

การศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของครีบบระบายความร้อน
แบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กในของไหลนาโนไททาเนียม

ปริญญานิพนธ์
ของ
เลิศศักดิ์ นาครินทร์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

กันยายน 2552

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

๙ ๓ ๖ ๓ ๔ ๖ ๘

การศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของครีบบระบายความร้อน
แบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กในของไหลนาโนไททาเนียม



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
กันยายน 2552

เลอศักดิ์ นาครินทร์. (2552). การศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของครีบบระบายความร้อนแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กในของไหลนาโนไททาเนียม. ปรินซ์นิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
คณะกรรมการควบคุม: รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล นาผล, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชัย อัสภุมงคล, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑารัตน์ คุรุเจริญ.

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาโดยการทดลองเกี่ยวกับคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนของครีบบระบายความร้อนแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กโดยใช้น้ำ และของไหลนาโนไททาเนียม ที่มีความเข้มข้นของผงไททาเนียม 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นสารทำงาน ครีบลักษณะการเรียงตัวแบบเรียงแถวทำจากอลูมิเนียม โดยที่ฐานครีบนานา 2.00 มิลลิเมตร ความสูงครีบบ 1.00, 1.50 และ 2.00 มิลลิเมตร ความกว้างของช่องไหล 0.80 มิลลิเมตร และความหนา 0.40 มิลลิเมตร ซึ่งทดสอบภายใต้สภาวะการให้ความร้อนคงที่ การทดสอบได้ทำการแปรเปลี่ยนค่าอุณหภูมิของสารทำงาน ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ ค่าฟลักซ์ความร้อน เมื่อเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยระหว่างของไหลนาโนไททาเนียมกับสารทำงานน้ำบริสุทธิ์พบว่าของไหลนาโนไททาเนียมมีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นสูงสุดประมาณ 50.81 เปอร์เซ็นต์เนื่องจากของไหลนาโนไททาเนียมมีค่าความร้อนจำเพาะ ค่าความหนาแน่น ค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้น และอาจมีอิทธิพลจากอนุภาคผงนาโนไททาเนียมทำให้เกิดการไหลปั่นป่วนในระบบ

คำสำคัญ (Keywords): คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อน, ครีบบระบายความร้อนแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก, ของไหลนาโน

A STUDY ON THE HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF THE MINI RECTANGULAR
CHANNEL HEAT SINKS OF TITANIUM NANO FLUID



Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Master of Engineering Degree in Mechanical Engineering
at Srinakharinwirot University
September 2009

Lursukd Nakharintr. (2009). *A Study on the Heat Transfer Characteristics of the Mini Rectangular Channel Heat Sinks of Titanium Nano Fluid*. Master thesis, M.Eng. (Mechanical Engineering). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Assoc. Prof. Dr.Paisarn Naphon, Asst. Prof. Dr.Pichai Asadamongkon, Asst. Prof. Dr. Jutarat Kurujareon.

In this study, the experimental results of the convection heat transfer characteristics of the rectangular mini-channel heat sinks are presented. Water and nanofluid titanium with the concentration of 0.4 % by volume are used as working fluids. The rectangular mini-channel heat sinks are fabricated from aluminum alloy with the base thickness, fin height, channel width and fin thickness of 2.00, 1.00-2.00, 0.80 and 0.40 mm., respectively. The experiments are tested under constant heat flux conditions. Experiments were performed for various temperatures of working fluid, Reynolds number, and heat flux. Due to the higher specific heat, density, thermal conductivity and turbulence intensity, average heat transfer rates for nanofluids as working fluid are 50.81 % higher than those for the pure water as working fluid.

Keywords: Heat transfer characteristics / Mini rectangular channel heat sinks / Titanium Nanofluid

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของครีบบระบายความร้อน

แบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กในของไหลนาโนไททาเนียม

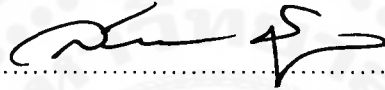
ของ

เลอศักดิ์ นาครินทร์

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

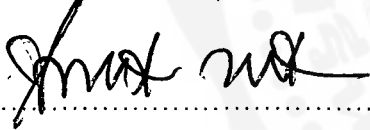


..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย สันติวัฒนกุล)

วันที่ 28... เดือน กันยายน... พ.ศ. 2552

คณะกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์



..... ประธาน

(รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล นามผล)



..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย อัมฤมงคล)



..... กรรมการ

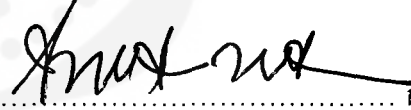
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑารัตน์ คุรุเจริญ)

คณะกรรมการสอบปากเปล่า



..... ประธาน

(พันเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง)



..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล นามผล)



..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย อัมฤมงคล)



..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑารัตน์ คุรุเจริญ)

ประกาศคุณูปการ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ไพศาล นาผล ประธานกรรมการควบคุมการทำปริญญานิพนธ์ที่ให้โอกาสในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ แนะนำพร้อมให้ความรู้จนสำเร็จและ ผศ.ดร.พิชัย อัมภมมงคล ผศ.ดร.จุฑารัตน์ คุรุเจริญ กรรมการควบคุมการทำปริญญานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาให้แนวคิดในการวิเคราะห์ และช่วยแก้ไขปัญหาดังที่เกิดขึ้น ในการทำปริญญานิพนธ์จนสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์จาก กองวิชาวิศวกรรมเครื่องกล รร. จปร. และคณาจารย์จาก ภาควิชาวิศวกรรมเคมี และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้ความรู้และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ คณะอนุกรรมการโครงการ “ทุนวิจัยมหัศจรรย์ สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี” สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ได้อนุมัติให้การสนับสนุนเงินจากกองทุนฯ แผนงานโครงการพัฒนานุเคราะห์ และคณะบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้การสนับสนุนเงินจากกองทุนงบประมาณแผ่นดินปี พ.ศ. 2551 สำหรับการศึกษาครั้งนี้

ท้ายสุดผู้วิจัยขอขอบพระคุณ พ่อ แม่ พี่ ที่ได้อบรมสั่งสอนรวมทั้งครอบครัวผู้วิจัย ที่ให้กำลังใจที่ดี และขอขอบคุณ เพื่อนๆ น้องๆ ที่ให้ความร่วมมือและสนับสนุนเป็นอย่างดีในการทำวิจัยนี้

เลอศักดิ์ นาครินทร์

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
การทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2 ทฤษฎี.....	12
หลักการถ่ายเทความร้อน.....	12
การนำความร้อน.....	12
การพาความร้อน.....	13
การแผ่รังสีความร้อน.....	14
การถ่ายเทความร้อนโดยการพาแบบบังคับสำหรับการไหลภายในท่อ.....	15
การพิจารณาทางด้านอุณหพลวัต.....	15
ตัวประกอบความเสียดทานและความดันลด.....	18
การพิจารณาทางด้านความร้อน.....	22
การหาอุณหภูมิเฉลี่ย.....	24
การหาอัตราการถ่ายเทความร้อน.....	25
การสมดุลพลังงาน.....	26
สหสัมพันธ์สำหรับการพาความร้อนแบบไหลราบเรียบในท่อกลม.....	31
การวิเคราะห์ทางทฤษฎี.....	32
สหสัมพันธ์สำหรับการพาความร้อนในท่อไม่กลม.....	37
ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของระบบ.....	38
การเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของระบบด้วยของไหลนาโน.....	39
คุณสมบัติทางกายภาพ และทางความร้อนของของไหลนาโน.....	41
อัตราการถ่ายเทความร้อน.....	42
อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย.....	43
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย.....	43
ความต้านทานทางความร้อน.....	43

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	45
อุปกรณ์ในการทดลอง.....	45
วิธีการทดลอง.....	50
ตัวแปรที่ใช้ในการเก็บข้อมูล.....	52
คุณลักษณะทั่วไปของอลูมิเนียมผสม AA7022.....	53
4 ผลและการวิเคราะห์.....	55
การเปรียบเทียบผลจากการทดลองระหว่างค่าเรโนลด์์นัมเบอร์ และค่าอุณหภูมิทางออกเฉลี่ยของของไหล.....	56
การเปรียบเทียบผลจากการทดลองระหว่างค่าเรโนลด์์นัมเบอร์ และค่าอุณหภูมิผิวเฉลี่ยของครีป.....	63
การเปรียบเทียบผลจากการทดลองระหว่างค่าเรโนลด์์นัมเบอร์ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน.....	64
การเปรียบเทียบผลจากการทดลองระหว่างค่าเรโนลด์์นัมเบอร์ และค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อน.....	65
การเปรียบเทียบผลจากการทดลองระหว่างค่าเรโนลด์์นัมเบอร์ และค่านัสเซลล์นัมเบอร์.....	71
การเปรียบเทียบผลจากการทดลองระหว่างค่าเรโนลด์์นัมเบอร์ และค่าความดันตกคร่อม.....	72
5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	76
สรุป.....	76
ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....	77
บรรณานุกรม.....	78
ภาคผนวก.....	83
ภาคผนวก ก.....	84
ภาคผนวก ข.....	104
อภิธานศัพท์.....	113
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	117

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 พิสัยค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน.....	14
2 ตัวเลขนัสเซลล์ท์สำหรับการไหลแบบราบเรียบในท่อหน้าตัดรูปร่างต่างๆ.....	38
3 แสดงคุณสมบัติและขนาดต่างๆ ของครีปที่ใช้ในการทดลอง.....	50
4 แสดงค่าความแม่นยำ และค่าความคลาดเคลื่อน เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง.....	50
5 แสดงเงื่อนไขในการทดลองของครีป แบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีป 1.0 มิลลิเมตร.....	52
6 แสดงเงื่อนไขในการทดลองของครีป แบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีป 1.5 มิลลิเมตร.....	52
7 แสดงเงื่อนไขในการทดลองของครีป แบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีป 2.0 มิลลิเมตร.....	53
8 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของอลูมิเนียมผสม AA7022.....	54
9 แสดงอุณหภูมิน้ำบริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานของครีปเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_m = 81.20 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้า ควบคุมที่ 20°C	88
10 แสดงอุณหภูมิน้ำบริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานของครีปเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_m = 87.00 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้า ควบคุมที่ 20°C	86
11 แสดงอุณหภูมิน้ำบริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานของครีปเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_m = 93.00 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้า ควบคุมที่ 20°C	86
12 แสดงอุณหภูมิน้ำบริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานของครีปเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_m = 81.20 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้า ควบคุมที่ 22°C	86
13 แสดงอุณหภูมิน้ำบริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานของครีปเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_m = 87.00 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้า ควบคุมที่ 22°C	87

บัญชีตาราง (ต่อ)

[illegible]

บัญชีตาราง (ต่อ)

[illegible]

บัญชีตาราง (ต่อ)

[illegible]

บัญชีตาราง (ต่อ)

[illegible]

บัญชีตาราง (ต่อ)

[illegible]

บัญชีตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
59 แสดงอุณหภูมิของของไหลนาโนบริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานของครีปเฉลี่ยและความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_{in} = 227.95 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ $22 \text{ }^{\circ}\text{C}$	102
60 แสดงอุณหภูมิของของไหลนาโนบริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานของครีปเฉลี่ยและความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_{in} = 209.50 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ $24 \text{ }^{\circ}\text{C}$	103
61 แสดงอุณหภูมิของของไหลนาโนบริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานของครีปเฉลี่ยและความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_{in} = 218.50 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ $24 \text{ }^{\circ}\text{C}$	103
62 แสดงอุณหภูมิของของไหลนาโนบริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานของครีปเฉลี่ยและความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_{in} = 227.95 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ $24 \text{ }^{\circ}\text{C}$	103

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 การพัฒนาชั้นขอบเขตความเร็วเมื่อมีการไหลราบเรียบภายในท่อกลม.....	16
2 สมดุลแรงบนปริมาตรควบคุมเล็กๆ.....	19
3 แผนภูมิผิวดินสำหรับหาตัวประกอบความเสียดทานสำหรับการไหลเต็มท่อกลม.....	21
4 การพัฒนาชั้นขอบเขตความร้อนในท่อกลม.....	22
5 การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสำหรับการไหลภายในท่อ.....	25
6 สมดุลทางพลังงานสำหรับปริมาตรควบคุมของการไหลภายในท่อ.....	26
7 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามความยาวของท่อเมื่อมีการถ่ายเทความร้อน (a) พลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ (b) อุณหภูมิที่ผิวคงที่.....	29
8 การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลที่ไหลผ่านภายนอกท่อและไหลผ่านภายในท่อ...	31
9 ปริมาตรควบคุมเล็กๆ สำหรับการวิเคราะห์พลังงานในการไหลผ่านท่อ.....	32
10 แสดงผองอนุภาคนาโนของ TiO_2	40
11 ภาพถ่ายของอนุภาค Nanoparticles ขนาด 200 นาโนเมตร.....	40
12 แสดงไดอะแกรมของอุปกรณ์การทดลอง.....	45
13 แสดงตำแหน่งจุดวัดอุณหภูมิและความดันของชุดทดสอบ.....	46
14 แสดงอุปกรณ์ในขณะทำการทดลอง.....	47
15 แสดงการประกอบชุดครีบเข้ากับชุดทดสอบ.....	47
16 ชุดฮีทเตอร์ชุดให้ความร้อน.....	48
17 ครีบบระบายความร้อนแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก.....	48
18 เครื่องมือวัดกระแสไฟฟ้า และ แรงดันไฟฟ้า (Volt Amp Meter).....	48
19 ชุดเครื่องมือวัดความดันตกคร่อม.....	49
20 แสดงชุดเก็บข้อมูล (Data logger).....	49
21 กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกของน้ำเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์ส์นัมเบอร์ของครีบบ แบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบ 1.0 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ ทางเข้า 20°C และที่พลักซ์ความร้อน 12.30, 13.18 และ 14.09 kW/m^2	56

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
22 กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกของของไหลนาโนไททาเนียมเฉลี่ยกับ ค่าเรโนลด์์นัมเบอร์ของครีบบางช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบบ 1.0 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิทางเข้า 20 °C และที่ฟลักซ์ความร้อน 14.08, 15.76 และ 16.75 kW/m ²	56
23 กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกของน้ำเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์์นัมเบอร์ของ ครีบบางช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบบ 1.5 มิลลิเมตรที่ฟลักซ์ ความร้อน 17.77 kW/m ² และที่อุณหภูมิทางเข้า 20, 22 และ 24 °C.....	57
24 กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกของของไหลนาโนเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์์ นัมเบอร์ของครีบบางช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบบ 1.5 มิลลิเมตร ที่ฟลักซ์ความร้อน 23.05 kW/m ² และที่อุณหภูมิทางเข้า 20, 22 และ 24 °C.....	57
25 กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกของน้ำเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์์นัมเบอร์ ของครีบบางช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบบ 1.0, 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตรอุณหภูมิทางเข้า 22 °C.....	58
26 กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกของของไหลนาโนเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์์ นัมเบอร์ของครีบบางช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบบ 1.0, 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตรที่อุณหภูมิทางเข้า 22 °C.....	58
27 กราฟความสัมพันธ์ของค่าอุณหภูมิผิวครีบบเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์์นัมเบอร์ ของครีบบ บางช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบบ 2.0 มิลลิเมตร น้ำเป็นสาร ทำงานที่อุณหภูมิทางเข้า 24 °C และที่ฟลักซ์ความร้อน 21.02, 21.88 และ 23.05 kW/m ²	60
28 กราฟความสัมพันธ์ของค่าอุณหภูมิผิวครีบบเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์์นัมเบอร์ ของครีบบ บางช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบบ 2.0 มิลลิเมตร ของไหลนาโนเป็นสารทำงานที่อุณหภูมิทางเข้า 24 °C และที่ฟลักซ์ความร้อน 31.70, 33.11 และ 34.51 kW/m ²	60

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
29 กราฟความสัมพันธ์ของค่าอุณหภูมิผิวครีปเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์์นัมเบอร์ ของครีปแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีป 2.0 มิลลิเมตร น้ำเป็นสารทำงาน อุณหภูมิทางเข้า 20, 22 และ 24 °C และที่ฟลักซ์ความร้อน 17.77 kW/m ²	61
30 กราฟความสัมพันธ์ของค่าอุณหภูมิผิวครีปเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์์นัมเบอร์ ของครีปแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีป 2.0 มิลลิเมตร ของไหลนาโนเป็นสารทำงาน อุณหภูมิทางเข้า 20, 22 และ 24 °C และที่ฟลักซ์ความร้อน 23.05 kW/m ²	61
31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายความร้อนเฉลี่ยกับค่าอัตราการไหลเชิงมวลของครีปแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีป 1.0, 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตร น้ำเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า 22 °C.....	63
32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายความร้อนเฉลี่ยกับค่าอัตราการไหลเชิงมวลของครีปแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีป 1.0, 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตร ของไหลนาโนเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า 22 °C.....	63
33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายความร้อนเฉลี่ยกับค่าอัตราการไหลเชิงมวลของครีปแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีป 1.0, 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตร น้ำ และของไหลนาโนเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า 20 °C.....	64
34 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของครีปกับค่าเรโนลด์์นัมเบอร์ของครีปแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีป 1.5 มิลลิเมตร น้ำเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า 22 °C และที่ฟลักซ์ความร้อน 16.75, 17.77 และ 19.09 kW/m ²	65
35 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของครีปกับค่าเรโนลด์์นัมเบอร์ของครีปแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีป 1.5 มิลลิเมตร ของไหลนาโนเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า 22 °C และที่ฟลักซ์ความร้อน 22.17, 23.05 และ 24.24 kW/m ²	65

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
36 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของครีบกับ ค่าเรโนลด์์นัมเบอร์ของครีบบนช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก ขนาดความสูง ครีบก 1.5 มิลลิเมตร ของไหลนาโนเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า 20, 22 และ 24 °C และที่ฟลักซ์ความร้อน 23.05 kW/m ²	66
37 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของครีบกับ ค่าเรโนลด์์นัมเบอร์ของครีบบนช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก ขนาดความสูง ครีบก 1.0, 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตร น้ำเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า 20 °C และที่ฟลักซ์ความร้อน 14.80, 22.17 และ 31.74 kW/m ²	66
38 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของครีบกับ ค่าเรโนลด์์นัมเบอร์ของครีบบนช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก ขนาดความสูง ครีบก 1.0, 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตร น้ำ และของไหลนาโนเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า 20 °C.....	67
39 กราฟความสัมพันธ์ของค่าตัวเลขนัสเซลล์นัมเบอร์กับค่าเรโนลด์์นัมเบอร์ ของครีบกับค่าเรโนลด์์นัมเบอร์ของครีบบนช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก ขนาดความสูงครีบก 2.0 มิลลิเมตร น้ำเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า 24 °C และที่ฟลักซ์ความร้อน 21.02, 21.88 และ 23.05 kW/m ²	69
40 กราฟความสัมพันธ์ของค่าตัวเลขนัสเซลล์นัมเบอร์กับค่าเรโนลด์์นัมเบอร์ ของครีบกับค่าเรโนลด์์นัมเบอร์ของครีบบนช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก ขนาดความสูงครีบก 1.0 มิลลิเมตร ของไหลนาโนเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า 22 °C และที่ฟลักซ์ความร้อน 14.80, 15.76 และ 16.75 kW/m ²	69
41 กราฟความสัมพันธ์ของค่าตัวเลขนัสเซลล์นัมเบอร์กับค่าเรโนลด์์นัมเบอร์ ของครีบกับค่าเรโนลด์์นัมเบอร์ของครีบบนช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก ขนาดความสูงครีบก 1.0, 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตร น้ำ และของไหลนาโน เป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า 20 °C.....	70

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
42 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์ส์นัมเบอร์ ของครีบบีบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก ขนาดความสูงครีบบีบ 1.0 มิลลิเมตร น้ำเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า 20 °C และที่ฟลักซ์ความร้อน 12.30, 13.18 และ 14.09 kW/m ²	71
43 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์ส์นัมเบอร์ ของครีบบีบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก ขนาดความสูงครีบบีบ 1.0 มิลลิเมตร ของไหลนาโนเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า 20 °C และที่ฟลักซ์ ความร้อน 14.80, 15.76 และ 16.75 kW/m ²	72
44 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์ส์นัมเบอร์ ของครีบบีบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก ขนาดความสูงครีบบีบ 2.0 มิลลิเมตร น้ำเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า 20, 22, และ 24 °C และที่ฟลักซ์ความร้อน 21.88 kW/m ²	72
45 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์ส์นัมเบอร์ ของครีบบีบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก ขนาดความสูงครีบบีบ 2.0 มิลลิเมตร ของไหลนาโนเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า 20, 22, และ 24 °C และที่ฟลักซ์ความร้อน 23.05 kW/m ²	73
46 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์ส์นัมเบอร์ ของครีบบีบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก ขนาดความสูงครีบบีบ 1.0, 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตร น้ำเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า 24 °C.....	73
47 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์ส์นัมเบอร์ ของครีบบีบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก ขนาดความสูงครีบบีบ 1.0, 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตร น้ำ และของไหลนาโนเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิ ทางเข้า 20 °C.....	74

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โดยเฉพาะด้านคอมพิวเตอร์ได้พัฒนาอย่างต่อเนื่อง และในปัจจุบันซึ่งเป็นทศวรรษที่ 21 เป็นการย่างก้าวเข้าสู่ยุคอิเล็กทรอนิกส์อย่างเต็มตัว ดังเห็นได้จากบริษัทชั้นนำด้านคอมพิวเตอร์ได้ทำการศึกษาวิจัย และนำเอาคอมพิวเตอร์ที่มีทั้งความเร็วและประสิทธิภาพสูงออกสู่ตลาดอย่างต่อเนื่อง และจากความต้องการคอมพิวเตอร์ที่มีทั้งความเร็วและประสิทธิภาพสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง อุปกรณ์ที่มีสำคัญควบคู่กับการพัฒนาเพื่อเพิ่มสมรรถนะคอมพิวเตอร์ คืออุปกรณ์ระบายความร้อนของคอมพิวเตอร์ จากเดิมเริ่มแรกใช้อากาศระบายความร้อนออกจากครีระบายความร้อนแบบธรรมชาติ ต่อมาใช้อากาศระบายความร้อนออกจากครีระบายความร้อนแบบบังคับ สำหรับปัจจุบันใช้ทั้งระบบท่อร้อน (Heat Pipe) และระบบระบายความร้อนแบบของเหลว และเพื่อทางเลือกสำหรับอนาคตจึงมีความสนใจในการศึกษาวิจัยครีระบายความร้อนแบบช่องเหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก (Rectangular Mini Channel Heat Sinks) โดยใช้ของไหลนาโนไททาเนียมเป็นสารทำงานเพื่อระบายความร้อน

การพาความร้อนโดยใช้น้ำ และของไหลนาโนเป็นขบวนการหนึ่งของการถ่ายเทความร้อน ซึ่งมีความสำคัญในงานวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และการดำรงชีวิตของมนุษย์ เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ ซึ่งต้องอาศัยกระบวนการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาทั้งสิ้น นักวิจัย และวิศวกรได้มีการคิดค้นหาวิธีการต่างๆ มาใช้พัฒนาขบวนการให้มี ประสิทธิภาพสูงสุด แต่ก็จะประสบกับปัญหาอันมีสาเหตุมาจากขีดจำกัดในการเพิ่มสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อน และการที่มีพื้นที่จำกัดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จึงได้ค้นหาวิธีที่จะเพิ่มอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนก็คือ การติดโลหะแผ่นบางๆ เข้ากับผิวโลหะเดิมเพื่อเพิ่มพื้นที่ ซึ่งเรียกว่าครีบ การออกแบบรูปทรงของครีบมีความสำคัญ เนื่องจากการออกแบบที่ดีทำให้การถ่ายเทความร้อนมีประสิทธิภาพครีแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า เป็นครีที่มีระบายความร้อนได้ดี เนื่องจากสามารถให้พื้นที่ผิวได้มาก มีขนาดเล็กใช้พื้นที่ติดตั้งน้อย และมีการไหลวนของสารทำงานได้ดี ทำให้การถ่ายเทความร้อนมีประสิทธิภาพสูง จึงสมควรศึกษาเกี่ยวกับค่าพารามิเตอร์ และคุณลักษณะการไหลของสารทำงานในการถ่ายเทความร้อน เพื่อทำความเข้าใจอย่างลึกซึ้งเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของความร้อน เพราะการนำเอาพลังงานมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพ ต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจทางทฤษฎีเป็นอย่างดี เพื่อนำไปพัฒนากระบวนการถ่ายเทความร้อนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ทำให้เกิดความก้าวหน้าในวิศวกรรมด้านต่างๆ อันจะเป็นประโยชน์ต่อการอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และอุตสาหกรรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งเป็นรากฐานของความเจริญทางเทคโนโลยีเพื่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ในอนาคตต่อไป

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. ศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อน และการไหลของของไหลนาโนไททาเนียมผสม น้ำในสัดส่วน 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และน้ำบริสุทธิ์โดยการพาความร้อนของครีบบระบายความร้อนแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก (Rectangular Mini Channel Heat Sinks)
2. ศึกษาผลของค่าฟลักซ์ความร้อน อัตราการไหล ขนาดครีบบระบายความร้อนแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนโดยการพาของครีบบระบายความร้อนแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก

ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. เป็นการศึกษาทางการทดลองการพาความร้อนของครีบบระบายความร้อนแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก
2. ทำการศึกษาเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนโดยการพาโดยพิจารณาการไหลของของไหลนาโนไททาเนียมผสม น้ำบริสุทธิ์ในสัดส่วน 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และน้ำบริสุทธิ์ผ่านครีบบระบายความร้อนแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดต่างๆ ที่มีค่าฟลักซ์ความร้อนที่ฐานครีบบคงที่ (Constant heat flux)
3. ใช้ของไหลนาโนไททาเนียมผสม น้ำบริสุทธิ์ในสัดส่วน 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และน้ำบริสุทธิ์เป็นสารทำงาน (Working Fluid) โดยให้ไหลในแนวนอน ซึ่งสามารถปรับค่าฟลักซ์ความร้อนและอัตราการไหลได้

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาในการวิจัยเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบของครีบบระบายความร้อนแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก
2. ได้เข้าใจถึงค่าพารามิเตอร์และประพฤติกรรมต่างๆ ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของครีบบระบายความร้อนแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก
3. ได้ข้อมูลในการปรับปรุงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ต้องการถ่ายเทความร้อน และการนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้งานในอนาคต

การทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการถ่ายเทความร้อนในการแก้ไขและพัฒนาเพื่อให้เกิดประโยชน์ เช่นจากการศึกษาเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานที่จะทำการวิจัยนี้ พบว่ามีการศึกษาและทำการทดลองอย่างต่อเนื่อง มีการนำเอาครีบนิตต่าง ๆ มาทำการศึกษาเพื่อหาข้อดีและปัญหา

เป่ง และปีเตอร์สัน (Peng; & Peterson. 1996) ได้ทำการศึกษาโดยการทดลองลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบสถานะเดียวด้วยน้ำของกลุ่มครีบบีบแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก (Micro channel) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไหลที่เกิดจากการไหลผ่าน 0.133 มิลลิเมตรถึง 0.367 มิลลิเมตร ศึกษาทั้งลักษณะการไหลแบบราบเรียบ และการไหลแบบปั่นป่วน ในการทดลองได้มีการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนรูปร่างของครีบ จากการรวบรวมผลการทดลองพบว่าคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบราบเรียบขึ้นอยู่กับสัดส่วนรูปร่างและเส้นผ่านศูนย์กลางของไหลที่เกิดจากการไหลผ่านของครีบระบายความร้อนจากจุดศูนย์กลางถึงจุดศูนย์กลาง คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนที่เหมาะสมที่สุดที่อัตราส่วนสัดส่วนรูปร่างประมาณ 0.5 สำหรับปัจจัยความฝืดที่มีค่าที่เหมาะสมที่สุดพบที่อัตราส่วนสัดส่วนรูปร่างประมาณ 0.5 เช่นกัน

อาดัมส์ และคณะ (Adams; et al. 1998) ได้ทำการศึกษาโดยการทดลองลักษณะการไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนแบบสถานะเดียวด้วยน้ำของกลุ่มครีบบีบแบบทอกลมขนาดเล็ก (Micro channel) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.76 มิลลิเมตร และ 1.09 มิลลิเมตร โดยศึกษาถึงความสัมพันธ์ของค่า เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ ค่านัสเซลท์นัมเบอร์ ของการไหลแบบปั่นป่วนของการถ่ายเทความร้อนแบบบังคับสถานะเดียว ผลจากการทดลองที่ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทอกลม 0.102~1.09 มิลลิเมตร ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ 2.6×10^3 - 2.3×10^4 และค่าตัวเลขพรานเติล 1.53-6.43 ตามลำดับ เป็นค่าที่มีความเชื่อถือได้ประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณของค่านัสเซลท์นัมเบอร์น้อยกว่า 18.6 เปอร์เซ็นต์

กิลล์ลอด และคณะ (Gillot; et al. 2000) ได้ทำการศึกษาโดยการทดลองเปรียบเทียบระหว่างการถ่ายเทความร้อนแบบหนึ่งสถานะกับการถ่ายเทความร้อนแบบสองสถานะของครีบระบายความร้อนขนาดเล็กเพื่อระบายความร้อนออกจากอุปกรณ์ไฟฟ้าโดยใช้ครีบทำจากท่อทองแดง ผลการทดลองพบว่าครีบระบายความร้อนแบบทอกลมขนาดเล็ก และครีบบีบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กมีความสามารถในการระบายความร้อนสูงทั้งการถ่ายเทความร้อนแบบหนึ่งสถานะและการถ่ายเทความร้อนแบบสองสถานะ

คุ และมุดาวาร์ (Qu; & Mudawar. 2002) ได้ทำการศึกษาทั้งวิธีการทดลอง และศึกษาการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อมของครีบบีบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความกว้าง 0.231 มิลลิเมตร และความสูง 0.731 มิลลิเมตรโดยใช้น้ำเป็นสารทำงาน

ทำการศึกษาในช่วงค่าเรย์โนลด์ส์นับเบอร์ 139 ถึง 1672 และที่ค่าฟลักซ์ความร้อน 100 และ 200 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยทำการศึกษาการแพร่กระจายของความร้อนทั้งในครีบบและในของไหล คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเมื่อนำผลมาเปรียบเทียบกันแล้วพบว่าค่าที่ได้จากการทดลอง และการวิเคราะห์เชิงตัวเลขอยู่ในเกณฑ์ดียอมรับได้

ฮิตซโรนี และคณะ (Hetsroni; et al. 2002) ได้ทำการศึกษาทั้งวิธีการทดลองการถ่ายเทความร้อนออกจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ครีบบระบายความร้อนแบบช่องสามเหลี่ยมขนาดเล็กโดยใช้ของเหลวไม่นำไฟฟ้าเป็นสารทำงานทำการการศึกษาที่ช่องอุณหภูมิ 323–333 องศาเซลวิน โดยทำการวัดอุณหภูมิ อัตราการไหล และความดันในระบบด้วยเครื่อง Infrared Radiometry and High Speed Digital Video Imaging เพื่อศึกษาลักษณะการเดือด ความเร็วของของไหล คุณภาพไอร่ ระหว่างที่มีการถ่ายเทความร้อนและนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการถ่ายเทความร้อนแบบหนึ่งสถานะที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน

อะโกสตีนิ และคณะ (Agostini; et al. 2002) ได้ทำการศึกษาโดยการทดลองของสัณฐานรูปการถ่ายเทความร้อนและปัจจัยความผิดของครีบบระบายความร้อนแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าในแนวตั้งจำนวน 11 ช่อง ขนาดช่องมีความกว้าง 1.47 มิลลิเมตร ความสูง 3.28 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านของไหลที่เกิดจากการไหลผ่าน 2.01 มิลลิเมตร โดยทำการทดลองที่ฟลักซ์ความร้อนช่วง 0.84 – 22 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ฟลักซ์มวล 28 – 800 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที ความดัน 2,000 กิโลพา ควบคุมอุณหภูมิด้านขาเข้าไว้ที่ 70 องศาเซลวิน แล้วนำผลที่ได้จากการทดลองไปเปรียบเทียบกับครีบบระบายความร้อนแบบท่อกกลมขนาดเล็ก

โอวเฮียบ และปาล์ม (Owhaib; & Palm. 2004) ได้ทำการศึกษาโดยการทดลองของคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของการพาความร้อนแบบสถานะเดียวโดยใช้สาร R134a เป็นสารทำงาน ในครีบบระบายความร้อนแบบท่อกกลมขนาดเล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.7, 1.2 และ 0.8 มิลลิเมตร นำผลที่ได้จากการทดลองมาสร้างความสัมพันธ์เปรียบเทียบกับครีบบระบายความร้อนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโตกว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองอยู่ในค่าที่ดียอมรับได้ช่วงความสัมพันธ์บริเวณการไหลแบบปั่นป่วน

อะโกสตีนิ และคณะ (Agostini; et al. 2004) ได้ทำการศึกษาโดยการทดลองของสัณฐานรูปการถ่ายเทความร้อนและปัจจัยความผิดของครีบบระบายความร้อนแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าครีบบทำจากอลูมิเนียมขนาดช่องความกว้าง 1.11 มิลลิเมตร ขนาดความสูง 1.22 มิลลิเมตร และขนาดความกว้าง 0.72 มิลลิเมตร ความสูง 0.73 มิลลิเมตร โดยทำการทดลองที่ฟลักซ์ความร้อนช่วง 210 – 49,700 วัตต์ต่อตารางเมตร ฟลักซ์มวล 65 – 2900 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที นำผลที่ได้จากการทดลองไปเปรียบเทียบกับครีบบระบายความร้อนที่มีขนาดโตกว่าผลที่ได้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

ยี่ และคณะ (Yue; et al. 2004) ได้ทำการศึกษาโดยการทดลองของความดันตกคร่อมของการไหลแบบหนึ่งสถานะ และการไหลแบบสองสถานะผ่านครีบบางช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก ขนาดเส้นผ่านของไหลที่เกิดจากการไหลผ่าน 0.333 มิลลิเมตร และ 528 มิลลิเมตร โดยใช้ก๊าซไนโตรเจน และน้ำเป็นสารทำงานและลักษณะการไหลภายในแบบราบเรียบ สำหรับการศึกษาความดันตกคร่อมของการไหลแบบสองสถานะใช้ก๊าซไนโตรเจน และน้ำเป็นสารทำงาน นำผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง เปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีของลอคฮาร์ต-มาร์ตินเนลลี (Lockhart–Martinelli Method) นำมาทำนายความดันตกคร่อมโดยทำการแก้ไขค่าคงที่ในสมการของชีชโฮล์ม (Chisholm's equation) เป็นสมการแบบเส้นตรงผลของความดันตกคร่อมของการไหลแบบสองสถานะขึ้นอยู่กับการไหล ความหนืด ผลลัพธ์ความดันตกคร่อมอยู่ในช่วงค่าบวก ลบ 20 เปอร์เซ็นต์ของลักษณะการไหลทั้งสองแบบ

โมริโน (Morini. 2004) ได้ทำการศึกษาโดยวิธีการทดลองการถ่ายเทความร้อนโดยการพาของครีบบรรยากาศความดันต่ำโดยทำการศึกษาปัจจัยความผิดพลาดช่วงการไหลแบบราบเรียบถึงการไหลแบบปั่นป่วน ขนาดเส้นผ่านของไหลที่เกิดจากการไหลผ่านน้อยกว่า 1.0 มิลลิเมตร แล้วนำผลการทดลองหลายๆ ค่ามาเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีและมีค่าแตกต่างกันโดยมีอิทธิพลจากความหนืด และความหยาบของผิวของครีบบ

