแลนด์ ( Lin, Ponnappan; & Leland. 2002 ). ได้พัฒนาขนาดของ ท่อความร้อนโดยใช้ครีบทองแดงและทดสอบในแนวราบ โดยให้ความร้อน 3 ระดับที่มาจากขด ลวดความร้อน ได้สรุปเอาไว้ว่า ท่อความร้อนที่มีครีบบเปิดภายนอกเป็นบางส่วน จะให้ประสิทธิภาพที่ ดีต่อความร้อนที่ครีบบเปิดแบบทั้งท่อ รวมทั้งสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่คอนเดนเซอร์ เพิ่มขึ้นถึง 120% อีกทั้งค่าการถ่ายเทความร้อนมากกว่า  $140 \text{ W/cm}^2$  และอุณหภูมิทำงานมีค่าอยู่ที่  $110^\circ\text{C}$  ซึ่งเปรียบเทียบแล้วพบว่าประสิทธิภาพที่ดีกว่าเดิมและเสถียรมากกว่าเดิมอีกด้วย

อีเซน ( Esen. 2003 ). ทำการเพิ่มประสิทธิภาพของพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยหลอด สูญญากาศกับท่อความร้อนโดยใช้สารทำความเย็นที่แตกต่างกัน 36 ชนิด และน้ำ จากการทดสอบ การนำความร้อนในเดือนกรกฎาคมและสิงหาคมปี 2002 ที่ประเทศตุรกี สารทำงานมี R134a, R407c และ R22 ซึ่ง R407c จะให้ประสิทธิภาพดีที่สุดและสามารถใช้เตาได้นานประมาณ 27 ถึง 70 นาที

ซอง อิวิงค์ และฉิง ( Song, Ewing; & Ching. 2004 ). ใช้ระเบียบวิธีการทางคณิตศาสตร์ใน การนำความร้อนกลับมาใช้ด้วยท่อความร้อน โดยใช้โปรแกรม CFD ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองสามารถ

ทำนายประสิทธิภาพของระบบ และกระบวนการทดสอบนั้นจะปรับความเหมาะสมในการใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรม รวมทั้งข้อมูลที่ได้นั้นจะนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ถูกค่านำอุปกรณ์ไปใช้

หวน ฮอง และลี ( Xuan, Hong; & Li. 2004). ทดสอบและใช้การประมาณค่าของประสิทธิภาพและกลไกของท่อความร้อนแบบแผ่นเรียบโดยใช้ผงของทองแดงเป็นรอยต่อของหน้าสัมผัสซึ่งจะช่วยในการถ่ายเทความร้อน การทดสอบจะปรับเปลี่ยนขนาดของความร้อนที่ปรับเปลี่ยนปริมาณของสารทำงานซึ่งใช้น้ำ

แวลเซล ( Vasiliev. 2005 ). เขียนบทความท่อความร้อนที่เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยรวมรวมการวิจัยจากสหภาพโซเวียตและทวีปยุโรป โดยเขากำหนดค่าการถ่ายเทความร้อนด้านอิวาเปอเรเตอร์ระหว่าง  $10^3-10^5$  w/m<sup>2</sup>k และค่าการนำความร้อนระหว่าง 0.01-0.03 k/w ซึ่งจะลดขนาดพื้นที่และมวลของตัวแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อจะนำไปติดตั้งในระบบระบายความร้อนอิเล็กทรอนิกส์หรือนำไปเป็นตัวอุ่นอากาศก่อนเข้าไปในระบบเผาไหม้ของหม้อไอน้ำเพื่อลดพลังงานที่ใช้ และอาจนำไปสร้างเครื่องสะสมพลังงานความร้อนที่ใช้ตามบ้านเรือนและศึกษาการใช้ท่อความร้อนขนาดเล็กในการระบายความร้อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยท่อความร้อนนั้นทำจากท่อทองแดงและครีบทำจากผงของหินปูน เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อมีขนาด 4 mm ความยาวของท่อมีขนาด 200 mm โดยใช้น้ำเป็นของไหลในการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ประมาณ 50 วัตต์

ลู และคณะ ( Liu; et al. 2006 ). สร้างแบบจำลองและทดสอบการแบ่งวงท่อความร้อนเพื่อความสะดวกในการนำความร้อนกลับมาใช้โดยหาช่วงการทำงานของสารทำงานเพื่อความเหมาะสมในการนำไปใช้ และปรับเปลี่ยนความยาวของท่ออีวาเปอเรเตอร์และเปรียบเทียบสารทำความเย็นของน้ำและเมทานอล ซึ่งเมทานอลให้ช่วงในการทำงานกว้างกว่าน้ำ

แวลโซบ ซอลซ่า และทาคาฮาชิ ( Vlassov, Sousa; & Takahashi. 2006 ). ได้ทำการเปรียบเทียบสารทำงานแอมโมเนียและอะซีโตนภายในท่อความร้อนเพื่อหาสารทำงานที่เหมาะสมในการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนโดยการปรับค่าความร้อนในส่วนรับความร้อนระหว่าง 20-80 วัตต์ จากการศึกษาโดยใช้ระเบียบการทางคณิตศาสตร์ร่วมกับการใช้เครื่องมือทดสอบ พบว่าอะซีโตนมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีได้ดีกว่าแอมโมเนีย

วิสิณี และสมชาย ( Visinee; & Somchai. 2005 ). รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับของไหลนาโนที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อน เป็นการเพิ่มคุณค่าในการวิจัยในส่วนของขนาดอนุภาคนาโนชนิดอนุภาคทั้งที่เป็นโลหะและอโลหะ ลักษณะการถ่ายเทความร้อน ซึ่งผลของการรวบรวมข้อมูลนี้ผู้วิจัยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในส่วนของการไหลนาโนต่อไป

ซวน และลิ ( Xuan; & Li. 2000 ). และได้กล่าวถึงความเป็นไปได้ 4 ข้อในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เช่น การเพิ่มขนาดพื้นที่ของอนุภาค การเปลี่ยนสารทำงาน การชนกันของอนุภาค และ การกระจายตัวของอนุภาคนาโน

ซู่ และซู่ ( Xue; & Xu. 2003 ). จำลองผลกระทบของการนำความร้อนในของไหลนาโน ใช้หลักการทฤษฎีของแมคเวล และผลทางทฤษฎีของผลกระทบการนำความร้อนนั้นจะใช้อนุภาคนาโนของอะลูมิเนียมผสมกับน้ำซึ่งเป็นฐานข้อมูลในการใช้คำนวณการใช้แบบจำลองนี้สามารถอธิบายความผิดปกติในการเพิ่มประสิทธิภาพของท่อความร้อนอนุภาคขนาดเล็ก/น้ำมัน และแสดงความไม่เป็นเชิงเส้นของการรับภาระของท่อ และได้สร้างแบบจำลองการนำความร้อนของของไหลนาโนกับท่อ และเปรียบเทียบเกี่ยวกับลักษณะรูปร่าง ความเป็นไปได้ของการนำความร้อน ของของแข็งและของเหลวซึ่งมีความสัมพันธ์กันในอัตราส่วนผสม จากทฤษฎีผลกระทบของการนำความร้อนของทองแดงกับน้ำและทองแดงกับเอทิลีนที่เป็นของไหลนาโน ซึ่งทั้งสองอย่างนั้นให้ผลการนำความร้อนที่อยู่ในเกณฑ์ดี

มามูต ( Mamut. 2004 ). ทำการศึกษาผลของลักษณะการนำความร้อนของของไหลนาโนที่ทำจากน้ำผสมกับอนุภาคนาโนของทองแดง ผลของการทดสอบนั้นจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับทฤษฎีและการจำลองบนหลักการของการถ่ายเทความร้อนโดยการจำลองของ Hamilton-Crosser ให้ค่าทดสอบที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้ประมาณการไว้

ลอย นูจิ้น และลาโจวี ( Roy, Nguyen; & Lajoie. 2004). นำเสนองานวิจัยการถ่ายเทความร้อนในระบบระบายความร้อนโดยใช้ของไหลนาโนและกำหนดการไหลเป็นแบบราบเรียบ ในงานวิจัยนี้ใช้น้ำผสมกับอนุภาคนาโนของอะลูมิเนียมออกไซด์เป็นของไหลนาโน โดยทดสอบด้วยระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์ผลที่ได้คือของไหลนาโนสามารถให้การถ่ายเทความร้อนดีขึ้น 2 เท่าโดยผสมอนุภาคในอัตราส่วน 10%

เวิน และดิงค์ ( Wen; & Ding. 2004 ). ทดสอบการพาความร้อนของของไหลนาโนผ่านท่อทองแดงโดยกำหนดให้การไหลเป็นแบบราบเรียบและของไหลนาโนประกอบด้วยอนุภาคนาโนของอะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับน้ำ ผลการทดสอบที่ได้การใส่อนุภาคนาโนจะทำให้การถ่ายเทความร้อนดีขึ้นและการลดขนาดของท่อลงจะทำให้การกระจายของความร้อนตามความยาวท่อนั้นดีขึ้น โดยเปรียบเทียบกับกรใช้น้ำเป็นสารทำงานเพียงอย่างเดียว

เซาว์ ( Zhou. 2004 ). ทำการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนร่วมกับการใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกและนำมาทำการเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่ได้ใช้คลื่นเสียงโดยให้ท่อทองแดงวางตัวในแนวระนาบ และทำการศึกษาผลกระทบของคลื่นเสียง,ความเข้มข้นของของไหลนาโนและการถ่ายเทความร้อนบริเวณท่อทองแดง ผลที่ได้จากการทดสอบพบว่ากรถ่ายเทความร้อนไม่มีความแตกต่างกัน

แบงค์ และ ช้าง ( Bang; & Chang. 2005 ). ศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนที่ทำจากอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ผสมกับน้ำในพื้นที่ผิวระนาบของอ่างทดสอบโดยจะใช้กล้องความเร็วสูงศึกษาพฤติกรรมการเดือด จากผลการทดสอบ สรุปได้ว่า ของไหลนาโนจะให้การถ่ายเทความร้อนน้อยกว่าการใช้น้ำเป็นสารทำงานเพียงอย่างเดียว และถ้าให้ความเข้มข้นของอนุภาคอะลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้นจะทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลง ส่วนระดับการเดือดก็จะลดลงเช่นเดียวกัน

