

การศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนของการเดือดแบบพุดของสารทำความเย็นผสมอนุภาคนาโน



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มีนาคม 2557

การศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนของการเดือดแบบพุดของสารทำความเย็นผสมอนุภาคนาโน



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มีนาคม 2557

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโร

การศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนของการเดือดแบบพุดของสารทำความเย็นผสมอนุภาคนาโน



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มีนาคม 2557

ชัชวาล ทองจรัส. (2557). การศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนของการเดือดแบบพุดของสารทำความเย็นผสมอนุภาคนาโน. ปริญญาโท. วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. กรรมการควบคุม: รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล นาคผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนของการเดือดแบบพุดของสารทำความเย็นผสมอนุภาคนาโน บนพื้นผิวรูปทรงกระบอก โดยใช้อนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และใช้สารทำความเย็น R141b และเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) เป็นสารทำงานพื้นฐานในการทดลอง โดยพิจารณาผลของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์และความดันขณะเกิดการเดือดที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและลักษณะของการเดือดแบบพุดบนพื้นผิวทรงกระบอก ซึ่งจากการทดลองพบว่า ผลของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนและความดันขณะเดือดมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์และผลของนักวิจัยอื่นพบที่มีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน

คำสำคัญ : การเดือดแบบพุด/คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของไหลนาโน

POOL BOILING HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF REFRIGERANT-
NANOPARTICLES MIXTURES



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

March 2014

Chatchawan Thongjing. (2014). *Pool boiling heat transfer characteristics of refrigerant-nanoparticles mixtures*. Master thesis, M.Eng. (Mechanical Engineering). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Assoc.Prof. Dr. Paisarn Naphon

The main focus of the present study is to investigate the pool boiling heat transfer characteristics of nanofluids on the cylindrical surface. The nanofluids with suspending TiO_2 nanoparticles in the base fluid refrigerant R141b and ethyl alcohol are used as working fluids. Effects of nanoparticle concentration and boiling pressure on the pool boiling heat transfer coefficient on the cylindrical brass surface and the boiling bubble characteristic are considered. It is found that the nanoparticle concentration and boiling pressure have a significant effect on the pool boiling heat transfer coefficient. In addition, the pool boiling heat transfer coefficients obtained from the experiment are compared with the proposed correlation and reasonable agreement is obtained.

Keywords: Pool boiling / Heat transfer characteristic/Nanofluids

ประกาศคุณูปการ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล นาผล ประธานคณะกรรมการควบคุมการทำปริญญาบัตรที่ให้โอกาสในการทำวิจัยเรื่องนี้ และเชื้อเพื่อห้องปฏิบัติการเทอร์โม-ของไหลและการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (TFHT) พร้อมทั้งให้ความรู้และคำแนะนำ คำปรึกษา ให้แนวคิด และช่วยแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นในการทำปริญญาบัตรจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณคณาจารย์จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้ความรู้และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยเป็นอย่างดี

ท้ายสุดผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดาที่ได้อบรมสั่งสอนและให้กำลังใจตลอดจนสนับสนุนการศึกษาและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง และขอขอบคุณเพื่อนๆที่ให้ความช่วยเหลือ และความร่วมมือในการทำวิจัยเป็นอย่างดีในการทำวิจัยนี้

ชัชวาล ทองจริง

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
ขอบเขตของการวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย.....	2
การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2 ทฤษฎี.....	23
กฎการถ่ายเทความร้อน (Principle of heat transfer).....	23
อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger).....	27
การเดือด (Boiling).....	36
ของไหลนาโน (Nanofluid).....	46
3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	56
อุปกรณ์การทดลอง.....	56
วิธีการทดลอง.....	63
เงื่อนไขในการทดลอง.....	66
การคำนวณผลการทดลอง.....	66
4 ผลและการวิเคราะห์.....	68
ผลของความเข้มข้นที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของฮีตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเท ความร้อน ของสารทำความเย็น R141b.....	69
ผลของความเข้มข้นที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของฮีตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเท ความร้อน ของเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol)	76

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
4 (ต่อ)	
ผลของความดันที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงฮีตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของสารทำความเย็น R141b.....	83
ผลของความดันที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงฮีตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของสารทำความเย็น เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol).....	90
การเปรียบเทียบกับ การทดลองกับสหสัมพันธ์	97
การเปรียบเทียบการทดลองกับผลการทดลองของนักวิจัยอื่น	98
5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	102
สรุป.....	102
ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....	103
บรรณานุกรม.....	104
ภาคผนวก.....	110
อภิธานศัพท์.....	111
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	114

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 ตารางสรุปการสำรวจเอกสารงานวิจัย.....	16
2 แสดงคุณสมบัติของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ TiO_2	53
3 แสดงคุณสมบัติของสารทำความเย็น R141b.....	54
4 แสดงสมบัติบางประการของแอลกอฮอล์บางชนิด.....	54



บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 ลักษณะการไหลผ่านท่อสองชั้น.....	28
2 การไหลแบบตั้งฉาก.....	28
3 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ แบบเซลล์และท่อ	29
4 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนในकुलिंगทาวเวอร์.....	29
5 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสตัด์ครีคูเปอร์เรเตอร์	30
6 การทำงานของสตัด์ครีคูเปอร์เรเตอร์.....	30
7 ตัวอย่างการติดตั้งสตัด์ครีคูเปอร์เรเตอร์กับเตาเชื้อเพลิง.....	31
8 แสดงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน อีโคโนไมซ์เซอร์.....	31
9 การทำงานของ อีโคโนไมซ์เซอร์.....	32
10 ตัวอย่างการติดตั้ง อีโคโนไมซ์เซอร์ กับหม้อไอน้ำ.....	32
11 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เฟลตฮีตเอ็กซ์เชนจ์เจอร์.....	33
12 การทำงานของ เฟลตฮีตเอ็กซ์เชนจ์เจอร์.....	33
13 ตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเฟลต เพื่อนำความร้อนจาก น้ำทิ้งมาใช้อุ่นน้ำป้อนป้อน.....	34
14 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน แบบเซลล์และท่อ.....	34
15 การทำงานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน แบบเซลล์และท่อ.....	35
16 ตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อเพื่อนำความ ร้อนจากน้ำเสียมาใช้อุ่นป้อนเครื่องทำน้ำร้อน.....	35
17 แสดงการเดือดของของเหลว	36
18 แสดงเส้นโค้งการเดือดของน้ำที่ความดันบรรยากาศ.....	38
19 แสดง นิวคลีเอท ทรานซิชัน ฟิล์ม ของการเดือดแบบพูล.....	40
20 ลักษณะการเกิดฟิล์มบอยลิ่งบนแท่งให้ความร้อน.....	40
21 รูปแบบการไหลภายในท่อหน้าตัดวงกลมแนวตั้ง.....	42
22 รูปแบบการไหลในท่อหน้าตัดกลมในแนวระดับ.....	43
23 แสดงการเปลี่ยนสถานะของสสาร.....	44
24 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิชชันของอนุภาคนาโนของ ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใส่ลงในน้ำ.....	47

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
25 แสดงการผลิตของไหลนาโนโดยใช้วิธีวันสเตป.....	48
26 แสดงผงอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์(TiO_2).....	52
27 แสดงขนาดของอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ด้วยวิธี Field Emission scanning electron microscope (FE-SEM).....	53
28 แสดงไดอะแกรมการทดลอง.....	57
29 แสดงภาพระบบทดลองหลัก.....	58
30 แสดงภาพตัวปรับแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลง.....	58
31 แสดงภาพแอมป์มิเตอร์.....	59
32 แสดงภาพโวลต์มิเตอร์.....	59
33 แสดงภาพตัวแสดงผลของอุณหภูมิตอบแบบดิจิตอล.....	60
34 แสดงภาพมาตรวัดการไหลของน้ำ.....	60
35 แสดงเกจวัดความดัน.....	60
36 แสดงขนาดของอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ด้วยวิธี Field Emission scanning electron microscope (FE-SEM).....	61
37 แสดงผงอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์(TiO_2).....	61
38 แสดงภาพถ่ายของไหลนาโน.....	62
39 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิต่อและฟลักซ์ความร้อนที่ความดัน 50 กิโลปาสคาล.....	69
40 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิต่อและฟลักซ์ความร้อนที่ความดัน 150 กิโลปาสคาล.....	69
41 ความสัมพันธ์ระหว่างและฟลักซ์ความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ความดัน 50 กิโลปาสคาล.....	70
42 ความสัมพันธ์ระหว่างและฟลักซ์ความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ความดัน 150 กิโลปาสคาล.....	70
43 ลักษณะการเดือดของสารทำความเย็น R141b และสารทำความเย็น R141b ผสมอนุภาคนาโน ที่ความเข้มข้นต่างๆ ตามอัตราการถ่ายเทความร้อนของแท่งฮีตเตอร์ ที่ความดันคงที่ 100 กิโลปาสคาล	71

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
44 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิและฟลักซ์ความร้อนที่ความดัน 50 กิโลปาสคาล.....	76
45 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิและฟลักซ์ความร้อนที่ความดัน 150 กิโลปาสคาล.....	76
46 ความสัมพันธ์ระหว่างและฟลักซ์ความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ความดัน 50 กิโลปาสคาล	77
47 ความสัมพันธ์ระหว่างและฟลักซ์ความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ความดัน 150 กิโลปาสคาล	77
48 ลักษณะการเดือดของเอทิลแอลกอฮอล์ และ เอทิลแอลกอฮอล์ ผสมอนุภาคนาโน ที่ความเข้มข้นต่างๆ ตามอัตราการถ่ายเทความร้อนของแท่งฮีตเตอร์ ที่ความดันคงที่ 100กิโลปาสคาล	78
49 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิและฮีตฟลักซ์ที่ อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร.....	83
50 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิและฮีตฟลักซ์ที่ อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.075 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร.....	83
51 ความสัมพันธ์ระหว่างฮีตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร.....	84
52 ความสัมพันธ์ระหว่างฮีตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.075 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร.....	84
53 ลักษณะการเดือดของ สารทำความเย็น R141b ผสมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่ความดันต่างๆ ตามอัตราการถ่ายเทความร้อนของแท่งฮีตเตอร์.....	85
54 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิและฮีตฟลักซ์ที่ อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร.....	90
55 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิและฮีตฟลักซ์ที่ อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.075 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร.....	90

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
56 ความสัมพันธ์ระหว่างฮีตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร.....	91
57 ความสัมพันธ์ระหว่างฮีตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.075 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร.....	91
58 ลักษณะการเดือดของเอทิลแอลกอฮอล์ผสมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่ความดันต่างๆ ตามอัตราการถ่ายเทความร้อนของแท่งฮีตเตอร์.....	92
59 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างและฟลักซ์ความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของสารทำความเย็น R141b กับสหสัมพันธ์.....	97
60 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างและฟลักซ์ความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของ Ethyl alcohol กับสหสัมพันธ์	97
61 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิและฮีตฟลักซ์ของสารทำความเย็น R141b ที่ความดันต่างๆ.....	98
62 ความสัมพันธ์ระหว่างและฮีตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของสารทำความเย็น R141b ที่ความดันต่างๆ.....	98
63 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิและฮีตฟลักซ์ของสารทำความเย็น R141b ผสมอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้น 0.010% โดยปริมาตร ที่ความดันต่างๆ..	99
64 ความสัมพันธ์ระหว่างและฮีตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของสารทำความเย็น R141b ผสมอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้น 0.010% โดยปริมาตร ที่ความดันต่างๆ.....	99
65 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิและฮีตฟลักซ์ของสารทำความเย็น R141b ผสมอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้น 0.050% โดยปริมาตรที่ความดันต่างๆ.....	100
66 ความสัมพันธ์ระหว่างฮีตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของสารทำความเย็น R141b ผสมอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้น 0.050% โดยปริมาตร ที่ความดันต่างๆ.....	100

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในยุคปัจจุบัน ประชากรของโลกได้เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ทำให้เทคโนโลยีได้ถูกพัฒนาให้มีความก้าวหน้าตลอดเวลา เพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์ โดยเทคโนโลยีที่มีความสำคัญอีกอย่างหนึ่งคือเทคโนโลยีการทำความเย็น ถึงแม้ว่าจะมีการคิดค้นและพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนอยู่ตลอดเวลาก็ตาม การแลกเปลี่ยนความร้อนในกรณีที่มีการเปลี่ยนสถานะ จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าเมื่อเทียบกรณีที่ไม่มีการเปลี่ยนสถานะ โดยที่กลไกการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพุด (Pool boiling heat transfer) ถือเป็นกลไกการถ่ายเทความร้อนแบบหนึ่งที่เกิดขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ดังนั้นการพัฒนาการแลกเปลี่ยนความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพุด นั้นสามารถพัฒนาได้ในสองส่วนด้วยกัน คือ 1) พัฒนาในส่วนของพื้นผิวให้ความร้อน และ 2) พัฒนาในส่วนของสารทำงานที่ใช้ภายในระบบ ซึ่งในส่วนของการพัฒนาสารทำงาน ที่ใช้ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพุด ได้มีการพัฒนาในหลายๆ วิธีด้วยกัน อย่างไรก็ตามในปัจจุบันวิธีหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจอย่างมาก คือ การใส่อนุภาคของแข็งที่มีค่าการนำความร้อนสูงลงไปของไหลฐาน (Base fluids) เพื่อเพิ่มค่าการนำความร้อนให้แก่ของไหลทำงาน ทั้งนี้เนื่องจากเหตุผลที่ว่าของไหลนาโน มีค่าการนำความร้อนที่สูงกว่าของไหลฐาน การปรับปรุงประสิทธิภาพของสารทำงานจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ช่วยให้สารทำความเย็นมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการใช้อนุภาคนาโนผสมกับสารทำความเย็น เพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการเดือดของสารทำความเย็น และความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของสารทำความเย็น โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างสารทำความเย็นผสมกับอนุภาคนาโน และสารทำความเย็นที่ไม่ผสมอนุภาคนาโน

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของการเดือดแบบพุดของของไหลนาโน
2. เปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบการเดือดแบบพุดของสารทำความเย็นระหว่างสารทำความเย็นที่ ผสมอนุภาคนาโน และสารทำความเย็น ที่ไม่ผสมอนุภาคนาโน

ขอบเขตการวิจัย

1. ทำการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเดือดแบบพุด
2. ใช้สารทำความเย็น R141b และ เอเทิลแอลกอฮอล์เป็นสารทำงาน
3. พื้นผิวให้ความร้อนทำด้วยโลหะทองเหลืองรูปทรงกระบอกวางในแนวนอน
4. ใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นอนุภาคนาโนในการทดลองที่ความเข้มข้น 0.010-0.075 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
5. ช่วงความดันที่ทดลอง 50-150 กิโลปาสคาล

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบอิทธิพลและความรู้จากการเปรียบเทียบการเดือดแบบพุดของสารทำความเย็นระหว่าง สารทำความเย็น ผสมอนุภาคนาโน และสารทำความเย็น ไม่ผสมอนุภาคนาโน
2. ทราบถึงอิทธิพลของความดันและอุณหภูมิที่มีผลต่อการเดือดแบบพุด
3. นำความรู้ที่ได้จากการศึกษาพฤติกรรมการเดือดแบบพุดของสารทำความเย็น มาปรับปรุงความสามารถในการเดือดของสารทำความเย็นให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

บททวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เดส และคณะ (Das; et al. 2003) ศึกษาลักษณะเฉพาะของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพูลของของไหลนาโน โดยใช้อนุภาคของอะลูมิเนียมออกไซด์ขนาดประมาณ 58.4 นาโนเมตร ใส่ลงไปในตัวนำ (Al₂O₃-Water nanofluid) ที่ความเข้มข้นระหว่าง 0.1 ถึง 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยพื้นผิวให้ความร้อนมีลักษณะเป็นท่อวางในแนวนอน (Horizontal tube) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 4, 6.5 และ 20 มิลลิเมตร ค่าความขรุขระของพื้นผิวให้ความร้อนอยู่ระหว่าง 0.37 ถึง 0.45 ไมโครเมตร จากผลการทดลองพบว่า ค่าความขรุขระของพื้นผิวให้ความร้อนมากขึ้นทำให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพูลดีขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของของไหลนาโนพบว่าทำให้ลักษณะเฉพาะของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพูลนั้นลดลง

ยู และคณะ (You; et al. 2003) ศึกษาการเพิ่มขึ้นของค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤติที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเดือดแบบพูลของของไหลนาโนที่ใส่อนุภาคของอะลูมิเนียมออกไซด์ลงในน้ำ โดยมีความเข้มข้นระหว่าง 0.001 ถึง 0.05 กรัมต่อลิตร พื้นผิวให้ความร้อนทำมาจากทองแดง ซึ่งมีลักษณะสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 10x10 ตารางมิลลิเมตร วางในแนวนอนและวัดค่าความต้านทานได้ 25 โอห์ม ในช่วงการทดลองจะรักษาความดันและอุณหภูมิไว้ที่ 2.89 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า ฟลักซ์ความร้อนวิกฤติของของไหลนาโนนั้นสูงกว่าน้ำและมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของของไหลนาโน โดยที่เมื่อความเข้มข้นเท่ากับ 0.05 กรัมต่อลิตร ค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤติจะเพิ่มขึ้นถึง 200 เปอร์เซ็นต์

มามูท (Mamut. 2004) ทำการศึกษาผลของลักษณะการนำความร้อนของของไหลนาโนที่ทำจากน้ำผสมกับอนุภาคนาโนของทองแดง ผลของการทดสอบนั้นจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับ ทฤษฎีและการจำลองบนหลักการของการถ่ายเทความร้อนโดยการจำลองของ Hamilton-Crosser ให้ค่าทดสอบที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้ประมาณการไว้

คองแทมมูเง็น และคณะ (Cong Tam Nguyen; et al. 2004) นำเสนองานวิจัยการถ่ายเทความร้อนในระบบระบายความร้อนโดยใช้ของไหลนาโนและกำหนดการไหลเป็นแบบราบเรียบ ในงานวิจัยนี้ใช้น้ำผสมกับอนุภาคนาโนของอะลูมิเนียมออกไซด์เป็นของไหลนาโน โดยทดสอบด้วยระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์ผลที่ได้คือของไหลนาโนสามารถให้การถ่ายเทความร้อนดีขึ้น 2 เท่าโดยผสมอนุภาคในอัตราส่วน 10%

เวิน และดิง (Wen; & Ding. 2004) ทดสอบการพาความร้อนของของไหลนาโนผ่านท่อทองแดงโดยกำหนดให้การไหลเป็นแบบราบเรียบและของไหลนาโนประกอบด้วยอนุภาคนาโนของอะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับน้ำ ผลการทดสอบที่ได้การใส่อนุภาคนาโนจะทำให้การถ่ายเทความร้อนดี

ขึ้นและการลดขนาดของท่อลงจะทำให้การกระจายของความร้อนตามความยาวท่อนั้นดีขึ้น โดยเปรียบเทียบกับการใช้ น้ำเป็นสารทำงานเพียงอย่างเดียว

ซุ (Zhou. 2004) ทำการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนร่วมกับการใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกและนำมาทำการเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่ได้ใช้คลื่นเสียงโดยให้ท่อทองแดงวางตัวในแนวระนาบ และทำการศึกษาผลกระทบของคลื่นเสียง, ความเข้มข้นของของไหลนาโนและการถ่ายเทความร้อนบริเวณท่อทองแดง ผลที่ได้จากการทดสอบพบว่า การถ่ายเทความร้อนไม่มีความแตกต่างกัน

ลี และคณะ (Li; et al. 2004) ศึกษาลักษณะเฉพาะของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพูล ของของไหลนาโน ชนิดที่ใส่ซิลิกอนไดออกไซด์ขนาด 25 นาโนเมตรลงในน้ำ (SiO₂-Water nanofluid) โดยความเข้มข้นเท่ากับ 0.05 ถึง 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับพื้นผิวให้ความร้อนทำจากลวดแพลตตินัม (Pt wire) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร และทำการทดลองภายใต้การเดือดแบบเยือกเย็น (Subcooled boiling) ที่ความดันบรรยากาศ จากผลการทดลองพบว่า ที่สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนนั้นเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของของไหลนาโนและมีค่าสูงกว่าน้ำ

วาสซิลโล และคณะ (Vassillo; et al. 2004) ศึกษาลักษณะเฉพาะของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพูลของของไหลนาโน ชนิดที่ใส่อนุภาค ซิลิกอนไดออกไซด์ขนาด 15 และ 50 นาโนเมตร และ 3 ไมโครเมตร ลงในน้ำ โดยมีความเข้มข้นเท่ากับ 0.5 ถึง 9 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สำหรับพื้นผิวให้ความร้อนทำจากลวดนิเกิลโครเมียม (NiCr wire) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 มิลลิเมตร ยาวประมาณ 75 มิลลิเมตร โดยทำการทดลองที่ความดันบรรยากาศ จากผลการทดลองพบว่า ที่ความเข้มข้นของของไหลนาโนเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความร้อนวิกฤติเพิ่มขึ้น และมีค่าสูงกว่าน้ำ

ทีเซี่ย และคณะ (Tsai; et al. 2004) ได้ศึกษาถึงผลของโครงสร้างลักษณะอนุภาคนาโนของทองในของไหลนาโน เพื่อดูประสิทธิภาพของท่อความร้อน โดยใช้ความยาวของท่อทองแดง 170 mm และมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm ผลการศึกษาที่ได้คือ มีการนำความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 0.17 °C/w ไปเป็น 0.215 °C/w และได้ทำการเปรียบเทียบการใช้ท่อความร้อนโดยใช้ของไหลนาโนกับน้ำ DI ซึ่งผลที่ได้คือ น้ำ DI ให้การนำความร้อนน้อยกว่าเนื่องจาก อนุภาคนาโนจะไปช่วยในการรับความร้อนและอนุภาคนาโนยังไปทำให้ฟองอากาศบริเวณแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง

ไมก้า และคณะ (Maïga; et al. 2004) ศึกษาคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนในหลอดความร้อนที่เหมือนกัน และศึกษาปัญหาของการพาความร้อนแบบบังคับของน้ำ-อะลูมิเนียมออกไซด์และเอทิลีน-อะลูมิเนียมออกไซด์ ที่เป็นของไหลนาโนภายในท่อความร้อนซึ่งทั้งสอง

หลอดนั้นเหมือนกันทุกประการและให้ความร้อนกับท่อแบบคงที่ ในรายงานนั้นได้กล่าวว่าเมื่อเขาเพิ่มความร้อนหรือเพิ่มอัตราส่วนของอนุภาคนาโนในของไหลการถ่ายเทความร้อนนั้นเพิ่มขึ้น และได้สรุปในตอนท้ายไว้ว่าการเปรียบเทียบของสารทำงานทั้งสองชนิดนั้น ของไหลนาโนเอทิลีน-อะลูมิเนียมออกไซด์ให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าของไหลนาโนของน้ำ-อะลูมิเนียมออกไซด์

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

แบ็ง และชาง (Bang; & Chang. 2005) ศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนที่ทำจากอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ผสมกับน้ำในพื้นที่ผิวระนาบของอ่างทดสอบโดยจะทำการวัดความเร็วสูงศึกษาพฤติกรรมการเดือด จากผลการทดสอบ สรุปได้ว่า ของไหลนาโนจะให้การถ่ายเทความร้อนน้อยกว่าการใช้น้ำเป็นสารทำงานเพียงอย่างเดียว และถ้าให้ความเข้มข้นของอนุภาคอะลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้นจะทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลง ส่วนระดับการเดือดก็จะลดลงเช่นเดียวกัน

ดิง และเวิน (Ding; & Wen. 2005) ศึกษาผลกระทบของอนุภาคในการเคลื่อนย้ายเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนในท่อขนาดเล็กเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร รวมทั้งศึกษาผลกระทบของการก่อให้เกิดแรงเฉือนและผลกระทบของความหนืดเนื่องจากแรงโน้มถ่วง การเคลื่อนย้ายของอนุภาคนาโนและการกระจายตัวภายใต้การเคลื่อนที่แบบบราวเนียน ซึ่งผลที่ได้นั้นจะเห็นการเคลื่อนที่แบบไม่เป็นระเบียบของอนุภาค อุณหภูมิในภาคตัดขวางของท่อ โดยจะนำไปเปรียบเทียบกับเคลื่อนที่แบบเป็นระเบียบของอนุภาคในการถ่ายเทความร้อน ซึ่งการเคลื่อนที่ของอนุภาคนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าของนัสซัลท์นัมเบอร์และ ทดสอบการถ่ายเทความร้อนของน้ำที่ผสมอนุภาคนาโนแบบท่อของคาร์บอน การทดสอบนี้ใช้ท่อทองแดงและใช้ของไหลนาโนเป็นสารทำงาน โดยวางท่อในแนวระนาบ ผลการทดสอบนั้นได้พบว่า การถ่ายเทความร้อนขึ้นกับการไหลของสารงาน ส่วนผลกระทบของความเป็นกรดต่างนั้นน้อยมาก และผลกระทบที่มากที่สุดของการถ่ายเทความร้อน คือ อัตราส่วนผสมของอนุภาคนาโน ในการทดสอบนั้นได้ผสมอนุภาคนาโนไว้ที่ 0.5% จะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น 350% ที่ค่าเรย์นอลด์เท่ากับ 800 โดยเปรียบเทียบกับกรณีไม่ใส่ผงอนุภาคนาโนในสารทำงาน

คู และคลินสเตอร์เยอร์ (Koo; & Kleinstreuer. 2005) ศึกษาการไหลของของไหลนาโนในครีบบรรเทาความร้อนขนาดเล็กโดยใช้วิธีการจำลองการไหลของของไหลนาโนซึ่งของไหลนาโนนี้แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ใช้อนุภาคนาโนของทองแดงผสมกับน้ำและอนุภาคนาโนของทองแดงผสมกับเอ

ทิลีน โดยกำหนดให้อัตราการไหลเป็นแบบราบเรียบ จากนั้นนำมาวิเคราะห์ค่าการกระจายของ อุณหภูมิ, ความดัน, ค่าไนส์เซิลท์นัมเบอร์, การกระจายตัวของความหนืด และผลกระทบของอุณหภูมิ

ลู และลิน (Liu; & Lin. 2005) เพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยอนุภาคนาโนแบบท่อของ คาร์บอนในของไหล โดยใช้เอทิลีน และ น้ำมันเครื่องชนิดซินทิติก เป็นของไหลนาโน ซึ่งผลของการ ทดสอบการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น 12.4% สำหรับอนุภาคนาโนผสมกับเอทิลีน ในอัตราส่วน 1% โดย ปริมาตร และเพิ่มขึ้น 30% สำหรับอนุภาคนาโนที่ผสมในน้ำมันเครื่องที่อัตราส่วน 2% โดยปริมาตร

คัง และคณะ (Kang; et al. 2004) ได้เสนองานวิจัยของประสิทธิภาพของท่อความร้อนเมื่อ ใส่อนุภาคนาโนของเงินลงไปของเหลวภายในท่อความร้อนโดยใช้น้ำเป็นของเหลว อนุภาคนาโนของ เงินมีขนาด 35 nm และ 10 nm การทดลองสามารถวัดการกระจายของอุณหภูมิและนำมาเปรียบเทียบ การนำความร้อนโดยใช้ของไหลนาโนและน้ำเพียงอย่างเดียว การทดสอบจะผสมอนุภาคนาโนใน ปริมาตร 1 mg/L ถึง 100 mg/L ลงในของไหล โดยท่อจะระบายความร้อนให้แก่ น้ำที่อุณหภูมิประมาณ 40 °C สามารถปรับค่าความร้อนที่ให้จากท่อความร้อนโดยลดอุณหภูมิขนาด 30-60 วัตต์ ผลที่ได้ คือ การนำความร้อนจะดีที่สุดเมื่ออนุภาคนาโนมีขนาด 10 nm ที่ระดับพลังงาน 60 วัตต์ และอัตรา ผสมเท่ากับ 10 mg/L (44.6 °C) และได้เปรียบเทียบการนำความร้อนโดยใช้น้ำเพียงอย่างเดียว ปรากฏว่า ค่าความต้านทานการนำความร้อน ของน้ำมีค่ามากกว่าของไหลนาโน และการใช้ของไหล นาโนยังทำให้การสูญเสียความร้อนลดลง

กอล และซุ (Gao; & Zhou. 2006) ศึกษาความแตกต่างของทฤษฎีทางฟิสิกส์และลักษณะ ทางเรขาคณิตที่ทำให้ความสามารถในการนำความร้อนของอนุภาคนาโนต่างกัน และการศึกษา เกี่ยวกับของไหลนาโนส่วนมากจะศึกษาสภาพการนำความร้อนโดยการกำหนดปริมาตรการผสม อนุภาคนาโนลงในของไหลนาโน

เชน และชวง (Chein; & Chuang. 2006) ศึกษาประสิทธิภาพการระบายความร้อนในโดยใช้ ของไหลนาโนในครีระบายความร้อนขนาดเล็กโดยใช้อนุภาคนาโนของทองแดงผสมกับน้ำ และปรับ ปริมาณอัตราส่วนของอนุภาคนาโนเพื่อหาความเหมาะสมในการถ่ายเทความร้อนของครีระบาย ความร้อนซึ่งอนุภาคนาโนมี 2 ขนาด คือ 100x300 ไมโครเมตร และขนาด 57x365 ไมโครเมตร ผลการ ทดสอบ เมื่อใช้ของไหลนาโนช่วยในการถ่ายเทความร้อน พบว่า สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการ ถ่ายเทความร้อน และไม่ทำให้ความดันตกลง เนื่องจากอนุภาคนาโนมีขนาดเล็กมากและผสมปริมาณ ที่น้อย

เฮอริ เอสฟาฮานี และ เอ็ดมาด (Heris Esfahany; & Etemad. 2006) ทดสอบออกไซด์ของ อนุภาคนาโนในการถ่ายเทความร้อนโดยการไหลแบบราบเรียบ ในรายงานได้ทดสอบของไหลนาโนที่

ประกอบด้วยอนุภาค CuO และ Al_2O_3 ในน้ำที่มีระดับของความเข้มข้นต่างกันและการหาความร้อน โดยการไหลแบบราบเรียบ ผ่านท่อกลมโดยกำหนดขอบเขตของอุณหภูมิไว้คงที่ ผลการเปรียบเทียบ ระหว่างการทดสอบ CuO ที่ผสมกับน้ำ และ Al_2O_3 ที่ผสมกับน้ำ พบว่าค่าการถ่ายเทความร้อนไม่ แตกต่างกันในกรณีที่มีความเข้มข้นนั้นน้อยมาก แต่เมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโนเพิ่มขึ้นจะทำให้ การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น และในรายงานนี้พบว่าค่าการถ่ายเทความร้อนของ Al_2O_3 จะดีกว่า CuO เล็กน้อย

ไล และคณะ (Li; et al. 2006) ศึกษาสารทำความเย็นและมวลของน้ำในการถ่ายเทความร้อน โดยใช้สารทำความเย็น R134a ร่วมกับอนุภาคนาโนของทองแดงและนำไปเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้สาร ทำความเย็น R134a เป็นสารทำงานเพียงอย่างเดียว ซึ่งในรายงานการทดสอบทำการศึกษาความดัน และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ผลการทดสอบเมื่อทำการผสมอนุภาคนาโนของทองแดงลงในสารทำงาน จะทำให้อุณหภูมิลดลงจาก 283.15 K เหลือ 282.65 K และความดันลดลงจาก 414.86 kPa เหลือ 401.35 kPa

มานซัวร์ กาลานิส และนงูเงิน (Mansour Galanis; & Nguyen. 2006) ศึกษาผลกระทบของ คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของน้ำและอนุภาคนาโน ซึ่งในที่นี้ใช้อลูมิเนียมออกไซด์เป็นอนุภาคนาโน และ ทดสอบประสิทธิภาพทางเทอร์โมไฮดรอลิกของการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน ใช้การพาความร้อนแบบบังคับโดยให้ความร้อนที่ผนังท่อซึ่งขรุขระ จากการศึกษาแบบจำลองทั้งสองแบบ พบว่า มีความ แตกต่างกันมาก ผลการทดสอบโดยของไหลนาโนสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบที่มีการ ใช้ออนุภาคนาโนเป็นส่วนประกอบ

มัวร์เชด ลีอง และหยาง (Murshed Leong; & Yang. 2006) การนำความร้อนของอนุภาคนาโนในของไหลหรือของไหลนาโน ในรายงานอธิบายถึงทฤษฎีและการทดสอบของการเพิ่มความร้อนในของ ไหลนาโนโดยพบว่า การใส่อนุภาคนาโนจะทำให้การนำความร้อนดีขึ้น ในการทดสอบนั้นจะใส่อนุภาคนาโนของอะลูมิเนียมออกไซด์ 1-5% ลงในน้ำบริสุทธิ์ ซึ่งให้ผลการนำความร้อนเพิ่มถึง 29% โดยการ เปรียบเทียบกับการผสมของแมคเวล

ปาล์ม รอยด์ และนงูเงิน (Palm Roy; & Nguyen. 2006) เพิ่มการถ่ายเทความร้อนในระบบ โดยใช้อของไหลนาโน ซึ่งใช้ระเบียบวิธีการทางคณิตศาสตร์โดยใช้ออนุภาคนาโน สามารถเพิ่ม ความสามารถในการระบายความร้อน อนุภาคนาโนของอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ผสมในน้ำที่ 4% จะ สามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ถึง 25% เปรียบเทียบกับการใช้น้ำเป็นสารทำงานเพียงอย่างเดียว

หวาง และคณะ (Hwang; et al. 2006) ศึกษาอนุภาคนาโนหลาย ๆ ชนิด เช่น อนุภาคท่อนาโนคาร์บอน อนุภาคทองแดงออกไซด์ ซิลิกอนไดออกไซด์ และอนุภาคนาโนเงิน นำมาใช้ในการผสม

สำหรับทำเป็นของไหลนาโน เพื่อทำการศึกษาประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนและการหล่อลื่น โดยนำมาผสมกับน้ำ เอทิลแอลกอฮอล์ น้ำมันเครื่อง น้ำมันซิลิกอน และน้ำมันโพลีโอะเลฟิน ซึ่งในการศึกษาทางความร้อนจะทำการศึกษาในส่วนของการนำความร้อน ส่วนในการหล่อลื่นจะศึกษาเรื่องความหนืดจลน์ ผลที่ได้คือสามารถเพิ่มสมรรถนะในการนำความร้อนได้ 0.4 W/mK และในการผสมลงในน้ำมันหล่อลื่นทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น และศึกษาการใช้อนุภาคนาโนในการนำความร้อน โดยการเปรียบเทียบระหว่างการใช้กากับอนุภาคนาโน 4 ชนิด คือ อนุภาคท่อนาโนคาร์บอนผสมน้ำ อนุภาคนาโนทองแดงออกไซด์ผสมน้ำ อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ผสมน้ำ และอนุภาคนาโนทองแดงออกไซด์ผสมเอทิลแอลกอฮอล์ ผลที่ได้คืออนุภาคท่อนาโนคาร์บอนผสมน้ำ 0.01% โดยปริมาตรทำให้ระบบมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 11.3%

คิม และคณะ (Kim; et al. 2006) ศึกษาการเพิ่มขึ้นของค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤติของการเดือดแบบพุดของของไหลนาโน ที่ความดันบรรยากาศโดยใช้อนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ขนาด 85 นาโนเมตร และอนุภาคอะลูมิเนียมไดออกไซด์ขนาด 47 นาโนเมตร ลงไปในน้ำ โดยมีความเข้มข้นระหว่าง 0.0000 ถึง 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยพื้นที่ผิวให้ความร้อนทำมาจากนิเกิลโครเมียมขนาด 0.2 มิลลิเมตร และลวดไททาเนียมขนาด 0.5 มิลลิเมตร จากผลการทดลองพบว่า ค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตินั้น แปรผันตามความเข้มข้นของของไหลนาโน และมีค่าสูงกว่าน้ำ

นงเงินและคณะ (Nguyen; et al. 2007) ทำการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในระบบระบายความร้อนของอุปกรณ์ไฟฟ้าด้วย อนุภาคอะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับน้ำเป็นของไหลนาโน การทดสอบนั้นจะทำการระบายความร้อนของไมโครโปรเซสเซอร์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าซึ่งผลของการผสมอนุภาคนาโนลงไป 6.8% โดยปริมาตรจะทำให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นมากกว่า 40% โดยเปรียบเทียบกับการใช้เป็นสารทำงานเพียงอย่างเดียว และขนาดของอนุภาคนาโนยังมีผลในการถ่ายเทความร้อนคืออนุภาคขนาด 36 nm จะให้การถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าขนาด 47 nm

วาง และมุจุมด้า (Wang; & Mujumdar. 2007) รวบรวมบทความและการทดสอบงานวิจัยในการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนของบุคคลต่างๆเพื่อศึกษาและใช้อ้างอิง ข้อมูล ในรายงานนั้น จะแสดงการเปรียบเทียบงานวิจัย การถ่ายเทความร้อนของอนุภาคนาโน การวัดค่าของการนำความร้อน การวัดความหนืดของของไหล รวมทั้งการเปรียบเทียบข้อมูลการทดสอบของการถ่ายเทความร้อนในของไหลนาโนหลายๆชนิดของบุคคลต่างๆ

นงเงิน และคณะ (Nguyen; et al. 2007) ศึกษาลักษณะเฉพาะของการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากการเดือดแบบพุดของของไหลนาโนที่ความดันบรรยากาศ โดยใส่อนุภาคอะลูมิเนียมไดออกไซด์ขนาด 47 นาโนเมตร ลงไปในน้ำกลั่น (Distilled water) ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.5 ถึง 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สำหรับพื้นที่ผิวให้ความร้อนนั้นทำจากทองแดงที่เคลือบด้วยโครเมียมมีลักษณะ

เป็นวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 24 มิลลิเมตร วางในแนวนอน ผลจากการทดลองพบว่า เมื่อความเข้มข้นของของไหลนาโนสูงขึ้นจะทำให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพูลดลงเมื่อเทียบกับน้ำ

อี และคณะ (He; et al. 2007) ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการไหลของอนุภาคนาโนไทเทเนียมออกไซด์ในท่อตามแนวแกนตั้ง โดยใช้น้ำเพียงอย่างเดียวและใช้ของไหลนาโน จากนั้นจะนำค่าการถ่ายเทความร้อนมาเปรียบเทียบกัน จากการทดสอบนั้นค่าการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนให้การถ่ายเทได้ดี และความดันสูญเสียมีไม่มากนัก

เซินหัวหลู และคณะ (Zhen-hua Liu; et al. 2007) การทดลองมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาการเกิดการเดือด และการถ่ายเทความร้อนของ น้ำ ต่อบริเวณของคอปเปอร์ออกไซด์ที่ลอยตัวอยู่ในของเหลว ภายใต้ภาวะแรงดันที่แตกต่างและความเข้มข้นของมวลในระดับอนุภาคนาโน การทดลองทำในอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็ก ซึ่งมีท่อให้ความร้อนแบบเรียบขนาดเล็ก (MFHP) ที่มีร่องขนาดจุลภาคที่ทำหน้าถ่ายเทความร้อนในระดับพื้นผิวเพื่อการระเหย จากผลการทดลองที่ได้บ่งชี้ให้เห็นว่า แรงดันเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้เกิดการเดือดภายในเครื่องทดสอบการระเหย MFHP ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนและจุดวิกฤตของการไหลทางความร้อน (CHF) ในระดับนาโนของของเหลวจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับระดับแรงดันของของเหลวดังกล่าว ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนและจุดวิกฤตของการไหลทางความร้อน (CHF) ในระดับนาโนของของเหลวจะมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 25%, 50% ตามลำดับที่แรงดันบรรยากาศ และจะเพิ่มเป็น 100% และ 150% ตามลำดับที่แรงดัน 7.4 kPa มวลความเข้มข้นของอนุภาคในระดับนาโนก็เป็นปัจจัยสำคัญในการถ่ายเททางความร้อนและ CHF ของของเหลวในระดับนาโน ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนและ CHF จะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อมวลของสารเพิ่มขึ้นภายใต้สภาวะความเข้มข้นต่ำ อย่างไรก็ตามเมื่ออนุภาคนาโนมีมวลเข้มข้นเกินกว่า 1.0%wt ค่า CHF จะเข้าใกล้ค่าคงที่ซึ่งใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนนั่นเอง ซึ่งค่าความเข้มข้นของมวลสูงสุดสำหรับของเหลวระดับนาโนซึ่งเหมือนกับค่าการส่งผ่านความร้อนที่เข้าใกล้ระดับความเข้มข้นที่ 1.0%wt ในทุกๆการทดสอบภายใต้แรงดันที่แตกต่างกัน จากการทดลองเป็นเครื่องยืนยันว่าคุณสมบัติการส่งผ่านความร้อนที่มีผลต่อการระเหยใน MFHP มีความชัดเจนกว่าการใช้ในสารละลายคอปเปอร์ออกไซด์

คิม และคณะ (Kim; et al. 2007) ศึกษาลักษณะเฉพาะของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพูลของของไหลนาโน ชนิดที่ใส่อนุภาคออกไซด์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ (AlO_2), เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (ZrO_2) และ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ลงไปในน้ำ โดยอนุภาคเหล่านี้มีความเข้มข้นระหว่าง 0.001 ถึง 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรพื้นผิวให้ความร้อนทำจากลวดเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel wire) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.0381 มิลลิเมตร ยาว 120 มิลลิเมตร และแบบแผ่นเรียบวางใน