อับเดลลาล์ และคณะ (Abdelall; et al. 2005) ทำการศึกษาโดยวิธีการทดลองของความดันตกคร่อมของท่อขยายและท่อลดของท่อกลมขนาดเล็กโดยใช้น้ำและอากาศเป็นสารทำงานทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.84 มิลลิเมตร และ 1.6 มิลลิเมตร การไหลแบบสถานะเดียวทดลองในช่วงค่าเรย์โนลด์ส์นับเบอร์ 870–12,960 และการไหลแบบสองสถานะทดลองในช่วงค่าเรย์โนลด์ส์นับเบอร์ $1.9 \times 10^3 - 1.6 \times 10^2$ จากผลการทดลองพบว่าการไหลแบบหนึ่งสถานะที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานค่าความดันตกคร่อมอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ สำหรับการไหลแบบสองสถานะพบว่าความดันรวมมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการลื่นไถลของความเร็วและค่าผลลัพธ์ที่ได้อยู่ในช่วงค่าที่ยอมรับได้

ลี และคณะ (Lee; et al. 2005) ทำการศึกษาโดยวิธีการทดลองของคุณสมบัติทางความร้อนของไหลแบบสถานะเดียวของครีบบรรยากาศความดันแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความกว้าง 0.194 มิลลิเมตร และความสูง 0.534 มิลลิเมตร ทำจากวัสดุทองแดง 10 ช่องแนวนอน ใช้น้ำบริสุทธิ์เป็นสารทำงานทำการทดลองช่วงค่าเรย์โนลด์ส์นับเบอร์ 300 ถึง 3500 ผลการทดลองอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้คือมีค่ามากทางทฤษฎี 5 เปอร์เซ็นต์

เซ็ง และคณะ (Zhang; et al. 2005) ทำการศึกษาโดยวิธีการทดลองของการระบายความร้อนแบบหนึ่งสถานะของครีประบายความร้อนแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยทำการทดลองที่ 2 ขนาดคือขนาดความกว้าง 12 มิลลิเมตร ความยาว 12 มิลลิเมตร และขนาดความกว้าง 10 มิลลิเมตร ความยาว 10 มิลลิเมตร โดยให้ความร้อนกับชุดระบายความร้อนแล้วนำครีบอลูมิเนียมมาวางบนชุดระบายความร้อนเพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากชุดระบายความร้อนมายังครีบอลูมิเนียม ครีบอลูมิเนียมมีขนาดความยาว 15 มิลลิเมตร และขนาดความกว้าง 12 มิลลิเมตร การถ่ายเทความร้อนจะถ่ายจากชุดระบายความร้อนผ่านหน้าสัมผัสแล้วมาระบายความร้อนที่ครีบอลูมิเนียม ครีบอลูมิเนียมวางให้ห่างกันเพื่อเว้นช่องว่างให้สารทำงานไหลผ่าน โดยค่าความต้านทานความร้อนของสารทำงานที่ทางเข้าของชุดระบายความร้อนขนาด 12 มิลลิเมตร อยู่ในช่วง 0.32 ถึง 0.44 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร สำหรับชุดระบายความร้อนขนาด 10 มิลลิเมตร อยู่ในช่วง 0.59 ถึง 0.44 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าความร้อนสูงสุดจะอยู่ที่หน้าสัมผัสของชุดระบายความร้อนกับครีบอลูมิเนียมโดยกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วหน้าสัมผัส ผลการทดลองพบว่าค่าของแรงดันตกคร่อมมีความใกล้เคียงกันของชุดระบายความร้อนทั้งสองแบบ แต่ที่แตกต่างกันคือค่าความต้านทานความร้อนของชุดระบายความร้อนขนาด 10 มิลลิเมตร มีมากกว่า แบบ 12 มิลลิเมตร ที่อัตราการไหลของสารทำงานเท่ากัน

คู และเลียนสทรูเออร์ (Koo; & Kleinstreuer. 2005) ศึกษาความต้องการในการเพิ่มประสิทธิภาพในการระบายความร้อนของอุปกรณ์เครื่องมือที่มีอัตราการไหลแบบราบเรียบและคงที่ จึงใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบจำลองการไหลของของไหลนาโนในช่องระบายความร้อนขนาดเล็กงานวิจัยนี้ใช้ของไหลนาโน 2 ชนิดคืออนุภาคนาโนทองแดงไดออกไซด์ ซึ่งกำหนดให้อัตราการไหลไม่สูงมากนักของไหลที่ใช้ผสมกับอนุภาคนาโนคือน้ำ และเอธิลแอลกอฮอล์ จากนั้นทำการวิเคราะห์ค่าการนำความร้อนและค่าความหนืดจลน์โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงเลข ผลการวิจัยจะแสดงถึงค่าการกระจายตัวของอนุภาคนาโน ชั้นของความดันและค่านัสเซลล์นัมเบอร์ การกระจายตัวของความหนืดและผลกระทบของการเพิ่มอนุภาคนาโน

เชียน และเฮิง (Chein; & Huang. 2005) ศึกษาการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการระบายความร้อนโดยใช้ของไหลนาโนในช่องระบายความร้อนขนาดเล็กโดยใช้อนุภาคนาโนทองแดงผสมน้ำและปรับปริมาณของอนุภาคนาโน เพื่อหาความเหมาะสมในการถ่ายเทความร้อนขนาดของช่องระบายความร้อนขนาดเล็กมี 2 ขนาดคือขนาดความกว้าง 100 ไมโครเมตร ความยาว 300 ไมโครเมตรและขนาดความกว้าง 57 ไมโครเมตร ความยาว 365 ไมโครเมตร เมื่อใช้ของไหลนาโนในการช่วยระบายความร้อนพบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนและของไหลนาโนไม่ทำให้ความดัน

ลดลง เพราะขนาดที่เล็กมากของอนุภาคนาโนและปริมาณการเติมอนุภาคนาโนลงไปนั้นมีปริมาณไม่สูงมากนัก

เมอเชด (Murshed. 2005) ของไหลนาโนที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือไททาเนียมออกไซด์ที่มีรูปทรง 2 แบบคือรูปทรงก้านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นาโนเมตรยาว 40 นาโนเมตร และแบบทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 นาโนเมตรโดยอนุภาคนาโนทั้งสองแบบจะผสมกับน้ำเป็นสารทำงาน และพิจารณาค่าความเป็นกรดต่างและค่าความหนืดของของไหลนาโนด้วย เครื่องมือทดสอบนี้จะแสดงค่าการนำความร้อนที่เพิ่มขึ้นโดยการปรับเปลี่ยนปริมาณของอนุภาคนาโนตามปริมาตร จากการทดสอบอนุภาคนาโนของไททาเนียมออกไซด์รูปทรงก้านและทรงกลมที่ปริมาณการผสมอนุภาคนาโน 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ และพบว่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของอนุภาคนาโนของไททาเนียมออกไซด์รูปทรงก้านสูงกว่าการคำนวณโดยใช้แบบจำลองของ Hamilton-Crosser 12 เปอร์เซ็นต์ ส่วนประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของอนุภาคนาโนของไททาเนียมออกไซด์รูปทรงกลมสูงกว่าการคำนวณโดยใช้แบบจำลองของ Bruggeman model 16 เปอร์เซ็นต์ ค่าความผิดพลาดของการทดลองอยู่ที่ 2 เปอร์เซ็นต์

เชน และคณะ (Shen; et al. 2006) ทำการศึกษาโดยวิธีการทดลองของการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบหนึ่งสถานะของครีกระบายความร้อนแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กจำนวน 26 ช่องขนาดความกว้าง 300 ไมโครเมตร ความยาว 800 ไมโครเมตร ขนาดความหนาของผิวเฉลี่ย 4 ถึง 6 เปอร์เซ็นต์ ใช้น้ำบริสุทธิ์เป็นสารทำงาน ทำการทดลองที่ช่วงค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ 162 ถึง 1,257 ควบคุมอุณหภูมิด้านขาเข้าไว้ที่ 30°C, 50°C และ 70°C และพลังงานความร้อนที่ป้อนอยู่ในช่วง 140 ถึง 450 วัตต์ ขนาดพื้นที่รับความร้อน 7.65 ตารางเซนติเมตร ผลการทดลองพบว่าค่าปัจจัยความฝืด คำนัสเซลท์นัมเบอร์เฉลี่ยอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้โดยเบี่ยงเบนไปจากค่าทางทฤษฎีเล็กน้อย ส่วนทางทางคุณสมบัติทางความร้อนอยู่ในช่วงขอบเขตทางทฤษฎี

ชเรียนกี และกานดลิการ์ (Steinke; & Kandlikar. 2006) ทำการศึกษาโดยวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของปัจจัยความฝืดของช่องขนาดเล็กของการไหลแบบสถานะเดียวเพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองโดยใช้ทฤษฎีสโตกส์ และ พอยสยี่ลลี (Stokes and Poiseuille) ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองพบว่าความดันตกคร่อมอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้และเป็นไปตามทฤษฎี

แจง และชอย (Jang; & Choi. 2006) ได้ศึกษาโดยวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการนำความร้อนของของไหลนาโนเพื่อทำการศึกษากการแพร่กระจายอุณหภูมิ และความต้านทานความร้อนของครีกระบายความร้อนขนาดเล็ก และศึกษาเปรียบเทียบระหว่างสารทำงานได้แก่ น้ำ น้ำผสมทองแดงออกไซด์ขนาด 2 นาโนเมตร และน้ำผสมผงเพชรขนาด 6 นาโนเมตร ในสัดส่วน 1-2 เปอร์เซ็นต์

โดยปริมาตร พบว่าสมรรถนะ การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น 10 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับน้ำ เพราะของไหลนาโนลดความต้านทานระหว่างผนังของครีประบายความร้อนกับสารทำงาน

คังและคณะ (Kang; et al. 2006) ได้เสนองานวิจัยเกี่ยวกับการทดสอบประสิทธิภาพทางความร้อนของอนุภาคนาโนเงิน (silver) โดยใช้ท่อความร้อน การทดสอบดังกล่าวใช้ท่อความร้อนแบบมีวิกกีใช้น้ำเป็นสารตัวกลางโดยผสมอนุภาคนาโนเงิน (silver) ลงไปที่อัตราส่วน 1 มิลลิกรัมต่อลิตรจนถึง 100 มิลลิกรัมต่อลิตรโดยท่อความร้อนถ่ายเทความร้อนให้แก่ น้ำจืดมีอุณหภูมิระหว่าง 40–45 องศาเซลเซียส ปรับค่าความร้อนในด้านรับความร้อนระหว่าง 30 – 60 วัตต์ ประสิทธิภาพของระบบสูงสุดที่อัตราส่วนการผสมอนุภาคนาโน 10 มิลลิกรัมต่อลิตรความร้อนที่ป้อนให้เท่ากับ 60 วัตต์อุณหภูมิสูงสุด 44.6 องศาเซลเซียส

เชียน และเจิง (Chein; & Chuang. 2006) ศึกษาของระบายความร้อนขนาดเล็กโดยใช้ของไหล นาโนในการระบายความร้อน โดยที่ของระบายความร้อนขนาดเล็กทำจากซิลิกอนและใช้อนุภาคนาโนทองแดงออกไซด์ ผสมน้ำที่อัตราส่วน 0.2 – 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรจากการศึกษาพบว่าที่อัตราการไหลของของไหลนาโนต่ำของไหลนาโนสามารถดูดซึมความร้อนได้เป็นอย่างดีแต่เมื่อมีอัตราการไหลสูงขึ้นอัตราในการดูดซึมความร้อนจะต่ำลง

หวาง และคณะ (Hwang; et al. 2006) ศึกษาอนุภาคนาโนหลายๆ ชนิด เช่น อนุภาคทองคำ โนคาร์บอน อนุภาคทองแดงออกไซด์ ซิลิกอนไดออกไซด์ และอนุภาคนาโนเงิน นำมาใช้ในการผสมสำหรับทำเป็นของไหลนาโน เพื่อทำการศึกษาศักยภาพในการถ่ายเทความร้อนและการหล่อลื่น โดยนำมาผสมกับน้ำ เอธิลแอลกอฮอล์ น้ำมันเครื่อง น้ำมันซิลิกอน และน้ำมันโพลีเอเลฟิน ซึ่งในการศึกษาทางความร้อนจะทำการศึกษาในส่วนของการนำความร้อน ส่วนในการหล่อลื่นจะศึกษาเรื่องความหนืดจลน์ ผลที่ได้คือสามารถเพิ่มสมรรถนะในการนำความร้อนได้ 0.4 W/m K และในการผสมลงในน้ำมันหล่อลื่นทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น และศึกษาการใช้อนุภาคนาโนในการนำความร้อนโดยการเปรียบเทียบระหว่างการใช้น้ำกับอนุภาคนาโน 4 ชนิด คือ อนุภาคทองคำโนคาร์บอนผสมน้ำ อนุภาคนาโนทองแดงออกไซด์ผสมน้ำ อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ผสมน้ำ และอนุภาคนาโนทองแดงออกไซด์ผสมเอธิลแอลกอฮอล์ ผลที่ได้คืออนุภาคทองคำโนคาร์บอนผสมน้ำ 0.01 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 1.3 เปอร์เซ็นต์

ลี และมุดาวาร์ (Lee; & Mudawar. 2007) ศึกษาโดยวิธีการทดลองของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบสถานะเดียวของการไหลแบบราบเรียบโดยใช้ของไหลนาโนเป็นสารทำงานในครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก ขนาดความกว้าง 10 มิลลิเมตร ความยาว 44.8 มิลลิเมตร และความสูงของครี 0.821 มิลลิเมตร ขนาดความหนาและร่องของครี 0.215 มิลลิเมตร ส่วนผสมของผงนาโนอลูมิเนียมออกไซด์กับน้ำในสัดส่วนความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ และ 2 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร

ผลการทดลองพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำ ส่วนความดันตกคร่อมเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนความเข้มข้นของผงนาโนอลูมิเนียมออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น

ฮร์นจาค และทู (Hrnjak; & Tu. 2007) ทำการศึกษาความดันตกคร่อมของการไหลแบบสถานะเดียวทั้งของก๊าซ และของเหลวในช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดเส้นผ่านของไหลที่เกิดจากการไหลผ่านอยู่ในช่วง 69.5 ถึง 304.7 ไมโครเมตร โดยใช้สารทำความเย็น 134a เป็นสารทำงานปรับสัดส่วนไอกับของเหลวอยู่ในช่วง 0.09 ถึง 0.24 และทำการทดลองในช่วงค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ 112 ถึง 9,180 ผลการทดลองพบว่าความดันตกคร่อมขึ้นอยู่กับปัจจัยความฝืดทั้งบริเวณการไหลแบบราบเรียบ การไหลแบบทรานซิชัน และการไหลแบบปั่นป่วน

นุเยน และคณะ (Nguyen; et al. 2007) ทำการศึกษาโดยวิธีการทดลองเพื่อหาคุณสมบัติและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของสารทำงานของไหลนาโนที่มีส่วนผสมระหว่างน้ำกลั่นผสมอนุภาคอลูมิเนียมออกไซด์ในสัดส่วนความเข้มข้น 1.0 เปอร์เซ็นต์ 3.1 เปอร์เซ็นต์ และ 6.8 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร ที่ขนาดอนุภาคอลูมิเนียมออกไซด์ 36 นาโนเมตร และ 47 นาโนเมตร ลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน ไหลผ่านครีบบระบายความร้อนแบบแท่งกลมโดยติดตั้งทดลองในชุดประมวลผลของคอมพิวเตอร์ และส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์ ผลการทดลองพบว่าสารทำงานของไหลนาโนที่ผสมอนุภาคอลูมิเนียมออกไซด์ในสัดส่วนความเข้มข้น 6.8 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรสามารถเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้เพิ่มขึ้น 40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำกลั่น

เชน (Chen; 2007) ทำการศึกษาโดยวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนแบบบังคับในครีบบระบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กของระบบหล่อเย็นของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้ของไหลอิมัลชันไหลผ่านวัสดุพูน วิเคราะห์โดยสมการ Forchheimer–Brinkman ส่วนขยายของสมการ Darcy ของการถ่ายเทความร้อนของวัสดุของแข็งกับของไหล ความเร็วภายในช่องทำการวิเคราะห์โดยวิธี finite-difference ผลการทดลองที่ได้จะทำการวิเคราะห์ ความเร็วของของไหล การแพร่กระจายของอุณหภูมิ และค่านัสเซลล์นัมเบอร์รวม

ไซ และเชียน (Tsai; & Chein. 2007) ทำการศึกษาโดยวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนแบบบังคับโดยการพาความร้อนในครีบบระบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กโดยใช้สารทำงานน้ำผสมนาโนทองแดงออกไซด์ ($\text{Cu-H}_2\text{O}$) และ Carbon Nanotube ผสมกับน้ำ ($\text{CNT-H}_2\text{O}$) โดยศึกษาการกระจายตัวของกระแสความเร็ว การกระจายของอุณหภูมิ ความดันตกคร่อม และความต้านทานของครีบบ ผลการทดลองพบว่าของไหลนาโนทำให้อุณหภูมิระหว่างผนังครีบบกับของไหลลดลงเมื่อเทียบกับน้ำ อุณหภูมิลดลงเนื่องจากความต้านทานความร้อนลดลง

เชียน และเจิง (Chein; & Chuang. 2007) ทำการศึกษาโดยวิธีการทดลองของการระบายความร้อนของครีบบระบายความร้อนโดยใช้ของไหลนาโน ครีบบระบายความร้อนทำมาจากซิลิกอนของ

ไหลนาโนใช้ทองแดงออกไซด์กับน้ำผสมกันในสัดส่วน 0.2 เปอร์เซ็นต์ ถึง 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ผลการทดลองพบว่าของไหลนาโนสามารถรับพลังงานความร้อนจากครีบบระบายความร้อนได้มากกว่า น้ำที่อัตราการไหลของสารทำงานต่ำกว่า เมื่ออัตราการไหลสูงขึ้นการถ่ายเทความร้อนจะถูกบังคับด้วย ปริมาตรของของไหลและอนุภาคของของไหลนาโนไม่สามารถดูดซับความร้อนที่มีขนาดใหญ่กว่าได้ ฉะนั้นการหาค่าอุณหภูมิที่ถูกต้องตามทฤษฎีต้องใช้อัตราการไหลที่ต่ำ ที่อัตราการไหลที่สูงไม่สามารถวัดอุณหภูมิได้ได้ในทางทฤษฎี เนื่องจากของไหลนาโนมีการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนและเป็นตะกอน การใช้ของไหลนาโน ยังพบว่ามีเพิ่มขึ้นของแรงดันตกคร่อม

ไล และเลียนสทริเออร์ (Li; & Kleinstreuer. 2008) ทำการศึกษาโดยวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการนำความร้อนของของไหลนาโนโดยใช้แบบจำลองของ KKL (Koo–Kleinstreuer–Li) โดยการเคลื่อนที่เป็นแบบ Brownian สารทำงานเปรียบเทียบกับระหว่างน้ำ น้ำผสมทองแดงออกไซด์ใน สัดส่วน 1 เปอร์เซ็นต์ และ 4 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค 28.6 นาโนเมตร ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนผสมของอนุภาค ทำนองเดียวกัน ความดันตกคร่อมและกำลังที่ใช้ปั๊มมีค่าสูงขึ้นตามสัดส่วนผสมของอนุภาค

ดวงทองสุข และคณะ (Duangthongsuk; et al. 2008) ทำการศึกษาคุนสมบัติการถ่ายเท ความร้อนของของไหลนาโนไททาเนียมโดยศึกษาคุนสมบัติทางความร้อนและคุนสมบัติทางกายภาพ เช่น ค่าความร้อนจำเพาะ ค่าความหนืด และค่าการนำความร้อน และนำค่าไปทำการทดลองใน อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหล นาโนไททาเนียม

หยาง และเปง (Yang; & Peng. 2008) ทำการศึกษาโดยวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของครีบบ ระบายความร้อนแบบความสูงไม่สม่ำเสมอโดยวิธีจัดระบายความร้อนทำการวิเคราะห์โดยโปรแกรม SIMPLEC ที่สภาวะการไหลแบบปั่นป่วน ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 15,000 และ 25,000 เพื่อทำการศึกษ ผลกระทบจากรูปร่างของครีบบระบายความร้อนที่มีผลต่อประสิทธิภาพทางความร้อน จากผลการ ทดลองพบว่าอุณหภูมิที่ฐานครีบลดลงเมื่อความสูงของครีบบเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับศูนย์กลางของครีบบ ระบายความร้อนและผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองทำให้ทราบความสูงของครีบบระบายความร้อนที่ เหมาะสมที่สุด

นาผล และคณะ (Naphon; et al. 2008) ทำการศึกษาศักยภาพของท่อร้อน (Heat Pipe) โดยใช้สารทำงานของน้ำบริสุทธิ์ผสมแอลกอฮอล์ และน้ำบริสุทธิ์ผสมระหว่างอนุภาคไททาเนียมขนาด 21 นาโนเมตร ท่อร้อนทำจากทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 15 มิลลิเมตร ขนาดความยาว 600 มิลลิเมตร ผลการทดลองพบว่าของไหลนาโนให้ประสิทธิภาพสูงกว่าแอลกอฮอล์

ดวงทองสุข และคณะ (Duangthongsuk; et al. 2009) ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อน โดยการพาความร้อนแบบบังคับและคุณลักษณะการไหลโดยใช้ของไหลนาโนไททาเนียมกับน้ำใน สัดส่วน 0.2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรเพื่อศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และปัจจัยความฝืดโดย ทำการทดลองในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นแนวนอนแบบไหลสวนทางกัน ภายใต้ สภาวะการไหลแบบปั่นป่วน จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโน ไททาเนียมมากกว่าน้ำ 6 ถึง 11 เปอร์เซ็นต์ และความดันตกคร่อมมีค่าสูงกว่าค่าคำนวณเล็กน้อย

นัมบุรู และคณะ (Numburu; et al. 2009) ทำการศึกษาโดยวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของ การไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโน 3 ชนิดคือ CuO , Al_2O_3 และ SiO_2 ผสมกับเอทิลีนไกลคอล และน้ำ ไหลภายในท่อกลมให้พลั๊กความร้อนคงที่ ความหนืดเพิ่มขึ้น 10 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางอุณหภูมิจลศาสตร์ของของไหลนาโนโดยการปรับเปลี่ยน อุณหภูมิแล้วนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับพบว่าค่าตัวเลขนัมเบอร์เป็นไปตามสมการ Gnielinski อนุภาคของสารมีขนาดเล็กจะทำให้ของไหลนาโนมีค่าความหนืดและค่าตัวเลขนัมเบอร์มีค่าสูง สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของ CuO , Al_2O_3 และ SiO_2 ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์คงที่ ค่าตัวเลขนัม เบอร์เพิ่มขึ้น 35 เปอร์เซ็นต์ และ 6 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ CuO เมื่อเทียบกับน้ำ

นาพล และคณะ (Naphon; et al. 2009) ทำการศึกษาประสิทธิภาพของท่อร้อน (Heat Pipe) โดยใช้สารทำงานของไหลนาโนส่วนผสมระหว่างอนุภาคไททาเนียมขนาด 21 นาโนเมตรกับสารทำความเย็น R11 ท่อร้อนทำจากทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 15 มิลลิเมตร ขนาดความยาว 600 มิลลิเมตร ผลการทดลองพบว่าที่มุม 60 องศา ท่อร้อนมีประสิทธิภาพสูงถึง 50 เปอร์เซ็นต์ สัดส่วนผสมของนาโนไททาเนียม กับสารทำความเย็น R11 ที่เหมาะสมที่สุดคือ 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าสารทำ ความเย็น R11 สูงถึง 1.40 เท่า

จากการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทำให้ทราบถึงผลการวิเคราะห์ และการทดลอง ของครีบนิตต่างๆ สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นครีบบน ช่องสี่เหลี่ยม จะเห็นว่าการวิเคราะห์และการทดลองของครีบบนช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กๆ น้อยมาก ดังนั้นผู้ทำการวิจัยครั้งนี้มองเห็นประโยชน์ในการทดลอง ของการถ่ายเทความร้อนโดยการ พาของครีบนิต โดยการศึกษาลักษณะความสูงของของครีบนิต และสารทำงานโดยใช้น้ำ ของไหลนาโนไททา นเนียมใช้ส่วนผสมน้ำกับผงอนุภาคไททาเนียม 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และค่าตัวแปรต่างๆ ที่มีผล ต่อการถ่ายเทความร้อนโดยการพาของครีบนิตช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก

บทที่ 2

ทฤษฎี

หลักการถ่ายเทความร้อน (Principle of heat transfer)

การศึกษาเรื่องการถ่ายเทความร้อนโดยทั่วไปมีรูปแบบการถ่ายเทความร้อนอยู่ด้วยกัน 3 แบบคือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี การถ่ายเทความร้อนทั้ง 3 แบบ เป็นสิ่งที่สำคัญยิ่งสำหรับงานทางด้านการถ่ายเทความร้อน ทั้งที่เกิดขึ้นในวัสดุที่เป็นของแข็ง และของไหล ซึ่งจะได้กล่าวถึงหลักในการถ่ายเทความร้อนทั้ง 3 แบบดังนี้

1. การนำความร้อน (Heat conduction)

การนำความร้อน คือวิธีการถ่ายเทพลังงานความร้อนที่ความร้อนเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำภายในตัวกลางเดียวกัน หรือเป็นการเคลื่อนที่ผ่านโมเลกุลของสารโดยที่โมเลกุลไม่เคลื่อนที่ (Steady state) การนำความร้อนจะเกิดขึ้นได้ดีมากในตัวกลางที่เป็นของแข็ง การเคลื่อนที่ของความร้อนแบบนี้เกิดขึ้นได้ดีมากในตัวกลางที่เป็นของแข็ง การเคลื่อนที่ของความร้อนแบบนี้เกิดขึ้นบ้างในของเหลวและก๊าซ แต่มักจะแยกไม่ออกจากกัน การเคลื่อนที่ของความร้อนแบบการนำความร้อนเคลื่อนที่โดยการนำได้โดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้ความร้อนยังเคลื่อนที่ไปได้โดยการสั่นสะเทือนของโมเลกุลภายในของแข็ง ในลักษณะของพลังงานของความสั่นสะเทือน (Vibration Energy) อีกด้วย

หลักการคำนวณเกี่ยวกับการนำความร้อนถูกตั้งขึ้นโดยโจเซฟ โฟริเออร์ (Joseph Fourier) ได้เสนอสมการที่ใช้สำหรับคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการนำไว้ดังนี้

$$Q_x = kA \left[\frac{dT}{dx} \right] \quad (2.1)$$

โดยที่ Q_x คือ อัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการนำ (W)

k คือ ค่าการนำความร้อน ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)

dT คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิ ($^\circ\text{C}$)

dx คือ ความแตกต่างของความยาวในทิศทาง x , (m)

A คือ พื้นที่ที่ตั้งฉากกับการถ่ายเทความร้อน, (m^2)

2. การพาความร้อน (Heat Convection)

การพาความร้อนเป็นกระบวนการถ่ายเทพลังงานความร้อนที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของมวลของของไหล โดยเฉพาะอย่างยิ่งการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวของแข็งกับของไหลที่พัดผ่านไปบนผิวของแข็งนั้นเช่น อากาศ น้ำหรือ ไขมัน เมื่อมีของไหล (Fluid) สัมผัสกับพื้นที่ผิวของวัตถุใดๆ ที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน จะเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนขึ้น ในสภาพธรรมชาติเมื่อของไหลถูกทำให้ร้อนจะสามารถเคลื่อนที่จากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้ทำให้เกิดการไหลเวียนพาความร้อนพาเพราะโมเลกุลที่เย็นและหนักกว่าจะตกลงข้างล่าง ส่วนโมเลกุลที่ร้อนและเบากว่าจะลอยตัวขึ้นหรืออาจกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า การพาความร้อนเป็นลักษณะการถ่ายเทความร้อน โดยมีอากาศเป็นสื่อกลางในการพาความร้อนจากวัตถุ หนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่งเช่น พัดลมเป่าผม จะใช้ลมเป่าผ่านเครื่องทำความร้อน (Heater) ให้ลมพาความร้อนไปให้เส้นผม เป็นต้น ลักษณะของการพาความร้อนที่เกิดขึ้นอาจขึ้นแบ่ง ออกได้ตามแรงที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนในโมเลกุลของของไหลได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. การพาความร้อนแบบอิสระ หรือโดยธรรมชาติ (Free or Natural Convection) เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหลเนื่องจากของไหล เมื่อได้รับความร้อน (อุณหภูมิลอยตัวสูงขึ้น) จะมีความหนาแน่นลดลงกว่าอากาศโดยรอบ ทำให้เกิดการลอยตัวสูงขึ้นเช่น ควันที่ลอยขึ้นจากปล่องไฟ

2. การพาความร้อนแบบบังคับ เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยใช้แรงภายนอกมาทำให้ของไหลเคลื่อนที่ผ่านพื้นผิวของแข็งที่มีอุณหภูมิต่างกันไปในทิศทางที่กำหนดไว้ เช่น แรงจากปั๊มหรือพัดลม

อัตราการพาความร้อนสามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$Q_x = hA(T_h - T_c) \quad (2.2)$$

โดยที่ h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $W/m^2 \cdot K$

Q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ของของแข็งที่สัมผัสกับของไหล (W)

T_h คือ อุณหภูมิของของไหลหรือพื้นที่ผิวของของแข็งที่ร้อนกว่า, ($^{\circ}C$)

T_c คือ อุณหภูมิที่เย็นกว่าของของไหลหรือพื้นผิวของของแข็ง, ($^{\circ}C$)

A คือ พื้นที่สัมผัสระหว่างผนังท่อกับการไหลของของไหล, (m^2)

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h แปรผันได้กว้างมาก ค่าที่ถือเป็นแบบอย่างของ h ถูกแสดงไว้ดังตาราง 1

ตาราง 1 พิสัยของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

Mode	h
	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
การพาความร้อนอิสระ	
ก๊าซ	5-20
ของเหลว	50-1,000
การพาความร้อนบังคับ	
ก๊าซ	25-250
ของเหลว	100-20,000
การพาความร้อนแบบเปลี่ยนสถานะ	
การเดือดหรือการควบแน่น	25,000-100,000

3. การแผ่รังสีความร้อน (Heat Radiation)

การแผ่รังสีความร้อนเป็นการถ่ายเทพลังงานความร้อนทะลุผ่านช่องว่างใดๆ (Through Space) ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Waves) จากพื้นผิวของวัตถุที่มีอุณหภูมิ สูงกว่าไปยังพื้นผิวของวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าในทุกทิศทางในความเป็นจริงแล้วการเกิด การแผ่รังสีเกิดการแผ่รังสีอย่างแท้จริงของความร้อนระหว่างวัตถุใดๆ จะไม่ทำให้อุณหภูมิของตัวกลาง ที่ความร้อนนั้นผ่านเพิ่มสูงขึ้น เมื่อรังสีนี้ไปตกกระทบวัตถุใดๆ บางส่วนอาจจะสะท้อน บางส่วนอาจจะ ส่งผ่านทะลุไป บางส่วนอาจ ถูกดูดกลืนไว้และถ้ารังสีตกกระทบคือรังสีความร้อนรังสีที่ถูกดูดกลืนไว้จะ ปรากฏเป็น ความร้อนภายในวัตถุนั้นด้วยความเร็วแสงการแผ่รังสีความร้อนสามารถผ่านสุญญากาศ ได้ซึ่ง ต่างจากการนำความร้อน และการพาความร้อนซึ่งจะต้องอาศัยตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน พลังงานการแผ่รังสีที่ปลดปล่อยจากวัตถุสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Q_x = \sigma AT^4 \quad (2.3)$$

โดยที่ σ คือ ตัวคงที่สเตฟาน-โบลตซ์มันน์ (Stefan-Boltzmann Constant) เท่ากับ $5.7 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$

A คือ พื้นผิวที่เปล่งพลังงานรังสี, (m^2)

T คือ อุณหภูมิของวัตถุ, ($^{\circ}C$)

การถ่ายเทความร้อนโดยการพาแบบบังคับสำหรับการไหลภายในท่อ (Forced Convection for Flow Inside Ducts)

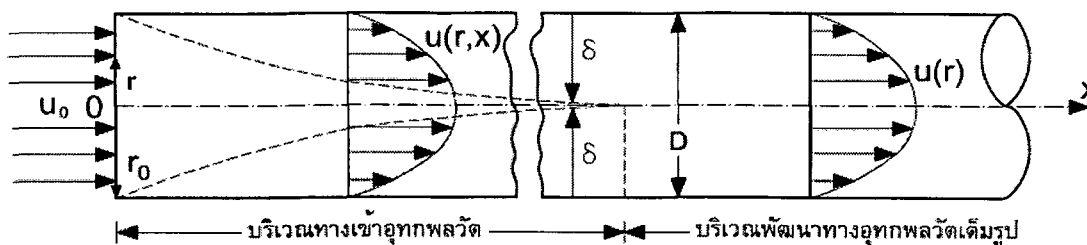
หลักการ และแนวความคิด

การพิจารณาถึงวิธีการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนและความดันลดในการพาความร้อนแบบบังคับให้ของไหลไหลไปในท่อซึ่งอาจเป็นการไหลแบบราบเรียบหรือไหลแบบปั่นป่วนได้ การไหลภายในท่อชั้นขอบเขตของของไหลจะไม่สามารถเพิ่มความหนาขึ้นเรื่อย ๆ เพราะมีขีดจำกัดที่ระยะหนึ่ง ชั้นขอบเขตของของไหลจะมาบรรจบกันที่จุดศูนย์กลางของท่อซึ่งจะแตกต่างจากการไหลภายนอกท่อ ชั้นขอบเขตของของไหลจะสามารถเพิ่มความหนาขึ้นได้โดยไม่มีขีดจำกัดตราบใดที่ยังไม่เกิดการแยกตัวของของไหล

การพิจารณาถึงกลไกทางกายภาพโดยเริ่มพิจารณาผลของความเร็วที่ทำให้เกิดการไหลภายในท่อ การพัฒนาชั้นขอบเขตความเร็ว จากนั้นจะพิจารณาผลของการเกิดชั้นขอบเขตความร้อนแล้วใช้กฎการอนุรักษ์พลังงานในการหาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของของไหลในทิศทางการไหล ในตอนสุดท้ายจะใช้สหสัมพันธ์แบบต่าง ๆ สำหรับคาดคะเนการไหลของความร้อนและความดันลด การไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อเป็นปัญหาที่พบในงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ส่วนการไหลแบบราบเรียบในท่อมักพบในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและระบบให้ความร้อนหรือให้ความเย็นแก่ของไหล สหสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียดทานส่วนมากเป็นความสัมพันธ์แบบเอมพิริคัลหรือกึ่งเอมพิริคัล ในการใช้ความสัมพันธ์เหล่านี้จะต้องเข้าใจถึงข้อจำกัดก่อนนำไปใช้งาน

การพิจารณาทางด้านอุทกพลวัต (Hydrodynamic Consideration)

สิ่งสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณาสำหรับการไหลภายในท่อคือ เงื่อนไขของการไหล เช่น ไหลแบบปั่นป่วนหรือราบเรียบ ไหลในบริเวณทางเข้าหรือไหลในบริเวณที่พัฒนาเต็มรูปแบบแล้ว การไหลแบบราบเรียบ เมื่อของไหลไหลเข้าในท่อกลมที่มีรัศมี r_0 ดังภาพประกอบ 1 ของไหลมีความเร็วสม่ำเสมอ u_0 ที่ทางเข้าท่อ เมื่อของไหลไหลเข้าท่อ ชั้นขอบเขตความเร็วจะเริ่มพัฒนาไปตามพื้นผิวของผนัง (Wall Surface) ความเร็วของอนุภาคของของไหลที่พื้นที่ผิวของผนังจะเป็นศูนย์ ความเร็วของอนุภาคที่อยู่ห่างจากผนังจะมีค่าสูงสุดที่จุดกึ่งกลางของท่อ ความหนาของชั้นขอบเขตความเร็ว $\delta_{(x)}$ จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องไปตามพื้นผิวท่อจนกระทั่งเต็มท่อ ระยะทางจากทางเข้าของท่อจนถึงจุดที่ชั้นขอบเขตความเร็วมาบรรจบกันที่กึ่งกลางของท่อเรียกว่า ความยาวทางเข้าอุทกพลวัต (Hydrodynamic Entry Length) $x_{fd,h}$ ในบริเวณนี้รูปแบบของความเร็วจะเปลี่ยนแปลงทั้งทางแนวแกนและแนวรัศมี บริเวณที่อยู่ห่างจาก $x_{fd,h}$ เรียกว่าบริเวณที่พัฒนาทางอุทกพลวัตเต็มรูปแบบ (Hydrodynamically Fully Developed Region) บริเวณนี้รูปแบบของความเร็วจะไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะทาง x การไหลที่ระยะ $x > x_{fd,h}$ เรียกว่าการไหลแบบพัฒนาเต็มรูปแบบแล้ว รูปแบบของความเร็วจะมีลักษณะเป็นพาราโบลา ส่วนการไหลแบบปั่นป่วนรูปแบบของความเร็วจะมีลักษณะแบนกว่าเพราะเกิดจากการผสมกันของของไหลในแนวรัศมี



