

การศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการไหลของการฉีดกระทบ
ของของไหลนาโนในกรณีระบายความร้อนที่มีช่องการไหลขนาดเล็กจิ๋ว



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
กรกฎาคม 2561

การศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการไหลของการฉีดกระทบ
ของของไหลนาโนในครีบบระบายความร้อนที่มีช่องการไหลขนาดเล็กจิ๋ว



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

กรกฎาคม 2561

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการไหลของการฉีดกระทบ
ของของไหลนาโนในกรณีระบายความร้อนที่มีช่องการไหลขนาดเล็กจิ๋ว



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
กรกฎาคม 2561

เลอศักดิ์ นาครินทร์. (2561). การศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อน และการไหลของการฉีด
กระทบของของไหลนาโนในครีประบายความร้อนที่มีช่องการไหลขนาดเล็กจิ๋ว. ปรินญา
นิพนธ์ ปร.ด. (วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนคริน
ทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม: รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล นาผล.

ปรินญาณินพนธ์นี้เป็นการศึกษาทั้งในเชิงวิธีการทดลอง และระเบียบวิธีเชิงตัวเลขถึง
คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อน และพลศาสตร์ของของไหล โดยสารทำงานการฉีดกระทบผ่านครี
ประบายความร้อนที่มีช่องการไหลขนาดเล็กจิ๋ว การสร้างชุดอุปกรณ์การทดลองซึ่งประกอบไปด้วยชุด
อุปกรณ์การทดลองในกรณีใช้น้ำ และของไหลนาโนไททาเนียมเป็นสารทำงาน โดยชุดทดลองใน
กรณีใช้น้ำ และของไหลนาโนไททาเนียมจะออกแบบให้มีลักษณะการไหลแบบฉีดกระทบที่ฐานของ
ครี และไหลผ่านช่องการไหลระหว่างครีประบายความร้อน ตัวแปรที่ศึกษาประกอบไปด้วย ความ
เข้มข้นของอนุภาคนาโน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับพื้นผิวฉีดที่
กระทบ อัตราการไหลของของไหลนาโน และพลังงานความร้อน ที่ป้อนให้กับครีประบายความร้อน
ซึ่งส่งผลต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของครีประบายความร้อนที่ติดตั้งช่องการไหลขนาดเล็ก
และเล็กจิ๋ว และมีขนาด กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ $50 \times 50 \times 5$ มิลลิเมตร และ $31 \times 31 \times 1.2$
มิลลิเมตร, และมีขนาด กว้าง x ยาว x สูง ของครีเท่ากับ $0.4 \times 0.4 \times 2$ มิลลิเมตร และ $0.2 \times 0.2 \times$
 0.2 มิลลิเมตร ตามลำดับ อนุภาคนาโนที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่ นาโนไททาเนียมซึ่งมีขนาด
ของอนุภาคเท่ากับ 50 นาโนเมตร ตัวแปรและช่วงที่พิจารณาของอัตราส่วนของระยะห่างของหัวฉีด
กับพื้นผิวที่ฉีดกระทบ H/D มีค่าเท่ากับ 0.8-4.0 มิลลิเมตร ที่ความเข้มข้นของของไหลนาโนเท่ากับ
0.005-0.015 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรและอัตราการไหลเชิงมวลเท่ากับ 8-12 กรัมต่อวินาที

จากการศึกษาผลที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการศึกษาด้วยระเบียบวิธี
เชิงตัวเลขพบว่าทั้งสองระเบียบวิธีให้ผลที่มีความสอดคล้องกัน ผลที่ได้จากการศึกษาประสิทธิภาพ
การถ่ายเทความร้อนของของไหลทั้งสองชนิดได้แก่ น้ำ และของไหลนาโน พบว่าอัตราการถ่ายเท
ความร้อนของของไหลนาโนมีค่าสูงกว่าน้ำ ที่ความเข้มข้นของของไหลนาโนสูงสุด 0.015 เปอร์เซ็นต์
สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้สูงกว่าน้ำเท่ากับ 18.56 เปอร์เซ็นต์ จากการศึกษา
ยังพบว่าขนาดของหัวฉีด และระยะห่างของตำแหน่งหัวฉีดกับพื้นผิวที่ฉีดกระทบก็ยังส่งผลต่อ
เลขนัสเซิลต์ ได้เช่นกัน โดยที่หัวฉีดที่มีขนาดใหญ่กว่า และระยะห่างของตำแหน่งของหัวฉีดน้อย
กว่าจะทำให้ เลขนัสเซิลต์ มีค่ามากกว่าหัวฉีดที่มีขนาดเล็กกว่า และระยะห่างของตำแหน่งของหัวฉีด
มากกว่า แต่อย่างไรก็ตามหัวฉีดที่มีขนาดเล็กกว่า และระยะห่างของตำแหน่งของหัวฉีดมากกว่า
ส่งผลให้แรงดันตกคร่อมมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย เมื่อเพิ่มขนาดความร้อน และอัตราการไหลของของ
ไหลหล่อเย็นให้กับครีประบายความร้อนพบว่า เลขนัสเซิลต์ มีค่าเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าผลของค่าตัว
แปรที่ได้จากการศึกษาในงานวิจัยนี้มีความสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน และ
สามารถนำไปเป็นแนวทางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ใน
อนาคต

STUDY OF THE JET IMPINGEMENT HEAT TRANSFER AND FLOW CHARACTERISTICS
OF TITANIUM NANOFLUIDS IN MICROCHANNEL HEAT SINKS



Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Doctor of Philosophy Program in Mechanical Engineering
at Srinakharinwirot University

July 2018

Lursukd Nakharintr. (2018). *Study of the Jet Impingement Heat Transfer and Flow Characteristics of Titanium Nanofluids in Microchannel Heat Sinks*. Thesis, Ph.D. (Mechanical Engineering). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Assoc. Prof. Dr. Paisarn Naphon.

The objective of this research is to study the jet impingement heat transfer and flow characteristics of titanium nanofluids in the mini- and micro-channel heat sinks experimentally and numerically. In the present study, the effects of the relevant parameters of nanofluid concentration, nozzle diameter, nozzle-to-heat sink distances, mass flow rate of nanofluids. The mini-and micro-channel heat sinks were fabricated from copper block with a width, length, and height of 50 x 50 x 5 mm and 31 x 31 x 1.2 mm, and the length, width, and the height of the fins were 0.4 x 0.4 x 2 mm. and 0.2 x 0.2 x 0.2 mm, respectively. The nanofluids studied were a mixture of de-ionized water and nanoscale TiO_2 particles of 50 nm. The jet-plate spacing to jet diameter ratios, nanofluid concentration and mass flow rate were in the range of $H/D = 0.8\text{--}4.0$, 0.005–0.015 % by volume, 8–12 g/s, respectively. In the numerical model, the Eulerian two-phase turbulent flow model of different kinds of coupling between phases were applied to analyze heat transfer and the flow characteristics of the problem under transient conditions.

The results obtained from the Eulerian two-phase approach model were verified by the experimental data. There was a reasonable level of agreement between predicted results and measured data. The results obtained from the nanofluids cooling in mini-and micro-channel heat sinks were compared with those from the de-ionized water cooling method. It was found that average heat transfer rates for nanofluids as coolant were higher than those for de-ionized water as a coolant. The suspension of nanoparticles in the base fluid remarkably increased convective heat transfer by 18.56 % at a 0.015 % of nanofluid concentration. In addition, the Nusselt number tended to increase the nozzle diameter and decreasing nozzle level height. While the pressure drop across the test section increase as the nozzle diameter decreased and the nozzle level height also increased. However, the suspension of nanoparticles brought almost no extra addition to the pressure drop to compare with the base fluid. Moreover, the Nusselt number increased as the heat input increased. For a given mass flow rate, it was concluded that the Nusselt number significantly increased with an increase in mass flow rate of water and nanofluids. According to the obtained results, an emphasis was placed on the proper selection of the relevant parameters to enhance of heat transfer were also important.