ดิงค์ และ เวิน ( Ding; & Wen. 2005 ). ศึกษาผลกระทบของอนุภาคในการเคลื่อนย้ายเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนในท่อขนาดเล็กเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร รวมทั้งศึกษาผลกระทบของการก่อให้เกิดแรงเฉือนและผลกระทบของความหนืดเนื่องจากแรงโน้มถ่วง การเคลื่อนย้ายของอนุภาคนาโนและการกระจายตัวภายใต้การเคลื่อนที่แบบบราวน์เนียน ซึ่งผลที่ได้นั้นจะเห็นการเคลื่อนที่แบบไม่เป็นระเบียบของอนุภาค อุณหภูมิในภาคตัดขวางของท่อ โดยจะนำไปเปรียบเทียบกับกรณีเคลื่อนที่แบบเป็นระเบียบของอนุภาคในการถ่ายเทความร้อน ซึ่งการเคลื่อนที่ของอนุภาคนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าของนัสซัลท์นัมเบอร์และ ทดสอบการถ่ายเทความร้อนของน้ำที่ผสมอนุภาคนาโนแบบท่อของคาร์บอน การทดสอบนี้ใช้ท่อทองแดงและใช้ของไหลนาโนเป็นสารทำงาน โดยวางท่อในแนวระนาบ ผลการทดสอบนั้นได้พบว่า การถ่ายเทความร้อนขึ้นกับการไหลของสารงาน ส่วนผลกระทบของความเป็นกรดต่างนั้นน้อยมาก และผลกระทบที่มากที่สุดของการถ่ายเทความร้อน คือ อัตราส่วนผสมของอนุภาคนาโน ในการทดสอบนั้นได้ผสมอนุภาคนาโนไว้ที่ 0.5% จะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น 350% ที่ค่าเรโนลด์นัมเบอร์เท่ากับ 800 โดยเปรียบเทียบกับกรณีไม่ใส่ผงอนุภาคนาโนในสารทำงาน

คู และ เคลลิสเตอร์เออร์ ( Koo; & Kleinstreuer. 2005 ). ศึกษาการไหลของของไหลนาโนในครีบบระบายความร้อนขนาดเล็กโดยใช้วิธีการจำลองการไหลของของไหลนาโนซึ่งของไหลนาโนนี้แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ใช้อนุภาคนาโนของทองแดงผสมกับน้ำและอนุภาคนาโนของทองแดงผสมกับเอทิลีน โดยกำหนดให้อัตราการไหลเป็นแบบราบเรียบ จากนั้นนำมาวิเคราะห์ค่าการกระจายของอุณหภูมิ, ความดัน, ค่านัสซัลท์นัมเบอร์, การกระจายตัวของความหนืด และผลกระทบของอุณหภูมิ

เรียว และ ลิน ( Liu; & Lin. 2005). เพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยอนุภาคนาโนแบบท่อของคาร์บอนในของไหล โดยใช้เอทิลีน และ น้ำมันเครื่องชนิดซินติติก เป็นของไหลนาโน ซึ่งผลของการทดสอบการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น 12.4% สำหรับอนุภาคนาโนผสมกับเอทิลีน ในอัตราส่วน 1% โดยปริมาตร และเพิ่มขึ้น 30% สำหรับอนุภาคนาโนที่ผสมในน้ำมันเครื่องที่อัตราส่วน 2% โดยปริมาตร

แยง และ แซง ( Yang; & Zhang. 2005 ). ศึกษาคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนโดยใช้อนุภาคนาโนในน้ำที่มีการไหลแบบราบเรียบ ในงานวิจัยนี้ศึกษาโดยใช้ภาพถ่ายของอนุภาคนาโนและ

เพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนด้วยอนุภาคนาโนของกราฟไฟต์ ซึ่งทำการควบคุมอัตราส่วนการผสม โดยผลที่ได้จากการทดสอบนั้นมีย่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคาดคะเนไว้ ซึ่งผลการทดสอบที่ได้นั้นจะนำไปปรับปรุงในงานวิจัยต่อไป

ฉิน และฉวน ( Chein; & Chuang. 2006 ). ศึกษาประสิทธิภาพการระบายความร้อนในโดยใช้ของไหลนาโนในครีบบระบายความร้อนขนาดเล็กโดยใช้อนุภาคนาโนของทองแดงผสมกับน้ำและปรับปริมาณอัตราส่วนของอนุภาคนาโนเพื่อหาความเหมาะสมในการถ่ายเทความร้อนของครีบบระบายความร้อนซึ่งอนุภาคนาโนมี 2 ขนาด คือ 100x300 ไมโครเมตร และขนาด 57x365 ไมโครเมตร ผลการทดสอบ เมื่อใช้ของไหลนาโนช่วยในการถ่ายเทความร้อน พบว่า สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน และไม่ทำให้ความดันตกสูง เนื่องจากอนุภาคนาโนมีขนาดเล็กมากและผสมปริมาณที่น้อย

เกี้ยว และซุ ( Gao; & Zhou. 2005 ). ศึกษาความแตกต่างของทฤษฎีทางฟิสิกส์และลักษณะทางเรขาคณิตที่ทำให้ความสามารถในการนำความร้อนของอนุภาคนาโนต่างกัน และการศึกษาเกี่ยวกับของไหลนาโนส่วนมากจะศึกษาสภาพการนำความร้อนโดยการกำหนดปริมาตรการผสมอนุภาคนาโนลงในของไหลนาโน

ฮี และคณะ ( He; et al. 2006 ). ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการไหลของอนุภาคนาโนไทเทเนียมออกไซด์ที่ไหลตามแนวแกนตั้ง โดยใช้น้ำเพียงอย่างเดียวและใช้ของไหลนาโน จากนั้นจะนำค่าการถ่ายเทความร้อนมาเปรียบเทียบกัน จากการทดสอบนั้นค่าการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนให้การถ่ายเทได้ดี และความดันสูญเสียมีไม่มากนัก

เฮอริส เอสฟาฮานี และเอ็ดมาท ( Heris, Esfahany; & Etemad. 2006). ทดสอบออกไซด์ของอนุภาคนาโนในการถ่ายเทความร้อนโดยการไหลแบบราบเรียบ ในรายงานได้ทดสอบของไหลนาโนที่ประกอบด้วยอนุภาค CuO และ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในน้ำที่มีระดับของความเข้มข้นต่างกัน และการหาความร้อนโดยการไหลแบบราบเรียบ ผ่านท่อกลมโดยกำหนดขอบเขตของอุณหภูมิไว้คงที่ ผลการเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบ CuO ที่ผสมกับน้ำ และ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่ผสมกับน้ำ พบว่าค่าการถ่ายเทความร้อนไม่แตกต่างกันในกรณีที่ความเข้มข้นนั้นน้อยมาก แต่เมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโนเพิ่มขึ้นจะทำให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น และในรายงานนี้พบว่าค่าการถ่ายเทความร้อนของ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> จะดีกว่า CuO เล็กน้อย

แจง และช็อย ( Jang; & Choi. 2006 ). ทำการเพิ่มประสิทธิภาพในการระบายความร้อนของครีบบระบายความร้อนโดยใช้ของไหลนาโน ซึ่งใช้การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์และนำมาทำการจำลองการระบายความร้อนโดยใช้ของไหลนาโน โดยมีส่วนผสมของอนุภาคทองแดงกับน้ำและ

อนุภาคเพชรกับน้ำ และนำมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งผลที่ได้คือของไหลนาโนที่มีอนุภาคของเพชรสามารถระบายความร้อนได้ดีกว่าการใช้น้ำอย่างเดียว

ลี และคณะ ( Li; et al. 2006 ). ศึกษาสารทำความเย็นและมวลของน้ำในการถ่ายเทความร้อนโดยใช้สารทำความเย็น R134a ร่วมกับอนุภาคนาโนของทองแดงและนำไปเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้สารทำความเย็น R134a เป็นสารทำงานเพียงอย่างเดียว ซึ่งในรายงานการทดสอบทำการศึกษาคความดัน และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ผลการทดสอบเมื่อทำการผสมอนุภาคนาโนของทองแดงลงในสารทำงานจะทำให้อุณหภูมิลดลงจาก 283.15 K เหลือ 282.65 K และความดันลดลงจาก 414.86 kPa เหลือ 401.35 kPa

แมนซอ กาลานิส และนูเง็ง ( Mansour, Galanis; & Nguyen. 2006 ). ศึกษาผลกระทบของคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของน้ำและอนุภาคนาโน ซึ่งในที่นี้ใช้อลูมิเนียมออกไซด์เป็นอนุภาคนาโน และทดสอบประสิทธิภาพทางเทอร์โมไฮดรอลิกของการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน ใช้การพาความร้อนแบบบังคับโดยให้ความร้อนที่ผนังท่อซึ่งขรุขระ จากการศึกษาแบบจำลองทั้งสองแบบพบว่า มีความแตกต่างกันมาก ผลการทดสอบโดยของไหลนาโนสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบที่มีการใช้ออนุภาคนาโนเป็นส่วนประกอบ

เมอเชิท ลีอง และแยง ( Murshed, Leong; & Yang. 2006 ). การนำความร้อนของอนุภาคนาโนในของไหลหรือของไหลนาโน ในรายงานอธิบายถึงทฤษฎีและการทดสอบของการเพิ่มความร้อนในของไหลนาโนโดยพบว่า การใส่อนุภาคนาโนจะทำให้การนำความร้อนดีขึ้น ในการทดสอบนั้นจะใส่อนุภาคนาโนของอะลูมิเนียมออกไซด์ 1-5% ลงในน้ำบริสุทธิ์ ซึ่งให้ผลการนำความร้อนเพิ่มถึง 29% โดยการเปรียบเทียบกับสมการของแมคเวล

นูเง็ง และคณะ ( Nguyen; et al. 2006 ). ทำการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในระบบระบายความร้อนของอุปกรณ์ไฟฟ้าด้วย อนุภาคอะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับน้ำเป็นของไหลนาโน การทดสอบนั้นจะทำการระบายความร้อนของไมโครโปรเซสเซอร์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าซึ่งผลของการผสมอนุภาคนาโนลงไป 6.8% โดยปริมาตรจะทำให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นมากกว่า 40% โดยเปรียบเทียบกับการใช้ น้ำเป็นสารทำงานเพียงอย่างเดียว และขนาดของอนุภาคนาโนยังมีผลในการถ่ายเทความร้อนคืออนุภาคขนาด 36 nm จะให้การถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าขนาด 47 nm

ปาล์ม ลอย และนูเง็ง ( Palm, Roy; & Nguyen. 2006 ). เพิ่มการถ่ายเทความร้อนในระบบโดยใช้ของไหลนาโน ซึ่งใช้ระเบียบวิธีการทางคณิตศาสตร์โดยใช้ออนุภาคนาโน สามารถเพิ่มความสามารถในการระบายความร้อน อนุภาคนาโนของอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ผสมในน้ำที่ 4% จะสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ถึง 25% เปรียบเทียบกับการใช้น้ำเป็นสารทำงานเพียงอย่างเดียว