แวนอนมีขนาด 5x45 มิลลิเมตร โดยทำการทดลองที่ความดันบรรยากาศ จากผลการทดลองพบว่า ค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤติเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของของไหลนาโนและมีค่าสูงกว่าน้ำ โดยที่อนุภาค อะลูมิเนียมออกไซด์นั้นเพิ่มขึ้นประมาณ 52 เปอร์เซ็นต์ เซอร์โคเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้น 75 เปอร์เซ็นต์ และซิลิกอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น 80 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

โจนาธาน และคณะ (Johnathan; et al. 2008) การเดือดของของเหลวในระดับนาโน จะส่งผลให้เห็นประสิทธิภาพในการส่งผ่านความร้อนจนเกิดการเดือดที่ค่าเพิ่มขึ้น แต่การตอบสนองทาง กลยังมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่ดีนัก สิ่งหนึ่งที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลคือการปรับปรุงคุณสมบัติด้านการ เปียกของพื้นผิวการศึกษาในหัวข้อนี้มีเป้าหมายเพื่อค้นหาการปรับปรุงค่าวิกฤตของการไหลทางความ ร้อนของของเหลวในระดับนาโน (CHF) ด้วยการจุ่มเคลือบพื้นผิวด้วยสารละลายที่มีคุณสมบัติการ เคลือบต่ำ จากนั้นให้ความร้อนเพื่อกระตุ้นพลังงานบนพื้นผิวให้พื้นผิวออกไซด์เกิดสภาวะทางโลหะเพื่อ ความพร้อมในการเคลือบ พลังงานที่เปลี่ยนแปลงในบริเวณพื้นผิวดังกล่าวสามารถตรวจวัดได้จาก ประยุกต์มุมสัมผัสของ 3 เฟส อัตราการเดือดของพื้นผิวเหล่านี้ ทั้งสารเคลือบคุณสมบัติต่ำ น้ำ และเอ ทานอลที่เป็นสารละลายตั้งต้นของของเหลวผสมระดับนาโนของอนุภาคอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีความ เข้มข้น 0.001g/L ถึง 10 g/L การทำให้สารละลายเจือจางไม่ส่งผลให้อัตราการเดือดมีค่าลดลงแต่อย่าง ใด ความเข้มข้นของสารละลาย (≥ 0.5 g/L) หรือระดับสูงกว่า 37% ส่งผลให้ค่า CHF มีค่าเพิ่มขึ้น ใน ระบบของเหลวที่มีคุณสมบัติการเปียกต่ำ เช่น น้ำบนผิวทองแดงขัด สามารถทำการปรับปรุงโดยการ เพิ่มอนุภาคนาโน หรือแม้แต่ความต้านทานการเปียกของวัสดุบางประเภท เช่น เอทานอลบนผิวแก้ว ก็ สามารถทำการปรับปรุงให้เกิดการเสื่อมสภาพลงได้ มากไปกว่านั้น การเติมอนุภาคนาโนในน้ำจะเป็น การปรับปรุงคุณสมบัติด้านการเปียก ก็ต่อเมื่ออนุภาคดังกล่าวไปปิดกั้นบริเวณพื้นผิว ซึ่งคล้ายกับ CHF ที่ได้เมื่อไม่มีการนำสารละลายนาโนมาใช้กับพื้นผิวออกไซด์ จะส่งผลให้เกิดการเปียกต่ำ และเมื่อ พื้นผิวถูกกระตุ้นทางความร้อน ค่าที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับ CHF แต่หากนำสารละลายนาโนมาใช้จุด วิกฤตของการไหลทางความร้อนจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส

ลู และคณะ (Liu; et al. 2008) ศึกษาลักษณะเฉพาะของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการ เดือดแบบพูลชของของไหลนาโน ที่ใส่อนุภาคออกไซด์ของทองแดง (CuO) ขนาด 50 นาโนเมตร ลงไป ในน้ำและ เอทิลแอลกอฮอล์, อนุภาคของซิลิกอนไดออกไซด์ขนาด 35 นาโนเมตร ใส่ลงไปในน้ำ และ เอทิลแอลกอฮอล์ โดยของไหลนาโนนั้นมีความเข้มข้นเท่ากับ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พื้นผิวให้ ความร้อนทำมาจากทองแดง เป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร วางในแวนอน จาก ผลการทดลองพบว่าจุดฟลักซ์ความร้อนวิกฤติของของไหลนาโนมีค่าสูงกว่าของไหลฐาน

ล็อตฟี และชาฟี (Lotfi H; & Shafii M.B. 2009) เพื่อศึกษาการเดือดในสารละลายนาโน การ ทดสอบโดยการจุ่มอนุภาคเงินแบบกลมในน้ำที่มีองค์ประกอบของสารละลายนาโนเป็นหลักอัน

ประกอบไปด้วย อนุภาคนาโนของเงินและไทเทเนียมไดออกไซด์ อนุภาคกลมของเงินเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. ที่อุณหภูมิจุ่มซุบที่ 700 องศาเซลเซียส จุ่มลงในสารละลายนาโนที่อุณหภูมิ 90 องศา ผลที่ได้คือการลดลงของความสามารถในการจุ่มซุบของสารละลายนาโนเมื่อเทียบกับน้ำบริสุทธิ์ เนื่องจากในน้ำจะทำหน้าที่กำจัดชั้นฟิล์มการเดือดให้หมดไปที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งขึ้นกับอัตราความเข้มข้นของสารละลาย การคำนวณการส่งผ่านทางความร้อนของสารละลายระดับนาโนจึงมีค่าน้อยกว่าน้ำบริสุทธิ์ทั่วไป เมื่อทำการจุ่มซุบอนุภาคกลมที่ผ่านการให้ความร้อนและไม่ได้ผ่านการล้าง ชั้นฟิล์มจากการเดือดจะไม่ปรากฏและอนุภาคกลมร้อนดังกล่าวจะก่อให้เกิดการเดือดอย่างรวดเร็ว เนื่องจากพื้นผิววัสดุทำหน้าที่ปกป้องไอของชั้นฟิล์มไว้ภายใน ทำให้การจุ่มซุบทำได้เร็วขึ้น

โฮวเป็งก้า และคณะ (Hao Penga; et al. 2009) เป้าหมายงานวิจัยฉบับนี้เพื่อศึกษาคูณลักษณะที่ไม่เหมาะสมของอนุภาคนาโนในการส่งผ่านความร้อนของสารทำความเย็นที่มีองค์ประกอบพื้นฐานเป็นสารละลายนาโน ซึ่งไหลอย่างต่อเนื่องในท่อแนวระดับ ทั้งยังนำเสนอการเปรียบเทียบการส่งผ่านทางความร้อนของสารทำความเย็นที่เป็รสารละลายนาโนอีกด้วย สำหรับการเตรียมสารทำความเย็นระดับนาโนได้ จาก R113 และ คอปเปอร์ออกไซด์ที่มีอนุภาคระดับนาโน การทดลองภายใต้แรงดันสภาวะควบแน่น 78.25 kPa มวลการไหลที่อัตรา 100 ถึง 200 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ต่อวินาที อัตราการไหลทางความร้อนที่ 3.08 ถึง 6.16 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร มวลไอขาเข้าที่อัตรา 0.2 ถึง 0.7 และสัดส่วนมวลในระดับอนุภาคนาโนที่ 0 – 0,5 % wt ผลการทดลองแสดงให้เห็นสัมประสิทธิ์การถ่ายเททางความร้อนในสารทำความเย็นที่เป็นสารละลายนาโนมีค่ามากกว่า สารทำความเย็นแบบทั่วไป ซึ่งมีอัตราการถ่ายเททางความร้อนมีสัมประสิทธิ์ถึง 29.7% สำหรับสารละลายนาโนมีสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนสูงถึง 93% ซึ่งการทดลองดังกล่าวอาจมีค่าคลาดเคลื่อนที่ $\pm 20\%$.

โฮวเป็งก้า และคณะ (Hao Penga; et al. 2009) เป้าหมายของงานวิจัยฉบับนี้เพื่อศึกษาผลกระทบในอนุภาคนาโนต่อแรงดันเสียดทานที่มีค่าลดลงในสารทำความเย็นที่เป็นสารละลายนาโน และเสนอการเปรียบเทียบเพื่อทำนายค่าแรงดันเสียดทานในสารทำความเย็นดังกล่าว สารทำความเย็น R113 และ คอปเปอร์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในสารทำความเย็นที่เป็นสารละลายนาโน ทดลองในสภาวะที่อัตรามวลการไหล 100-200 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ต่อวินาที ในอัตราการไหลทางความร้อน 3.08 – 6.16 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร มวลไอขา 0.2-0.7 และสัดส่วนมวลจาก 0-0.5%wt การทดลองแสดงให้เห็นถึงอัตราการลดลงของแรงดันเสียดทานในสารทำความเย็นแบบนาโนที่มีอัตราส่วนมวลอนุภาคนาโนที่เพิ่มขึ้น สัดส่วนสูงสุดที่ส่งผลต่ออัตราการลดลงของแรงดันคือ 20.8% ภายใต้สภาวะข้างต้น ซึ่งเป็นค่าที่สูงสุดของการลดลงของแรงดันที่เป็นไปได้ จากการพยากรณ์ที่ความเชื่อมั่นที่ 92% ภายใต้ความคลาดเคลื่อน $\pm 15\%$.

วิสิณี และสมชาย (Visinee; & Somchai. 2009) ศึกษาลักษณะเฉพาะของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพูล ของของไหลนาโนที่มีอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์แขวนลอยในสารทำความเย็น R141b โดยมีความเข้มข้นระหว่าง 0.01 ถึง 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร การส่งผ่านความร้อนจากการก่อตัวขณะเดือดในสารทำความเย็นแบบนาโนมีผลมาจากความเข้มข้นของอนุภาคนาโน และแรงดันที่มีค่าต่างกัน อนุภาคของไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผสมอยู่ในสารทำความเย็น HCFC 141b ที่ 0.01, 0.03 และ 0.05 % vol จากการทดลองที่กำหนดให้ผิวท่อทองแดงทำหน้าที่เป็นพื้นผิวที่เกิดการเดือด เมื่อทำการเปรียบเทียบการก่อตัวจากการเดือดที่เกิดขึ้นระหว่างสารทำความเย็นแบบธรรมดา กับสารละลายแบบนาโน พบว่าอัตราการส่งผ่านความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารที่มากขึ้น โดยเฉพาะที่อัตราส่วน 0.05%vol อัตราการเดือดจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดยิ่งยวด ส่งผลให้เกิดแรงดัน 400 และ 500 kPa ภายใต้สัมประสิทธิ์ การส่งผ่านความร้อนที่อุณหภูมิเดียวกัน จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพูลจะลดลง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของของไหลนาโน และจะแปรผันตามค่าความดัน

โฮซ็อนอาห์ และคณะ (Ho Seon Ahn; et al. 2010) เป็นที่รู้กันดีว่าจุดวิกฤตจากการไหลของความร้อนในขณะเดือด (CHF) ที่ใช้สารละลายนาโนจะเกิดการก่อตัว สิ่งสำคัญที่นำมาพิจารณาคือการไหลขณะเดือดที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในหลายๆ กิจกรรม จากการศึกษา CHF ของสารละลายนาโน ภายใต้การพาความร้อนที่กำหนดขึ้นในช่องสี่เหลี่ยมเล็กๆ ขนาด 10 มม. สูง 5 มม. บนแผ่นงานทองแดงหน้าสัมผัสขนาด 10 มม. ให้ความร้อนเพื่อหวังให้เกิดการส่งผ่านความร้อนจากด้านล่างของผิวสัมผัสที่ติดกับช่องที่กำหนดให้เกิดการไหลผ่านตัวทำความร้อน สารละลายนาโนที่มีอนุภาคนาโนของอะลูมินาความเข้มข้น 0.01% vol ที่ใช้ในการทดสอบ การทดลองจะแสดงให้เห็นถึงการเดือดแบบ CHF ในสารละลายนาโน ที่ถูกหวังให้เกิดการพาความร้อนเมื่อเทียบกับน้ำบริสุทธิ์ ในขณะที่เกิดการเดือด การศึกษาพื้นผิวของตัวทำความร้อนด้วย SEM (Scanning Electro Microscope) พบว่าอนุภาคนาโนจะเกิดการแทนที่บนพื้นผิวสัมผัสของตัวทำความร้อนดังกล่าวทำให้เกิดการพาความร้อนที่ดีขึ้น เนื่องมาจากความสามารถในการเปียก (Wettability) ที่มากขึ้น

มอนนีร์บูดูท และคณะ (Mounir Boudouh; et al. 2010) เอกสารฉบับนี้ จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการส่งผ่านความร้อนขณะเดือดของสารละลายนาโนและการเกิดสภาวะการลดลงของประจุของน้ำที่ไหลในช่องทางการไหลจำนวนมาก ซึ่งทดสอบทองแดงที่ประกอบด้วย 50 ช่องทางการไหลเล็กๆ เส้นผ่านศูนย์กลาง 800 มม. การทดลองจะแสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะของค่าสัมประสิทธิ์การไหลเฉพาะจุดที่เกิดการส่งผ่านความร้อนที่พื้นผิว และอุณหภูมิที่เกิดบริเวณพื้นผิวโดยใช้สารละลายอนุภาคทองแดงในน้ำที่ความเข้มข้นต่ำ และทำการตรวจวัดอุณหภูมิที่พื้นผิวด้วยเทอร์โมคัปเปิล เพื่อตรวจวัดอัตราการไหลและการส่งผ่านความร้อนเฉพาะจุด สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ที่เกิดขึ้นจะ

สัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลายในตำแหน่งนั้นๆ ซึ่งการทดลองดังกล่าวนี้ให้ผลที่ใกล้เคียงกับการทดลองของ Kandlikar และ Balasubramanian [ว่าด้วยการขยายตัวของของไหลขณะเดือดเมื่อทำการเปรียบเทียบการส่งผ่านลามินาร์ และการไหลในแนวลึกของลามินาร์ ในช่องเล็กๆ ระดับอนุภาค, Heat Transfer Eng. 25 (3) (2004) 86e93.] ในการทำให้น้ำเดือด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงลักษณะการส่งผ่านความร้อน การไหลทางความร้อนที่เกิดเฉพาะ จุด เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น และการสูญเสียประจุที่พื้นผิวสัมผัสจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นด้วย

โฮเป็ง และคณะ (Hao Peng; et al. 2010) ลักษณะการก่อตัวเพื่อส่งผ่านความร้อนขณะเดือดของสารทำความเย็นน้ำมันผสมอนุภาคนาโนของผงเพชร ศึกษาจากสารทำความเย็น R113 และน้ำมัน VG68 สภาวะการทดลองภายใต้แรงดันยิ่งยวดที่ 101.3 kPa อัตราการไหลทางความร้อนที่ 10-80 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ความเข้มข้นของอนุภาคนาโน ต่อ น้ำมันที่ 0-5%wt การทดลองจะแสดงให้เห็นถึง R113 ที่ผสมกับน้ำมันที่มีอนุภาคนาโนของผงเพชร ให้ค่าที่มากกว่า R113 ที่ผสมกับน้ำมันถึง 63.4% ภายใต้สภาวะเดียวกัน และเมื่อเพิ่มสัดส่วนความเข้มข้นของสารละลาย จะส่งผลให้ค่าดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นอีกด้วย ซึ่งจากการนำผลการทดลองดังกล่าวมาเปรียบเทียบจะสามารถทำนายค่าสัมประสิทธิ์ของการส่งผ่านความร้อนของของผสมดังกล่าวได้ จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการผสมอนุภาคนาโนในสารละลายจะส่งผลให้คุณสมบัติดังกล่าวมีค่ามากขึ้น

สุริยวงศ์ และวงศ์วิเศษ (Suriyawong; & Wongwises. 2010) ศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพุลงของของไหลนาโนชนิดที่ใสอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 21 นาโนเมตรลงไปใต้น้ำโดยมีความเข้มข้นระหว่าง 0.00005 ถึง 0.01 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยพื้นที่ผิวให้ความร้อนทำมาจากทองแดงและอลูมิเนียมมีค่าความขรุขระของพื้นผิวเท่ากับ 0.2 และ 4 ไมโครเมตร โดยทำการทดลองที่ความดันบรรยากาศ จากผลการทดลองพบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของของไหลนาโน และพื้นที่ผิวที่มีความขรุขระเท่ากับ 0.2 ไมโครเมตร จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าค่าความขรุขระของพื้นผิวเท่ากับ 4 ไมโครเมตร และกรณีของผิวทองแดงพบว่า เมื่อความเข้มข้นมากกว่า 0.0001 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนนั้นมีค่าต่ำกว่าน้ำ แต่สำหรับพื้นผิวอลูมิเนียมั้นทุกๆความขรุขระและทุกๆความเข้มข้นนั้นพบว่า ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่น้อยกว่าน้ำเสมอ

แททูกิม และคณะ (Tae Il Kim; et al. 2011) จากการทดลอง เพื่อศึกษาค่าวิกฤตการถ่ายเทความร้อนขณะเดือด CHF ของอะลูมินาและ อนุภาคนาโนอะลูมินา ที่ฝังตัวลงบนท่อ เมื่อทดสอบการไหลในขณะเดือดของอะลูมินาในสารละลายนาโนบนระนาบท่อ (NFPT) และการลดลงของประจุในน้ำและอนุภาคนาโนของอะลูมินาเมื่อเกิดการฝังตัวลงบนท่อ (DWNT) มีค่าสูงถึง 80% ไม่ว่าจะทำการทดลองภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน ค่า CHF ที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกันนี้ระหว่างท่อ NFPT และ DWPT

ซึ่งเป็นผลมาจากอนุภาคนาโนของอะลูมินาที่อยู่ใต้ชั้นผิวของวัสดุนั่นเอง และเมื่อการทดลองเพื่อให้เกิดการเดือดภายใต้สภาวะ CHF พบว่าพื้นผิวดังกล่าวเมื่อนำมาศึกษาโดยการผ่าตามขวางของแนวท่อ โดย FE-SEM จะพบอนุภาคของอะลูมินาฝังตัวอยู่ที่บริเวณพื้นผิวที่ได้รับความร้อน

อับบราห์ฮัม บุลัคบาซี และดาห์กอน ซิลโลกู (Abdurrahim Bolukbasi; & Dogan Ciloglu. 2011) เพื่อทำการศึกษากลุ่มกระบวนการในแนวตั้งในสารละลายนาโนซิลิกา ภายใต้อุณหภูมิยิ่งยวดและบรรยากาศแรงดันควบคุม สารละลายนาโนซิลิกาผสมน้ำ จะทำหน้าที่เป็นสารหล่อเย็นที่มีส่วนผสมดังต่อไปนี้ (0.001, 0.01, 0.05 and 0.1 vol.%) ซึ่งงานทดสอบจะถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงและจุ่มลงในสารละลายอีมีตัวอย่าง รวดเร็ว อัตราการเย็นตัวของอุณหภูมิจะเป็นตัวชี้วัดเพื่อศึกษาการส่งผ่านความร้อนขณะเดือดในสารละลายนาโนซึ่งต่างจากน้ำบริสุทธิ์ อย่างไรก็ตามตลอดการทดสอบกับสารละลายความเข้มข้นสูงพบว่าชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นขณะที่เกิดการเดือดนั้นหายไป มากไปกว่านั้นการก่อตัวของการส่งผ่านทางความร้อนที่จุดวิกฤตจะลดลงเมื่อเทียบกับสภาวะที่เกิดในน้ำบริสุทธิ์ แต่การก่อตัวของการส่งผ่านทางความร้อนในขณะเดือดจะเพิ่มขึ้นซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ขณะทำการทดสอบ ลักษณะผิวที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการฝังตัวของอนุภาคนาโนบนพื้นผิว เป็นผลมาจากกระบวนการการจุ่มดังกล่าวนั่นเอง

ซัวร์ราฟ มิตร และคณะ (Sourav Mitra; et al. 2012) เพื่อศึกษาการส่งผ่านทางความร้อนในขณะเดือดของสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ในน้ำ กับสารละลายนาโน MECNT ที่มีสารตั้งต้นจากของเหลวที่ใช้ในการปรับปรุงผิวเหล็กกล้าเป็นหลัก เพื่อเปรียบเทียบอัตราการเย็นตัวของสารทั้งสอง ขนาดของชิ้นงานที่เกิดจากการส่งผ่านทางความร้อนจะใช้เพื่อทำนายการอัตราการส่งผ่านและการไหลทางความร้อนที่เกิดบนพื้นผิววัสดุ ซึ่งเป็นผลมาจากชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นขณะที่เกิดการเดือดจนถึงช่วงการส่งผ่านทางความร้อนพบว่าสารละลายนาโนจะมีค่าที่สูงกว่า และจากการฝังตัวของอนุภาคนาโนดังกล่าวจะส่งผลให้เกิดสภาวะความไม่เสถียรของชั้นฟิล์มขึ้น อย่างไรก็ตามค่าวิกฤตของการส่งผ่านความร้อน CHF ให้ค่าที่ไม่เด่นชัดนักในสารละลายนาโนเมื่อเทียบกับน้ำ

อาห์บีดีนี และคณะ (Abedini; et al. 2013) ลำดับการเย็นตัวของสารละลายนาโนที่ไหลในขณะเดือดของสารละลายน้ำและอะลูมินา (ขนาด 30 นาโนเมตร) เพื่อใช้ในการศึกษาต้นแบบการผสมกันระหว่างสารทั้งสอง การทำนายสามารถเปรียบเทียบจากการทดลองในน้ำบริสุทธิ์เทียบกับสารละลายนาโน และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านทางความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมีค่ามากขึ้น แต่ไม่เป็นผลสำหรับระบบที่มีอัตราการไหลภายใต้ความเร็วสูง เห็นได้ว่าเมื่ออัตราการไหลลดลง ค่าสัมประสิทธิ์ของการส่งผ่านทางความร้อนจะมีค่ามากขึ้น เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านทางความร้อนมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อการพาความร้อน

อาห์เลจันดร มัวร์กูส และคณะ (Alejandro Mourgues et; al. 2013) เมื่อพิจารณา CHF จะพบว่าไม่ง่ายเลยสำหรับการผสมผสานระหว่างจุดคุ้มทุนและความปลอดภัยในระบบทางความร้อนเข้าด้วยกัน เหมือนกับระบบปฏิกรณ์นิวเคลียร์ จึงเป็นเหตุให้มีความพยายามศึกษาสารละลายนาโนเพื่อให้ได้ CHF สูงๆ จากระบบเพื่อประโยชน์จากความร้อนในระดับพื้นผิว จากการรวมตัวทางความร้อนขณะเดือดในสารละลายนาโนที่มี และไม่มี ZnO (0.01%vol) บน SS-304 ที่บรรยากาศ และสภาวะไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวด การทดลองแสดงให้เห็นถึงการเกิดวัฏจักรของการไหลทางความร้อนและกำแพงอุณหภูมิที่กั้นการเกิดการก่อตัวทางความร้อนขณะเดือด โดยที่ชิ้นงานทดสอบไม่เกิดความเสียหายแต่อย่างใด ทำให้ต้องทำการทดลองกับสารละลายภายใต้สภาวะเดียวกันหลายๆ ครั้ง สภาวะการทดลอง 3 แบบที่แตกต่าง a) ทดสอบกับน้ำ DI b) ทดสอบกับสารละลายนาโน NF c) ทดสอบกับ DI ที่มีอนุภาคนาโนของ ZnO เคลือบบน NFC ผสม จากการทดลองพบว่าเกิดการฝังตัวของอนุภาคนาโนบนพื้นผิวที่มีชั้นความหนาประมาณ 70 นาโนเมตร ซึ่งเป็นผลมาจากประสิทธิภาพในการฝังตัวของสารดังกล่าว ในทำนองเดียวกันอัตราการให้ความร้อนบนพื้นผิวงาน รูปทรงบนผิว ความสามารถในการดูดซับและความหยาบของผิวยังเป็นอีกเหตุผลที่กระทบต่อการฝังตัวดังกล่าวอีกด้วย จากการทดลองพบว่า NF และ NFC ให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านทางความร้อนมากกว่า DIW อีกทั้งยังมีค่าการฝังตัวบนพื้นผิวมากกว่าถึง 10 เท่าอีกด้วย

มูฮัมหมัด ริชา ราเวสซี และคณะ (Mohammad Reza Raveshi; et al. 2013) เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการปรับปรุงเทคนิคกระบวนการเดือดโดยประยุกต์ใช้สารละลายนาโน จากพื้นฐานทั่วไปโดยการเติมอนุภาคนาโนในของเหลว เพื่อทำเป็นสารละลายนาโนขึ้น จากนั้นศึกษาการส่งผ่านความร้อนจากการเดือด ของสารละลายนาโนของ อะลูมินาในน้ำ และสารไกลคอลลภายใต้ความดันบรรยากาศ โดยน้ำที่ใช้ในการทดลองเป็น DI ผสมกับเอทิลีน ไกลคอล ซึ่งให้ผลที่ดีเมื่อเทียบกับการทดลองที่ผ่านมา โดยทำการทดลองกับปริมาตรที่ต่างกัน 6 ระดับ ผลที่ได้จากสารผสมดังกล่าวไว้ค่าที่ไม่แตกต่างเมื่ออัตราส่วนผสมของสารมีความเข้มข้นที่เท่ากัน แต่ค่าสัมประสิทธิ์ทางความร้อนจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อความเข้มข้นมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าสูงสุดที่เกิดจากการส่งผ่านทางความร้อนมีค่าอยู่ที่อัตราความเข้มข้นที่ 0.75% และให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านทางความร้อนถึง 64%

ตาราง 1 ตารางสรุปการสำรวจเอกสารงานวิจัย

นักวิจัย	ลักษณะงานที่ศึกษา	สารทำงาน
Das et al. (2003)	ศึกษาลักษณะเฉพาะของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพุดของของไหลนาโน	อนุภาคนาโนของอะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับน้ำ
You et al. (2003)	ศึกษาการเพิ่มขึ้นของค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤติที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเดือดแบบพุด	อนุภาคนาโนของอะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับน้ำ
Mamut (2004)	ศึกษาผลของลักษณะการนำความร้อนของของไหลนาโน	น้ำผสมกับอนุภาคนาโนของทองแดง
Cong Tam Nguyen et al. (2004)	นำเสนองานวิจัยการถ่ายเทความร้อนในระบบระบายความร้อนโดยใช้ของไหลนาโนและกำหนดการไหลเป็นแบบราบเรียบ	น้ำผสมกับอนุภาคนาโนของอะลูมิเนียมออกไซด์
Wen และ Ding. (2004)	ทดสอบการพาความร้อนของของไหลนาโนผ่านท่อทองแดงโดยกำหนดให้การไหลเป็นแบบราบเรียบ	อนุภาคนาโนของอะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับน้ำ
Zhou (2004)	ทำการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนร่วมกับการใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิก	ของไหลนาโน
Li et al. (2004)	ศึกษาลักษณะเฉพาะของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพุดของของไหลนาโน	ซิลิกอนไดออกไซด์ผสมกับน้ำ
Vassllo et al. (2004)	ศึกษาลักษณะเฉพาะของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพุดของของไหลนาโน	ซิลิกอนไดออกไซด์ผสมกับน้ำ

ตาราง 1 (ต่อ)

นักวิจัย	ลักษณะงานที่ศึกษา	สารทำงาน
Maïga et al. (2004)	ศึกษาคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนในหลอดความร้อนที่เหมือนกัน	อะลูมิเนียมออกไซด์-น้ำและอะลูมิเนียมออกไซด์-เอทิลีน
Visinee และ Somchai. (2005)	รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับของไหลนาโนที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อน	อนุภาคนาโนชนิดอนุภาคทั้งที่เป็นโลหะและอโลหะ
Bang และ Chang. (2005)	ศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโน	อะลูมิเนียมออกไซด์ที่ผสมกับน้ำ
Ding และ Wen. (2005)	ศึกษาผลกระทบของอนุภาคในการเคลื่อนย้ายเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนในท่อขนาดเล็ก	ของไหลนาโน
Koo และ Kleinstreuer. (2005)	ศึกษาการไหลของของไหลนาโนในครีบบระบายความร้อนขนาดเล็ก	อนุภาคนาโนของทองแดงผสมกับน้ำและอนุภาคนาโนของทองแดงผสมกับเอทิลีน
Liu และ Lin. (2005)	ศึกษาเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยอนุภาคนาโนแบบท่อของคาร์บอนในของไหล	เอทิลีน และ น้ำมันเครื่องชนิดซินทิติก
Kang et al. (2004)	เสนองานวิจัยของประสิทธิภาพของท่อความร้อนเมื่อใส่อนุภาคนาโนของเงินลงไปของเหลวภายในท่อความร้อน	อนุภาคนาโนของเงินผสมกับน้ำ
Gao และ Zhou. (2006)	ศึกษาความแตกต่างของทฤษฎีทางฟิสิกส์และลักษณะทางเรขาคณิตที่ทำให้ความสามารถในการนำความร้อนของอนุภาคนาโนต่างกัน	ของไหลนาโน

ตาราง 1 (ต่อ)

นักวิจัย	ลักษณะงานที่ศึกษา	สารทำงาน
Chein และ Chuang. (2006)	ศึกษาประสิทธิภาพการระบายความร้อนโดยใช้ของไหลนาโนในครีบริบายความร้อนขนาดเล็ก	อนุภาคนาโนของทองแดงผสมกับน้ำ
Heris Esfahany และ Etemad. (2006)	ทดสอบออกไซด์ของอนุภาคนาโนในการถ่ายเทความร้อนโดยการไหลแบบราบเรียบ	อนุภาคนาโนของคอปเปอร์ออกไซด์ และ อนุภาคนาโนของ อลูมิเนียมไดออกไซด์ผสมกับน้ำ
Li et al. (2006)	ศึกษาสารทำความเย็นและมวลของน้ำในการถ่ายเทความร้อน	สารทำความเย็น R134a ร่วมกับอนุภาคนาโนของทองแดง
Murshed Leong และ Yang. (2006)	การนำความร้อนของอนุภาคนาโนในของไหลหรือของไหลนาโน	อนุภาคนาโนของอะลูมิเนียมออกไซด์ ลงในน้ำบริสุทธิ์
Palm Roy และ Nguyen. (2006)	เพิ่มการถ่ายเทความร้อนในระบบโดยใช้ของไหลนาโน ซึ่งใช้ระเบียบวิธีการทางคณิตศาสตร์โดยใช้อนุภาคนาโน	อะลูมิเนียมออกไซด์ที่ผสมกับน้ำ
Kim et al. (2006)	ศึกษาการเพิ่มขึ้นของค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤติของการเดือดแบบพูลของของไหลนาโน ที่ความดันบรรยากาศ	อนุภาคไททานเนียมไดออกไซด์และอนุภาค อลูมิเนียมไดออกไซด์ ผสมกับน้ำ
Hwang et al. (2006)	ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนและการหล่อลื่น	อนุภาคท่อนาโนคาร์บอน อนุภาคคอปเปอร์ออกไซด์ ซิลิกอนไดออกไซด์และอนุภาคนาโนเงินโดยนำมาผสมกับน้ำ เอทิลแอลกอฮอล์ น้ำมันเครื่อง น้ำมันซิลิกอน

ตาราง 1 (ต่อ)

นักวิจัย	ลักษณะงานที่ศึกษา	สารทำงาน
Mansour Galanis และ Nguyen. (2006)	ศึกษาผลกระทบของคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของน้ำและอนุภาคนาโน	อนุภาคนาโนของอลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับน้ำ
Nguyen et al. (2007)	ทำการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในระบบระบายความร้อนของอุปกรณ์ไฟฟ้า	อนุภาคอะลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับน้ำ
Nguyen et al. (2007)	ศึกษาลักษณะเฉพาะของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพุดของของไหลนาโนที่ความดันบรรยากาศ	สื่อนุภาคอลูมิเนียมไดออกไซด์ลงไปใต้น้ำกลั่น
Wang และ Mujumdar. (2007)	รวบรวมบทความและการทดสอบงานวิจัยในการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนของบุคคลต่างๆ	ของไหลนาโน
He et al. (2007)	ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการไหลของอนุภาคนาโน	น้ำและของไหลนาโน
Zhen-hua Liu et al. (2007)	ศึกษาการเกิดการเดือด และการถ่ายเทความร้อนของ น้ำ ต่อนุภาคนาโน	คอปเปอร์ออกไซด์ผสมกับน้ำ
Kim et al. (2007)	ศึกษาลักษณะเฉพาะของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพุดของของไหลนาโน	อนุภาคอะลูมิเนียมไดออกไซด์ เซอร์โคเนียมไดออกไซด์และซิลิกอนไดออกไซด์ ลงไปในน้ำ
Johnathan et al. (2008)	ศึกษาการเดือดของของเหลวในระดับนาโน	อนุภาคอะลูมิเนียมออกไซด์ผสมน้ำ
Lotfi H และ Shafii M.B. (2009)	ศึกษาการเดือดในสารละลายนาโน	อนุภาคนาโนของเงินและไททาเนียมไดออกไซด์ ในน้ำ

ตาราง 1 (ต่อ)

นักวิจัย	ลักษณะงานที่ศึกษา	สารทำงาน
Hao Peng et al. (2009)	ศึกษาคุณลักษณะที่ไม่เหมาะสมของอนุภาคนาโนในการส่งผ่านความร้อนของสารทำความเย็น	R113 และ คอปเปอร์ ออกไซด์
Hao Peng et al. (2009)	เพื่อศึกษาผลกระทบในอนุภาคนาโนต่อแรงดันเสียดทานที่มีค่าลดลงในสารทำความเย็นที่เป็นสารละลายนาโน	R113 และ คอปเปอร์ ออกไซด์
Visinee Trisaksri และ Somchai Wongwiset. (2009)	ศึกษาลักษณะเฉพาะของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพุดของของไหลนาโน	อนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์แขวนลอยในสารทำความเย็น R141b
Ho Seon Ahn et al. (2010)	การศึกษาฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของสารละลายนาโนภายใต้การพาความร้อนที่กำหนดขึ้นในช่องสี่เหลี่ยมเล็กๆ	อนุภาคนาโนของอะลูมิเนียม
Mounir Boudouh et al. (2010)	ศึกษาการส่งผ่านความร้อนขณะเดือดของสารละลายนาโนและการเกิดสภาวะการลดลงของประจุของน้ำที่ไหลในช่องทางกรไหลจำนวนมาก	ของไหลนาโน
Hao Peng et al. (2010)	ลักษณะการก่อตัวเพื่อส่งผ่านความร้อนขณะเดือดของสารทำความเย็น	R113 และ น้ำมันผสมอนุภาคนาโนของผงเพชร
Suriyawong และ Wongwiset. (2010)	ศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพุดของของไหลนาโน	อนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ผลมลงไปในน้ำ
Tae Il Kim et al. (2011)	ศึกษาค่าวิกฤตการถ่ายเทความร้อนขณะเดือดแบบพุด	อนุภาคนาโนอะลูมิเนียมผสมกับน้ำ

ตาราง 1 (ต่อ)

นักวิจัย	ลักษณะงานที่ศึกษา	สารทำงาน
Abdurrahim Bolukbasi และDogan Ciloglu. (2011)	ทำการศึกษาการจุ่มชุบกระบอกสูบในแนวตั้งในสารละลายนาโนซิลิกาภายใต้อุณหภูมิยิ่งยวดและบรรยากาศแรงดันควบคุม	สารละลายนาโนซิลิกาผสมน้ำ
Sourav Mitra et al. (2012)	ศึกษาการส่งผ่านทางความร้อนในขณะเดือด	สารละลายไททาเนียมไดออกไซด์ในน้ำ
Abedini et al. (2013)	ลำดับการเย็นตัวของสารละลายนาโนที่ไหลในขณะเดือด	สารละลายน้ำและอะลูมินา
Alejandro Mourgues et al. (2013)	ศึกษาสารละลายนาโนเพื่อให้ได้ CHF สูงๆจากการรวมตัวทางความร้อนขณะเดือดในสารละลายนาโน	ซิงค์ออกไซด์ผสมกับน้ำ DI
Mohammad Reza Raveshi et al. (2013)	ปรับปรุงเทคนิคกระบวนการการเดือดโดยประยุกต์ใช้สารละลายนาโน	อนุภาคอะลูมินาในน้ำ

จากการสำรวจเอกสารพบว่า การศึกษาลักษณะเฉพาะ เนื่องจากการเดือดแบบพูลของของไหลนาโน บนพื้นผิวให้ความร้อนที่มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกที่วางในแนวนอน ยังมีอยู่ไม่มากนัก และให้ผลขัดแย้งกันบ้าง โดยนักวิจัยบางท่านสรุปผลว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนนั้นแปรผันตามความเข้มข้นของของไหลนาโน ส่วนบางท่านสรุปผลว่าแปรผกผันกับความเข้มข้นของของไหลนาโน และเกือบทั้งหมดที่ทดลองทดลองที่ความดันบรรยากาศ ยกเว้นงานของ Visinee Trisaksri และ Somchai Wongwises ที่ศึกษาผลของความดันด้วย โดยที่นักวิจัยเหล่านั้นก็ไม่ได้ศึกษาผลของความดัน ที่คาดว่าจะมีความสัมพันธ์กับลักษณะของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพูล ด้วยเหตุนี้คณะผู้วิจัย จึงมีแนวคิดที่จะทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพูล เพื่อจะยืนยันผลการทดลองที่ขัดแย้งกัน ดังที่กล่าวไว้เบื้องต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ของไหลนาโนโดยใช้อนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์แขวนลอยในสารทำความเย็น R141b และ เอททิล

แอลกอฮอล์ โดยมีความเข้มข้นระหว่าง 0.01 ถึง 0.075 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พื้นผิวให้ความร้อนมีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกวางในแนวนอน โดยทำการทดลองที่ความดัน 50 ถึง 150 กิโลปาสคาล โดยจะศึกษาผลของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพุดที่ความดันต่ำ เปรียบเทียบกับผลของ Visinee Trisaksri และ Somchai Wongwiset



บทที่ 2

ทฤษฎี

1. กฎการถ่ายเทความร้อน (Principle of heat transfer)

การถ่ายเทความร้อนเป็นวิทยาศาสตร์แขนงหนึ่ง ที่ศึกษาการกำหนดการถ่ายเทพลังงานซึ่งจะพิจารณาค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกันในเนื้อของวัสดุ ในวิชา เทอร์โมไดนามิกส์ มักสอนว่าการถ่ายเทพลังงานนั้น กำหนดได้ด้วยความร้อน การถ่ายเทความร้อนในด้านวิทยาศาสตร์ จะไม่อธิบายว่า พลังงานความร้อน เกิดการถ่ายเทขึ้นได้อย่างไร แต่มักจะกำหนดอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนในเงื่อนไขที่เจาะจง ความจริงแล้ว อัตราการถ่ายเทความร้อน คือ สิ่งที่จะต้องนำมาพิจารณาวัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ ในจุดที่มีความแตกต่างกัน ระหว่างการถ่ายเทความร้อนกับเทอร์โมไดนามิกส์ ว่าเป็นอย่างไร วิชาเทอร์โมไดนามิกส์ กำหนดให้ระบบอยู่ในสภาวะสมดุลอาจนำไปใช้กำหนดปริมาณของพลังงานที่ต้องการ เพื่อใช้เปลี่ยนแปลงระบบ จากสภาวะที่สมดุลหนึ่งไปสู่สภาวะอื่น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้ ไม่ได้กำหนดว่ามีการเปลี่ยนแปลงเร็วแค่ไหน แต่จะพิจารณาระบบที่ไม่อยู่ในสภาวะสมดุล ในระหว่างกระบวนการที่เกิดขึ้นนั้น การถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มหลักการในกฎข้อที่หนึ่งและข้อที่สองของ เทอร์โมไดนามิกส์ โดยเพิ่มกฎของการทดลองซึ่งอาจใช้หาอัตราการถ่ายเทความร้อน ขณะเดียวกันวิทยาศาสตร์ทางด้าน เทอร์โมไดนามิกส์ นำเอากฎที่ได้จากการทดลอง มาใช้เป็นพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อนเป็นหลัก ซึ่งทำให้ง่ายต่อการนำไปใช้ในสถานการณ์ที่มีความแตกต่างกันได้ เมื่อใดที่จุดสองจุดมีอุณหภูมิแตกต่างกัน ก็จะมีพลังงานถ่ายเทจาก จุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำพลังงานที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยอิทธิพลของอุณหภูมิที่แตกต่างกันนี้มีชื่อเรียกว่าความร้อน ถึงแม้ว่าวิชาเทอร์โมไดนามิกส์จะเป็นวิชาที่ศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทของพลังงานก็ตามแต่ก็จะเป็นการศึกษาเฉพาะในกรณีที่ระบบความร้อนอยู่ในสภาวะที่สมดุลแล้วเท่านั้นกฎเกณฑ์ต่างๆในวิชาเทอร์โมไดนามิกส์จึงใช้เพียงแค่ทำนายพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงสถานะของระบบความร้อนที่อยู่ในสภาวะสมดุลย์จากสถานะหนึ่งไปยังอีกสถานะหนึ่งเท่านั้นไม่สามารถบอกให้ทราบว่าการเปลี่ยนแปลงนั้นเกิดขึ้นรวดเร็วเพียงใด ศาสตร์จากวิชาการถ่ายเทความร้อนนี้จะช่วยต่อเติมกฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์ด้วยการวิเคราะห์ที่สามารถนำมาใช้หาอัตราการถ่ายเทความร้อนได้

หลักการถ่ายเทความร้อน (Principle of heat transfer) ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อน โดยทั่วไปแล้ว จะมีรูปแบบการถ่ายเทความร้อนอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบคือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี ซึ่งรูปแบบของการถ่ายเทความร้อนทั้ง 3 รูปแบบนี้เป็นสิ่งสำคัญยิ่งสำหรับ