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อน และการไหลของการฉีดกระทบ
ของของไหลนาโนในกรณีระบายความร้อนที่มีช่องการไหลขนาดเล็กจิ๋ว

ของ

เลอศักดิ์ นาครินทร์

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายแพทย์จัตตชัย เอกปัญญาสกุล)
วันที่ เดือน พ.ศ. 2561

คณะกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ คณะกรรมการสอบปากเปล่า

..... ประธาน ประธาน
(รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล นามผล) (รองศาสตราจารย์ ดร.สมิทธิ์ เอี่ยมสะอาด)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล นามผล)

..... กรรมการ
(พันเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยวานิชกุล)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.สงกรานต์ วิริยะศาสตร์)

ประกาศคุณูปการ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล นาผล ประธานกรรมการควบคุมการทำปริญญานิพนธ์ที่ให้โอกาสในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ แนะนำพร้อมให้ความรู้จนสำเร็จ รองศาสตราจารย์ ดร. สมิทธิ์ เอี่ยมสะอาด ประธานคณะกรรมการสอบปากเปล่าผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกมหาวิทยาลัย จากสาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร พันเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง กรรมการสอบปากเปล่าผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกมหาวิทยาลัย จากกองวิชาวิศวกรรมเครื่องกล โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประชา บุญยวานิชกุล และ อาจารย์ ดร. สงกรานต์ วิริยะศาสตร์ กรรมการสอบปากเปล่าที่กรุณาให้คำปรึกษาให้แนวคิดในการวิเคราะห์ และช่วยแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น ในการสอบปากเปล่า และการทำปริญญานิพนธ์จนสมบูรณ์

ท้ายสุดผู้วิจัยขอขอบพระคุณ พ่อ แม่ ที่ได้อบรมสั่งสอนรวมทั้งครอบครัวผู้วิจัย ที่ให้กำลังใจที่ดีตลอดมา และขอขอบคุณ คุณสุริยา ดับโศก และพนักงานของ บริษัท เอ็มเทค แมชชีน แอนด์ เอ็นจิเนียริง เซอร์วิส จำกัด ที่ให้การสนับสนุนทั้งกำลังกาย และสละเวลาในการจัดทำครีบบรรยายความร้อนทั้งแบบ Minichannel Heat Sinks และ แบบ Microchannel Heat Sinks เพื่องานวิจัยนี้จนสำเร็จ และเพื่อน ๆ น้อง ๆ ที่ให้ความร่วมมือ และสนับสนุนเป็นอย่างดีในการทำวิจัยนี้

เลอศักดิ์ นาครินทร์

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	5
ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	5
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2 ทบทวนวรรณกรรม.....	6
บทนำ.....	6
สรุปผลการทบทวนวรรณกรรม.....	47
3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	48
บทนำ.....	48
พื้นฐานของการจัดกระทบ.....	48
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการจัดกระทบ.....	49
การวิเคราะห์ความอิสระของกริด.....	60
เงื่อนไขเริ่มต้นในการจำลอง.....	63
กระบวนการหาคำตอบ.....	64
เงื่อนไขขอบ.....	66
ขั้นตอนและลำดับการแก้สมการ.....	67
4 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	69
บทนำ.....	69
อุปกรณ์ในการทดลอง.....	70
วิธีการทดลอง.....	76
ตัวแปรที่ใช้ในการเก็บข้อมูล.....	77
คุณลักษณะทั่วไปของทองแดงแบบ JIS H 3140.....	79
การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน.....	83

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5 ผลและการวิเคราะห์ผล.....	85
บทนำ.....	85
ผลกระทบจากการทดลองของครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก.....	86
ผลกระทบจากการทดลองของครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว.....	101
ผลกระทบของแบบจำลองคณิตศาสตร์ของครีประบายความร้อนแบบ ช่องขนาดเล็ก.....	116
ผลกระทบของแบบจำลองคณิตศาสตร์ของครีประบายความร้อนแบบ ช่องขนาดเล็กจิ๋ว.....	140
6 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	164
บทนำ.....	164
ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....	165
บรรณานุกรม.....	168
ภาคผนวก.....	178
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	182

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 การจำแนกชนิดช่องการไหลแบบต่าง ๆ.....	4
2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของกริดของอุณหภูมิขาออกของครีบริบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก.....	60
3 เปรียบเทียบอุณหภูมิขาออกที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลองของครีบริบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก.....	60
4 การตรวจสอบความเป็นอิสระของกริดของอุณหภูมิขาออกของครีบริบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว.....	61
5 เปรียบเทียบอุณหภูมิขาออกที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลองของครีบริบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว.....	61
6 แสดงเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองแบบเฟสเดียว.....	63
7 แสดงเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองแบบสองเฟส.....	64
8 แสดงคุณสมบัติและขนาดต่าง ๆ ของครีบริที่ใช้ในการทดลอง.....	76
9 แสดงค่าความแม่นยำ และค่าความคาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง.....	76
10 แสดงเงื่อนไขในการทดลองของครีบริลักษณะแบบช่องการไหลขนาดเล็ก (Minichannel heat sinks).....	78
11 แสดงเงื่อนไขในการทดลองของครีบริลักษณะแบบช่องการไหลขนาดเล็กจิ๋ว (Microchannel heat sinks).....	78
12 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่สำคัญของทองแดงแบน.....	79
13 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่สำคัญของอนุภาคนาโน.....	80

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยเทคโนโลยี การหล่อเย็นชนิดต่าง ๆ.....	2
2 แสดงช่วงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องครีปที่ใช้งานปัจจุบัน.....	2
3 แสดงเทคโนโลยีการถ่ายเทความร้อนสมรรถนะสูงด้วยครีประบาย ความร้อนแบบที่มีช่องการไหลขนาดเล็กจิ๋วของ IBM.....	4
4 การกำหนดค่าทางเรขาคณิตของการฉีดกระทบ.....	48
5 แสดงแบบจำลองคณิตศาสตร์แบบเต็มของชุดทดลองครีประบายความร้อน แบบช่องขนาดเล็ก และครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว.....	49
6 แสดงจุดติดตั้งเครื่องมือวัดของชุดทดสอบ.....	56
7 แสดงครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก.....	57
8 แสดงครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว.....	58
9 แสดงแบบจำลองคณิตศาสตร์ภาคตัดตามเส้น A-A (ภาพประกอบ 5 (ก)) แบบสมมาตร ของชุดทดลองครีประบายความร้อน แบบช่องขนาดเล็ก.....	59
10 แสดงแบบจำลองคณิตศาสตร์ภาคตัดตามเส้น A-A (ภาพประกอบ 5 (ข)) แบบสมมาตร ของชุดทดลองครีประบายความร้อน แบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว.....	59
11 แสดงรูปแบบของเมชของแบบจำลองคณิตศาสตร์ภาคตัดตามเส้น A-A (ภาพประกอบ 5) แบบสมมาตร ของชุดทดลอง.....	62
12 ขั้นตอนการคำนวณ และลำดับการแก้สมการแบบจำลองคณิตศาสตร์.....	68
13 แสดงไดอะแกรมของอุปกรณ์การทดลอง.....	69
14 แสดงตำแหน่งจุดวัดอุณหภูมิและความดันของชุดทดสอบ.....	70
15 แสดงอุปกรณ์ในขณะที่ทำการทดลอง.....	72
16 แสดงการประกอบชุดครีปเข้ากับชุดทดสอบ.....	72
17 ฮีตเตอร์แท่งสำหรับให้ความร้อน.....	73
18 ชุดเครื่องมือวัดความดันตกคร่อม.....	73
19 เครื่องมือวัดกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า (Volt amp meter).....	74
20 แสดงเครื่องเก็บข้อมูล (Data logger).....	74
21 อุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC voltage regulator).....	75
22 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล (Digital weigh scale).....	75