ภาพประกอบ 1 การพัฒนาชั้นขอบเขตความเร็วเมื่อมีการไหลราบเรียบภายในท่อกลม

สำหรับการไหลภายในท่อกลม ตัวเลขเรย์โนลด์อาจนิยามดังนี้

$$Re = \frac{u_m D}{\nu} = \frac{u_m D \rho}{\mu} \quad (2.4)$$

เมื่อ u_m คือความเร็วเฉลี่ยของของไหลที่หน้าตัดหนึ่ง ๆ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์วิกฤตเป็นตัวเลขที่บอกว่าการไหลเปลี่ยนแปลงจากไหลราบเรียบเป็นการไหลแบบปั่นป่วนเมื่อไร การไหลแบบปั่นป่วนจะเกิดขึ้นเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์วิกฤตมีค่ามากกว่า 2300

$$Re_c = \frac{u_m D}{\nu} > 2300 \quad (2.5)$$

การไหลแบบปั่นป่วนจะสมบูรณ์เมื่อ $Re > 4000$ และเป็นการไหลแบบราบเรียบเมื่อ $Re < 2300$ ส่วน $2300 < Re < 4000$ การไหลอาจเป็นแบบราบเรียบหรือปั่นป่วนก็ได้ ขึ้นอยู่กับความหยาบของผิวและเงื่อนไขตอนที่ไหลเข้าท่อ

สำหรับการไหลราบเรียบ

$$(X_{fd,h})_{Lam} = 0.05 Re D \quad (2.6)$$

ความเร็วเฉลี่ยของของไหลที่หน้าตัดหนึ่ง ๆ หาได้จากสมการ

$$\dot{m} = \rho u_m A_c \quad (2.7)$$

สำหรับการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ในสภาวะคงที่ในท่อกลมที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ $\frac{\pi D^2}{4}$ ตัวเลขเรย์โนลด์อาจหาได้จากสมการ

$$\text{Re} = \frac{4 \dot{m}}{\pi D \mu} \quad (2.9)$$

อัตราการไหลของมวลสารอาจหาได้จากการรวมมวลก้อนเล็กๆเข้าด้วยกันตลอดหน้าตัด

$$\dot{m} = \int_A \rho u(r, x) dA \quad (2.10)$$

และความเร็วเฉลี่ย

$$u_m = \frac{\int_A \rho u(r, x) dA}{\rho A} \quad (2.11)$$

ค่าความเร็วเฉลี่ย u_m สามารถหาได้จากสมการ (2.11) ถ้าทราบสมการความเร็ว $u(r, x)$ ที่หน้าตัด การหาค่า $u(r, x)$ ในบริเวณที่ขึ้นขอบเขตนี้ คือ

(1) ความเร็วในทิศทางตามแกนรัศมี r คือ $v = 0$

(2) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วตามแกน x ของท่อคือ $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$

ดังนั้นความเร็วตามแกน x จะเปลี่ยนแปลงตามรัศมี r เท่านั้นคือ $u(r, x) = u(r)$ ความเร็วนี้หาได้จากสมการ x – โมเมนตัม

$$\frac{dP}{dx} = \mu \left(\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} \right) = \frac{\mu}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{du}{dr} \right) \quad (2.12)$$

เนื่องจาก $\frac{dP}{dx}$ ไม่เปลี่ยนแปลงตาม r เมื่ออินทิเกรตสมการ (2.12) สองครั้งนี้จะได้

$$u(r) = \frac{1}{\mu} \left(\frac{dP}{dx} \right) \frac{r^2}{4} + C_1 \ln r + C_2$$

ค่าคงที่ C_1 และ C_2 หาจากเงื่อนไขที่ขอบเขต 2 เงื่อนไขคือ

$$u(r_0) = 0 \text{ และ } \left. \frac{\partial u}{\partial r} \right|_{r=0} = 0$$

จากเงื่อนไขทั้งสองจะได้ความเร็ว

$$u(r) = -\frac{r_0^2}{4\mu} \left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \frac{dP}{dx} \quad (2.13)$$

สมการ (2.13) แสดงให้เห็นว่ารูปแบบของความเร็วในการไหลในชั้นขอบเขตที่พัฒนาเต็มรูปแบบแล้วมีลักษณะเป็นพาราโบลา และ $\frac{dP}{dx}$ จะมีค่าเป็นลบเสมอ ดังนั้นความดันจะมีค่าลดลงตามทิศทางการไหลของไหล

ความเร็วของการไหลเฉลี่ย u_m ที่พื้นที่หน้าตัดของท่อหาจากสมการ (2.11)

$$u_m = \frac{1}{\pi r_0^2} \int_0^{r_0} 2\pi r u(r) dr = -\frac{r_0^2}{8\mu} \frac{dP}{dx} \quad (2.14)$$

ตัวประกอบความเสียดทานและความดันลด

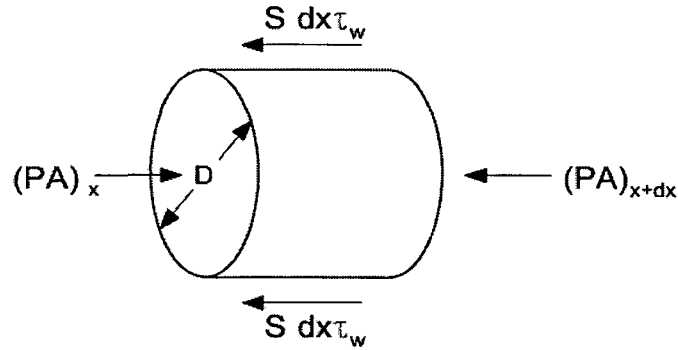
การหาความดันลดในการไหลภายในท่อเป็นสิ่งจำเป็นเพราะนักศึกษาจะต้องนำมาคำนวณหา กำลังของปั๊มหรือโบลเวอร์ (Blower) ที่ใช้ในการขับให้ของไหลไหลไปตามท่อให้ได้ตามระยะทางที่ต้องการ การหาความดันลดให้พิจารณา Moody Friction Factor, f ดังนี้

$$\frac{dP}{dx} = -f \frac{\rho u_m^2}{2D} \quad (2.15)$$

ตัวประกอบความเสียดทาน f นี้แตกต่างจากสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน C_f (Friction Coefficient หรือ Fanning Friction Factor) ซึ่งนิยามไว้ดังนี้

$$C_f = \frac{\tau_w}{(\rho u_m^2 / 2)} \quad (2.16)$$

เกรเดียนต์ความดัน $\frac{dP}{dx}$ ที่เกิดจากการไหลไปตามท่อหาจากภาพประกอบ 2 โดยพิจารณา สมดุลแรงบนปริมาตรควบคุมเล็กๆที่มีความยาว dx ดังนี้



ภาพประกอบ 2 สมดุลแรงบนปริมาตรควบคุมเล็กๆ

$$(PA)_x - (PA)_{x+dx} = S dx \tau_w$$

$$\frac{dP}{dx} = -\frac{S}{A} \tau_w = -\frac{\pi D}{(\pi D^2 / 4)} \tau_w = -\frac{4}{D} \tau_w \quad (2.17)$$

เมื่อ A คือพื้นที่หน้าตัดของท่อ S คือเส้นรอบรูปและ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ความเค้นเฉือนที่ผนังท่อ τ_w เกี่ยวข้องกับการเกรเดียนต์ความเร็วดังนี้

$$\tau_w = \mu \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_w = -\mu \left. \frac{\partial u}{\partial r} \right|_w \quad (2.18)$$

แรงเฉือนของไหลกระทำต่อผิวมีขนาดเท่ากับแรงเฉือนที่ผิวกระทำต่อของไหล แต่มีทิศทางตรงข้ามกัน ดังนั้นจาก (2.17) และ (2.18) จะได้

$$\frac{dP}{dx} = \frac{4\mu}{D} \left. \frac{\partial u}{\partial r} \right|_w \quad (2.19)$$

แทนค่าสมการ (2.19) ลงในสมการ (2.15) จะได้

$$f = -8 \frac{\mu}{\rho u_m^2} \left. \frac{\partial u}{\partial r} \right|_w \quad (2.20)$$

และ $C_f = \frac{f}{4} \quad (2.21)$

แทนค่าสมการ (2.4) และ (2.14) ลงในสมการ (2.15) จะได้

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \quad (2.22)$$

ตัวประกอบความเสียดทาน f หาได้จากสมการ (2.20) เมื่อทราบการกระจายความเร็วภายในท่อและจากสมการ (2.22) เมื่อการไหลเป็นแบบราบเรียบในบริเวณที่ของไหลมีการพัฒนาเต็มรูปแล้ว ถ้าทราบตัวประกอบความเสียดทาน f แล้วก็สามารถหาความดันลด $P_1 - P_2 = \Delta P$ สำหรับระยะทาง $x_2 - x_1 = L$ ของท่อได้โดยการอินทิเกรตสมการ (2.15)

$$\int_{P_1}^{P_2} dP = -f \frac{\rho u_m^2}{2D} \int_{x_1}^{x_2} dx$$

$$P_2 - P_1 = -f \frac{L}{D} \frac{\rho u_m^2}{2} \quad (2.23)$$

ถ้า Q คืออัตราการไหลเชิงปริมาตร (m^3/s) ภายในท่อ กำลังงานที่ใช้ในการปั๊มเพื่อให้ของไหลไหลไปตามท่อได้ตามระยะทางที่กำหนดคือ

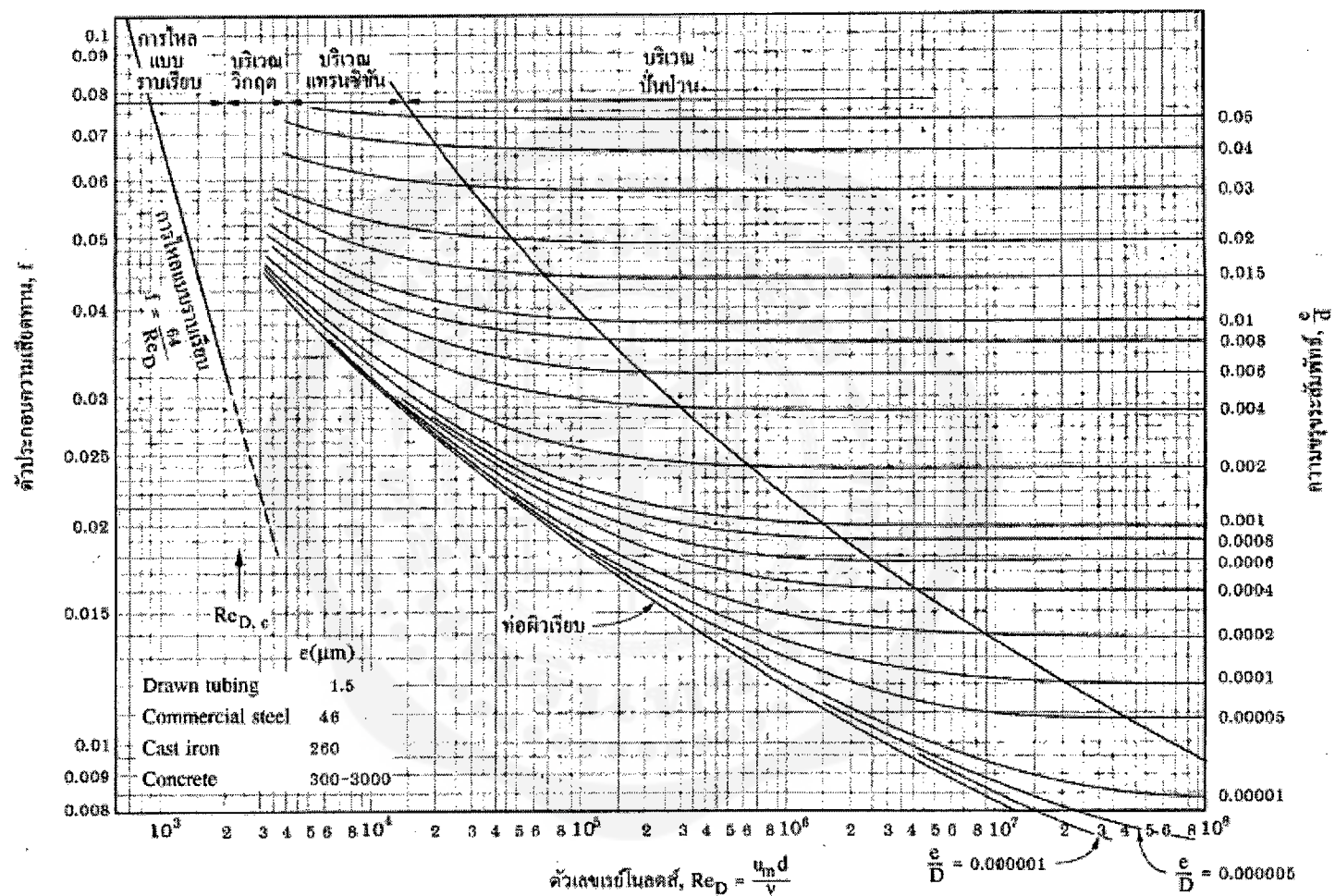
$$P = \text{กำลังงานที่ใช้ปั๊ม} = (Q \text{ m}^3/\text{s}) (\Delta P \text{ N/m}^2)$$

$$P = Q \Delta P \quad \text{N-m/s หรือ W} \quad (2.24)$$

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนบริเวณที่มีการพัฒนาเต็มรูปแล้ว การวิเคราะห์ทำได้ยากส่วนใหญ่ มักใช้ผลที่ได้จากการทดลอง ค่าตัวประกอบความเสียดทาน f อ่านได้จากภาพประกอบ 3 ค่า f นอกจากจะขึ้นอยู่กับค่าตัวเลขเรย์โนลด์แล้วยังขึ้นอยู่กับความขรุขระของผนังท่อด้วยผนังท่อเรียบจะมีค่า f ต่ำกว่าท่อที่มีผนังขรุขระ สำหรับท่อผนังเรียบอาจประมาณค่า f ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$f = 0.316 \text{Re}^{-1/4} \quad \text{Re} \leq 2 \times 10^4 \quad (2.25)$$

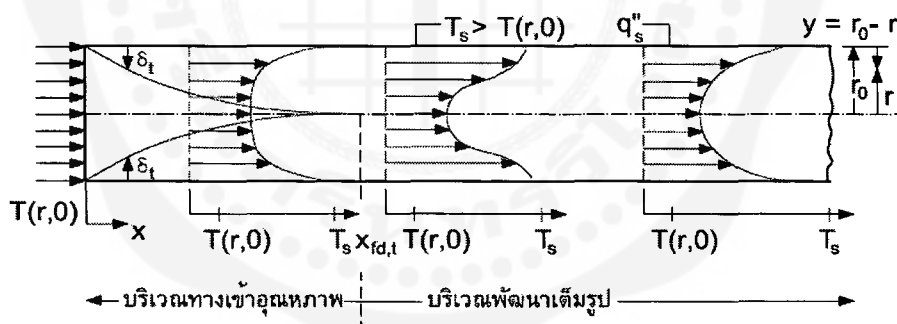
$$f = 0.184 \text{Re}^{-1/5} \quad \text{Re} \geq 2 \times 10^4 \quad (2.26)$$



ภาพประกอบ 3 แผนภูมิสำหรับหาตัวประกอบความเสียดทานสำหรับการไหลเต็มท่อกลม

การพิจารณาทางด้านความร้อน

การถ่ายเทความร้อนเมื่อมีของไหลไหลเข้าไปในท่อ สมมติว่าของไหลมีอุณหภูมิสม่ำเสมอ T_{in} ไหลเข้าไปในท่อที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน อนุภาคของของไหลในชั้นที่สัมผัสกับผิวท่อจะสมมติให้มีอุณหภูมิเท่ากับผิวท่อซึ่งจะทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนโดยการพาขึ้นในท่อ และการพัฒนาขึ้นของเขตความร้อนไปตามท่อ ความหนาของชั้นขอบเขตความร้อนจะเพิ่มขึ้นในทิศทางการไหลของของไหล จนกระทั่งชั้นของเขตมาพบกันที่จุดกึ่งกลางท่อแล้วจะเกิดบริเวณของไหลที่เรียกว่าบริเวณที่พัฒนาทางความร้อนเต็มรูป (Thermally Fully Developed Region) ดังภาพประกอบ 4 บริเวณของไหลตรงที่เริ่มพัฒนาขึ้นของเขตความร้อนจนถึงบริเวณที่ชั้นขอบเขตความร้อนมาพบกันที่จุดกึ่งกลางท่อเรียกว่า "บริเวณทางเข้าอุณหภูมิภาพ (Thermal Entry Region)" และความยาวของบริเวณนี้เรียกว่า "ความยาวทางเข้าอุณหภูมิภาพ (Thermal Entry Length) $X_{fd,t}$ " รูปแบบของอุณหภูมิ (Temperature Profile) ในบริเวณที่พัฒนาทางความร้อนอาจแปรตามระยะทาง x ในทิศทางการไหลซึ่งจะไม่เหมือนกับรูปแบบของความเร็ว รูปแบบของอุณหภูมิจึงแตกต่างกันที่หน้าตัดต่าง ๆ ของท่อในบริเวณที่พัฒนา อย่างไรก็ตามการนิยามรูปแบบของอุณหภูมิในรูปไร้มิติ เช่น $\frac{(T - T_s)}{(T_m - T_s)}$ จะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงในบริเวณที่พัฒนาทางความร้อน เมื่ออุณหภูมิหรือฟลักซ์ความร้อนที่ผิวท่อมีค่าคงที่



ภาพประกอบ 4 การพัฒนาชั้นขอบเขตความร้อนในท่อกลม

ในการไหลแบบราบเรียบในท่อ ตัวเลขพรันด์เทิลนัมเบอร์ Pr จะใช้ในการวัดการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของชั้นขอบเขตความเร็วและความร้อน เช่นของไหลที่มีชั้นขอบเขตทั้งสองจะทับกัน ถ้า $Pr \gg 1$ เช่น น้ำมัน ชั้นขอบเขตความเร็วจะเจริญเติบโตขึ้นเร็วกว่าชั้นขอบเขตความร้อน ดังนั้น $X_{fd,h} < X_{fd,t}$ ถ้า $Pr \ll 1$ เช่น โลหะเหลว ชั้นขอบเขตความร้อนจะเจริญเติบโตเร็วกว่าชั้นขอบเขตความเร็ว

การไหลแบบราบเรียบ ความยาวทางเข้าอุณหภูมามีค่าประมาณดังนี้

$$[X_{fd,t}]_{Lam} \approx 0.05 Re Pr D \quad (2.27)$$

การไหลแบบปั่นป่วน ความยาวทางเข้าอุทกพลวัต และความยาวอุณหภูมจะไม่ขึ้นอยู่กับ Re หรือ Pr จึงใช้สมการ (2.28) มีค่าประมาณดังนี้

$$[X_{fd,h}] \approx [X_{fd,t}] \approx 10D \quad (2.28)$$

การหาอุณหภูมิเฉลี่ย

เมื่อของไหลไหลผ่านท่อกลม ของไหลอาจถูกทำให้ร้อนขึ้นหรือเย็นลงก็ได้ อุณหภูมิของของไหลที่หน้าตัดใดๆ จะเปลี่ยนจาก T_s ที่ผิวของผนังที่หน้าตัดนั้นจนมีค่าสูงสุด (หรือต่ำสุดในกรณีที่ทำให้ความร้อน) ที่จุดศูนย์กลางของท่อ เพื่อความสะดวกในการศึกษาเกี่ยวกับการไหลของของไหล ควรใช้ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ T_m ที่มีค่าคงที่ที่หน้าตัดหนึ่งอุณหภูมิเฉลี่ย T_m จะเปลี่ยนแปลงในทิศทางการไหล ค่าของอุณหภูมิเฉลี่ย T_m ที่หน้าตัดหนึ่งอาจนิยามในเทอมของพลังงานความร้อนที่ถ่ายทอดโดยของไหลเมื่อของไหลที่หน้าตัดมีพื้นที่ A คือ E_t หาจากสมการ (2.29)

$$\dot{E}_t = \int_A \rho u c_v T dA \quad (2.29)$$

ถ้าทราบค่าอุณหภูมิเฉลี่ย T_m จะได้

$$\dot{E}_t = \dot{m} c_v T_m \quad (2.30)$$

ดังนั้น

$$T_m = \frac{\int_A \rho u c_v T dA}{\dot{m} c_v} \quad (2.31)$$

ถ้าของไหลที่ไหลในท่อกลมเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้ จะมีค่าคงที่ และถ้า c_v มีค่าคงที่ จะได้

$$T_m = \frac{\rho c_v \int_0^{r_0} u T d\pi r^2}{\rho \pi r_0^2 u_m c_v} = \frac{2 \int_0^{r_0} u T r dr}{r_0^2 u_m} \quad (2.32)$$

การหาอัตราการถ่ายเทความร้อน

อัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ของไหลหรือออกจากของไหล หาจากสมการ (2.33)

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p (T_{m,out} - T_{m,in}) \quad (2.33)$$

เมื่อ $T_{m,in}$ และ $T_{m,out}$ เป็นอุณหภูมิของของไหลเฉลี่ยที่ทางเข้า และทางออกของท่อ

เงื่อนไขทางความร้อนที่ผิวของท่ออาจมีได้ 2 แบบ

- (1) อุณหภูมิของผิวท่อคงที่ ($T_s =$ ค่าคงที่) เช่นมีการเปลี่ยนแปลงสถานะเกิดขึ้นที่ผิวด้านนอกของท่อ ได้แก่ การเดือด หรือการควบแน่น
- (2) ฟลักซ์ความร้อนที่ผิวท่อมีค่าคงที่ เพราะท่อได้รับรังสีความร้อนหรือการให้ความร้อนด้วยหลอดต้านทานไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอ ฟลักซ์ความร้อนโดยการพาที่ตำแหน่งใด ๆ ภายในท่อคือ

$$q'' = h(T_s - T_m) \quad (2.34)$$

เมื่อ h คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาที่จุดใดๆ T_s และ T_m เป็นอุณหภูมิของผิวและอุณหภูมิของของไหลเฉลี่ยที่ตำแหน่งนั้น ค่า T_m จะเปลี่ยนแปลงไปตามทิศทางการไหล

เนื่องจากการพาความร้อนระหว่างผิวท่อและของไหล อุณหภูมิของของไหลจะต้องเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทาง x dT_m/dx และ $\partial T/\partial x$ ที่รัศมีใดๆ จะไม่เท่ากับศูนย์ ดังนั้นรูปแบบของอุณหภูมิ $T(r)$ จะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทาง x อย่างต่อเนื่องทำให้ดูเหมือนว่าสภาพการพัฒนามีรูปร่างไม่สามารถเกิดขึ้นได้ ในการวิเคราะห์ปัญหานี้เพื่อให้ง่ายจึงต้องใช้รูปแบบไร้มิติของอุณหภูมิเป็น $(T_s - T)/(T_s - T_m)$ อัตราส่วนนี้จะไม่ขึ้นกับ x การไหลจึงมีการพัฒนาทางความร้อนเต็มรูปแบบและ

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{T_s(x) - T(r, x)}{T_s(x) - T_m(x)} \right]_{fd, t} = 0 \quad (2.35)$$

เมื่อ $T_s(x)$ คืออุณหภูมิที่ผนังท่อ $T(r, x)$ คืออุณหภูมิของของไหลที่ตำแหน่ง (r, x) และ $T_m(x)$ คืออุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลตลอดหน้าตัดของท่อ เนื่องจากอัตราส่วนอุณหภูมิในสมการ (2.35) ไม่ขึ้นกับค่า x ดังนั้นอนุพันธ์ของอัตราส่วนนี้เทียบกับ r ต้องไม่ขึ้นอยู่กับค่า x ด้วย นั่นคือ

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{T_s(x) - T(r, x)}{T_s(x) - T_m(x)} \right]_{r=r_0} = - \frac{\frac{\partial T(r, x)}{\partial r} \Big|_{r=r_0}}{T_s(x) - T_m(x)} \neq f(x)$$

จากกฎของฟูเรียร์

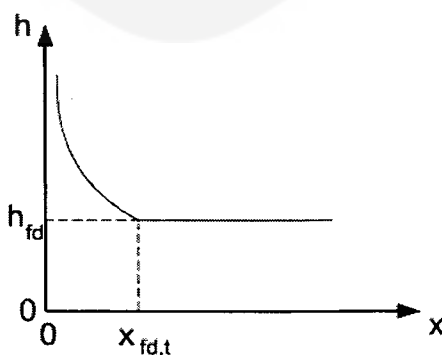
$$q_s'' = -k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_0}$$

และ

$$h(T_s - T_m) = k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_0}$$

จะได้

$$\frac{h}{k} \neq f(x) \quad (2.36)$$



ภาพประกอบ 5 การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสำหรับการไหลภายในท่อ

ดังนั้นในการไหลที่มีการพัฒนาทางความร้อนเต็มรูป สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะมีค่าคงที่ คือไม่แปรตามค่า x ส่วนบริเวณทางเข้าท่อค่า h จะแปรตามค่า x ดังภาพประกอบ 5 เมื่อ $x=0$ h จะมีค่าสูงสุดและจะลดลงมาอย่างรวดเร็วตามความหนาของชั้นขอบเขตความร้อน จนถึงบริเวณที่มีการพัฒนาทางความร้อนเต็มรูป ค่า h จะคงที่

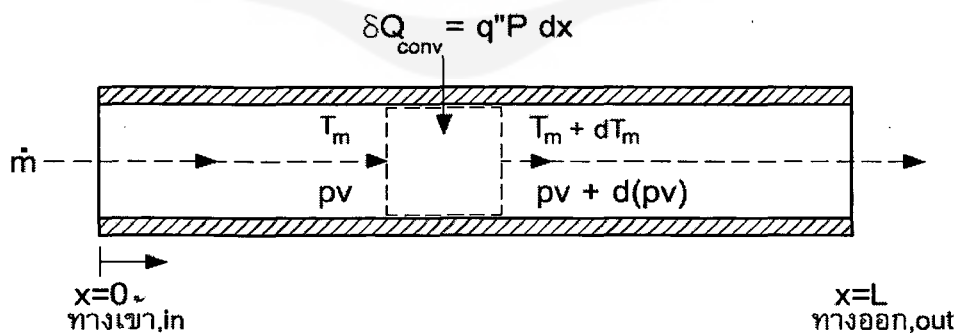
สมดุลทางพลังงาน (Energy Balance)

เมื่อของของไหลไหลภายในท่อ นักศึกษาคงอยากทราบว่าอุณหภูมิของของไหลจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร นักศึกษาสามารถใช้สมดุลทางพลังงานกับปริมาตรควบคุมเล็กๆ ภายในท่อเพื่อหาอุณหภูมิเฉลี่ย $T_m(x)$ ดังภาพประกอบ 6 สมมติให้ของไหลไหลด้วยอัตราการไหลคงที่ $\dot{m}$ และการถ่ายเทความร้อนโดยการพาเกิดขึ้นที่ผิวด้านในของท่อ สมมติว่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ พลังงานศักย์ และการถ่ายเทพลังงาน โดยการนำในทิศทางตามแกน x มีค่าน้อยมากซึ่งจะไม่นำมาคิดไม่มีการไหลนอกมากระทำต่อของไหลในขณะของไหลไหลผ่านท่อ ส่วนงานไหลที่ใช้ในการเคลื่อนของไหลให้ไหลผ่านผิวควบคุมก็คือผลคูณของความดันของของไหล p และปริมาตรจำเพาะของของไหล v ดังนั้นจากกฎการอนุรักษ์พลังงานสำหรับปริมาตรควบคุมเล็กๆ ในภาพประกอบ 6 จะได้

$$\delta Q_{conv} + \dot{m}(c_v T_m + pv) - \left[\dot{m}(c_v T_m + pv) + \dot{m} \left\{ \frac{d(c_v T_m + pv)}{dx} dx \right\} \right] = 0$$

$$\delta Q_{conv} = \dot{m} d(c_v T_m + pv)$$

$$\delta Q_{conv} = q_s'' P dx$$
(2.37)



ภาพประกอบ 6 สมดุลทางพลังงานสำหรับปริมาตรควบคุมของการไหลภายในท่อ

ทางซ้ายมือของสมการ (2.37) คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน โดยการพาไปสู่ของไหล ทางขวามือของสมการคือพลังงานความร้อนของของไหลที่เพิ่มขึ้นบวกกับอัตราสุทธิของงานไหลที่ใช้ในการเคลื่อนของไหลผ่านปริมาตรควบคุม ถ้าของไหลเป็นแก๊สสมบูรณ์และ c_p มีค่าคงที่ สมการ (2.37) จะลดรูปเป็น

$$\delta Q_{conv} = \dot{m} c_p dT_m \quad (2.38)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาตลอดท่อ ถ้าคิดจากทางเข้าถึงทางออกจะได้

$$Q_{conv} = \dot{m} c_p (T_{m,out} - T_{m,in}) \quad (2.39)$$

ถ้ากำหนดฟลักซ์ความร้อนให้ที่ผนังท่อเป็น q_s'' และ P เป็นเส้นรอบรูปของผิว (Surface Perimeter) จะได้อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาเป็น

$$\delta Q_{conv} = q_s'' P dx \quad (2.40)$$

ถ้าฟลักซ์ความร้อนที่ผิวมีค่าคงที่ ($q_s'' = \text{ค่าคงที่}$) ฟลักซ์ความร้อนนี้จะไม่ขึ้นกับค่า x ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาตลอดท่อคือ

$$Q_{conv} = q_s'' PL \quad (2.42)$$

และจากสมการ (2.39) จะได้

$$T_{m,out} - T_{m,in} = \frac{q_s'' PL}{\dot{m} c_p} \quad (2.43)$$

และจากสมการ (2.38) และ (2.40) จะได้

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{q_s'' P}{\dot{m} c_p} = f(x) \quad (2.44)$$

ถ้าอินทิเกรตจาก $x=0$ จนถึง x ใดๆจะได้

$$T_m(x) - T_{m,in} = \frac{q_s'' P}{\dot{m} c_p} x \quad (2.45)$$

ภาพประกอบ 7a จะแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยตามค่า x ตามความยาวของท่อ อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลจะเพิ่มขึ้นเชิงเส้นในทิศทางการไหล เพราะพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเชิงเส้นในทิศทางการไหล อุณหภูมิของผิวท่อในกรณีนี้หาได้จากสูตร $\dot{Q} = hA(T_s - T_m)$ ถ้า h มีค่าคงที่ $T_s - T_m$ จะมีค่าคงที่ด้วย ดังนั้นอุณหภูมิของผิวท่อจะมีค่าเพิ่มขึ้นเชิงเส้นในทิศทางการไหลด้วยเมื่อ c_p มีค่าคงที่ ถ้าอุณหภูมิของผิวท่อมีค่าคงที่ ($T_s =$ ค่าคงที่)

จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน อัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่หรือออกจากของไหลที่กำลังไหลภายในท่อคือ

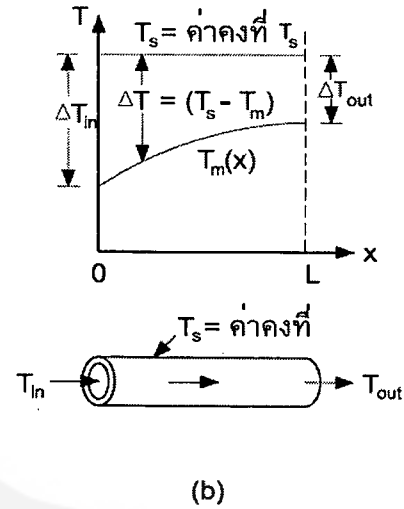
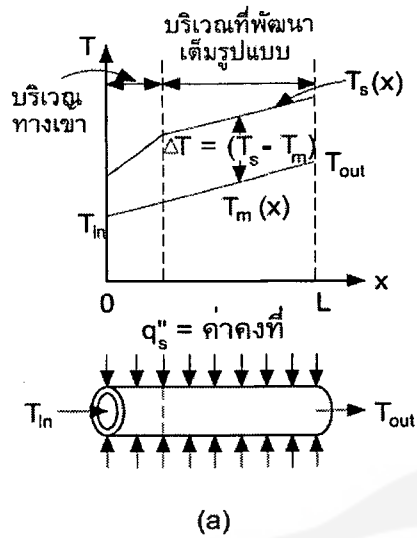
$$Q = hA\Delta T_{ave} = hA(T_s - T_m)_{ave} \quad (2.46)$$

เมื่อ h คือค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน A คือพื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อน ($A = \pi DL$ สำหรับท่อกลมที่มีความยาว L) และ ΔT_{ave} เป็นค่าความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยที่เหมาะสมระหว่างของไหลและผิวท่ออยู่ด้วยกัน 2 แบบ

แบบที่ 1 ความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงคณิตศาสตร์ (Arithmetic Mean Temperature Difference) ΔT_{am} ดังนี้

$$\begin{aligned} \Delta T_{ave} \approx \Delta T_{am} &= \frac{\Delta T_{in} + \Delta T_{out}}{2} = \frac{(T_s - T_{in}) + (T_s - T_{out})}{2} \\ &= T_s - \frac{(T_{in} + T_{out})}{2} = T_s - T_b \end{aligned} \quad (2.47)$$

เมื่อ $T_b = \frac{T_{in} + T_{out}}{2}$ = Bulk Mean Fluid Temperature ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยเชิงคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิของของไหลเฉลี่ยตรงทางเข้าและทางออกจากท่อ ความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงคณิตศาสตร์นี้ บางทีก็ให้ผลที่ยอมรับได้แต่บางครั้งก็ใช้ไม่ได้ ดังนั้นจึงต้องหาค่า ΔT_{ave} ที่ดีกว่านี้



ภาพประกอบ 7 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามความยาวของท่อเมื่อมีการถ่ายเทความร้อน (a) ฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ (b) อุณหภูมิที่ผิวคงที่

แบบที่ 2 ความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบลอการิทึม (Logarithmic Mean Temperature Difference) เมื่ออุณหภูมิที่ผนังท่อมีค่าคงที่ อัตราการถ่ายเทความร้อนและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยตามระยะทางในแกน x จะแตกต่างจากกรณีที่ฟลักซ์ความร้อนที่ผนังมีค่าคงที่ สมมติให้ $\Delta T = T_s - T_m$ และจากสมการ (2.48) และกฎการเย็นตัวของนิวตันจะได้

$$\dot{m} C_p dT_m = h dA (T_s - T_m) \quad (2.48)$$

ดังนั้นการเพิ่มพลังงานความร้อนให้แก่ของไหลจะมีค่าเท่ากับการถ่ายเทความร้อนจากผิวท่อไปสู่ของไหลโดยการพา เมื่อ $dA = P dx$ และ P คือเส้นรอบรูปของท่อ T_s คืออุณหภูมิของผิวท่อซึ่งมีค่าคงที่ เมื่อจัดรูปสมการ (2.48) ใหม่จะได้

$$\frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = \frac{d(T_s - T_m)}{T_s - T_m} = -\frac{hP}{\dot{m} C_p} dx \quad (2.49)$$