งานด้านการแลกเปลี่ยนความร้อน ทั้งวัสดุที่เป็นของแข็งและของไหล ซึ่งจะได้กล่าวถึง การถ่ายเทความร้อนทั้ง 3 รูปแบบดังต่อไปนี้

1.1 การนำความร้อน (Conduction heat transfer)

การนำความร้อน คือ การที่ความร้อนเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำภายในตัวกลางเดียวกัน หรือเป็นการเคลื่อนที่ระหว่างตัวกลางที่ติดกัน แต่มีอุณหภูมิต่างกัน ในการนำความร้อน ความร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านโมเลกุลของสาร โดยที่โมเลกุลไม่เคลื่อนที่ (อยู่นิ่ง) การนำความร้อนจะเกิดขึ้นได้ดีมากในตัวกลางที่เป็นของแข็ง การเคลื่อนที่ของความร้อนแบบการนำ เกิดขึ้นบ้างในของเหลวและก๊าซ แต่มักจะแยกไม่ออกจากการเคลื่อนที่ของความร้อนแบบการพา ความร้อนเคลื่อนที่ได้โดยการเคลื่อนที่ของ Electron จากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่อุณหภูมิที่ต่ำ นอกจากนี้ความร้อนยังเคลื่อนที่ไปได้โดยการสั่นสะเทือนของโมเลกุลภายในของแข็ง ในลักษณะของพลังงานการสั่นสะเทือน (Vibration energy) หลักการคำนวณเกี่ยวกับการนำความร้อน ถูกตั้งขึ้นโดย Joseph Fourier นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส Fourier ได้เสนอสมการที่ใช้สำหรับคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการนำในปี ค.ศ.1822 โดยอาศัยข้อมูลจากการทดลอง คือ

$$Q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2-1)$$

โดยที่ k คือ ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) มีหน่วยเป็น W/mK

A คือ พื้นที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของความร้อน

$\frac{dT}{dx}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับระยะทาง

สมการที่ (2-1) นี้เรียกว่า Fourier rate equation ซึ่งเป็นสมการที่ได้มาโดยอาศัยผลการทดลอง จากสมการนี้ เราสามารถหาสมการอื่น ๆ เพื่อใช้เป็นประโยชน์ในการคำนวณเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการนำได้

1.2 การพาความร้อน (Convection heat transfer)

การพา คือ การที่ความร้อนเคลื่อนที่ระหว่างผิวของของแข็งกับของไหล ของไหลจะทำหน้าที่เป็นตัวพาความร้อนมาให้ หรือพาความร้อนออกจากผิวของของแข็ง กลไกที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพานั้น เกิดจากผลรวมของการนำความร้อน การสะสมพลังงานและการเคลื่อนที่ของของไหล การพาความร้อน แบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ

1. การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection)
2. การพาความร้อนแบบอิสระ (Natural หรือ free convection)

การพาโดยการบังคับ (Forced convection) คือ การเคลื่อนที่ของความร้อน ระหว่างผิวของของแข็งกับของไหล ซึ่งของไหลถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของแข็ง โดยมีกลไกภายนอกเป็นตัวขับเคลื่อน เช่น พัดลม หรือเครื่องสูบน้ำ

การพาตามธรรมชาติ (Natural หรือ Free convection) คือ การเคลื่อนที่ของความร้อน ระหว่างผิวของแข็งกับผิวของไหล โดยที่ไม่มีกลไกภายนอกใด ๆ มาทำให้ของไหลเคลื่อนที่ แต่ของไหลที่อยู่ใกล้กับผิวของแข็งก็อาจเคลื่อนที่ได้โดยแรงลอยตัวของของไหลเอง แรงลอยตัวนี้เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหล เมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นของของไหล

การคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพานั้นเป็นสิ่งที่ยุ่งยาก เมื่อพิจารณาแล้ว มีหลายสิ่งหลายอย่างที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของความร้อนแบบการพา เป็นต้นว่า คุณสมบัติต่าง ๆ ของของไหล เช่น ความหนาแน่น ความร้อนจำเพาะ ความหนืด ความเร็วของของไหล ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของพื้นผิวของแข็งกับของไหล เป็นต้น Newton ได้ตัดปัญหาความยุ่งยากเหล่านี้ โดยเสนอสมการสำหรับคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพา ไว้ดังนี้

$$q = h(T_h - T_c) \quad (2-2)$$

โดยที่ h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Heat transfer coefficient) ซึ่งได้รวมเอาความยุ่งยากทั้งหมดไว้ ถ้าเรารู้วิธีการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนได้ เราก็คำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพาได้ สมการสำหรับคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนเป็นส่วนใหญ่มักจะเป็นสมการชนิด Empirical equation

h มีหน่วยเป็น W/m^2K ในระบบ SI ค่า q คืออัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ของของแข็งที่สัมผัสกับของไหล T_h คืออุณหภูมิที่ร้อนกว่า (อาจจะเป็นของไหลหรือของแข็งก็ได้) T_c คืออุณหภูมิต่ำกว่า (อาจจะเป็นของไหล หรือของแข็งก็ได้)

1.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation heat transfer)

ในการแผ่รังสี ความร้อนเคลื่อนที่ได้โดยมีต้องอาศัยตัวกลางดังเช่นในการนำและการพาในการแผ่รังสี ความร้อนจะเคลื่อนที่ได้ดีที่สุดในสุญญากาศ การที่จะอธิบายว่า ความร้อนเคลื่อนที่ได้ อย่งไรนั้น เป็นสิ่งซึ่งยากที่จะอธิบายให้เห็นถึงพฤติกรรมทางกายภาพได้ มีผู้ที่พยายามเสนอทฤษฎีเกี่ยวกับการแผ่รังสีหลายทฤษฎี แต่ก็ไม่ค่อยเป็นที่ยอมรับ ส่วนทฤษฎีซึ่งเป็นที่ยอมรับมากที่สุด

ขณะนี้ เป็นทฤษฎีที่นำเสนอโดย Einstein ซึ่งกล่าวว่า ในการแผ่รังสี ความร้อนเคลื่อนที่โดยอาศัยกลไกของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับวิศวกร วิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่โดยการแผ่รังสี อาจจะไม่มีความสำคัญเท่ากับที่จะรู้วิธีการคำนวณหาอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการแผ่รังสี ในปี 1884 Stefan และ Boltzmann ได้เสนอสมการในการคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนสูงสุดโดยการแผ่รังสีจากวัตถุที่มีพื้นที่ A และอุณหภูมิ T ดังนี้

$$Q = \sigma AT^4 \quad (2-3)$$

โดยที่ σ คือค่าคงที่ Stefan-Boltzmann ซึ่งมีค่า $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ ในระบบ SI สมการนี้สามารถที่จะนำไปใช้ในการคำนวณ เพื่อประโยชน์ในการออกแบบเครื่องมือต่าง ๆ

ในปัจจุบัน ปัญหาของการแผ่รังสีกำลังมีผู้สนใจมากเป็นพิเศษ เนื่องจากขาดแคลนพลังงานพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งแผ่จากดวงอาทิตย์มายังโลก เป็นแหล่งพลังงานที่อาจนำมาใช้ทดแทนพลังงานที่กำลังใช้อยู่ในปัจจุบันได้

วัตถุที่จะให้ค่าการแผ่รังสีสูงสุดตามสมการ (2-3) เรียกว่า วัตถุอุดมคติ (Ideal body) หรือ วัตถุดำ (Black body) วัตถุที่มีอยู่ทั่ว ๆ ไปจะแผ่รังสีได้น้อยกว่าวัตถุอุดมคติ การแผ่รังสีความร้อนจากวัตถุโดยทั่ว ๆ ไป ที่มีอุณหภูมิ T และพื้นที่ A จะเขียนได้ดังนี้

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

โดยที่ E คือคุณสมบัติทางการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ ซึ่งเรียกว่า ค่าการแผ่รังสี (Emissivity) ซึ่งเป็นปริมาณที่แสดงถึงประสิทธิภาพการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ เมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุที่สามารถแผ่รังสีความร้อนได้สูงสุด E จะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ

สมการ (2-4) ใช้สำหรับหาอัตราการแผ่รังสีความร้อนจากวัตถุที่มีพื้นที่ A การที่จะหาอัตราแลกเปลี่ยนความร้อน โดยการแผ่รังสีความร้อน ระหว่างวัตถุสองชิ้นที่มีอุณหภูมิต่างกัมนั้นยุ่งยากมาก เราจะพิจารณาการแลกเปลี่ยนความร้อน ระหว่างวัตถุเล็กที่มีพื้นที่ผิว A และค่าการแผ่รังสีความร้อน E กับวัตถุใหญ่ซึ่งครอบคลุมวัตถุเล็กอยู่ โดยที่วัตถุเล็กมีอุณหภูมิ T_h และวัตถุใหญ่มีอุณหภูมิ T_c เราจะเขียนอัตราแลกเปลี่ยนความร้อนสุทธิระหว่างวัตถุทั้งสองได้เป็น

$$Q_n = E\sigma A(T_h^4 - T_c^4) \quad (2-5)$$

เราอาจจะเขียนสมการสำหรับอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนสุทธิ

$$Q_n = E\sigma(T_h^2 + T_c^2)(T_h + T_c)A(T_h - T_c)$$

$$Q_n = h_r A(T_h - T_c) \quad (2-6)$$

โดยที่

$$h_r = E\sigma(T_h^2 + T_c^2)(T_h + T_c) \quad (2-7)$$

h_r คือ สัมประสิทธิ์ของการแผ่รังสีความร้อน (Radiation heat transfer coefficient)

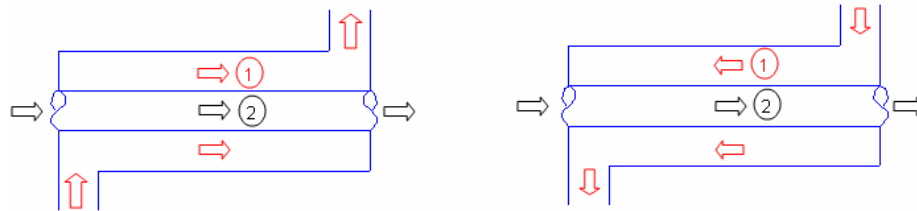
2. อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger)

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน คือ เครื่องมือที่ใช้สำหรับการถ่ายเทความร้อนจากของไหลชนิดหนึ่งไปยังของไหลอีกชนิดหนึ่ง โดยที่ของไหลไม่จำเป็นต้องผสมกัน เพื่อให้ของไหลนั้น ๆ มีอุณหภูมิสูงขึ้นหรือต่ำลง ตามลักษณะของงานที่ต้องการใช้ เช่น ถ้าต้องการให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อจะเอาผลที่ได้จากการแลกเปลี่ยนความร้อนไปใช้ในโรงงานทำความเย็น ก็จะต้องใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำให้ของไหลที่จะนำไปใช้นั้นมีอุณหภูมิลดลง เช่น โรงงานปรับอากาศที่มีขนาดใหญ่ ๆ แต่ถ้าต้องการให้ผลที่ได้จากการแลกเปลี่ยนความร้อนออกมาให้ของไหลมีอุณหภูมิสูงขึ้น ก็ใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ช่วยในการทำความร้อนให้กับของไหล เช่น โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า ที่ต้องใช้ไอน้ำเป็นตัวปั่นกังหัน และต้องมีการอุ่นน้ำเลี้ยงที่ใช้ในหม้อไอน้ำ ก็ต้องใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเข้ามาช่วยแทนที่จะต้องเอาน้ำเย็นมาต้ม ซึ่งต้องใช้พลังงาน และเวลามาก กว่าที่จะได้ไอน้ำที่มีอุณหภูมิตามที่ต้องการไปใช้งาน แต่ถ้ามีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนก็สามารถนำ น้ำ หรืออากาศที่อุณหภูมิต่ำ มาแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น แล้วจึงนำไปต้มในหม้อไอน้ำที่จะทำให้ประหยัดพลังงาน และเวลาได้อีกทางหนึ่ง ซึ่งหลักการการทำงานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนั้นจะขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของของไหล และชนิดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

2.1 ชนิดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Classification of heat exchanger)

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีหลายแบบ การจำแนกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนอาจทำได้โดยอาศัยทิศทางการเคลื่อนที่ของของไหลในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และลักษณะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นหลัก โดยทั่วไป จำแนกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็น 3 แบบ คือ

1.แบบท่อสองชั้น (Concentric Tube) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้ อาจอยู่ในลักษณะของท่อสองท่อสวมเข้าด้วยกัน ส่วนการไหลมีอยู่ 2 แบบคือ ไหลในทิศทางเดียวกันกับไหลสวนทาง ดังภาพประกอบ 1

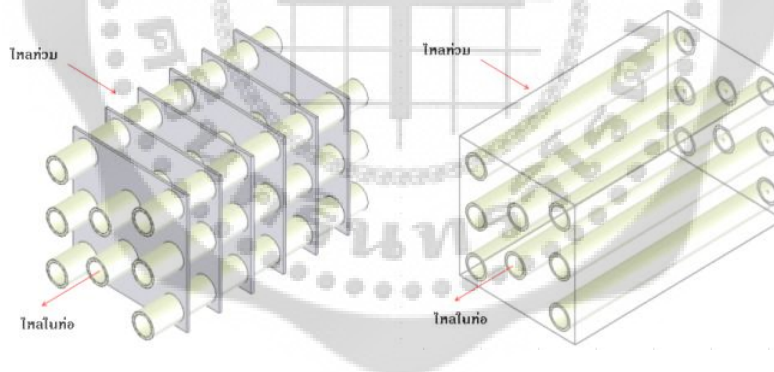


การไหลแบบขนานกัน

การไหลแบบสวนทางกัน

ภาพประกอบ 1 ลักษณะการไหลผ่านท่อสองชั้น

2. แบบทิศทางการไหลตั้งฉากกัน (Cross Flow) ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ของไหลจะมีทิศทางตั้งฉากกัน ลักษณะการไหลอาจไหลเดี่ยวเดียว หรือสองเดี่ยว หรือมากกว่านั้นก็ได้

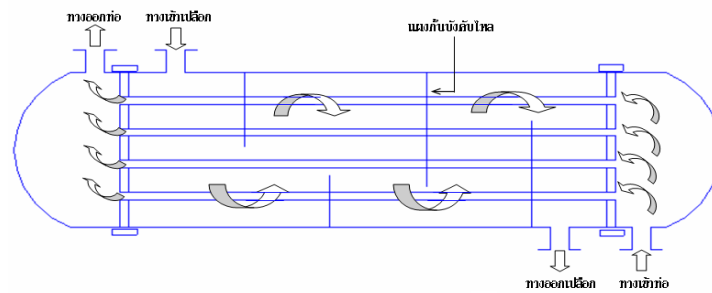


ติดครีบและของไหลไม่ผสมกัน

ไม่ติดครีบ ของไหลไหลท่วมกลุ่มท่อ

ภาพประกอบ 2 การไหลแบบ Cross flow

3. แบบเชลล์และท่อ (Shell and tube) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ ของไหลอย่างหนึ่งอยู่ในเชลล์ อีกอย่างหนึ่งอยู่ในท่อ ส่วนลักษณะการไหลจะไหลแบบสวนทางหรือขนานกัน อาจทั้งสองอย่างรวมกันในเครื่องเดียวหรืออาจจะไหลตั้งฉากกับท่ออีกด้วย

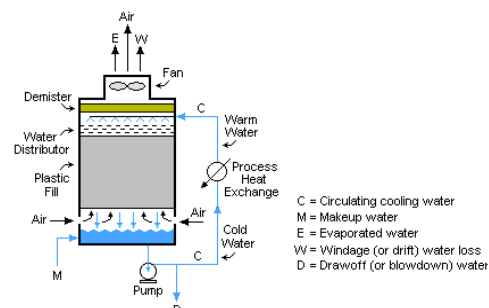


ภาพประกอบ 3 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Shell and tube

2.2 ชนิดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบ่งตามกระบวนการถ่ายเทความร้อน

โดยทั่วไปกระบวนการถ่ายเทความร้อนยังแบ่งแยกได้เป็น การสัมผัสโดยตรงและการสัมผัสโดยทางอ้อม การสัมผัสโดยตรงนั้นเกิดจากของไหลสองชนิดมาผสมกันเช่น แก๊สและของเหลว ตัวอย่างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ถ่ายเทความร้อนแบบสัมผัสกันโดยตรง เช่น Cooling towers หัวฉีดเครื่องควบแน่น และสเปรย์ชนิดต่างๆ

Cooling towers เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่นิยมใช้กันมาก โดยระบายความร้อนสู่บรรยากาศซึ่งจะเป็นแบบ Natural-convection หรือ Forced-convection ก็ได้ สำหรับกระบวนการ Natural-convection ดังแสดงในภาพประกอบ 4 น้ำถูกฉีดสวนทางกับกรไหลของอากาศ โดยที่อากาศจะเป็นตัวพาความร้อนออกไป น้ำที่หยดลงมาจะถูกทำให้เย็นโดยการพาความร้อน และอาจจะมีกระเหยด้วยบางส่วน ในขณะที่กระบวนการถ่ายเทความร้อนแบบ Force-convection น้ำจะถูกฉีดเข้าไปในกระแสการไหลของอากาศที่พัดลมเป็นตัวทำให้มีการไหลซึ่งจะติดไว้บนสุดหรือล่างสุดก็ได้ อากาศจะมีการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น

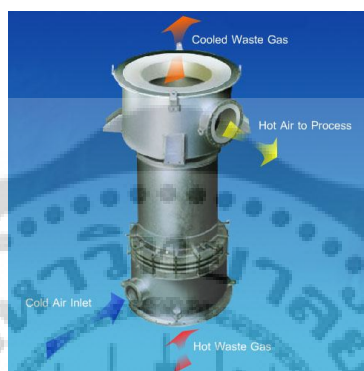


ภาพประกอบ 4 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนใน Cooling towers

ที่มา: <http://www.jsunat.com/cmstoday/index>.

ในลักษณะการถ่ายเทความร้อนโดยทางอ้อมจะพบได้ใน Automobile radiators สารทำงานที่ร้อนและเย็นจะถูกแยกโดยแผ่นกั้นซึ่งเรียกว่า Surface heat exchangers ซึ่งไม่มีการผสมกันระหว่างสารทำงานทั้งสอง

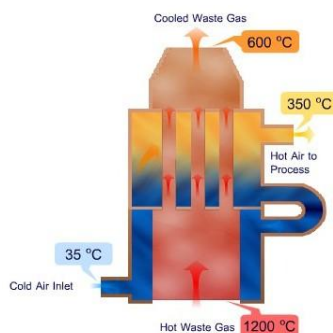
ตัวอย่างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน
อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน สแตค รีคูเปอร์เรเตอร์ (Stack recuperator)



ภาพประกอบ 5 แสดงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน สแตค รีคูเปอร์เรเตอร์

ที่มา: <http://www.jsunat.com/cmstoday/index>.

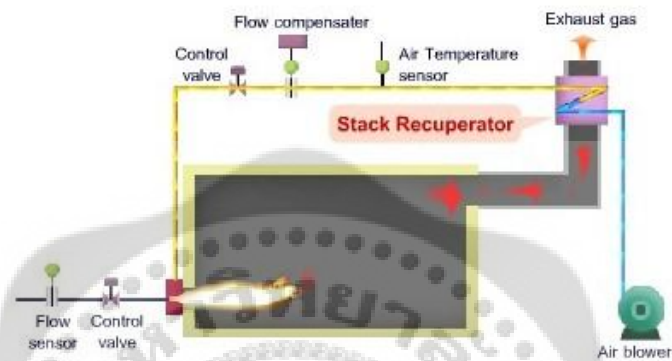
หลักการทำงานก๊าซไอเสียและอากาศเย็นจะไหลไปตามแนวท่อที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกันในช่วงแรกที่กำลังไอเสียมีอุณหภูมิสูงจะเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสี การถ่ายเทความร้อนในช่วงที่ 2 จะเป็นการถ่ายเทความร้อนโดยการพา ซึ่งก๊าซไอเสียจะถูกส่งผ่านท่อเล็กๆหลายท่อที่ขนานกัน เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อนทำให้อากาศเย็นไหลผ่านผิวท่อที่อุณหภูมิสูงขึ้น



ภาพประกอบ 6 การทำงานของ สแตค รีคูเปอร์เรเตอร์

ที่มา: <http://www.jsunat.com/cmstoday/index>.

การใช้งานและประโยชน์เหมาะสำหรับติดตั้งกับเตาเผาขนาดใหญ่ที่มีอุณหภูมิเผาสูง เพื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศก่อนการเผาไหม้ทำให้ประหยัดเชื้อเพลิงที่ใช้เผาไหม้ได้เหมาะกับอุตสาหกรรมเซรามิค อุตสาหกรรมโลหะ อุตสาหกรรมแก้ว



ภาพประกอบ 7 ตัวอย่างการติดตั้ง สเต็ค รีคูเปอรเรเตอร์กับเตาเชื้อเพลิง

ที่มา: <http://www.jsunat.com/cmstoday/index>.

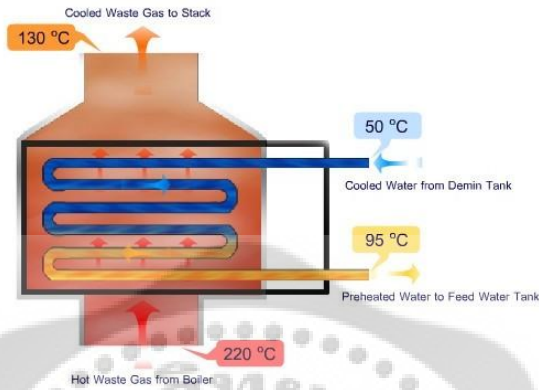
อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน อีโคโนไมเซอร์ Economiser



ภาพประกอบ 8 แสดงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนอีโคโนไมเซอร์

ที่มา: <http://www.jsunat.com/cmstoday/index>.

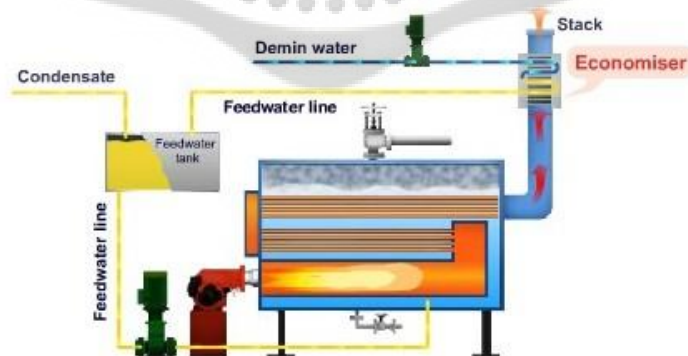
หลักการทำงานในตัว อีโคโนไมซ์เซอร์ ประกอบด้วยกลุ่มท่อจำนวนมากซึ่งท่อเหล่านี้มีคريبและวางอยู่ในช่องทางของก๊าซไอเสียโดยที่ของเหลวจะไหลผ่านท่อ โดยรับความร้อนจากก๊าซไอเสียทำให้อุณหภูมิของของเหลวสูงขึ้น



ภาพประกอบ 9 การทำงานของ อีโคโนไมซ์เซอร์

ที่มา: <http://www.jsunat.com/cmstoday/index>.

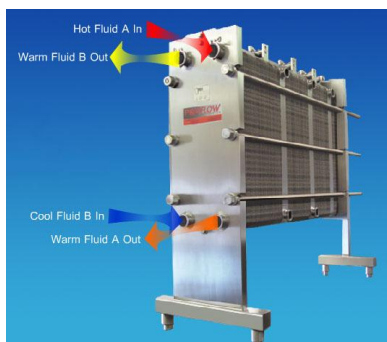
การใช้งานและประโยชน์การติดตั้ง อีโคโนไมซ์เซอร์ส่วนมากติดตั้งกับหม้อไอน้ำทำให้มีอุณหภูมิน้ำป้อนสูงขึ้นเพิ่มประสิทธิภาพหม้อไอน้ำได้ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ สำหรับหม้อไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงกำมะถันสูง อาจก่อให้เกิดกรดกำมะถันกัดกร่อนโลหะได้



ภาพประกอบ 10 ตัวอย่างการติดตั้ง อีโคโนไมซ์เซอร์กับหม้อไอน้ำ

ที่มา: <http://www.jsunat.com/cmstoday/index>.

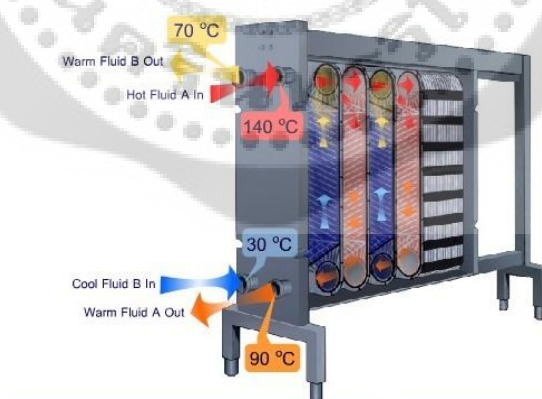
อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเพลต Plate heat exchanger



ภาพประกอบ 11 แสดงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเพลต

ที่มา: <http://www.jsunat.com/cmstoday/index>.

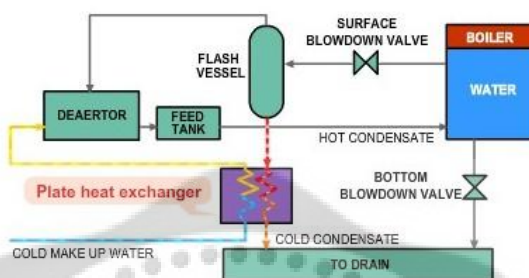
หลักการทำงานมีโครงสร้างซึ่งยึดแผ่นถ่ายเทความร้อน โดยที่แผ่นถ่ายเทความร้อนจะสร้างช่องสำหรับตัวกลาง 2 ชนิด ซึ่งจะมีฉนวนปิดช่องเหล่านี้ ของเหลวหรือก๊าซจะไหลในลักษณะสวนทางกันระหว่างแผ่นที่เรียงติดกันเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อน



ภาพประกอบ 12 การทำงานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเพลต

ที่มา: <http://www.jsunat.com/cmstoday/index>.

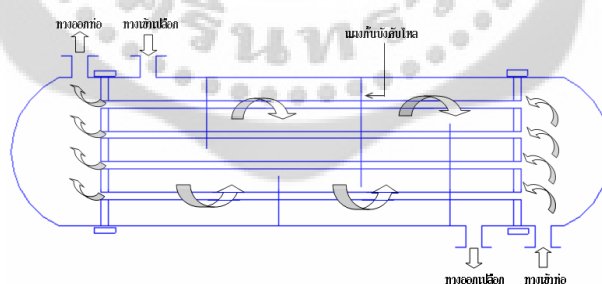
การใช้งานและประโยชน์การติดตั้ง อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเพลตในอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเคมี และอุตสาหกรรมสิ่งทอ มีขนาดกระทัดรัดและบำรุงรักษาง่าย ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนดีกว่าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ ไม่เหมาะกับของเหลวที่กัดกร่อน และของเหลวที่มีอนุภาคเจือปน การใช้งานถูกจำกัดที่ความดันสูง



ภาพประกอบ 13 ตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเพลตเพื่อนำความร้อนจากน้ำทิ้งมาใช้อุ่นน้ำป้อน

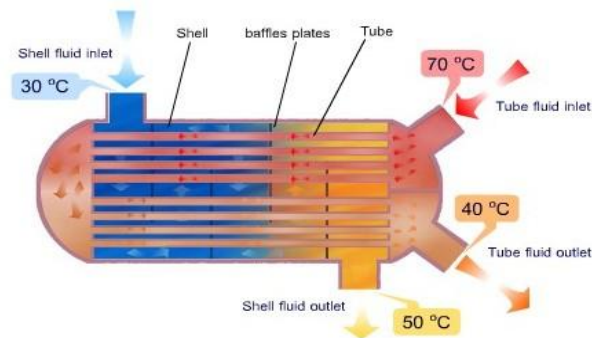
ที่มา: <http://www.jsunat.com/cmstoday/index>.

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ Shell and tube heat exchanger



ภาพประกอบ 14 แสดงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ

หลักการทำงานโครงสร้างประกอบด้วยชุดท่อขนาดเล็กรวมบรรจุอยู่ในเปลือกท่อขนาดใหญ่ ของเหลวหรือก๊าซจะไหลในลักษณะสวนทางกันเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อน



ภาพประกอบ 15 การทำงานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ

ที่มา: <http://www.jsunat.com/cmstoday/index>.

การใช้งานและประโยชน์การติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและเคมี ทนต่ออุณหภูมิและแรงดันสูงได้ ใช้แผ่นประเก็นน้อย ทำให้ลดการรั่วซึม มีระยะระหว่างพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนมากกว่า จึงลดโอกาสที่จะเกิดการอุดตัน แต่มีขนาดใหญ่ ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนน้อยกว่าแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ



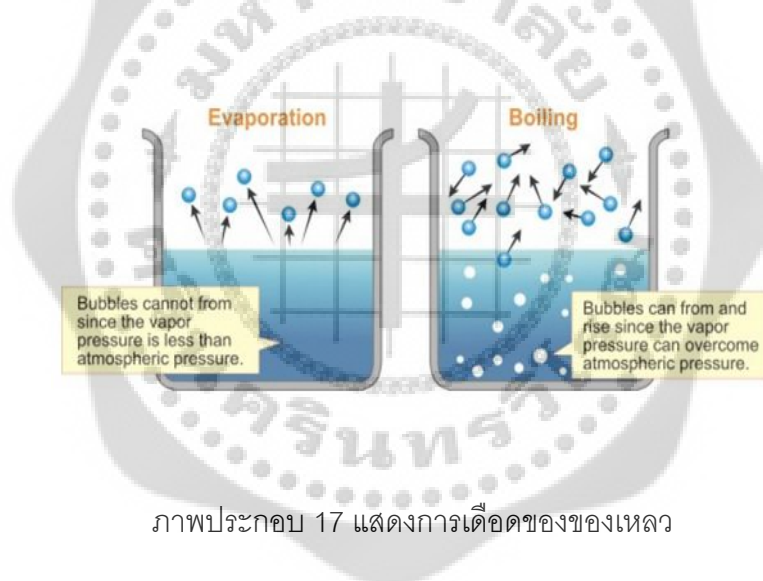
ภาพประกอบ 16 ตัวอย่างการติดตั้ง อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ เพื่อนำความร้อนจากน้ำเสียมาใช้อุ่นป้อนเครื่องทำน้ำร้อน

ที่มา: <http://www.jsunat.com/cmstoday/index>.

3. การเดือด (Boiling)

การเดือดเป็นการกลายเป็นไออย่างรวดเร็วของของเหลว ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อของเหลวได้รับความร้อนจนถึงจุดเดือด อุณหภูมิที่ความดันไอของของเหลวนั้นเท่ากับความดันแวดล้อมที่กดลงบนของเหลว ขณะที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือด ของเหลวจะระเหยขึ้นจากพื้นผิว แต่ที่จุดเดือด ฟองไอ (vapor bubble) มาจากของเหลวทั้งหมด ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นได้เมื่อความดันไอสูงพอที่จะชนะความดันบรรยากาศ เพื่อที่ฟองจะสามารถขยายได้ ดังนั้น ความแตกต่างระหว่างการกลายเป็นไอกับการเดือด คือ "กลไก" มากกว่าทางอุณหพลศาสตร์ จุดเดือดของของเหลวจะลดต่ำลงเมื่อความดันแวดล้อมลดลง ตัวอย่างเช่น โดยการใช้อุปกรณ์สุญญากาศหรือที่ระดับความสูง

การเดือด หมายถึง ปรากฏการณ์ ที่ของเหลวเปลี่ยนสถานะเป็นไอเมื่อได้รับความร้อน เกิดฟองอากาศ (air bubble) อย่างรวดเร็ว เนื่องจากของเหลวมีความดันไอ (vapour pressure) เท่ากับความดันบรรยากาศ ที่อยู่รอบๆ ในการทำให้อาหารสุก (cooking) หมายถึงการต้มอาหารในน้ำเดือด



ภาพประกอบ 17 แสดงการเดือดของของเหลว

ที่มา: <http://th.wikipedia.org>

3.1 การเดือดแบบพูล (Pool boiling)

การเดือดแบบพูลเป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนในกรณีที่มีการเปลี่ยนสถานะ จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าเมื่อเทียบกรณีที่ไม่มีการเปลี่ยนสถานะ โดยที่กลไกการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพูล (Pool boiling heat transfer) ถือเป็นกลไกการถ่ายเทความร้อนแบบหนึ่งที่เกิดขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และการพัฒนาการแลกเปลี่ยนความร้อนเนื่องจากการเดือด

แบบพุด นั้นสามารถพัฒนาได้ในสองส่วนด้วยกัน คือ 1) พัฒนาในส่วนของพื้นผิวให้ความร้อน และ 2) พัฒนาในส่วนของการทำงานที่ใช้ภายในระบบ

รูปแบบของการเดือด

เมื่อมีการเปลี่ยนสถานะเกิดขึ้นในสภาวะที่มีผิวสัมผัสระหว่างของแข็งและของเหลว จะเรียกว่าการเดือด โดยขบวนการจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ผิว T_s มีค่ามากกว่าอุณหภูมิอิ่มตัว T_{sat} ซึ่งสอดคล้องกับความดันของเหลวที่สภาวะต่างๆ ความร้อนจะถูกถ่ายเทจากผิวของแข็งไปยังของเหลว ซึ่งสามารถคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนได้จากสมการของ Newton's law cooling คือ

$$q''_s = h(T_s - T_{Sat}) = h \cdot \Delta T_e \quad (2-8)$$

โดยที่ $\Delta T = T_s - T_{Sat}$ คือ Excess temperature การเกิดกระบวนการเดือด สามารถอธิบายได้จาก การที่เริ่มเกิดฟองไอของไอของเหลวขนาดเล็กๆ ขึ้น ซึ่งจะมีขนาดใหญ่ขึ้นและจะหลุดออกจากผิวของวัตถุ การขยายขนาดของฟองไอของเหลวและการเคลื่อนที่จะขึ้นอยู่กับการเคลื่อนที่ของ Excess temperature ลักษณะของพื้นผิวและคุณสมบัติทางเทอร์โมกายภาพ (Thermo physical property) ของของเหลว เช่นแรงตึงผิว ในลักษณะเดียวกันการเคลื่อนที่ของฟองไอจะมีผลอย่างมากต่อการเคลื่อนที่ของของเหลวบริเวณใกล้ๆ กับผิวของวัตถุ ซึ่งจะมีผลอย่างมากต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ในขณะการเดือด การเดือดสามารถเกิดขึ้นภายใต้สภาวะต่างๆ ได้ เช่นในการเดือดแบบพุด (Pool boiling) ของเหลวจะหยุดนิ่งและการเคลื่อนที่ของของเหลวที่อยู่ใกล้ผิวจะเกิดการพาความร้อนที่อิสระ และถูกคลุกเคล้าโดยฟองไอที่ขยายใหญ่ขึ้นและถูกปลดปล่อยออกจากผิวของวัตถุ ในทางตรงกันข้าม การเดือดจากการพาความร้อนแบบบังคับ (Force convection boiling) นั้นการเคลื่อนที่ของของเหลว จะถูกทำให้ไหลโดยอาศัยแรงจากภายนอก

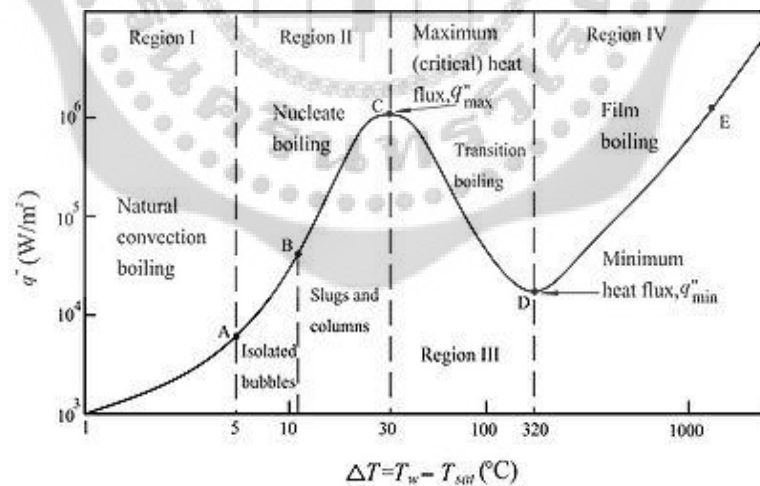
เส้นโค้งการเดือด(Boiling curve)

Nukiyama เป็นคนแรกที่ได้ทำการสังเกตและจำแนกลักษณะการเดือดของการเดือดแบบพุด โดยเครื่องมือชนิดหนึ่ง ซึ่งพล็อตความร้อนที่ให้กับน้ำที่ความดันอิ่มตัวสามารถทำได้โดยผ่านลวดนิโครมที่ติดตั้งในแนวราบ และสามารถหาได้จากการวัดการไหลของกระแสไฟฟ้า Potential drop อุณหภูมิของเส้นลวดสามารถหาได้จากพื้นฐานความรู้ทางความต้านไฟฟ้า ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ จะเห็นว่า เมื่อมีการให้กำลังเข้าไปพล็อตความร้อนจะเพิ่มขึ้น โดยตอนแรกจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ หลังจากนั้นก็จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อ Excess temperature สูงเกินพอ จากการสังเกตการ

เดือดของ Nukiyama พบว่าเริ่มมีฟองของเหลวเกิดขึ้นที่ผิววัตถุ ซึ่งจะไม่เกิดจนกว่าจะถึง $\Delta T_e = 5^\circ C$ และเมื่อเพิ่มกำลังต่อไปฟลักซ์ความร้อนจะเพิ่มขึ้นไปอย่างรวดเร็วจนกระทั่งถึงจุด Suddenly ซึ่งเป็นระดับที่มีค่ามากกว่า q''_{max} เล็กน้อย อุณหภูมิของเส้นลวดจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหลอมเหลว เส้นลวดจะเกิดการไหม้ อย่างไรก็ตาม Nukiyama ได้ทำการทดลองซ้ำ โดยใช้ลวดพลาสติกที่มีจุดหลอมเหลวสูง (2046K VS 1500K) โดยยังคงรักษาฟลักซ์ความร้อนที่มีค่าเหนือ q''_{max} ได้โดยไม่มีกรไหม้เกิดขึ้นและเมื่อลดกำลังลงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของ ΔT_e กับ q''_s เมื่อฟลักซ์ความร้อนลดลงไปถึงจุดต่ำสุด q''_{min} และเมื่อกำลังลดลงอย่างต่อเนื่อง จะเป็นสาเหตุให้ Excess temperature ลดลงทันที

รูปแบบของการเดือดแบบพูล

เราสามารถเข้าใจพื้นฐานกลไกทางกายภาพได้ โดยการทดสอบเพื่อสังเกตรูปแบบลักษณะของการเดือดแบบพูลซึ่งลักษณะแบบนี้สามารถแบ่งได้ตามเส้นโค้งการเดือด ดังภาพประกอบ 18 ซึ่งเป็นเส้นโค้งของการเดือดของน้ำที่ความดัน 1 atm ซึ่งจะมีลักษณะหรือพฤติกรรมคล้ายของเหลวอื่น จากสมการของ Newton's law cooling พบว่าค่า q''_s จะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) และ Excess temperature และลักษณะของการเดือดแบบต่างๆ สามารถแบ่งได้ตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงของ ΔT_e



ภาพประกอบ 18 แสดงเส้นโค้งการเดือดของน้ำที่ 1 atm

การเดือดแบบพาความร้อนอิสระ (Natural convection boiling)

จากภาพประกอบ 18 การเดือดแบบพาความร้อนอิสระจะเกิดขึ้นเมื่อ $\Delta T_e \leq \Delta T_{e,A}$ ขณะที่ $\Delta T_{e,A} \approx 5^\circ C$ ซึ่งในช่วงนี้จะมีไอของเหลวขนาดเล็กๆ ที่ผิวของวัตถุ อย่างไรก็ตามเมื่อ Excess

temperature มีค่าเพิ่มขึ้น ฟองไอของของเหลวจะเริ่มเกิดขึ้นแต่จะอยู่ต่ำกว่าที่จุด A (คือจุดเริ่มต้นการเดือดแบบนิวคลีเอท) จะวัดการเคลื่อนที่เบื้องต้นของของเหลวได้โดยพิจารณาจากการพาความร้อนแบบอิสระ ซึ่งอาจจะเป็นการไหลแบบลามินาร์หรือแบบเทอร์บูแลนต์

การเดือดแบบนิวคลีเอท (Nucleate boiling)