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
23 ทองแดงแบบ JIS H3140 C1020 (CU OF– OKTM 99.99%).....	79
24 ภาพถ่ายของ Microchannel heat sinks ด้วยกล้อง จุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า.....	80
25 ของไหลนาโนไททาเนียมผสมน้ำที่ความเข้มข้น 0.005 0.010 และ 0.015 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร.....	81
26 ของไหลนาโนไททาเนียมผสมน้ำที่ความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 150,000 เท่า.....	81
27 ของไหลนาโนไททาเนียมผสมน้ำที่ความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 150,000 เท่า.....	82
28 ของไหลนาโนไททาเนียมผสมน้ำที่ความเข้มข้น 0.015 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 150,000 เท่า.....	82
29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกเฉลี่ย และค่าอัตรา การไหลเชิงมวล และสารทำงานต่าง ๆ และ ครีประบายความร้อน แบบช่องขนาดเล็ก.....	86
30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกเฉลี่ย และค่าอัตรา การไหลเชิงมวลและสารทำงานต่าง ๆ และ ครีประบายความร้อน แบบช่องขนาดเล็ก.....	87
31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และสารทำงานต่าง ๆ และครีประบาย ความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก.....	88
32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ย และค่าอัตรา การไหลเชิงมวล และสารทำงานต่าง ๆ และครีประบายความร้อน แบบช่องขนาดเล็ก.....	89
33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันตกคร่อมเฉลี่ย และค่าอัตรา การไหลเชิงมวล และสารทำงานต่าง ๆ และครีประบายความร้อน แบบช่องขนาดเล็ก.....	90
34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกเฉลี่ย และค่าอัตรา การไหลเชิงมวล และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ และ ครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก.....	91

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิผิวครีบนีล และค่าอัตรา การไหลเชิงมวล และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ และ ครีบรรยายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก.....	92
36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนนีล และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ และครีบรรยายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก.....	93
37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าเลขนัสเซิลต์นีล และค่าอัตรา การไหลเชิงมวล และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ และ ครีบรรยายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก.....	94
38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันตกคร่อมนีล และค่าอัตรา การไหลเชิงมวล และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ และครีบรรยายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก.....	95
39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกนีล และค่าอัตรา การไหลเชิงมวลและตำแหน่งหัวฉีดที่ระยะห่างต่าง ๆ และ ครีบรรยายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก.....	96
40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิผิวครีบนีล และค่าอัตรา การไหลเชิงมวล และตำแหน่งหัวฉีดที่ระยะห่างต่าง ๆ และ ครีบรรยายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก.....	97
41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนนีล และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และตำแหน่งหัวฉีดที่ระยะห่างต่าง ๆ และครีบรรยายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก.....	98
42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าเลขนัสเซิลต์นีล และค่าอัตรา การไหลเชิงมวล และตำแหน่งหัวฉีดที่ระยะห่างต่าง ๆ และ ครีบรรยายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก.....	99
43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความดันตกคร่อมนีล และค่าอัตรา การไหลเชิงมวล และตำแหน่งหัวฉีดที่ระยะห่างต่าง ๆ และ ครีบรรยายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก.....	100
44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกนีล และค่าอัตรา การไหลเชิงมวล และสารทำงานต่าง ๆ และ ครีบรรยายความร้อน แบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว.....	101

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกเฉลี่ย และค่าอัตรา การไหลเชิงมวล และสารทำงานต่าง ๆ และ ครีบระบายความร้อน แบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว.....	102
46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และสารทำงานต่าง ๆ และครีบระบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว.....	103
47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ย และค่าอัตรา การไหลเชิงมวล และสารทำงานต่าง ๆ และ ครีบระบายความร้อน แบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว.....	104
48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันตกคร่อมเฉลี่ย และค่าอัตรา การไหลเชิงมวล และสารทำงานต่าง ๆ และ ครีบระบายความร้อน แบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว.....	105
49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกเฉลี่ย และค่าอัตรา การไหลเชิงมวลและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ และ ครีบระบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว.....	106
50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิผิวครีบเฉลี่ย และค่าอัตรา การไหลเชิงมวล และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ และ ครีบระบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว.....	107
51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ และ ครีบระบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว.....	108
52 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ย และค่าอัตรา การไหลเชิงมวล และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ และ ครีบระบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว.....	109
53 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันตกคร่อมเฉลี่ย และค่าอัตรา การไหลเชิงมวล และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ และ ครีบระบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว.....	110
54 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกเฉลี่ย และค่าอัตรา การไหลเชิงมวล และตำแหน่งหัวฉีดที่ระยะห่างต่าง ๆ และ ครีบระบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว.....	111

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
55 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิผิวครีปเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และตำแหน่งหัวฉีดที่ระยะห่างต่าง ๆ และครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว.....	112
56 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และตำแหน่งหัวฉีดที่ระยะห่างต่าง ๆ และ ครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว.....	113
57 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และ ตำแหน่งหัวฉีดที่ระยะห่างต่าง ๆ และครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว.....	114
58 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และตำแหน่งหัวฉีดที่ระยะห่างต่าง ๆ และครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว.....	115
59 แสดงการแพร่กระจายของเวกเตอร์ความเร็วของของไหล ที่สภาวะอัตราการไหล 11.65 กรัมต่อวินาที $\text{TiO}_2 \phi = 0.015$ เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ.....	116
60 แสดงการแพร่กระจายของความดันรวมที่สภาวะอัตราการไหล 11.65 กรัมต่อวินาที $\text{TiO}_2 \phi = 0.015$ เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ.....	118
61 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิโดยรวม ที่สภาวะอัตราการไหล 11.65 กรัมต่อวินาที $\text{TiO}_2 \phi = 0.015$ เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ.....	120
62 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิของครีประบายความร้อนที่สภาวะอัตราการไหล 11.65 กรัมต่อวินาที $\text{TiO}_2 \phi = 0.015$ เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ.....	121

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
63 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิที่สภาวะอัตราการไหล 11.65 กรัมต่อวินาที $\text{TiO}_2 \phi = 0.015$ เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ.....	122
64 แสดงการแพร่กระจายของเวกเตอร์ความเร็วของของไหลที่หัวฉีด ที่สภาวะอัตราการไหล 11.65 กรัมต่อวินาที $\text{TiO}_2 \phi = 0.015$ เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.5 มิลลิเมตร และตำแหน่งหัวฉีดต่าง ๆ.....	124
65 แสดงการแพร่กระจายของความดันรวมที่สภาวะอัตราการไหล 11.65 กรัมต่อวินาที $\text{TiO}_2 \phi = 0.015$ เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง หัวฉีด 2.5 มิลลิเมตร และตำแหน่งหัวฉีดต่าง ๆ.....	126
66 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิโดยรวมที่สภาวะอัตราการไหล 11.65 กรัมต่อวินาที $\text{TiO}_2 \phi = 0.015$ เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง หัวฉีด 2.5 มิลลิเมตร และตำแหน่งหัวฉีดต่าง ๆ.....	128
67 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิของครีประบายความร้อนที่สภาวะ อัตราการไหล 11.65 กรัมต่อวินาที $\text{TiO}_2 \phi = 0.015$ เปอร์เซ็นต์ ขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร และตำแหน่งหัวฉีดต่าง ๆ.....	129
68 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิที่ส่วนปลายของครีประบายความร้อน ที่สภาวะอัตราการไหล 11.65 กรัมต่อวินาที $\text{TiO}_2 \phi = 0.015$ เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.5 มิลลิเมตร และตำแหน่งหัวฉีดต่าง ๆ.....	130
69 แสดงการแพร่กระจายของเวกเตอร์ความเร็วที่สภาวะอัตราการไหล 11.65 กรัมต่อวินาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.5 มิลลิเมตร ตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร และ $\text{TiO}_2 \phi = 0.005, 0.010$ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์.....	132
70 แสดงการแพร่กระจายของความดันรวมที่สภาวะอัตราการไหล 11.65 กรัมต่อวินาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.5 มิลลิเมตร ตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร และ $\text{TiO}_2 \phi = 0.005, 0.010$ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์.....	134