เมื่ออินทิเกรตจากทางเข้าท่อจนถึงทางออกจากท่อจะได้

$$\int_{\Delta T_{in}}^{\Delta T_{out}} \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = - \int_{x=0}^L \frac{\dot{P}}{\dot{m} c_p} h dx$$

$$\ln \frac{\Delta T_{out}}{\Delta T_{in}} = - \frac{\dot{P}}{\dot{m} c_p} \int_0^L h dx = - \frac{\dot{P}}{\dot{m} c_p} L \bar{h} \quad (2.50)$$

เมื่อ $\bar{h}$ คือค่าเฉลี่ยของ h ตลอดความยาวของท่อ เมื่อจัดรูปสมการ (2.50) ใหม่จะได้

$$\frac{\Delta T_{out}}{\Delta T_{in}} = \frac{T_s - T_{m,out}}{T_s - T_{m,in}} = \exp \left(- \frac{PL}{\dot{m} c_p} \bar{h} \right) \quad (2.51)$$

ถ้าอินทิเกรตสมการ (2.49) จากทางเข้าท่อจนถึงตำแหน่ง x ใดๆภายในท่อจะได้

$$\frac{T_s - T_{m,x}}{T_s - T_{m,in}} = \exp \left(- \frac{Px}{\dot{m} c_p} \bar{h}_x \right) \quad (2.52)$$

$\bar{h}_x$ คือค่าเฉลี่ยของ h จากทางเข้าท่อจนถึง x ความแตกต่าง อุณหภูมิ $T_s - T_m$ ลดลงตามภาพประกอบ 7b การหาสมการสำหรับอัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด Q_{conv} ดังนี้

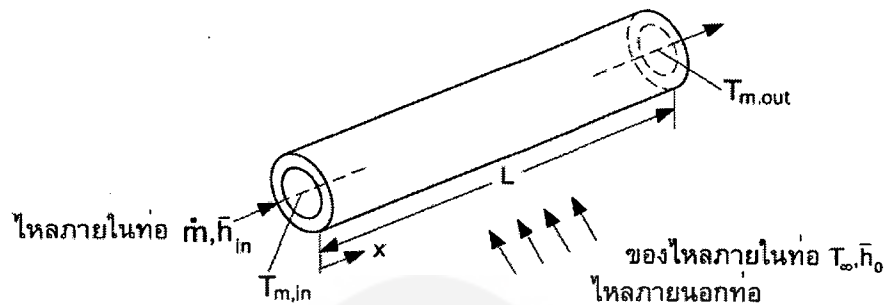
$$Q_{conv} = \dot{m} c_p [(T_s - T_{m,in}) - (T_s - T_{m,out})] = \dot{m} c_p (\Delta T_{in} - \Delta T_{out})$$

เมื่อแทนค่า $\dot{m} c_p$ จากสมการ (2.50) จะได้

$$Q_{conv} = \frac{PL \bar{h}}{\ln \frac{\Delta T_{out}}{\Delta T_{in}}} (\Delta T_{out} - \Delta T_{in}) = A \bar{h} \Delta T_{lm} \quad (2.53)$$

เมื่อ A คือพื้นที่ผิวของท่อ $= P \cdot L$ และ ΔT_{lm} คือความแตกต่างอุณหภูมิแบบลอการิทึม

$$\Delta T_{lm} = \frac{(\Delta T_{out} - \Delta T_{in})}{\ln \frac{\Delta T_{out}}{\Delta T_{in}}} \quad (2.54)$$



ภาพประกอบ 8 การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลที่ไหลผ่านภายนอกท่อและไหลผ่านภายในท่อ

สมการ (2.53) เป็นรูปแบบกฎการเย็นตัวของนิวตัน ΔT_{lm} จะเป็นความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยที่เหมาะสมตลอดความยาวของท่อ ถ้ามีของไหลที่มีอุณหภูมิ T_{∞} คงที่ไหลผ่านภายนอกท่อดังภาพประกอบ ภาพประกอบ 8 ใช้สมการในรูปแบบเดียวกับสมการ (2.53) โดยแทน T_s ด้วย T_{∞} และแทน $\bar{h}$ ด้วย $\bar{U}$ ดังนี้

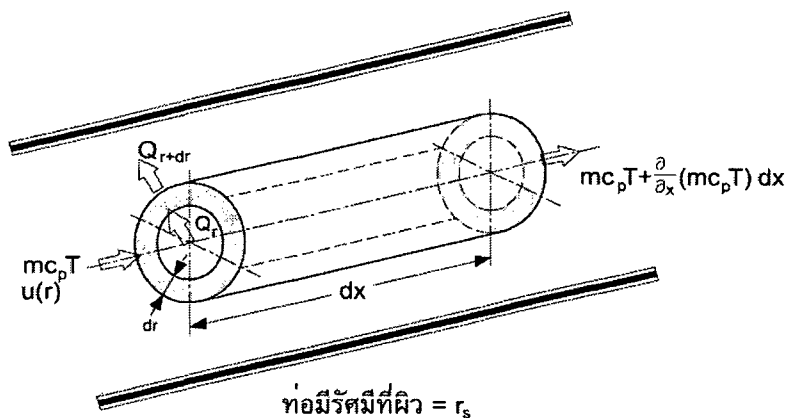
$$Q = \bar{U} A_s \Delta T_{lm} \quad (2.55)$$

และ

$$\frac{\Delta T_{out}}{\Delta T_{in}} = \frac{T_{\infty} - T_{m,out}}{T_{\infty} - T_{m,in}} = \exp \left(- \frac{PL}{m c_p} \bar{U} \right) \quad (2.56)$$

สหสัมพันธ์สำหรับการพาความร้อนแบบไหลราบเรียบในท่อกลม

ในที่นี้จะกล่าวถึงวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามทฤษฎีสำหรับการไหลแบบราบเรียบในท่อกลม และพิจารณาสหสัมพันธ์แบบเอมพิริคัลที่ใช้กับการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อกลมด้วย



ภาพประกอบ 9 ปริมาตรควบคุมเล็กๆ สำหรับการวิเคราะห์พลังงานในการไหลผ่านท่อ

การวิเคราะห์ทางทฤษฎี

การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในท่อที่มีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ พิจารณาปริมาตรควบคุมเล็กๆ ดังภาพประกอบ 9 ความร้อนถ่ายเทโดยการนำเข้าและนำออกจากปริมาตรควบคุมเล็กๆ ในทิศทางตามแนวรัศมี และมีการส่งถ่ายความร้อนโดยการพาในทิศทางตามแนวแกนของท่อ ดังนั้น อัตราการนำความร้อนเข้าสู่ปริมาตรควบคุมคือ

$$Q_r = k2\pi r dx \frac{\partial T}{\partial r}$$

อัตราการนำความร้อนออกจากปริมาตรควบคุมคือ

$$Q_{r+dr} = Q_r + \frac{\partial Q_r}{\partial r} dr = -k2\pi r dx \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial r} \left(-k2\pi r dx \frac{\partial T}{\partial r} \right) dr$$

อัตราการพาความร้อนเข้าสู่ปริมาตรควบคุม

$$mc_p T = \rho 2\pi r dr u(r) c_p T$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากปริมาตรควบคุม

$$mc_p T + \frac{\partial}{\partial x}(mc_p T) dx$$

จากกฎการอนุรักษ์พลังงานภายในปริมาตรควบคุม คือ

$$\dot{E}_m + \dot{E}_g = \dot{E}_o + \dot{E}_{st}, \quad \dot{E}_g = 0 \text{ และ } \dot{E}_{st} = 0$$

ดังนั้น อัตราการนำพลังงานเข้า = อัตราการนำพลังงานออก

$$\begin{aligned} Q_r + mc_p T &= Q_r + \frac{\partial Q_r}{\partial r} dr + mc_p T + \frac{\partial}{\partial x}(mc_p T) dx \\ \frac{\partial}{\partial r} \left(-k 2\pi r dx \frac{\partial T}{\partial r} \right) dr + \frac{\partial}{\partial r} (\rho 2\pi r dr u(r) c_p T) dx &= 0 \\ 2\pi r k \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) dx dr &= \rho 2\pi r dr u c_p \frac{\partial T}{\partial x} dx \\ \frac{1}{ur} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) &= \frac{\rho c_p}{k} \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial x} \end{aligned} \quad (2.57)$$

อุณหภูมิของของไหลจะเพิ่มขึ้นเชิงเส้นตามระยะทาง x เนื่องจากฟลักซ์ความร้อนที่ผิวท่อมีค่าสม่ำเสมอ ดังนั้น

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \text{ค่าคงที่} \quad (2.58)$$

และสมการ (2.57) จะลดรูปจากสมการอนุพันธ์ย่อยมาเป็นสมการอนุพันธ์ธรรมดาโดยมีเงื่อนไขขอบเขตสำหรับการกระจายอุณหภูมิในทิศทาง r ดังนี้

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad \text{ที่ } r = 0$$

$$\text{และ } k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_s} = q_s'' = \text{ค่าคงที่} \quad \text{ที่ } r = r_s$$

ในการแก้สมการ (2.57) ให้แทนค่า $u(r)$ ด้วย $\left[l - \left(\frac{r}{r_s}\right)^2\right] u_{\max}$ โดยสมมติว่าคุณสมบัติมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ดังนั้น

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial x} u_{\max} \left(l - \frac{r^2}{r_s^2} \right) r \quad (2.59)$$

อินทิเกรตครั้งแรกเทียบกับ r จะได้

$$r \frac{dT}{dr} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial x} \frac{u_{\max}}{2} \left(1 - \frac{r^2}{r_s^2} \right) + c_1 \quad (2.60)$$

อินทิเกรตครั้งที่ 2 จะได้

$$T(r, x) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial x} \frac{u_{\max}}{4} r^2 \left(1 - \frac{r^2}{4r_s^2} \right) + c_1 \ln r + c_2 \quad (2.61)$$

แทนค่า $\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0$ ในสมการ (2.60) จะได้ $c_1 = 0$

ถ้ากำหนดให้อุณหภูมิที่จุดศูนย์กลางของท่อ ($r=0$) เป็น T_c จะได้ $c_2 = T_c$ ดังนั้นสมการการกระจายอุณหภูมิก็คือ

$$T - T_c = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial x} \frac{u_{\max}}{4} r_s^2 \left[\frac{r^2}{r_s^2} - \frac{1}{4} \left(\frac{r}{r_s} \right)^4 \right] \quad (2.62)$$

อุณหภูมิรวมเฉลี่ย (Average Bulk Temperature) T_m ที่ใช้ในการนิยามสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้จากสมการ (2.63) ดังนี้

$$T_m = \frac{\int_0^{r_s} (p u c_p T) (2\pi r dr)}{\int_0^{r_s} (p u c_p) (2\pi r dr)} = \frac{\int_0^{r_s} (p u c_p T) 2\pi r dr}{\dot{m} c_p} \quad (2.63)$$

เนื่องจากฟลักซ์ความร้อนจากผนังท่อมีค่าสม่ำเสมอ เอนทาลปีของของไหลในท่อจะต้องเพิ่มขึ้นเชิงเส้นตามค่า x ดังนั้น $\frac{\partial T_m}{\partial x}$ จะมีค่าคงที่ นักศึกษาสามารถคำนวณหาค่า T_m ได้โดยแทนค่าสมการ (2.62) และสมการ $u = [1 - (r/r_s)^2] u_{\max}$ สำหรับ T และ u ในสมการ (2.63) จะได้

$$T_m - T_c = \frac{7}{96} \frac{u_{\max} r_s^2}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.64)$$

ส่วนอุณหภูมิที่ผนังท่อคือ

$$T_a - T_c = \frac{3}{16} \frac{u_{\max} r_s^2}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.65)$$

จากสมการ (2.64) ถึง (2.65) จะได้

$$T_m - T_s = -\frac{11}{96} \frac{u_{\max} r_s^2}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.66)$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาเฉลี่ย $\bar{h}$ หาจากสมการ (2.67) ดังนี้

$$\bar{h} = \frac{Q_{conv}}{A(T_s - T_m)} = -\frac{k(\partial T / \partial r)_{r=r_s}}{T_s - T_m} \quad (2.67)$$

หาค่าเกรเดียนต์อุณหภูมิในแนวรัศมีที่ตำแหน่ง $r = r_s$ จากสมการ (2.60) จะได้

$$\left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=r_s} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial x} \frac{u_{\max} r_s}{4} \quad (2.68)$$

แทนค่าสมการ (2.66) และสมการ (2.68) ลงในสมการ (2.67) จะได้

$$\frac{\bar{h}D}{k} = 436 = \overline{Nu}_D \quad (2.69)$$

เมื่อ $q_s'' =$ ค่าคงที่

เมื่ออุณหภูมิที่ผิวมีค่าคงที่ $T_s =$ ค่าคงที่

การหาค่า $\bar{h}$ มีความยุ่งยากมากเพราะความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างผนังท่อ T_s และอุณหภูมิรวมเฉลี่ย T_m จะแปรเปลี่ยนไปตามความยาวของท่อดังภาพประกอบ 7b นั่นคือ $\frac{\partial T_b}{\partial x} = f(x)$ สามารถแก้สมการ (2.59) โดยใช้เงื่อนไขที่ขอบเขตเพิ่มขึ้นอีกอันคือที่ $r = r_s$ $T(x, r_s) =$ ค่าคงที่ การแก้ระบบสมการของปัญหานี้ต้องใช้วิธีทำซ้ำซึ่งยุ่งยากกว่าในกรณีของฟลักซ์ความร้อนคงที่ แต่ค่า $\overline{Nu}_D$ ที่หามาได้จะมีค่าคงที่

$$\overline{Nu}_D = \frac{\bar{h}D}{k} = 3.66 \quad (2.70)$$

เมื่อ $T_s =$ ค่าคงที่

คุณสมบัติต่าง ๆ เช่นค่าสภาพนำความร้อน k ที่ใช้ในการหาค่า h ควรหาค่าที่ T_m ความสัมพันธ์ทั่วไป สำหรับค่าตัวเลขนัสเซิลท์ในบริเวณทางเข้า (Entry Region) สำหรับการไหลแบบราบเรียบในท่อกลมถูกกำหนดโดย Sieder and Tate ดังนี้

$$\overline{Nu}_D = 1.86 \left(\frac{\text{Re}_D \text{Pr} D}{L} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14} \quad (2.71)$$

เมื่อ $T_s =$ ค่าคงที่ $\text{Pr} > 0.48$ คุณสมบัติควรหาค่าที่อุณหภูมิเฉลี่ย $\bar{T}_m = \frac{(T_{m,in} + T_{m,out})}{2}$ μ_2 หาค่าที่อุณหภูมิผิวท่อ

สหสัมพันธ์สำหรับการพาความร้อนในท่อไม่กลม

งานทางด้านวิศวกรรมบางอย่างอาจเกี่ยวข้องกับการพาความร้อนในท่อไม่กลม ตัวเลขนัสเซลล์ท์และประกอบความเสียดทานสำหรับการไหลแบบราบเรียบในท่อที่มีหน้าตัดต่าง ๆ ได้ถูกรวบรวมไว้ในตาราง 1 สำหรับบริเวณที่รูปแบบของความเร็วและรูปแบบของอุณหภูมิถูกพัฒนาขึ้นมาเต็มรูป ความยาวลักษณะเฉพาะ (Characteristic Length) ใช้แทนได้ด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกดังนี้

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \quad (2.72)$$

เมื่อ A_c คือพื้นที่หน้าตัดของการไหลและ P คือเส้นรอบรูปที่เปียก ดังนั้นตัวเลขนัสเซลล์ท์และตัวเลขเรย์โนลด์สำหรับท่อไม่กลมคือ

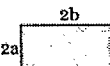
$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (2.73)$$

$$Re = \frac{u_m D_h}{\nu} \quad (2.74)$$

ค่า D_h สำหรับท่อกลมก็คือเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ พื้นที่หน้าตัดของท่อคือ $A_c = \frac{\pi D^2}{4}$ และเส้นรอบรูปคือ $P = \pi D$ สำหรับแผ่นราบที่วางขนานกันจะมีค่าเท่ากับสองเท่าของระยะทางระหว่างแผ่นราบทั้งสอง

ค่า Nu_r และ Nu_H เป็นตัวเลขนัสเซลล์ท์สำหรับกรณีที่อุณหภูมิของผนังท่อมีค่าคงที่และพลักซ์ความร้อนที่ผนังท่อมีค่าคงที่ตามลำดับ ตัวประกอบความเสียดทาน f จะกำหนดเป็นผลคูณของ f และ Re ค่าตัวเลขนัสเซลล์ท์และตัวเลขเรย์โนลด์คำนวณมาจากการใช้เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกที่นิยามโดยสมการ (2.72) เมื่อทราบค่าตัวเลขนัสเซลล์ท์แล้วก็สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาจาก $h = kNu / D_h$

ตาราง 2 ตัวเลขนัสเซลท์สำหรับการไหลแบบราบเรียบในท่อหน้าตัดรูปต่าง ๆ ในบริเวณพัฒนาเต็มท่อ
เชิงอุทกพลวัต และเชิงความร้อน ภายใต้ฟลักซ์ความร้อนที่ผิวท่อคงที่ (H) และอุณหภูมิที่ผิวท่อ
คงที่ (T), ($Nu = hD_h / k, D_h = 4A / p$)

หน้าตัด		$Nu_{(H)}$	$Nu_{(T)}$	$f \propto Re$
		4.36	3.66	64
		3.11	2.49	53.3
	$\frac{a}{b} = \frac{1}{8}$	6.49	5.60	82.3
	$\frac{a}{b} = \frac{1}{4}$	5.33	4.44	72.9
	$\frac{a}{b} = \frac{1}{2}$	4.12	3.39	62.2
	$\frac{a}{b} = 1$	3.61	2.98	56.9
 (หุ้มฉนวน)	$\frac{a}{b} = 0$	8.24	7.54	96.0
	$\frac{a}{b} = 0$	5.39	4.86	96.0

ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของระบบ

ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของระบบโดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับค่าตัวแปรที่สำคัญต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. สถานะของของไหล เช่น ของเหลว หรือก๊าซ
2. ลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นขณะที่ถ่ายเทความร้อน เช่น การไหลแบบราบเรียบ หรือการไหลแบบปั่นป่วน
3. กระบวนการถ่ายเทความร้อน เช่น การพาความร้อนแบบธรรมชาติ การพาความร้อนแบบบังคับ หรือการพาความร้อนแบบเปลี่ยนสถานะ
4. ความเร็วของกระแสการไหลอิสระ
5. ลักษณะรูปร่าง และความหยาบของผิว
6. สภาพของพื้นที่สัมผัส
7. อุณหภูมิที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของของไหล

การเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของระบบด้วยของไหลนาโน (Nanofluids)

การเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของระบบโดยการปรับปรุงคุณสมบัติของสารทำงานจากของไหลพื้นฐานเดิมที่ใช้อยู่เป็นของไหลนาโน การที่สารทำงานในระบบมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำจะไปขัดขวางกลไกการแลกเปลี่ยนความร้อน แม้ว่าจะมีการปรับปรุงเทคนิคมากมายเพื่อเพิ่มความสามารถการถ่ายเทความร้อนก็ตาม สำหรับการพัฒนาคูณสมบัติทางความร้อนให้กับสารทำงานเป็นทางเลือกหนึ่งของวิธีการเพิ่มค่าการนำความร้อนของของไหลคือการผสมอนุภาคของแข็งเข้ากับของไหลผสมอนุภาคมีหลายชนิด เช่น ผงอนุภาคโลหะ ผงอนุภาคอโลหะ และผงอนุภาคสารโพลิเมอร์ ที่สามารถผสมกับของไหลเพื่อทำให้ของไหลเข้มข้นขึ้นได้ ค่าการนำความร้อนของของไหลที่มีอนุภาคเหล่านี้แขวนลอยผสมอยู่ถูกคาดว่าจะมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้นกว่าของไหลพื้นฐานธรรมดา การทดสอบวิธีการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมนี้ ได้ถูกนำไปใช้ซึ่งผลของปริมาณอนุภาคคิดเป็นปริมาตร, ขนาด, อัตราการไหล, ความดันตกคร่อม ของสารผสม และพฤติกรรมถ่ายเทความร้อนได้ถูกศึกษาไว้ด้วยซึ่งการนำไปใช้ที่ได้กล่าวไว้นั้น อนุภาคที่แขวนลอยอยู่จะมีขนาดอยู่ในหน่วยระดับไมโครเมตร (μm) นาโนเมตร (nm) ซึ่งอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดที่กล่าวมานั้นอาจเกิดปัญหาร้ายแรงต่อระบบ เช่น การสึกกร่อน และการอุดตัน ดังนั้น ของไหลที่ผสมด้วยอนุภาคขนาดใหญ่จึงมีการนำไปประยุกต์ใช้น้อยมากในการเพิ่มขีดความสามารถการถ่ายเทความร้อนให้กับระบบ

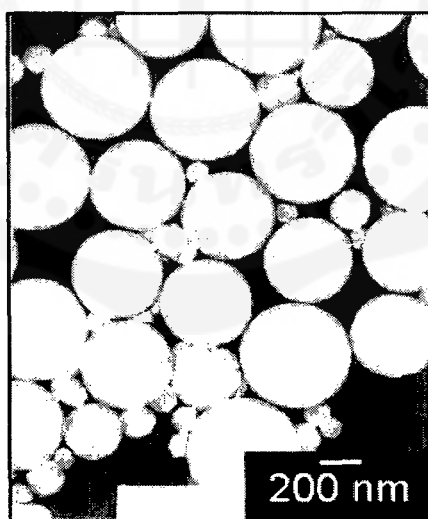
การประยุกต์ใช้ของไหลนาโนทำให้เกิดหนทางที่มีประสิทธิภาพของการปรับปรุงคุณภาพการถ่ายเทความร้อนของของไหล อนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 100 นาโนเมตร จะแสดงคุณสมบัติที่ต่างจากตอนที่อยู่ในสถานะของแข็งธรรมดา เมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคนาโนที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงกว่า และมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น ได้มีนักวิจัยจำนวนมากพยายามผสมอนุภาคนาโนของสารต่าง ๆ เพื่อสร้างของไหลที่มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน นักวิจัยใช้คำว่า "Nanofluids" เพื่ออ้างถึงของไหลที่มีอนุภาคนาโนแขวนลอยผสมอยู่ ผลการทดลองเบื้องต้นส่วนหนึ่งแสดงให้เห็นค่าการนำความร้อนที่สามารถเพิ่มขึ้นประมาณ 60% ซึ่งได้จากของไหลนาโนที่ประกอบด้วยน้ำและอนุภาคนาโน 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ CuO_2 และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น 6 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งได้จากของไหลนาโนที่ประกอบด้วยน้ำและอนุภาคนาโน 0.2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ TiO_2 ภาพประกอบ 10 แสดงผงอนุภาคนาโนของ TiO_2 ก่อนนำไปผสมกับน้ำเพื่อทำเป็นของไหลนาโนไททาเนียม และภาพประกอบ 11 ภาพถ่ายขยายของอนุภาค Nanoparticles ขนาด 200 นาโนเมตร

การผสมอนุภาคนาโนในสารทำงานในระบบทำความร้อน หรือระบบทำความเย็น คุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนสามารถที่จะพัฒนา ปรับปรุงได้อย่างมากมาย เหตุผลสำคัญ ดังนี้

1. การผสมอนุภาคนาโน จะเพิ่มพื้นที่ผิวและความจุความร้อนของของไหล
2. การผสมอนุภาคนาโนจะเพิ่มประสิทธิภาพการนำความร้อนให้กับของไหล
3. ปฏิกริยาการชนกันท่ามกลางอนุภาคของไหลและการไหลผ่านผิวหน้าจะเกิดขึ้นรุนแรงและหนาแน่นมากขึ้น
4. การเปลี่ยนแปลงการผสมกัน และความปั่นป่วนของของไหลจะรุนแรงมากขึ้น
5. การกระจายตัวของอนุภาคนาโนจะทำให้อุณหภูมิของของไหลเท่ากันทั่วทุกตำแหน่ง



ภาพประกอบ 10 แสดงผงอนุภาคนาโนของ TiO_2



ภาพประกอบ 11 ภาพถ่ายขยายของอนุภาค Nanoparticles ขนาด 200 นาโนเมตร

คุณสมบัติทางกายภาพ และทางความร้อนของของไหลนาโน

คุณสมบัติทางกายภาพ และทางความร้อนของของไหลนาโน เช่น ความหนาแน่น ความหนืด ความร้อนจำเพาะ และการนำความร้อนของของไหลนาโนสามารถคำนวณได้จากสมการต่างๆ ดังนี้

ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของของไหลนาโนสามารถคำนวณได้จากสมการของ ดวงทองสุข และคณะ (2009) ดังนี้

$$\rho_{nf} = \phi \rho_p + (1 - \phi) \rho_w \quad (2.75)$$

โดยที่ ρ_{nf} คือ ความหนาแน่นของของไหลนาโน, kg/m^3

ρ_p คือ ความหนาแน่นของอนุภาคนาโน, kg/m^3

ρ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำ, kg/m^3

ϕ คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคนาโน

ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่

ความหนาแน่นของของไหลนาโนสามารถคำนวณได้จากสมการของ ดวงทองสุข และคณะ (2009) ดังนี้

$$c_{p_{nf}} = \phi c_{p_p} + (1 - \phi) c_{p_w} \quad (2.76)$$

โดยที่ $c_{p_{nf}}$ คือ ความร้อนจำเพาะของของไหลนาโน, $\text{J/kg } ^\circ\text{C}$

c_{p_p} คือ ความร้อนจำเพาะของอนุภาคนาโน, $\text{J/kg } ^\circ\text{C}$

c_{p_w} คือ ความร้อนจำเพาะของน้ำ, $\text{J/kg } ^\circ\text{C}$

ϕ คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคนาโน

ค่าความหนืดสัมบูรณ์

ค่าความหนืดสัมบูรณ์ ดวงทองสุข และคณะ (2009) แนะนำให้ใช้สมการของ อินเสตียร์น สำหรับของไหลนาโนที่มีสัดส่วนอนุภาคนาโนไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ค่าที่ได้จะมีความแม่นยำมาก

$$\mu_{nf} = (1 + 2.5\phi)\mu_w \quad (2.77)$$

โดยที่ μ_{nf} คือ ค่าความหนืดสัมบูรณ์ของของไหลนาโน, kg/m.s

μ_w คือ ค่าความหนืดสัมบูรณ์ของของน้ำ, kg/m.s

ϕ คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคนาโน

ค่าการนำความร้อน

ค่าการนำความร้อนสมการที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางสำหรับการคำนวณหาค่าการนำความร้อนของไหลผสมระหว่างอนุภาคของแข็งกับของเหลว ดรวงทองสุข และคณะ (2009) แนะนำให้ใช้สมการดังนี้

$$k_{nf} = \left[\frac{k_p + 2k_w - 2\phi(k_w - k_p)}{k_p + 2k_w + \phi(k_w - k_p)} \right] k_w \quad (2.78)$$

โดยที่ k_{nf} คือ ค่าการนำความร้อนของของไหลนาโน, W/m °C

k_p คือ ค่าการนำความร้อนของของอนุภาคนาโน, W/m °C

k_w คือ ค่าการนำความร้อนของน้ำ, W/m °C

ϕ คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคนาโน

อัตราการถ่ายเทความร้อน

อัตราการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนมีสมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$Q_{nf} = \dot{m}_{nf} c_{p,nf} (T_{in} - T_{out})_{nf} \quad (2.79)$$

$$Q_{nf} = 0.006271 \times 4,168.82 \times 3.97$$

$$Q_{nf} = 102.21 \text{ W}$$

โดยที่ Q_{nf} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโน, W

$\dot{m}_{nf}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลนาโน, kg/s

$c_{p,nf}$ คือ ค่าความร้อนจำเพาะของของไหลนาโน, J/kg K

$T_{in,nf}$ คือ อุณหภูมิขาเข้าของของไหลนาโน, °C

$T_{out,nf}$ คือ อุณหภูมิขาออกของของไหลนาโน, °C

อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย

อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเป็นการพิจารณานำเอาอัตราความร้อนที่ให้กับอัตราความร้อนที่ได้รับมาเฉลี่ยกันโดยมีสมการดังนี้

$$Q_{ave} = \frac{Q_{ele} + Q_{nf}}{2} \quad (2.80)$$

โดยที่ Q_{ave} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของของไหลนาโน, W

Q_{ele} คือ อัตราความร้อนที่ป้อนให้แผ่นกำเนิดความร้อน, W

Q_{nf} คือ อัตราความร้อนที่ของของไหลนาโนได้รับ, W

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของของไหลนาโนพิจารณาจากสมการพื้นฐานโดยมีสมการดังนี้

$$h_{nf} = \frac{\bar{q}_{ave}}{T_s - T_{out,nf}} \quad (2.81)$$

ความต้านทานทางความร้อน (Thermal Resistance)

ความต้านทานทางความร้อนของระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลาการพิจารณาความต้านทานทางความร้อนของระบบจะแบ่งการพิจารณาเป็นส่วนๆ เช่น ความต้านทานความร้อนภายในท่อ ความต้านทานทางความร้อนของครีป และความต้านทานทางความร้อนภายนอกท่อ เมื่อเอาความต้านทานทั้งหมดมารวมกันเรียกว่าความต้านทานความร้อนรวม R_{th} และจัดอยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$R_{th} = \frac{1}{A_{in} h_{in}} + \frac{1}{k A_m} + \frac{1}{A_{out} h_{out}} \quad (2.82)$$

โดยที่ R_{th} คือ ความต้านทานความร้อนรวม, °C/W

A_{in} คือ พื้นที่ผิวด้านใน, m²

A_{out} คือ พื้นที่ผิวด้านนอก, m²

$$A_m \text{ คือ } \frac{A_{out} - A_{in}}{\ln(A_{out} / A_{in})}, \text{ m}^2$$

h_{in} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในท่อ, $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$

h_{out} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายนอกท่อ, $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$

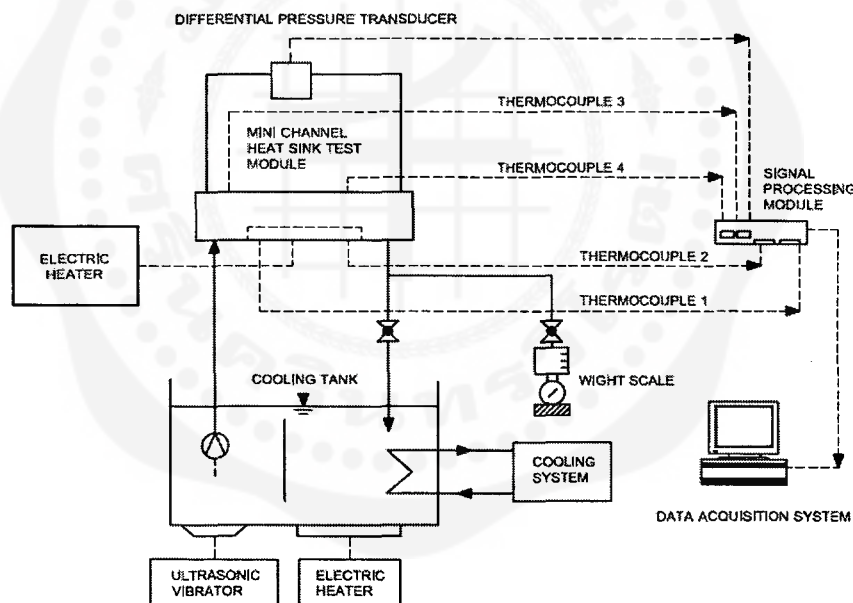
k คือ ค่าการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำท่อ, $\text{W}/(\text{m } ^\circ\text{C})$



บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในการทดลองจะใช้ชุดครีบบแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก (Rectangular Mini Channel Heat Sink) จำนวน 3 ชุด ตามความสูงของครีบคือ ขนาดความสูง 1.00 มิลลิเมตร 1.50 มิลลิเมตร และ 2.00 มิลลิเมตร โดยขนาดความหนาฐานครีบ 2.00 มิลลิเมตร ขนาดความกว้างของช่องไหล 0.80 มิลลิเมตร และความหนาครีบ 0.40 มิลลิเมตร เท่ากันทั้ง 3 ชุด วางอยู่ในชุดทดลองตามแนวนอน ซึ่งใช้น้ำ และของไหลนาโนเป็นสารทำงาน (Working Fluid) โดยสามารถปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของสารทำงานในชุดทดลองตั้งแต่ 16, 18, 20, 22, 24, 26 และ 28 ลิตรต่อชั่วโมง (LPH) การควบคุมอัตราความร้อนของครีบใช้ฮีตเตอร์ที่ประกอบอยู่ด้านหลังของครีบเป็นตัวควบคุมให้ได้อัตราความร้อนตามต้องการ

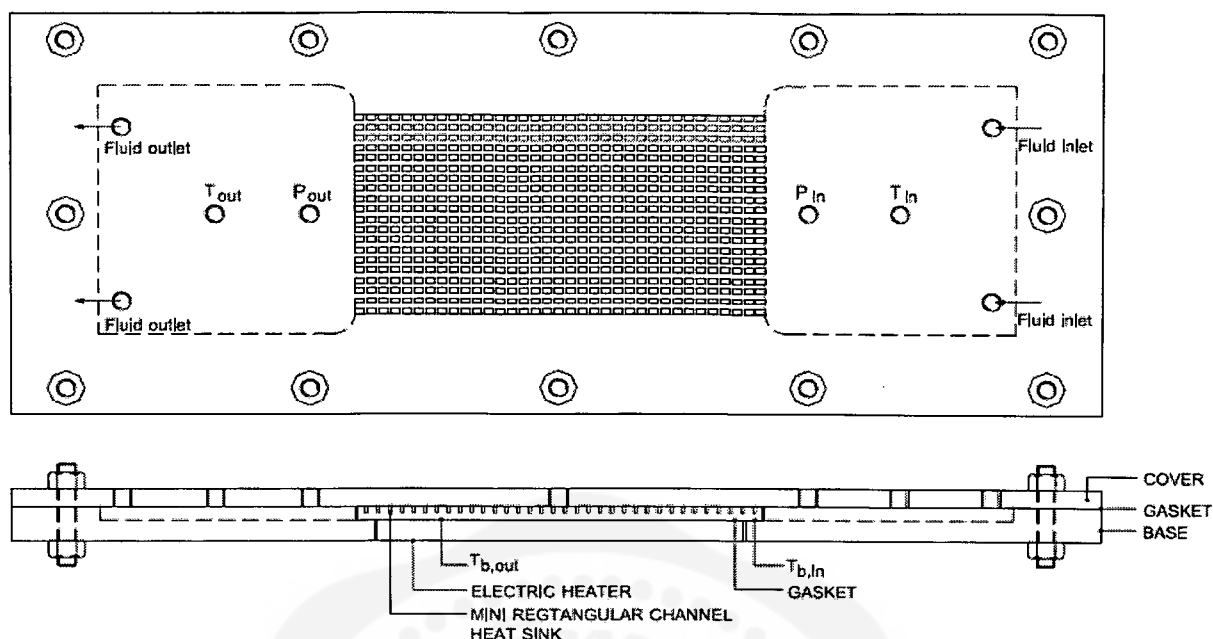


ภาพประกอบ 12 แสดงไดอะแกรมของอุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์ในการทดลอง

จากภาพประกอบ 12 ประกอบด้วยชุดทดลองและอุปกรณ์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ชุดทดสอบ (Mini Channel Heat Sink Test Module) ทำหน้าที่เป็นที่ติดตั้งชุดทดสอบ เช่น ครีบบระบายความร้อน ฮีตเตอร์ และเครื่องมือวัดต่างๆ ดังภาพประกอบ 13