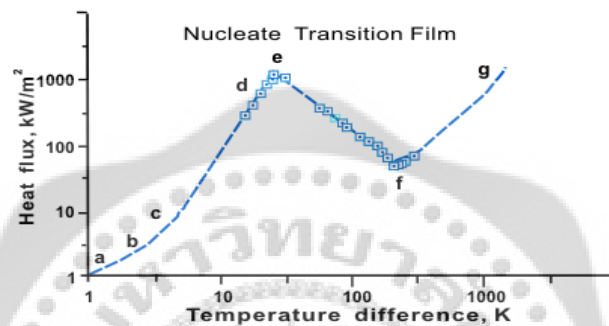
การเดือดแบบนิวคลีเอทจะเกิดในช่วง $\Delta T_{e,A} \leq \Delta T_e \leq \Delta T_{e,C}$ โดยที่ $\Delta T_{e,C} \approx 30^\circ C$ ซึ่งในช่วงดังกล่าว รูปแบบการเดือดสามารถแบ่งออกได้ 2 ลักษณะ คือบริเวณ A-B (Isolated bubbles) ฟองไอของเหลวจะแยกออกมาจากตำแหน่งที่เกิดและหลุดออกจากบริเวณผิว ในการแยกนี้จะทำให้ของเหลวมีการสัมผัสกับผิว ทำให้มีการเพิ่มของ h และ q''_s ในบริเวณนี้ การถ่ายเทความร้อนส่วนมากจะถ่ายเทโดยตรงจากพื้นผิวไปยังของเหลวโดยการเคลื่อนที่ที่ผิว แต่จะไม่ผ่านฟองไอของเหลวที่ลอยตัวขึ้นจากผิว อย่างไรก็ตามเมื่อ ΔT_e มีค่าเพิ่มขึ้นจนห่างจาก $\Delta T_{e,B}$ มากพอ จะมีตำแหน่งของการเกิดฟองไ้มากขึ้นและมีฟองของเหลวมากขึ้นด้วย ในบริเวณ B-C ซึ่งไอของเหลวจะหลุดออกไปในรูปแบบของ Jet หรือ Column ซึ่งต่อมาจะรวมตัวกันเป็นลำของฟองไอของเหลว การรบกวนกันระหว่างการควบแน่นของฟองไอของเหลวนี้จะมีผลยับยั้งการไหลของของเหลวที่จุด P เป็นจุดที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของเส้นโค้งการเดือด เมื่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงสุด ที่จุดนี้ค่า h จะเริ่มลดลงทำให้ค่า ΔT_e เพิ่มขึ้น และถึงแม้ว่า q''_s ซึ่งเป็นผลมาจาก h และ ΔT_e จะยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การเพิ่มขึ้นของ ΔT_e ถูกทำให้สมดุลโดยการลดลงของ h ที่ค่าฟลักซ์ความร้อนสูงสุด $q''_{s,C} = q''_{\max}$ จะถูกเรียกว่า ฟลักซ์ความร้อนวิกฤติ โดยปรกติ น้ำที่ความดันบรรยากาศจะมีค่าน้อยกว่า 1MW/m^2 ซึ่ง ณ จุดนี้ ฟองไอของเหลวจะเกิดขึ้นและยากที่จะกลายเป็นของเหลวที่ทำให้บริเวณผิวเปียกได้มีการออกแบบให้มีบริเวณการเดือดแบบนิวคลีเอทในอุปกรณ์ทางด้านวิศวกรรม เพราะว่าการถ่ายเทความร้อน และสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าสูง

การเดือดแบบทรานซิชัน (Transition boiling)

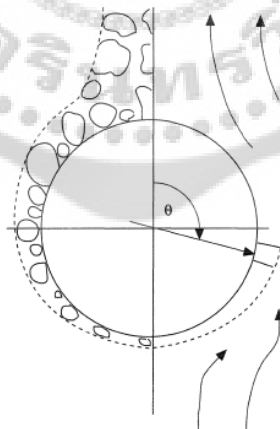
ในบริเวณที่ $\Delta T_{e,C} \leq \Delta T_e \leq \Delta T_{e,D}$ โดยที่ $\Delta T_{e,D} = 120^\circ C$ จะเรียกว่าการเดือดแบบทรานซิชัน หรือที่เรียกว่าการเดือดแบบฟิล์มที่ไม่เสถียร หรือ การเดือดแบบฟิล์มบางส่วน การเกิดฟองของของเหลวจะรวดเร็วมากและฟองไอจะรวมตัวกัน จนเกิดเป็นชั้นฟิล์มของไอของเหลวปกคลุมที่บริเวณผิว และที่ทุกตำแหน่งบนผิวนั้นจะเกิดการสลับกันระหว่างการเดือดแบบฟิล์มและแบบนิวคลีเอท แต่บางส่วนของพื้นผิวจะปกคลุมโดยฟิล์มที่เกิดขึ้นโดยการเพิ่มขึ้นของค่า ΔT_e เพราะว่าการนำความร้อนของไอของของเหลวจะน้อยกว่าของของเหลว ดังนั้นค่า h และ q''_s จะลดลงโดยการเพิ่มขึ้นของค่า ΔT_e

การเดือดแบบฟิล์ม (Film boiling)

การเดือดแบบนี้เกิดขึ้นเมื่อ $\Delta T_e \geq \Delta T_{e,D}$ ที่จุด D ของเส้นโค้งการเดือด หรือ Leidenforst point ; จุด Leidenforst ที่มีฟลักซ์ความร้อนต่ำสุด $q''_{s,D} = q''_{\min}$ และที่ผิวจะถูกล้อมรอบโดยไอของเหลว การถ่ายเทความร้อนจากผิวไปยังของเหลวจะเกิดขึ้นโดยการนำความร้อนผ่านชั้นฟิล์มไอน้ำไปยังของเหลว เมื่ออุณหภูมิผิวสูงขึ้น มีผลทำให้เทอมของการแผ่รังสีผ่านชั้นฟิล์มของไอน้ำไปยังของเหลวมีความสำคัญและค่าฟลักซ์ความร้อนจะเพิ่มขึ้นโดยการเพิ่มขึ้นของค่า ΔT_e



ภาพประกอบ 19 แสดงนิวคลีเอท ทรานซิชันฟิล์มของการเดือดแบบพุด



ภาพประกอบ 20 แสดงลักษณะการเกิดฟิล์มบอยลิ่งบนแท่งให้ความร้อน

ของเหลว (Liquid) เป็น สถานะ ของ ของไหล ซึ่ง ปริมาตร จะถูกจำกัดภายใต้สภาวะคงที่ของ อุณหภูมิ และ ความดัน และรูปร่างของมันจะถูกกำหนดโดยภาชนะที่บรรจุมันอยู่ ยิ่งไปกว่านั้น

ของเหลวยังออกแรงกดดันต่อภาชนะด้านข้างและบางสิ่งบางอย่างในตัวของตัวเอง ความกดดันนี้จะถูกส่งผ่านไปทุกทิศทาง

ถ้าของเหลวอยู่ในระเบียบของสนามแรงโน้มถ่วง ความดัน P ที่จุดใดๆ สามารถแสดงเป็นสูตรทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$P = \rho gz$$

ที่ซึ่ง ρ เป็น ความหนาแน่น ของของเหลว (ซึ่งกำหนดให้คงที่) และ z คือความลึก ณ จุดใต้พื้นผิวของเหลว นั้น สังเกตว่าในสูตรนี้กำหนดให้ความดันที่ผิวบนเท่ากับ 0 และไม่ต้องคำนึงถึงความตึงผิวของเหลวมีลักษณะเฉพาะของ แรงตึงผิว (Surface tension) และ แรงยกตัว (capillarity) โดยทั่วไปของเหลวจะขยายตัวเมื่อถูกความร้อนและหดตัวเมื่อถูกความเย็น วัตถุที่จมอยู่ในของเหลวจะมีปรากฏการณ์ที่เรียกว่า แรงลอยตัว (buoyancy)

ของเหลวเมื่อได้รับความร้อนจนถึง จุดเดือด จะเปลี่ยนสถานะเป็น ก๊าซ และเมื่อทำให้เย็นจนถึง จุดเยือกแข็งมันก็จะเปลี่ยนสถานะเป็น ของแข็ง โดยการกลั่นแยกส่วน (fractional distillation) ของเหลวจะถูกแยกจากกันและกันโดย การระเหย (vaporization) ที่ จุดเดือด ของของเหลวแต่ละชนิด การเกาะติด (Cohesion) ระหว่าง โมเลกุล ของของเหลวจะไม่เพียงพอที่จะป้องกันจาก การระเหย จากผิวของมันได้

3.2 การเดือดที่มีการไหล (Flow Boiling)

การเดือดที่มีการไหลคือรูปแบบการไหลของสารทำงานภายในท่อความร้อน

2.3.2.1 รูปแบบการไหลภายในท่อหน้าตัดวงกลมในแนวตั้ง จะมีรูปแบบการไหล ทั้งก๊าซและของเหลวไหลขึ้นด้านบน ซึ่งแบ่งได้ 5 รูปแบบดังนี้

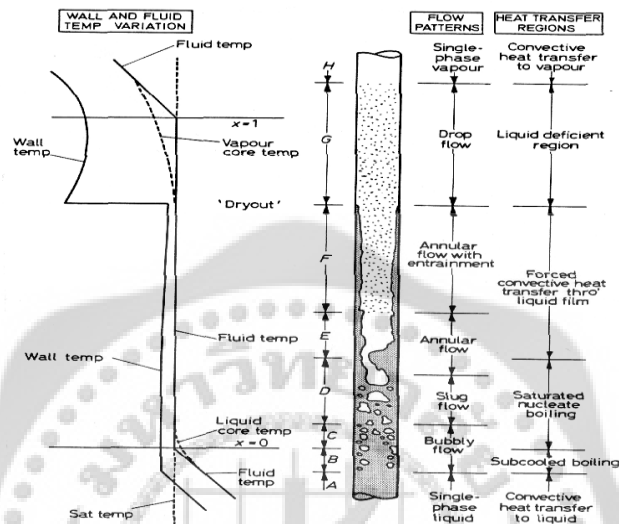
- การไหลเป็นฟอง (Bubble flow) รูปแบบการไหลที่มีทั้งฟองก๊าซเล็กๆกระจายเป็นจุดๆ ไหลปะปนกับของเหลว และสถานะของเหลวจะต่อเนื่อง

- การไหลแบบเป็นก้อน (Slug flow or Plug flow) รูปแบบการไหลที่มีฟองก๊าซที่มีรูปร่างคล้ายกระสุนไหลขึ้นสู่ด้านบนโดยมีของเหลวชั้นกลางพร้อมกับมีก๊าซปะปนบ้างโดยขณะเดียวกันมีฟิล์มของเหลวล้อมรอบฟองก๊าซเป็นรูปกระสุน

- การไหลเป็นโพรง (Churn flow) รูปแบบการไหลที่มีรูปร่างของฟองก๊าซบิดเบี้ยวไปเนื่องจากฟองก๊าซมีความเร็วในการไหลเพิ่มขึ้น โดยที่รูปแบบการไหลแบบนี้อาจจะไม่มีการสั่นของของเหลวให้เห็นเมื่อท่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยๆ

- การไหลแบบวงแหวน (Annular flow) รูปแบบการไหลที่มีการไหลของก๊าซอยู่ในแกนกลาง ท่อมีหยดของเหลวเล็กๆปะปนไปด้วย และขณะเดียวกันก็มีการไหลเป็นฟิล์มที่ผิวท่อ

- การไหลแบบวงแหวนแทรก (Wispy annular flow) รูปแบบการไหลที่มีการไหลขึ้นของก๊าซอยู่แกนกลางท่อ โดยที่หยดของเหลวได้ปะปนไปกับก๊าซนั้นได้รวมตัวกันเป็นริ้วปนกันไปด้วย และขณะเดียวกันก็มีการไหลของของเหลวเป็นฟิล์มที่ผิวท่อ ซึ่งการเกิดการรวมตัวของหยดของเหลวเล็กๆ เนื่องจากอัตราความเร็วของฟิล์มของเหลวเพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นของหยดของเหลวมากขึ้นด้วย



ภาพประกอบ 21 แสดง รูปแบบการไหลภายในท่อหน้าตัดวงกลมแนวตั้ง

ที่มา: http://lenr.qumbu.com/rossi_ecat_steam_v410

2.3.2.1 รูปแบบการไหลภายในท่อหน้าตัดวงกลมแนวระดับ จะแบ่งออกได้ 5 แบบดังนี้

-การไหลแบบแยกชั้น (Stratified flow) รูปแบบการไหลจะมีการแยกตัวออกจากกันเนื่องจากแรงดึงดูด โดยที่ก๊าซจะไหลไปตามด้านบนท่อ และของเหลวจะไหลไปที่แนวด้านล่างท่อ

-การไหลแบบแยกชั้นผิวคลื่น (Stratified wavy flow) รูปแบบการไหลที่มีความเร็วของก๊าซเพิ่มขึ้นจากรูปแบบการไหลแบบแยกชั้น ทำให้เกิดคลื่นที่ผิวรอยต่อระหว่างก๊าซกับของเหลว

-การไหลแบบฟองฟู้ง (Dispersed bubble flow) รูปแบบการไหลที่มีฟองก๊าซกระจายปะปนในของเหลวมีแนวโน้มของฟองก๊าซจะรวมกันที่ด้านบนของท่อ เมื่อระบบมีความเร็วในการไหลมากขึ้น ฟองก๊าซจะกระจายตัวได้สม่ำเสมอมากขึ้น

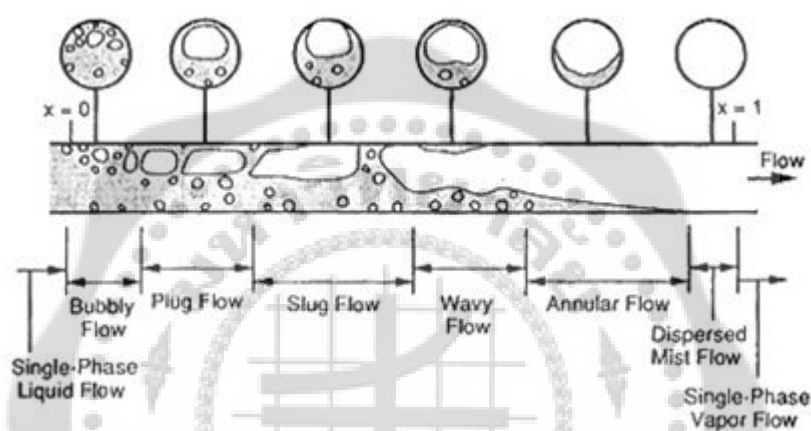
-การไหลแบบวงแหวนฟู้ง (Annular dispersed flow) รูปแบบการไหลก็คล้ายท่อที่อยู่แนวตั้งแต่ความหนาแน่นของฟิล์มจะสม่ำเสมอ โดยที่ด้านล่างของท่อความหนาแน่นของแผ่นฟิล์มก็จะมากกว่า

-การไหลแบบเป็นช่วง (Intermittent flow) รูปแบบการไหลนี้แบ่งออกได้ 3 รูปแบบด้วยกัน

ก. การไหลแบบเป็นก้อน(Plug flow) รูปแบบการไหลที่คล้ายกับท่อในแนวตั้งแต่จะแนบชิดกับผิวท่อด้านบน

ข. การไหลแบบเป็นห้วง(Slug flow) รูปแบบการไหลที่ของเหลวมีสภาพเป็นชั้นไปกั้นหน้าท่อนั้นจะมีฟองก๊าซปะปนไปด้วย

ค.การไหลแบบกึ่งห้วง (Semi-slug flow) เป็นรูปแบบการไหลที่มีฟองก๊าซเกิดขึ้นที่เคลื่อนโดยเคลื่อนไม่สามารถที่จะก่อตัวเป็นก้อนของเหลวไปปิดกั้นท่อหรือสัมผัสกับผนังท่อด้านบนได้



ภาพประกอบ 22 แสดง รูปแบบการไหลในท่อหน้าตัดกลมในแนวระดับ

ที่มา: http://lenr.qumbu.com/rossi_ecat_steam_v410

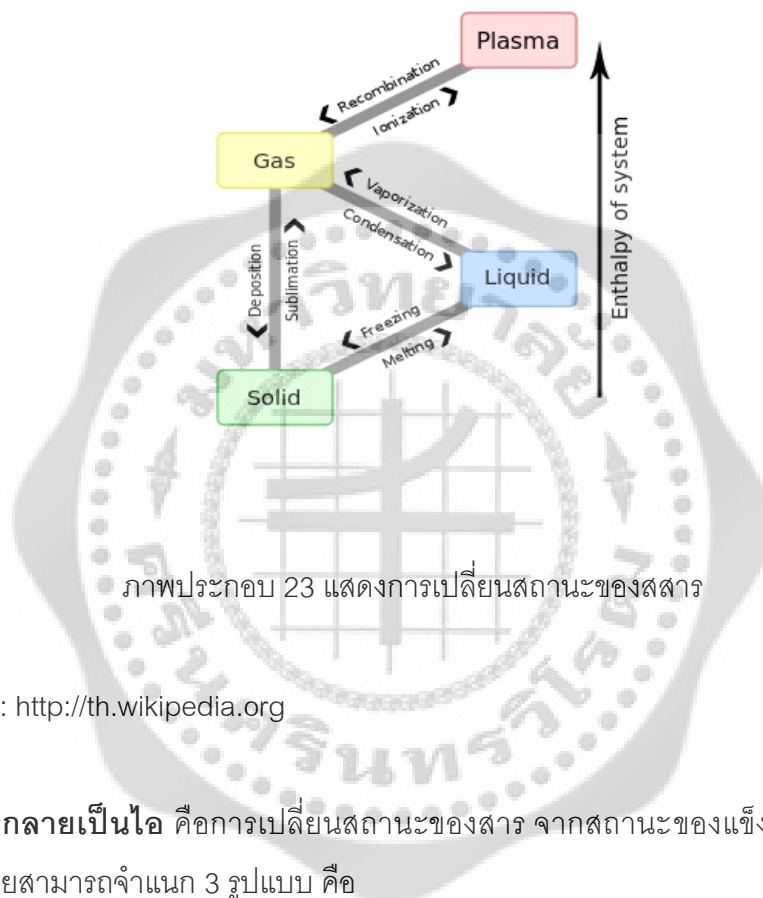
3.3 จุดเดือด

จุดเดือดของธาตุหรือสสารเป็นอุณหภูมิซึ่งความดันไอของของเหลวเท่ากับความดันของสิ่งแวดล้อมที่อยู่รอบของเหลวนั้นของเหลวในสิ่งแวดล้อมที่เป็นสุญญากาศมีจุดเดือดต่ำกว่าของเหลวที่ความดันบรรยากาศ ของเหลวในสิ่งแวดล้อมความดันสูงจะมีจุดเดือดสูงกว่าของเหลวที่ความดันบรรยากาศ จึงอาจกล่าวได้ว่า จุดเดือดของของเหลวมีได้หลากหลายขึ้นอยู่กับความดันของสิ่งแวดล้อม (ซึ่งมักแตกต่างกันไปตามความสูง) ในความดันเท่ากัน ของเหลวต่างชนิดกันย่อมเดือดที่อุณหภูมิต่างกัน

จุดเดือดปกติ (หรือเรียกว่า จุดเดือดบรรยากาศหรือจุดเดือดความดันบรรยากาศ) ของของเหลวเป็นกรณีพิเศษซึ่งความดันไอของของเหลวเท่ากับความดันบรรยากาศที่ระดับน้ำทะเล คือ 1 บรรยากาศ ที่อุณหภูมินั้น ความดันไอของของเหลวจะมากพอที่จะเอาชนะความดันบรรยากาศและให้

ฟองไอก่อตัวภายในความจุของเหลว จุดเดือดมาตรฐานปัจจุบัน (จนถึง ค.ศ. 1982) นิยามโดย IUPAC ว่าเป็นอุณหภูมิซึ่งเกิดการเดือดขึ้นภายใต้ความดัน 1 บาร์

3.4 การกลายเป็นไอ



ที่มา: <http://th.wikipedia.org>

การกลายเป็นไอ คือการเปลี่ยนสถานะของสาร จากสถานะของแข็งหรือของเหลว ไปสู่สถานะก๊าซ โดยสามารถจำแนก 3 รูปแบบ คือ

การระเหย คือการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปสู่ก๊าซในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือด ในความดันหนึ่ง โดยส่วนมากการระเหยมักเกิดบริเวณผิวน้ำของของเหลว

การเดือด คือการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปสู่ก๊าซในสภาวะที่อุณหภูมิที่เทียบเท่าหรือมากกว่าจุดเดือด โดยสิ่งที่แตกต่างจากการระเหยคือ การเดือดจะเกิดขึ้นทุกส่วนของของเหลว

การระเหิด คือการเปลี่ยนสถานะของของแข็งไปเป็นก๊าซโดยไม่ผ่านสถานะของเหลว

ความดันไอ คือ ความดัน (ถ้าไอถูกผสมด้วยก๊าซอื่น เรียก ความดันย่อย) ของไอ (ไอนี้เกิดจากโมเลกุลหรืออะตอมหนีจากของเหลวหรือของแข็ง) ที่อุณหภูมิกำหนดสำหรับสารเฉพาะ มีความดันที่ซึ่งไอของสารนั้นอยู่ในจุด สมดุล กับสถานะที่เป็น ของเหลว หรือ ของแข็ง ของมัน นี่คือ ความดันไอ

สมดุล (Equilibrium vapor pressure) หรือ ความดันไออิ่มตัว (Saturation vapor pressure) ของสารที่อุณหภูมิหนึ่ง คำว่าความดันไอบ่อยครั้งเข้าใจว่าเป็น ความดันไออิ่มตัว สารที่มีความดันไอสูงที่อุณหภูมิปกติเราเรียกภาวการณ์นี้ว่าระเหย (volatile)

ความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอของแข็งและของเหลว

เป็นที่น่าสังเกตว่าความดันไอของสารที่เป็นของเหลวปกติจะมีความแตกต่างจากความดันไอของสารเดียวกันที่อยู่ในสถานะของแข็ง ถ้าอุณหภูมิของความดันไอของของเหลวสูงกว่าของของแข็งของเหลวจะระเหยกลายเป็นไอแต่ไอจะควบแน่นเป็นของแข็ง นั่นคือของเหลวถูกทำให้เยือกแข็ง (freezing) ถ้าอุณหภูมิของความดันไอของของเหลวต่ำกว่าของของแข็ง ของแข็งจะระเหยกลายเป็นไอแต่ไอจะควบแน่นเป็นของเหลว นั่นคือของแข็งถูกทำให้หลอมเหลว ที่อุณหภูมิที่เท่ากัน ของสองความดันไอที่มีความสมดุลระหว่าง สถานะ ของเหลวและของแข็ง ที่อุณหภูมินี้จะเป็นจุดหลอมเหลว (melting point)

ความดันไอน้ำ

ที่อุณหภูมิ น้ำ เดือด ความดันประมาณ 100 kPa สามารถคำนวณได้โดยสูตรดังนี้

$$T_v = 100 + 0.0002772 \times (P - 101000) - 1.24 \times 10^{-9} \times (P - 101000)^2$$

ที่ซึ่งอุณหภูมิเป็นองศา Celsius และความดัน P เป็น ปาสคาล ค่าความดันไอสามารถจะคำนวณจากค่า P จากสมการ. Raoult's law ใช้หาค่าความดันไอของของเหลวผสม

ความดันอากาศหรือความดันบรรยากาศ

เป็นความกดดันอยู่จุดใดหนึ่งของชั้นบรรยากาศของโลก โดยทั่วไปความกดอากาศจะประมาณเท่ากับความกดดันที่เกิดขึ้นย้อนน้ำหนัของอากาศอยู่บนจุดนั้น ๆ ซึ่งหมายความว่า จุดที่มีความกดอากาศต่ำจะมีอากาศที่มีมวลสารต่ำกว่าจะอยู่ข้างบนมัน ด้วยเหตุผลแบบเดียวกัน ความกดอากาศจะต่ำลงเมื่อระดับความสูงเพิ่มขึ้น ความกดอากาศที่ความสูงระดับน้ำทะเล จะเท่ากับ 1 atm (หนึ่งหน่วยบรรยากาศ) หรือ 101.325 kPa (กิโลปาสคาล) หรือ 760 mmHg (มิลลิเมตรปรอท)

ของไหล

ของไหลใช้นิยามสสารที่เปลี่ยนรูปร่างหรือไหลด้วยความเค้นเฉือน ของเหลวและแก๊สต่างก็เป็นรูปแบบหนึ่งของของไหล ของไหลเป็นสถานะหนึ่งของสสาร โดยทั่วไปในภาษาอังกฤษ คำว่า Fluid

หรือของไหลมักหมายถึงของเหลวหรือ liquid ด้วย ของไหลบางอย่างอาจมีความเหนียวสูงมาก ทำให้แยกแยะกับของแข็งได้ยาก หรือในโลหะบางชนิดก็อาจมีความแข็งต่ำมาก

4. ของไหลนาโน (Nanofluids)

ของไหลนาโน (Nanofluids) คือ นวัตกรรมใหม่ของของไหลที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อน ทำได้โดยอาศัยการใส่อนุภาคของของแข็งที่มีขนาดต่ำกว่า 50 นาโนเมตร (เล็กกว่าเส้นผมของคนประมาณ 1000 เท่า) ลงไปในของไหลพื้นฐาน (Base fluid) อนุภาคที่ใส่ลงไปนี้จะลอยตัวอยู่ได้ในของไหลโดยอาศัยปรากฏการณ์ที่เรียกว่า "Brownian motion" ของไหลนาโนถูกพัฒนาขึ้นมาพร้อมกับความก้าวหน้าทางด้านนาโนเทคโนโลยี โดยที่ Steve Choi (1995) แห่ง Argonne National Laboratory ที่สหรัฐอเมริกา เป็นคนแรกที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโน เป็นที่ทราบกันดีว่าอนุภาคของของแข็งที่ใส่ลงไปนั้นมีความสามารถในการนำความร้อนที่สูงกว่าของไหลทั่วไปหลายเท่า ตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิห้องนั้นทองแดงมีความสามารถในการนำความร้อนสูงกว่าน้ำประมาณ 700 เท่า และมากกว่าน้ำมันเครื่องยนต์ประมาณ 3000 เท่า ดังนั้นของไหลนาโนได้รับความคาดหวังว่าจะเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนและนำมาใช้แทนของไหลธรรมดาทั่วไป

$$\text{Cooper's Equation } h_b = A(P_r)^{(0.12-0.2\log_{10} \varepsilon)} (-\log_{10}(P_r))^{-0.55} M^{-0.5} q^{0.67}$$

h_b = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการเดือด kW/m^2

P_r = ค่าความดันลด kPa

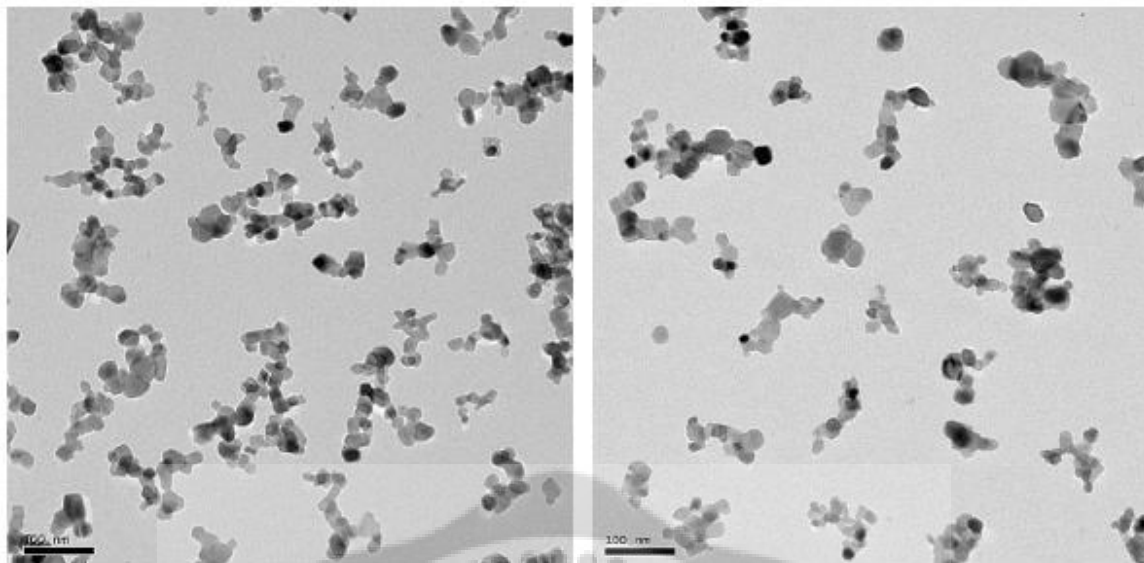
P_c = ค่าความดันวิกฤติ kPa

P = ความดันในระบบ kPa

ε = ค่าความราบเรียบของพื้นผิว μm

q = ฮีตฟลักซ์ kW/m^2

M = มวลโมเลกุล g/mol



(a) หลังจากการผสมเสร็จใหม่ๆ

(b) หลังจากการผสม 3 ชั่วโมง

ภาพประกอบ 24 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิชชันของอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใส่ลงในน้ำ

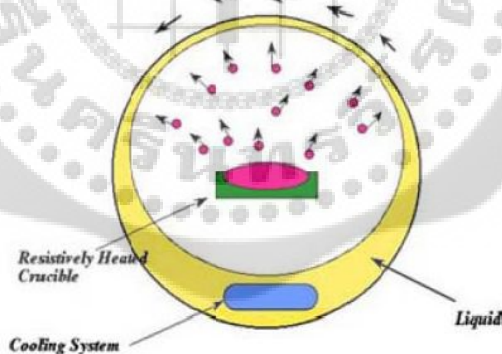
ที่มา: <http://www.chumphon.kmitl.ac.th/me>)

จากแนวคิดที่ว่าของแข็งมีค่าความสามารถในการนำความร้อนได้ดีกว่าของเหลว นักวิจัยจึงได้นำของแข็งที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรใส่ลงไปในห้องทำงานพื้นฐาน เพื่อเพิ่มค่าการนำความร้อนของของไหลทำงาน จากงานวิจัยในวารสารนานาชาติได้มีผู้สนใจการหาค่าการนำความร้อนของของไหลนาโน โดยที่ในปี ค.ศ. 2001 Eastman และคณะ ได้ทดลองด้วยวิธี Transient hot-wire เพื่อหาค่าการนำความร้อนของอนุภาคนาโนของทองแดงที่ใส่ลงในเอทิลีนไกลคอล ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.3 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และได้พบว่าค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้น 40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับของไหลพื้นฐาน ในขณะที่ ในปี ค.ศ. 2005 Murshed และคณะ ได้ทดลองหาค่าการนำความร้อนของอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใส่ลงในน้ำ มีความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จากผลการทดลองพบว่า ค่าการนำความร้อนของของไหลนาโนเพิ่มขึ้น 33 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับของไหลพื้นฐาน และเมื่อไม่นานมานี้ ในปี ค.ศ. 2009 Duangthongsuk และ Wongwises ได้ทำการศึกษาเชิงทดลองหาค่าการนำความร้อนของอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใส่ลงในน้ำ โดยมีความ

เข้มข้น 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จากผลการทดลองพบ ว่าค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้น 7 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับของไหลพื้นฐานผลงานวิจัยของการหาค่าการนำความร้อนที่ได้กล่าวมาในข้างต้นนี้แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของค่าการนำความร้อนของของไหลทำงานหลังจากใส่อนุภาคนาโนลงไป

4.1 การผลิต Nanofluids

วิธีการที่ใช้ในการผลิตอนุภาคของแข็งที่ใช้สำหรับของไหลนาโนนั้น มีอยู่ด้วยกัน 2 วิธีคือ One-step method และ Two-step method ตามลำดับ สำหรับกระบวนการสำหรับ One-step method นั้นทำได้โดยการให้ความร้อนกับอนุภาคของโลหะภายในห้องสุญญากาศ (Vacuum chamber) เพื่อให้โลหะนั้นกลายเป็นไอ โดยที่ห้องสุญญากาศนั้นจะมีของไหลสำหรับการหล่อเย็นอยู่บริเวณผนังด้านในของห้อง และเมื่อไอของโลหะมาสัมผัสกับของไหลหล่อเย็นนี้ก็จะเกิดการควบแน่น ก่อให้เกิดเป็นอนุภาคทรงกลมกระจายอยู่ในของไหลหล่อเย็น วิธีการนี้จะทำให้ได้อนุภาคขนาดเล็ก ไม่มีการเกาะกันของอนุภาค กระจายตัวได้ดี สำหรับวิธีที่สองคือ Two-step method นั้นทำได้โดยใช้การควบแน่นของแก๊สเฉื่อย และนำไปกระจายลงในของไหลอีกทีหนึ่งวิธีการนี้เหมาะสำหรับผลิตออกไซด์ของอนุภาคนาโน นอกจากนั้นยังสามารถทำได้ง่าย ราคาไม่แพง แต่มีการเกาะกันของอนุภาคเล็กน้อย เมื่อเทียบกับ One-step method



ภาพประกอบ 25 แสดงการผลิตของไหลนาโนโดยใช้ One-step method

ที่มา: <http://www.chumphon.kmitl.ac.th/me>

4.2 การประยุกต์ใช้ Nanofluids

ของไหลนาโนนี้สามารถที่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้อย่างกว้างขวางดังต่อไปนี้

อุตสาหกรรมกรรมการขนส่ง (Transportation) ของไหลนาโนสามารถนำไปใช้แทนของไหลที่ใช้ในการหล่อเย็น (ปกติคือ เอลิซีน ไกคอลล์ และน้ำ) น้ำมันเครื่อง ของไหลในระบบส่งกำลังอัตโนมัติ และของไหลสังเคราะห์อื่น ๆ ในยานพาหนะต่าง ๆ ได้ เพื่อเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของไหลต่าง ๆ เหล่านี้ ของไหลนาโนสามารถที่จะทำให้อุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น เครื่องยนต์ บั๊ม หม้อน้ำ มีขนาดเล็กและมีน้ำหนักเบาลงได้ทำให้ใช้เชื้อเพลิงในการไหลลดลง

อุตสาหกรรมเครื่องจักรขนาดเล็ก (Micro machines) ในปี 1960 นั้นวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนั้นมุ่งเน้นในการทำเครื่องจักรให้มีขนาดเล็กกะทัดรัด โดยเฉพาะระบบ MEMS (Micro-electromechanical systems) โดยที่ระบบนี้นั้นจะมีความร้อนเกิดขึ้นสูงมากในขณะที่ใช้งาน ซึ่งของไหลปกตินั้นไม่สามารถระบายความร้อนได้ทันถึงแม้ว่าจะใส่อนุภาคของของแข็งลงไปเพื่อเพิ่มความสามารถในการนำความร้อนแล้วก็ตามแต่ก็ไม่สามารถใช้งานได้เนื่องจากอนุภาคที่ใส่ลงไปในตอนนั้นมีขนาดใหญ่เกินไปและไม่สามารถไหลในช่องทางการหล่อเย็นของระบบ MEMS ที่แคบ ๆ ได้เนื่องจากเกิดการอุดตันของช่องทางการไหล ดังนั้นของไหลนาโนเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นของไหลในการหล่อเย็นของระบบนี้ได้

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องมือวัด (Electronics and instrumentation) ของไหลนาโนสามารถที่จะนำมาใช้ในเพิ่มสมรรถนะในการหล่อเย็นของระบบอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องมือวัดได้อย่างดี โดยไหลอย่างราบเรียบและปราศจากการอุดตันในช่องทางการไหล

อุตสาหกรรมเกี่ยวกับ HVAC ของไหลนาโนสามารถเพิ่มขีดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของอุตสาหกรรม HVAC และระบบการทำความเย็นได้เป็นอย่างดี ด้วยเทคโนโลยีของของไหลนาโนทำให้ระบบเหล่านี้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและมีค่าใช้จ่ายที่น้อยลง

อุตสาหกรรมโลหะ (Metalworking) ของไหลนาโนสามารถที่จะใช้เป็นของไหลสำหรับหล่อเย็น ในกระบวนการการกัดและเจียโลหะได้

อุตสาหกรรมจัดหาพลังงานและการผลิต (Energy supply and production) ในระบบพลังงานแสงอาทิตย์นั้นสามารถที่จะใช้ข้อดีของของไหลนาโนในการเพิ่มขีดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar collector) ไปยังถังเก็บ (Storage tank)

4.3 ศักยภาพ และทิศทางในอนาคตของ Nanofluids

ข้อได้เปรียบของไหลนาโนเมื่อเปรียบเทียบกับของไหลปกติหรือของไหลที่ใส่อนุภาคขนาดไมโครเมตรลงไปนั้นพบว่า ของไหลนาโนสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้มากกว่าหลายเท่า เช่น ถ้าของไหลนาโนมีค่าความสามารถในการนำความร้อนสูงกว่าของไหลทั่วไป 3 เท่าจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 2 เท่า โดยไม่ทำให้ กำลังงานปั๊ม (Pumping power) เพิ่ม

สูงขึ้นซึ่งโดยปกติทั่วไปนั้นถ้าต้องการให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น 2 เท่า จะต้องเพิ่มกำลังงานปั๊มให้สูงขึ้นประมาณ 10 เท่า ดังนั้นจะเห็นได้ว่าของไหลนาโนนั้นช่วยลดกำลังงานปั๊มได้มาก และยังทำให้อุปกรณ์ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นมีขนาดและน้ำหนักลดลงด้วย ขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับของไหลที่ใส่อนุภาคขนาดไมโครเมตรลงไปนั้น พบว่าของไหลแบบนี้ไม่สามารถนำไปใช้งานในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในงานจริงได้ เนื่องจากก่อให้เกิดปัญหาการอุดตันในช่องทางการไหล ทำให้เกิดการสึกหรอ เกิดการนอนกันหรือตกตะกอนได้ง่ายและที่สำคัญคือเพิ่มกำลังงานปั๊มด้วย

ในขณะที่งานวิจัยและพัฒนาการของของไหลนาโนถูกพัฒนาขึ้นมาพร้อมกับความก้าวหน้าทางด้านวิทยาศาสตร์ทางความร้อน (Thermal science) และการใช้งานของนาโนเทคโนโลยี สิ่งที่สำคัญ คือการทำให้ของไหลนาโนนั้นเหมาะสมกับความต้องการในการใช้งานทางด้านต่าง ๆ เช่น ปรับปรุงขนาดของอนุภาคนาโนชนิดของของไหลนาโน เป็นต้น เทคโนโลยีของของไหลนาโนนี้สามารถนำมาใช้ให้เป็นประโยชน์ในทางปฏิบัติได้เช่น ใช้ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีช่องทางการไหลขนาดเล็ก (Micro channel heat exchangers) ปั๊มขนาดเล็ก (Micro pumps) และ ระบบการจัดการความร้อน (Thermal management system) ที่ใช้ในยานพาหนะสมัยใหม่ รถบรรทุกขนาดใหญ่ หรือ เครื่องจักรกลขนาดใหญ่ได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนได้ด้วย เช่น วิชาการชีวเวช (Biomedical) กล่าวคือใส่อนุภาคนาโนของแม่เหล็กลงไปในการเลือดและนำอนุภาคเหล่านี้ไปสู่เซลล์มะเร็ง จากนั้นใช้เลเซอร์หรือสนามแม่เหล็กเพื่อถ่ายเทพลังงานไปสู่อนุภาคเหล่านั้นเพื่อทำลายเซลล์มะเร็ง โดยไม่ทำให้เลือดร้อนหรือทำลายเนื้อเยื่อบริเวณใกล้เคียง ซึ่งจะเห็นได้ว่าของไหลนาโนนั้นสามารถที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่หลากหลายได้

4.4 ค่าการนำความร้อนของของไหลนาโน (Nanofluid)

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

$$K_{eff} = \frac{k_p \alpha_p (dT/dx)_p + k_f \alpha_f (dT/dx)_f}{\alpha_p (dT/dx)_p + \alpha_f (dT/dx)_f} \quad (2-9)$$

Hamilton และ Crosser เสนอแบบจำลองของของผสมระหว่างของเหลวและของแข็ง ซึ่งมีอัตราส่วนของค่าการนำความร้อน ของทั้งสองสมการที่มากกว่า 100

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = \frac{k_p + (n-1)k_f - (n-1)\alpha(k_f - k_p)}{k_p + (n-1)k_f + \alpha(k_f - k_p)} \quad (2-10)$$

โดยที่

k_p คือค่าการนำความร้อนของอนุภาค, k_f คือค่าการนำความร้อนของของไหล, α คือสัดส่วนปริมาตรของอนุภาค, n คือตัวประกอบรูปร่างที่เกิดจากการทดลองกำหนดให้เป็น n

ค่าความกลม ซึ่งอธิบายได้ว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวของทรงกลม ซึ่งมีปริมาตรเท่ากับอนุภาคนั้น เทียบกับพื้นที่ผิวกลมจริงๆ ของอนุภาค

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

อีกทางเลือกหนึ่งในการคำนวณหาประสิทธิภาพค่าการนำความร้อนของ Solid-Liquid mixture ได้ถูกแสดงโดย Wasp

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

สัดส่วนปริมาตร α ของอนุภาคสามารถหาได้จาก

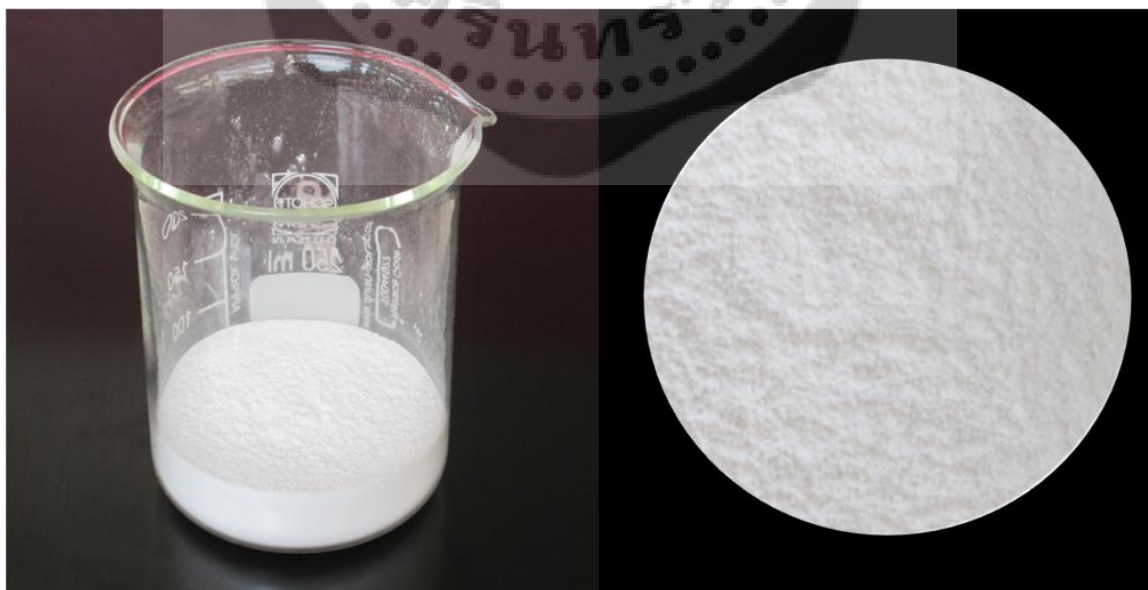
$$\alpha = \frac{V_p}{V_f + V_p} = m \frac{\pi}{6} \overline{d_p^3} \quad (2-12)$$