แวง และมาจุมดา ( Wang; & Mujumdar. 2006 ). รวบรวมบทความและการทดสอบงานวิจัยในการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนของบุคคลต่างๆเพื่อศึกษาและใช้อ้างอิง ข้อมูล ในรายงานนั้นจะแสดงการเปรียบเทียบงานวิจัย การถ่ายเทความร้อนของอนุภาคนาโน การวัดค่าของการนำความร้อน การวัดความหนืดของของไหล รวมทั้งการเปรียบเทียบข้อมูลการทดสอบของการถ่ายเทความร้อนในของไหลนาโนหลายๆชนิดของบุคคลต่างๆ

หวง และคณะ ( Hwang; et al. 2006 ). ศึกษาอนุภาคนาโนหลายๆ ชนิด เช่น อนุภาคท่อนาโนคาร์บอน อนุภาคทองแดงออกไซด์ ซิลิกอนไดออกไซด์ และอนุภาคนาโนเงิน นำมาใช้ในการผสมสำหรับทำเป็นของไหลนาโน เพื่อทำการศึกษาประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนและการหล่อลื่น โดยนำมาผสมกับน้ำ เอทิลแอลกอฮอล์ น้ำมันเครื่อง น้ำมันซิลิกอน และน้ำมันโพลีโอเลฟิน ซึ่งในการศึกษาทางความร้อนจะทำการศึกษาในส่วนของการนำความร้อน ส่วนในการหล่อลื่นจะศึกษาเรื่องความหนืดจลน์ ผลที่ได้คือสามารถเพิ่มสมรรถนะในการนำความร้อนได้  $0.4 \text{ W/mK}$  และในการผสมลงในน้ำมันหล่อลื่นทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น และศึกษาการใช้อนุภาคนาโนในการนำความร้อนโดยการเปรียบเทียบระหว่างการใช้กับอนุภาคนาโน 4 ชนิด คือ อนุภาคท่อนาโนคาร์บอนผสมน้ำ อนุภาคนาโนทองแดงออกไซด์ผสมน้ำ อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ผสมน้ำ และอนุภาคนาโนทองแดงออกไซด์ผสมเอทิลแอลกอฮอล์ ผลที่ได้คืออนุภาคท่อนาโนคาร์บอนผสมน้ำ  $0.01 \%$  โดยปริมาตรทำให้ระบบมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น  $11.3\%$

ทีเซี่ย และคณะ ( Tsai; et al. 2004 ). ได้ศึกษาถึงผลของโครงสร้างลักษณะอนุภาคนาโนของทองในของไหลนาโน เพื่อดูประสิทธิภาพของท่อความร้อน โดยใช้ความยาวของท่อทองแดง  $170 \text{ mm}$  และมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง  $6 \text{ mm}$  ผลการศึกษาที่ได้คือ มีการนำความร้อนเพิ่มขึ้นจาก  $0.17 \text{ }^{\circ}\text{C/w}$  ไปเป็น  $0.215 \text{ }^{\circ}\text{C/w}$  และได้ทำการเปรียบเทียบการใช้ท่อความร้อนโดยใช้ของไหลนาโนกับน้ำ DI ซึ่งผลที่ได้คือ น้ำ DI ให้การนำความร้อนน้อยกว่าเนื่องจาก อนุภาคนาโนจะไปช่วยในการรับความร้อนและอนุภาคนาโนยังไปทำให้ฟองอากาศบริเวณแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง

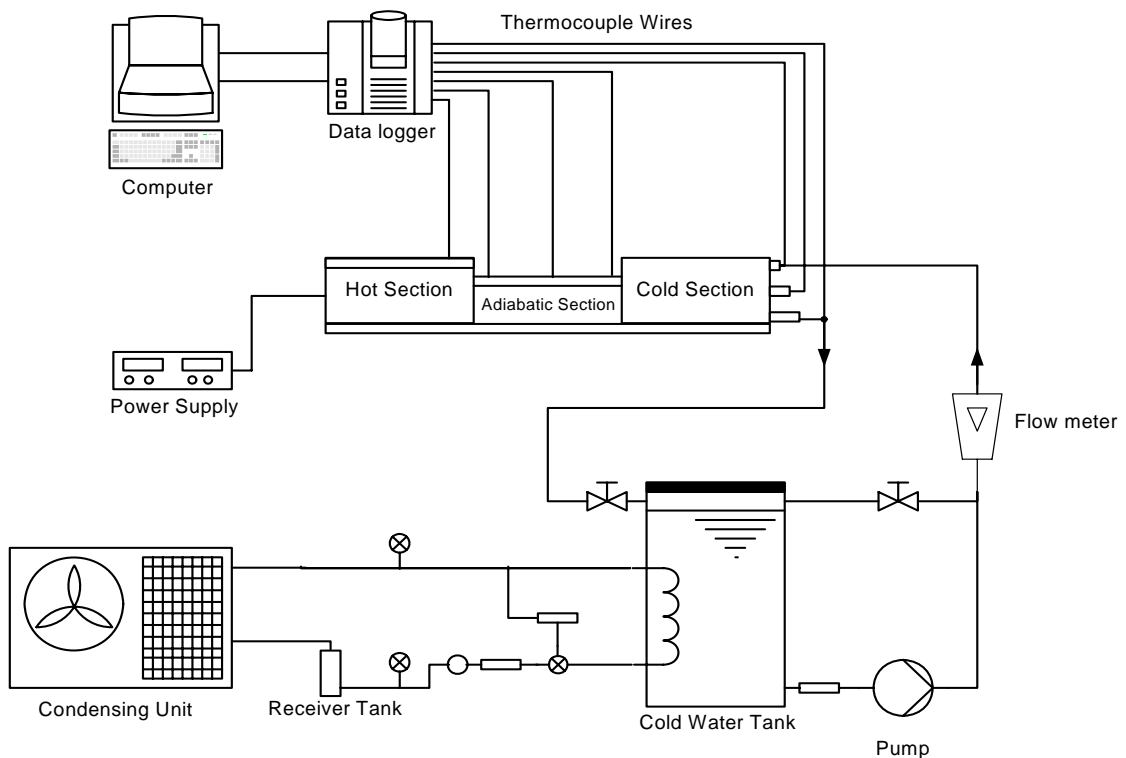
ไมก้า และคณะ ( Maïga; et al. 2004 ). ศึกษาคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนในหลอดความร้อนที่เหมือนกัน และศึกษาปัญหาของการพาความร้อนแบบบังคับของน้ำ-อะลูมิเนียมออกไซด์และเอทิลีน-อะลูมิเนียมออกไซด์ ที่เป็นของไหลนาโนภายในท่อความร้อนซึ่งทั้งสองหลอดนั้นเหมือนกันทุกประการและให้ความร้อนกับท่อแบบคงที่ ในรายงานนั้นได้กล่าวว่าเมื่อเขาเพิ่มความร้อนหรือเพิ่มอัตราส่วนของอนุภาคนาโนในของไหลการถ่ายเทความร้อนนั้นเพิ่มขึ้น และได้สรุปในตอนท้ายไว้ว่าการเปรียบเทียบของสารทำงานทั้งสองชนิดนั้น ของไหลนาโนเอทิลีน-อะลูมิเนียมออกไซด์ให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าของไหลนาโนของน้ำ-อะลูมิเนียมออกไซด์

เค็ง และคณะ ( Kang; et al. 2004 ). ได้เสนองานวิจัยของประสิทธิภาพของท่อความร้อนเมื่อใส่อนุภาคนาโนของเงินลงไปของเหลวภายในท่อความร้อนโดยใช้น้ำเป็นของเหลว อนุภาคนาโนของเงินมีขนาด 35 nm และ 10 nm การทดลองสามารถวัดการกระจายของอุณหภูมิและนำมาเปรียบเทียบการนำความร้อนโดยใช้ของไหลนาโนและน้ำเพียงอย่างเดียว การทดสอบจะผสมอนุภาคนาโนในปริมาตร 1 mg/L ถึง 100 mg/L ลงในของไหล โดยท่อจะระบายความร้อนให้แก่ น้ำที่อุณหภูมิประมาณ 40°C สามารถปรับค่าความร้อนที่ให้จากท่อความร้อนโดยขดลวดความร้อนขนาด 30-60 วัตต์ ผลที่ได้คือ การนำความร้อนจะดีที่สุดเมื่ออนุภาคนาโนมีขนาด 10 nm ที่ระดับพลังงาน 60 วัตต์ และอัตราผสมเท่ากับ 10 mg/L ( 44.6°C ) และได้เปรียบเทียบการนำความร้อนโดยใช้น้ำเพียงอย่างเดียว ปรากฏว่า ค่าความต้านทานการนำความร้อน ของน้ำมีค่ามากกว่าของไหลนาโน และการใช้ของไหลนาโนยังทำให้การสูญเสียความร้อนลดลง

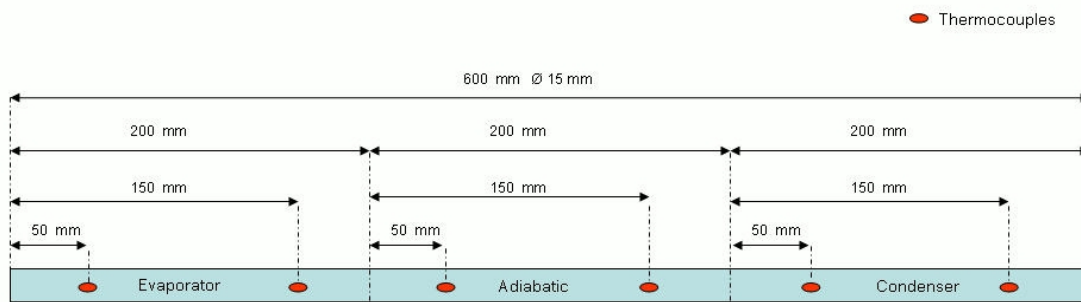
จากการศึกษาบทบาททฤษฎีธรรมชาติและเอกสารที่เกี่ยวข้องพบว่าท่อความร้อนนั้นมีการศึกษามากแล้วรูปแบบการทำงานรวมทั้งอุปกรณ์จะคล้ายกันแต่จะแตกต่างกันในเรื่องของสารทำงานที่ใช้ภายในท่อความร้อน ส่วนของไหลนาโนนั้นมีการศึกษาค้นคว้าและการใช้งานมานานมานี้ซึ่งยังไม่ค่อยแพร่หลายมากนักและที่ผ่านมาได้มีการใช้ของไหลนาโนร่วมกับท่อความร้อนนั้นน้อยมาก จึงเป็นที่มาในการทำวิจัยเรื่องนี้และเป็นแนวทางที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของท่อความร้อน

### บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

อุปกรณ์ในการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ชุดคือชุดท่อความร้อน,ชุดทำน้ำเย็นและชุดบันทึกผลการทดสอบ ในส่วนของท่อความร้อนนั้นใช้ขดลวดความร้อนเป็นแหล่งให้ความร้อนกับฮีตไปป์ โดยสามารถปรับระดับกำลังไฟฟ้าที่ให้กับขดลวดความร้อนได้ และระบายความร้อนด้วยน้ำเย็นซึ่งจะกำหนดไว้ที่ 19 - 20 °C โดยสารทำงานของท่อความร้อนใช้ R11 ซึ่งมีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง เพื่อง่ายต่อการผสมอนุภาคนาโน อนุภาคนาโนที่ใช้ในการทดสอบคือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 21 นาโนเมตร



ภาพประกอบ 13 แสดงไดอะแกรมของอุปกรณ์การทดลอง



ภาพประกอบ 14 แสดงขนาดของท่อความร้อนและตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล

### อุปกรณ์ในการทดลอง

จากภาพประกอบ 13 ประกอบด้วยชุดทดลองและอุปกรณ์ต่างๆดังนี้

- 1.ชุดควบคุมระบบน้ำเย็น
- 2.ชุดปรับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าชุดลดความร้อน ( Dimmer )
- 3.เครื่องควบคุมอุณหภูมิ ( Temp controler )
- 4.ชุดปรับอัตราการไหลของน้ำเย็น ( Rota meter)
- 5.ชุดทดสอบท่อความร้อน
- 6.เครื่องเก็บข้อมูล ( Data logger )
- 7.คอมพิวเตอร์



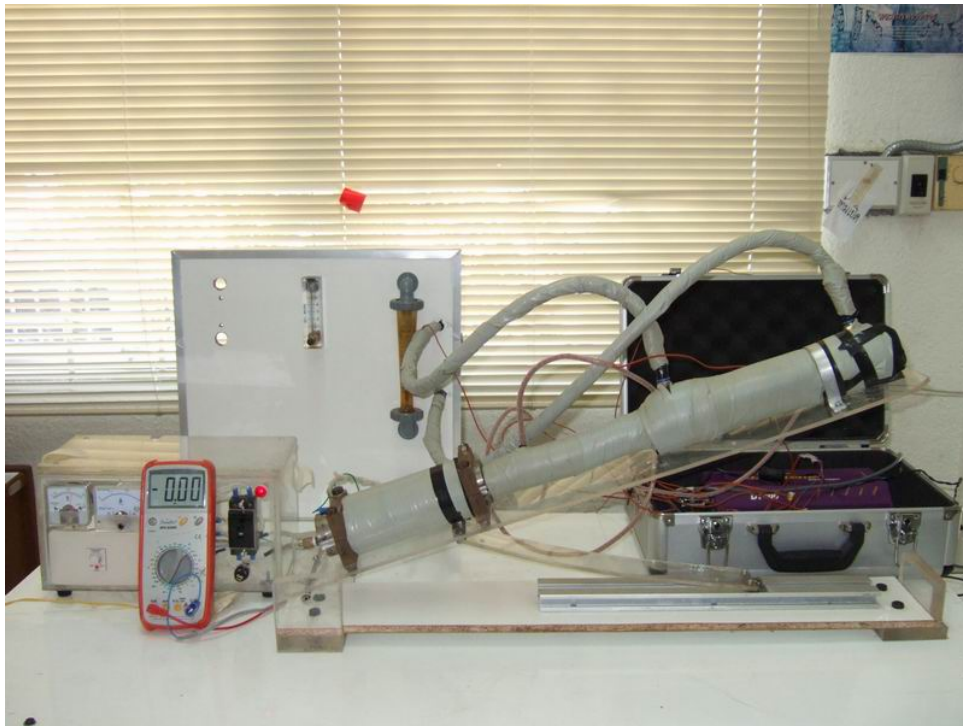
ภาพประกอบ 15 แสดงอุปกรณ์ในการทดสอบ



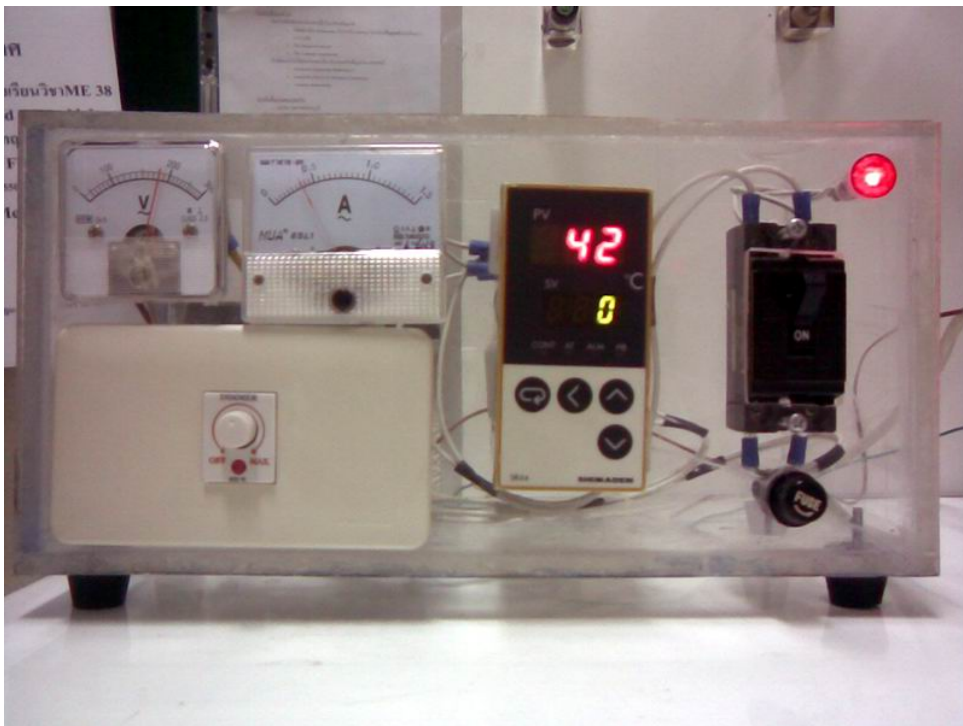
ภาพประกอบ 16 แสดงท่อความร้อนที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลแล้วกับชุดคอนเดนเซอร์



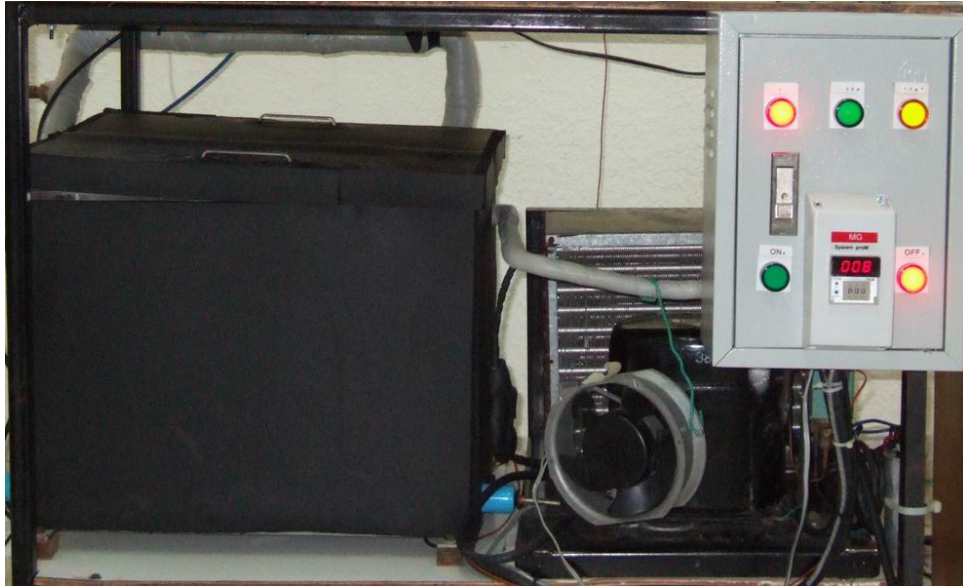
ภาพประกอบ 17 แสดงส่วนให้ความร้อนของท่อความร้อน



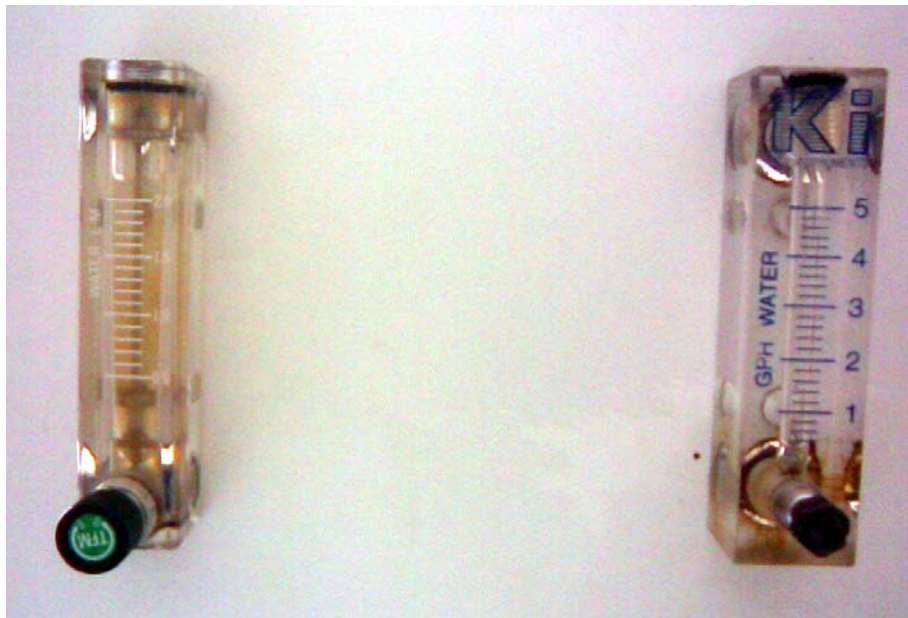
ภาพประกอบ 18 แสดงชุดทดสอบต่อความร้อนเมื่อทำการติดตั้งและหุ้มฉนวน



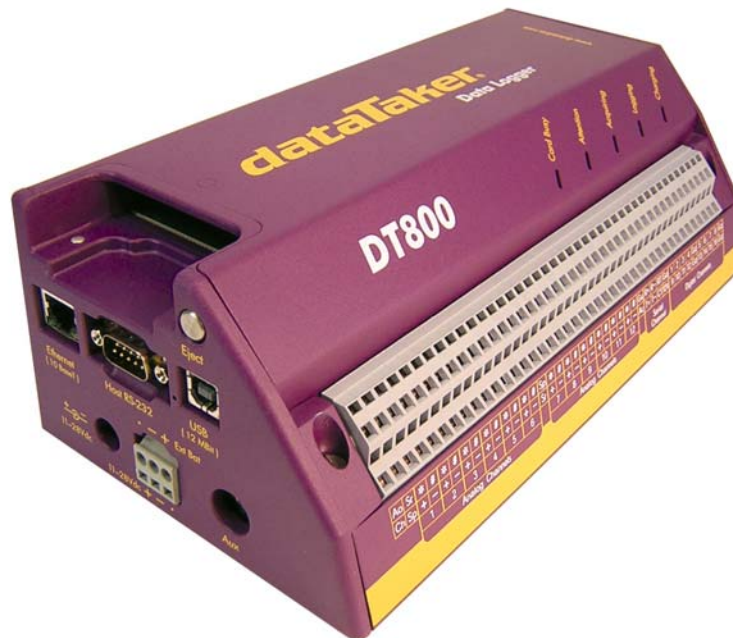
ภาพประกอบ 19 แสดงเครื่องควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้หลอดความร้อน