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
71 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิโดยรวมที่สภาวะอัตราการไหล 11.65 กรัมต่อวินาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.5 มิลลิเมตร ตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร และ $\text{TiO}_2 \phi = 0.005, 0.010$ และ 0.015 เปอร์เซนต์.....	136
72 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิของครีกระบายความร้อนที่สภาวะอัตรา การไหล 11.65 กรัมต่อวินาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง หัวฉีด 2.5 มิลลิเมตร ตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร และ $\text{TiO}_2 \phi = 0.005, 0.010$ และ 0.015 เปอร์เซนต์.....	137
73 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิที่ส่วนปลายของครีกระบายความร้อน ที่สภาวะอัตราการไหล 11.65 กรัมต่อวินาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง หัวฉีด 2.5 มิลลิเมตร ตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร และ $\text{TiO}_2 \phi = 0.005, 0.010$ และ 0.015 เปอร์เซนต์.....	138
74 แสดงการแพร่กระจายของเวกเตอร์ความเร็วของของไหลที่สภาวะอัตรา การไหล 11.12 กรัมต่อวินาที $\text{TiO}_2 \phi = 0.015$ เปอร์เซนต์ ตำแหน่งหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง หัวฉีดต่าง ๆ.....	140
75 แสดงการแพร่กระจายของความดันรวมที่สภาวะอัตราการไหล 11.12 กรัมต่อวินาที $\text{TiO}_2 \phi = 0.015$ เปอร์เซนต์ ตำแหน่ง หัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ.....	142
76 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิโดยรวมที่สภาวะอัตราการไหล 11.12 กรัมต่อวินาที $\text{TiO}_2 \phi = 0.015$ เปอร์เซนต์ ตำแหน่ง หัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ.....	144
77 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิของครีกระบายความร้อนที่สภาวะอัตรา การไหล 11.12 กรัมต่อวินาที $\text{TiO}_2 \phi = 0.015$ เปอร์เซนต์ ตำแหน่งหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง หัวฉีดต่าง ๆ.....	145

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
78 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิที่ส่วนปลายของครีประบายความร้อน ที่สภาวะอัตราการไหล 11.12 กรัมต่อวินาที $\text{TiO}_2 \phi = 0.015$ เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่งหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง หัวฉีดต่าง ๆ.....	146
79 แสดงการแพร่กระจายของเวกเตอร์ความเร็วของของไหลที่หัวฉีด ที่สภาวะอัตราการไหล 11.12 กรัมต่อวินาที $\text{TiO}_2 \phi = 0.015$ เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร และตำแหน่งหัวฉีดต่าง ๆ.....	148
80 แสดงการแพร่กระจายของความดันรวมที่สภาวะอัตราการไหล 11.12 กรัมต่อวินาที $\text{TiO}_2 \phi = 0.015$ เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง หัวฉีด 2.0 มม. และตำแหน่งหัวฉีดต่าง ๆ.....	150
81 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิโดยรวมที่สภาวะอัตราการไหล 11.12 กรัมต่อวินาที $\text{TiO}_2 \phi = 0.015$ เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง หัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร และตำแหน่งหัวฉีดต่าง ๆ.....	152
82 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิของครีประบายความร้อนที่สภาวะอัตรา การไหล 11.12 กรัมต่อวินาที $\text{TiO}_2 \phi = 0.015$ เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร และตำแหน่งหัวฉีดต่าง ๆ.....	153
83 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิที่ส่วนปลายของครีประบายความร้อน ที่สภาวะอัตราการไหล 11.12 กรัมต่อวินาที $\text{TiO}_2 \phi = 0.015$ เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร และตำแหน่งหัวฉีดต่าง ๆ.....	154
84 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิที่ส่วนปลายของครีประบายความร้อน ที่สภาวะอัตราการไหล 11.12 กรัมต่อวินาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร ตำแหน่งหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และ $\text{TiO}_2 \phi = 0.005$ เปอร์เซ็นต์, 0.010 % และ 0.015 %.....	156
85 แสดงการแพร่กระจายของความดันรวมที่สภาวะอัตราการไหล 11.12 กรัมต่อวินาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร ตำแหน่งหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และ $\text{TiO}_2 \phi = 0.005, 0.010$ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์.....	158

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
86 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิโดยรวมที่สภาวะอัตราการไหล 11.12 กรัมต่อวินาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร ตำแหน่งหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และ $\text{TiO}_2 \phi = 0.005, 0.010$ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์.....	160
87 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิของครีบบระบายความร้อนที่สภาวะอัตรา การไหล 11.12 กรัมต่อวินาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร ตำแหน่งหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และ $\text{TiO}_2 \phi = 0.005, 0.010$ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์.....	161
88 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิที่ปลายของครีบบระบายความร้อน ที่สภาวะอัตราการไหล 11.12 กรัมต่อวินาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง หัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร ตำแหน่งหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และ $\text{TiO}_2 \phi = 0.005, 0.010$ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์.....	162

บทที่ 1

บทนำ

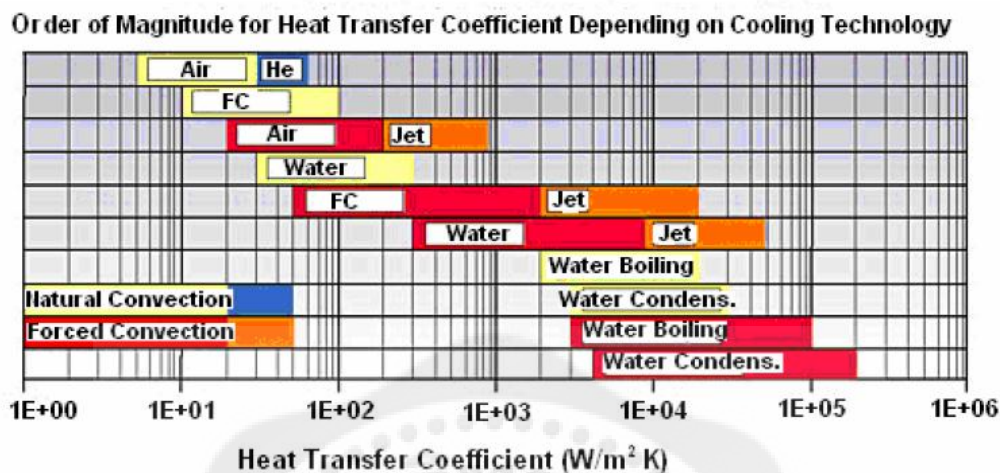
1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โดยเฉพาะด้านคอมพิวเตอร์ได้พัฒนาอย่างต่อเนื่อง และในปัจจุบันซึ่งเป็นทศวรรษที่ 21 เป็นการย่างก้าวเข้าสู่ยุคดิจิทัลอย่างเต็มตัว ดังเห็นได้จากบริษัทชั้นนำด้านคอมพิวเตอร์ได้ทำการศึกษาวิจัย และนำเอาคอมพิวเตอร์ที่มีทั้งความเร็วและประสิทธิภาพสูงออกสู่ตลาดอย่างต่อเนื่อง และจากความต้องการคอมพิวเตอร์ที่มีทั้งความเร็วและประสิทธิภาพสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง อุปกรณ์ที่มีสำคัญควบคู่กับการพัฒนาเพื่อเพิ่มสมรรถนะคอมพิวเตอร์ คืออุปกรณ์ระบายความร้อนของคอมพิวเตอร์ จากเดิมเริ่มแรกใช้อากาศระบายความร้อนออกจากครีบบระบายความร้อนแบบธรรมชาติ ต่อมาใช้อากาศระบายความร้อนออกจากครีบบระบายความร้อนแบบบังคับ สำหรับปัจจุบันใช้ทั้งระบบท่อร้อน (Heat pipe) และระบบระบายความร้อนแบบของเหลว และเพื่อทางเลือกสำหรับอนาคตจึงมีความสนใจในการศึกษาวิจัย ครีบบระบายความร้อนที่มีช่องการไหลขนาดเล็กจิ๋ว (Microchannel heat sinks) โดยใช้ของไหลนาโนไททาเนียมเป็นสารทำงานเพื่อระบายความร้อน โดยใช้กระบวนการถ่ายเทความร้อนแบบจี้ดกระทบ (Impingement jets)