โดย m คือปริมาณของอนุภาคต่อหน่วยปริมาตร, d_p คือเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของอนุภาค

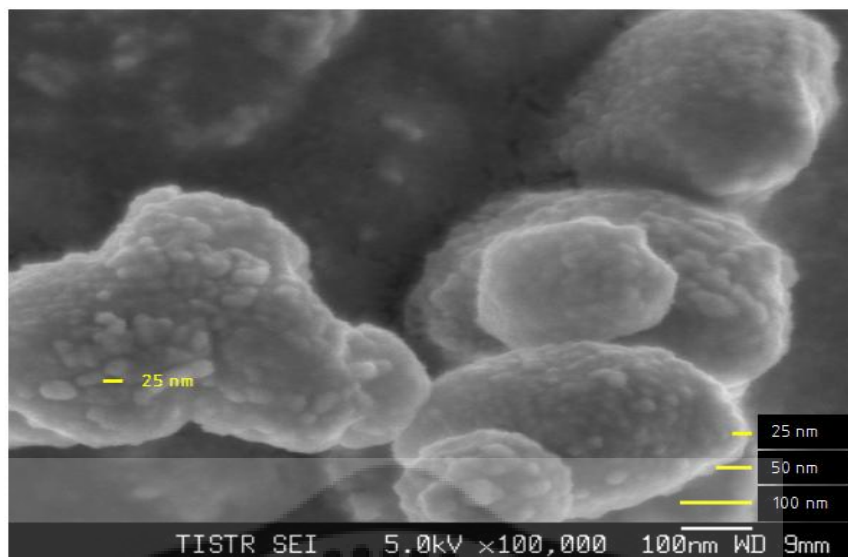
การเปรียบเทียบระหว่างสมการ Wasp และ Hamilton แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองของ Wasp เป็นกรณีพิเศษ ที่ค่าความกลม (Sphericity) เท่ากับ 1.0 ในแบบจำลอง Hamilton และ Crosser

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

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



ภาพประกอบ 26 แสดงผงอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)



ภาพภาพประกอบ 27 แสดงขนาดของอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ด้วยวิธี Field emission scanning electron microscope (FE-SEM)

ตาราง 2 แสดงคุณสมบัติของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ TiO_2

นาโนไทเทเนียมออกไซด์ TiO_2	
ขนาดอนุภาค	21 nm
ชนิดของอนุภาค	กลม
ความหนาแน่น	130 g/L
พื้นที่ผิวต่อน้ำหนัก	63 m^2/g
ค่าการนำความร้อน	11.7 Wm/K
สี	ขาว
มวลโมเลกุล	79.9 g/mol
จุดเดือด	2750 °C
จุดหลอมเหลว	1877 °C
ความถ่วงจำเพาะ	4.26 (น้ำ=1)

ตาราง 3 แสดงคุณสมบัติของสารทำความเย็น R141b

นาโนไทเทเนียมออกไซด์ TiO ₂	
สูตรทางเคมี	C ₃ H ₃ Cl ₂ F
ขนาดอนุภาค	117 g/mol
ความดันวิกฤติ	4.12 MPa
อุณหภูมิวิกฤติ	204 C°
ความถ่วงจำเพาะ	1.25
จุดเดือด	32°C
ความดันไอ	10psia ที่ 20°C
ความหนาแน่นของไอ	4.0

ตาราง 4 แสดงสมบัติบางประการของแอลกอฮอล์บางชนิด

สูตรโครงสร้าง	ชื่อ IUPAC	จุดหลอม เหลว(°C)	จุดเดือด (°C)	ความหนา แน่น(g/cm ³)	การละลายน้ำ (g/100cm ³)
CH ₃ OH	methanol	-97.8	65.0	0.7914	α
CH ₃ CH ₂ OH	ethanol	-114.7	78.5	0.7893	α
CH ₃ CH ₂ CH ₂ OH	1 – propanol	-126.5	94.7	0.8035	α
CH ₃ CHOHCH ₃	2 – propanol	-89.5	82.	0.7855	α
CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₂ OH	1 – butanol	-89.5	117.3	0.8098	8.0
CH ₃ CH ₂ CHOHCH ₃	2 – butanol	-114.7	99.5	0.8063	12.5
(CH ₃) ₂ CH CH ₂ OH	2 – methyl – 1 –	-	107.9	0.8021	11.1
(CH ₃) ₃ COH	propnol	25.5	82.2	0.7887	α
CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₂ OH	2 – methyl – 2 – propanol	-79.0	138	0.8144	2.2
	1 – pentanol				

ที่มา: <http://www.forenmmed.md.kku.ac>

สัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนรวม (The overall heat transfer coefficient)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U) เป็นสัดส่วนกับค่าแลกเปลี่ยนความร้อนในรูปของค่าความต้านทานทางความร้อนรวม สำหรับความสัมพันธ์ทั่ว ๆ ไปจะเป็นดังนี้

$$\text{ผนังรวม} : U = \frac{1}{1/h_o + L/k + 1/h_i} \quad (2-13)$$

$$\text{ผนังทรงกระบอก} : U = \frac{1}{r_o/r_i h_i + [r_o \ln(r_o/r_i)] / k + 1/h_o} \quad (2-14)$$

$$: U = \frac{1}{1/h_i + [r_o \ln(r_o/r_i)] / k + r_i/r_o h_o} \quad (2-15)$$

ส่วนสมการการถ่ายเทความร้อนคือ

$$: Q = UA(\Delta T_{LMTD}) \quad (2-16)$$

กรณีที่ผิวภายนอกท่อติดครีป สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U) จะสามารถหาค่าได้จากสมการ

$$U_i = \left[\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o \{ (A_o/A_i) + \eta_f (A_f/A_i) \}} \right]^{-1} \quad (2-17)$$

โดยที่ A_o, A_i คือ พื้นที่ผิวภายนอกและภายในของท่อตามลำดับ m^2

h_o, h_i คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวภายนอกท่อและภายในท่อตามลำดับ $W/m^2 K$

A_f คือ พื้นที่ผิวของครีป m^2

η_f คือ ประสิทธิภาพของครีป

r_o, r_i คือ ความหนาของผนัง (รัศมีของภายนอกและภายในของทรงกระบอก) m

ΔT_{LMTD} คือ อุณหภูมิแตกต่างเฉลี่ยที่มีการแลกเปลี่ยน

ความร้อนทั้งหมด K

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1 อุปกรณ์การทดลอง

ในการทดลองได้แบ่งออกเป็น 2 ชุดการทดลองดังนี้

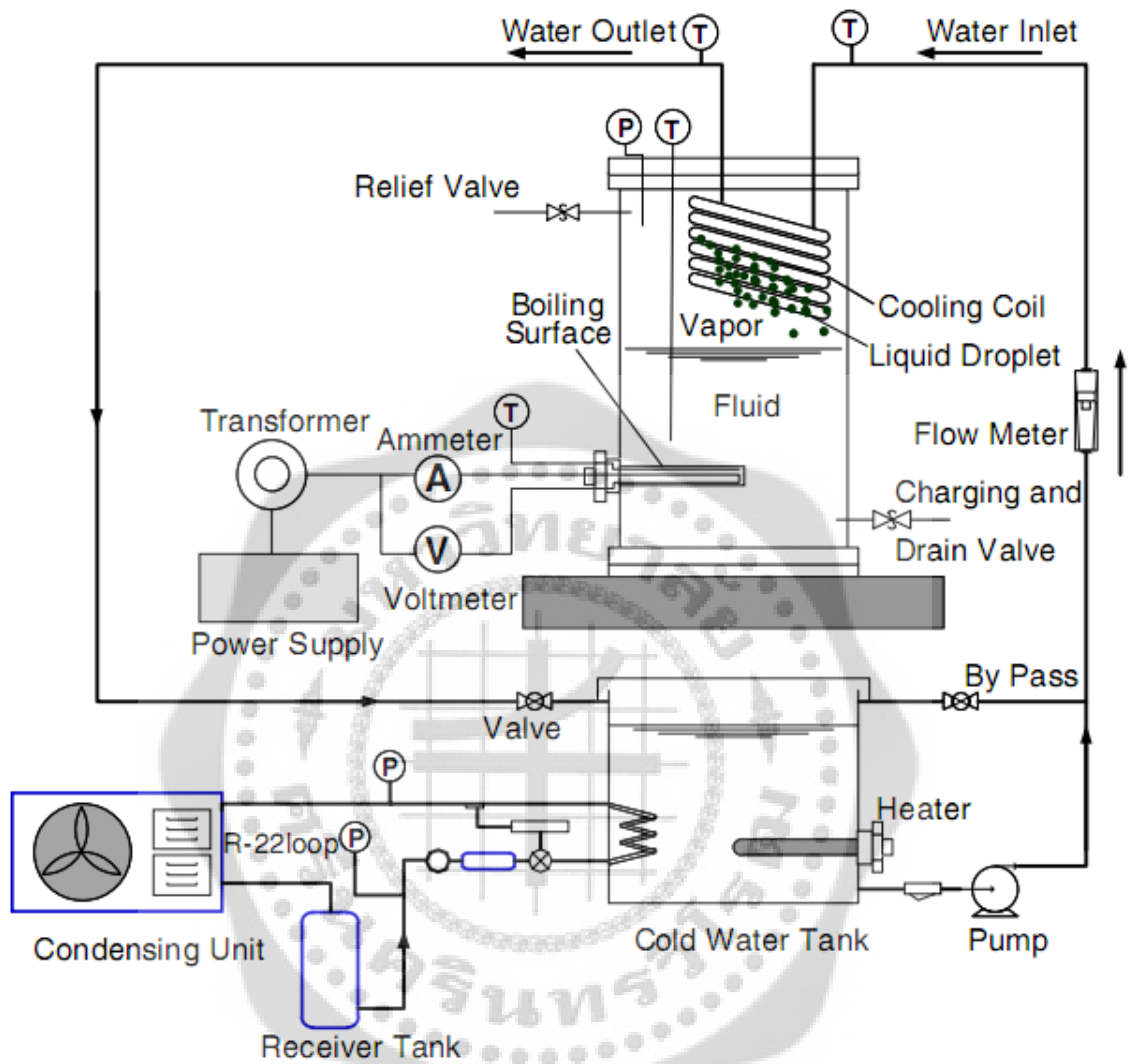
1. การศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของการเดือดแบบพูล ของสารทำความเย็น
2. การศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของการเดือดแบบพูล ของสารทำความเย็น

ผสมอนุภาคนาโน

ในการทดลองการถ่ายเทความร้อนของการเดือดแบบพูล ของสารทำความเย็น และสารทำความเย็นผสมอนุภาคนาโน จะออกแบบอุปกรณ์ที่ต้องใช้ในระบุดังต่อไปนี้

1. เกจวัดความดัน (Pressure Gauge)
2. ตัวแสดงผลของอุณหภูมิแบบดิจิตอล (Digital Temperature indicator)
3. ตัวปรับแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลง (Variable Transformer)
4. โวลต์มิเตอร์ (Voltmeter)
5. แอมป์มิเตอร์ (Ammeter)
6. วาล์วลดแรงดัน (Relief Valve)
7. ชุดคอนเดนเซอร์ (Condenser unit)
8. มาตรวัดการไหลของน้ำ (Water Flow Meter)
9. วาล์วควบคุมแรงดันการไหลของน้ำ (Water Control Valve)
10. แท่งฮีตเตอร์ (Copper Sleeve and Heating element)

1.2 ไดอะแกรมอุปกรณ์การทดลอง



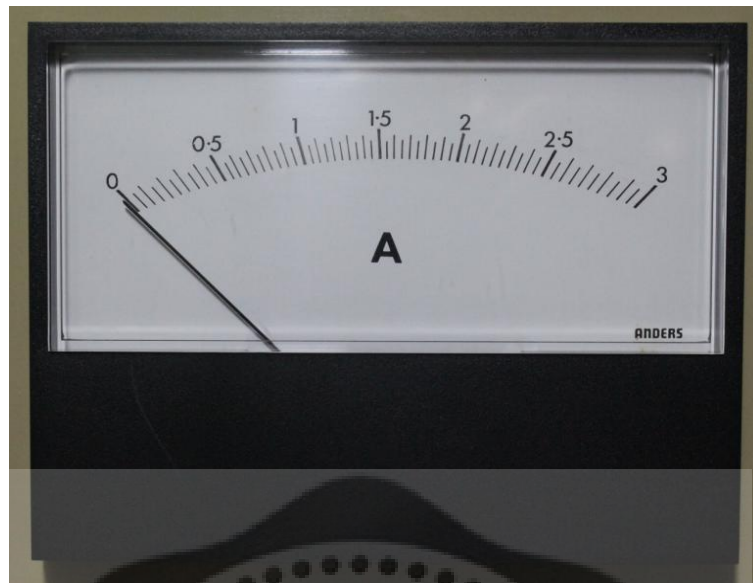
ภาพประกอบ 28 แสดงไดอะแกรมการทดลอง



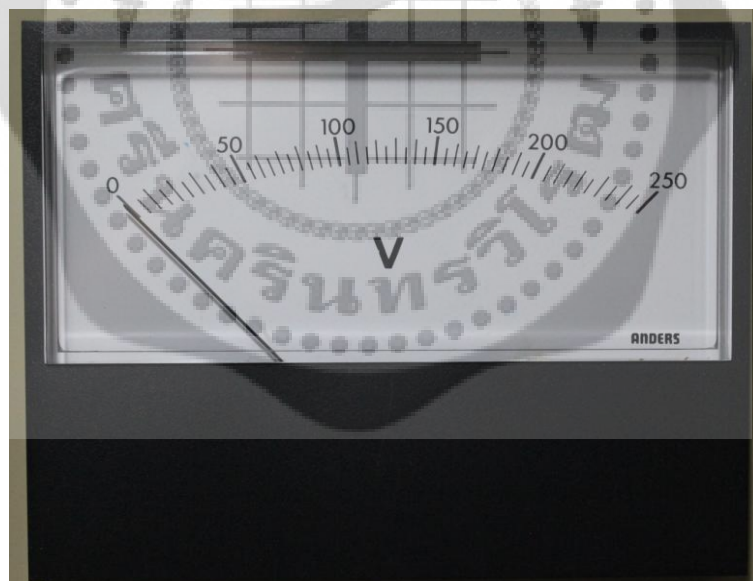
ภาพประกอบ 29 ระบบทดลองหลัก



ภาพประกอบ 30 ตัวปรับแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลง



ภาพประกอบ 31 แอมป์มิเตอร์



ภาพประกอบ 32 โวลต์มิเตอร์



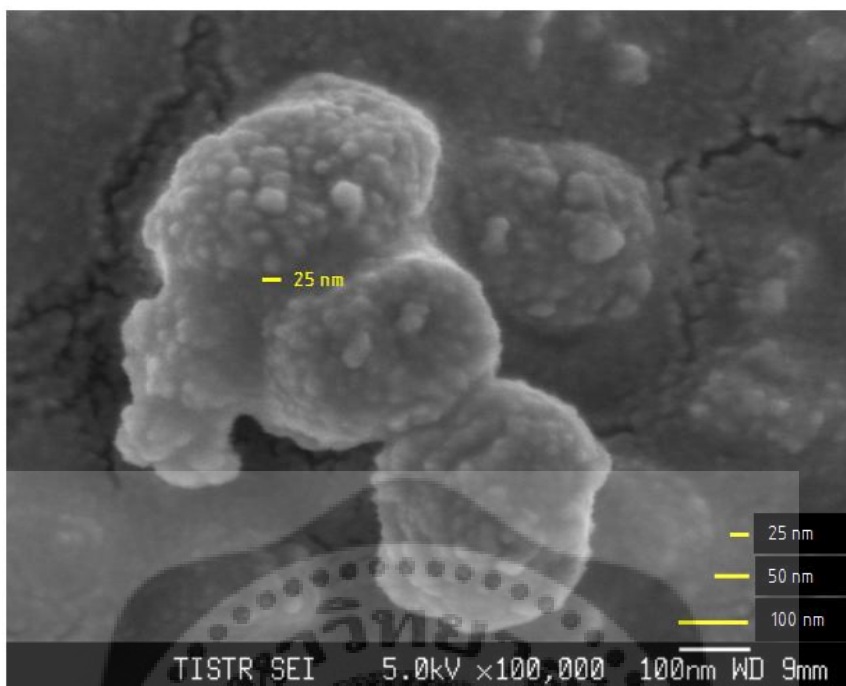
ภาพประกอบ 33 ตัวแสดงผลของอุณหภูมิตอบแบบดิจิทัล



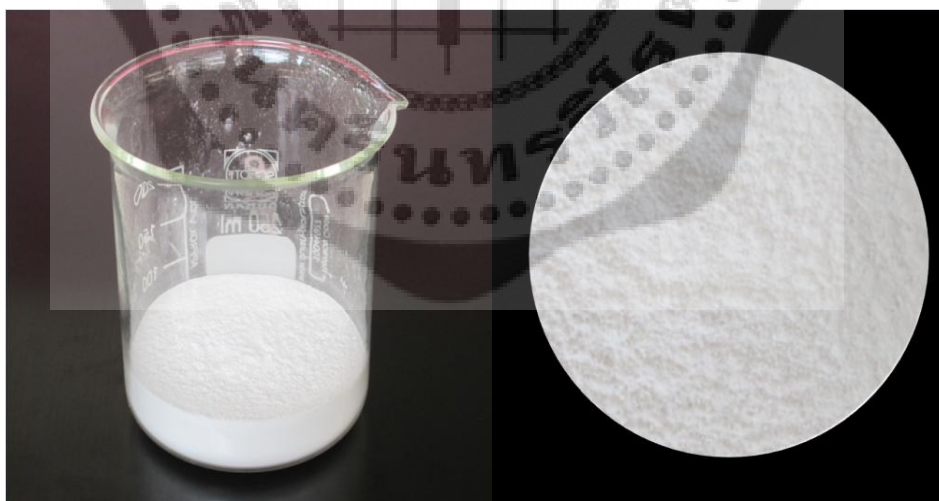
ภาพประกอบ 34 มาตรวัดการไหลของน้ำ



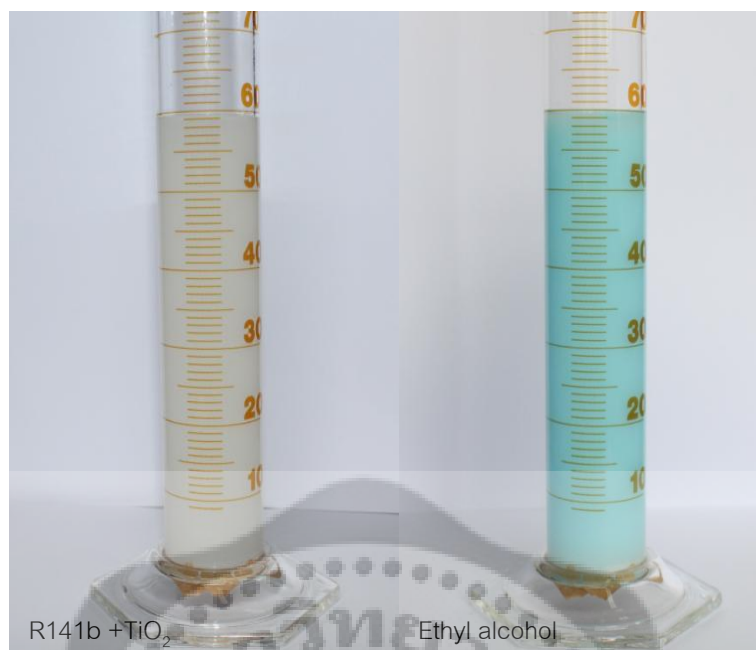
ภาพประกอบ 35 เกจวัดความดัน



ภาพประกอบ 36 แสดงขนาดของอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ด้วยวิธี Field emission scanning electron microscope (FE-SEM)



ภาพประกอบ 37 แสดงผงอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)



ภาพประกอบ 38 แสดงภาพถ่ายของไหลนาโน

จากแผนภาพอุปกรณ์การทดลองดังภาพประกอบ 28 จะแสดงระบบการทดลอง ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ

- ระบบการทดลองหลัก
- ระบบน้ำหล่อเย็น
- ของไหลที่ใช้ในการทดลอง

ในส่วนของระบบหลักประกอบด้วยท่อแก้วทนความร้อนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร และมีความหนา 10 มิลลิเมตร มีแท่งฮีตเตอร์ทำหน้าที่ให้ความร้อนกับสารทำงานในระบบ โดยแท่งฮีตเตอร์ทำด้วยโลหะทองเหลืองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร ยาว 42 มิลลิเมตร พื้นผิวให้ความร้อนสามารถให้ความร้อนได้สูงสุดที่ 220 องศาเซลเซียส โดยแท่งฮีตเตอร์ต้องจมอยู่ในของเหลวและของเหลวต้องท่วมแท่งฮีตเตอร์ไม่น้อยกว่า 50 มิลลิเมตร และมี เทอร์โมคัปเปิ้ล คอยวัดอุณหภูมิของของเหลวและอุณหภูมิของแท่งฮีตเตอร์ ส่วนความดันที่เกิดขึ้นในระบบจะถูกวัดด้วยเกจวัดความดัน การควบคุมความดันในระบบสามารถทำได้โดย ปรับมาตรวัดการไหลของน้ำเพื่อรักษาความดันให้คงที่ โดยจะมีน้ำจากระบบหล่อเย็นทำหน้าที่หล่อเย็นและลดความดันในระบบ การที่จะรักษาความดันให้คงที่ได้จะต้องปรับมาตรวัดการไหลของน้ำตลอดเวลา

มีตัวปรับแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลง ทำหน้าที่ปรับเพิ่ม แรงดันไฟฟ้าสู่แท่ง ฮีตเตอร์โดยมีโวลต์มิเตอร์ และแอมป์มิเตอร์ คอยวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปที่แท่ง ฮีตเตอร์

ในส่วนระบบน้ำหล่อเย็น ประกอบด้วย แทงค์เก็บน้ำเย็น ทำหน้าที่เป็นแหล่งเก็บน้ำเย็นเพื่อเตรียมจ่ายไปที่ระบบทดลองหลักเพื่อช่วยในการลดความดันในระบบ มีปั๊มทำหน้าที่ส่งน้ำหล่อเย็น ไปที่ระบบการทดลองหลัก โดยผ่านมาตรวัดการไหลของน้ำ ผ่านคอยล์และไหลกลับไปที่แทงค์เก็บเหมือนเดิม มีคอนเด็นซิงยูนิททำหน้าที่ทำให้น้ำเย็น โดยระบบทำความเย็นจะใช้สารทำความเย็น R-22 เพื่อทำความเย็น ส่วน แทงฮีตเตอร์จะทำหน้าที่ให้ความร้อนเพื่อทำให้อุณหภูมิของน้ำสมดุลย์ให้ได้ตามที่กำหนด ส่วน วาล์วบายพาส ทำหน้าที่บายพาสน้ำ เพื่อลดความดันที่เกิดขึ้นในท่อส่ง

สำหรับของไหลนาโน จะใช้อุณหภูมิของนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ แชนนอนลอยในของไหลพื้นฐาน (R141b และ เอทิลแอลกอฮอล์) ขนาดของอนุภาคนาโนเฉลี่ยอยู่ที่ 21 นาโนเมตร ของไหลนาโน หลังจากผสมในของไหลพื้นฐานจะถูกทำให้แขวนลอยโดยใช้เครื่องเขย่าหรือเครื่อง Ultra sonic เป็นเวลา 3 ชม. ก่อนที่จะนำไปใส่ในท่อแก้วทนความร้อน.

2.วิธีการทดลอง

2.1 สำหรับสารทำความเย็น R141b

1. ทำการติดตั้งระบบการทดลองให้เหมาะสมกับการทดลองการถ่ายเทความร้อนของการเดือดแบบพูล ของสารทำความเย็น และสารทำความเย็นผสมอนุภาคนาโน
2. เตรียมสารทำความเย็น R141b และสารทำความเย็น R141b ผสม อนุภาคนาโนไททาเนียมได ออกไซด์ (TiO_2) ที่ความเข้มข้น ต่าง ๆ กันของไหลนาโนหลังจากผสมในของไหลพื้นฐานจะถูกทำให้แขวนลอยโดยใช้เครื่องเขย่าหรือเครื่อง Ultra sonic เป็นเวลา 3 ชม. ก่อนที่จะนำไปใส่ในท่อแก้วทนความร้อน
3. ทำการทดลอง การถ่ายเทความร้อนของการเดือดแบบพูล ของสารทำความเย็น และสารทำความเย็นผสมอนุภาคนาโน โดย เปิด สวิตซ์จ่ายไฟให้กับระบบ
 - ปรับค่าความดันให้มีค่า 50kPa, 75kPa, 100kPa, 125kPa, 150kPa ตามลำดับ พร้อมรักษาความดันให้คงที่ โดยการปรับระบบน้ำหล่อเย็นเพื่อรักษาความดัน
 - ปรับค่าแรงดันไฟฟ้าครึ่งละ 10 V โดยเริ่มจาก 10 V ไปจนถึง 120 V จากนั้นปรับครึ่งละ 5 V จาก 120 V ไปจนถึง 150 V

เมื่อนำสารทำงานใส่ลงในแทงแก้วทนความร้อนที่ใช้ทดลองแล้วให้ทำการปรับแรงดันไฟฟ้าครึ่งละ 10 V โดยเริ่มต้นที่ 10 V เมื่อปรับแรงดันไฟฟ้าให้กับแทงฮีตเตอร์ จะมีความร้อนเกิดขึ้นที่ผิวของแทงฮีตเตอร์ จากนั้นความร้อนก็จะถูกถ่ายเทจากผิวของแทงฮีตเตอร์ไปยังของเหลวในระบบ เมื่อ

ของเหลวได้รับความร้อนจนถึงจุดเดือดก็จะมีฟองไอของของเหลวเกิดขึ้นโดยเริ่มเกิดขึ้นที่ผิวแท่งฮีตเตอร์และลอยขึ้นสู่ด้านบนผิวของของเหลว การเกิดฟองไอของของเหลวทำให้มีผลต่อความดันในแท่งแก้วทำให้มีความดันเพิ่มขึ้น และจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากนั้นเมื่อความดันเกินค่าที่กำหนดให้ทำการปรับลดแรงดัน และควบคุมแรงดันให้ได้ค่าตามต้องการโดยการปรับมาตรวัดการไหลของน้ำ ยกตัวอย่างเช่น ต้องการทดลองที่ความดันคงที่ 50 กิโลปาสคาล เมื่อความดันในแท่งแก้วโซวที่เกจวัดความดันเกิน 50 กิโลปาสคาลให้ปรับลดความดันด้วยการปรับมาตรวัดการไหลของน้ำโดยเปิดให้น้ำไหลมากขึ้นเพื่อจะลดความดันในแท่งแก้ว และทำการควบคุมความดันให้คงที่โดยปรับมาตรวัดการไหลของน้ำให้ได้ตามความดันที่ต้องการทดลอง เมื่อเห็นว่าสามารถควบคุมความดันให้คงที่ได้แล้ว ให้รอจนกว่าอุณหภูมิของของเหลวในแท่งแก้วคงที่ จากนั้นให้ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิของของเหลว อุณหภูมิของแท่งฮีตเตอร์ แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า เพื่อที่จะนำมาคำนวณหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน อุณหภูมิแตกต่างระหว่างแท่งฮีตเตอร์และของเหลว ฮีตฟลักซ์ และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน เมื่อบันทึกค่าเสร็จให้ทำการปรับเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นอีกทีละ 10 V ไปจนถึง 120 V จากนั้นปรับครั้งละ 5 V จาก 120 V ไปจนถึง 150 V ทุกครั้งที่ปรับแรงดันไฟฟ้า และควบคุมความดันให้คงที่ ให้บันทึกค่าค่าอุณหภูมิของของเหลว อุณหภูมิของแท่งฮีตเตอร์ แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าทุกครั้ง เมื่อทำการทดลองที่ความดัน 50 กิโลปาสคาลเสร็จก็ให้เปลี่ยนมาทดลองที่ความดัน 75 100 125 และ 150 กิโลปาสคาลตามลำดับ เมื่อทดลองเสร็จก็ให้เริ่มทำการทดลองขั้นต่อไปโดยการเปลี่ยนความเข้มข้นของของเหลวในระบบ จาก 0.01-0.075 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในแต่ละความเข้มข้นที่ทำการทดลองเมื่อทดลองเสร็จให้ล้างระบบให้สะอาดและให้แห้งสนิทก่อนที่จะทำการทดลองที่ความเข้มข้นอื่นๆ

4.ทำการเปรียบเทียบและสรุปผลการทดลอง

2.2 สำหรับสารทำความเย็นเอทิลแอลกอฮอล์

1. ทำการติดตั้งระบบการทดลองให้เหมาะสมกับการทดลองการถ่ายเทความร้อนของการเดือดแบบพูล ของสารทำความเย็น และสารทำความเย็นผสมอนุภาคนาโน
2. เตรียมสารทำความเย็นเอทิลแอลกอฮอล์และสารทำความเย็นเอทิลแอลกอฮอล์ผสมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กันของไหลนาโนหลังจากผสมในของไหลพื้นฐานจะถูกทำให้แขวนลอยโดยใช้เครื่องเขย่าหรือเครื่อง Ultra sonic เป็นเวลา 3 ชม. ก่อนที่จะนำไปใส่ในท่อแก้วทนความร้อน
3. ทำการทดลอง การถ่ายเทความร้อนของการเดือดแบบพูล ของสารทำความเย็น และสารทำความเย็นผสมอนุภาคนาโน โดย เปิด สวิตซ์จ่ายไฟให้กับระบบ

- ปรับค่าความดันให้มีค่า 50kPa, 75kPa, 100kPa, 125kPa, 150kPa ตามลำดับ พร้อมรักษาความดันให้คงที่ โดยการปรับระบบน้ำหล่อเย็นเพื่อรักษาความดัน

- ปรับค่าแรงดันไฟฟ้าครึ่งละ 10 V โดยเริ่มจาก 10 V ไปจนถึง 120 V จากนั้นปรับครึ่งละ 5 V จาก 120 V ไปจนถึง 150 V

เมื่อนำสารทำงานใส่ลงในแท่งแก้วทนความร้อนที่ใช้ทดลองแล้วให้ทำการปรับแรงดันไฟฟ้าครึ่งละ 10 V โดยเริ่มต้นที่ 10 V เมื่อปรับแรงดันไฟฟ้าให้กับแท่งฮีตเตอร์ จะมีความร้อนเกิดขึ้นที่ผิวของแท่งฮีตเตอร์ จากนั้นความร้อนก็จะถูกถ่ายเทจากผิวของแท่งฮีตเตอร์ไปยังของเหลวในระบบ เมื่อของเหลวได้รับความร้อนจนถึงจุดเดือดก็จะมีฟองไอของของเหลวเกิดขึ้นโดยเริ่มเกิดขึ้นที่ผิวแท่งฮีตเตอร์และลอยขึ้นสู่ด้านบนผิวของของเหลว การเกิดฟองไอของของเหลวทำให้มีผลต่อความดันในแท่งแก้วทำให้มีความดันเพิ่มขึ้น และจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากนั้นเมื่อความดันเกินค่าที่กำหนดให้ทำการปรับลดแรงดัน และควบคุมแรงดันให้ได้ค่าตามต้องการโดยการปรับมาตรวัดการไหลของน้ำ ยกตัวอย่างเช่น ต้องการทดลองที่ความดันคงที่ 50 กิโลปาสคาล เมื่อความดันในแท่งแก้วที่เกจวัดความดันเกิน 50 กิโลปาสคาลให้ปรับลดความดันด้วยการปรับมาตรวัดการไหลของน้ำโดยเปิดให้น้ำไหลมากขึ้นเพื่อจะลดความดันในแท่งแก้ว และทำการควบคุมความดันให้คงที่โดยปรับมาตรวัดการไหลของน้ำให้ได้ตามความดันที่ต้องการทดลอง เมื่อเห็นว่าสามารถควบคุมความดันให้คงที่ได้แล้ว ให้รอจนกว่าอุณหภูมิของของเหลวในแท่งแก้วคงที่ จากนั้นให้ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิของของเหลว อุณหภูมิของแท่งฮีตเตอร์ แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า เพื่อที่จะนำมาคำนวณหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน อุณหภูมิแตกต่างระหว่างแท่งฮีตเตอร์และของเหลว ฮีตฟลักซ์ และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน เมื่อบันทึกค่าเสร็จให้ทำการปรับเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นอีกทีละ 10 V ไปจนถึง 120 V จากนั้นปรับครึ่งละ 5 V จาก 120 V ไปจนถึง 150 V ทุกครั้งที่ปรับแรงดันไฟฟ้า และควบคุมความดันให้คงที่ ให้บันทึกค่าอุณหภูมิของของเหลว อุณหภูมิของแท่งฮีตเตอร์ แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าทุกครั้ง เมื่อทำการทดลองที่ความดัน 50 กิโลปาสคาลเสร็จก็ให้เปลี่ยนมาทดลองที่ความดัน 75 100 125 และ 150 กิโลปาสคาลตามลำดับ เมื่อทดลองเสร็จก็ให้เริ่มทำการทดลองขั้นต่อไปโดยการเปลี่ยนความเข้มข้นของของเหลวในระบบ จาก 0.01-0.075 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในแต่ละความเข้มข้นที่ทำการทดลองเมื่อทดลองเสร็จให้ล้างระบบให้สะอาดและให้แห้งสนิทก่อนที่จะทำการทดลองที่ความเข้มข้นอื่นๆ

4. ทำการเปรียบเทียบและสรุปผลการทดลอง

2.3 ตัวแปรที่ได้จากการทดลอง

- อุณหภูมิของสารทำความเย็น (Liquid Temperature)
- อุณหภูมิของแท่งฮีตเตอร์ (Metal Temperature)

- ความดัน (Pressure)
- กระแสไฟฟ้า (Current)
- แรงดันไฟฟ้า (Voltage)

3. เงื่อนไขในการทดลอง

3.1 สารทำงาน

- สารทำความเย็น R141b
- สารทำความเย็นเอทิลแอลกอฮอล์

3.2 ความเข้มข้น (อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂))

- 0.010, 0.025, 0.050 และ 0.075 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

ของไหลนาโนหลังจากผสมในของไหลพื้นฐานจะถูกทำให้แขวนลอยโดยใช้เครื่อง เขย่าหรือเครื่อง Ultra sonic เป็นเวลา 3 ชม. ก่อนที่จะนำไปใส่ในท่อแก้วทนความร้อน

3.3.3 ความดัน

- 50, 75, 100, 125 และ 150 กิโลปาสคาล

4 การคำนวณผลการทดลอง

อัตราการถ่ายเทความร้อนของแท่งฮีตเตอร์ (Heat transfer rate)

$$\text{Heat transfer rate } (Q) = \text{Voltage } (E) \times \text{Current } (I)$$

โดยที่ E คือ แรงดันไฟฟ้า, I คือกระแสไฟฟ้า

ฮีตฟลักซ์ (Heat flux)

$$\text{Heat Flux } (\phi) = \text{Heat transfer rate } (Q) / \text{Effective area } (A)$$

โดยที่ Q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนของแท่งฮีตเตอร์, A คือพื้นที่ผิวให้ความร้อนมีค่าเท่ากับ 0.0018 m^2

ผลต่างของอุณหภูมิ (Temperature difference)

$$\text{Temperature difference } (\Delta T) = \text{Metal Temperature } (T_s) - \text{Liquid Temperature } (T_l)$$

โดยที่ (T_s) คือ อุณหภูมิของแท่งฮีตเตอร์, (T_l) คืออุณหภูมิของสารทำความเย็น

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer coefficient)

Heat transfer coefficient (h) = Heat flux (ϕ) / Temperature difference (ΔT)

โดยที่ (ϕ) คือฮีตฟลักซ์, (ΔT) คือผลต่างของอุณหภูมิระหว่างแท่งฮีตเตอร์และสารทำความเย็น



บทที่ 4

ผลและการวิเคราะห์

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ การทดลองคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของการเดือดแบบพูลของสารทำความเย็นหรือสารทำงานที่ไม่ผสมอนุภาคนาโนกับการทดลองโดยใช้สารทำความเย็นหรือสารทำงานผสมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) โดยการทดลองเก็บข้อมูล แล้วนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาตัวแปรต่างๆที่ต้องการ ในการคำนวณสำหรับผลที่ได้ทั้งสองส่วนจะถูกบันทึกในรูปแบบของตาราง และนำผลมาแสดงในลักษณะของกราฟ แสดงการเปรียบเทียบของตัวแปรต่างๆ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองและการคำนวณสามารถแสดงอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆดังนี้

1. ผลของความเข้มข้นที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของฮีตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของสารทำความเย็น R141b และลักษณะการเดือดของสารทำความเย็น R141b และสารทำความเย็น R141b ผสมอนุภาคนาโน นาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่ความเข้มข้นต่างๆ

2. ผลของความเข้มข้นที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของฮีตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) และลักษณะการเดือดของเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) และเอทิลแอลกอฮอล์ ผสมอนุภาคนาโนนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่ความเข้มข้นต่างๆ

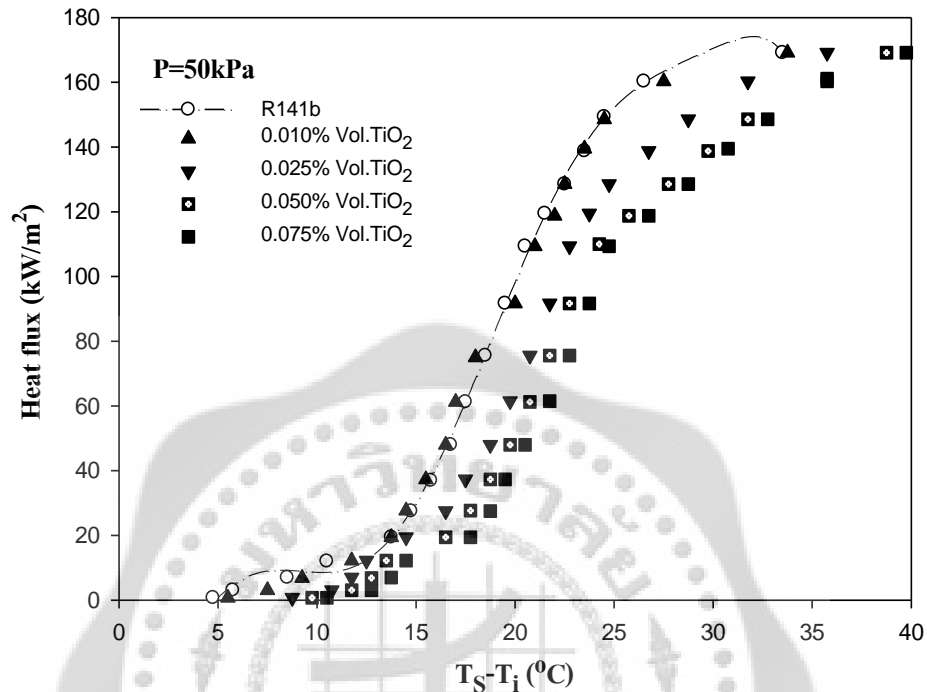
3. ผลของความดันที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงฮีตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของสารทำความเย็น R141b และลักษณะการเดือดของ สารทำความเย็น R141b ผสมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่ความดันต่างๆ

4. ผลของความดันที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงฮีตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) และลักษณะการเดือดของเอทิลแอลกอฮอล์ผสมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่ความดันต่างๆ

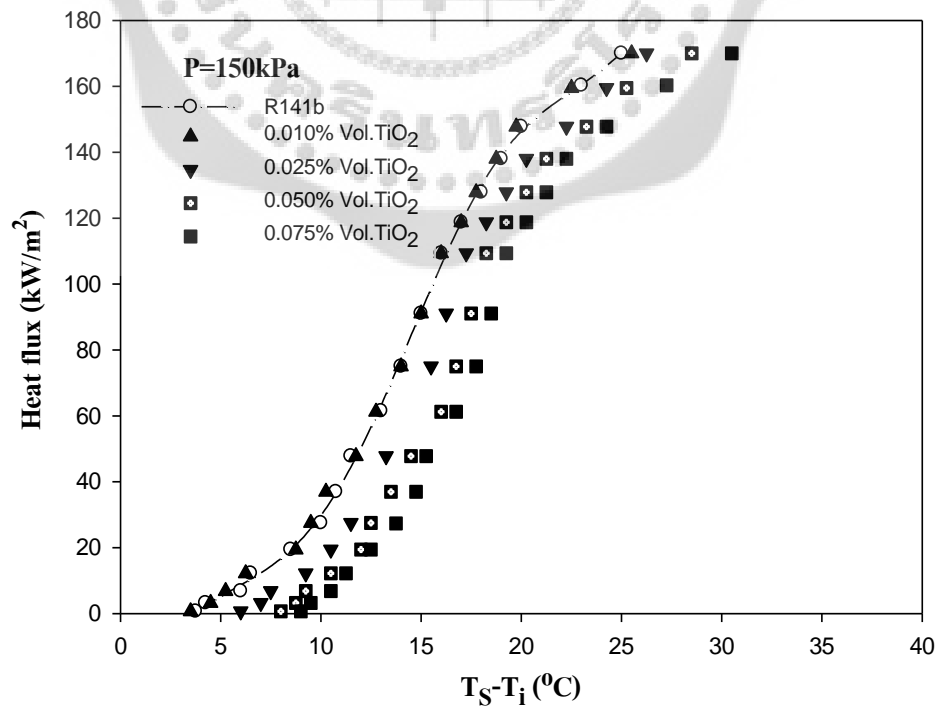
5. การเปรียบเทียบกับ การทดลองกับสหสัมพันธ์ Cooper's Correlation และการเปรียบเทียบการทดลองกับผลการทดลองของ Triaksri et al.