ภาพประกอบ 20 แสดงชุดทำน้ำเย็นและควบคุมอุณหภูมิน้ำเย็นในระบบ



ภาพประกอบ 21 แสดงอุปกรณ์ปรับอัตราการไหลของน้ำเย็นชนิด Rota meter



ภาพประกอบ 22 แสดงอุปกรณ์เก็บข้อมูล ( Data loggers )

ชุดทดลองได้แบ่งออกเป็น 5 ส่วนหลัก คือ ชุดทดสอบต่อความร้อน ชุดเก็บข้อมูล ชุดทำน้ำเย็น ชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับชุดลดความร้อน และชุดควบคุมอุณหภูมิน้ำเย็น

## วิธีการทดลอง

การทดสอบมีขั้นตอนดังนี้

1. ใส่สารทำงานลงในท่อความร้อนตามอัตราส่วนแล้วดูอากาศในท่อออกเพื่อไม่ให้ขัดขวางการถ่ายเทความร้อนของสารทำงาน
2. เปิดชุดทำน้ำเย็น โดยปรับตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 20°C
3. เปิดปั๊มน้ำและปรับอัตราการไหลของน้ำไว้ที่ 1 GPH
4. เปิดเครื่องเก็บข้อมูล
5. เมื่อชุดทำน้ำเย็นได้อุณหภูมิที่ 20°C แล้ว จึงเปิดชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าของชุดลดความร้อน ที่ 50 วัตต์
6. ตรวจสอบมุมที่ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนมากที่สุดโดยปรับมุมของชุดทดสอบต่อความร้อนเป็น 0, 15, 30, 45, 60, 90 องศา ตามลำดับ

7. เมื่อกราฟอุณหภูมิที่แสดงเริ่มคงที่ จึงสามารถเก็บข้อมูลไปคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อน

8. เมื่อทราบมุมที่ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมากที่สุดแล้วให้ใช้ค่ามุมนั้น แล้วปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าของขดลวดความร้อนเป็น 30,40,50,60 และ 70 วัตต์ ตามลำดับ

9. ทำตามข้อ 1-7 โดยการเปลี่ยนปริมาตรสารทำงานภายในท่อความร้อน เก็บข้อมูลที่ได้อ้อมคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อน

10. เมื่อ หามุม และปริมาตรสารทำงานที่ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนดีที่สุดแล้วนำมาคำนวณหาปริมาตรอนุภาคนาโนที่ต้องใช้

11. ผสมอนุภาคนาโนลงในสารทำงาน แล้วบรรจุลงในท่อความร้อน

12. ทำการเก็บข้อมูล และเพิ่มอัตราส่วนผสมของอนุภาคนาโนจนกระทั่งประสิทธิภาพเชิงความร้อนไม่เปลี่ยนแปลง

ในส่วนของการวัดอุณหภูมินั้นจะติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล บริเวณผิวของท่อความร้อนระยะห่างทุกๆ 20 เซนติเมตรและใช้เครื่องเก็บข้อมูลในการวัดและแปรผลเป็นกราฟแนวโน้มของอุณหภูมิ นำข้อมูลมาคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนและเปรียบเทียบ

## ตัวแปรที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

จัดตัวแปรที่จะทำการวิจัยออกเป็น 2 กลุ่มคือ

1. กลุ่มตัวแปรอิสระ ได้แก่

- กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้ขดลวดความร้อน
- มุมของท่อความร้อน
- ปริมาตรสารทำงาน
- ปริมาตรอนุภาคนาโน

2. กลุ่มตัวแปรตาม

- อุณหภูมิที่จุดต่างๆของท่อความร้อน
- ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของท่อความร้อน

## บทที่ 4

### ผลและการเปรียบเทียบผล

#### การเปรียบเทียบผล

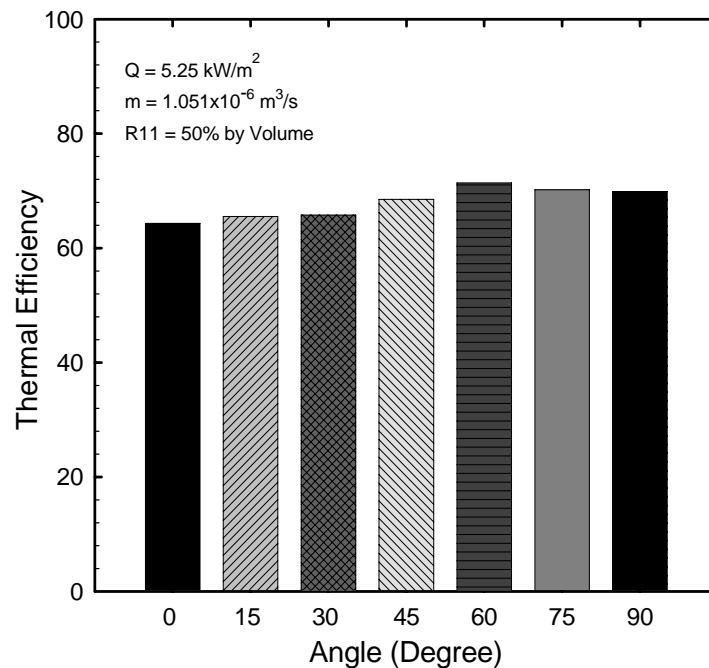
ในการทดสอบได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ชุดดังนี้

1. การทดสอบมุมเอียงของท่อความร้อนที่ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุด โดยมุมที่ใช้ทดสอบคือ 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90 องศา
2. การทดสอบปรับเปลี่ยนปริมาณสารทำงานภายในท่อความร้อนโดยใช้สารทำความเย็น R11 (Freon 11)
3. การทดสอบใช้ของไหลนาโนเป็นสารทำงาน โดยใช้สารทำความเย็น R11 ผสมกับอนุภาคนาโนของไทเทเนียมที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากผลการทดสอบสามารถแสดงอยู่ในรูปตัวแปรต่างๆดังนี้

- ผลกระทบของประสิทธิภาพเชิงความร้อนเมื่อปรับเปลี่ยนมุมเอียงท่อความร้อน
- ผลของการเพิ่มฟลักซ์ความร้อนต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนท่อความร้อน
- ผลกระทบของประสิทธิภาพเชิงความร้อนเมื่อปริมาณสารทำงานภายในท่อความร้อนต่างกัน
- การวิเคราะห์ปริมาณสารทำงานและมุมเอียงท่อความร้อนที่ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุด
- การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของท่อความร้อนเมื่อเติมอนุภาคนาโนในสารทำความเย็นที่ความเข้มข้นต่างๆ

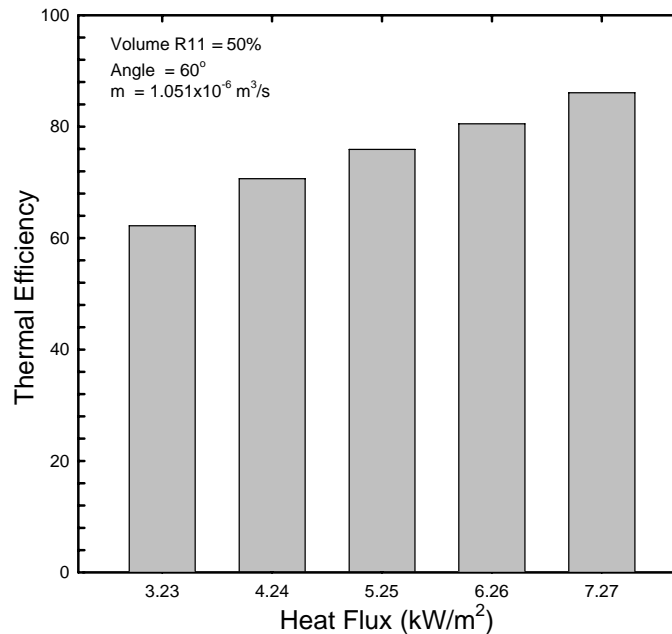
## ผลกระทบของประสิทธิภาพเชิงความร้อนเมื่อปรับเปลี่ยนมุมเอียงท่อความร้อน



ภาพประกอบ 23 แสดงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของท่อความร้อนเมื่อปรับเปลี่ยนมุมเอียง

จากภาพประกอบ 23 ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนท่อความร้อนเมื่อปรับเปลี่ยนมุมเอียงท่อความร้อนโดยใช้ปริมาตรสารทำความเย็น R11 ที่ 50% โดยปริมาตรท่อเป็นสารทำงาน และให้ฟลักซ์ความร้อนคงที่เท่ากับ  $5.25 \text{ kW/m}^2$  และอัตราการไหลของน้ำ  $1.051 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มมุมเอียงของท่อความร้อน ประสิทธิภาพเชิงความร้อนท่อความร้อนจะเพิ่มขึ้น โดยประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าสูงสุด ที่มุม 60 องศา และเมื่อเพิ่มมุมเอียงของท่อความร้อนมากขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนท่อความร้อนลดลง เนื่องจากการวางท่อในแนวตั้งจะทำให้เกิดเป็นชั้นของของไหลที่ผนังท่อ ซึ่งจะไปเพิ่มความต้านทานการถ่ายเทความร้อน และอุณหภูมิ ของท่อความร้อน ส่วนการวางในแนวระดับนั้นสารทำงานจะกลับไปส่วนของภาระระเหยได้ด้วยแรงคาปิลารี และยังไม่เกิดขึ้นของของไหลที่ผนัง จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนจากฮีตเตอร์ทำได้อย่างรวดเร็ว แต่เนื่องจากท่อความร้อนเป็นแบบไม่มีวิกค์จึงต้องเอียงท่อความร้อนเพื่อให้สารทำงานควบแน่นกลับมายังส่วนทำภาระด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก การเพิ่มมุมเอียงนั้นจะทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนท่อความร้อนตามแนวแกนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งถึงมุมเอียงที่จุดๆหนึ่งค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะเริ่มคงที่แม้จะเพิ่มมุมเอียงอีกก็ตาม