การพาความร้อนโดยใช้น้ำ และของไหลนาโนเป็นขบวนการหนึ่งของการถ่ายเทความร้อนซึ่งมีความสำคัญในงานวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และการดำรงชีวิตของมนุษย์ เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ ซึ่งต้องอาศัยกระบวนการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาทั้งสิ้น นักวิจัย วิศวกร และนักพัฒนาได้มีการคิดค้นหาวิธีการต่าง ๆ มาใช้พัฒนาขบวนการใหม่ ๆ ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด แต่ก็จะประสบกับปัญหาอันมีสาเหตุมาจากขีดจำกัดในการเพิ่มสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อน และการมีพื้นที่จำกัดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จึงได้ค้นหาวิธีที่จะเพิ่มอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนก็ คือ การติดโลหะแผ่นบาง ๆ เข้ากับผิวโลหะเดิมเพื่อเพิ่มพื้นที่ ซึ่งเรียกว่าครีบ การออกแบบรูปทรงของครีบมีความสำคัญ เนื่องจากการออกแบบที่ดีทำให้การถ่ายเทความร้อนมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ครีบบางช่องสี่เหลี่ยมจัตุรัส เป็นครีบที่มีระบายความร้อนได้ดีเนื่องจากสามารถให้พื้นที่ผิวได้มาก มีขนาดเล็กใช้พื้นที่ติดตั้งน้อย และมีการไหลวนของสารทำงานได้ดีทำให้การถ่ายเทความร้อนมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

ภาพประกอบ 1 แสดงการเปรียบเทียบเทคโนโลยีการหล่อเย็นแบบต่าง ๆ ที่สามารถนำมาใช้สำหรับการถ่ายเทความร้อนที่มีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูง โดยสามารถให้ค่าพลังความร้อนตั้งแต่ 100 - 20,000 วัตต์ต่อตารางเมตรต่อองศาเคนวิน ข้อมูลที่ได้จากภาพประกอบ 1 นับว่าเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการวิจัยต่อยอดเพื่อให้ได้เทคโนโลยีการจัดการความร้อนที่เป็นเลิศ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างสร้างสรรค์สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ทั้งนักวิจัย

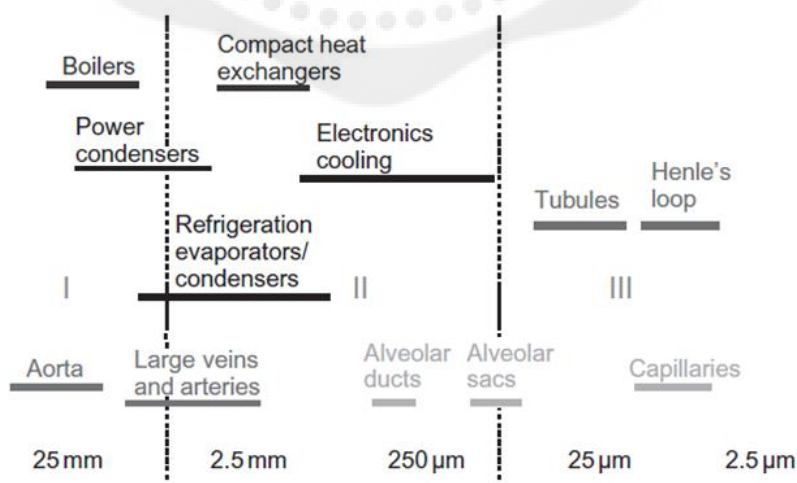
วิศวกร และนักพัฒนาในปัจจุบันมีความสนใจที่จะวิจัยปรับปรุงพัฒนาเทคโนโลยีการหล่อเย็นที่ประสิทธิภาพสูงโดยใช้ทรัพยากรความร้อนที่มีช่องการไหลขนาดเล็กจิ๋ว



ภาพประกอบ 1 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยเทคโนโลยีการหล่อเย็นชนิดต่างๆ

ภาพประกอบ 2 เป็นการจำแนกขนาดช่องการไหลของของไหลในอุตสาหกรรม และทางชีวการแพทย์โดยแบ่งออกเป็น 3 ระยะ คือ

ระยะที่ I ขนาดช่องการไหลเล็กสุดไม่เกิน 25 มิลลิเมตร ตัวอย่างการใช้งานในอุตสาหกรรม ได้แก่ หม้อไอน้ำ อุปกรณ์ควบแน่นไอน้ำของเครื่องกังหันไอน้ำ เครื่องควบแน่นไอ และเครื่องระเหยไอในอุปกรณ์ทำความเย็น สำหรับทางระบบชีวภาพได้แก่ หลอดเลือดเออร์ตา (Aorta) ของหัวใจ



ภาพประกอบ 2 แสดงช่วงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องครีปที่ใช้งานปัจจุบัน

ระยะที่ II ขนาดช่องการไหลขนาดเล็กตั้งแต่ 2.5 มิลลิเมตร ถึง 250 ไมโครเมตร ตัวอย่างการใช้งานในอุตสาหกรรมได้แก่ อุปกรณ์ควบแน่นไอน้ำของเครื่องกังหันไอน้ำ เครื่องควบแน่นไอน้ำ และเครื่องระเหยไอน้ำในอุปกรณ์ทำความเย็น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด การทำความเย็นอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับทางระบบชีวภาพได้แก่ เส้นเลือดใหญ่ และหลอดเลือดแดง ท่อลำเลียง กะเปาะถุงลม

ระยะที่ III ขนาดช่องการไหลขนาดเล็กตั้งแต่ 25 ไมโครเมตร ถึง 2.5 ไมโครเมตร ตัวอย่างการใช้งานในอุตสาหกรรมได้แก่ ท่อลำเลียงขนาดเล็กจิ๋ว และ Henle's Loop สำหรับทางระบบชีวภาพได้แก่ กะเปาะถุงลม และเส้นเลือดฝอย

การจำแนกชนิดช่องการไหลแบบต่าง ๆ ตาม ตาราง 1 จะพบว่าขนาดของช่องการไหลมีขนาดเล็กลงมาก จึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบทฤษฎีแบบเดิมที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน สำหรับของไหลพลังงาน และการขนส่งมวล ซึ่งมีสององค์ประกอบพื้นฐานที่น่าสนใจอย่างยิ่งสำหรับการศึกษาวิจัยต่อยอดจากทฤษฎี "แบบเดิม ๆ " ที่ซึ่งต้องใช้กลศาสตร์เป็นเครื่องมือประกอบการศึกษา ตัวอย่าง เช่นความแตกต่างในการไหลของของไหลในช่องที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กอาจเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากข้อจำกัด การเปลี่ยนแปลง และความไม่แน่นอน ดังนี้

1 การเปลี่ยนแปลงกระบวนการพื้นฐาน เช่น การเบี่ยงเบนจากสมมติฐานการไหลของก๊าซต่อเนื่อง หรืออิทธิพลที่เพิ่มขึ้นของกองกำลังเพิ่มเติมบางอย่าง เช่น แรงจลนศาสตร์ไฟฟ้า

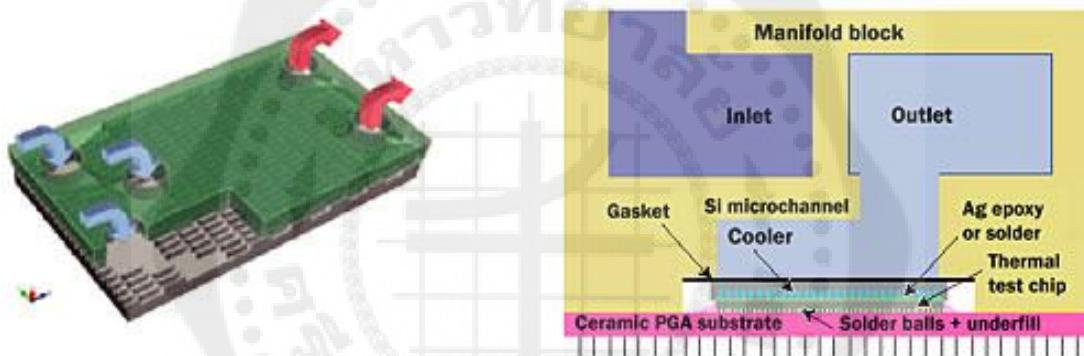
2 ความไม่แน่นอนเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ปัจจัยเชิงประจักษ์ที่ได้จากการทดลองที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางเข้า และทางออกสำหรับการไหลของของไหลในท่อ