ภาพประกอบ 13 แสดงตำแหน่งจุดวัดอุณหภูมิและความดันของชุดทดสอบ

2. ปั๊มไหลเวียน (Circulation Pump) ทำหน้าที่เพิ่มแรงดันสารทำงานเพื่อจ่ายให้กับครีบริบายความร้อนแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก (Rectangular Mini Channel Heat Sink) ที่ทำการทดลอง
3. ถังหล่อเย็น (Cooling tank) ทำหน้าที่บรรจของสารทำงานเพื่อให้สารทำงานเข้าสู่ระบบเพื่อไปดึงความร้อนจากครีบริบายความร้อนแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก (Rectangular Mini Channel Heat Sink) และระบายความร้อนออกจากสารทำงานด้วยระบบทำความเย็น
4. ชุดเครื่องสั่นสะเทือน (Ultrasonic Vibrator) ทำหน้าที่สั่นถังเก็บของเหลวเพื่อป้องกันการตกตะกอนของของไหลนาโน
5. ชุดหล่อเย็น (Cooling System) ทำหน้าที่ดึงความร้อนออกจากสารทำงานด้วยระบบทำความเย็น
6. ชุดครีบริบายความร้อนแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก (Rectangular Mini Channel Heat Sink) ทำหน้าที่ดึงความร้อนออกจากฮีตเตอร์
7. แหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply) ทำหน้าที่จ่ายไฟให้กับฮีตเตอร์ มอเตอร์ปั๊มน้ำ ระบบทำความเย็น เครื่อง Ultrasonic Vibrator
8. เครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้า (Volt Meter) ทำหน้าที่วัดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับฮีตเตอร์ มอเตอร์ปั๊มน้ำ

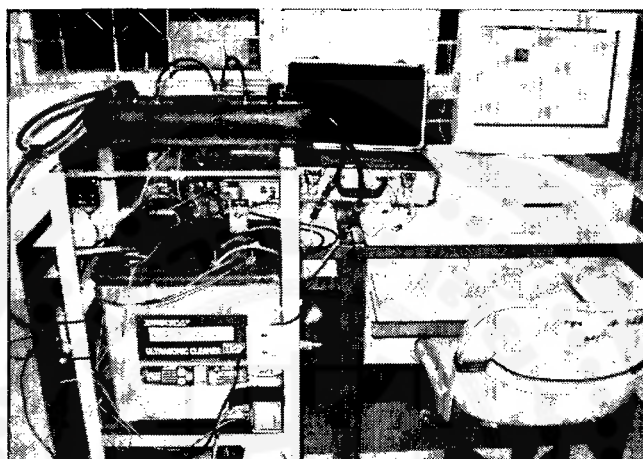
9. เครื่องชั่งน้ำหนัก (Wight Scale) ใช้สำหรับตรวจวัดอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน ให้มีค่าเท่ากันตลอดการทดลอง

10. เครื่องมือวัดความดันตกคร่อม (Difference Pressure)

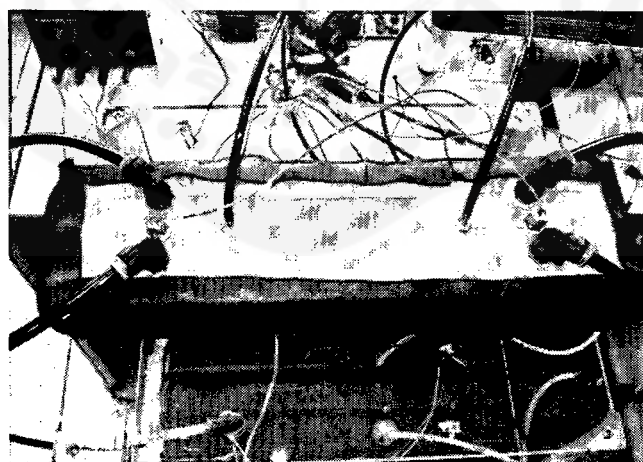
11. เครื่องมือวัดอุณหภูมิ (Thermocouple)

12. ชุดเก็บข้อมูล (Data logger)

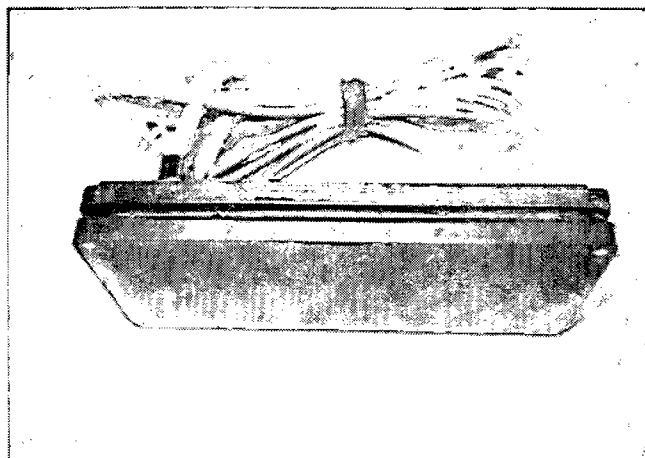
13. คอมพิวเตอร์แสดงผลการทดลอง (Data Acquisition System)



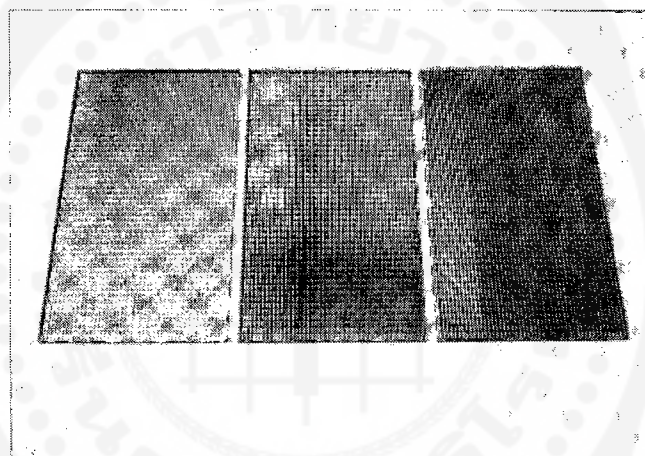
ภาพประกอบ 14 แสดงอุปกรณ์ในขณะทำการทดลอง



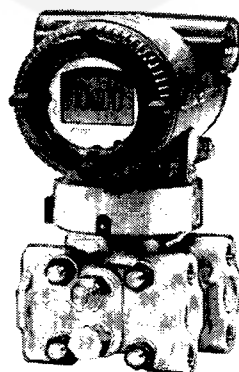
ภาพประกอบ 15 แสดงการประกอบชุดครีบเข้ากับชุดทดสอบ



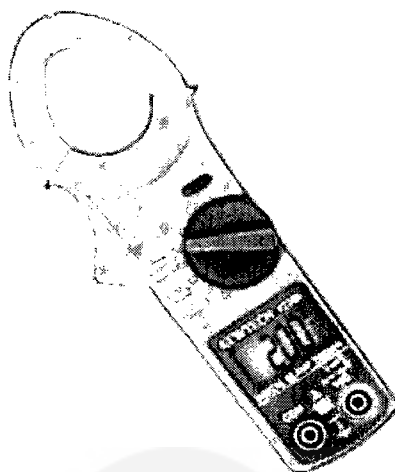
ภาพประกอบ 16 ชุดฮีทเตอร์ชุดให้ความร้อน



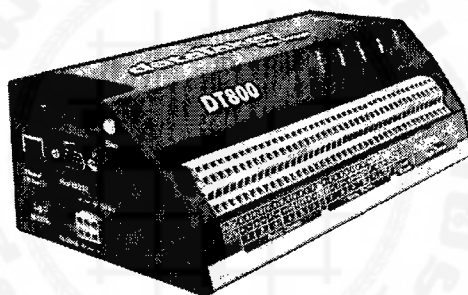
ภาพประกอบ 17 ครีกระบายความร้อนแบบช่องสี่เหลี่ยมแผ่นผ้าขนาดเล็ก



ภาพประกอบ 18 ชุดเครื่องมือวัดความดันตกคร่อม



ภาพประกอบ 19 เครื่องมือวัดกระแสไฟฟ้า และ แรงดันไฟฟ้า (Volt Amp Meter)



ภาพประกอบ 20 แสดงชุดเก็บข้อมูล (Data logger)

ชุดทดลองประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก คือ ส่วนปรับ-ควบคุม ประกอบด้วยชุดปรับฟลักซ์ความร้อน (Heat flux) อัตราการไหลของสารทำงาน และชุดวัดอุณหภูมิความร้อนเป็นระบบดิจิตอล โดยบรรจุรวมไว้ในตู้คอลโทล ส่วนหล่อเย็นทำหน้าที่รักษาอุณหภูมิของสารทำงานให้ได้ตามค่าที่ต้องการ โดยชุดทดสอบพร้อมอุปกรณ์แสดงในภาพประกอบ 15

ตาราง 3 แสดงคุณสมบัติและขนาดต่างๆ ของครีปที่ใช้ในการทดลอง

ลักษณะ ครีป	วัสดุครีป	ขนาดครีป กว้าง-ยาว-สูง (mm.)	ขนาดฐานครีป กว้าง-ยาว-หนา (mm.)	จำนวน ครีป (อัน)	พ.ท.รับ ความร้อน (m ²)	พ.ท.ผิวถ่ายเท ความร้อน (m ²)
แบบช่อง	อลูมิเนียม*	0.4 – 1.8 –1.0	60 –110 –2	2,500	0.0066	0.0158
แบบช่อง	อลูมิเนียม*	0.4 – 1.8 –1.5	60 –110 –2	2,500	0.0066	0.0213
แบบช่อง	อลูมิเนียม*	0.4 – 1.8 –2.0	60 –110 –2	2,500	0.0066	0.0268

* อลูมิเนียมผสม AA 7022

ตาราง 4 แสดงค่าความแม่นยำ และค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง

ชนิดของอุปกรณ์	ค่าความแม่นยำ	ค่าความคลาดเคลื่อน
ชุดเครื่องมือวัดความความดันตกคร่อม	0.1%	± 0.03
ชุดเครื่องมือวัดความร้อน (ชนิด T), ชุดแสดงผล	0.1 %	± 0.10

วิธีการทดลอง

การเก็บข้อมูลจากการทดลองเพื่อนำไปวิเคราะห์ผลมีลำดับขั้นตอนดังนี้

1. ประกอบชุดครีปที่ต้องการทดสอบ
2. เตรียมอุปกรณ์สำหรับการทดลองให้พร้อม
3. ทำการเติมสารทำงานลงในถังหล่อเย็น (Cooling Tank)
4. เปิดชุดทำความเย็นโดยปรับตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 20 °C
5. เปิดปั๊มน้ำและปรับอัตราการไหลของน้ำไว้ที่ 16 LPH
6. เปิดเครื่องเก็บข้อมูล
7. เมื่ออุณหภูมิของสารทำงานคงที่ที่ 20 °C แล้ว จึงเปิดชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าของขดลวด

ความร้อน (Electric Heater) ที่ 81.20 วัตต์

8. เมื่อกราฟอุณหภูมิของสารทำงานทางเข้า ทางออก อุณหภูมิฐานครีปทางเข้า ทางออก และอุณหภูมิของถังหล่อเย็นแสดงค่าคงที่ จึงสามารถเก็บข้อมูลไปคำนวณหาประสิทธิภาพได้

9. เมื่อเก็บข้อมูลและคำนวณสมมูลพลังงานได้ตามเกณฑ์ที่กำหนด ± 10 เปอร์เซ็นต์ จึงสามารถเก็บค่าอุณหภูมิ และค่าความดันตกคร่อมได้

10. ปรับอัตราการไหลของน้ำไว้ที่ 18, 20, 22, 24, 26 และ 28 ลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ

11. เปลี่ยนกำลังไฟฟ้าของขดลวดความร้อนเป็น 87.00 และ 93.00 วัตต์ ตามลำดับ

12. ดำเนินการตามข้อ 1-11 แต่เปลี่ยนสารทำงานเป็นของไหลนาโนไททาเนียมในสัดส่วน 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรกับน้ำ และเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าของขดลวดความร้อนเป็น 97.65, 104.00 และ 110.55 วัตต์ ตามลำดับ

13. ดำเนินการทดลองจนได้ค่าครบตามตารางการทดลองดังตาราง 5 ตาราง 6 และ ตาราง 7

เนื่องจากชุดครีบทดลองเป็นแบบสมมาตร (Symmetry) ทั้งสามอัน จึงทำการทดลองและศึกษาโดยทำการวัดอุณหภูมิของฐานครีบทดลอง และอุณหภูมิของสารทำงาน แต่ละจุดและนำมาหาค่าเฉลี่ย การวัดอุณหภูมิของฐานครีบทดลองแบ่งออกเป็น 2 จุด คือ บริเวณฐานของครีบทดลองด้านทางเข้า ($T_{b,in}$) บริเวณฐานของครีบทดลองด้านทางออก ($T_{b,out}$) เพื่อหาค่าเฉลี่ย และบันทึกผลในรูปแบบของตาราง

ในส่วนอุณหภูมิของสารทำงานแบ่งการวัดเป็น 2 จุด คือด้านทางเข้า ($T_{f,in}$) และด้านทางออก ($T_{f,out}$) ตามลำดับ อุณหภูมิของสารทำงาน (T_f) สำหรับการปฏิบัติการส่งถ่ายความร้อนควบคุมอุณหภูมิไว้ประมาณ 20°C , 22°C และ 24°C และ อุณหภูมิห้องควบคุม (T_r) ไว้ประมาณ 25°C เป็นอุณหภูมิที่สะดวกในการทดลอง

ตัวแปรที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

จัดตัวแปรที่จะทำการศึกษาวิจัยออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

1. กลุ่มตัวแปรที่กำหนดให้เปลี่ยนแปลง (ตัวแปรอิสระ) ได้แก่
 - ค่าฟลักซ์ความร้อน (Heat flux) ที่ให้กับครีบทดลอง
 - อัตราการไหลของสารทำงาน (Flow rate) ที่ผ่านครีบทดลอง .
 - ความสูงของครีบทดลอง
2. กลุ่มตัวแปรตามที่ต้องการวัดค่า (ตัวแปรตาม) ได้แก่
 - อุณหภูมิของฐานครีบทดลอง
 - อุณหภูมิของสารทำงานที่ผ่านครีบทดลอง
 - ความดันตกคร่อมของการไหลของสารทำงานที่ผ่านครีบทดลอง

ตาราง 5 แสดงเงื่อนไขในการทดลองของครีบลักษณะแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก ขนาดความสูง
ครีบล 1.00 มิลลิเมตร ขนาดความกว้างครีบล 0.40 มิลลิเมตร และขนาดความยาวครีบล 1.80 มิลลิเมตร

อุณหภูมิทางเข้า °C	อัตราความร้อน ที่ป้อน (W)	อัตราการไหล ของน้ำ (LPH)	อัตราความร้อน ที่ป้อน (W)	อัตราการไหล ของของไหลนาโน (LPH)
		16.00		16.00
20.00	81.20	18.00	97.65	18.00
22.00	87.00	20.00	104.00	20.00
และ	และ	22.00	และ	22.00
24.00	93.00	24.00	110.55	24.00
		26.00		26.00
		28.00		28.00

ตาราง 6 แสดงเงื่อนไขในการทดลองของครีบลักษณะแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก ขนาดความสูง
ครีบล 1.50 มิลลิเมตร ขนาดความกว้างครีบล 0.40 มิลลิเมตร และขนาดความยาวครีบล 1.80 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ ทางเข้า °C	อัตราความร้อนที่ ป้อน (W)	อัตราการไหล ของน้ำ (LPH)	อัตราความร้อนที่ ป้อน (W)	อัตราการไหล ของของไหลนาโน (LPH)
		16.00		16.00
20.00	110.55	18.00	146.30	18.00
22.00	117.30	20.00	152.10	20.00
และ	และ	22.00	และ	22.00
24.00	126.00	24.00	160.00	24.00
		26.00		26.00
		28.00		28.00

ตาราง 7 แสดงเงื่อนไขในการทดลองของครีบลักษณะแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก ขนาดความสูงครีบ 2.00 มิลลิเมตร ขนาดความกว้างครีบ 0.40 มิลลิเมตร และขนาดความยาวครีบ 1.80 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ ทางเข้า °C	อัตราความร้อนที่ ป้อน (W)	อัตราการไหล ของน้ำ (LPH)	อัตราความร้อนที่ ป้อน (W)	อัตราการไหล ของของไหลนาโน (LPH)
		16.00		16.00
20.00	138.75	18.00	209.50	18.00
22.00	144.40	20.00	218.50	20.00
และ	และ	22.00	และ	22.00
24.00	152.10	24.00	227.95	24.00
		26.00		26.00
		28.00		28.00

คุณลักษณะทั่วไปของอลูมิเนียมผสม AA7022 (General Characteristics of Aluminum Alloy AA7022)

AA7022 เป็นโลหะผสมของอะลูมิเนียมที่มีสังกะสี แมกนีเซียม และทองแดงเป็นส่วนผสมสำคัญ โดยได้ผ่านกระบวนการบ่มแข็งอย่างสมบูรณ์จึงมีความแข็งแรงสูงและไม่จำเป็นต้องทำกระบวนการอบชุบทางความร้อนอื่นอีกต่อไป ทำให้ประหยัดต้นทุนในการผลิตแม่พิมพ์ นอกจากนี้ยังใช้เวลาในการผลิตแม่พิมพ์น้อยกว่าเหล็กมากสามารถกัดทำลวดลายผิวได้ดี เหมาะกับงานแม่พิมพ์พลาสติกที่ต้องการความประณีต และมีรายละเอียดสูงหรือมีรูปร่างซับซ้อน ทั้งในแม่พิมพ์เป่าและฉีดพลาสติก รวมทั้งทำต้นแบบแม่พิมพ์เป่า และแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

คุณลักษณะเด่น (Significant Characteristics)

- มีค่าการนำความร้อนสูงกว่าเหล็กทั่วไป 4 เท่า
- มีความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กโครงสร้าง
- มีน้ำหนักเบากว่าเหล็กมาก
- สามารถกลึงไสแปรรูปได้ง่ายและรวดเร็ว
- ให้ผิวที่สวยงามเมื่อทำการกลึงละเอียด

การใช้งาน (Applications)

- ผลิตแม่พิมพ์พลาสติกทั้งงานเป่า และงานฉีดพลาสติก
- ผลิตต้นแบบของแม่พิมพ์ฉีด หรือเป่าพลาสติก
- ทำแผ่นนำความร้อน
- โต๊ะจับยึดชิ้นงานของเครื่องจักร
- ทำอุปกรณ์ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ต้องการความแข็งแรงสูง
- แผ่นรองล่างของงานสแตมปีง และ tool bed ต่าง ๆ

ตาราง 8 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ (Physical Properties)

คุณสมบัติ	ค่าเฉลี่ย
ความหนาแน่น / Density (g/cm^3)	2.80
อุณหภูมิหลอมเหลว / Melting range ($^{\circ}\text{C}$)	480-635
การนำความร้อน ที่ $20^{\circ}\text{-}100^{\circ}\text{C}$ Thermal Conductivity (W/m.K)	120-140
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนระหว่าง $20^{\circ}\text{-}100^{\circ}\text{C}$ / Coefficient of thermal expansion between $20^{\circ}\text{-}100^{\circ}\text{C}$ ($\mu\text{m/m.K}$)	23.6
ค่าการนำไฟฟ้า ที่ 20°C Electrical conductivity ($\text{m}/\Omega.\text{mm}^2$)	17-21
โมดูลัสของการยืดหยุ่น ที่ 20°C Modulus of elasticity (10^3 N/mm^2)	72
ความจุความร้อนจำเพาะที่ 20°C Specific heat at 20°C ($\text{J/g.}^{\circ}\text{C}$)	960

บทที่ 4

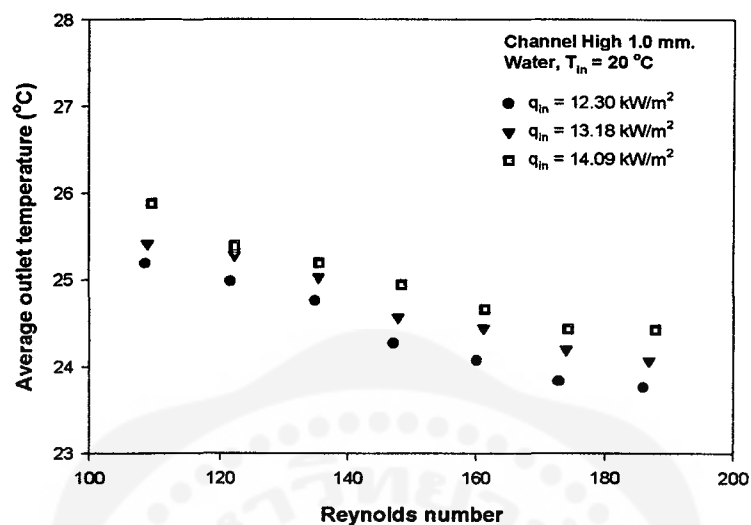
ผลและการวิเคราะห์ผล

การเปรียบเทียบผล

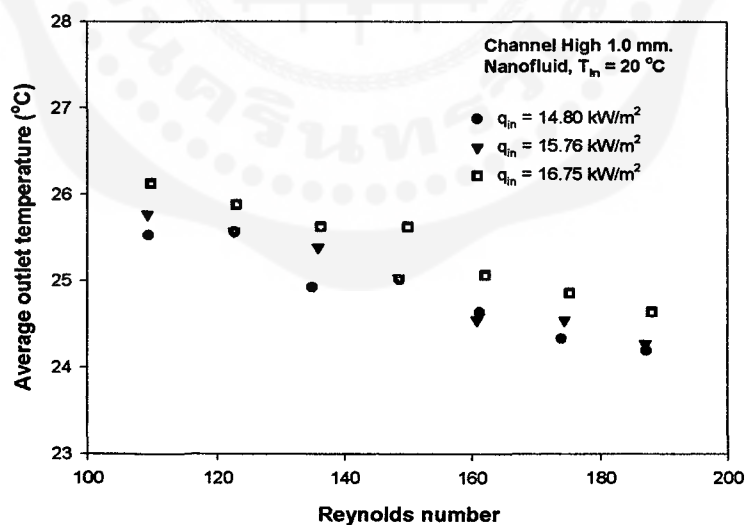
ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ใช้สารทำงาน 2 ชนิด คือ น้ำ และ ของไหลนาโนไททาเนียม โดยใช้ อนุภาคของไททาเนียมผสมกับน้ำ 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร การทดลองได้มีการสร้างครีบบางช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก (Mini Rectangular Channel Heat Sink) สำหรับใช้ในการทดลองเก็บข้อมูล แล้วนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาตัวแปรที่ต้องการต่าง ๆ ผลที่ได้จากการทดลองจะถูกบันทึกในรูปแบบของตาราง และนำผลมาแสดงในลักษณะของกราฟแสดงการเปรียบเทียบของตัวแปรต่างๆ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองสามารถแสดงอยู่ในรูปตัวแปรต่างๆ ดังนี้

- กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรโนลด์ส์นัมเบอร์ (Reynolds number, Re) และ ค่าอุณหภูมิทางออกเฉลี่ยของของไหล
- กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรโนลด์ส์นัมเบอร์ (Reynolds number, Re) และ ค่าอุณหภูมิผิวเฉลี่ยของครีบบ
- กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการไหล (Flow rate, Q) และค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของครีบบ
- กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรโนลด์ส์นัมเบอร์ (Reynolds number, Re) และ ค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อน (Thermal resistance heat transfer, R_{th})
- กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรโนลด์ส์นัมเบอร์ (Reynolds number, Re) และ ค่าตัวเลขนัสเซลล์นัมเบอร์ (Nusselt number, Nu)
- กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรโนลด์ส์นัมเบอร์ (Reynolds number, Re) และ ค่าความดันตกคร่อม (Pressure Drop, Δp)

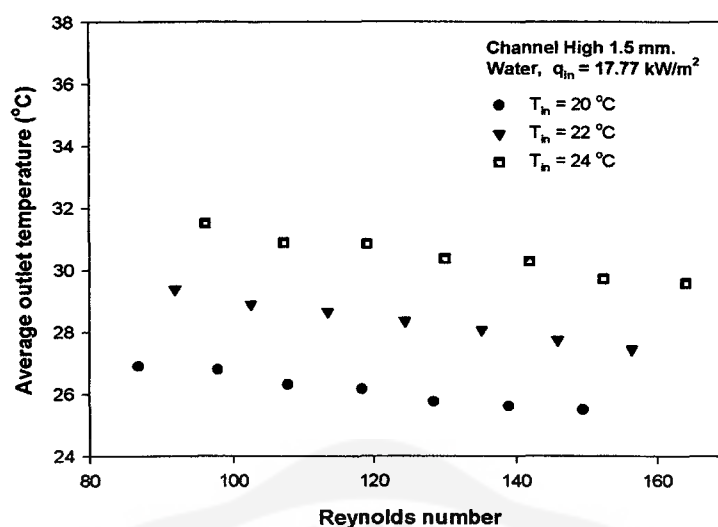
การเปรียบเทียบผลจากการทดลองระหว่างค่าเรโนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number, Re) และ ค่าอุณหภูมิทางออกเฉลี่ยของของไหล



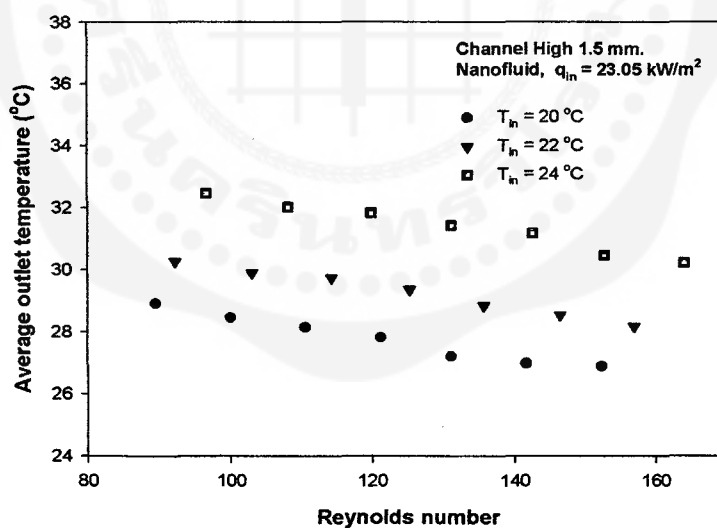
ภาพประกอบ 21 กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกของน้ำเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของครีบบางช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบ 1.0 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิทางเข้า $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ และที่ฟลักซ์ความร้อน 12.30, 13.18 และ 14.09 kW/m^2



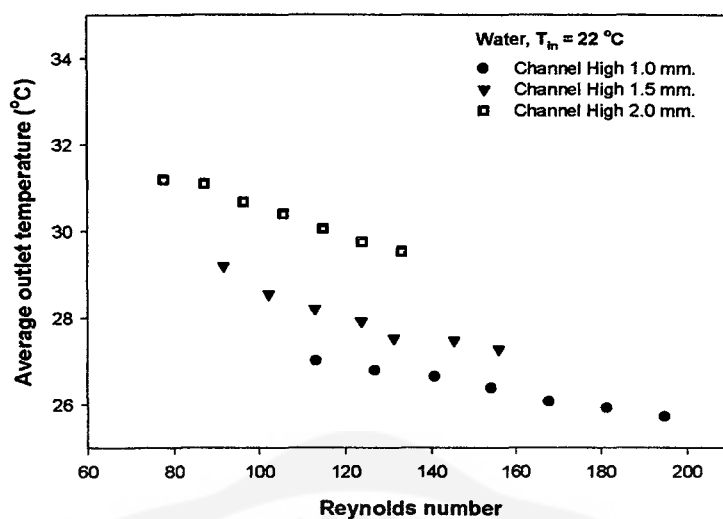
ภาพประกอบ 22 กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกของของไหลนาโนไททาเนียมเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของครีบบางช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบ 1.0 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิทางเข้า $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ และที่ฟลักซ์ความร้อน 14.08, 15.76 และ 16.75 kW/m^2



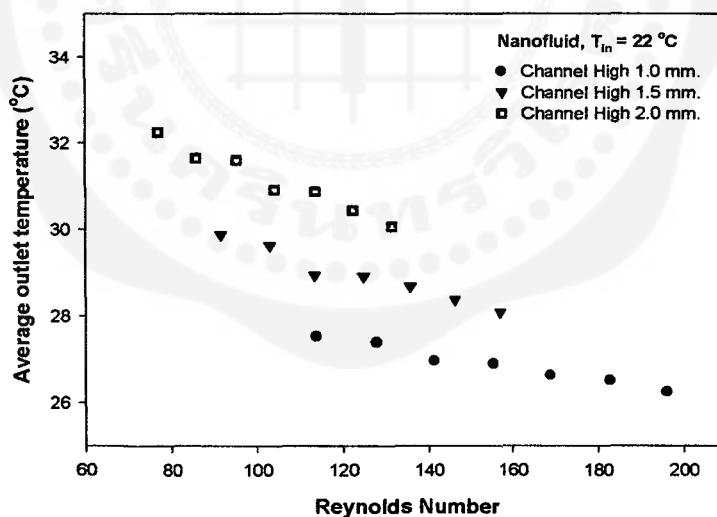
ภาพประกอบ 23 กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกของน้ำเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของครีบบนช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบบ 1.5 มิลลิเมตรที่ฟลักซ์ความร้อน 17.77 kW/m^2 และที่อุณหภูมิทางเข้า 20 , 22 และ $24 \text{ }^{\circ}\text{C}$



ภาพประกอบ 24 กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกของของไหลนาโนเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของครีบบนช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบบ 1.5 มิลลิเมตร ที่ฟลักซ์ความร้อน 23.05 kW/m^2 และที่อุณหภูมิทางเข้า 20 , 22 และ $24 \text{ }^{\circ}\text{C}$



ภาพประกอบ 25 กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกของน้ำไหลเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของครีบบางช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบ 1.0, 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิทางเข้า $22\text{ }^{\circ}\text{C}$



ภาพประกอบ 26 กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกของของไหลนาโนเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของครีบบางช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบ 1.0, 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตรที่อุณหภูมิทางเข้า $22\text{ }^{\circ}\text{C}$

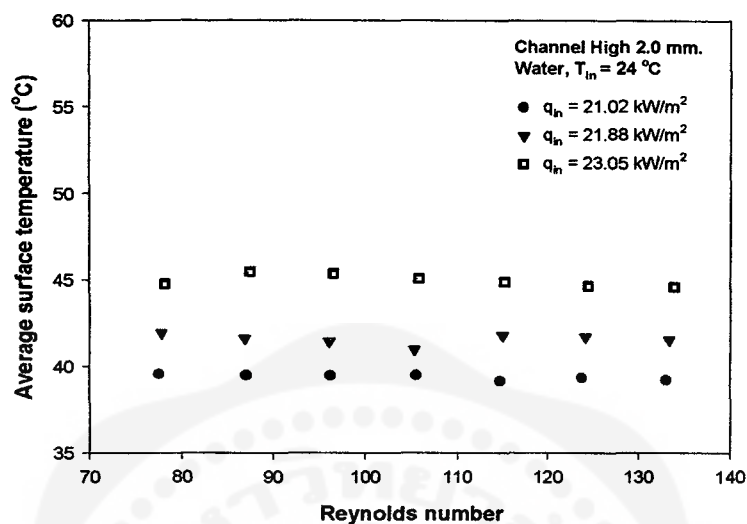
ภาพประกอบ 21 ถึง 26 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิทางออกของของไหลเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ที่ได้จากการทดลองของครีบบางช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก ที่อุณหภูมิทางเข้า 20, 22 และ 24 °C ที่ขนาดความสูงของครีบบาง 1.0, 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตร ที่ฟลักซ์ความร้อนต่างๆ และเปรียบเทียบสารทำงานระหว่างน้ำกับของไหลนาโนไททาเนียมผลสมน้ำ 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยอุณหภูมิของของไหลที่ทางออกวัดทั้งหมด 1 จุดใช้ค่าเฉลี่ยจากการวัด 3 ครั้ง จากกราฟพบว่าเมื่อค่าเรโนลด์นัมเบอร์สูงขึ้นอุณหภูมิทางออกของของไหลมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อการไหลของของไหลสูงขึ้น อัตราการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของของไหล ดังนั้นอุณหภูมิทางออกของของไหลจึงมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนตามค่าเรโนลด์นัมเบอร์ที่เพิ่มขึ้น

ภาพประกอบ 21 และ 22 กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกของน้ำเฉลี่ย และของไหลนาโนเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของครีบบางช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบบาง 1.0 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิทางเข้า 20 °C และที่ฟลักซ์ความร้อน ต่างๆ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อฟลักซ์ความร้อนสูงขึ้นอุณหภูมิของของไหลทางออกเฉลี่ยของของไหลสูงขึ้นตาม แต่เมื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการเพิ่มอัตราการไหลของของไหลอุณหภูมิทางออกเฉลี่ยของของไหลลดลงตาม และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารทำงานที่ใช้น้ำ และที่ใช้ของไหลนาโนไททาเนียมพบว่าอุณหภูมิของทางออกเฉลี่ยของของไหลนาโนไททาเนียมมีสูงกว่าน้ำเล็กน้อย

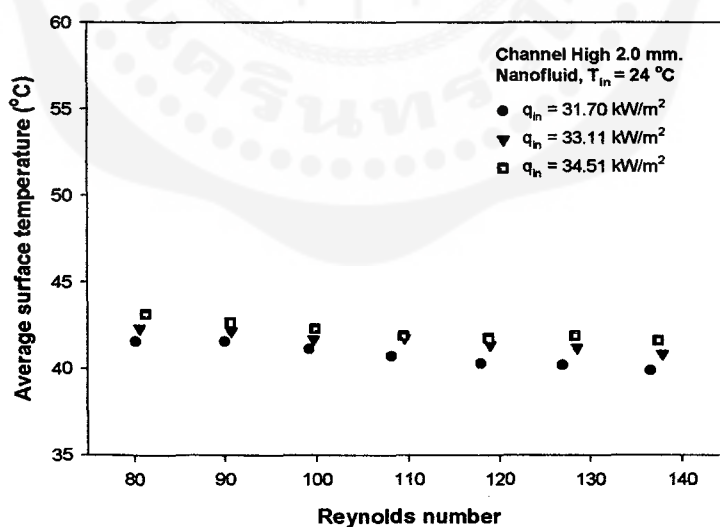
ภาพประกอบ 23 ถึง 24 กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกของน้ำเฉลี่ย และของไหลนาโนเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของครีบบางช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบบาง 1.5 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิทางเข้า 20, 22 และ 24 °C จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิทางออกเฉลี่ยของของไหลสูงขึ้นตามอุณหภูมิทางเข้าที่เพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มลดลงตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น

ภาพประกอบ 25 ถึง 26 กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกของน้ำเฉลี่ย และของไหลนาโนเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของครีบบางช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบบาง 1.0, 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิทางเข้า 22 °C จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิทางออกเฉลี่ยของของไหลสูงขึ้นตามขนาดความสูงของครีบบางระบายความร้อน และมีแนวโน้มลดลงตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นการเพิ่มพื้นที่ถ่ายเทความร้อนโดยเพิ่มขนาดความสูงของครีบบางระบายความร้อนทำให้อุณหภูมิทางออกเฉลี่ยของของไหลสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบ น้ำ และของไหลนาโนไททาเนียมเป็นสารทำงานพบว่าอุณหภูมิทางออกเฉลี่ยของไหลนาโนไททาเนียมมีค่าสูงกว่าน้ำ

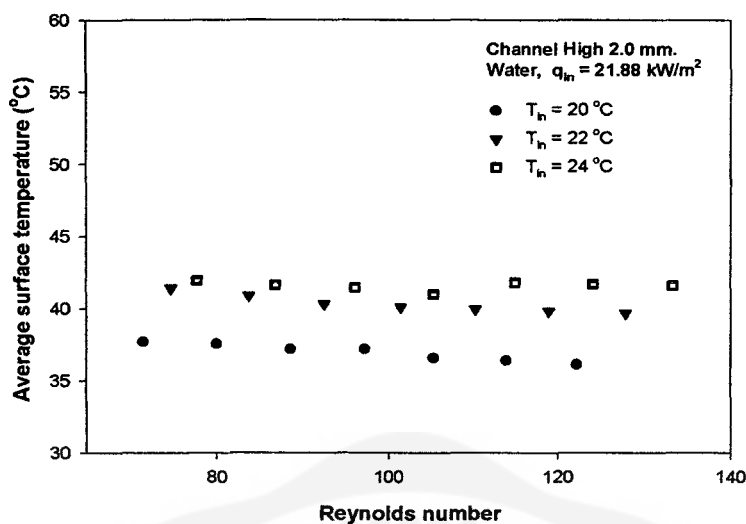
การเปรียบเทียบผลจากการทดลองระหว่างค่าเรโนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number, Re) และ ค่าอุณหภูมิผิวเฉลี่ยของครีป