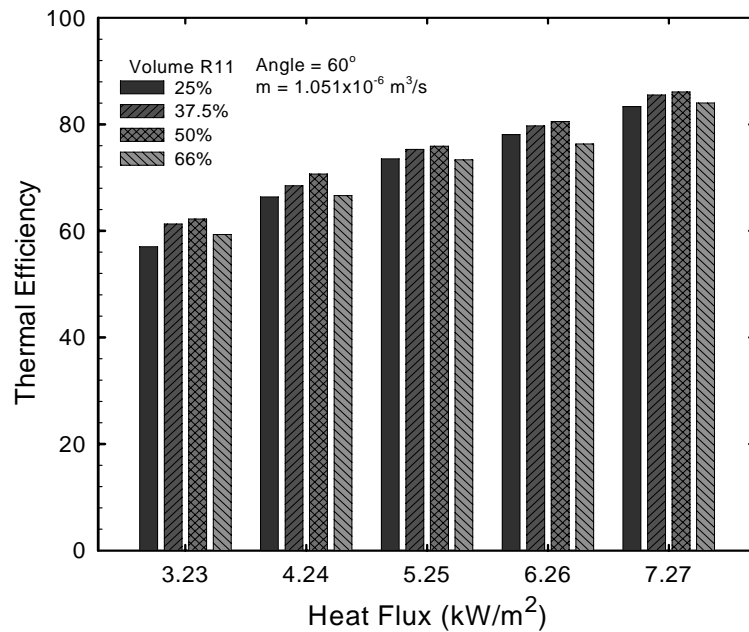
## ผลของการเพิ่มฟลักซ์ความร้อนต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่อความร้อน



ภาพประกอบ 24 แสดงผลกระทบบของฟลักซ์ความร้อนต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่อความร้อน

จากภาพประกอบ 24 ทดสอบที่มุมเอียงต่อความร้อน 60 องศา อัตราการไหลของน้ำ  $1.051 \times 10^{-6}$  m/s ปริมาตรสารทำงาน 50% ของปริมาตรท่อ แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มฟลักซ์ความร้อน ประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่อความร้อนจะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากการเพิ่มฟลักซ์ความร้อนนั้นเป็นการเพิ่มพลังงานเข้าไปยังระบบ ทำให้การเดือดของสารทำงานปั่นป่วนและรุนแรงเพิ่มมากขึ้นอีกทั้งรูปแบบการไหลของสารทำงานเปลี่ยนแปลงจากการระเหยเพียงเล็กน้อย ไปเป็นการเดือดแบบไหลสองสถานะในรูปแบบ Bubble flow, Churn flow และ Annular flow ซึ่งมีความเร็วไอสูง ทำให้อัตราการไหลโดยมวลของไอไปยังส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้น และส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย รวมทั้งอุณหภูมิและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของท่อความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 61 % ไปเป็น 81% ที่อัตราการให้ความร้อน 30 วัตต์ และ 70 วัตต์ตามลำดับ

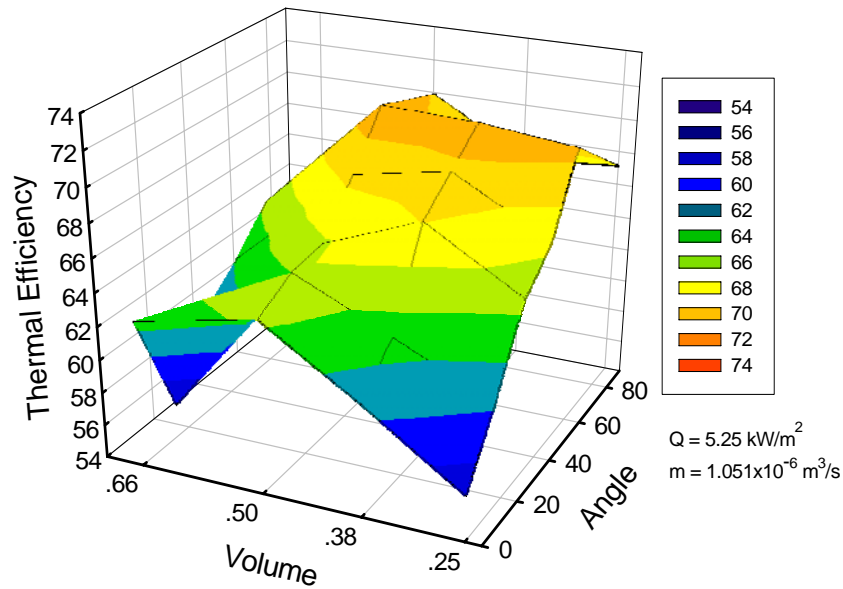
## ผลกระทบของประสิทธิภาพเชิงความร้อนเมื่อปริมาณสารทำงานภายในท่อความร้อนต่างกัน



ภาพประกอบ 25 แสดงผลกระทบของปริมาณสารทำงานต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนท่อความร้อน

จากภาพประกอบ 25 ทดสอบที่มุมเอียงท่อความร้อน 60 องศา อัตราการไหลของน้ำ  $1.051 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารทำงาน ประสิทธิภาพเชิงความร้อนท่อความร้อนจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งสูงสุดที่ ปริมาณสารทำงาน 50% ของปริมาตรท่อ และเมื่อเพิ่มปริมาณสารทำงานต่อไป ประสิทธิภาพเชิงความร้อนท่อความร้อนลดลงเนื่องจาก พื้นที่ว่างของท่อความร้อนที่ใช้ในการควบแน่นของสารทำงานน้อยลง ดังนั้นเมื่อสารทำงานระเหยเป็นไอความดันภายในท่อความร้อนจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งสารทำงานไม่สามารถเดือดเพิ่มได้อีก จึงทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนลดลง

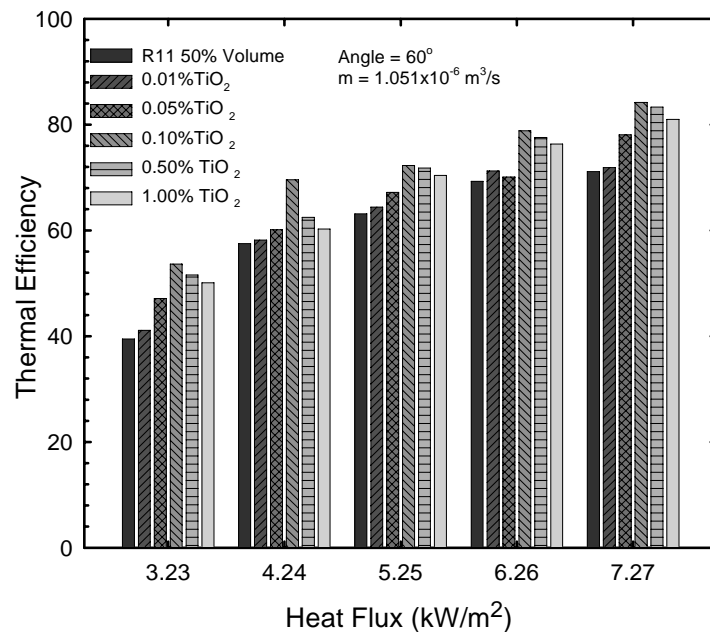
## การวิเคราะห์ปริมาณสารทำงานและมุมเอียงท่อความร้อนที่ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุด



ภาพประกอบ 26 กราฟวิเคราะห์ผลกระทบของมุมเอียงและปริมาณของสารทำงาน R11 ที่เหมาะสมต่อท่อความร้อน

จากผลการทดสอบปรับมุมเอียงของท่อความร้อนและเปลี่ยนปริมาณสารทำงานนำมาวิเคราะห์เพื่อหาจุดสูงสุดของประสิทธิภาพเชิงความร้อนและ นำข้อมูลไปใช้ในการทดสอบการใช้ของไหลนาโนเป็นสารทำงานในท่อความร้อน ภาพประกอบ 26 นำข้อมูลผลการทดลองสามารถนำมาสรุปเป็นกราฟซึ่งจะทำการเปรียบเทียบหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดของท่อความร้อนเมื่อปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ผลที่ได้คือ ที่ปริมาณสารทำงาน 50% มุมเอียง 60 องศา ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดเท่ากับ 71.15%

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของท่อความร้อนเมื่อเติมอนุภาคนาโนในสารทำความเย็นที่ความเข้มข้นต่างๆ

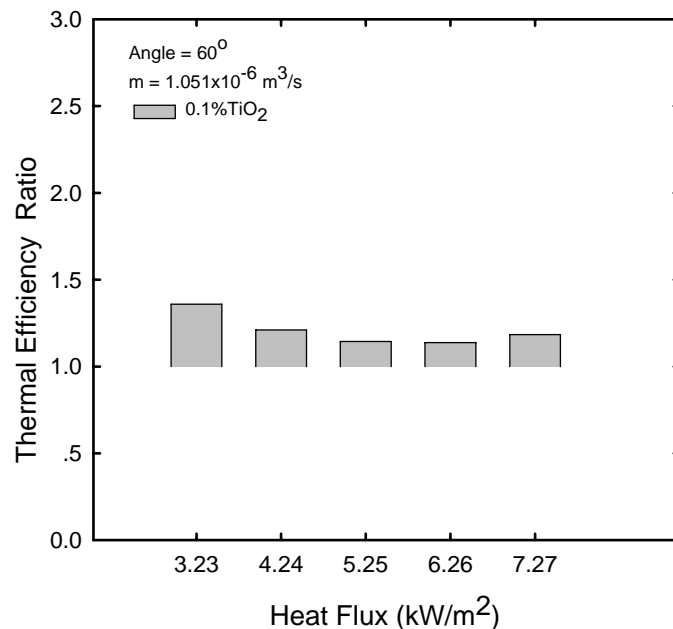


ภาพประกอบ 27 กราฟแสดงสัดส่วนผสมของอนุภาคนาโนที่ทำให้ท่อความร้อนมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุด

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของท่อความร้อนสูงสุดที่ปริมาตรสารทำงาน 50% และมุมเอียงของท่อความร้อน เท่ากับ 60 องศา จึงใช้ปริมาตรสารและ มุมเอียงดังกล่าวในการทดสอบการผสมอนุภาคนาโนในสารทำงานที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากภาพประกอบ 27 เมื่อผสมอนุภาคนาโนทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนท่อความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคนาโนจะไปช่วยเพิ่มพื้นที่ผิว ค่าการนำความร้อน และความจุความร้อนของของไหล การเติมอนุภาคนาโนยังไปทำให้ความปั่นป่วนของของไหลรุนแรงมากขึ้น และยังไปช่วยกำจัดฟองอากาศที่เกิดจากการเดือดของสารทำงาน ซึ่งฟองอากาศทำให้พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลกับท่อความร้อนลดลง รวมทั้งยังช่วยกระจายอุณหภูมิของของไหลให้เท่ากัน จากกราฟพบว่าเมื่อผสมอนุภาคนาโนลงในสารทำงานจะทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนท่อความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารทำความเย็นเป็นสารทำงานเพียงอย่างเดียว โดยอัตราส่วนของอนุภาคนาโนที่ทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดอยู่ที่ 0.10% โดยปริมาตรสารทำความเย็น และเมื่อเพิ่ม