3 ความไม่แน่นอนในการวัดที่กลศาสตร์รวมทั้งมิติทางเรขาคณิต และพารามิเตอร์การทำงาน

ภาพประกอบ 3 แสดงการนำครีบรรยายความร้อนที่มีช่องการไหลขนาดเล็กจิ๋วไปใช้สำหรับการถ่ายเทความร้อนซึ่งในขนาดจะมีการปรับปรุงให้มีการเปลี่ยนสถานะของของเหลวให้กลายเป็นไอเพื่อเพิ่มค่าฟลักซ์ความร้อนให้สูงมากขึ้น สำหรับชุดต้นแบบนี้สามารถให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงถึง 1,000 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ด้วยการเปลี่ยนสถานะของของเหลวในช่องการไหลขนาดเล็กจิ๋วด้วยอัตราการไหล 500 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ตำแหน่งของอุณหภูมิใช้งานที่มีการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 10 องศาเซลเซียส ถึง 15 องศาเซลเซียส

ตาราง 1 การจำแนกชนิดช่องการไหลแบบต่าง ๆ

ชนิดของช่องการไหล	ขนาดความกว้างของช่องครีป
Conventional channels	$D > 3.00 \text{ mm}$
Minichannels	$3.00 \text{ mm} \geq D > 200.00 \text{ }\mu\text{m}$
Microchannels	$200.00 \text{ }\mu\text{m} \geq D > 10.00 \text{ }\mu\text{m}$
Transitional microchannels	$10.00 \text{ }\mu\text{m} \geq D > 1.00 \text{ }\mu\text{m}$
Transitional nanochannels	$1.00 \text{ }\mu\text{m} \geq D > 0.10 \text{ }\mu\text{m}$
Nanochannels	$0.10 \text{ }\mu\text{m} \geq D$



ภาพประกอบ 3 แสดงเทคโนโลยีการถ่ายเทความร้อนสมรรถนะสูงด้วยครีประบายความร้อนแบบที่มีช่องการไหลขนาดเล็กจิ๋วของ IBM

ในปัจจุบันจึงสมควรทำการศึกษาวิจัยโดยการผสมผสานระหว่างครีประบายความร้อนที่มีขนาดช่องการไหลขนาดเล็กจิ๋วโดยใช้สารทำงานของไหลนาโนไททาเนียม และสารทำงานไหลเจ็ดกระแทบครีประบายความร้อน โดยทำการศึกษาเกี่ยวกับค่าพารามิเตอร์ และคุณลักษณะการไหลของสารทำงานในการถ่ายเทความร้อน เพื่อทำความเข้าใจอย่างลึกซึ้งซึ่งเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของความร้อน เพราะการนำเอาพลังงานมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพ ต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจทางทฤษฎีเป็นอย่างดี เพื่อนำไปพัฒนากระบวนการถ่ายเทความร้อนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ทำให้เกิดความก้าวหน้าในวิศวกรรมด้านต่าง ๆ อันจะเป็นประโยชน์ต่อวงการอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมคอมพิวเตอร์ และอุตสาหกรรมอวกาศ ซึ่งเป็นรากฐานของความเจริญทางเทคโนโลยีเพื่อการดำรงชีวิตของมนุษยชาติในยุคอุตสาหกรรม 4.0 ที่กำลังจะมาถึงในอนาคตอันใกล้ต่อไป

2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ตั้งวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยไว้ดังนี้

- 1 ศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อน และการไหลของของไหลนาโนไททาเนียม และน้ำบริสุทธิ์โดยการพาความร้อนของครีบบระบายความร้อนที่มีช่องการไหลขนาดเล็กจิ๋ว
- 2 ศึกษาผลของ ค่าอัตราการไหล ค่าขนาดของหัวฉีด ค่าระยะห่างของหัวฉีดกับครีบบระบายความร้อนที่มีช่องการไหลขนาดเล็กจิ๋วที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนโดยการพา
- 3 ศึกษาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อน พฤติกรรมการไหล และความดันตกคร่อม เปรียบเทียบกับผลการทดลอง

3 ขอบเขตของการวิจัย

ทำการศึกษาวิจัยทั้งการทดลอง และการคำนวณโดยแบบจำลองคณิตศาสตร์ โดยทำการศึกษาวิจัยในขอบเขตดังนี้

- 1 ศึกษาวิจัยการพาความร้อนของครีบบระบายความร้อนที่มีช่องการไหลขนาดเล็กจิ๋ว
- 2 ศึกษาวิจัยเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนโดยการพา โดยพิจารณาการไหลของของไหลนาโนไททาเนียมผสมน้ำบริสุทธิ์ในสัดส่วน 0.005, 0.010, 0.015 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร และน้ำบริสุทธิ์ผ่านครีบบระบายความร้อนที่มีช่องการไหลขนาดเล็กจิ๋วที่มีค่าฟลักซ์ความร้อนที่ฐานครีบกังที่ (Constant heat flux)

4 ประโยชน์และผลที่คาดว่าจะได้รับ

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยคาดว่าประโยชน์ที่จะได้รับจากการครั้งนี้ไว้ดังนี้

- 1 เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษา และพัฒนาในการวิจัยเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบของครีบบระบายความร้อนที่มีช่องการไหลขนาดเล็กจิ๋ว
- 2 ได้เข้าใจถึงค่าพารามิเตอร์ และประพพฤติกรรมต่าง ๆ ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของครีบบระบายความร้อนที่มีช่องการไหลขนาดเล็กจิ๋ว
- 3 ได้เข้าใจถึงความแตกต่างของค่าพารามิเตอร์ และประพพฤติกรรมต่าง ๆ ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของครีบบระบายความร้อนที่มีช่องการไหลขนาดเล็กจิ๋วเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาแบบจำลองคณิตศาสตร์
- 4 ได้ข้อมูลในการปรับปรุงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ต้องการถ่ายเทความร้อน และการนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้งานยุคอุตสาหกรรม 4.0 ในอนาคต
- 5 ได้ข้อมูลพื้นฐานในการปรับปรุงเพื่องานวิจัยขั้นสูงสำหรับการถ่ายเทความร้อนในอุตสาหกรรมหุ่นยนต์ และอุตสาหกรรมอวกาศ

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรม

1 บทนำ

วัตถุประสงค์ของบทนี้เพื่อทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะการไหล และการถ่ายเทความร้อนแบบจืดกระทบของของไหลสถานะเดียว และสองสถานะที่ไหลในช่องขนาดเล็ก ช่องขนาดเล็กจิ๋ว และอื่น ๆ ที่ใกล้เคียงโดยทำการสรุปจากวรรณกรรมที่มีการเผยแพร่ที่กล่าวถึงความสัมพันธ์ของคุณลักษณะการไหล และการถ่ายเทความร้อนแบบจืดกระทบของของไหลสถานะเดียว และสองสถานะที่ไหลในช่องขนาดเล็ก ช่องขนาดเล็กจิ๋ว และอื่น ๆ ที่ใกล้เคียง และปัจจัยควบคุมต่าง ๆ การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องนี้มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่องานวิจัยที่จะดำเนินการ และพบว่ามีวรรณกรรมต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับคุณลักษณะการไหล และการถ่ายเทความร้อนแบบจืดกระทบของของไหลมีดังต่อไปนี้

บ็อค ซอน ปาก และยอง อี โซ (Bock Choon Pak; & Young I. Cho. 1998). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีการทดลองแรงเสียดทานการไหลแบบปั่นป่วน และพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากของเหลวที่กระจายตัว (เช่น อนุภาคของโลหะออกไซด์ขนาดเล็กยิ่งยวดที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ) ในท่อกลมถูกตรวจสอบโดยการทดลอง วัดความหนืดโดยใช้เครื่องวัดความหนืดบรุคฟิลด์ชนิดแกนหมุน (Brookfield rotating viscometer) อนุภาคของโลหะออกไซด์ 2 ชนิด คือ γ - อะลูมินา (Al_2O_3) และไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 13 และ 27 นาโนเมตรตามลำดับ ถูกนำมาใช้เป็นอนุภาคแขวนลอย ค่าเลขเรย์โนลด์ส (Re) และค่าเลขแพรนดัล (Pr) มีความแตกต่างกันในช่วง $10^4 - 10^5$ และ 6.5 - 12.3 ตามลำดับ ความหนืดของของเหลวกระจายตัวที่มีอนุภาค γ - Al_2O_3 และ TiO_2 ที่ความเข้มข้นปริมาตร 10% มีค่าประมาณ 200 และ 3 เท่าของน้ำตามลำดับ ผลการวัดความหนืดเหล่านี้มีขนาดใหญ่กว่าการคาดคะเนจากทฤษฎีสัมัยดั้งเดิมของวิทยาศาสตร์การไหลของสารแขวนลอย ตัวประกอบของแรงเสียดทานของ Darcy สำหรับของเหลวกระจายตัวที่มีปริมาตรตั้งแต่ 1% ถึง 3% ใกล้เคียงกับความสัมพันธ์ของ Kays' สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนของของเหลวแบบเฟสเดียว ค่าเลขนัสเซลต์ (Nu) ของของเหลวที่กระจายตัวสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนเต็มรูปแบบเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของปริมาตรเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกับ ค่าเลขเรย์โนลด์ส อย่างไรก็ตามพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในการถ่ายเทของของไหลที่กระจายตัวในปริมาตร 3% มีค่าน้อยกว่าน้ำบริสุทธิ์ประมาณ 12% เมื่อเปรียบเทียบภายใต้สภาวะความเร็วเฉลี่ยคงที่ ดังนั้นจึงควรเลือกใช้อนุภาคที่มีการนำความร้อนสูง และมีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อใช้เป็นของเหลวที่กระจายตัวเป็นตัวกลางในการทำงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ความสัมพันธ์ใหม่สำหรับการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วน สำหรับของเหลวที่กระจายตัวเจือจางด้วย ขนาดของอนุภาคของโลหะออกไซด์ ในระดับเล็กกว่าไมโครเมตรได้จากสมการต่อไปนี้
$$\text{Nu} = 0.021 \text{ Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.5}$$