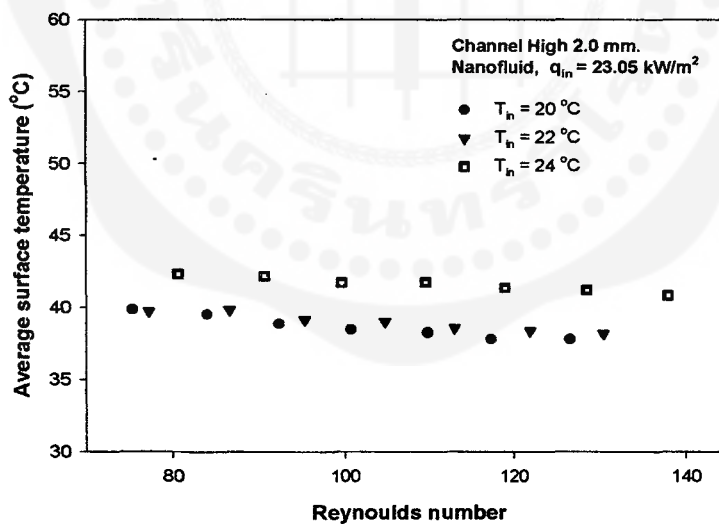
ภาพประกอบ 27 กราฟความสัมพันธ์ของค่าอุณหภูมิผิวเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ ของครีปแบบ ช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีป 2.0 มิลลิเมตร น้ำเป็นสารทำงานที่อุณหภูมิทางเข้า $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ และที่ฟลักซ์ความร้อน 21.02, 21.88 และ 23.05 kW/m^2



ภาพประกอบ 28 กราฟความสัมพันธ์ของค่าอุณหภูมิผิวเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ ของครีปแบบ ช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีป 2.0 มิลลิเมตร ของไหลนาโนเป็นสารทำงานที่อุณหภูมิทางเข้า $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ และที่ฟลักซ์ความร้อน 31.70, 33.11 และ 34.51 kW/m^2



ภาพประกอบ 29 กราฟความสัมพันธ์ของค่าอุณหภูมิผิวครีบเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ ของครีบบแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบ 2.0 มิลลิเมตร น้ำเป็นสารทำงาน อุณหภูมิทางเข้า 20, 22 และ 24 °C และที่ฟลักซ์ความร้อน 21.88 kW/m²



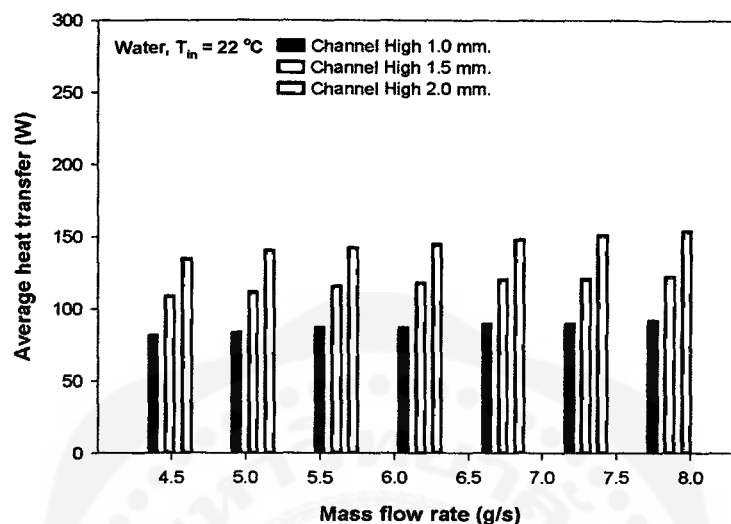
ภาพประกอบ 30 กราฟความสัมพันธ์ของค่าอุณหภูมิผิวครีบเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ ของครีบบแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบ 2.0 มิลลิเมตร ของไหลนาโนเป็นสารทำงาน อุณหภูมิทางเข้า 20, 22 และ 24 °C และที่ฟลักซ์ความร้อน 23.05 kW/m²

ภาพประกอบ 27 ถึง 30 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวครีปเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์์นัมเบอร์ของครีปแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก ที่ฟลักซ์ความร้อนต่างๆ ที่อุณหภูมิทางเข้า 20, 22 และ 24 °C ที่ขนาดความสูงของครีป 2.0 มิลลิเมตร และเปรียบเทียบสารทำงานระหว่างน้ำกับของไหลนาโนไททาเนียมผสมน้ำ 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยอุณหภูมิของฐานครีปวัดที่ผิวหน้าสัมผัสระหว่างฮีทเตอร์กับฐานครีปจากการทดลองวัดทั้งหมด 2 จุดใช้ค่าเฉลี่ย 2 จุด และค่าเฉลี่ยจากการวัด 3 ครั้งแล้วนำมาคำนวณหาค่าจากกราฟพบว่าเมื่อค่าฟลักซ์ความร้อนเพิ่มขึ้นค่าอุณหภูมิผิวครีปเฉลี่ยสูงขึ้นตาม เมื่อเพิ่มค่าอุณหภูมิทางเข้าสูงขึ้นค่าอุณหภูมิผิวครีปเฉลี่ยสูงขึ้นตามเช่นกัน และเมื่อค่าเรโนลด์์นัมเบอร์สูงขึ้นอุณหภูมิผิวครีปเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงทั้งนี้ก็เนื่องจากว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น

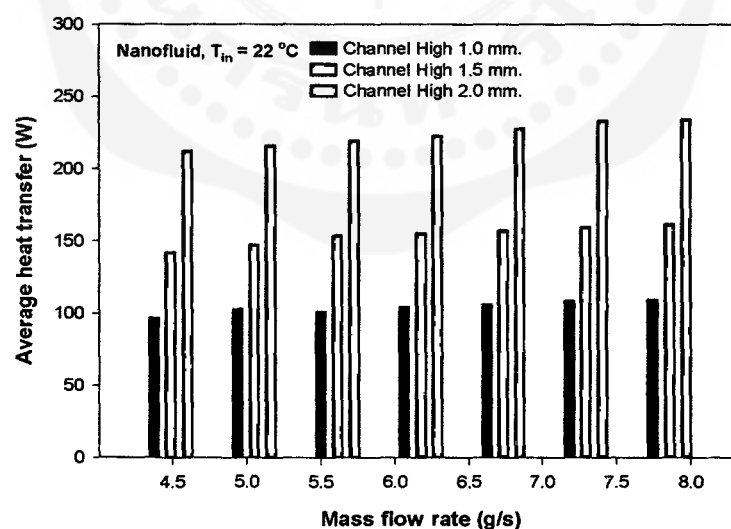
ภาพประกอบ 27 และ 28 กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิผิวครีปเฉลี่ย น้ำ และของไหลนาโนเป็นสารทำงานเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์์นัมเบอร์ของครีปแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีป 2.0 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิทางเข้า 22 °C และที่ฟลักซ์ความร้อนค่าต่างๆ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อฟลักซ์ความร้อนสูงขึ้นอุณหภูมิผิวครีปเฉลี่ยสูงขึ้นตาม และเมื่อค่าเรโนลด์์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มอัตราการไหลอุณหภูมิผิวครีปเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงตาม และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างน้ำ และของไหลนาโนไททาเนียมเป็นสารทำงานพบว่าอุณหภูมิของช่องทางออกเฉลี่ยของของไหลนาโนไททาเนียมมีค่าต่ำกว่าน้ำ เพราะมีการนำพาความร้อน ค่าความหนาแน่น และค่าความร้อนจำเพาะมากกว่าน้ำ จึงถ่ายเทความร้อนออกจากครีปได้มากกว่าทั้งที่ค่าฟลักซ์ความร้อนมากกว่าน้ำ

ภาพประกอบ 29 และ 30 กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิผิวครีปเฉลี่ย น้ำ และของไหลนาโนเป็นสารทำงานเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์์นัมเบอร์ของครีปแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีป 2.0 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิทางเข้า 20, 22 และ 24 °C และที่ฟลักซ์ความร้อนค่าต่างๆ ผลการทดลองจากกราฟจะพบว่าอุณหภูมิผิวครีปสูงขึ้นตามอุณหภูมิทางเข้าอย่างชัดเจน และเมื่อค่าเรโนลด์์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มอัตราการไหลอุณหภูมิผิวครีปเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงตาม

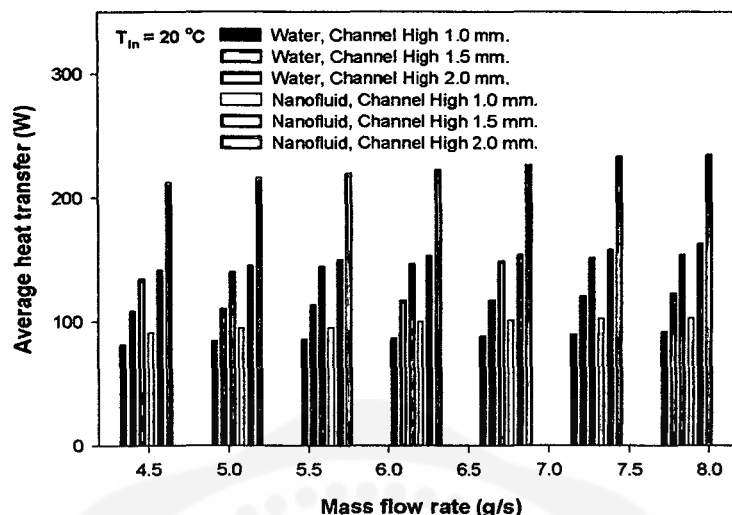
การเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างค่าเรโนลด์ส์นัมเบอร์ (Reynolds number, Re) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของครี



ภาพประกอบ 31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยกับค่าอัตราการไหลเชิงมวลของครีแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครี 1.0, 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตร น้ำเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า 22 °C



ภาพประกอบ 32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยกับค่าอัตราการไหลเชิงมวลของครีแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครี 1.0, 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตร ของไหลนาโนเป็นสารทำงานที่ อุณหภูมิทางเข้า 22 °C

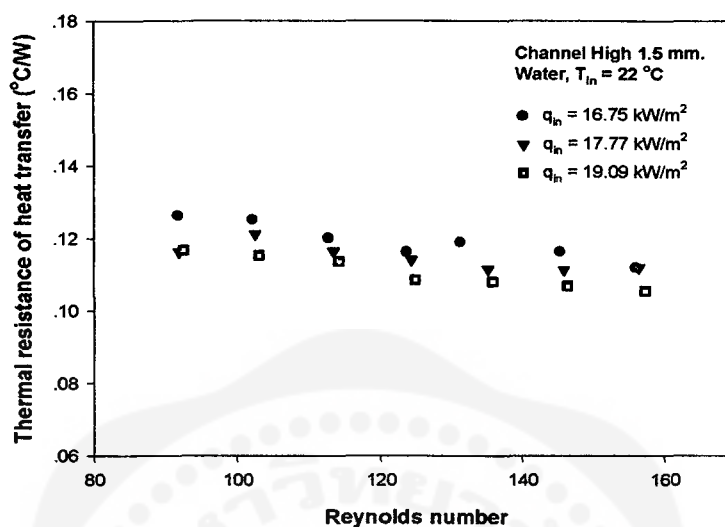


ภาพประกอบ 33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยกับค่าอัตราการไหลเชิงมวลของครีบบางช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบ 1.0, 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตร น้ำและของไหลนาโนเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า $20\text{ }^{\circ}\text{C}$

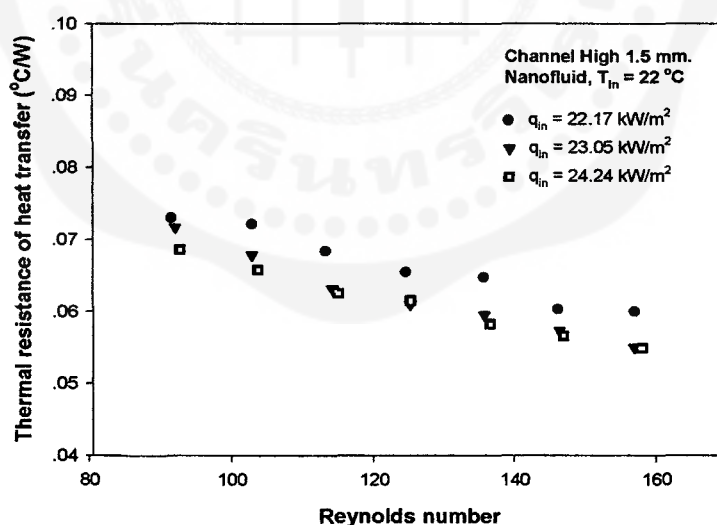
ภาพประกอบ 31 ถึง 33 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยกับค่าอัตราการไหลเชิงมวลของครีบบางช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบ 1.0, 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตร น้ำและของไหลนาโนเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ และเปรียบเทียบสารทำงานระหว่างน้ำกับของไหลนาโนไททาเนียมผสมน้ำ 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยค่าที่ได้จากการคำนวณ และการวัดโดยใช้ค่าเฉลี่ยจากการวัด 3 ครั้ง จากกราฟพบว่าเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้นอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นตามอย่างชัดเจน และเมื่อเพิ่มขนาดความสูงของครีบบางระบายความร้อนอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเช่นกัน

ภาพประกอบ 33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยกับค่าอัตราการไหลเชิงมวลของครีบบางช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบ 1.0, 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตร น้ำและของไหลนาโนเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ จากผลการทดลองพบว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ขนาดความสูงของครีบบางสูงขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารทำงานพบว่าของไหลนาโนมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนมากกว่าน้ำอย่างชัดเจน และอัตราการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนของไหลนาโนไททาเนียมมีค่ามากกว่าน้ำ

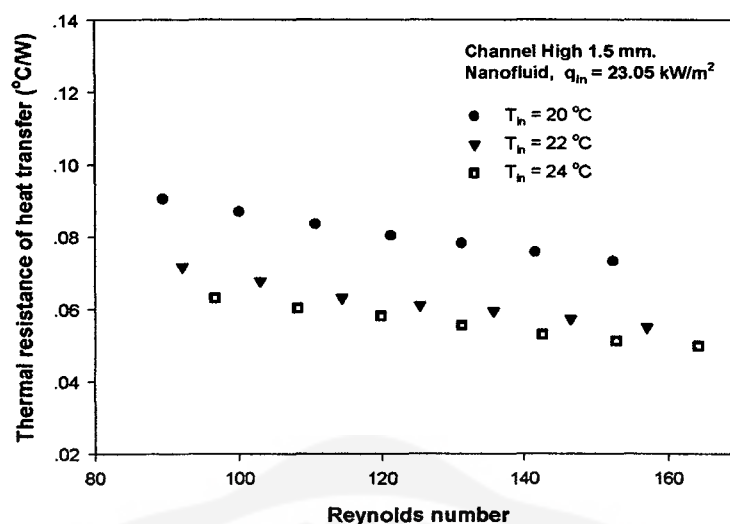
การเปรียบเทียบผลจากการทดลองระหว่างค่าเรโนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number, Re) และ ค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อน (Thermal resistance heat transfer, R_h)



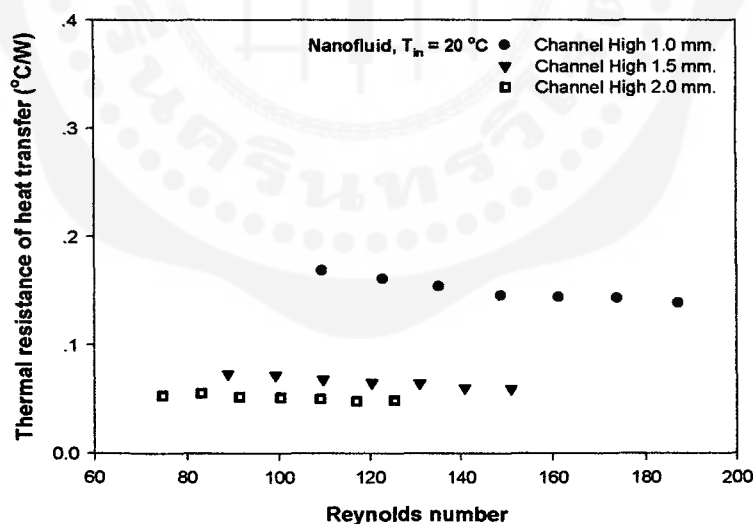
ภาพประกอบ 34 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของครีบกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของครีบบนช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบก 1.5 มิลลิเมตร น้ำเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ และที่ฟลักซ์ความร้อน 16.75, 17.77, และ 19.09 kW/m^2



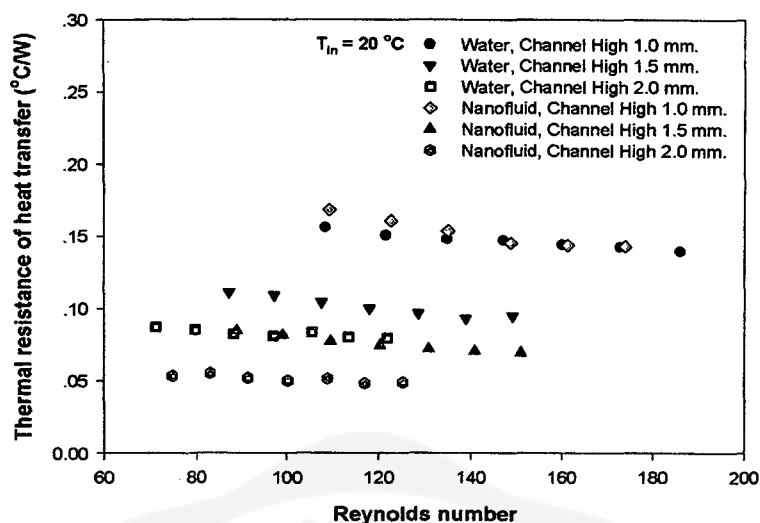
ภาพประกอบ 35 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของครีบกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของครีบบนช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบก 1.5 มิลลิเมตร ของไหลนาโนเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ และที่ฟลักซ์ความร้อน 22.17, 23.05, และ 24.24 kW/m^2



ภาพประกอบ 36 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของครีบกับค่าเรโนลด์ นัมเบอร์ของครีบบนช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบก 1.5 มิลลิเมตร ของไหลนาโนเป็นสารทำงานที่อุณหภูมิทางเข้า 20, 22 และ 24°C และที่ฟลักซ์ความร้อน 23.05 kW/m^2



ภาพประกอบ 37 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของครีบกับค่าเรโนลด์ นัมเบอร์ของครีบบนช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบก 1.0, 1.5, และ 2.0 มิลลิเมตร ของไหลนาโนเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า 20°C



ภาพประกอบ 38 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของครีบกับค่าเรโนลด์ นัมเบอร์ของครีบบนช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบก 1.0, 1.5, และ 2.0 มิลลิเมตร น้ำ และของไหลนาโนเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า 20 °C

ภาพประกอบ 34 ถึง 38 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของ ครีบกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของครีบบนช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบก 1.0, 1.5, และ 2.0 มิลลิเมตร น้ำ และของไหลนาโนเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า 20, 22, และ 24 °C และ เปรียบเทียบสารทำงานระหว่างน้ำกับของไหลนาโนไททาเนียมผสมน้ำ 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดย อุณหภูมิของของไหลที่ทางออกวัดจากการทดลองทั้งหมด 2 จุดใช้ค่าเฉลี่ยจากการวัด 3 ครั้ง จากกราฟ พบว่าเมื่อค่าเรโนลด์นัมเบอร์สูงขึ้นค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของครีบกมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้ก็เนื่องจากว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความสูงของครีกระบายความร้อนค่าความ ต้านทานความร้อนลดลงและพบว่าค่าความต้านทานความร้อนของครีบกขนาดความสูง 1.5 มิลลิเมตร กับ ขนาดความสูง 2.0 มิลลิเมตรมีค่าใกล้เคียงกันมาก

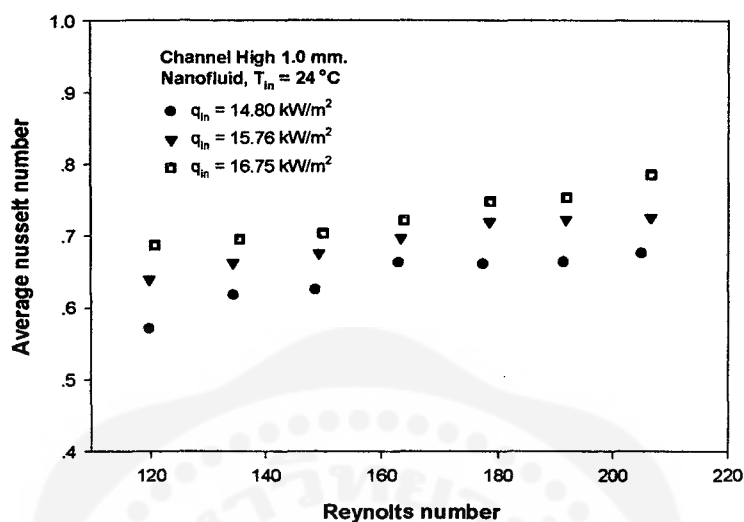
ภาพประกอบ 33 และ 34 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของ ครีบกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของครีบบนช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบก 1.5 มิลลิเมตร น้ำ และของไหลนาโนเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า 22 °C และที่ฟลักซ์ความร้อนต่างๆ จากผล การทดลองพบว่าค่าความต้านทานสูงสุดเกิดขึ้นกับค่าฟลักซ์ความร้อนที่ต่ำและค่าความต้านทาน ความร้อนมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารทำงานพบว่าของไหล นาโนมีความต้านทานความร้อนน้อยกว่าน้ำ

ภาพประกอบ 36 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของครีบกับค่าเรโนลด์์นัมเบอร์ของครีบบนช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบก 1.5 มิลลิเมตร น้ำ และของไหลนาโนเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า 20, 22 และ 24 °C และที่ฟลักซ์ความร้อน 23.05 kW/m² ผลการทดลองจากกราฟจะพบว่าค่าความต้านทานความร้อนมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิทางเข้าต่ำสุด และเมื่อเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทางเข้าค่าความต้านทานความร้อนมีแนวโน้มลดลง

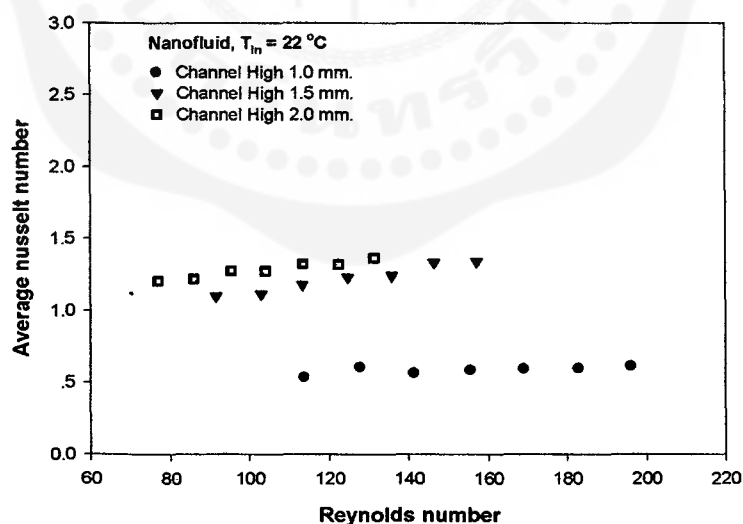
ภาพประกอบ 37 และ 38 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของครีบกับค่าเรโนลด์์นัมเบอร์ของครีบบนช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบก 1.0, 1.5, และ 2.0 มิลลิเมตร น้ำ และของไหลนาโนเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า 20, 22 และ 24 °C ผลการทดลองจากกราฟจะพบว่าค่าความต้านทานความร้อนมีแนวโน้มลดลงตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นและมีค่าเกาะกลุ่มกันเป็นส่วนใหญ่



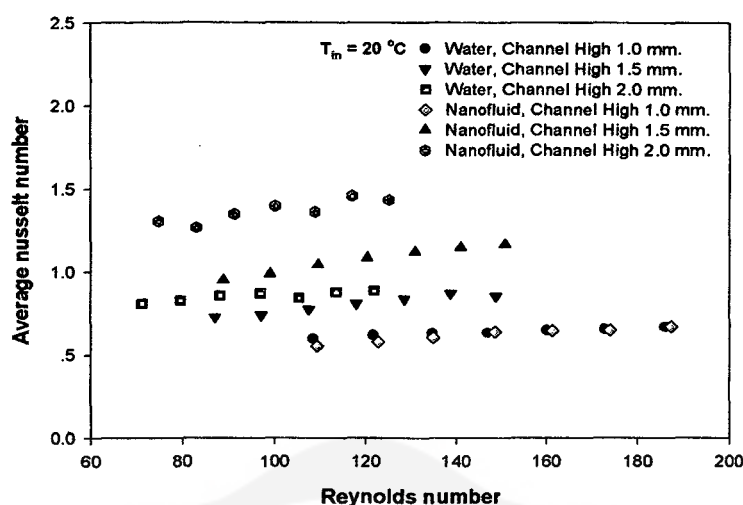
การเปรียบเทียบผลจากการทดลองระหว่างค่าเรโนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number, Re) และ ค่าตัวเลขนัสเซลล์นัมเบอร์ (Nusselt number, Nu)



ภาพประกอบ 39 กราฟความสัมพันธ์ของค่าตัวเลขนัสเซลล์นัมเบอร์กับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของครีบบแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบบ 1.0 มิลลิเมตร ของไหลนาโนเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ และที่ฟลักซ์ความร้อน 14.80, 15.76, และ 16.75 kW/m^2



ภาพประกอบ 40 กราฟความสัมพันธ์ของค่าตัวเลขนัสเซลล์นัมเบอร์กับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของครีบบแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบบ 1.0, 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตร ของไหลนาโนเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า $22\text{ }^{\circ}\text{C}$



ภาพประกอบ 41 กราฟความสัมพันธ์ของค่าตัวเลขนัสเซลล์นัมเบอร์เฉลี่ยกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของ ครีบบางช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบบ 1.0, 1.5, และ 2.0 มิลลิเมตร น้ำ และ ของไหลนาโนเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า $20\text{ }^{\circ}\text{C}$

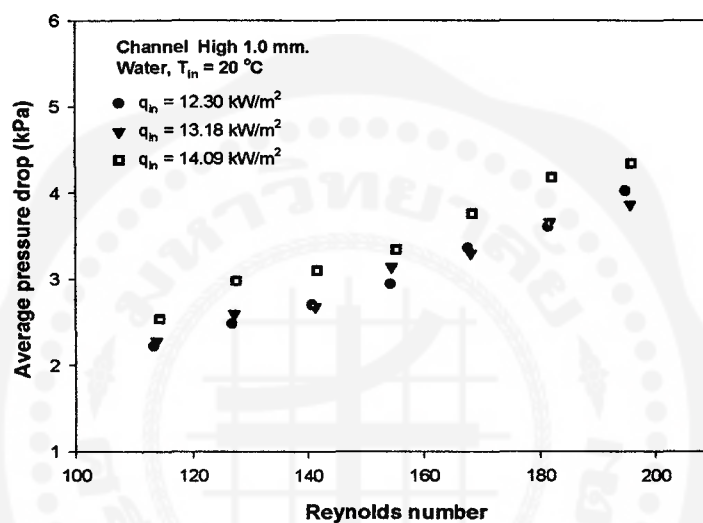
ภาพประกอบ 39 ถึง 41 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซลล์นัมเบอร์เฉลี่ยกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบบ 1.0, 1.5, และ 2.0 มิลลิเมตรน้ำ และ ของไหลนาโนเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า $20, 22$ และ $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ และที่ฟลักซ์ความร้อนต่างๆ และ เปรียบเทียบสารทำงานระหว่างน้ำกับของไหลนาโนไททาเนียมผสมน้ำ 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดย ค่าตัวเลขนัสเซลล์นัมเบอร์เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณจากกราฟพบว่าเมื่อค่าเรโนลด์นัมเบอร์สูงขึ้นค่า ตัวเลขนัสเซลล์นัมเบอร์มีแนวโน้มสูงขึ้นตามอัตราการไหล และตามขนาดความสูงของครีบบที่เพิ่มขึ้น

ภาพประกอบ 39 กราฟความสัมพันธ์ของค่าตัวเลขนัสเซลล์นัมเบอร์เฉลี่ยกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ ของครีบบางช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบบ 1.0 มิลลิเมตรของไหลนาโนเป็นสาร ทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ และที่ฟลักซ์ความร้อนต่างๆ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อฟลักซ์ ความร้อนสูงขึ้นค่าตัวเลขนัสเซลล์นัมเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นค่าตัวเลขนัสเซลล์ นัมเบอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม

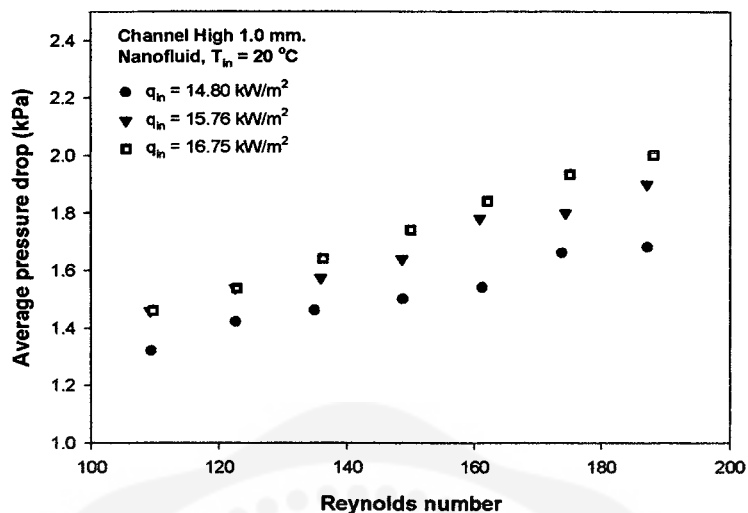
ภาพประกอบ 40 กราฟความสัมพันธ์ของค่าตัวเลขนัสเซลล์นัมเบอร์เฉลี่ยกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ ของครีบบางช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบบ 1.0, 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตรของไหล นาโนเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ จากผลการทดลองพบว่าค่าตัวเลขนัสเซลล์นัมเบอร์มี ค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดความสูงของครีบบที่เพิ่มขึ้นและเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นค่าตัวเลขนัสเซลล์นัมเบอร์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม

ภาพประกอบ 41 กราฟความสัมพันธ์ของค่าตัวเลขนัสเซิลล์นับเบอ์เฉลี่ยกับค่าเรโนลด์นัมเบอ์ของครีบบางช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ขนาดความสูงครีบบาง 1.0, 1.5, และ 2.0 มิลลิเมตร น้ำและของไหลนาโนเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า 20 °C ผลการทดลองจากกราฟจะพบค่าตัวเลขนัสเซิลล์นับเบอ์ทั้งที่ใช้ น้ำ และของไหลนาโนเป็นสารทำงานมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น

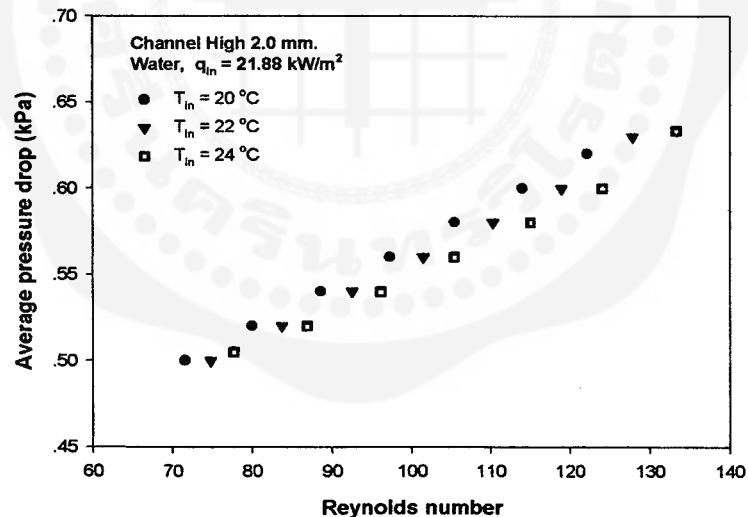
การเปรียบเทียบผลจากการทดลองระหว่างค่าเรโนลด์นัมเบอ์ (Reynolds number, Re) และค่าความดันตกคร่อม (Pressure Drop, Δp)



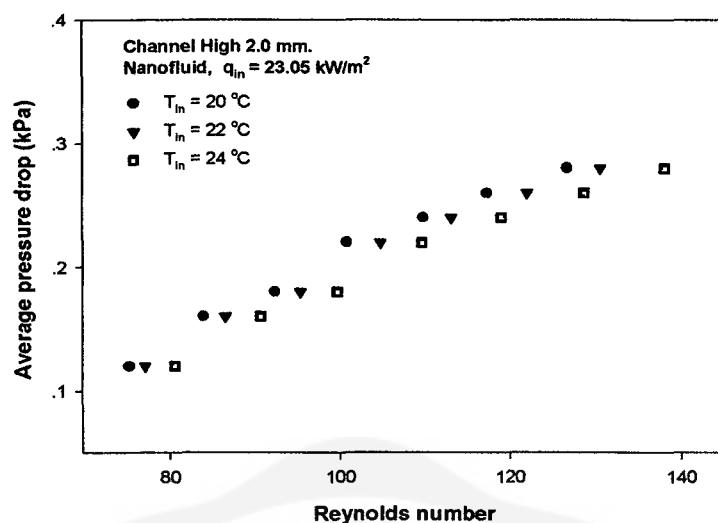
ภาพประกอบ 42 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์นัมเบอ์ของครีบบางช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ขนาดความสูงครีบบาง 1.0 มิลลิเมตร น้ำเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า 20 °C และที่ฟลักซ์ความร้อน 12.30, 13.18 และ 14.09 kW/m^2



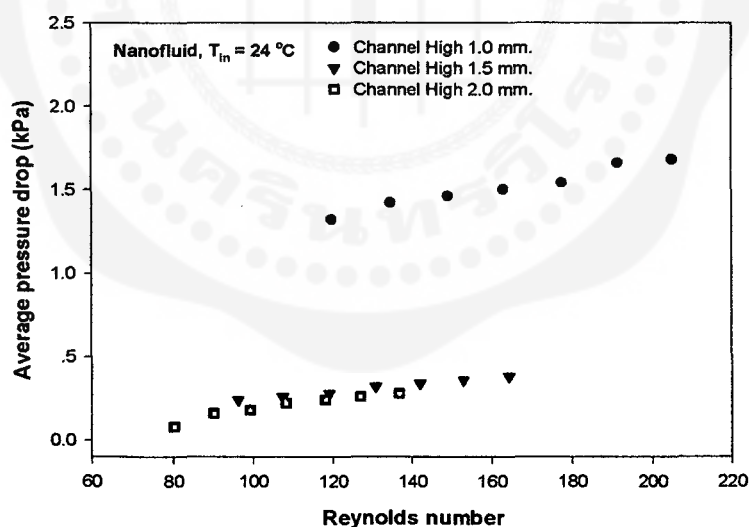
ภาพประกอบ 43 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของครีบบแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบบ 1.0 มิลลิเมตร ของไหลนาโนเป็นสารทำงานที่อุณหภูมิทางเข้า $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ และที่ฟลักซ์ความร้อน 14.80, 15.76 และ 16.75 kW/m^2