ปริมาณอนุภาคนาโนเข้าไปอีกจะทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนลดลง เนื่องจากความหนืดของสารทำงานเพิ่มขึ้น และเมื่อผสมอนุภาคนาโนในปริมาณมากจะทำให้คุณสมบัติสารทำงานคล้ายของแข็งมากกว่าของเหลว ซึ่งการพาความร้อนจากส่วนที่ระเหยไปยังส่วนควบแน่นจึงทำได้ไม่ดี โดยประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่อความร้อนในกรณีใช้สารทำความเย็นเพียงอย่างเดียว เท่ากับ 71.15% และเมื่อใช้สารทำงานที่ผสมอนุภาคนาโนประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่อความร้อน เท่ากับ 84.22% ที่สัดส่วนอนุภาคนาโน 0.10% โดยปริมาตรสารทำความเย็น



ภาพประกอบ 28 สัดส่วนการเพิ่มของประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่อความร้อนเมื่อใช้ของไหลนาโน

จากภาพประกอบ 28 แสดงการเปรียบเทียบสัดส่วนการเพิ่มของประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่อความร้อนระหว่างใช้สารทำความเย็น R11 กับใช้สารทำความเย็นที่ผสมอนุภาคนาโน 0.10% เป็นสารทำงาน จะเห็นได้ว่าการใช้สารทำงานที่ผสมอนุภาคนาโน จะทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของต่อความร้อนเพิ่มขึ้นโดยประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดของต่อความร้อนที่ใช้ของไหลนาโนในการทดสอบเท่ากับ 84.22% หรือเพิ่มขึ้น 13.07 %

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### สรุป

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบแล้วนำผลมาคำนวณหาตัวแปรที่ต้องการ และการคำนวณ ซึ่งผลที่ได้นำเสนอในลักษณะกราฟ แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ และวิเคราะห์ผลที่ได้จากกราฟ ดังที่เสนอใน บทที่ 4 สามารถสรุปได้ดังนี้

- มุมเอียงที่ใช้ในการทดสอบต่อความร้อนเท่ากับ 60 องศา ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนดีที่สุด
- ปริมาตรสารทำงานที่ 50% โดยปริมาตรทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดเท่ากับ 71.15% ที่มุมเอียง 60 องศา เช่นกัน และเมื่อเพิ่มพลาตซ์ความร้อนประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่อความร้อนเพิ่มขึ้น
- เมื่อใช้สารทำความเย็นผสมอนุภาคนาโนเป็นสารทำงาน ทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่อความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติของสารทำงานมีการนำความร้อนเพิ่มขึ้น โดยประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่อความร้อนเพิ่มขึ้นเท่ากับ 13.07 % ที่สัดส่วนการผสมอนุภาคนาโน 0.10% โดยปริมาตรสารทำความเย็นและมุมเอียงเท่ากับ 60 องศา

#### ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

การศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนโดยการใช้สารทำความเย็นร่วมกับอนุภาคนาโนเป็น การศึกษาที่ยังไม่แพร่หลาย เนื่องจากการผสมอนุภาคนาโนลงในสารทำงานนั้นทำได้ยากเพราะ สารทำความเย็นส่วนใหญ่สามารถระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำ และต่อความร้อนนั้นมีหลายรูปแบบ ทำให้ ไม่สามารถศึกษาได้ทั้งหมด ในอนาคตอาจมีการศึกษาเพิ่มเติมมากขึ้น

1. อาจทำการเปลี่ยนชนิดของอนุภาคนาโน
2. อาจทำปรับเปลี่ยนจุดเข้าและออกของน้ำหล่อเย็น
3. อาจทำการเปลี่ยนสารทำความเย็นเป็นชนิดอื่น
4. อาจออกแบบให้ต่อความร้อนสามารถถอดเปลี่ยนได้ โดยใช้ฐาน และชุดให้ความร้อน (Heater) ตัวเดียวกันเพื่อศึกษาในกรณีเพิ่มวิกคิในต่อความร้อน
5. อาจใช้ต่อความร้อนที่เป็นท่อไอเพื่อศึกษาการไหลของสารทำงานภายในต่อความร้อน

6. อาจออกแบบให้อุปกรณ์ควบคุมในงานทดสอบเป็นอุปกรณ์มาตรฐานในระบบที่แสดงให้ทราบในสิ่งที่สังเกตได้สะดวกเพื่อให้การทดลองเป็นไปอย่างต่อเนื่อง

7. อาจทำการหาความดันลด (Pressure drop) ในระบบ

8. อาจทำการเพิ่มจำนวนกลับของท่อความร้อนเพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน

## บรรณานุกรม

## บรรณานุกรม

- นักสิทธิ์ คุ้มพัฒนาชัย. (2533). *การถ่ายเทความร้อน*. ปรับปรุงและพิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ. โครงการตำราเรียนสำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์.
- มนตรี พิรุณเกษตร. (2541). *การถ่ายเทความร้อน*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- พงษ์ธร จรัญญากรณ์. (2542). *อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับงานอุตสาหกรรม*. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล. (2536). *อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในงานอุตสาหกรรม*. กรุงเทพฯ. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- N. Dussadee; et al. (2006). Temperature control of paddy bulk storage with aeration–thermosyphon heat pipe. In *Energy Conversion and Management*.
- N. Srihajong; et al. Thermosyphon as An Energy Saver in Aeroponic System: A Case of Mathematical Modeling. In *Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering Chiang Mai University*.
- T. Payakarak; et al. (2000). Correlations to Predict Heat Transfer Characteristics of an Inclined Closed Two-Phase Thermosyphon at Normal Operating Conditions, In *Applied Thermal Engineering*, V. 20. pp. 781-790
- P. Terdtoon; et al. (1997). Effects of Bond Numbers on Internal Flow Patterns of an Inclined Closed Two-Phase Thermosyphon at Normal Operating Conditions. In *Experimental Heat Transfer*, V.10. pp. 233-251
- P. Terdtoon; et al. (1998). Effects of Aspect Ratios on Internal Flow Patterns of an Inclined Closed Two-Phase Thermosyphon at Normal Operating Condition. In *Heat Transfer Engineering*, pp. 78-85
- B.J. Huang; et al. (1998). A Solar ejector cooling system using refrigerant R141b. In *Solar Energy*, V.64. pp. 223-226
- B.J. Huang; et al. (2004). Heat-pipe enhanced solar-assisted heat pump water heater. In *Solar Energy*, V.78. pp. 375-381
- B.J. Huang; & C.P. Lee (2006). Performance evaluation method of solar-assisted heat pump water heater. In *Applied Thermal Engineering*, V.27. pp. 568-575

- S.Lin; et al. (2000). Two-phase heat transfer to a refrigerant in a 1 mm diameter tube. In *International Journal of Refrigeration*, V.24. pp. 51-56
- S.Lin; et al. (2005). Numerical study of heat pipe application in heat recovery systems. In *Applied Thermal Engineering*, V.25. pp. 127-133.
- L.Lin; et al. (2002). High performance miniature heat pipe. In *International Journal of Heat and Mass Transfer*, V.45. pp. 3131–3142
- M. Esen. (2003). Thermal performance of a solar cooker integrated vacuum-tube collector with Heat pipes containing different refrigerants. In *Solar Energy*, V.76. pp. 751-757
- F. Song; et al. (2004). Experimental investigation on the heat transfer characteristics of axial rotating heat pipes. In *International Journal of Heat and Mass Transfer*, V.47. pp. 4721-4731
- Y. Xuan; et al. (2004). Investigation on transient behaviors of flat plate heat pipes. In *Experimental Thermal and Fluid Science*, V.28. pp. 249-255
- L.L. Vasiliev. (2005). Heat pipes in modern heat exchangers. In *Applied Thermal Engineering*, V.25. pp. 1-19
- L.L. Vasiliev. (2006). Micro and miniature heat pipes Electronic component coolers. In *Applied Thermal Engineering*.
- D. Liu; et al. (2006). Modeling and experimental investigation of looped separate heat pipe as waste heat recovery facility. In *Applied Thermal Engineering*, V.26. pp. 2433-2441
- V.V. Vlassov; et al. (2006). Comprehensive optimization of a heat pipe radiator assembly filled with ammonia or acetone. In *International Journal of Heat and Mass Transfer*, V.49. pp. 4584-4595
- V. Trisaksri; & S. Wongwises. (2005). Critical review of heat transfer characteristics of nanofluids. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V.11. pp. 512-523
- Y. Xuan; & Q. Li (2000). Heat transfer enhancement of nanofluids. In *International Journal of Heat and Fluid Flow*, V.21. pp. 58-64
- Q.Z. Xue. (2003). Model for effective thermal conductivity of nanofluids. In *Physics Letters A*. V.307. pp. 313-317
- Q. Xue; & W.M. Xu. (2004). A model of thermal conductivity of nanofluids with interfacial shells. In *Materials Chemistry and Physics*, V.90. pp. 298-301

- E. Mamut. (2004). Characterization of heat and mass transfer properties of nanofluids. In *General Physics Ovidius*. University of Constanta, 124 Mamaia Av. 8700 Constanta, Romania.
- G. Roy; et al. (2004). Numerical investigation of laminar flow and heat transfer in a radial flow cooling system with the use of nanofluids. In *Superlattices and Microstructures*, V.35. pp. 497-511
- D. Wen; & Y. Ding (2004). Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions. In *International Journal of Heat and Mass Transfer*, V.47. pp. 5181-5188
- D.W. Zhou. (2004). Heat transfer enhancement of copper nanofluid with acoustic cavitation. In *International Journal of Heat and Mass Transfer*, V.47. pp. 3109-3117
- I.C. Bang; & S.H. Chang. (2005). Boiling heat transfer performance and phenomena of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- water nano-fluids from a plain surface in a pool. In *International Journal of Heat and Mass Transfer*, V.48. pp. 2407-2419
- Y. Ding; & D. Wen (2005). Particle migration in a flow of nanoparticle suspensions. In *Powder Technology*, V.149. pp. 84-92
- Y. Ding; et al. (2006). Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids). In *International Journal of Heat and Mass Transfer*, V.49. pp. 240-250
- J. Koo; & C. Kleinstreuer. (2005). Laminar nanofluid flow in microheat-sinks. In *International Journal of Heat and Mass Transfer*, V.48. pp. 2652-2666
- M.S. Liu; et al. (2005). Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids. In *International Communications in Heat and Mass Transfer*, V.32. pp.1202-1210
- Y. Yang; et al. (2005). Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow. In *International Journal of Heat and Mass Transfer*, V.48. pp. 1107-1116
- B. Yang; & Z.H. Han (2006). Temperature Dependent Thermal Conductivity of Nanorod-in-Fluorocarbon Nanofluids. In *9th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference*, San Francisco, California.