ยี่มิน เจวียน และวิลฟรีด โรเอทเซล (Yimin Xuan; & Wilfried Roetzel. 2000). ทำการศึกษาวิจัยเชิงทฤษฎี และการทดลอง ของเหลวนาโนเป็นของเหลวผสมของแข็งซึ่งอนุภาคนาโนเป็นสารแขวนลอยโลหะ หรือ โลหะ สารแขวนลอยอนุภาคขนาดเล็กยิ่งยวดเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้านการขนถ่าย และประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของเหลวนาโน ซึ่งมีศักยภาพที่ดีในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนกลไกของการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของเหลวนาโน มีการตรวจสอบ อยู่บนสมมติฐานที่ว่าของเหลวนาโนมีพฤติกรรมเหมือนของเหลวมากกว่า เป็นของเหลวผสมของแข็งแบบธรรมดา ในบทความนี้เสนอแนวทางที่แตกต่างกันสองวิธีในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของสารเหลวนาโน ผลกระทบจากคุณสมบัติการขนถ่ายของเหลวนาโน และการกระจายความร้อนจะรวมอยู่ด้วย

กิลส์ รอย และคณะ (Gilles Roy; et al. 2004). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีการทดลองเพื่อศึกษาความสามารถของไหลนาโน ในการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับของเหลวจากน้ำ ไกลคอล น้ำมันพื้นฐาน เพื่อสนับสนุนให้วิศวกรมีโอกาสในการพัฒนาในพื้นที่ที่ต้องมีการถ่ายเทความร้อนสูงที่ทนต่ออุณหภูมิต่ำ และพื้นที่ขนาดเล็ก ในงานวิจัยฉบับนี้ได้พิจารณาถึงสภาวะอุณหพลศาสตร์ และความร้อนของน้ำกับไนโตรเจนอัลคาไลไนต์ ในระบบระบายความร้อนโดยการไหลแบบราบเรียบในแนวนอน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้มากถึงแม้จะมีการเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าในกรณีของอนุภาคนาโนที่มีอนุภาคนาโน 10 เปอร์เซ็นต์ ในทางกลับกันการเพิ่มความเค้นเฉือนบนผนัง จะสังเกตเห็นได้ด้วยการเพิ่มความเข้มข้นของปริมาตรอนุภาค

ดับเบิลยู ยู และ เอส ยู เอส ซอย (W. Yu; & S. U. S. Choi. 2004). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการทดลอง ซึ่งก่อนหน้านี้ได้พัฒนารูปแบบแมกซ์เวลล์ ที่ได้รับการปรับปรุงใหม่สำหรับการนำความร้อนของอนุภาคนาโน มาใช้ และระบุว่าชั้นของแข็ง/ของเหลว มีบทบาทสำคัญในการนำความร้อนที่เพิ่มขึ้นของอนุภาคนาโน อย่างไรก็ตาม รูปแบบ แมกซ์เวลล์ ที่ได้รับการปรับปรุงนี้ถูกจำกัดไว้สำหรับอนุภาคทรงกลม ที่เราขยายโมเดลแฮมิลตัน – คروسเซอร์ (Hamilton – Crosser model) สำหรับสารแขวนลอยของอนุภาคที่ไม่เป็นรูปทรงกลมเพื่อรวมผลกระทบของตัวประสาน ของแข็ง/ของเหลว ตัวประสานของ ของแข็ง/ของเหลว ถูกอธิบายว่าเป็นรูปทรงรีคัพกับอนุภาคที่เป็นของแข็ง รูปแบบใหม่สำหรับสารแขวนลอยสามเฟสแสดงออกทางคณิตศาสตร์ในรูปของค่าการนำความร้อนที่เท่ากัน และอนุภาคปริมาตรที่เท่ากันของอนุภาคที่มีเส้นตรงแบบแอนไอโซทรอปิกคอล รวมทั้งปัจจัยรูปร่างเชิงประจักษ์ ด้วยรูปทรงเชิงประจักษ์โดยทั่วไปรูปแบบ แฮมิลตัน – คروسเซอร์ ได้รับการปรับปรุงอย่างถูกต้องทำนายความสำคัญของการนำความร้อนของอนุภาคนาโนที่มีนาโนคาร์บอนในน้ำมัน ปัจจุบันรูปแบบใหม่นี้ไม่สามารถทำนายพฤติกรรมเชิงเส้นของการนำความร้อนของนาโนได้

แซมมี โจเซฟ ปาล์ม และคณะ (Samy Joseph Palm; et al. 2006). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาความสามารถในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของสารทำความเย็นที่มีอนุภาคนาโนชนิดละอองโลหะภายในระบบระบายความร้อนแบบบีรตี การไหลเวียน

ของการพาความร้อนที่เป็นการไหลแบบราบเรียบของของไหลนาโน เหล่านี้ระหว่างดิสก์โคแอคเซียล และดิสก์คู่ขนานแบบคู่ขนาน กับการฉีดกระทบแกนกลาง ได้รับการพิจารณาโดยอาศัยคุณสมบัติการใช้งานของของไหลนาโน ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ผลการทดลองแสดงให้เห็นชัดเจนว่าสามารถใช้ประโยชน์จากการถ่ายเทความร้อนได้ดีกับการใช้ส่วนผสมของของเหลว และของแข็ง ตัวอย่าง เช่น ของไหลนาโนอะลูมินาออกไซด์ ($\text{Water/Al}_2\text{O}_3$) ที่มีอนุภาคนาโนที่มีปริมาตรไม่ถึง 4.0 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผนังเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 25 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับของเหลวฐานเพียงอย่างเดียว (เช่น น้ำ) นอกจากนี้ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่ามีความแตกต่างกันอย่างมากเมื่อใช้สารละลายของไหลนาโนที่มีคุณสมบัติคงตัว (อุณหภูมิที่ไม่ขึ้นกับสารละลาย) กับของไหลนาโนที่มีคุณสมบัติขึ้นกับอุณหภูมิ การใช้สมบัติที่ขึ้นกับอุณหภูมิทำให้การคาดการณ์การถ่ายเทความร้อนที่มากขึ้นมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการคาดคะเน โดยใช้คุณสมบัติคงที่พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้นในขณะที่ความเค้นเฉือนของผนังลดลงสำหรับกรณีที่ใช้คุณสมบัติของของไหลนาโนที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

ซ่ง ตัม เหวียน และคณะ (Cong Tam Nguyen; et al. 2007). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีการทดลองเพื่อศึกษาความพฤติกรรม และการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนที่มีส่วนผสมอะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ในระบบปิดสำหรับการระบายความร้อนของไมโครโปรเซสเซอร์ หรือชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ ข้อมูลจากการทดลองของระบบการไหลแบบปั่นป่วนได้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการรวมอนุภาคนาโนที่มีส่วนผสม 6.8 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรกับน้ำกลั่นได้เพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น 40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับน้ำกลั่น นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของอนุภาคทำให้มีอุณหภูมิของอุปกรณ์ลดลงอย่างชัดเจน ข้อมูลการทดลองนี้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าของไหลนาโนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค 36 นาโนเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าของไหลนาโน ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค 47 นาโนเมตร