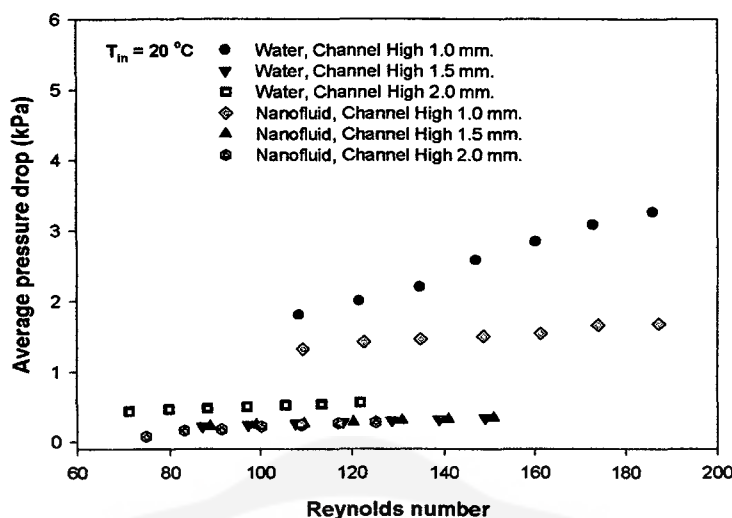
ภาพประกอบ 44 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของครีบบแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบบ 2.0 มิลลิเมตร น้ำเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า 20, 22 และ $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ และที่ฟลักซ์ความร้อน 21.88 kW/m^2



ภาพประกอบ 45 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของครีบบแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบบ 2.0 มิลลิเมตร ของไหลนาโนเป็นสารทำงานที่อุณหภูมิทางเข้า 20, 22 และ 24 °C และที่ฟลักซ์ความร้อน 23.05 kW/m²



ภาพประกอบ 46 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของครีบบแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบบ 1.0, 1.5, และ 2.0 มิลลิเมตร ของไหลนาโนเป็นสารทำงานที่อุณหภูมิทางเข้า 24 °C



ภาพประกอบ 47 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของครีบบแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบบ 1.0, 1.5, และ 2.0 มิลลิเมตร น้ำ และของไหลนาโนเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า $20\text{ }^{\circ}\text{C}$

ภาพประกอบ 42 ถึง 47 แสดงการเปรียบเทียบค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ได้จากการทดลองของครีบบแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก ที่ฟลักซ์ความร้อนต่างๆ ที่อุณหภูมิทางเข้า 20 , 22 และ $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่ขนาดความสูงของครีบบ 1.0, 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตร และเปรียบเทียบสารทำงานระหว่างน้ำกับของไหลนาโนไททาเนียมผสมน้ำ 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยค่าความดันตกคร่อมของไหลที่ทางออกวัดจากการทดลองทั้งหมด 1 จุดใช้ค่าเฉลี่ยจากการวัด 3 ครั้ง จากกราฟพบว่าเมื่อค่าเรโนลด์นัมเบอร์สูงขึ้นค่าความดันตกคร่อมมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นทั้งนี้ก็เนื่องจากอัตราการไหลของของไหลสูงขึ้น อัตราการเพิ่มขึ้นของความดันตกคร่อมเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามอัตราการไหลของของไหลที่เพิ่มขึ้น

ภาพประกอบ 42 และ 43 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของครีบบแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก ขนาดความสูงครีบบ 1.0 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิทางเข้า $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่อัตราการไหลต่างๆ และที่ฟลักซ์ความร้อนต่างๆ จากผลการทดลองพบว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นความดันตกคร่อมมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อเพิ่มฟลักซ์ความร้อนพบว่าความดันตกคร่อมมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งที่ใช้น้ำ และของไหลนาโนเป็นสารทำงาน

ภาพประกอบ 44 ถึง 45 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์์นัมเบอร์ของครีบบางช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก ขนาดความสูงครีบ 1.0, 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิทางเข้า 20, 22, 24 °C ที่อัตราการไหลต่างๆ และที่ฟลักซ์ความร้อนคงที่ จากผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิทางเข้าเปลี่ยนแปลงไม่มีผลต่อความดันตกคร่อมของระบบอย่างชัดเจน

ภาพประกอบ 46 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์์นัมเบอร์ของครีบบางช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก ขนาดความสูงครีบ 1.0, 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิทางเข้า 24 °C ที่อัตราการไหลต่างๆ และที่ฟลักซ์ความร้อนคงที่ การเปลี่ยนแปลงขนาดความสูงของครีบบางความสูงมีผลต่อความดันตกคร่อมของระบบอย่างชัดเจนพบที่ครีบขนาดความสูง 1.0 มิลลิเมตรมีค่าความดันตกคร่อมของระบบสูงสุด ส่วนที่ครีบขนาดความสูง 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตรมีค่าความดันตกคร่อมเกาะกลุ่มกัน

ภาพประกอบ 47 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ยกับค่าเรโนลด์์นัมเบอร์ของครีบบางช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบ 1.0, 1.5, และ 2.0 มิลลิเมตร น้ำ และของไหลนาโนเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิทางเข้า 20 °C ผลการทดลองจากกราฟจะพบว่าครีบบางความสูงขนาดความสูง 1.0 มิลลิเมตรทั้งน้ำ และของไหลนาโนเป็นสารทำงานที่มีความดันตกคร่อมเฉลี่ยของระบบมีค่าสูงสุดและมีแนวโน้มเพิ่มอย่างชัดเจนเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น สำหรับครีบขนาดความสูง 1.5 มิลลิเมตร และ 2.0 มิลลิเมตรมีค่าเกาะกลุ่มกัน น้ำเป็นสารทำงานที่มีความดันตกคร่อมเฉลี่ยสูงกว่าของไหลนาโนเป็นสารทำงาน

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาโดยการทดลองแล้วนำผลมาคำนวณหาตัวแปรที่ต้องการ ซึ่งผลที่ได้มาเสนอในลักษณะกราฟ แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ กราฟที่ใช้ในการศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนในลักษณะต่างๆ และความดันตกคร่อมของครีบบระบายความร้อนกับสารทำงาน ดังที่เสนอในบทที่ 4 ผลที่สามารถสรุปได้ดังนี้

- อุณหภูมิทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิผิวชุดครีบเฉลี่ย ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และค่านัสเซลล์นัมเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่าฟลักซ์ความร้อนสูงขึ้น โดยมีความสอดคล้องกันดีทั้งที่ใช้น้ำและของไหลนาโนไททาเนียมเป็นสารทำงาน และการเพิ่มขนาดความสูงของครีบบระบายความร้อนขนาดความสูงครีบ 1.0 มิลลิเมตร 1.5 มิลลิเมตร และ 2.0 มิลลิเมตร
- อุณหภูมิผิวชุดครีบเฉลี่ยมีค่าน้อยลงเมื่ออัตราการไหลของของไหลสูงขึ้น โดยมีความสอดคล้องกันดีทั้งที่ใช้น้ำ และของไหลนาโนไททาเนียมเป็นสารทำงาน และการเพิ่มขนาดความสูงของครีบบระบายความร้อนขนาดความสูงครีบ 1.0 มิลลิเมตร 1.5 มิลลิเมตร และ 2.0 มิลลิเมตร
- ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และค่านัสเซลล์นัมเบอร์มีค่าสูงขึ้นโดยแปรตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของของไหล ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกันดีทั้งที่ใช้น้ำ และของไหลนาโนไททาเนียมเป็นสารทำงาน และการเพิ่มขนาดความสูงของครีบบระบายความร้อนขนาดความสูงครีบ 1.0 มิลลิเมตร 1.5 มิลลิเมตร และ 2.0 มิลลิเมตรความสอดคล้อง ทั้งค่าสัมประสิทธิ์ การพาความร้อนและค่านัสเซลล์นัมเบอร์
- การถ่ายเทความร้อนในส่วนของครีบบางช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขนาดความสูงครีบ 2.0 มิลลิเมตร 1.5 มิลลิเมตร และ 1.0 มิลลิเมตร มีค่าสูงสุดลดต่ำตามลำดับอันเกิดจากการพื้นที่การถ่ายเทความร้อนมากกว่า
- ค่าความดันตกคร่อมของครีบบางช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก ขนาดความสูงครีบ 2.0 มิลลิเมตร 1.5 มิลลิเมตร และ 1.0 มิลลิเมตร มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดตามลำดับตามพื้นที่หน้าตัดของช่องการไหลที่ลดลง
- ค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของครีบบางช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก ขนาดความสูงครีบ 2.0 มิลลิเมตร 1.5 มิลลิเมตร และ 1.0 มิลลิเมตร มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดตามลำดับตามพื้นที่การถ่ายเทความร้อนที่ลดลง

- สารทำงานที่ใช้ของไหลนาโนไททาเนียมผสมน้ำความเข้มข้น 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนดีกว่าน้ำเฉลี่ยประมาณ 12.88, 31.22 และ 53.64 เปอร์เซ็นต์ที่สถานะอุณหภูมิทางเข้า 20 °C และ เฉลี่ยประมาณ 19.07, 31.51 และ 53.81 เปอร์เซ็นต์ที่สถานะอุณหภูมิทางเข้า 22 °C เรียงตามลำดับความสูงของครีป 1.00, 1.50 และ 2.00 มิลลิเมตรเนื่องจากของไหลนาโนไททาเนียมมีค่าความร้อนจำเพาะ ค่าความหนาแน่น ค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้น และมีอิทธิพลจากอนุภาคผงนาโนไททาเนียมทำให้เกิดการไหลปั่นป่วนในระบบ

- ครีประบายความร้อนแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก ขนาดความสูงครีป 1.0 มิลลิเมตร 1.5 มิลลิเมตร และ 2.0 มิลลิเมตร มีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามพื้นที่ที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

การศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนโดยการพาของครีปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก เป็นการวิจัยที่มีขอบเขตที่กว้างและมีรายละเอียดมาก ในงานวิจัยได้ทำการศึกษาได้บางส่วนเท่านั้น เพราะว่ามีข้อจำกัดในด้านอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองในการเก็บข้อมูล ทำให้ไม่สามารถศึกษาการถ่ายเทความร้อนครอบคลุมได้ทั้งหมด ในอนาคตอาจมีการเพิ่มเติมเงื่อนไขหรืออุปกรณ์อย่างเช่น

1. อาจทำการเพิ่มอัตราการไหลของของไหลให้สูงขึ้น
2. อาจทำการลดขนาดช่องไหลให้เล็กลงสู่ระดับ Micro Channel เพื่อทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนโดยการพาของครีป
3. อาจทำการศึกษาถึงผลกระทบในกรณีนี้ที่อุณหภูมิทางเข้าของระบบไม่คงที่ และอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงสุด
4. อาจออกแบบให้ตัวครีปมีรูปแบบชนิดอื่นๆ โดยใช้ฐานครีป และชุดให้ความร้อน (Heater) ตัวเดียวกันเพื่อศึกษารูปทรง และขนาดของครีปได้หลากหลาย
5. อาจออกทำการทดลองเพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนแบบจืดโดยใช้ครีปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขึ้นเดิม
6. อาจออกทำการทดลองเพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนโดยใช้ครีปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กขึ้นเดิมแต่เปลี่ยนสารทำงานเป็นสารทำงานอื่น หรือที่ความเข้มข้นใหม่เพื่อหาจุดที่ดีที่สุด
7. อาจทำการหาความดันลด (Pressure drop) ในระบบเพิ่มเติม



บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- นักสิทธิ์ คูวัฒนาชัย. (2535). *การถ่ายเทความร้อน*. ฟิสิกส์เซ็นเตอร์. กรุงเทพฯ: ม.ป.ป.
- มนตรี พิรุณเกษตร. (2541). *การถ่ายเทความร้อน ฉบับเตรียมสอบและเสริมประสบการณ์*. ปรับปรุงและพิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์วิทย์พัฒนา.
- สมศรี จรุงเรือง. (2542). *ระเบียบวิธีวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- P. K. Namburu; et al. (2009). Numerical study of turbulent flow and heat transfer characteristics of nanofluids considering variable properties. *International Journal of Thermal Sciences*. V. 48 pp. 290–302.
- P. Naphon; et al. (2009). Heat pipe efficiency enhancement with refrigerant–nanoparticles mixtures. *Energy Conversion and Management*. V. 50 pp. 772–776.
- W. Duangthongsuk; & S. Wongwises. (2009). Heat transfer enhancement and pressure drop characteristics of TiO₂–water nanofluid in a double-tube counter flow heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. V.52 pp. 2059–2067.
- J. Li; & C. Kleinstreuer. (2008). Thermal performance of nanofluid flow in microchannels. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. V.29 pp. 1221–1232.
- P. Naphon; et al. (2008). Experimental investigation of titanium nanofluids on the heat pipe thermal efficiency. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. V. 35 pp 1316–1319.
- W. Duangthongsuk; & S. Wongwises. (2008). Effect of thermophysical properties models on the predicting of the convective heat transfer coefficient for low concentration nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. V. 35 pp 1320–1326.
- Y.T. Yang; & H.S. Peng. (2008). Numerical study of pin-fin heat sink with un-uniform fin height design. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. V. 51 pp. 4788–4796.
- T.H. Tsai; & R. Chein. (2007). Performance analysis of nanofluid-cooled microchannel heat sinks. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. V. 28 pp. 1013–1026.
- C.H. Chen. (2007). Forced convection heat transfer in microchannel heat sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. V.50 pp. 2182–2189.

- P. Hrnjak; & X. Tu. (2007). Single phase pressure drop in microchannels. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. V.28 pp. 2–14.
- R. Chein; & J. Chuang. (2007). Experimental microchannel heat sink performance studies using nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*. V.46 pp. 57–66.
- C. T. Nguyen; et al. (2006). Heat transfer enhancement for an electronic liquid cooling system. *Applied Thermal Engineering*. V.27 pp. 1501–1506.
- J. Lee; & I. Mudawar. (2006). Assessment of the effectiveness of nanofluids for single-phase and two-phase heat transfer in micro-channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. V.50 pp. 452–463.
- M.E. Steinke; & S.G. Kandlikar. (2006). Single phase liquid friction factors in microchannels. *International Journal of Thermal Sciences*. V.45 pp. 1073–1083.
- S.P. Jang; & S.U.S. Choi. (2006). Cooling performance of a microchannel heat sink with nanofluids. *Applied Thermal Engineering*. V.26 pp. 2457–2463.
- S. Shen; et al. (2006). Flow and heat transfer in microchannels with rough wall surface. *Energy Conversion and Management*. V.47 pp. 1311–1325.
- S. W. Kang et al. (2006). *Experimental investigation of silver nano-fluid on heat Pipe Thermal performance*. *Applied Thermal Engineering*, V.26 pp. 2377–2382.
- F.F. Abdelall; et al. (2005). Pressure drop caused by abrupt flow area changes in small channels. *Experimental Thermal and Fluid Science*. V.29 pp. 425–434.
- H.Y. Zhang; et al. (2005). Single phase liquid cooled microchannel heat sink for electronic packages. *Applied Thermal Engineering*. V.25 pp. 1472–1487.
- J. Koo, C. Kleinstreuer. (2005). Laminar nanofluid flow in microheat-sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. V.48. pp. 2652–2661.
- P. S. Lee; et al. (2005). Investigation of heat transfer in rectangular microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. V.48 pp. 1688–1704.
- R. Chein; & G. Huang (2005). Analysis of microchannel heat sink performance using nanofluids. *Applied Thermal Engineering*. V. 25 pp. 3104–3114.
- A. Bejan; & A.D. Kraus. (2004). Force convection; Internal flows. In *Heat transfer Handbook*. John wiley & sons, Inc. pp. 395-438.

- B. Agostini; et al. (2004). Liquid flow friction factor and heat transfer coefficient in small Channels. *Experimental Thermal and Fluid Science*. V. 28 pp. 97–103.
- G. L. Morini. (2004). Single phase convective heat transfer in microchannels. *International Journal of Thermal Sciences*. V43 pp.631-651.
- J. Yue; et al. (2004). Pressure drops of single and two-phase flows through T-type microchannel mixers. *Chemical Engineering Journal*. V.102 pp. 11–24.
- W. Owhaib; & B. Palm. (2004). Experimental investigation of single-phase convective heat transfer in circular microchannels. *Experimental Thermal and Fluid Science*. V.28 pp. 105–110.
- B. Agostini; et al. (2002). Friction factor and heat transfer coefficient of R134a liquid flow in mini-channels. *Applied Thermal Engineering*. V.22 pp. 1821–1834.
- G. Hetsroni; et al. (2002). A uniform temperature heat sink for cooling of electronic devices. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. V45 pp. 3275–3286.
- Weilin Qu, Issam Mudawar. (2002). *Experimental and numerical study of pressure drop And heat transfer in a single-phase micro-channel heat sink*. International Journal of Heat and Mass Transfer, V.45 pp. 2549–2565.
- C. Gillo; et al. (2000). Single- and two-phase heat exchangers for power electronic components. *Int. J. Therm. Sci*. V. 39 pp. 826–832.
- T.M Adams; et al. (1998). An experimental investigation of single-phase forced convection in microchannels. *Int. J. Heat Mass Transfer*. V. 41 pp 851 857.
- X. F. Peng; & G. P. Peterson. (1996). *Convective heat transfer and flow friction for water flow in microchannel structures*. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 39, No. 12, pp. 2599-2608.
- A. D. Kraus, A. Aziz; & J. Welty. (1999). *Extended Surface Heat Transfwer*. International Edition. A Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons,INc.
- K. S. Ramesh and P. S. Dusan. (2001). *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. John Wiley & Sons,Inc.
- S.Kakac; et al. (1999). *Heat Transfer Enhancement of Heat Exchangers*. International Edition. London: Kluwer Academic Publishers.
- Y. A. Cengel. (1998). *Heat Transfer*. International Edition. North America: McGraw-Hill.

J. P. Holman. (1997). *Heat Transfer*. Eighth Edition. Singapore: McGraw-Hill,INC.

Incropera, F.P.; & Dewitt, D.P. (1985). *Introduction to Heat Transfer*. International Edition.
London: John Wiley & Sons, Inc.

J.R. Welty. (1978). *Engineering Heat Transfer*. International Edition. London: John Wiley & Sons, Inc.

M.N. Ozisik, (1977). *Basic Heat Transfer*. Kogakusha. International Edition. Turkey:
McGraw-Hill, Ltd,

Jackop, M.; & Hawkins,G.A. (1957) *Elements of Heat Transfer*. International Edition.
London: John Wiley & Sons, Inc.







ภาคผนวก ก
ตารางแสดงผลการทดลอง

ตารางแสดงผลการทดลอง

จากการทดลองที่ค่าอัตราการไหล 16, 18, 20, 22, 24, 26 และ 28 ลิตรต่อชั่วโมง (LPH) อุณหภูมิควบคุมด้านทางเข้า 20, 22, และ 24 องศาเซลเซียส

ครีบบระบายความร้อนขนาดความสูงครีป 1.00 มิลลิเมตร ใช้น้ำเป็นสารทำงานที่ค่าความร้อน (Heating Power) 81.20, 87.00 และ 93.00 วัตต์ ใช้น้ำของไหลนาโททาเนียมความเข้มข้น 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรผสมกับน้ำเป็นสารทำงานที่ค่าความร้อน (Heating Power) 97.65, 104.00 และ 110.55 วัตต์

ครีบบระบายความร้อนขนาดความสูงครีป 1.50 มิลลิเมตร ใช้น้ำเป็นสารทำงานที่ค่าความร้อน (Heating Power) 110.55, 117.30 และ 126.00 วัตต์ ใช้น้ำของไหลนาโททาเนียมความเข้มข้น 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรผสมกับน้ำเป็นสารทำงานที่ค่าความร้อน (Heating Power) 146.30, 152.10 และ 160.00 วัตต์

ครีบบระบายความร้อนขนาดความสูงครีป 2.00 มิลลิเมตร ใช้น้ำเป็นสารทำงานที่ค่าความร้อน (Heating Power) 138.75, 144.40 และ 152.10 วัตต์ ใช้น้ำของไหลนาโททาเนียมความเข้มข้น 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรผสมกับน้ำเป็นสารทำงานที่ค่าความร้อน (Heating Power) 209.50, 218.50 และ 227.95 วัตต์ ดังตารางบันทึกผลการทดลองดังต่อไปนี้

ผลการทดลองของครีบบแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก ขนาดความสูงครีป 1.00 มิลลิเมตร

ตาราง 9 แสดงอุณหภูมิที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_h = 81.20 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 20°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	21.31	21.26	21.24	21.05	21.05	20.98	20.96
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	25.19	24.98	24.76	24.27	24.07	23.83	23.76
อุณหภูมิฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	32.09	31.99	31.97	31.63	31.51	31.34	31.42
อุณหภูมิฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	38.81	38.67	38.56	38.15	37.85	37.71	37.74
อุณหภูมิถังน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	20.04	20.04	20.04	20.00	20.03	20.02	20.01
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	1.80	2.00	2.20	2.58	2.84	3.08	3.26

ตาราง 10 แสดงอุณหภูมิน้ำที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตก
คร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 87.00 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 20°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	21.31	21.35	21.37	21.16	21.22	21.14	21.04
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	25.42	25.28	25.03	24.57	24.44	24.20	24.07
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	32.39	32.37	32.45	32.05	32.00	31.90	31.83
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	38.32	38.80	38.70	38.08	37.97	37.84	37.73
อุณหภูมิถังน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	20.01	20.01	20.02	19.98	20.01	20.01	20.04
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	1.90	2.06	2.14	2.70	2.76	3.08	3.20

ตาราง 11 แสดงอุณหภูมิน้ำที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตก
คร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 93.00 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 20°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	21.39	21.26	21.22	21.14	21.12	21.04	21.15
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	25.88	25.39	25.19	24.94	24.66	24.43	24.43
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	33.48	33.30	33.21	33.05	33.06	32.96	32.95
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	40.53	40.05	40.00	39.78	39.52	39.34	39.21
อุณหภูมิถังน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	20.01	20.01	20.05	19.98	20.02	20.01	20.04
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	2.14	2.62	2.76	2.94	3.40	3.68	3.76

ตาราง 12 แสดงอุณหภูมิน้ำที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตก
คร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 81.20 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 22°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	23.22	23.09	23.15	23.10	23.09	23.03	22.98
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	27.01	26.78	26.64	26.38	26.06	25.92	25.72
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	33.37	33.33	33.25	33.14	33.04	32.96	32.91
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	39.50	39.25	39.24	38.93	38.80	38.60	38.49
อุณหภูมิถังน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	22.01	22.01	22.01	22.02	22.03	22.03	22.01
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	2.22	2.48	2.70	2.94	3.36	3.60	4.02

ตาราง 13 แสดงอุณหภูมิน้ำที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตก
คร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 87.00 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 22°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิน้ำทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	23.19	23.11	23.15	23.04	23.00	22.99	22.96
อุณหภูมิน้ำทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	27.34	27.00	26.94	26.49	26.37	26.08	25.99
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	34.21	34.09	34.05	33.85	33.82	33.73	33.52
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	40.21	39.90	39.86	39.55	39.44	39.27	39.08
อุณหภูมิถึงน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	22.03	22.00	22.04	22.01	22.01	22.02	22.02
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	2.28	2.60	2.68	3.14	3.30	3.66	3.86

ตาราง 14 แสดงอุณหภูมิน้ำที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตก
คร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 93.00 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 22°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิน้ำทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	23.34	23.15	23.19	23.18	23.01	22.97	23.03
อุณหภูมิน้ำทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	27.70	27.19	27.14	26.86	26.50	26.26	26.18
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	35.23	35.10	35.07	34.90	34.68	34.60	34.56
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	41.84	41.57	41.54	41.25	40.87	40.67	40.60
อุณหภูมิถึงน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	22.00	22.01	22.02	22.04	21.98	22.00	22.01
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	2.54	2.98	3.10	3.34	3.76	4.18	4.34

ตาราง 15 แสดงอุณหภูมิน้ำที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตก
คร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 81.20 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 24°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิน้ำทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	25.09	25.04	25.04	24.99	24.97	24.91	24.96
อุณหภูมิน้ำทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	28.83	28.66	28.34	28.18	27.89	27.70	27.65
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	35.78	35.68	35.59	35.39	35.15	35.03	35.00
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	42.21	42.08	41.81	41.63	41.44	41.21	41.17
อุณหภูมิถึงน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	24.03	24.00	24.03	24.01	24.00	24.00	24.00
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	2.72	2.90	3.34	3.44	3.78	4.20	4.24

ตาราง 16 แสดงอุณหภูมิน้ำที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตก
คร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_{in} = 87.00 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 24°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิน้ำทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	25.09	25.11	25.08	25.03	25.02	24.99	25.09
อุณหภูมิน้ำทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	29.15	28.80	28.69	28.40	28.30	28.06	28.07
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	36.22	36.04	35.88	35.82	35.76	35.66	35.74
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	42.79	42.26	42.09	41.85	41.75	41.55	41.62
อุณหภูมิถึงน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	24.03	24.03	24.04	24.06	24.02	24.01	24.05
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	2.50	2.86	2.88	3.43	3.44	3.84	4.04

ตาราง 17 แสดงอุณหภูมิน้ำที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตก
คร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_{in} = 93.00 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 24°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิน้ำทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	25.20	25.06	25.08	25.11	25.05	25.01	24.99
อุณหภูมิน้ำทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	29.53	29.11	29.01	28.66	28.55	28.26	28.27
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	37.12	37.02	37.10	36.98	36.88	36.78	36.76
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	43.92	43.77	43.80	43.58	43.44	43.25	43.21
อุณหภูมิถึงน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	24.07	24.01	24.04	24.04	23.99	24.03	24.03
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	2.72	3.11	3.34	3.84	3.90	4.40	4.40

ตาราง 18 แสดงอุณหภูมิของของไหลนาโนไททาเนียมที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีป
เฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_{in} = 97.65 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 20°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิน้ำทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	21.02	21.19	20.95	21.03	20.89	20.80	20.88
อุณหภูมิน้ำทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	25.53	25.56	24.92	25.01	24.63	24.33	24.19
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	39.19	39.24	38.16	37.98	37.79	37.75	37.22
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	38.58	38.59	37.56	37.70	37.44	37.31	36.93
อุณหภูมิถึงน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	20.01	20.05	20.02	20.02	20.01	20.00	20.04
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	1.32	1.42	1.46	1.50	1.54	1.66	1.68

ตาราง 19 แสดงอุณหภูมิของของไหลนาโนไททาเนียมที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 104.00$ W อุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 20°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	20.98	21.08	21.07	20.88	20.70	20.79	20.74
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	25.77	25.57	25.38	25.03	24.55	24.54	24.27
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	40.34	40.25	39.93	39.83	39.38	39.33	39.43
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	39.37	39.19	38.82	38.63	38.08	37.99	38.10
อุณหภูมิถึงน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	20.05	20.03	20.08	20.00	19.99	20.03	20.02
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	1.46	1.54	1.57	1.64	1.78	1.80	1.90

ตาราง 20 แสดงอุณหภูมิของของไหลนาโนไททาเนียมที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 110.55$ W และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 20°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	21.02	21.02	21.07	21.10	20.88	20.85	20.84
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	26.13	25.88	25.63	25.63	25.07	24.86	24.65
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	42.70	43.14	43.15	42.70	42.16	42.16	42.19
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	40.65	40.78	40.46	40.30	39.57	39.24	39.32
อุณหภูมิถึงน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	20.04	20.04	20.04	20.06	20.03	20.03	20.03
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	1.46	1.54	1.64	1.74	1.84	1.93	2.00

ตาราง 21 แสดงอุณหภูมิของของไหลนาโนไททาเนียมที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 97.65$ W และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 22°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	22.96	22.96	22.94	23.01	22.93	22.96	22.87
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	27.52	27.39	26.96	26.90	26.63	26.51	26.24
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	42.71	42.53	42.43	42.41	42.41	42.72	42.39
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	40.00	39.58	39.45	39.23	39.07	39.19	38.65
อุณหภูมิถึงน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	22.02	22.03	22.03	22.05	22.04	22.07	22.07
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	1.32	1.42	1.46	1.50	1.54	1.66	1.68

ตาราง 22 แสดงอุณหภูมิของของไหลนาโนไททาเนียมที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 104 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 22°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	23.04	23.13	23.07	22.97	22.98	22.93	22.83
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	27.86	27.67	27.27	27.07	26.85	26.67	26.36
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	45.19	45.41	45.13	44.88	44.71	44.45	44.06
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	42.10	42.31	42.00	41.60	41.33	40.78	39.85
อุณหภูมิถึงน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	22.05	22.05	22.06	22.07	22.02	22.03	22.04
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	1.46	1.54	1.57	1.64	1.78	1.80	1.90

ตาราง 23 แสดงอุณหภูมิของของไหลนาโนไททาเนียมที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 110.55 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 22°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	23.06	23.08	23.08	23.05	22.88	22.76	22.75
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	28.22	27.81	27.50	27.41	26.88	26.67	26.55
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	46.10	45.91	45.81	45.30	45.45	45.48	46.18
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	43.99	43.86	43.49	43.37	42.68	42.45	42.38
อุณหภูมิถึงน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	22.03	22.04	22.04	22.06	22.03	22.01	22.03
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	1.46	1.54	1.64	1.74	1.84	1.93	2.00

ตาราง 24 แสดงอุณหภูมิของของไหลนาโนไททาเนียมที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 97.65 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 24°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	25.30	25.29	25.32	25.19	25.19	25.06	24.90
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	29.80	29.63	29.21	28.99	28.83	28.55	28.21
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	42.91	41.73	41.19	40.64	41.48	41.52	41.21
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	42.08	41.92	41.62	41.21	40.92	40.90	40.48
อุณหภูมิถึงน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	24.01	24.03	24.03	24.00	24.06	23.98	24.01
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	1.32	1.42	1.46	1.50	1.54	1.66	1.68

ตาราง 25 แสดงอุณหภูมิของของไหลนาโนไททาเนียมที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 104 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 24°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	25.16	25.20	25.36	25.13	25.32	25.07	25.13
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	29.96	29.64	29.48	29.24	29.24	28.74	28.65
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	42.02	41.26	41.10	41.18	41.01	40.83	41.19
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	41.61	41.63	41.58	41.45	41.47	40.99	40.91
อุณหภูมิถังน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	24.02	24.04	22.73	24.04	24.03	24.02	23.70
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	1.46	1.54	1.57	1.64	1.78	1.80	1.90

ตาราง 26 แสดงอุณหภูมิของของไหลนาโนไททาเนียมที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 110.55 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 24°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	25.36	25.46	25.43	25.25	25.26	25.00	25.04
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	30.46	30.18	29.85	29.43	29.35	28.84	28.78
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	42.54	42.66	42.50	42.01	41.97	41.56	41.37
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	41.53	41.38	41.34	41.11	40.95	40.66	40.34
อุณหภูมิถังน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	24.03	24.05	24.05	24.06	24.05	24.02	24.05
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	1.46	1.54	1.64	1.74	1.84	1.93	2.00

ผลการทดลองของครีบบแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก ขนาดความสูงครีบ 1.50 มิลลิเมตร

ตาราง 27 แสดงอุณหภูมิที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีบเฉลี่ย และความดันตก
คร่อมเฉลี่ยของครีบที่ $Q_n = 110.55 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 20°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	21.83	21.61	21.59	21.57	21.50	21.47	21.43
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	26.91	26.37	26.10	25.85	25.64	25.55	25.32
อุณหภูมิผิวฐานครีบทงเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	36.25	35.93	35.63	35.09	35.09	34.99	35.55
อุณหภูมิผิวฐานครีบทงออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	36.06	35.70	35.25	35.00	34.55	34.40	34.31
อุณหภูมิถึงน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	20.03	20.03	20.04	20.00	20.03	20.04	20.02
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34

ตาราง 28 แสดงอุณหภูมิที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีบเฉลี่ย และความดันตก
คร่อมเฉลี่ยของครีบที่ $Q_n = 117.30 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 20°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	21.48	21.81	21.58	21.56	21.52	21.49	21.50
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	26.90	26.78	26.31	26.15	25.75	25.61	25.49
อุณหภูมิผิวฐานครีบทงเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	36.45	36.40	36.33	36.43	36.17	36.17	36.53
อุณหภูมิผิวฐานครีบทงออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	36.23	35.99	35.75	35.79	35.56	35.24	35.33
อุณหภูมิถึงน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	20.04	20.01	20.02	20.02	20.04	20.02	19.99
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34

ตาราง 29 แสดงอุณหภูมิที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีบเฉลี่ย และความดันตก
คร่อมเฉลี่ยของครีบที่ $Q_n = 126.00 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 20°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	22.19	22.17	22.08	21.99	21.79	21.65	21.69
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	28.04	27.71	27.15	26.75	26.33	26.07	26.02
อุณหภูมิผิวฐานครีบทงเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	40.77	40.83	40.27	40.46	40.03	40.14	40.36
อุณหภูมิผิวฐานครีบทงออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	36.41	36.50	35.87	35.60	35.48	35.97	36.11
อุณหภูมิถึงน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	20.04	20.01	20.02	20.01	20.01	20.01	20.02
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34

ตาราง 30 แสดงอุณหภูมิน้ำที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 110.55 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 22°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิน้ำทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	24.02	23.84	23.65	23.60	23.53	23.51	23.44
อุณหภูมิน้ำทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	29.18	28.54	28.20	27.92	27.52	27.47	27.27
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	40.84	40.48	40.11	39.97	40.19	40.29	39.98
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	39.18	38.70	38.33	37.84	37.80	38.02	37.62
อุณหภูมิถังน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	22.02	22.02	22.01	22.00	22.03	22.02	22.04
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	0.21	0.22	0.24	0.28	0.30	0.34	0.54

ตาราง 31 แสดงอุณหภูมิน้ำที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 117.30 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 22°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิน้ำทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	23.97	23.79	23.71	23.66	23.62	23.58	23.49
อุณหภูมิน้ำทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	29.38	28.91	28.66	28.36	28.08	27.74	27.45
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	40.96	41.28	41.11	40.95	40.73	40.51	40.63
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	38.51	39.31	39.01	38.81	38.58	38.47	38.45
อุณหภูมิถังน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	22.03	22.00	21.99	22.03	22.04	22.05	22.03
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	0.20	0.22	0.23	0.26	0.28	0.30	0.31

ตาราง 32 แสดงอุณหภูมิน้ำที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 126.00 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 22°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิน้ำทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	24.06	23.92	23.95	23.79	23.79	23.68	23.67
อุณหภูมิน้ำทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	29.90	29.28	29.00	28.67	28.34	28.01	27.78
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	42.30	41.94	42.01	41.86	41.41	41.31	41.34
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	39.92	39.47	39.32	38.56	38.71	38.50	38.15
อุณหภูมิถังน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	22.01	22.04	22.04	22.03	22.03	22.03	22.02
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	0.20	0.22	0.24	0.26	0.29	0.33	0.34

ตาราง 33 แสดงอุณหภูมิน้ำที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตก
คร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 110.55 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 24°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	25.80	25.52	25.69	25.48	25.68	25.65	25.36
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	30.89	30.47	30.39	29.77	29.83	29.60	29.06
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	42.67	42.26	42.12	41.79	41.83	42.29	41.91
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	37.99	37.72	37.28	37.01	36.94	36.72	36.94
อุณหภูมิถังน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	24.00	24.03	24.03	24.04	24.04	24.02	24.03
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	0.20	0.22	0.23	0.26	0.28	0.30	0.31

ตาราง 34 แสดงอุณหภูมิน้ำที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตก
คร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 117.30 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 24°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	26.00	25.80	25.82	25.61	25.76	25.49	25.63
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	31.51	30.90	30.85	30.38	30.28	29.71	29.59
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	43.24	43.22	42.67	42.51	42.11	41.88	41.80
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	40.20	39.54	39.67	39.55	39.44	39.18	39.09
อุณหภูมิถังน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	24.00	24.02	24.03	24.01	24.03	24.05	24.01
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	0.20	0.22	0.23	0.26	0.28	0.30	0.31