- R. Chein; & J. Chuang (2006). Experimental microchannel heat sink performance studies using nanofluids. In *International Journal of Thermal Sciences*, V.46. pp. 57-66
- L. Gao; & X.F. Zhou (2006). Differential effective medium theory for thermal conductivity in nanofluids. In *Physics Letters A*, V.348. pp. 355-360
- Y. He; et al. (2006). Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO<sub>2</sub> nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe. In *International Journal of Heat and Mass Transfer*.
- S.Z. Heris; et al. (2006). Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer. In *International Communications in Heat and Mass Transfer*, V.33. pp.529-535
- S.P. Jang; & S.U.S. Choi (2006). Cooling performance of a microchannel heat sink with nanofluids. In *Applied Thermal Engineering*, V.26. pp. 2457-2463
- J. Li; et al. (2006). Formation and dissociation of HFC134a gas hydrate in nano-copper suspension. In *Energy Conversion and Management*, V.47. pp. 201-210
- R. B. Mansour; et al. (2006). Effect of uncertainties in physical properties on forced convection heat transfer with nanofluids. In *Applied Thermal Engineering*, V.27. pp. 240-249
- S.M.S. Murshed; et al. (2006). Thermal Conductivity of nanoparticle Suspensions (Nanofluids). In *IEEE*.
- C.T. Nguyen; et al. (2006). Heat transfer enhancement using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid for an electronic liquid cooling system. In *Applied Thermal Engineering*.
- S.J. Palm; et al. (2006). Heat transfer enhancement with the use of nanofluids in radial flow cooling systems considering temperature-dependent properties. In *Applied Thermal Engineering*, V.26. pp. 2209-2218
- X.Q. Wang; & A.S. Mujumdar. (2006). Heat transfer characteristics of nanofluids. a review. In *International Journal of Thermal Sciences*, V.46. pp. 1-19
- Y. Hwang; et al. (2006). Thermal conductivity and lubrication characteristics of nanofluids. In *Current Applied Physics*, pp.67-71.
- Y. Hwang; et al. (2006). Investigation on characteristics of thermal conductivity enhancement of nanofluids. In *Current Applied Physics*, V.6. pp.1068-1071

- C. Y. Tsai; et al. (2004). Effect of structural character of gold nanoparticles in nanofluid on heat pipe thermal performance. In *Materials Letters*, V.58. pp.1461- 1465
- S.E. Maïga; et al. (2004). Heat transfer behaviours of nanofluids in a uniformly heated tube. In *Superlattices and Microstructures*, V.35. pp.543-557
- S.W. Kang; et al. (2006). Experimental investigation of silver nano-fluid on heat pipe thermal performance. In *Applied Thermal Engineering*, V.26. pp. 2377-2382
- P.Dunn; & D.A.Reay (1978).Heat Pipes. New York. Pergamon Press Oxford.
- S.W.Chi (1976). Heat Pipe Theory and Practice Washing. McGraw-Hill Book Company.
- A.S. Ahuja; & liu (2003). Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids. In *Journal of Heat Transfer*, V.125. pp. 567-574
- U.S.Choi (1995). Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles  
In *The American Society of Mechanical Engineers*, pp. 99-105.
- R.L.Hamilton; & O. K.Crosser (1962). Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems. In *I&ZC Fundamentals*, V.1. pp. 187-191
- E.J. Wasp; et al. (1977). Solid-liquid flow slurry pipeline transportation. In *Trans Tech Publications*.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก  
ตัวอย่างการคำนวณ

## ตัวอย่างการคำนวณ

เมื่อทำการทดลองและเก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่อความร้อน โดยมีขั้นตอนต่างๆดังนี้

ข้อมูลเบื้องต้นและข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่ใช้ในการคำนวณมีดังนี้

- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อความร้อน 15 มิลลิเมตร ยาว 600 มิลลิเมตร
- ความต่างศักย์ไฟฟ้า เท่ากับ 224 โวลต์
- ความยาวส่วนให้ความร้อน 200 มิลลิเมตร
- กระแสไฟฟ้าที่ป้อนขดลวดเท่ากับ 0.26 แอมแปร์
- อัตราการไหลของน้ำเย็น 1 GPH
- กำหนดอุณหภูมิของน้ำเข้าและออกที่ 20.78, 19.33 °C ตามลำดับ

### 1. การคำนวณหาพื้นที่ผิวส่วนให้ความร้อน

$$\begin{aligned} A &= 2 \times \pi \times r \times l & (1) \\ &= 2 \times \frac{22}{7} \times (7.5 \times 10^{-3}) \times (600 \times 10^{-3}) \\ &= 9.43 \times 10^{-3} \quad \text{m}^2 \end{aligned}$$

A = พื้นที่ผิวส่วนรับความร้อนจากขดลวดความร้อน (m<sup>2</sup>)

r = รัศมีท่อความร้อน (m)

l = ความยาวส่วนให้ความร้อน (m)

### 2. การคำนวณหาพลังงานความร้อนที่ป้อนให้ท่อความร้อน (Q<sub>in</sub>)

$$\begin{aligned} P &= I \times V \times \text{Factor} & (2) \\ P &= 0.26 \times 224 \times 0.85 \\ &= 4.95 \times 10^2 \quad \text{kW} \end{aligned}$$

P = กำลังไฟฟ้า (วัตต์)

I = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

V = ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)

A = พื้นที่ส่วนรับความร้อน (m<sup>2</sup>)

3. การคำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเย็น

$$1\text{ GPH} = 1.05 \times 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$\dot{m} = \frac{Q}{\rho} \quad (3)$$

$$= \frac{1.05 \times 10^{-6}}{998.2}$$

$$= 1.05 \times 10^{-3} \text{ kg / s}$$

$\dot{m}$  = อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเย็น (kg/s)

$Q$  = อัตราการไหลของน้ำเย็น ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$\rho$  = ความหนาแน่นของน้ำ (998.2  $\text{kg}/\text{m}^3$ )

4. การคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่อความร้อน

$$\eta = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \quad (4)$$

$$Q_{out} = \dot{m} c_p \Delta T \quad (5)$$

$$= 1.05 \times 10^{-3} \times 4.19 \times (29.33 - 20.78)$$

$$= 3.75 \times 10^{-2} \text{ kW}$$

$$\eta = \frac{0.04}{4.95 \times 10^{-2}}$$

$$= 75.75 \%$$

**ภาคผนวก ข**  
**ตารางแสดงผลการทดลอง**

**ตารางแสดงผลการทดลอง**

ตาราง 6 แสดงประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่อความร้อนเมื่อปรับมุมเอียงต่อความร้อน

Heat Flux (kW/m <sup>2</sup> )	ประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่อความร้อน (R11 50%)						
	มุมเอียงของต่อความร้อน (องศา)						
	0	15	30	45	60	75	90
5.25	64.35	65.53	65.78	68.51	71.41	70.19	69.89

ตาราง 7 แสดงประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่อความร้อนเมื่อใช้สารทำความเย็น R11 เป็นสารทำงาน

ปริมาณสาร ทำงาน	ประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่อความร้อน						
	มุมเอียงของต่อความร้อน (องศา)						
	0	15	30	45	60	90	
25%	56.73	60.35	64.67	66.49	70.61	67.14	
37.5%	60.72	62.90	68.05	69.57	71.22	66.78	
50%	64.35	65.53	65.78	68.51	71.41	69.89	
66%	62.80	56.04	60.36	62.17	64.42	59.74	

ตาราง 8 แสดงประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่อความร้อนเมื่อใช้ของไหลนาโนเป็นสารทำงาน

อัตราส่วนอนุภาคนาโน %โดยปริมาตร สารทำความเย็น	ประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่อความร้อน				
	Heat Flux (kW/m <sup>2</sup> )				
	3.23	4.24	5.25	6.26	7.27
R11 Pure	39.47	57.51	63.15	69.30	71.15
0.01% TiO <sub>2</sub>	41.11	58.17	64.40	71.24	71.86
0.05% TiO <sub>2</sub>	47.11	60.13	67.18	70.09	78.09
0.10% TiO <sub>2</sub>	53.62	69.56	72.27	78.84	84.22
0.50% TiO <sub>2</sub>	51.58	62.47	71.79	77.57	83.32
0.10% TiO <sub>2</sub>	50.11	60.25	70.40	76.34	80.97

ตาราง 9 แสดงสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของท่อความร้อนเมื่อใช้ของไหลนาโนเป็นสารทำงาน

Heat Flux (kW/m <sup>2</sup> )					
	3.23	4.24	5.25	6.26	7.27
Efficiency Ratio	1.36	1.21	1.14	1.13	1.18

อภิธานศัพท์

## รายการสัญลักษณ์

### สัญลักษณ์

$A$	=	พื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อน, $m^2$
$C_p$	=	ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่, $J/kg.K$
$D$	=	เส้นผ่าศูนย์กลางของไหลที่เกิดจากการไหลผ่าน, $m.m.$
$f$	=	สัมประสิทธิ์ของความเสียดทาน
$g$	=	ความเร่งอันเนื่องมาจากแรงดึงดูดของโลก, $m/s^2$
$h$	=	สัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อน, $W/m^2.^{\circ}C$
$k$	=	ค่าการนำความร้อน, $W/m.K$
$L$	=	ความยาว (Characteristic length), $m$
$\dot{m}$	=	อัตราการไหลของมวลของของไหล, $kg/s$
Pr	=	ตัวเลขพรานด์เติล (Prandtl number)
$Q$	=	อัตราการไหลของน้ำ, $m^3/s$
$Q$	=	อัตราการถ่ายเทความร้อน, $W$
$q$	=	อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่, $W/m^2$
$\dot{q}$	=	อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยปริมาตร, $W/m^3$
$T$	=	อุณหภูมิ, $^{\circ}C$
$\eta$	=	ประสิทธิภาพต่อความร้อน
$\rho$	=	ความหนาแน่น, $kg/m^3$
$\Delta$	=	ค่าการเปลี่ยนแปลง

ประวัติย่อผู้วิจัย

## ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นาย ดิฐพงศ์ ทองคำ
วันเดือนปีเกิด	8 กรกฎาคม 2526
สถานที่เกิด	กรุงเทพ
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	336 ซ.จรัญสนิทวงศ์ 44 ถนนจรัญสนิทวงศ์ แขวงบางยี่ขัน เขตบางพลัด กรุงเทพ 10700

### ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2540	มัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียนเทพศิรินทร์
พ.ศ. 2543	มัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนเทพศิรินทร์
พ.ศ. 2547	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
พ.ศ. 2550	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