6. การเปรียบเทียบการทดลองกับผลการทดลองของนักวิจัยอื่น

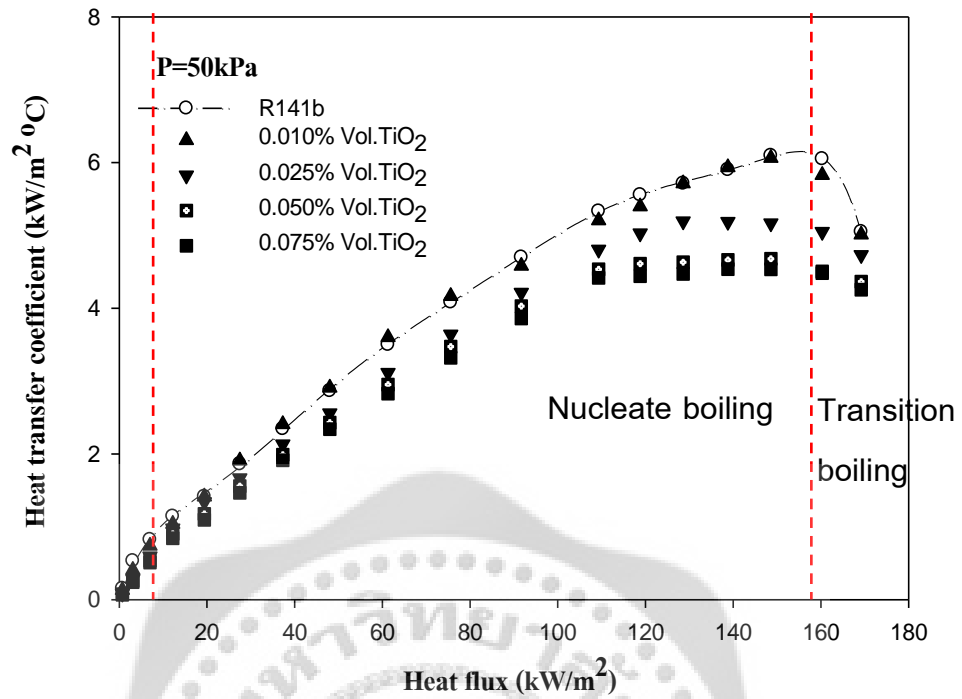
1. ผลของความเข้มข้นที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของฮีตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของสารทำความเย็น R141b



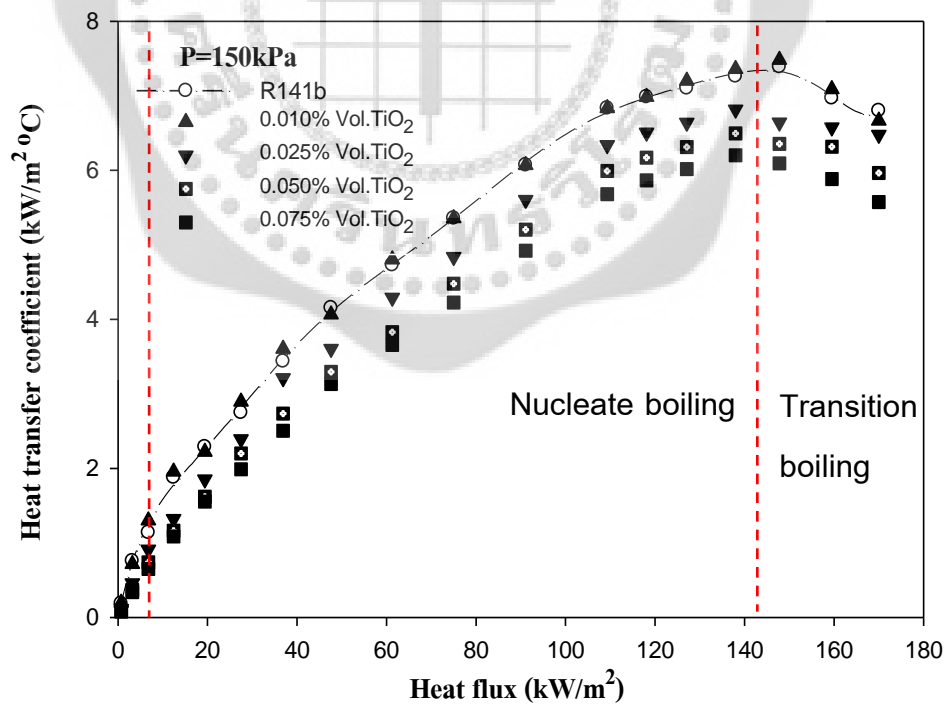
ภาพประกอบ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิและฮีตฟลักซ์ที่ความดัน 50kPa



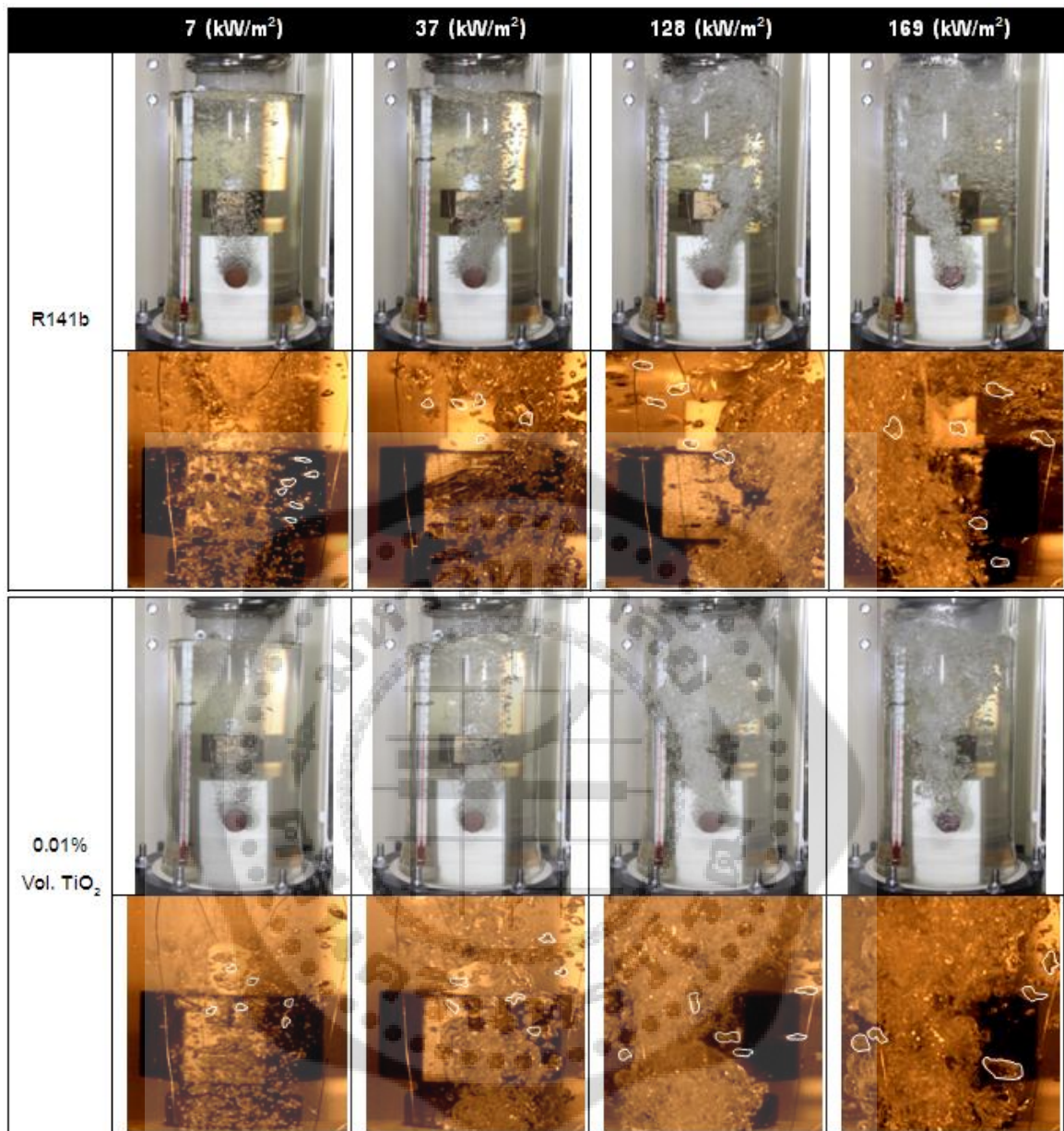
ภาพประกอบ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิและฮีตฟลักซ์ที่ความดัน 150kPa



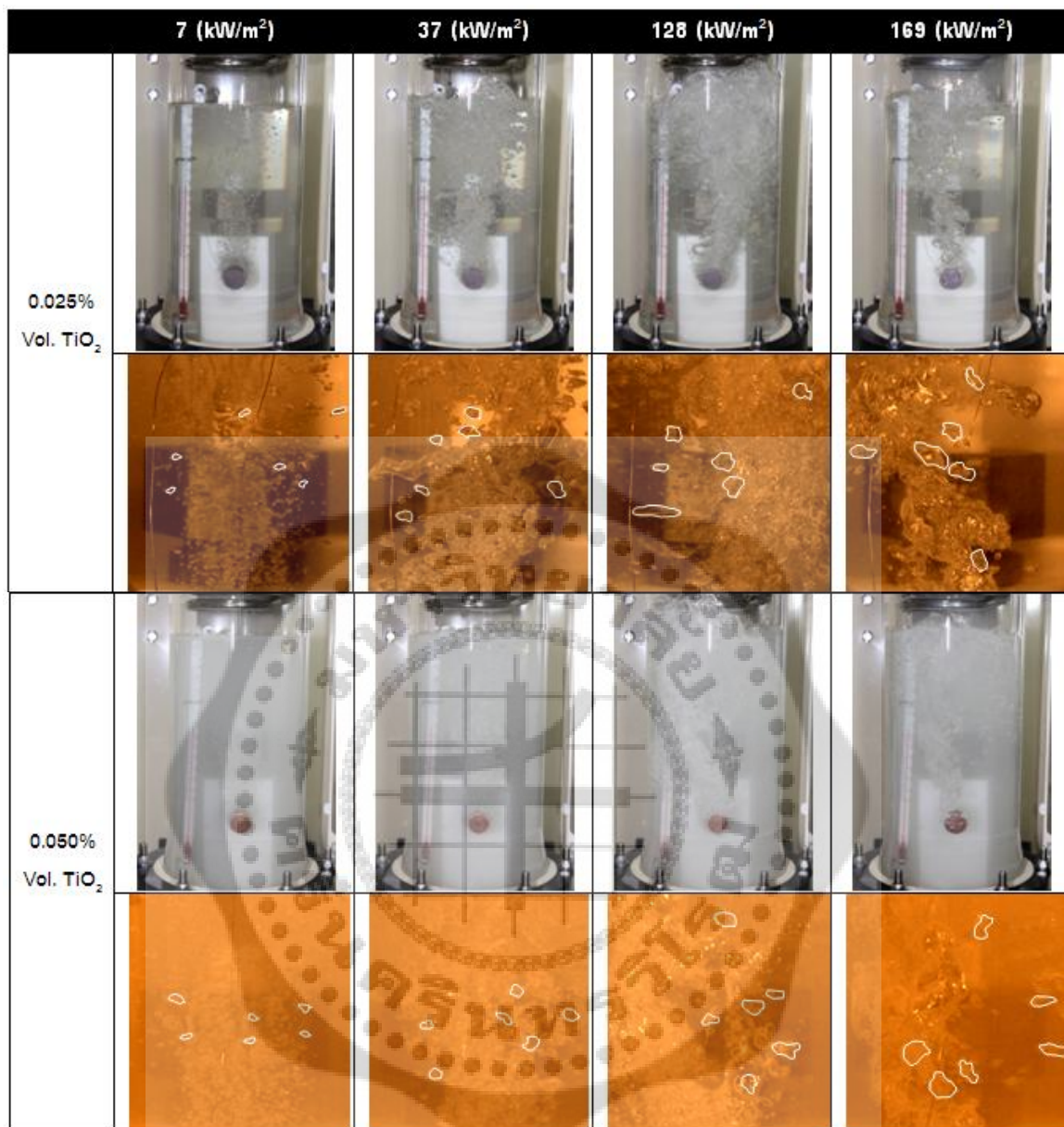
ภาพประกอบ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างฮีตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ ความดัน 50kPa



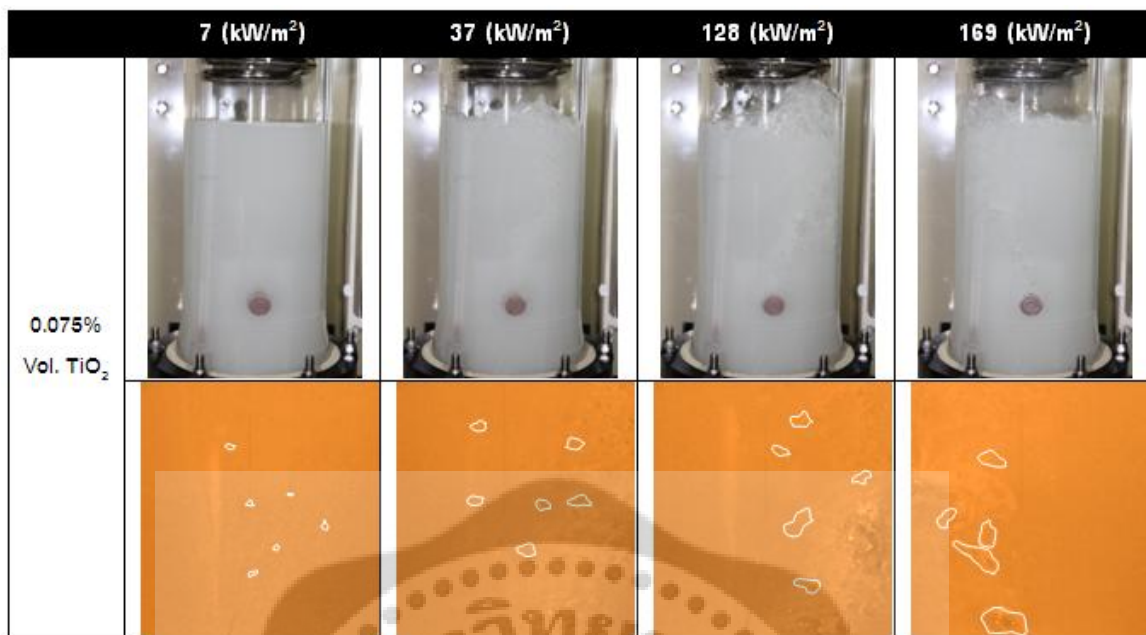
ภาพประกอบ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างฮีตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ ความดัน 150kPa



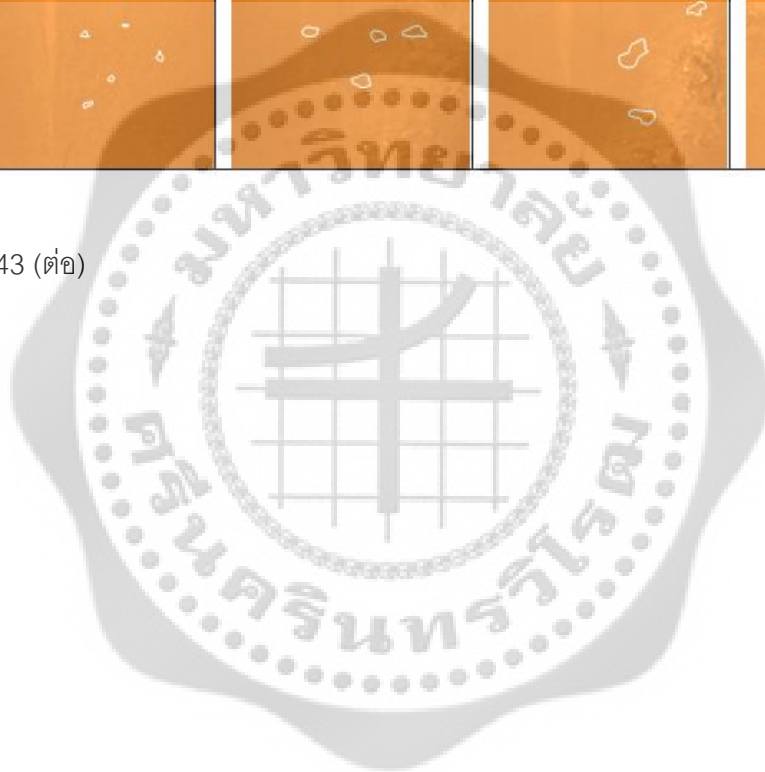
ภาพประกอบ 43 ลักษณะการเดือดของสารทำความเย็น R141b และสารทำความเย็น R141b ผสมอนุภาคนาโน ที่ความเข้มข้นต่างๆ ตามอัตราการถ่ายเทความร้อนของแท่งฮีตเตอร์ ที่ความดันคงที่ 100kPa



ภาพประกอบ 43 (ต่อ)



ภาพประกอบ 43 (ต่อ)



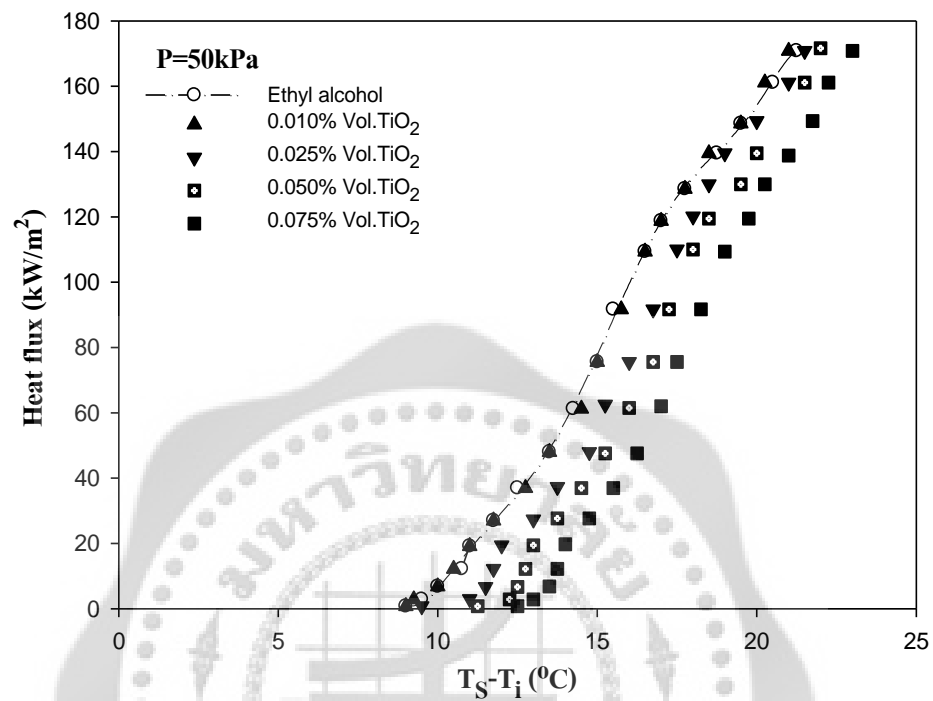
จากภาพประกอบ 39 และ 40 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิของสารทำงานกับอุณหภูมิของแท่งโลหะให้ความร้อน และฮีตฟลักซ์ ที่ความดันคงที่ 50kPa และ 150kPa โดยใช้สารทำความเย็น R141b และสารทำความเย็น R141b ผสมอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นสารทำงาน โดยแต่ละความดันที่ทดลองจะทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็น 0.010, 0.025, 0.050 และ 0.075 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าเมื่อผลต่างของอุณหภูมิมระหว่างอุณหภูมิของสารทำงานกับอุณหภูมิของแท่งโลหะให้ความร้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ฮีตฟลักซ์มีค่าเพิ่มมากขึ้นไปด้วย และที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ต่างกันพบว่า ที่ความ 0.010 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรจะให้ค่าฮีตฟลักซ์สูงที่สุดและไม่ต่างกับการใช้สารทำความเย็นที่ไม่ผสมอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และเมื่อเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่ผลต่างของอุณหภูมิกำลังหนึ่งๆ ไปที่ 0.025, 0.050 และ 0.075 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ตามลำดับ จะมีผลทำให้ค่าฮีตฟลักซ์มีค่าลดลงตามลำดับด้วยเช่นกัน โดยที่ความเข้มข้น 0.075 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรจะให้ค่าฟลักซ์ความร้อนที่ต่ำสุดและที่ความดันต่างกัน พบว่า ที่ผลต่างของอุณหภูมิกำลังหนึ่งๆ ที่ความดันสูงจะให้ค่าฮีตฟลักซ์ที่สูงกว่าที่ความดันต่ำ โดยที่ 150kPa ให้ค่าฮีตฟลักซ์ที่สูงกว่าที่ 50kPa

จากภาพประกอบ 41 และ 42 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฮีตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ที่ความดันคงที่ 50kPa และ 150kPa โดยใช้สารทำความเย็น R141b และสารทำความเย็น R141b ผสมอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นสารทำงาน โดยแต่ละความดันที่ทดลองจะทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็น 0.010, 0.025, 0.050 และ 0.075 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรตามลำดับ จากการทดลองพบว่า เมื่อฮีตฟลักซ์มีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้นไปด้วย และที่ความเข้มข้นต่างกันพบว่า ที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) 0.010 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรจะให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดและไม่ต่างกับการใช้สารทำความเย็นที่ไม่ผสมอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และเมื่อเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่ฮีตฟลักซ์กำลังหนึ่งๆ โดยเพิ่มความเข้มข้นไปที่ 0.025, 0.050 และ 0.075 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรตามลำดับ จะมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าลดลงตามลำดับเช่นกัน โดยที่ความเข้มข้น 0.075 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ต่ำที่สุดและที่ความดันต่างกันพบว่า ที่ฮีตฟลักซ์กำลังหนึ่งๆ ที่ความดันสูงจะ

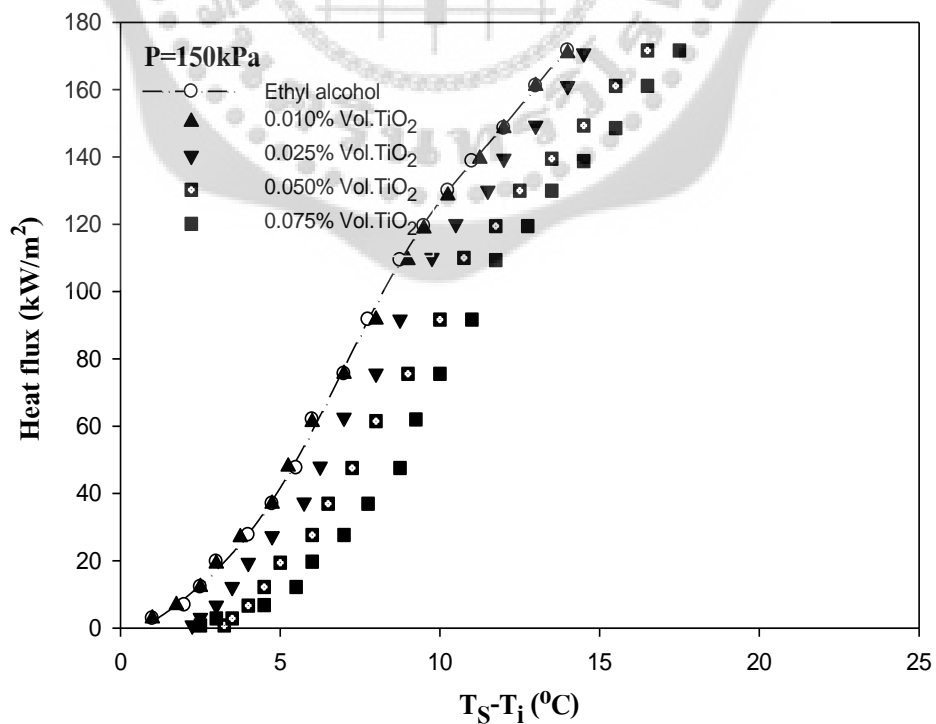
ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้มากกว่าที่ความดันต่ำ โดยที่ 150kPa ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากกว่าที่ 50kPa

จากภาพประกอบ 43 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการเดือดและขนาดของฟองไอจากการเดือดที่ ความดันคงที่ 100kPa โดยใช้สารทำความเย็น R141b และสารทำความเย็น R141b ผสมอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นสารทำงานในระบบ โดยทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็น 0.010, 0.025, 0.050 และ 0.075 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าที่สัปดาห์ค่าหนึ่งๆลักษณะการเดือดของสารทำความเย็น ความหนาแน่นของฟองไอ และขนาดของฟองไอจากการเดือดที่ความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร จะไม่ต่างกับสารทำความเย็นที่ไม่ผสมอนุภาคนาโน และเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นในการทดลองไปที่ 0.025, 0.050 และ 0.075 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่า ลักษณะการเดือดจะมีความรุนแรงน้อยลงรวมถึงขนาดของฟองไอจะมีค่าเล็กลงด้วย และความหนาแน่นของฟองไอก็มีความหนาแน่นลดลงด้วยเช่นกัน เมื่อเพิ่มค่าสัปดาห์ให้กับระบบ พบว่าลักษณะการเดือดจะมีความรุนแรงเพิ่มขึ้นขนาดของฟองไอจะมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีความหนาแน่นของฟองไอเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นเมื่อความรุนแรงของการเดือดเพิ่มขึ้นขนาดของฟองไอมีขนาดใหญ่ขึ้นและความหนาแน่นของฟองไอเพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

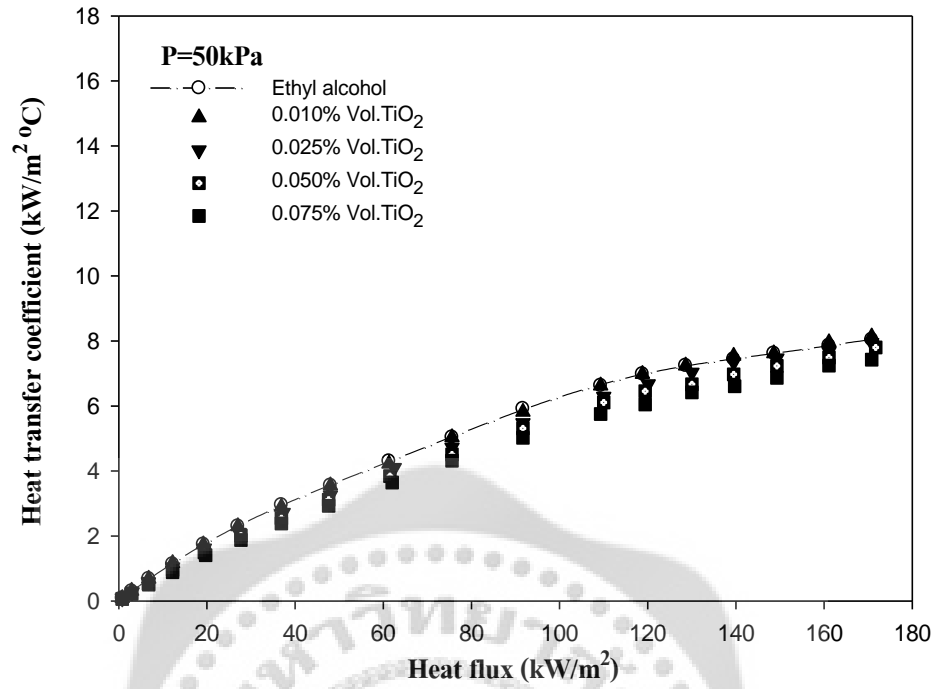
2. ผลของความเข้มข้นที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของฮีตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol)



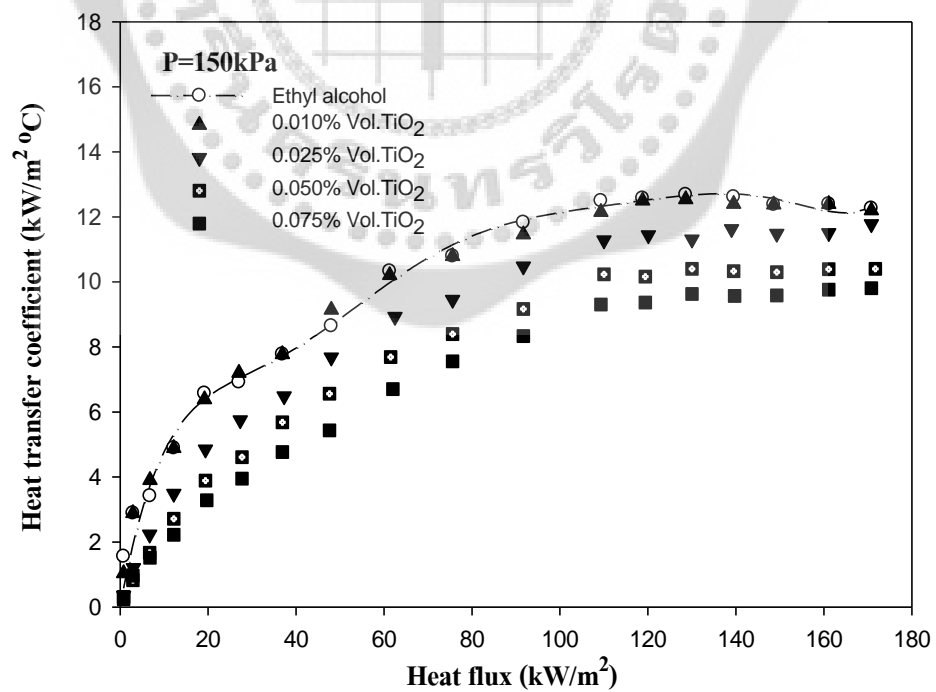
ภาพประกอบ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิและฮีตฟลักซ์ที่ความดัน 50kPa



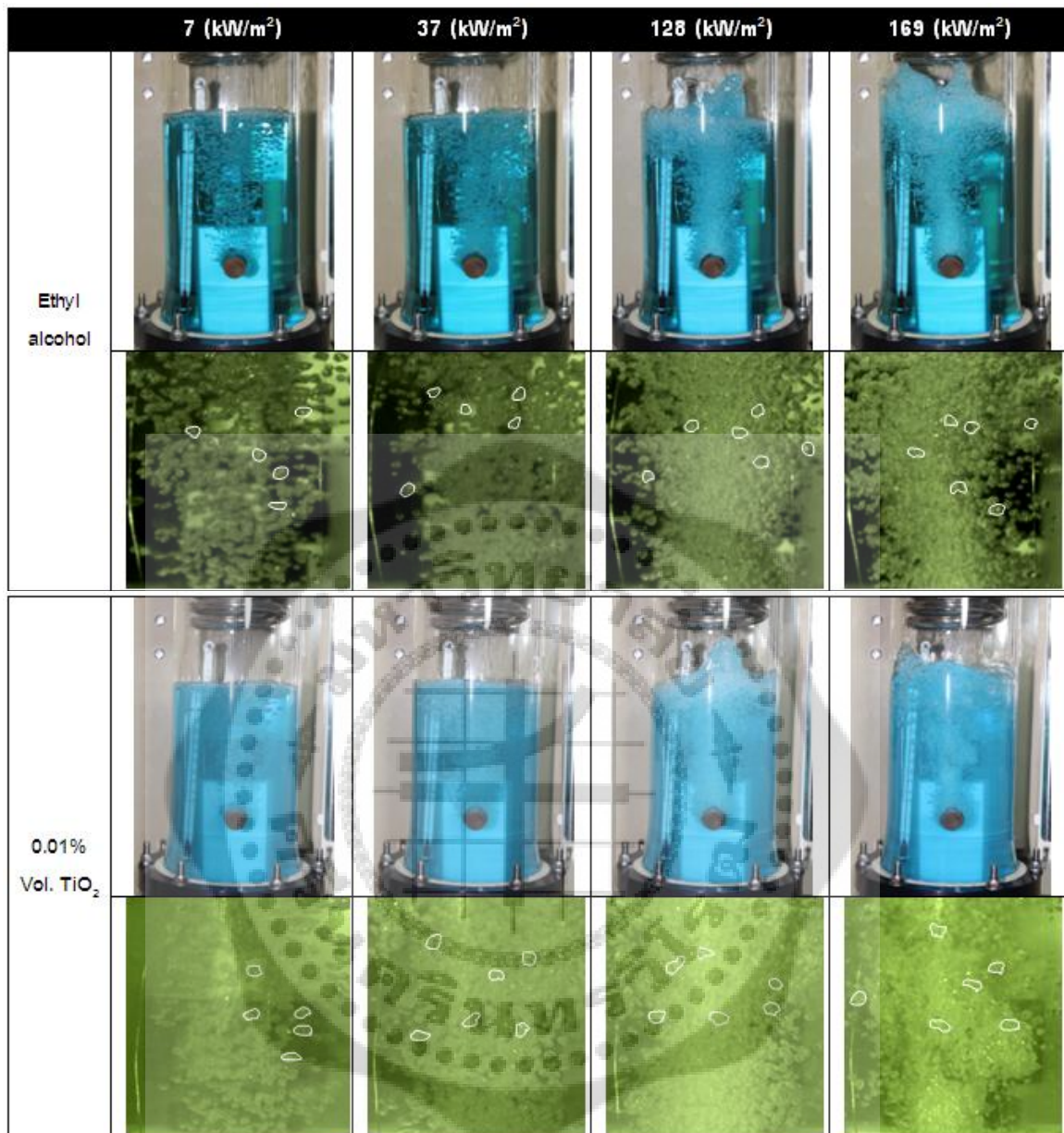
ภาพประกอบ 45 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิและฮีตฟลักซ์ที่ความดัน 150kPa



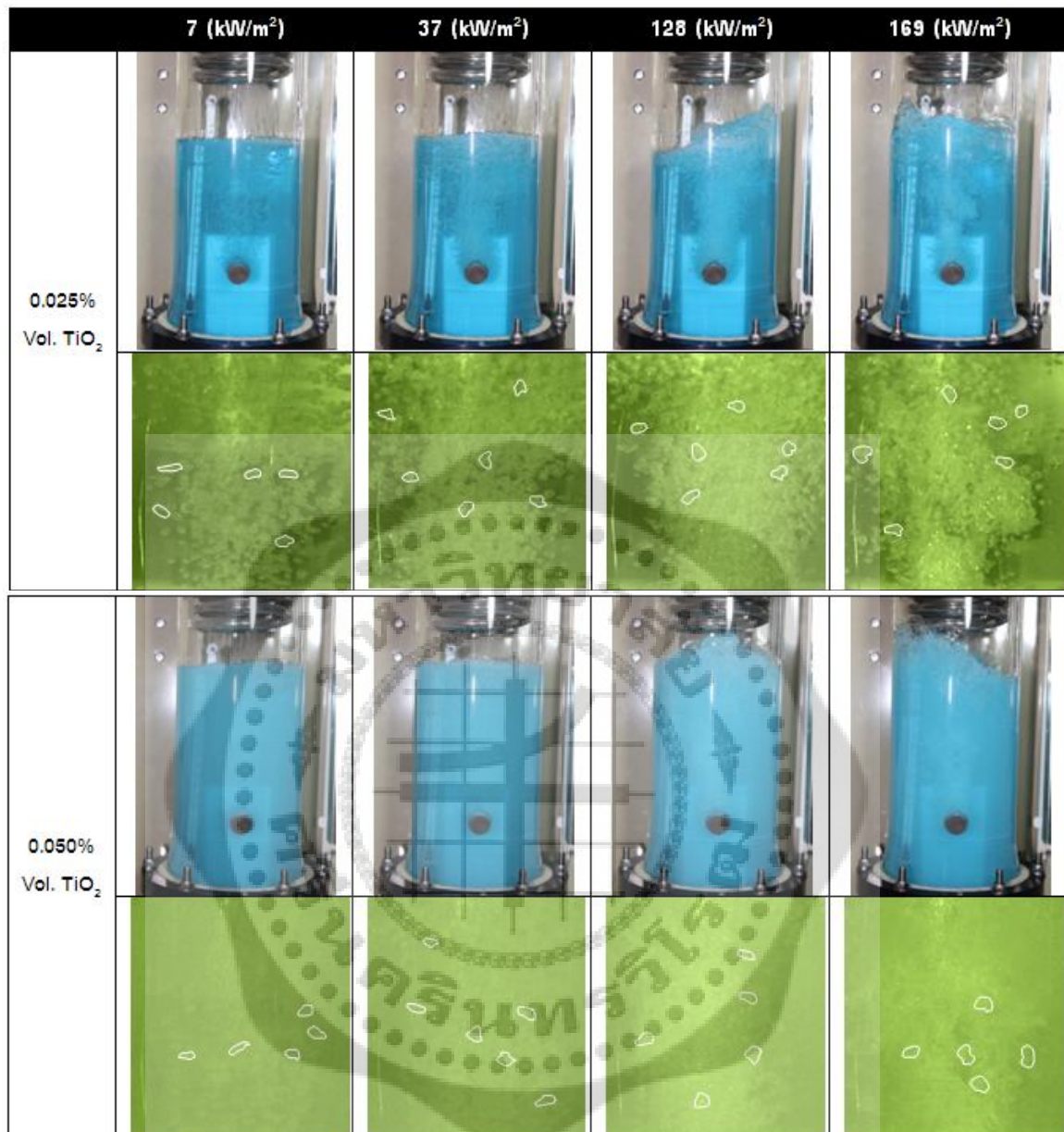
ภาพประกอบ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างและฮีตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ ความดัน 50kPa



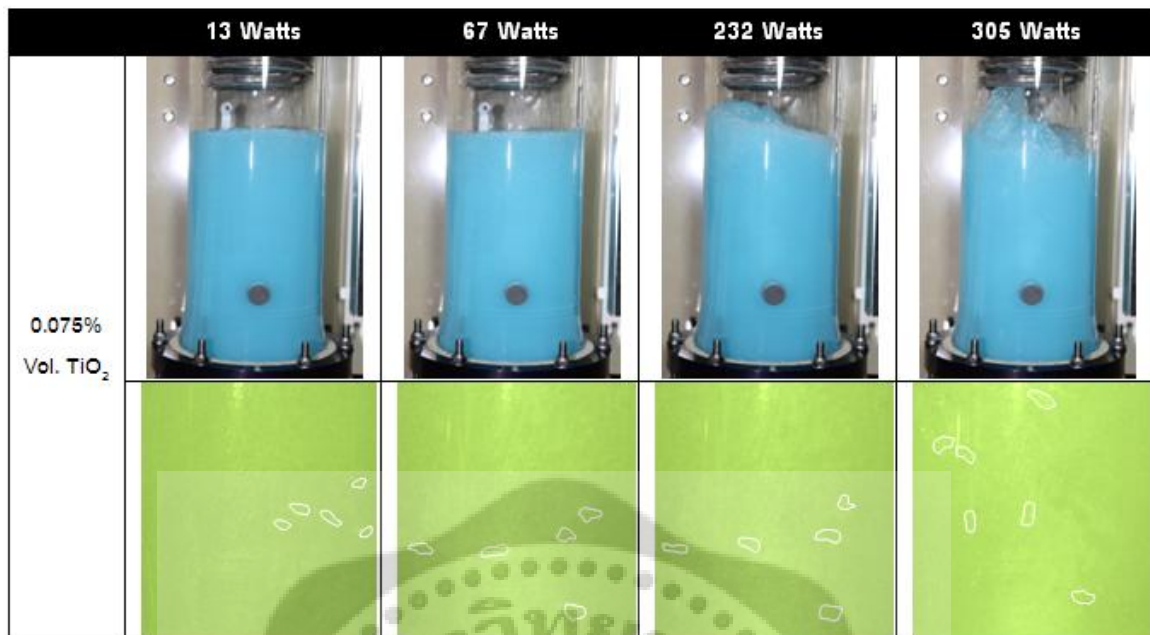
ภาพประกอบ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างและฮีตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ ความดัน 150kPa



ภาพประกอบ 48 ลักษณะการเดือดของ Ethyl alcohol และ Ethyl alcohol ผสมอนุภาคนาโน ที่ความเข้มข้นต่างๆ ตามอัตราการถ่ายเทความร้อนของแท่งฮีตเตอร์ ที่ความดันคงที่ 100kPa



ภาพประกอบ 48 (ต่อ)



ภาพประกอบ 48 (ต่อ)