ตาราง 35 แสดงอุณหภูมิน้ำที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตก
คร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 126.00 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 24°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	25.85	25.83	25.83	25.64	25.64	25.67	25.51
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	31.71	31.42	31.10	30.67	30.32	30.13	29.65
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	43.61	43.22	43.42	43.39	43.59	43.84	44.00
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	41.38	41.07	41.39	40.84	40.77	40.93	40.80
อุณหภูมิถังน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	24.04	24.07	24.02	24.01	24.04	24.03	24.05
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	0.20	0.21	0.22	0.24	0.26	0.30	0.31

ตาราง 36 แสดงอุณหภูมิของของไหลนาโนไททาเนียมที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 146.30$ W และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 20°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	21.79	21.59	21.56	21.60	21.52	21.39	21.31
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	28.53	27.90	27.50	27.30	27.12	26.74	26.33
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	33.75	33.25	32.81	32.69	32.58	32.32	32.00
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	40.89	40.15	39.41	39.10	38.96	38.59	38.12
อุณหภูมิกึ่งน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	20.03	20.05	20.05	20.04	20.06	20.05	20.01
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34

ตาราง 37 แสดงอุณหภูมิของของไหลนาโนไททาเนียมที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 152.10$ W และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 20°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	21.91	21.86	21.82	21.81	21.66	21.57	21.57
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	28.92	28.45	28.14	27.81	27.21	26.98	26.89
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	34.97	34.62	34.39	34.08	33.54	33.37	33.30
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	42.66	42.08	41.69	41.21	40.37	40.09	39.99
อุณหภูมิกึ่งน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	20.03	20.06	20.04	20.04	20.02	20.03	20.05
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28

ตาราง 38 แสดงอุณหภูมิของของไหลนาโนไททาเนียมที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 160.00$ W และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 20°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	22.03	21.97	21.92	21.78	21.68	21.67	21.60
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	29.39	28.85	28.31	28.08	27.58	27.35	27.05
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	35.61	35.18	34.67	34.43	34.05	33.88	33.57
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	43.63	42.89	42.06	41.72	41.04	40.62	40.13
อุณหภูมิกึ่งน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	20.00	20.04	20.05	20.04	20.03	20.02	20.07
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28

ตาราง 39 แสดงอุณหภูมิของของไหลนาโนไททาเนียมที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 146.30$ W และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 22°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	23.09	23.36	23.15	23.19	23.23	23.05	23.06
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	29.88	29.63	28.95	28.91	28.68	28.37	28.09
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	34.30	34.35	33.67	33.66	33.61	33.11	33.05
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	39.93	39.87	38.80	38.75	38.71	37.91	37.72
อุณหภูมิถึงน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	22.02	22.08	22.05	22.04	22.06	22.04	22.06
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	0.24	0.26	0.28	0.32	0.34	0.36	0.38

ตาราง 40 แสดงอุณหภูมิของของไหลนาโนไททาเนียมที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 152.10$ W และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 22°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	23.19	23.09	23.10	23.17	23.04	23.00	22.93
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	30.29	29.90	29.75	29.37	28.85	28.54	28.18
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	34.79	34.43	34.15	33.87	33.49	33.23	32.83
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	40.48	39.92	39.44	38.91	38.31	37.78	37.15
อุณหภูมิถึงน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	22.04	22.04	22.04	22.08	22.01	22.06	22.03
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36

ตาราง 41 แสดงอุณหภูมิของของไหลนาโนไททาเนียมที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 160.00$ W และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 22°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	23.40	23.44	23.50	23.26	23.28	23.15	23.20
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	30.79	30.29	30.01	29.26	29.15	28.74	28.57
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	35.25	34.84	34.62	34.17	34.00	33.58	33.46
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	40.86	40.25	39.72	38.87	38.53	38.11	37.84
อุณหภูมิถึงน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	22.06	22.02	22.04	22.02	22.04	22.01	22.05
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36

ตาราง 42 แสดงอุณหภูมิของของไหลนาโนไททาเนียมที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 146.30$ W และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 24°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	25.33	25.18	25.19	25.23	25.20	25.02	25.10
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	32.11	31.49	31.37	31.14	30.79	30.42	30.17
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	35.62	35.19	35.15	34.99	34.71	34.29	34.19
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	40.38	39.75	39.73	39.41	38.92	38.34	38.07
อุณหภูมิดังน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	24.03	24.05	24.02	24.02	24.02	24.04	24.06
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	0.24	0.26	0.28	0.32	0.34	0.36	0.38

ตาราง 43 แสดงอุณหภูมิของของไหลนาโนไททาเนียมที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 152.10$ W และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 24°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	25.37	25.43	25.38	25.27	25.21	24.92	24.95
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	32.48	32.03	31.83	31.45	31.18	30.48	30.24
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	36.25	35.96	35.85	35.51	35.22	34.54	34.36
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	41.05	40.46	40.31	39.74	39.36	38.47	38.17
อุณหภูมิดังน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	24.02	24.04	24.07	24.04	24.01	24.05	24.03
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36

ตาราง 44 แสดงอุณหภูมิของของไหลนาโนไททาเนียมที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 160.00$ W และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 24°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	25.42	25.45	25.42	25.23	25.34	25.34	25.16
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	32.89	32.55	32.27	31.78	31.48	31.08	30.56
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	36.98	36.74	36.54	35.73	35.57	35.32	35.00
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	41.81	41.52	40.82	39.84	39.44	39.01	38.68
อุณหภูมิดังน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	24.04	24.06	24.01	24.02	24.04	24.07	24.01
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36

ผลการทดลองของครีบบางช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก ขนาดความสูงครีบ 2.00 มิลลิเมตร

ตาราง 45 แสดงอุณหภูมิที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีบเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีบที่ $Q_n = 138.75$ W และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 20°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	20.84	20.86	20.88	20.83	20.91	20.81	20.78
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	27.30	27.01	26.77	26.53	26.35	25.90	25.69
อุณหภูมิผิวฐานครีบทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	36.73	36.57	36.37	36.47	37.02	36.16	36.42
อุณหภูมิผิวฐานครีบทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	35.09	35.12	34.97	34.85	35.39	34.85	34.56
อุณหภูมิถังน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	20.04	20.01	20.03	20.04	20.04	20.01	20.04
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	0.44	0.46	0.48	0.50	0.52	0.54	0.56

ตาราง 46 แสดงอุณหภูมิที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีบเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีบที่ $Q_n = 144.40$ W และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 20°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	21.03	20.87	20.86	20.97	20.84	20.88	20.81
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	27.79	27.39	27.12	26.81	26.35	26.15	25.85
อุณหภูมิผิวฐานครีบทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	38.64	38.70	38.09	38.37	37.31	37.14	37.42
อุณหภูมิผิวฐานครีบทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	37.20	36.85	36.71	36.43	36.33	36.15	35.30
อุณหภูมิถังน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	20.03	20.03	20.04	20.03	20.01	20.01	20.03
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	0.50	0.52	0.54	0.56	0.58	0.60	0.62

ตาราง 47 แสดงอุณหภูมิที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีบเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีบที่ $Q_n = 152.10$ W และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 20°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	20.95	20.93	20.88	20.93	20.83	20.95	20.95
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	27.97	27.75	27.21	27.15	26.73	26.62	26.31
อุณหภูมิผิวฐานครีบทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	43.81	43.78	43.47	43.36	43.08	42.88	43.11
อุณหภูมิผิวฐานครีบทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	37.93	37.84	37.34	37.17	36.89	36.70	37.75
อุณหภูมิถังน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	20.04	20.02	20.05	20.01	20.02	20.02	20.02
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	0.54	0.56	0.58	0.60	0.62	0.64	0.66

ตาราง 48 แสดงอุณหภูมิน้ำที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตก
คร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_{in} = 138.75 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 22°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิน้ำทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	22.76	22.83	22.78	22.75	22.70	22.74	22.69
อุณหภูมิน้ำทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	29.14	28.75	28.43	28.19	27.93	27.62	27.45
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	42.05	42.87	42.80	43.42	43.60	43.36	43.13
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	34.47	34.39	34.26	34.51	34.30	33.88	33.86
อุณหภูมิถึงน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	21.89	22.06	22.02	22.03	22.02	22.03	22.00
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	0.44	0.46	0.48	0.50	0.52	0.54	0.56

ตาราง 49 แสดงอุณหภูมิน้ำที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตก
คร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_{in} = 144.40 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 22°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิน้ำทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	22.93	22.84	22.83	22.86	22.83	22.76	22.76
อุณหภูมิน้ำทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	29.75	29.42	28.92	28.61	28.35	28.04	27.83
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	45.59	45.17	44.46	44.14	44.01	43.89	43.51
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	37.73	37.06	36.70	36.53	36.38	36.29	36.39
อุณหภูมิถึงน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	22.05	22.02	22.04	22.05	22.05	22.03	21.99
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	0.50	0.52	0.54	0.56	0.58	0.60	0.63

ตาราง 50 แสดงอุณหภูมิน้ำที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตก
คร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_{in} = 152.10 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 22°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิน้ำทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	22.82	22.85	22.83	22.77	22.80	22.74	22.72
อุณหภูมิน้ำทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	29.85	29.62	29.18	28.72	28.55	28.31	28.05
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	46.07	45.48	44.97	45.12	45.35	45.33	45.11
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	39.94	39.75	40.08	39.68	39.33	39.13	38.90
อุณหภูมิถึงน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	22.00	22.01	22.04	22.01	22.03	22.03	22.04
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	0.54	0.56	0.58	0.60	0.62	0.64	0.66

ตาราง 51 แสดงอุณหภูมิที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตก
คร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 138.75 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 24°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	24.71	24.72	24.69	24.67	24.69	24.61	24.65
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	31.20	31.10	30.68	30.40	30.06	29.74	29.53
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	42.91	42.82	43.16	43.35	43.22	43.54	43.53
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	36.67	36.62	36.25	36.08	35.58	35.61	35.41
อุณหภูมิถังน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	24.04	24.01	24.02	24.00	24.04	24.01	24.05
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	0.44	0.46	0.48	0.50	0.52	0.54	0.56

ตาราง 52 แสดงอุณหภูมิที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตก
คร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 144.40 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 24°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	24.72	24.75	24.67	24.67	24.70	24.69	24.64
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	31.48	30.86	30.52	30.19	30.23	29.91	29.72
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	45.94	45.74	45.42	44.74	45.83	45.78	45.82
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	38.44	37.99	37.96	37.75	38.30	38.15	37.83
อุณหภูมิถังน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	24.01	24.04	24.01	24.03	24.00	24.04	24.02
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	0.50	0.52	0.54	0.56	0.58	0.60	0.63

ตาราง 53 แสดงอุณหภูมิที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตก
คร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 152.10 \text{ W}$ และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 24°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	24.78	24.79	24.72	24.74	24.73	24.67	24.73
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	31.91	31.35	30.95	30.62	30.44	30.20	30.04
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	48.62	49.40	49.39	49.23	49.07	48.83	48.84
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	41.45	42.09	41.87	41.47	41.26	41.02	40.92
อุณหภูมิถังน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	24.04	24.02	24.04	24.00	23.99	24.00	24.03
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	0.54	0.56	0.58	0.60	0.62	0.64	0.66

ตาราง 54 แสดงอุณหภูมิของของไหลนาโนไททาเนียมที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 209.50$ W และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 20°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	21.07	20.89	20.77	20.75	20.83	20.71	20.57
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	31.27	30.43	29.64	29.42	29.00	28.37	27.92
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	35.58	35.10	34.77	34.70	34.91	34.46	34.03
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	40.55	40.99	39.28	39.11	39.30	37.64	38.11
อุณหภูมิถึงน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	20.03	20.05	20.02	20.03	20.08	20.04	20.03
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	0.08	0.16	0.18	0.22	0.24	0.26	0.28

ตาราง 55 แสดงอุณหภูมิของของไหลนาโนไททาเนียมที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 218.50$ W และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 20°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	21.04	21.04	20.96	20.90	21.05	20.56	20.89
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	32.09	31.23	30.41	29.74	29.51	28.75	28.56
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	37.55	37.25	36.93	36.70	36.63	36.09	36.34
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	42.93	42.60	41.57	41.00	40.65	40.28	40.02
อุณหภูมิถึงน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	20.03	20.05	20.04	20.00	20.05	20.04	20.05
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	0.12	0.16	0.18	0.22	0.24	0.26	0.28

ตาราง 56 แสดงอุณหภูมิของของไหลนาโนไททาเนียมที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 227.95$ W และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 20°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	20.93	20.89	20.78	20.79	20.94	20.87	20.88
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	31.72	31.12	30.22	29.96	29.43	29.02	28.78
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	36.91	36.69	36.29	36.27	36.17	35.98	35.99
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	43.55	42.42	41.72	41.81	41.39	41.29	40.71
อุณหภูมิถึงน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	20.05	20.07	20.01	20.02	20.03	20.02	20.03
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	0.12	0.16	0.18	0.22	0.24	0.26	0.28

ตาราง 57 แสดงอุณหภูมิของของไหลนาโนไททาเนียมที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 209.50$ W และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 22°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	22.62	22.64	22.69	22.57	22.66	22.60	22.71
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	32.26	31.66	31.60	30.92	30.87	30.44	30.07
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	36.99	36.85	36.94	36.84	36.86	36.70	36.61
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	42.58	42.23	42.10	41.66	41.60	41.67	40.75
อุณหภูมิถึงน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	22.05	22.03	22.03	22.03	22.06	22.08	22.05
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	0.08	0.16	0.18	0.22	0.24	0.26	0.28

ตาราง 58 แสดงอุณหภูมิของของไหลนาโนไททาเนียมที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 218.50$ W และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 22°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	22.71	22.87	22.80	22.93	22.62	22.63	22.51
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	32.82	32.32	31.65	31.38	30.73	30.38	29.90
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	37.37	37.38	36.98	36.97	36.60	36.51	36.32
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	42.84	43.06	42.11	41.84	41.34	41.02	40.89
อุณหภูมิถึงน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	22.02	22.03	22.05	22.04	22.03	22.05	22.01
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	0.12	0.16	0.18	0.22	0.24	0.26	0.28

ตาราง 59 แสดงอุณหภูมิของของไหลนาโนไททาเนียมที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 227.95$ W และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 22°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	22.68	22.71	22.81	22.64	22.76	22.88	22.71
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	33.32	32.66	32.32	31.46	31.52	31.28	30.68
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	39.07	38.85	38.81	38.37	37.77	37.79	37.51
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	44.20	43.34	43.06	42.40	43.22	43.09	42.20
อุณหภูมิถึงน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	22.05	22.00	22.07	22.01	22.03	22.05	22.02
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	0.12	0.16	0.18	0.22	0.24	0.26	0.28

ตาราง 60 แสดงอุณหภูมิของของไหลนาโนไททาเนียมที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 209.50$ W และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 24°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	24.62	24.67	24.64	24.54	24.60	24.50	24.58
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	34.26	34.01	33.31	32.56	32.48	31.98	31.85
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	39.41	39.41	39.11	38.77	38.66	38.62	38.47
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	44.45	44.46	43.92	43.44	42.67	42.51	42.04
อุณหภูมิดังน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	24.03	24.07	24.04	24.04	24.00	24.04	24.02
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	0.08	0.16	0.18	0.22	0.24	0.26	0.28

ตาราง 61 แสดงอุณหภูมิของของไหลนาโนไททาเนียมที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 218.50$ W และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 24°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	24.66	24.81	24.66	24.77	24.78	24.76	24.78
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	34.74	34.55	33.72	33.57	33.10	32.88	32.50
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	39.81	39.87	39.53	39.66	39.44	39.40	39.17
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	45.62	45.27	44.68	44.66	44.09	43.80	43.31
อุณหภูมิดังน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	24.08	24.04	24.03	24.05	24.04	24.04	24.05
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	0.12	0.16	0.18	0.22	0.24	0.26	0.28

ตาราง 62 แสดงอุณหภูมิของของไหลนาโนไททาเนียมที่บริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิฐานครีปเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีปที่ $Q_n = 227.95$ W และอุณหภูมิทางเข้าควบคุมที่ 24°C

รายละเอียด	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย 3 ครั้ง						
อัตราการไหล	Q	LPH	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00
อุณหภูมิทางเข้า	T_{in}	$^\circ\text{C}$	24.80	24.74	24.66	24.74	24.67	24.65	24.59
อุณหภูมิทางออก	T_{out}	$^\circ\text{C}$	35.33	34.51	33.88	33.50	33.09	32.78	32.36
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางเข้า	$T_{b, in}$	$^\circ\text{C}$	40.72	40.37	40.08	39.96	39.91	39.71	39.51
อุณหภูมิผิวฐานครีปทางออก	$T_{b, out}$	$^\circ\text{C}$	46.47	45.82	45.39	44.69	44.46	44.92	44.55
อุณหภูมิดังน้ำควบคุม	T_{tank}	$^\circ\text{C}$	24.04	24.02	24.03	24.00	24.06	24.06	24.05
ความดันตกคร่อม	Δp	kPa	0.12	0.16	0.18	0.22	0.24	0.26	0.28

ภาคผนวก ข
ตัวอย่างการคำนวณ



ตัวอย่างการคำนวณ

เมื่อทำการทดลองและเก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณมาเรียบร้อยแล้ว ขั้นต่อไป คือการคำนวณหาตัวแปรที่ต้องการโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริง โดยมีขั้นตอนต่างๆดังต่อไปนี้

ข้อมูลเบื้องต้นและข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่ใช้ในการคำนวณมีดังนี้

- ขนาดของชุดครีบระบายความร้อน ความกว้าง 60.0 มิลลิเมตร ความยาว 110.0 มิลลิเมตร ฐานครีบหนา 2.0 มิลลิเมตร และความสูงของครีบบี 3 ขนาดคือ ขนาดความสูง 1.0 มิลลิเมตร 1.5 มิลลิเมตร และ 2.0 มิลลิเมตร
- ขนาดของครีบระบายความร้อน ความกว้างของช่องไหล 0.8 มิลลิเมตร ความกว้างของครีบ 1.8 มิลลิเมตร ความสูงของครีบ 1.0 มิลลิเมตร ความหนา 0.4 มิลลิเมตร
- ที่อัตราการไหล 22.00 ลิตรต่อชั่วโมง
- อ้างอิงข้อมูลการคำนวณจากตารางแสดงผลการคำนวณในภาคผนวก ก ตาราง 18 แสดงอุณหภูมิของไหลนาโนไททาเนียมบริเวณทางเข้า และทางออกเฉลี่ย ฐานครีบเฉลี่ย และความดันตกคร่อมเฉลี่ยของครีบแบบเรียงแถวที่ $Q_h = 97.65 \text{ W}$ และอุณหภูมิถึงควบคุมที่ 20.00°C ขนาดความสูงครีบ 1.0 มิลลิเมตร
- พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของครีบแบบเรียงแถว $= 0.0158 \text{ m}^2$

1. การคำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางของไหลที่เกิดจากการไหลผ่าน (Hydraulic diameter)

$$D_h = \frac{4 \times \text{Cross sectional area for liquid flow}}{\text{Wetted perimeter}} = \frac{4ab}{2(a+b)} \times N_c \quad (1)$$

$$= \frac{4 \times 0.0008 \times 0.001}{2(0.0008 + 0.001)} \times 49$$

$$D_h = 0.000889 \text{ m}$$

D_h คือ Hydraulic diameter, m

a คือความกว้างของช่องครีบระบายความร้อน, m

b คือความสูงของครีบระบายความร้อน, m

2. การคำนวณหาอุณหภูมิเฉลี่ย

2.1 อุณหภูมิของของไหลนาโนเฉลี่ย

$$\begin{aligned}
 T_{ave} &= \left(\frac{T_{out} + T_{in}}{2} \right) \\
 &= \frac{21.03 + 25.01}{2} \\
 T_{ave} &= 23.02 \text{ } ^\circ C
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

2.2 อุณหภูมิของผิวฮีทเตอร์เฉลี่ย

$$\begin{aligned}
 \bar{T}_{ht} &= \left(\frac{T_{ht,in} + T_{ht,out}}{2} \right) \\
 &= \frac{37.98 + 37.70}{2} \\
 \bar{T}_{ht} &= 37.84 \text{ } ^\circ C
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

2.3 อุณหภูมิของผิวฐานครีปเฉลี่ย

$$\begin{aligned}
 \bar{T}_b &= \bar{T}_{ht} - \left(\frac{q_x L}{k_{Al}} \right) \\
 &= 37.84 - \left(\frac{14,759.45 \times 0.002}{165.00} \right) \\
 \bar{T}_b &= 37.66 \text{ } ^\circ C
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

2.4 อุณหภูมิเฉลี่ยของผิวครีป

$$\begin{aligned}
 \bar{T}_s &= \bar{T}_b = \bar{T}_{ht} - \left(\frac{q_x L}{k_{Al}} \right) \\
 &= 37.84 - \left(\frac{14,759.45 \times 0.002}{165.00} \right) \\
 T_s &= 37.66 \text{ } ^\circ C
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

3. การคำนวณหาคุณสมบัติของของไหลนาโน

คุณสมบัติของของไหลนาโนเฉลี่ยที่อุณหภูมิเฉลี่ย 23.02°C คือ

3.1 การคำนวณหาคุณสมบัติของความหนาแน่น

ความหนาแน่นของของไหลนาโนสามารถคำนวณได้จากสมการของ ดวงทองสุข และคณะ (2009) ดังนี้

$$\begin{aligned}\rho_{nf} &= \phi\rho_p + (1 - \phi)\rho_w \\ \rho_{nf} &= 0.004 \times 4170.00 + (1 - 0.004) \times 997.54 \\ \rho_{nf} &= 1,009.74 \text{ kg/m}^3\end{aligned}\tag{6}$$

โดยที่ ρ_{nf} คือ ความหนาแน่นของของไหลนาโน, $1,009.74 \text{ kg/m}^3$
 ρ_p คือ ความหนาแน่นของอนุภาคนาโน, $4,170.00 \text{ kg/m}^3$
 ρ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำ, 997.54 kg/m^3
 ϕ คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคนาโน 0.004

3.2 การคำนวณหาคุณสมบัติของค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่

ความหนาแน่นของของไหลนาโนสามารถคำนวณได้จากสมการของ ดวงทองสุข และคณะ (2009) ดังนี้

$$\begin{aligned}c_{p_{nf}} &= \phi c_{p_p} + (1 - \phi)c_{p_w} \\ c_{p_{nf}} &= 0.004 \times 709.93 + (1 - 0.004) \times 4,182.2 \\ c_{p_{nf}} &= 4,168.82 \text{ J/kg }^{\circ}\text{C}\end{aligned}\tag{7}$$

โดยที่ $c_{p_{nf}}$ คือ ความร้อนจำเพาะของของไหลนาโน, $4,168.82 \text{ J/kg }^{\circ}\text{C}$
 c_{p_p} คือ ความร้อนจำเพาะของอนุภาคนาโน, $709.93 \text{ J/kg }^{\circ}\text{C}$
 $c_{p_p} = 0.9821 \times T(^{\circ}\text{C}) + 681.29 \text{ J/kg }^{\circ}\text{C}$
 c_{p_w} คือ ความร้อนจำเพาะของน้ำ, $4182.2 \text{ J/kg }^{\circ}\text{C}$
 ϕ คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคนาโน 0.004

3.3 การคำนวณหาคุณสมบัติของค่าความหนืดสัมบูรณ์

ค่าความหนืดสัมบูรณ์ ดวงทองสุข และคณะ (2009) แนะนำให้ใช้สมการของ อินเสดีย์ร์น สำหรับของไหลนาโนที่มีสัดส่วนอนุภาคนาโนไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ค่าที่ได้จะมีความแม่นยำมาก

$$\mu_{nf} = (1 + 2.5\phi)\mu_w \quad (8)$$

$$\mu_{nf} = (1 + (2.5 \times 0.004)) \times 0.0093173$$

$$\mu_{nf} = 0.0009407$$

โดยที่ μ_{nf} คือ ค่าความหนืดสัมบูรณ์ของของไหลนาโน, 0.0009407 kg/m.s

μ_w คือ ค่าความหนืดสัมบูรณ์ของของน้ำ, 0.00093173 kg/m.s

ϕ คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคนาโน 0.004

3.4 การคำนวณหาคุณสมบัติของค่าการนำความร้อน

ค่าการนำความร้อนสมการที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางสำหรับการคำนวณหาค่าการนำความร้อนของไหลผสมระหว่างอนุภาคของแข็งกับของเหลว ดวงทองสุข และคณะ (2009) แนะนำให้ใช้สมการดังนี้

$$k_{nf} = \left[\frac{k_p + 2k_w - 2\phi(k_w - k_p)}{k_p + 2k_w + \phi(k_w - k_p)} \right] k_w \quad (9)$$

$$k_{nf} = \left[\frac{0.60867286 + (2 \times 0.60378) - (2 \times 0.004)(0.60378 - 0.60867286)}{0.60867286 + (2 \times 0.60378) + 0.004(0.60378 - 0.60867286)} \right] 0.60378$$

$$k_{nf} = 0.6037988 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$$

โดยที่ k_{nf} คือ ค่าการนำความร้อนของของไหลนาโน, 0.6037988 W/m $^\circ\text{C}$

k_p คือ ค่าการนำความร้อนของของอนุภาคนาโน, 0.60867286 W/m $^\circ\text{C}$

$$k_p = 0.5582 \times T^{0.0276} \text{ W/m } ^\circ\text{C}$$

k_w คือ ค่าการนำความร้อนของน้ำ, 0.60378 W/m $^\circ\text{C}$

ϕ คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคนาโน 0.004

4. การคำนวณหา ตัวเลขเรย์โนลด์

$$Re = \frac{\rho u_m D_h}{\mu} \quad (10)$$

(ในกรณีที่ความเร็วของของไหลนาโน 0.1559 m/s ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 23.02 °C)

$$= \frac{1009.74 \times 0.1559 \times 0.000889}{0.0009407}$$

$$Re = 148.75$$

Re คือค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds Number)

u_m คือความเร็วของของไหลนาโน, m/s

μ คือความหนืดสัมบูรณ์, kg/m-s

4.1 การคำนวณหาอัตราความเร็วการไหลของน้ำ

$$u_m = \frac{Q}{A_c} \quad (11)$$

$$= \frac{0.0000061}{0.0000392}$$

$$= 0.1559 \quad \text{m/s}$$

Q คืออัตราการไหลของของไหลนาโน, m³/s

ρ คือความหนาแน่นของอากาศขาเข้า, kg/m³

A_c คือพื้นที่หน้าตัดของช่องไหลรวม, m²

5. การคำนวณหาพื้นที่

5.1 การคำนวณหาพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อนของครีป

$$A_s = A_p + A_f \quad (12)$$

A_s คือพื้นที่ถ่ายเทความร้อนโดยรวม, m²

A_p คือพื้นที่ผิวที่ฐานที่สัมผัสกับของไหล, m

A_f คือพื้นที่ผิวทั้งหมดของครีป, m²

$$A_p = (W \times L) - (w \times t \times N_t) \quad (13)$$

$$A_f = ((2w) + (2t)) \times H \times N_t \quad (14)$$

H คือความสูงของครีป, m

w คือความกว้างของครีป, m

t คือความหนาของครีป, m

W คือความกว้างของชุดครีป, m

L คือความยาวของชุดครีป, m

N_t คือจำนวนครีป

$$A_p = (0.06 \times 0.11) - (0.0018 \times 0.0004 \times 2500) = 0.0048 m^2$$

$$A_f = ((2 \times 0.0018) + (2 \times 0.0004)) \times 0.001 \times 2500 = 0.011 m^2$$

$$A_s = 0.0048 + 0.011 = 0.0158 m^2$$

5.1 การคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดรวมของช่องไหล

$$A_c = W \times H \times N_c \quad (15)$$

$$A_c = 0.0008 \times 0.001 \times 49$$

$$A_c = 0.0000392 \text{ m}^2$$

A_c คือพื้นที่หน้าตัดรวมของช่องไหล, m^2

W คือความกว้างของช่องไหล, m

H คือความสูงของครีป, m

N_c คือจำนวนของช่องไหล

6. การคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อน

$$Q_{nf} = \dot{m}_{nf} \times c_{p_{nf}} \times (T_{in} - T_{out})_{nf} \quad (16)$$

$$Q_{nf} = 0.006271 \times 4,168.82 \times (25.01 - 21.03)$$

$$Q_{nf} = 102.21 \text{ W}$$

โดยที่ Q_{nf} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโน, W

$\dot{m}_{nf}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลนาโน, kg/s

$c_{p_{nf}}$ คือ ค่าความร้อนจำเพาะของของไหลนาโน, J/kg K

$T_{in,nf}$ คือ อุณหภูมิเข้าของของไหลนาโน, °C

$T_{out,nf}$ คือ อุณหภูมิออกของของไหลนาโน, °C

7. การคำนวณหาอัตราความร้อน (Heat flux) ในการคำนวณ

$$Q_{conv} = \frac{Q_{elec} + Q_{nf}}{2} \quad (17)$$

$$= \frac{97.65 + 102.21}{2}$$

$$= 99.93 \text{ W}$$

8. การคำนวณหาสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อน

$$Q_{Aver} = \bar{h} A_s \Delta T_{lm} \quad (18)$$

$$\bar{h} = \frac{Q_{Aver}}{A_s (\Delta T_{lm})}$$

$$= \frac{99.93}{0.0158 \times 14.55}$$

$$= 434.68 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$\bar{h}$ คือ สัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนของครีปเฉลี่ย, $\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

A_s คือ พื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อน, m^2

ΔT_{lm} คือ ความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยของผิวครีปและของไหลในรูปล็อก (LMTD), $^\circ\text{C}$

9. การคำนวณหาค่านัสเซลท์นัมเบอร์เฉลี่ย (Nusselt number)

$$\begin{aligned}\bar{Nu} &= \frac{\bar{h} D_h}{k} \\ &= \frac{434.68 \times 0.000889}{0.6037988} \\ \bar{Nu} &= 0.640\end{aligned}\tag{19}$$

Nu คือนัสเซลท์นัมเบอร์ (Nusselt number)

D_h คือ Hydraulic diameter, m

k คือค่าการนำความร้อนของของไหล, W/m.°C

10. การคำนวณหาความต้านทานการถ่ายเทความร้อน (Thermal Resistance)

$$\begin{aligned}R_{th} &= \frac{1}{h \times A_s} \\ &= \frac{1}{434.68 \times 0.0158} \\ R_{th} &= 0.146 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}\end{aligned}\tag{20}$$

R_{th} คือความต้านทานการถ่ายเทความร้อน, °C /W

h คือสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อน, W/m² °C

A_s คือพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อน, m²



อภิธานศัพท์

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

A	=	พื้นที่, m^2
A_c	=	พื้นที่หน้าตัด, m^2
A_s	=	พื้นที่ผิว, m^2
C_f	=	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
c_p	=	ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่, $J/kg.K$
c_v	=	ความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่, $J/kg.K$
D	=	เส้นผ่าศูนย์กลาง, m .
D_h	=	เส้นผ่าศูนย์กลางของไฮดรอลิก, m .
E	=	พลังงานศักย์ไฟฟ้า, V
f	=	สัมประสิทธิ์ของความเสียดทาน
g	=	ความเร่งอันเนื่องมาจากแรงดึงดูดของโลก, m/s^2
h	=	สัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนโดยการพา, $W/m^2.^{\circ}C$
$\bar{h}$	=	สัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนโดยการพาเฉลี่ย, $W/m^2.^{\circ}C$
k	=	สภาพนำความร้อน, $W/m.K$
L	=	ค่าคุณลักษณะความยาว (Characteristic length)
L_1	=	ความยาวครีป, $m.m$.
L_2	=	ความยาวผิวฐานครีปด้านที่ของไหลไม่ไหลผ่าน, $m.m$.
L_3	=	ความยาวผิวฐานครีปด้านที่ของไหลไหลผ่าน, $m.m$.
$\dot{m}$	=	อัตราการไหลของมวลของของไหล, kg/s
Nu	=	ค่านัสเซิลท์นัมเบอร์ (Nusselt number)
N_r	=	จำนวนครีปทั้งหมด
P	=	เส้นรอบรูป, m
p	=	ค่าความดัน, kPa
Pr	=	ตัวเลขพรานด์เติล (Prandtl number)
Q	=	อัตราการถ่ายเทความร้อน, W

q''	=	ฟลักซ์ความร้อน, W/m^2
$\dot{q}$	=	อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยปริมาตร, W/m^3
R	=	รัศมี, m.
r_o	=	รัศมีทรงกระบอก, m.
R_{th}	=	ความต้านทานความร้อน, $^{\circ}C/W$
Re	=	ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Raynolds number)
T	=	อุณหภูมิ, $^{\circ}C$
V	=	ปริมาตรการแลกเปลี่ยนความร้อน, $m.m.^3$
$\dot{V}$	=	ปริมาตรอัตราการไหลของของไหล, $m.m.^3/s$
W	=	ความกว้าง, m.m.
X_c	=	ระยะห่างของครีปที่ของไหลไหลผ่าน, m.m.
$X_{fd,h}$	=	ความยาวทางอุทกพลวัต, m
$X_{fd,i}$	=	ความยาวทางเข้าของความร้อน, m

สัญลักษณ์ภาษากรีก

u_m	=	ความเร็วเฉลี่ย, m/s
ν	=	ความหนืดจลน์ศาสตร์, m^2/s
μ	=	ความหนืดพลศาสตร์, kg/ms
ρ	=	ความหนาแน่น, kg/m^3
ε	=	การกระจายของพลังงานที่เกิดขึ้น
Δ	=	ค่าการเปลี่ยนแปลง
η	=	ประสิทธิภาพ
∞	=	ตัวแปรการไหลของของไหล
β	=	สัมประสิทธิ์การขยายตัว
α	=	ค่าการแผ่กระจายความร้อน, m^2/s
τ	=	ความเค้นแรงเฉือน (Shear stress) N/m^2

ตัวกำกับล่าง

<i>aev</i>	=	ค่าเฉลี่ย
<i>b</i>	=	ฐานครีป
<i>cond</i>	=	การนำความร้อน
<i>conv</i>	=	การพาความร้อน
<i>elec</i>	=	ไฟฟ้า
<i>f</i>	=	ในส่วนของผิวของครีป
<i>fd</i>	=	เงื่อนไขพัฒนาเต็มรูป
<i>in</i>	=	ทางเข้า
<i>m</i>	=	ค่าเฉลี่ย
<i>nf</i>	=	ของไหลนาโน
<i>out</i>	=	ทางออก
<i>p</i>	=	ในส่วนบริเวณฐานครีป, อนุภาคของวัตถุ
<i>t</i>	=	ค่าโดยรวม
<i>tank</i>	=	ถังหล่อเย็น
<i>w</i>	=	ผิวครีป, ผนัง, น้ำ
<i>w</i>	=	น้ำ



ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นายเลอศักดิ์ นาครินทร์
วันเดือนปีเกิด	28 กันยายน 2509
สถานที่เกิด	อ.ไพรบึง จ.ศรีสะเกษ
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	47/1 หมู่ 7 ต. บางไผ่ อ. เมืองฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา 24000
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	ผู้จัดการแผนกตรวจสอบความปลอดภัยกระบวนการผลิต
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	บริษัท ปตท. เคมิคอล จำกัด (มหาชน)

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2523	ประถมศึกษา จาก โรงเรียนชุมชนบ้านไพรบึง
พ.ศ. 2526	มัธยมศึกษาตอนต้น จาก โรงเรียนไพรบึงวิทยาคม
พ.ศ. 2529	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นต้น (สาขาวิชาช่างยนต์) จาก วิทยาลัยเทคนิคศรีสะเกษ
พ.ศ. 2531	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (สาขาวิชาช่างเทคนิคยานยนต์) จาก วิทยาลัยเทคนิคอุบลราชธานี
พ.ศ. 2537	อุดมศึกษา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เทคโนโลยีการผลิต) จาก วิทยาลัยครูฉะเชิงเทรา ประเทศไทย
พ.ศ. 2546	ประกาศนียบัตรทักษะวิศวกรรมเคมีแบบบูรณาการ จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี ประเทศไทย
พ.ศ. 2547	อุดมศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประเทศไทย
พ.ศ. 2549	ประกาศนียบัตรวิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประเทศไทย
พ.ศ. 2552	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