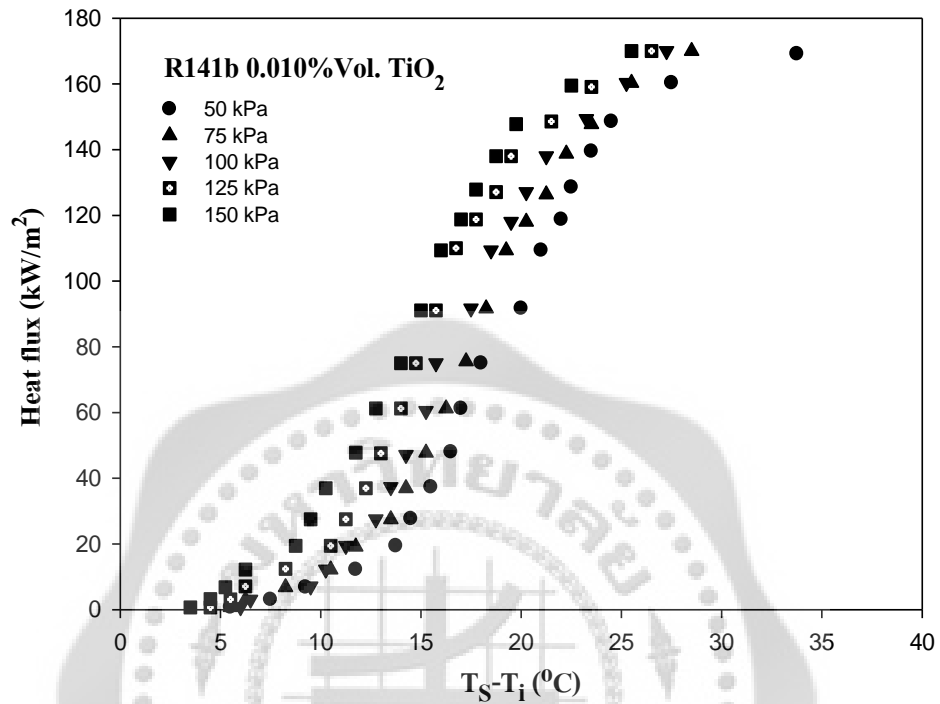
จากภาพประกอบ 44 และ 45 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิของสารทำงานกับอุณหภูมิของแท่งโลหะให้ความร้อน และฮีตฟลักซ์ ที่ความดันคงที่ 50kPa และ 150kPa โดยใช้เอทิลแอลกอฮอล์(Ethyl alcohol) และเอทิลแอลกอฮอล์(Ethyl alcohol) ผสมอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นสารทำงาน โดยแต่ละความดันที่ทดลองจะทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็น 0.010, 0.025, 0.050 และ 0.075 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าเมื่อผลต่างของอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิของสารทำงานกับอุณหภูมิของแท่งโลหะให้ความร้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ฮีตฟลักซ์มีค่าเพิ่มมากขึ้นไปด้วย และที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์(TiO_2) ต่างกันพบว่า ที่ความ 0.010 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรจะให้ค่าฮีตฟลักซ์สูงที่สุดและไม่ต่างกับการใช้สารทำความเย็นที่ไม่ผสมอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และเมื่อเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์(TiO_2) ที่ผลต่างของอุณหภูมิต่างๆ ไปที่ 0.025, 0.050 และ 0.075 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ตามลำดับ จะมีผลทำให้ค่าฮีตฟลักซ์มีค่าลดลงตามลำดับด้วยเช่นกัน โดยที่ความเข้มข้น 0.075 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรจะให้ค่าฟลักซ์ความร้อนที่ต่ำสุดและที่ความดันต่างกัน พบว่า ที่ผลต่างของอุณหภูมิต่างๆ ที่ความดันสูงจะให้ค่าฮีตฟลักซ์ที่สูงกว่าที่ความดันต่ำ โดยที่ 150kPa ให้ค่าฮีตฟลักซ์ที่สูงกว่าที่ 50kPa

จากภาพประกอบ 46 และ 47 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฮีตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ที่ความดันคงที่ 50kPa และ 150kPa โดยใช้เอทิลแอลกอฮอล์(Ethyl alcohol) และเอทิลแอลกอฮอล์(Ethyl alcohol) ผสมอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นสารทำงาน โดยแต่ละความดันที่ทดลองจะทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็น 0.010, 0.025, 0.050 และ 0.075 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรตามลำดับ จากการทดลองพบว่า เมื่อฮีตฟลักซ์มีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้นไปด้วย และที่ความเข้มข้นต่างกันพบว่า ที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) 0.010 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรจะให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดและไม่ต่างกับการใช้สารทำความเย็นที่ไม่ผสมอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และเมื่อเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์(TiO_2) ที่ฮีตฟลักซ์ค่าต่างๆ โดยเพิ่มความเข้มข้นไปที่ 0.025, 0.050 และ 0.075 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรตามลำดับ จะมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าลดลงตามลำดับเช่นกัน โดยที่ความเข้มข้น 0.075 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ต่ำที่สุดและที่ความดันต่างกันพบว่า ที่ฮีตฟลักซ์ค่าต่างๆ

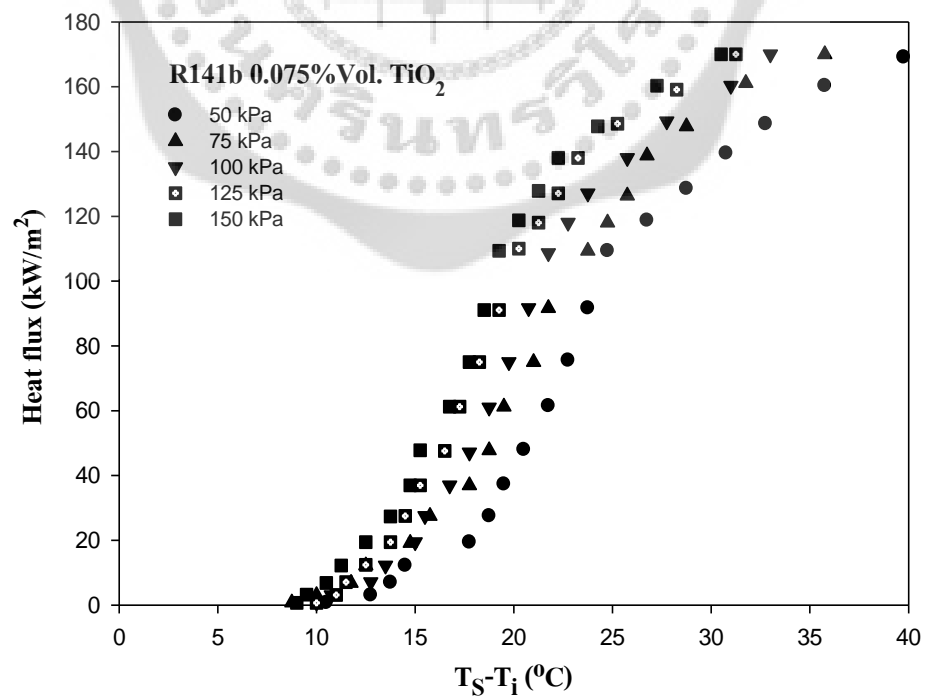
ที่ความดันสูงจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้มากกว่าที่ความดันต่ำ โดยที่ 150kPa ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากกว่าที่ 50kPa

จากภาพประกอบ 48 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการเดือดและขนาดของฟองไอจากการเดือดที่ ความดันคงที่ 100kPa โดยใช้เอทิลแอลกอฮอล์(Ethyl alcohol) และเอทิลแอลกอฮอล์(Ethyl alcohol) ผสมอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นสารทำงานในระบบ โดยทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์(TiO_2) เป็น 0.010,0.025,0.050 และ 0.075 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าฮีตฟลักซ์ค่าหนึ่งๆลักษณะการเดือดของสารทำความเย็น ความหนาแน่นของฟองไอ และขนาดของฟองไอจากการเดือดที่ความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จะไม่ต่างกับสารทำความเย็นที่ไม่ผสมอนุภาคนาโน และเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นในการทดลองไปที่ 0.025,0.050 และ0.075 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าลักษณะการเดือดจะมีความรุนแรงน้อยลงรวมถึงขนาดของฟองไอจะมีค่าเล็กลงด้วย และความหนาแน่นของฟองไอก็มีความหนาแน่นลดลงด้วยเช่นกันเมื่อเพิ่ม ค่าฮีตฟลักซ์ให้กับระบบ พบว่าลักษณะการเดือดจะมีความรุนแรงเพิ่มขึ้นขนาดของฟองไอจะมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีความหนาแน่นของฟองไอเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นเมื่อความรุนแรงของการเดือดเพิ่มขึ้นขนาดของฟองไอก็มีขนาดใหญ่ขึ้นและความหนาแน่นของฟองไอเพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

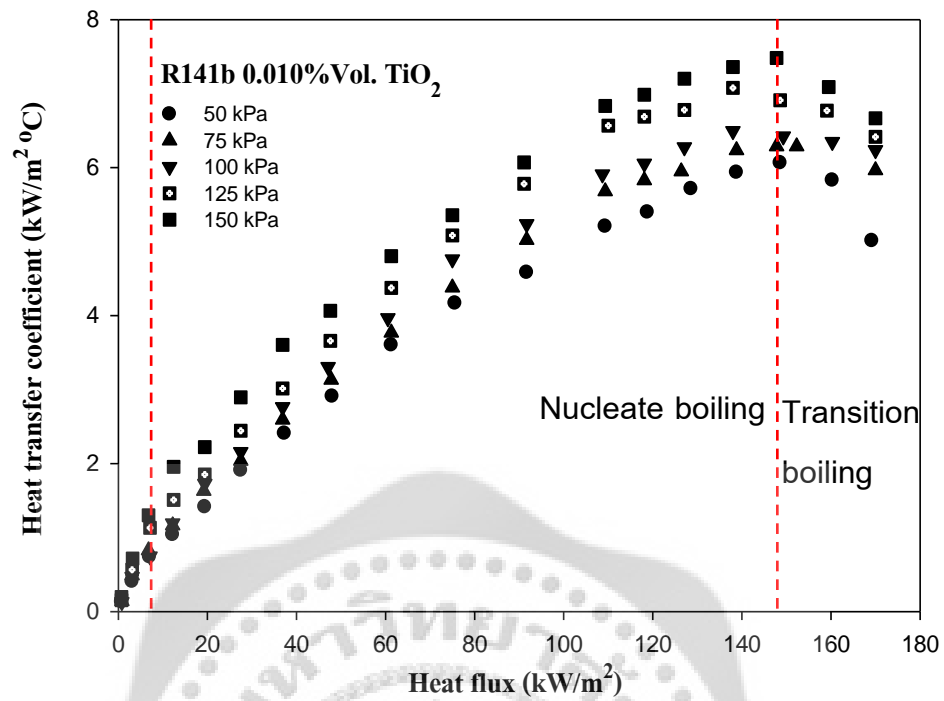
3. ผลของความดันที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงฮีตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของสารทำความเย็น R141b



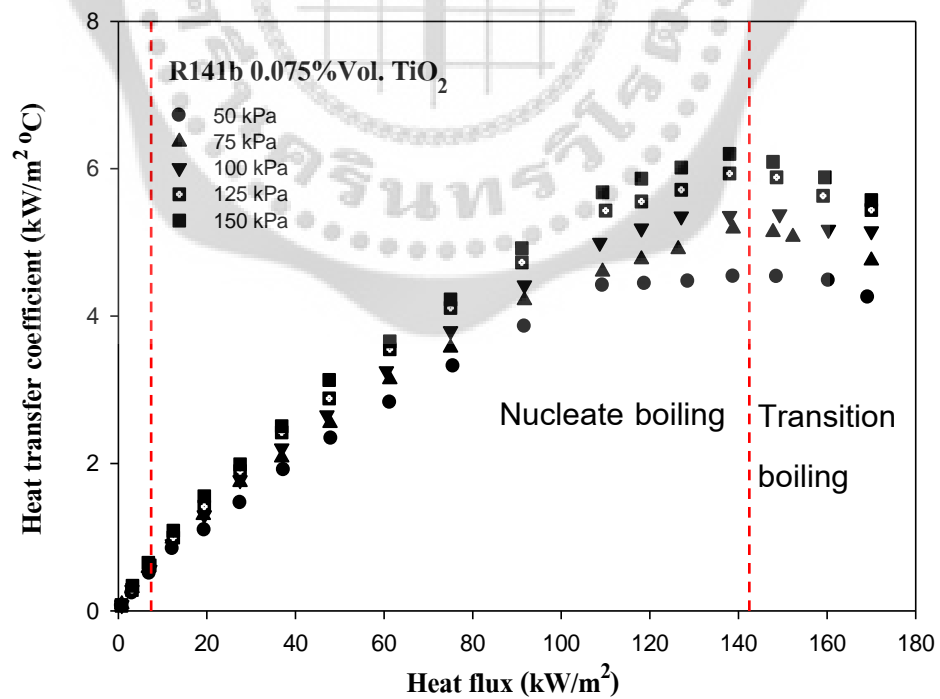
ภาพประกอบ 49 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิและฮีตฟลักซ์ที่ 0.010% Vol. TiO₂



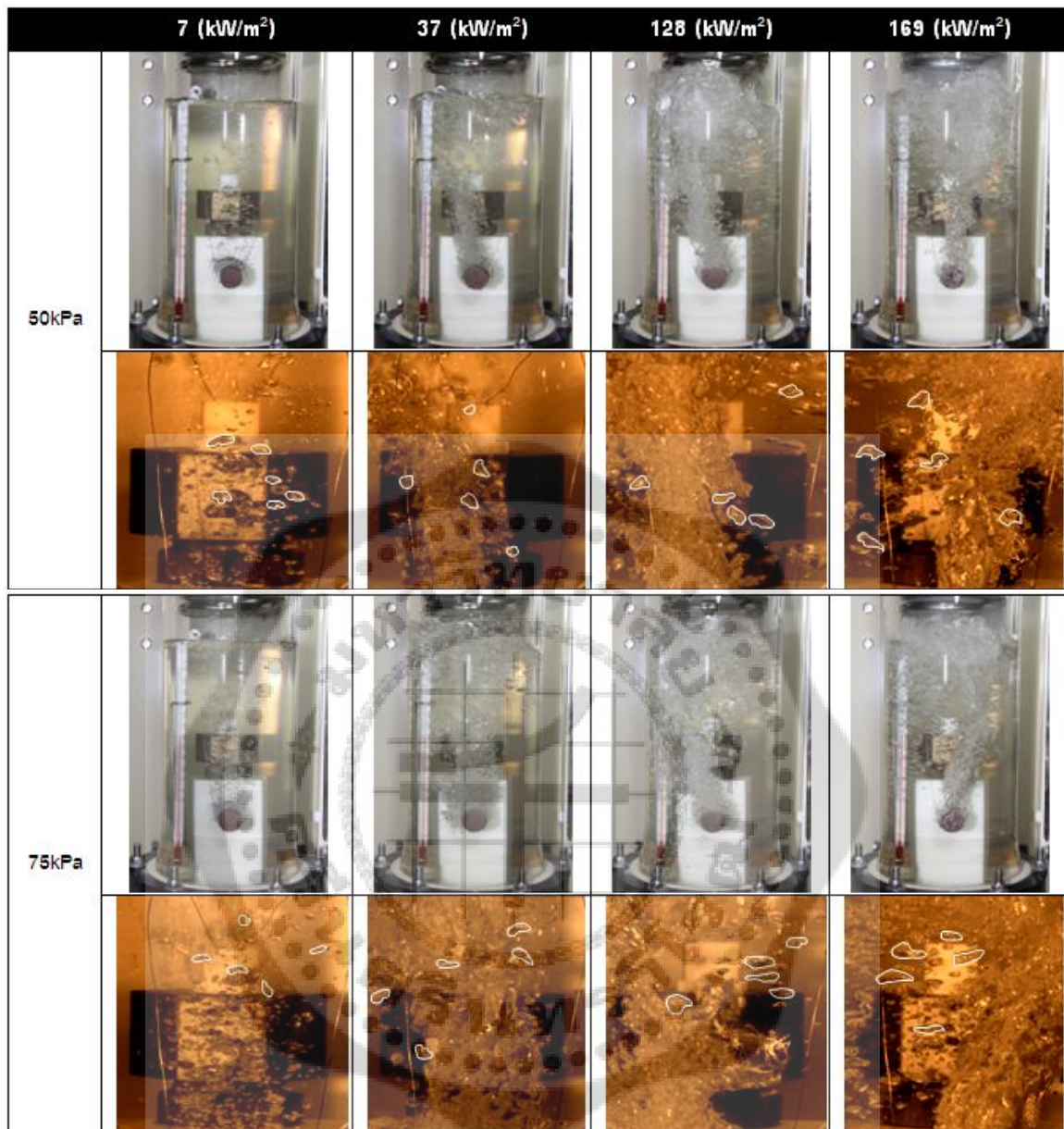
ภาพประกอบ 50 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิและฮีตฟลักซ์ที่ 0.075% Vol. TiO₂



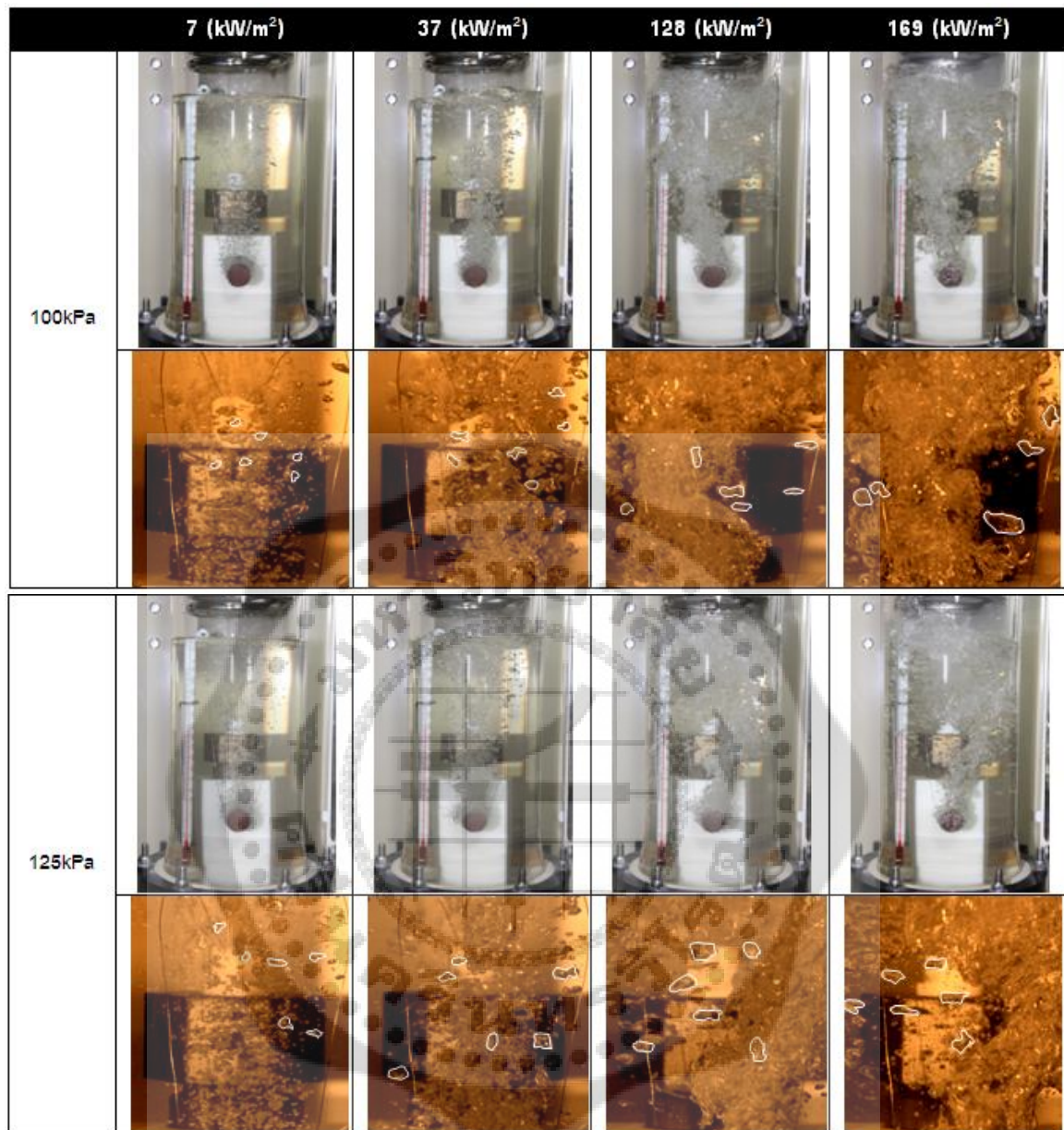
ภาพประกอบ 51 ความสัมพันธ์ระหว่างฮีตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ 0.010% Vol. TiO_2



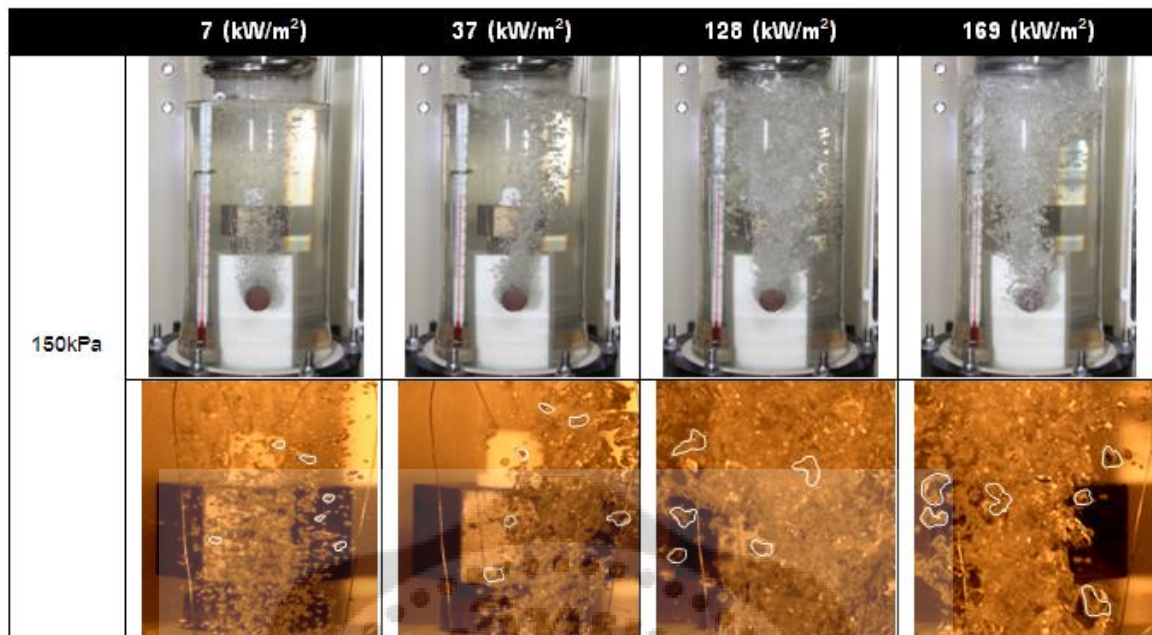
ภาพประกอบ 52 ความสัมพันธ์ระหว่างฮีตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ 0.075% Vol. TiO_2



ภาพประกอบ 53 ลักษณะการเดือดของ สารทำความเย็น R141b ผสมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่ความดันต่างๆ ตามอัตราการถ่ายเทความร้อนของแท่งฮีตเตอร์



ภาพประกอบ 53 (ต่อ)



ภาพประกอบ 53 (ต่อ)



จากภาพประกอบ 49 และ 50 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิของสารทำงานกับอุณหภูมิของแท่งโลหะให้ความร้อน และฮีตฟลักซ์ โดยใช้สารทำความเย็น R141b ผสมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.010 และ 0.075 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรเป็นสารทำงาน โดยแต่ละความเข้มข้นที่ทดลองจะทำการเปลี่ยนแปลงความดันในระบบการทดลองที่ความดัน 50kPa, 75kPa, 100kPa, 125kPa และ 150kPa ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าเมื่อผลต่างของอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิของสารทำงานกับอุณหภูมิของแท่งโลหะให้ความร้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ฮีตฟลักซ์มีค่าเพิ่มมากขึ้นไปด้วย และที่ความเข้มข้นค่าหนึ่งๆที่ความดันต่างกันพบว่า ที่ความดัน 50kPa จะให้ฮีตฟลักซ์ที่ต่ำที่สุด แต่เมื่อเพิ่มความดันไปที่ 75kPa, 100kPa, 125kPa และ 150kPa จะทำให้ฮีตฟลักซ์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ โดยที่ความดัน 150kPa จะให้ค่าฮีตฟลักซ์ที่สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับที่ความเข้มข้นของของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่ต่างกันพบว่า ที่ความเข้มข้นน้อยๆจะให้ค่าฮีตฟลักซ์สูงกว่าที่ความเข้มข้นมีค่ามาก ในทำนองเดียวกันยิ่งเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) มากขึ้นเท่าไรยิ่งทำให้ค่าฮีตฟลักซ์มีค่าลดลง

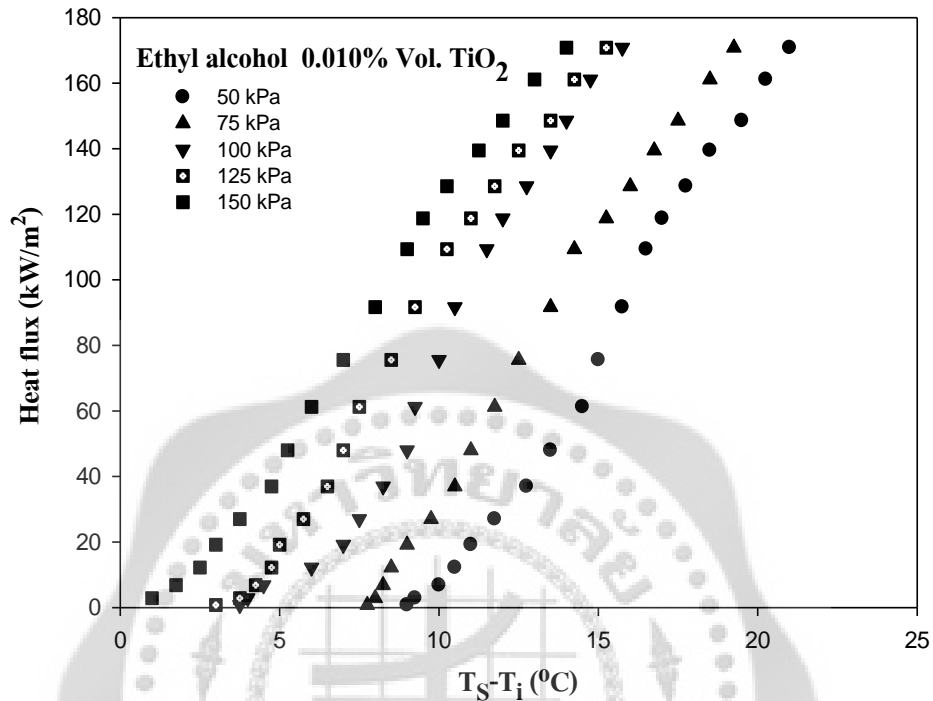
จากภาพประกอบ 51 และ 52 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฮีตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยใช้สารทำความเย็น R141b ผสมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.010 และ 0.075 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรเป็นสารทำงาน โดยแต่ละความเข้มข้นที่ทดลองจะทำการเปลี่ยนแปลงความดันในระบบการทดลองที่ความดัน 50kPa, 75kPa, 100kPa, 125kPa และ 150kPa ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าเมื่อฮีตฟลักซ์มีค่าเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นไปด้วย และที่ความเข้มข้นค่าหนึ่งๆที่ความดันต่างกันพบว่า ที่ความดัน 50kPa จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ต่ำที่สุด แต่เมื่อแต่เมื่อเพิ่มความดันไปที่ 75kPa, 100kPa, 125kPa และ 150kPa จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ โดยที่ ความดัน 150kPa จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่สูงที่สุด

จากภาพประกอบ 53 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการเดือดและขนาดของฟองไอน้ำจากการเดือดโดยใช้สารทำความเย็น R141b ผสมอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่ความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นสารทำงานในระบบ โดยทำการเปลี่ยนแปลงความดันในระบบการทดลองที่ความดัน 50kPa, 75kPa, 100kPa, 125kPa และ 150kPa ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าที่ฮีตฟลักซ์ค่าหนึ่งๆลักษณะการเดือดของสารทำความเย็น ความหนาแน่นของฟองไอน้ำจากการเดือดที่ความดันต่ำ จะมีความรุนแรงน้อยกว่าที่ความดันสูง และขนาดของฟองไอน้ำที่ความดันต่ำ

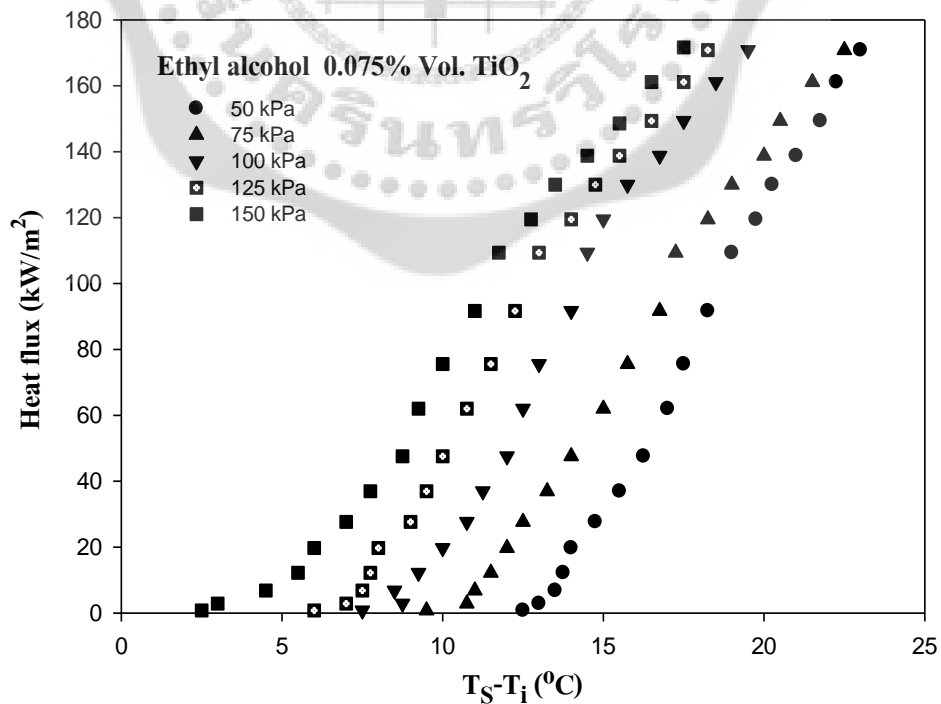
จะมีขนาดใหญ่กว่าที่ความดันสูงโดยที่ความดัน 50kPa ลักษณะการเดือดของสารทำความเย็น ความหนาแน่นของฟองไอจากการเดือดจะน้อยที่สุด แต่ขนาดของฟองไอจากการเดือดจะใหญ่ที่สุด แต่เมื่อเพิ่มความดันไปที่ 75kPa, 100kPa, 125kPa และ 150kPa ลักษณะการเดือดของสารทำความเย็น ความหนาแน่นของฟองไอ จากการเดือดจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามลำดับและมีค่าสูงสุดที่ 150kPa เมื่อเพิ่มค่าฮีตฟลักซ์ให้กับระบบ พบว่าลักษณะการเดือดจะมีความรุนแรงเพิ่มขึ้นและมีความหนาแน่นของฟองไอเพิ่มขึ้นด้วย และจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน



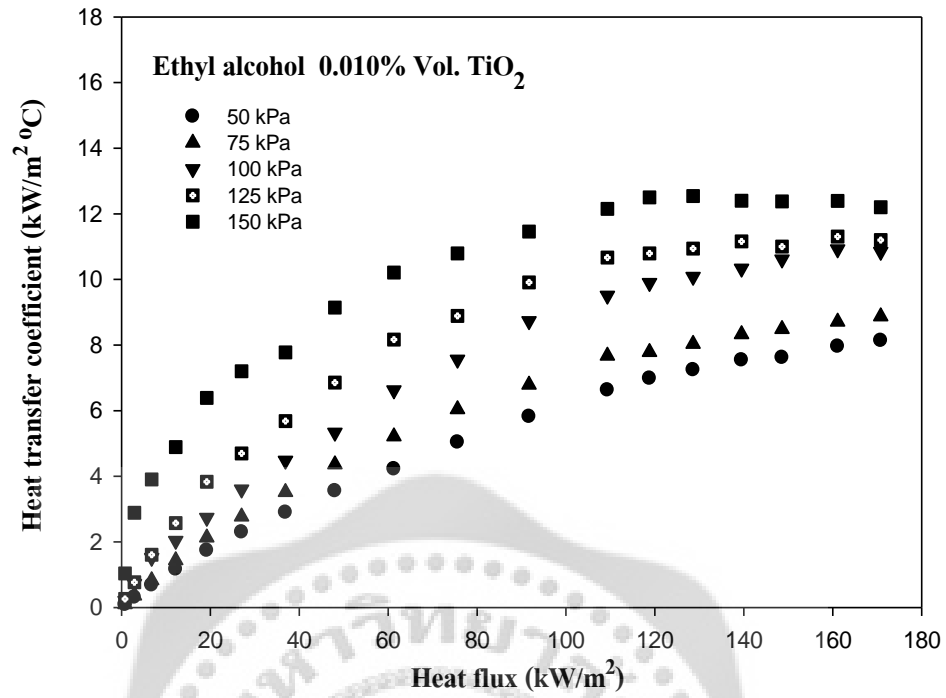
4. ผลของความดันที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงฮีตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol)



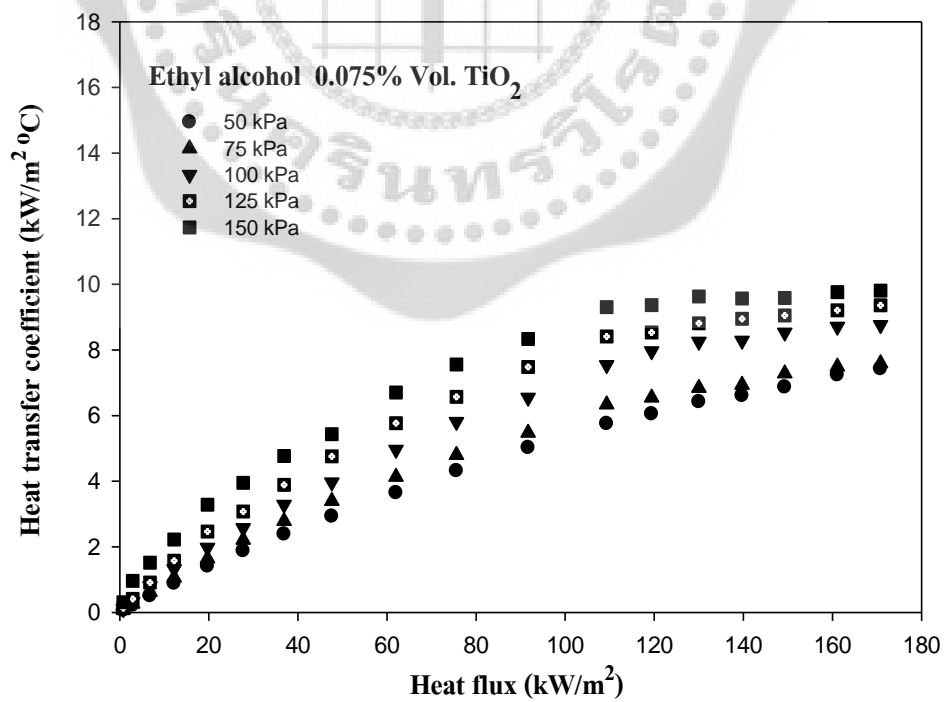
ภาพประกอบ 54 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิและฮีตฟลักซ์ที่ 0.010% Vol. TiO₂



ภาพประกอบ 55 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิและฮีตฟลักซ์ที่ 0.075% Vol.



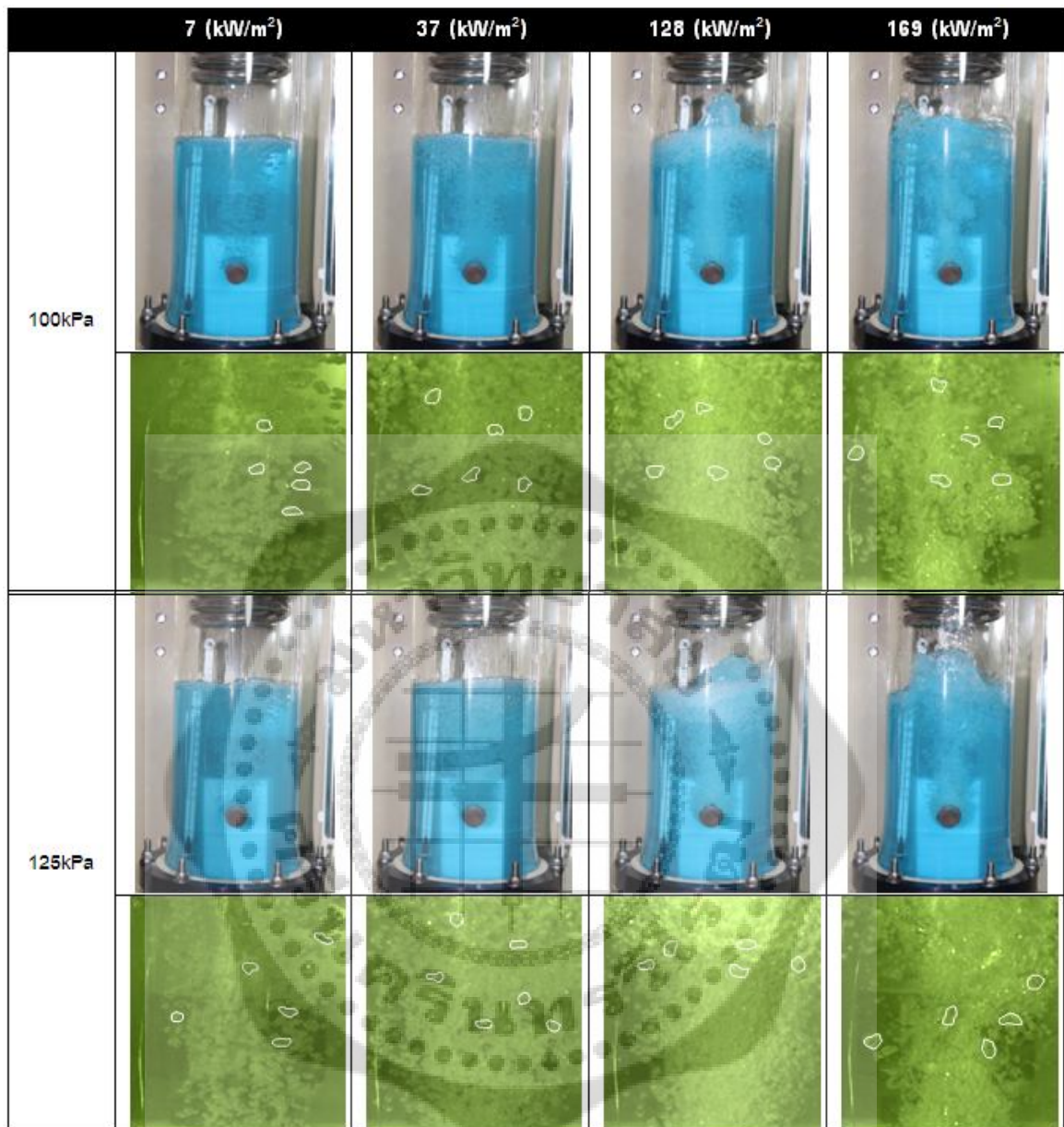
ภาพประกอบ 56 ความสัมพันธ์ระหว่างฮีตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ 0.010% Vol. TiO₂



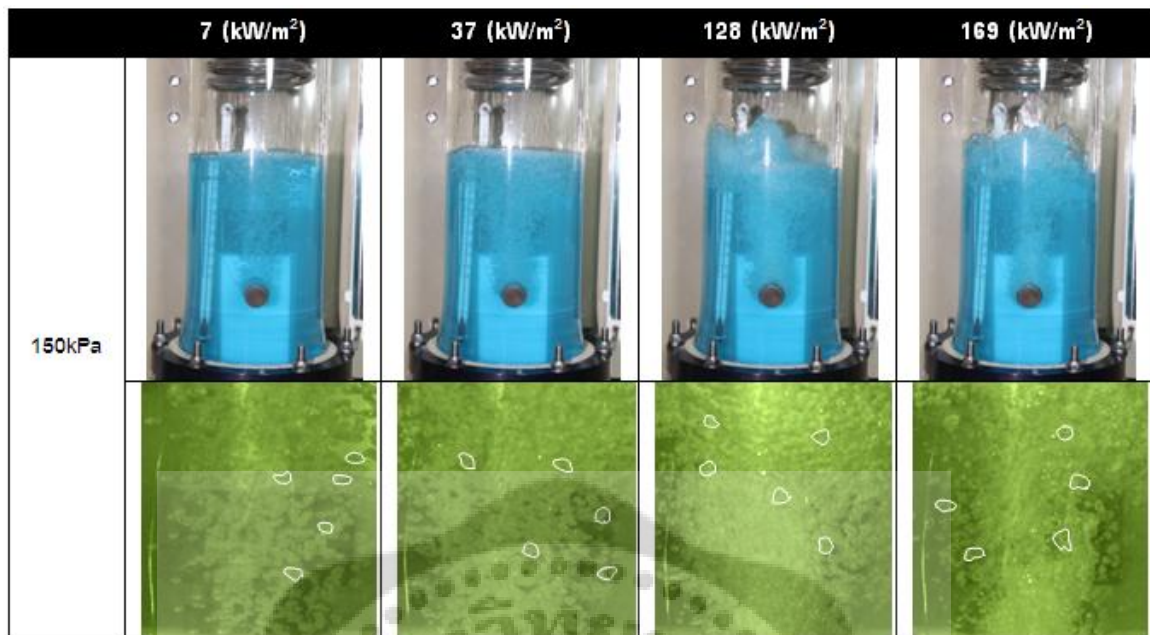
ภาพประกอบ 57 ความสัมพันธ์ระหว่างฮีตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ 0.075% Vol. TiO₂



ภาพประกอบ 58 ลักษณะการเดือดของ Ethyl alcohol ผสมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่ความดันต่างๆ ตามอัตราการถ่ายเทความร้อนของแท่งฮีตเตอร์



ภาพประกอบ 58 (ต่อ)



ภาพประกอบ 58 (ต่อ)



จากภาพประกอบ 54 และ 55 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิของสารทำงานกับอุณหภูมิของแท่งโลหะให้ความร้อน และฮีตฟลักซ์ โดยใช้เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) ผสมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.010 และ 0.075 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรเป็นสารทำงาน โดยแต่ละความเข้มข้นที่ทดลองจะทำการเปลี่ยนแปลงความดันในระบบการทดลองที่ความดัน 50kPa, 75kPa, 100kPa, 125kPa และ 150kPa ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าเมื่อผลต่างของอุณหภูมิมระหว่างอุณหภูมิของสารทำงานกับอุณหภูมิของแท่งโลหะให้ความร้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ฮีตฟลักซ์มีค่าเพิ่มมากขึ้นไปด้วย และที่ความเข้มข้นค่าหนึ่งๆที่ความดันต่างกันพบว่า ที่ความดัน 50kPa จะให้ฮีตฟลักซ์ที่ต่ำที่สุด แต่เมื่อเพิ่มความดันไปที่ 75kPa, 100kPa, 125kPa และ 150kPa จะทำให้ฮีตฟลักซ์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ โดยที่ความดัน 150kPa จะให้ค่าฮีตฟลักซ์ที่สูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่ต่างกันพบว่า ที่ความเข้มข้นน้อยๆจะให้ค่าฮีตฟลักซ์สูงกว่าที่ความเข้มข้นมีค่ามาก ในทำนองเดียวกันยิ่งเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) มากขึ้นเท่าไรยิ่งทำให้ค่าฮีตฟลักซ์มีค่าลดลง

จากภาพประกอบ 56 และ 57 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฮีตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยใช้เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) ผสมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.010 และ 0.075 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรเป็นสารทำงาน โดยแต่ละความเข้มข้นที่ทดลองจะทำการเปลี่ยนแปลงความดันในระบบการทดลองที่ความดัน 50kPa, 75kPa, 100kPa, 125kPa และ 150kPa ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าเมื่อฮีตฟลักซ์มีค่าเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นไปด้วย และที่ความเข้มข้นค่าหนึ่งๆที่ความดันต่างกันพบว่า ที่ความดัน 50kPa จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ต่ำที่สุด แต่เมื่อแต่เมื่อเพิ่มความดันไปที่ 75kPa, 100kPa, 125kPa และ 150kPa จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ โดยที่ ความดัน 150kPa จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่สูงที่สุด

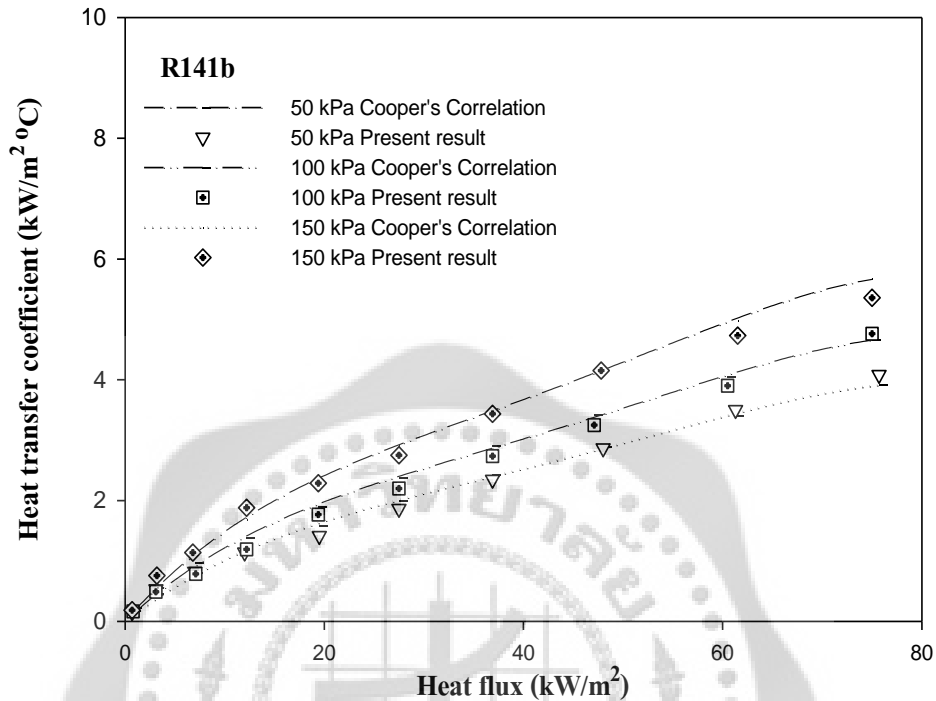
จากภาพประกอบ 58 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการเดือดและขนาดของฟองไอลจากการเดือดโดยใช้เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) ผสมอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่ความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นสารทำงานในระบบ โดยทำการเปลี่ยนแปลงความดันในระบบการทดลองที่ความดัน 50kPa, 75kPa, 100kPa, 125kPa และ 150kPa ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าที่ฮีตฟลักซ์ค่าหนึ่งๆลักษณะการเดือดของสารทำความเย็น ความหนาแน่นของฟองไอลจากการเดือดที่ความดันต่ำ จะมีความรุนแรงน้อยกว่าที่ความดันสูง และขนาดของฟองไอลที่ความดันต่ำ

จะมีขนาดใหญ่กว่าที่ความดันสูงโดยที่ความดัน 50kPa ลักษณะการเดือดของสารทำความเย็น ความหนาแน่นของฟองไอจากการเดือดจะน้อยที่สุด แต่ขนาดของฟองไอจากการเดือดจะใหญ่ที่สุด แต่เมื่อเพิ่มความดันไปที่ 75kPa, 100kPa, 125kPa และ 150kPa ลักษณะการเดือดของสารทำความเย็น ความหนาแน่นของฟองไอ จากการเดือดจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามลำดับและมีค่าสูงสุดที่ 150kPa เมื่อเพิ่มค่าฮีตฟลักซ์ให้กับระบบ พบว่าลักษณะการเดือดจะมีความรุนแรงเพิ่มขึ้นและมีความหนาแน่นของฟองไอเพิ่มขึ้นด้วย และจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

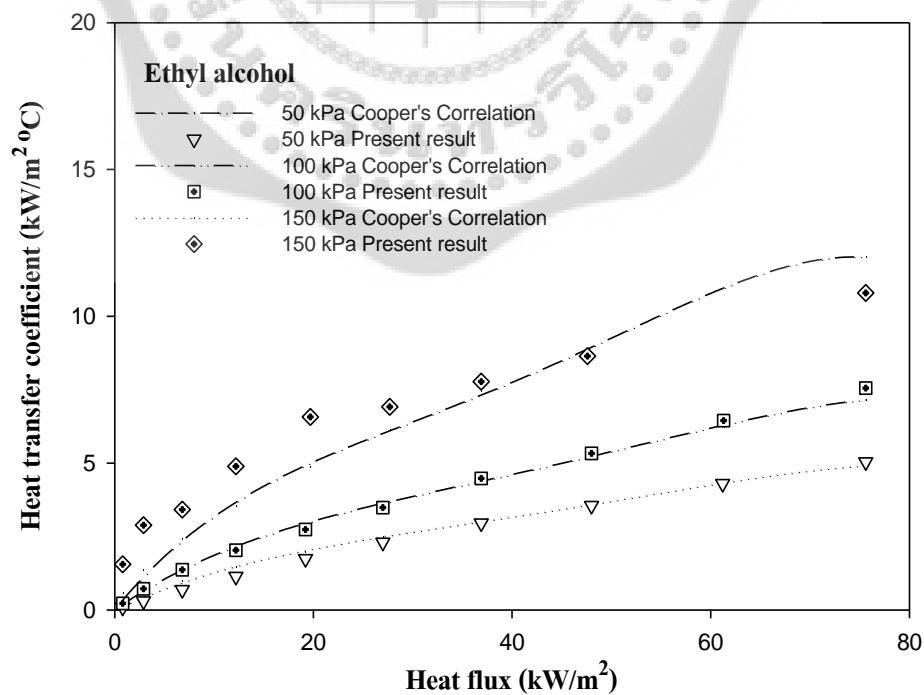


5. การเปรียบเทียบการทดลองกับสหสัมพันธ์

$$\text{Cooper's Equation } h_b = A(P_r)^{(0.12-0.2\log_{10} \varepsilon)} (-\log_{10}(P_r))^{-0.55} M^{-0.5} q^{0.67}$$

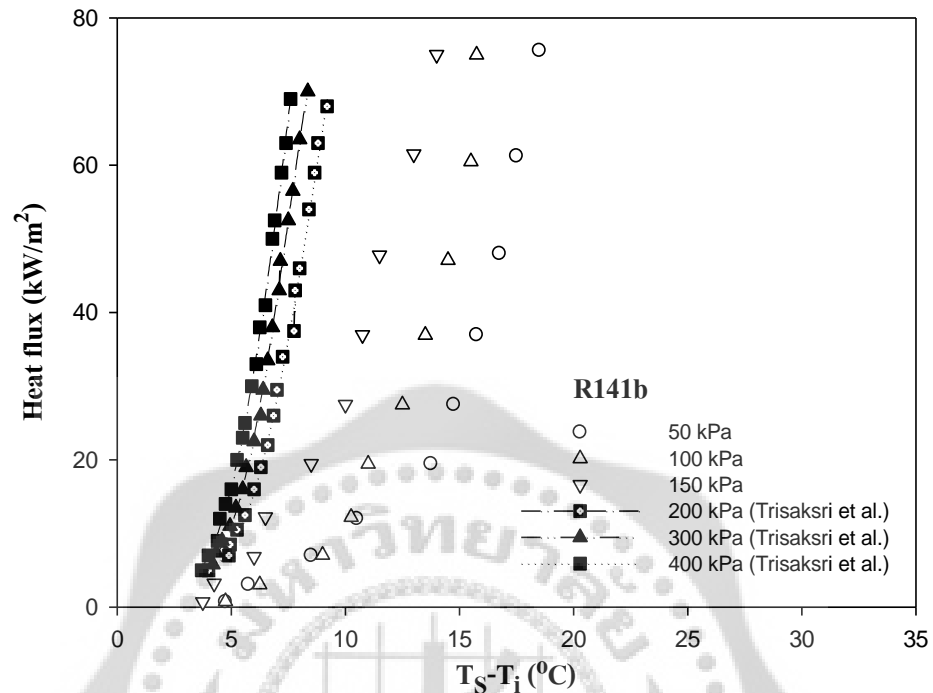


ภาพประกอบ 59 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างและฟลักซ์ความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของสารทำความเย็น R141b กับ Cooper's correlation.

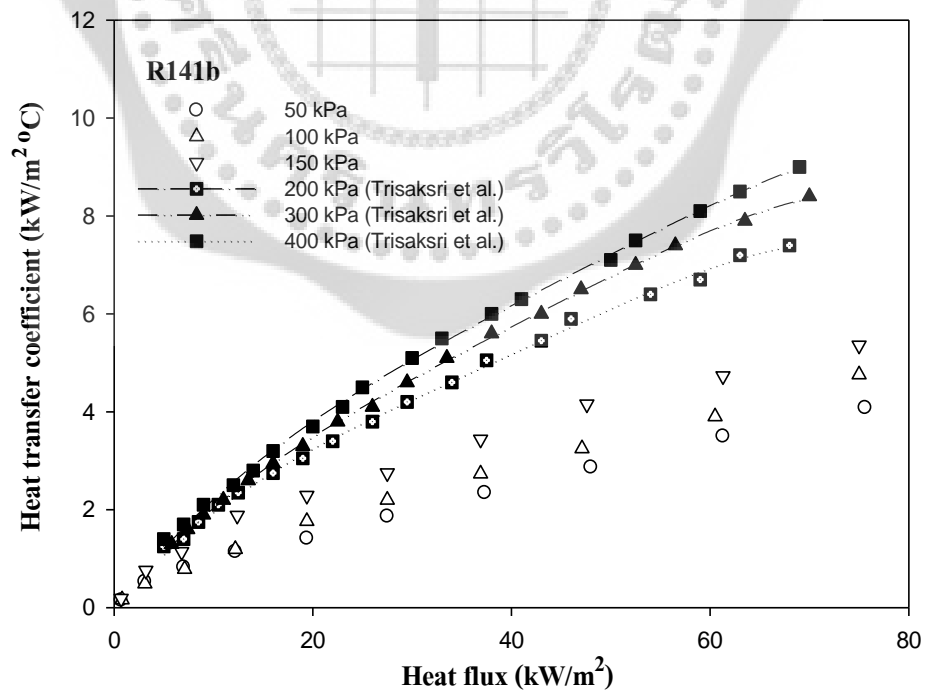


ภาพประกอบ 60 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างและฟลักซ์ความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของ Ethyl alcohol กับ Cooper's correlation.

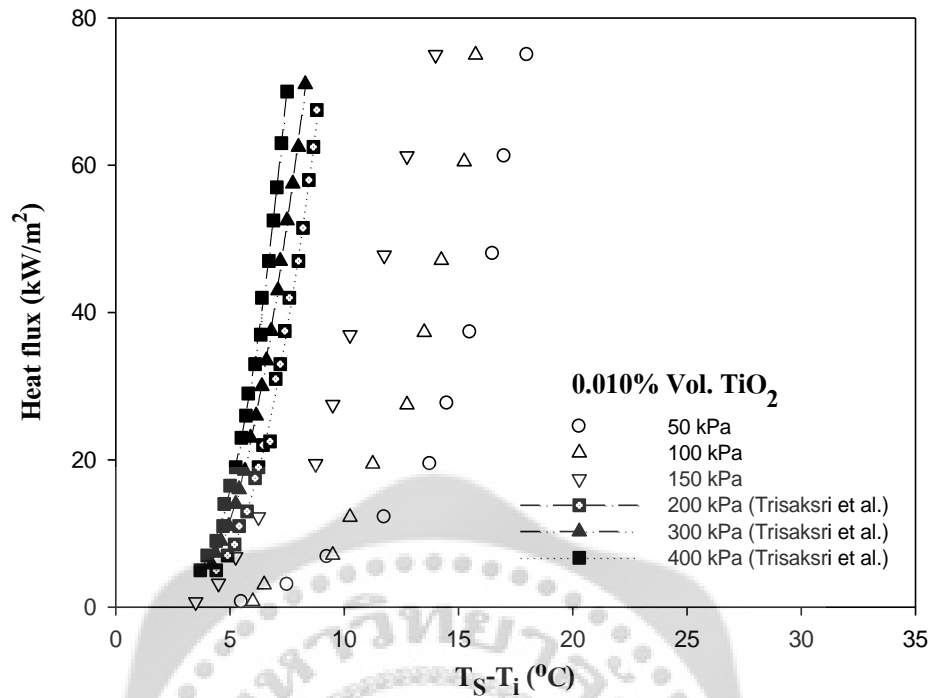
6. การเปรียบเทียบการทดลองกับผลการทดลองของนักวิจัยอื่น



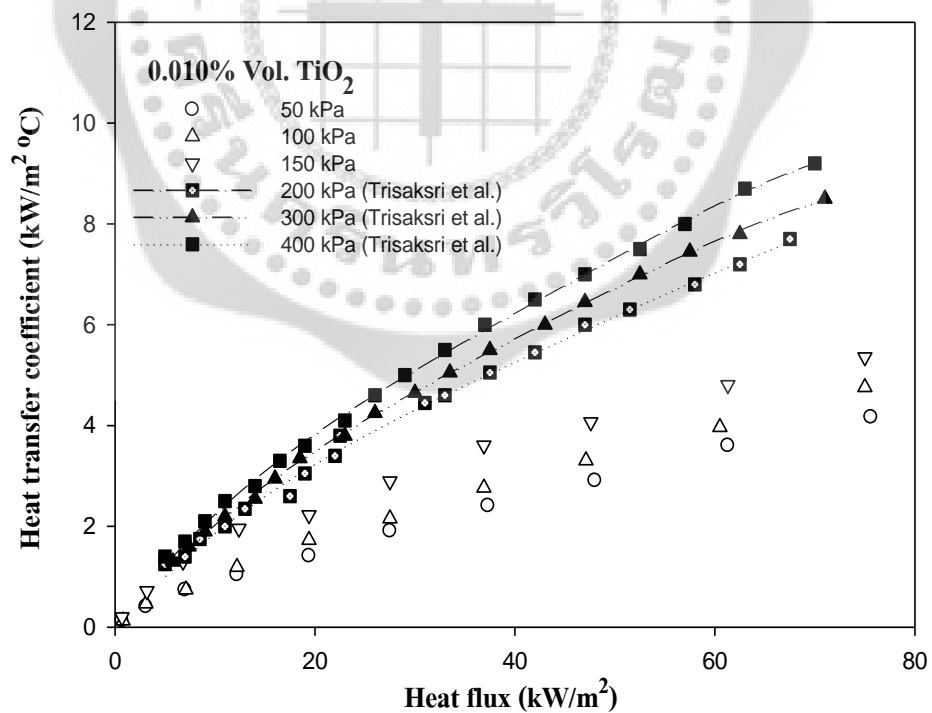
ภาพประกอบ 61 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิและฮีตฟลักซ์ของสารทำความเย็น R141b ที่ความดันต่างๆ



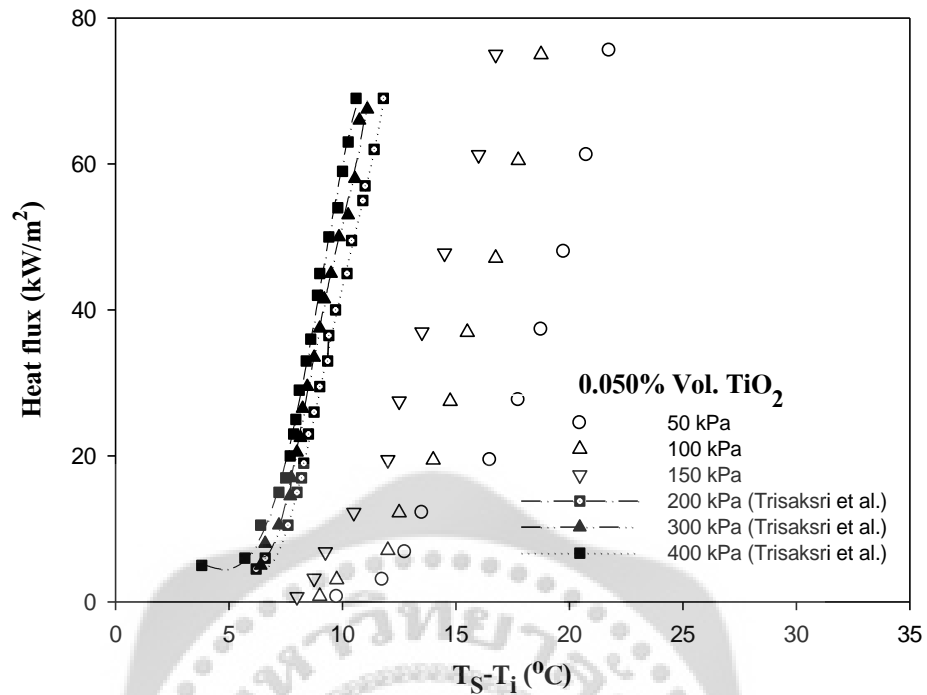
ภาพประกอบ 62 ความสัมพันธ์ระหว่างฮีตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของสารทำความเย็น R141b ที่ความดันต่างๆ



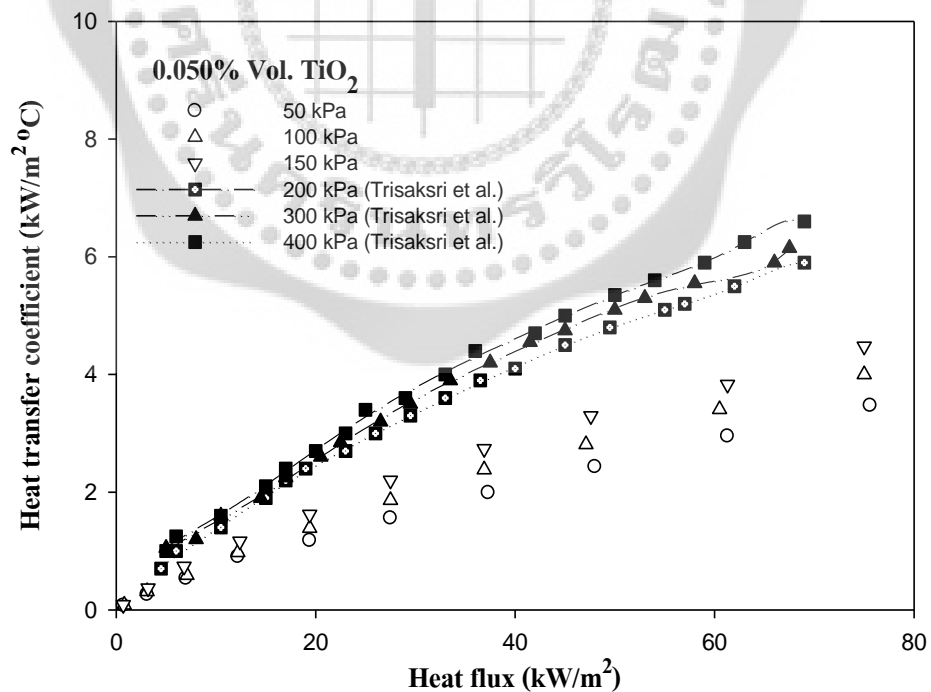
ภาพประกอบ 63 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิและฮีตฟลักซ์ของสารทำความเย็น R141b ผสมอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้น 0.010% โดยปริมาตร ที่ความดันต่างๆ



ภาพประกอบ 64 ความสัมพันธ์ระหว่างฮีตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของสารทำความเย็น R141b ผสมอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้น 0.010% โดยปริมาตร ที่ความดันต่างๆ



ภาพประกอบ 65 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิและฮีตฟลักซ์ของสารทำความเย็น R141b ผสมอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้น 0.050% โดยปริมาตร ที่ความดันต่างๆ



ภาพประกอบ 66 ความสัมพันธ์ระหว่างฮีตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของสารทำความเย็น R141b ผสมอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้น 0.050% โดยปริมาตร ที่ความดันต่างๆ

ภาพประกอบ 59 และ 60 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการทดลองกับสหสัมพันธ์ Cooper's Correlation ของสารทำความเย็น R141b และ เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) พบว่าลักษณะกราฟมีค่าเป็นไปในทิศทางเดียวกันและมีค่าใกล้เคียงกันมากจนเห็นได้ว่าเส้นกราฟของ Cooper's Correlation และ Present result ทับกันและเกือบจะเป็นเส้นเดียวกัน

ภาพประกอบ 61 การเปรียบเทียบการทดลองกับผลการทดลองของ Trisaksri et al. โดยเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิและฮีตฟลักซ์ของสารทำความเย็น R141b ที่ความดันต่างๆ พบว่าลักษณะของกราฟจากการทดลอง และของ Trisaksri et al. มีความสัมพันธ์ไปในทางเดียวกัน โดยฮีตฟลักซ์จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามความดันที่สูงขึ้น

ภาพประกอบ 62 การเปรียบเทียบการทดลองกับผลการทดลองของ Trisaksri et al. ความสัมพันธ์ระหว่างฮีตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของสารทำความเย็น R141b ที่ความดันต่างๆ พบว่าลักษณะของกราฟจากการทดลอง และของ Trisaksri et al. มีความสัมพันธ์ไปในทางเดียวกัน โดยสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามความดันที่สูงขึ้น

ภาพประกอบ 63 และ 65 การเปรียบเทียบการทดลองกับผลการทดลองของ Trisaksri et al. โดยเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิและฮีตฟลักซ์ของสารทำความเย็น R141b ผสมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.010 และ 0.050 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่ความดันต่างๆ พบว่าลักษณะของกราฟจากการทดลอง และของ Trisaksri et al. มีความสัมพันธ์ไปในทางเดียวกัน โดยฮีตฟลักซ์จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามความดันที่สูงขึ้น

ภาพประกอบ 57 และ 59 การเปรียบเทียบการทดลองกับผลการทดลองของ Trisaksri et al. ความสัมพันธ์ระหว่างฮีตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของสารทำความเย็น R141b ผสมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.010 และ 0.050 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่ความดันต่างๆ พบว่าลักษณะของกราฟจากการทดลอง และของ Trisaksri et al. มีความสัมพันธ์ไปในทางเดียวกัน โดยสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามความดันที่สูงขึ้น

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการทดลองเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนของการเดือดแบบพูลของสารทำความเย็นผสมอนุภาคนาโนอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ โดยการ การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารทำงาน และทดลองที่ความดันต่างกันสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ที่ความเข้มข้นของสารทำความเย็นผสมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 0.010 เปอร์เซนต์โดยปริมาตรจะให้การถ่ายเทความร้อนจากการเดือด ไม่ต่างจากการใช้สารทำความเย็นที่ไม่ผสมอนุภาคนาโน ทั้งใน R141b และ Ethyl alcohol

2. ที่ความเข้มข้นน้อยมากๆ เกือบจะไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนจากการเดือด

3. เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารทำความเย็นผสมอนุภาคนาโนเป็น 0.025 0.050 และ 0.075 เปอร์เซนต์โดยปริมาตร พบว่าทำให้การถ่ายเทความร้อนจากการเดือดแบบพูลลดลง ทั้ง R141b และ Ethyl alcohol แสดงว่า สัมประสิทธิ์เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนจากการเดือดจะลดลงตามปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในสารทำงาน

4. การเพิ่มความเข้มข้นของสารทำความเย็นผสมอนุภาคนาโน จะทำให้กระบวนการของการเดือดมีความล่าช้าขึ้นในขณะที่อุณหภูมิของแท่งโลหะจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

5. ที่ฟลักซ์ความร้อนค่าเดียวกันสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของสารทำงานที่มีความเข้มข้นสูง จะมีค่าต่ำกว่า สารทำงานที่มีความเข้มข้นต่ำ โดยจะเห็นได้ชัดเจนในช่วงที่ฟลักซ์ความร้อนมีค่าสูงๆ

6. ที่ความดันสูงจะส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนจากการเดือดแบบพูลมีค่าเพิ่มขึ้นไปด้วย และจากการทดลองพบว่า ที่ความดัน 50kPa การถ่ายเทความร้อนจากการเดือดจะมีค่าต่ำที่สุด และที่ความดัน 150kPa การถ่ายเทความร้อนจากการเดือดจะมีค่าสูงที่สุด

7. ที่ปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคสูง ผลของความดัน ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน จะมีค่าน้อยกว่าที่ปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคที่ต่ำ

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

การศึกษาเกี่ยวกับลักษณะเฉพาะเนื่องจากการเดือดแบบพุดของสารทำความเย็นผสมอนุภาคนาโน บนพื้นผิวให้ความร้อนที่มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกที่วางในแนวนอนโดยศึกษาผลของความดันที่มีความสัมพันธ์กับลักษณะการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพุด จากการศึกษาวิจัยนั้นเป็นการวิจัยที่มีขอบเขที่ยังกว้างอยู่ และมีผู้ที่ศึกษาไม่มากนัก ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาที่ความดันบางช่วง เนื่องจากมีขีดจำกัดในด้านอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และสารที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งสามารถทำการวิจัยเพิ่มเติมในเงื่อนไขอื่นๆได้ อย่างเช่น

1. อาจเปลี่ยนสารทำงานเป็นชนิดอื่นที่แตกต่างกันออกไป
2. อาจทดลองที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่น้อยกว่า 0.010 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
3. อาจทำการทดลองที่ขนาดของอนุภาคนาโนที่แตกต่างกันเพื่อศึกษาและหาขนาดที่เหมาะสมกับการใช้งานจริง
4. อาจทดลองเปลี่ยนอนุภาคนาโนชนิดอื่นๆที่ให้ค่าการนำความร้อนที่สูงกว่าไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)



บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- นักสิทธิ์ คุ้มพัฒนาชัย. (2535). *การถ่ายเทความร้อน*. ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, กรุงเทพฯ.
- มนตรี พิรุณเกษตร. (2542). *การถ่ายเทความร้อน ฉบับเตรียมสอบและเสริมประสบการณ์*. วพ. วิทยพัฒน์, กรุงเทพฯ.
- J.P. Holman. (2002). *Heat Transfer*. 9th Edition. International Edition. McGraw-Hill Book Company.
- M.N. Ozisik.(1985). *Heat Transfer*. International Edition. Mc-Graw-Hill Book Company.
- F.P. Incropera, D.P. Dittus. (1996). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley&Sons, Inc.
- F.M. White. (1988). *Heat and Mass Transfer*. International Edition. Addison Wesley.
- Das S.K.; Putra N.; & Roetzel W. (2003). Pool boiling characteristics of nanofluids. In *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 46: 851-862.
- You S.M.; Kim J.H.; & Kim K.H.(2003). Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer. *Applied Physics Letters*. 44: 3374-3376.
- Mamut E. (2004). Characterization of heat and mass transfer properties of nanofluids. In *General Physics Ovidius*. University of Constanta, 124 Mamaia Av. 8700 Constanta, Romania
- Gilles Roy; Cong Tam Nguyen; & Paul-Rene Lajoie. (2004). Numerical investigation of laminar flow and heat transfer in a radial flow cooling system with the use of nanofluids. In *Superlattices and Microstructures*. 35: 497-511.
- Wen D.; & Ding Y. (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*. 47: 5181-5188.
- Zhou D.W. (2004). Heat transfer enhancement of copper nanofluid with acoustic cavitation. In *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 47: 3109-3117.
- Li Wang C.H.; & Peng B.X. (2004). On the pool boiling of subcooled nano-particle suspension. Paper presented in the 6th *International Symposium on Heat transfer*. Beijing. China. June 15-19. 2004

- Vassallo P.; Kumar R.; & Arnico, S.D. (2004). Pool boiling heat transfer experiments in silica-water nanofluid. In *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 47: 407-411.
- Sidi El Becaye Maiga; Cong Tam Nguyen; Nicolas Galanis; & Gilles Roy. (2004). Heat transfer behaviours of nanofluids in a uniformly heated tube. In *Superlattices and Microstructures*. 35: 543-557.
- Visinee Trisaksri; & Somchai Wongwises. (2005). Critical review of heat transfer characteristics of nanofluids. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 11: 512-523.
- Bang I.C.; & Chang S.H. (2005). Boiling heat transfer performance and phenomena of Al_2O_3 - water nano-fluids from a plain surface in a pool. In *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 48: 2407-2419.
- Ding Y.; & Wen D. (2005). Particle migration in a flow of nanoparticle suspensions. In *Powder Technology*. 149: 84-92.
- Koo J.; & Kleinstreuer C. (2005). Laminar nanofluid flow in microheat-sinks. In *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 48: 2652-266.
- Min-Sheng Liu; Ching-Cheng Lin; I-Te Huang; & Chi-Chuan Wang. (2005). Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids. In *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 32: 1202-1210.
- Shung-Wen Kang; Wei-Chiang Wei; Sheng-Hong Tsai; & Shih-Yu Yang. (2006). Experimental investigation of silver nano-fluid on heat pipe thermal performance. In *Applied Thermal Engineering*. 26: 2377-2382.
- Lei Gao; & Xiao Feng Zhou. (2006). Differential effective medium theory for thermal conductivity in nanofluids. In *Physics Letters A*. 348: 355-360.
- Chein R.; & Chuang J. (2006). Experimental microchannel heat sink performance studies using nanofluids. In *International Journal of Thermal Sciences*. 46: 57-66.
- Zeinali Heris S.; Etemad S.Gh.; & Nasr Esfahany M. (2006). Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer. In *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 33: 529-535.

- Jinping Li; Deqing Liang; Kaihua Guo; Ruzhu Wang; & Shuanshi Fan. (2006). Formation and dissociation of HFC134a gas hydrate in nano-copper suspension. In *Energy Conversion and Management*. 47: 201-210.
- Samy Joseph Palm; Gilles Roy; & Cong Tam Nguyen (2006). Heat transfer enhancement with the use of nanofluids in radial flow cooling systems considering temperature-dependent properties. In *Applied Thermal Engineering*. 26: 2209-2218.
- Hwang Y.; Park H.S.; Lee J.K.; & Jung W.H. (2006). Thermal conductivity and lubrication characteristics of nanofluids. In *Current Applied Physics*. 34: 67-71.
- Kim H.; Kim J.; & Kim M. (2006). Experimental study on characteristics of water-TiO₂ nanofluids. In *Nuclear Engineering and Technology*. 38: 61-68.
- Ridha Ben Mansour; Nicolas Galanis; & Cong Tam Nguyen. (2007). Effect of uncertainties in physical properties on forced convection heat transfer with nanofluids. In *Applied Thermal Engineering*. 27: 240-249.
- Xiang-Qi Wang; & Arun S. Mujumdar. (2007). Heat transfer characteristics of nanofluids. a review. In *International Journal of Thermal Sciences*. 46: 1-19.
- Cong Tam Nguyen; Gilles Roy; Christian Gauthier; & Nicolas Galanis. (2007). Heat transfer enhancement using Al₂O₃-water nanofluid for an electronic liquid cooling system. In *Applied Thermal Engineering*. 27: 1501-1506.
- Yurong He; Yi Jin; Haisheng Chen; Yulong Ding; Daqiang Cang; & Huilin Lu. (2007). Heat transfer and flow behavior of aqueous suspensions of TiO₂nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe. In *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 50: 2272-2281.
- Zhen-hua Liu; Jian-guo Xiong; & Ran Bow.(2007). Boiling heat transfer characteristics of nanofluids in a flat heat pipe evaporator with micro-grooved heating surface. In *International Journal of Multiphase Flow*. 33: 1284-1295.
- Kim S.J.; Bang I.C.; Buongiorno J.; & Hu L.W. (2007). Surface wettability change during pool boiling of nanofluid and its effect on critical heat flux. In *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 50: 4105-4116.
- Johnathan S.Courey; & Jungho kim.(2008). Nanofluid boiling: The effect of surface wettability. In *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 29: 1577-1585.

- Zhen-hua Liu; & Liang Liao (2008). Sorption and agglutination phenomenon of nanofluids on a plain heating surface during pool boiling. In *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 51: 2593–2602.
- Lotfi H.; & Shafii M.B. (2009). Boiling heat transfer on a high temperature silver sphere in nanofluid. *International Journal of Thermal Sciences*. 48: 2215–2220.
- Hao Penga; Guoliang Dinga; Weiting Jianga; Haitao Hua; & Yifeng Gaob.(2009). Heat transfer characteristics of refrigerant-based nanofluid flow boiling inside a horizontal smooth tube. In *International journal of refrigeration*. 32: 1259–1270.
- Hao Penga; Guoliang Dinga; Weiting Jianga; Haitao Hua; & Yifeng Gaob. (2009). Measurement and correlation of frictional pressure drop of refrigerant-based nanofluid flow boiling inside a horizontal smooth tube. In *International journal of refrigeration*. 32: 1756 – 1764.
- Visinee Trisaksri; & Somchai Wongwises. (2009). Nucleate pool boiling heat transfer of TiO₂-R141b nanofluids. In *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 52: 1582–1588.
- Ho Seon Ahn; Hyungdae Kim; HangJin Jo; SoonHo Kang; WonPyo Chang; & Moo Hwang Kim .(2010). Experimental study of critical heat flux enhancement during forced convective flow boiling of nanofluid on a short heated surface. In *International Journal of Multiphase Flow*. 36: 375–384.
- Mounir Boudouh; Hasan Louahlia Gualous; & Michel De Labachellerie. (2010). Local convective boiling heat transfer and pressure drop of nanofluid in narrow rectangular channels. In *Applied Thermal Engineering*. 30: 2619-2631.
- Hao Peng; Guoliang Ding; Haitao Hua; Weiting Jiang; Dawei Zhuang; & Kaijian Wangb. (2010). Nucleate pool boiling heat transfer characteristics of refrigerant/oil mixture with diamond nanoparticles. In *International journal of refrigeration*. 33: 347–358.
- Suriyawong S.; & Wongwises S. (2010). Nucleate pool boiling heat transfer characteristics of TiO₂-Water nanofluids at very low concentrations. In *Experimental Thermal and Fluid Science*. 34: 992-999.

Tae Il Kim; Won Joon Chang; & Soon Heung Chang. (2011). Flow boiling CHF enhancement using Al_2O_3 nanofluid and an Al_2O_3 nanoparticle deposited tube. In *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 54: 2021–2025.

Abdurrahim Bolukbasi; & Dogan Ciloglu. (2011). Pool boiling heat transfer characteristics of vertical cylinder quenched by SiO_2 -water nanofluids. In *International Journal of Thermal Sciences*. 50: 1013-1021.

Sourav Mitra; Sandip K. Saha; Subhrakanti Chakraborty; & Sumitesh Das. (2012). Study on boiling heat transfer of water- TiO_2 and water MWCNT nanofluids based laminar jet impingement on heated steel surface. In *Applied Thermal Engineering*. 37: 353-359.

Abedini E.; Behzadmehr A.; Sarvari S.M.H.; & Mansouri S.H. (2013). Numerical investigation of sub cooled flow boiling of a nanofluid. In *International Journal of Thermal Sciences*. 64: 232-239.

Alejandro Mourgues; Virginie Hourtan; Thierry Muller; & Marylise Caron-Charles. (2013). Boiling behaviors and critical heat flux on a horizontal and vertical plate in saturated pool boiling with and without ZnO nanofluid. In *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 57: 595–607.

Mohammad Reza Raveshi; Ali Keshavarz; Mohammad Salemi Mojarrad; & Shayan Amiri. (2013). Experimental investigation of pool boiling heat transfer enhancement of alumina–water–ethylene glycol nanofluids. In *Experimental Thermal and Fluid Science*. 44: 805–814.

<http://www.jsunat.com/cmstoday/index>.

<http://th.wikipedia.org>

http://lenr.qumbu.com/rossi_ecat_steam_v410.

<http://www.chumphon.kmitl.ac.th/me/images/stories/km/km001.pdf>

<http://www.kostic.niu.edu>

<http://www.foremed.md.kku.ac.th>





รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

A	=	พื้นที่ผิวของปริมาตร	m^2
C_p	=	ค่าความร้อนเฉพาะ	$kJ/kg.K \ C_R$
f	=	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน	
g	=	ความเร่งอันเนื่องมาจากแรงดึงดูดของโลก	m/s
h	=	สัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อน	$W/m^2.C$
h_L	=	ค่าการสูญเสียหลัก	m
h_m	=	ค่าการสูญเสียรอง	m
m	=	มวลของของไหล	kg
m'	=	อัตราการไหลของการไหล	kg/s
P	=	ความดันของของไหล	Pa
\bar{P}	=	ความดันเฉลี่ยของของไหล	Pa
t	=	เวลา	
u	=	ความเร็วของของไหล	m/s
\bar{u}	=	ความเร็วของของไหลเฉลี่ย	m/s
T	=	อุณหภูมิ	$^{\circ}C$
x, y, z	=	ระยะตามแกนตั้งฉาก x, y, z	m
u, v, w	=	ความเร็วของแกนตั้งฉาก x, y, z	m/s
$C_{1\varepsilon}$	=	ค่าคงที่ของสมการ $k-\varepsilon$ Model	
$C_{2\varepsilon}$	=	ค่าคงที่ของสมการ $k-\varepsilon$ Model	
C_{μ}	=	ค่าคงที่ของสมการ $k-\varepsilon$ Model	
ε	=	อัตราการสลายของความปั่นป่วน	m^2/s^3
μ	=	ความหนืดสมบูรณ์ของของไหล	m^2/s
μ_t	=	ค่าความหนืดของความปั่นป่วน	m^2/s
ρ	=	ความหนาแน่น	kg/m^3
Q	=	อัตราการถ่ายเทความร้อน	$Watts$
ϕ	=	ฮีตฟลักซ์	kW/m^2

รายการสัญลักษณ์(ต่อ)

สัญลักษณ์

E	=	แรงดันไฟฟ้า	<i>Volts</i>
I	=	กระแสไฟฟ้า	<i>Amps</i>
ΔT	=	ความแตกต่างของอุณหภูมิ	$^{\circ}C$
T_s	=	อุณหภูมิของแท่งฮีตเตอร์	$^{\circ}C$
T_i	=	อุณหภูมิของสารทำความเย็น	$^{\circ}C$
ε	=	ค่าความราบเรียบของพื้นผิว	μm
q	=	ฮีตฟลักซ์	kW / m^2
h_b	=	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการเดือด	kW / m^2
P_r	=	ค่าความดันลด	<i>kPa</i>
P_c	=	ค่าความดันวิกฤติ	<i>kPa</i>
M	=	มวลโมเลกุล	<i>g / mol</i>



ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นายชัชวาล ทองจริง
วันเดือนปีเกิด	21 เมษายน 2529
สถานที่เกิด	อุดรธานี
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	118 หมู่ 2 ต.หนองสระปลา อ.หนองหาน จ.อุดรธานี 41320
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ.2545	มัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียนประจักษ์ศิลปาคาร
พ.ศ.2548	มัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนอุดรพิทยานุกูล
พ.ศ.2552	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
พ.ศ.2557	ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