เอ ยี แอกวู แนนนา และคณะ (A.G. Agwu Nnanna; et al. 2009). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีการทดลอง และวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาการระบายความร้อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ ชุดเทอร์โมอิเล็กทริกส์ ประคบเข้ากับชุดแผ่นชิป และอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยด้านเย็นของ ชุดเทอร์โมอิเล็กทริกส์ ประคบติดอยู่กับชุดแผ่นชิป การประคบแบบนี้ทำให้ค่าความต้านทานทางความร้อนระหว่าง ชุดเทอร์โมอิเล็กทริกส์ กับชุดแผ่นชิปมีค่าคงที่ การทดลองวิจัยนี้ได้มีการเพิ่มความร้อนของ ชุดเทอร์โมอิเล็กทริกส์ โดยใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ของไหลนาโนเป็นสารทำงาน ชุดเทอร์โมอิเล็กทริกส์ เลือกใช้พิจารณาจะใช้ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด อนุภาคอะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ขนาด 27 นาโนเมตร และแหล่งกำเนิดความร้อน คือชุดแผ่นชิป สัดส่วนผสมของอนุภาค อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ในของไหลนาโนในสัดส่วนกับน้ำโดยปริมาตรตั้งแต่ 0.0 ถึง 2.0 เปอร์เซ็นต์ เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลอง และวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาสมรรถนะการตอบสนองด้านความร้อนทั้งแบบชั่วขณะ และแบบสถานะคงตัวของชุดทดลองตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ของไอโซฟลักซ์ ข้อมูลที่เก็บจากเครื่อง

แลกเปลี่ยนความร้อนแบบที่ใช้ของไหลนาโนจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับน้ำกลั่นเป็นสารทำงาน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ามีความล่าช้าในการตอบสนองทางความร้อนระหว่างชุดทดลอง และตัวแลกเปลี่ยนความร้อน ความต้านทานทางความร้อนของจุดเชื่อมต่อระหว่างสองส่วนนี้จะนำมาเปรียบเทียบกับของไหลนาโน และน้ำกลั่นเป็นสารทำงาน พบว่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านร้อน และด้านเย็น $\Delta T = T_h - T_c \approx 0$ ใกล้เคียงกับศูนย์สำหรับของไหลนาโน ขณะที่ $\Delta T > 0$ สำหรับน้ำ เมื่อ $\Delta T \approx 0$ การมีส่วนร่วมของผลฟูเรียร์ต่อความร้อนโดยรวมจะอยู่ที่ประมาณศูนย์ ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความสามารถในการทำความเข้าใจของชุดทดลองผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการไล่ระดับอุณหภูมิของแผ่นความร้อนที่เชื่อมต่อกับชุดแผ่นชิป และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่ำกว่าที่ใช้น้ำกลั่นมาก ผลการไล่ระดับสีที่มีอุณหภูมิต่ำทำให้ความต้านทานต่อการไหลเวียนของความร้อนต่ำลง ค่าความต้านทานการสัมผัสความร้อนโดยเฉลี่ยคือ $R = \Delta T / Q$ เท่ากับ 0.18 และ 1.2 องศาเซลเซียส ตามลำดับสำหรับน้ำกลั่น และของไหลนาโน สำหรับช่วงของกระแสไฟฟ้าที่ดีที่สุดช่วงตั้งแต่ 1.2 ถึง 4.1 แอมแปร์ ซึ่งพิจารณาในการศึกษาค่า COP ช่วงระหว่าง 1.96 และ 0.68

ซ่ง ตัม เหวียน และคณะ (Cong Tam Nguyen; et al. 2009). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีการทดลองเพื่อศึกษาสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนอะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค 36 นาโนเมตร ในเครื่องฉีดกระทบภายใต้สภาวะที่มีความกดดัน และจมอยู่ใต้ของเหลวโดยฉีดกระทบบนพื้นผิวที่แบนราบเรียบวางในแนวนอน และแผ่นวงกลม การทดสอบนี้กำหนดพารามิเตอร์ที่ควบคุมได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 3.0 มิลลิเมตร และระยะห่างของหัวฉีดกับพื้นผิวชิ้นงานที่ฉีดกระทบตั้งไว้ที่ 2.0, 5.0 และ 10.0 มิลลิเมตร ค่าเลขเรย์โนลด์ส์ (Re) ตั้งแต่ 3,800 ถึง 88,000 ค่าเลขพรานด์เทิล ตั้งแต่ 5.0 ถึง 10.0 และสัดส่วนอนุภาคที่ผสมมีค่าตั้งแต่ 0.0 ถึง 6.0 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรกับน้ำกลั่น การไหลที่ทำการทดลองทั้งการไหลแบบราบเรียบ และการไหลแบบปั่นป่วน และแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับระยะห่างของหัวฉีดกับพื้นผิวที่ฉีดกระทบ และสัดส่วนผสมของอนุภาคนาโนของไหลนาโนสามารถประยุกต์ใช้สำหรับการถ่ายเทความร้อนในบางกรณีอื่น ๆ ตามความเหมาะสม สำหรับการทดลองครั้งนี้พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวสูงที่สุดสามารถทำได้โดยใช้ระยะหัวต่อระหว่างผิวงานที่ฉีดกระทบที่ 5.0 มิลลิเมตร และสัดส่วนผสมของนาโนที่ 2.8 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรกับน้ำกลั่น และพบว่าสัดส่วนผสมของนาโนที่ 6.0 เปอร์เซ็นต์ หรือสัดส่วนผสมที่สูงกว่านี้ไม่เหมาะสมสำหรับวัตถุประสงค์ในการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนโดยวิธีการฉีดกระทบในสภาวะการฉีดจมอยู่ใต้ของเหลว ในทำนองเดียวกันระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับผิวงานที่ฉีดกระทบแคบ หรือกว้างมากเกินไปการเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนในบางกรณีทำให้เกิดการลดลงอย่างไม่ชัดเจนเมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมาเปรียบเทียบกับที่ใช้น้ำกลั่น

จูเลียน เซอราซิม และคณะ (Iulian Gherasim; et al. 2009). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีการทดลองเพื่อศึกษาความสามารถในการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของสารหล่อเย็นที่มี

อนุภาคนาโนแขวนลอย (Al_2O_3 กระจายตัวอยู่ในน้ำ) ภายในอุปกรณ์ระบายความร้อนแบบรัศมี โดยมีการไหลเวียนแบบรัศมีอย่างต่อเนื่องของของไหลนาโนระหว่างแผ่นจานร้อน และแผ่นจานแบนที่มีการฉีดกระทบของสารหล่อเย็นตามแนวแกนของชุดทดลองที่สร้างขึ้น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงการถ่ายเทความร้อนเป็นไปได้ในระบบระบายความร้อนแบบรัศมีโดยใช้ของไหลนาโน โดยทั่วไปพบว่า ค่าเลขนัสเซิลต์ (Nu) เพิ่มขึ้นตามค่าสัดส่วนอนุภาค และค่าเลขเรย์โนลด์ส์ (Re) และลดลงด้วยการเพิ่มระยะห่างของแผ่นจานที่เพิ่มขึ้น

ไพศาล นาผล และคณะ (Paisarn Naphon; et al. 2009). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการไหลของของเหลว และการถ่ายเทความร้อนของระบายความร้อนครีบน้ำขนาดเล็กแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับหน่วยประมวลผลกลางของเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยใช้เป็นสารทำงานที่ใช้ในการทำงานในแบบจำลองคณิตศาสตร์ สมการควบคุมสามมิติสำหรับการไหลของของไหล และคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อน ใช้ระเบียบวิธีการทางไฟไนต์วอลุ่มสำหรับแก้ไขปัญหา ใช้แบบจำลอง $k-\epsilon$ มาตรฐาน ของการไหลแบบปั่นป่วนเพื่ออธิบายโครงสร้าง และพฤติกรรมของการไหล ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์ จะได้รับการยืนยันโดยข้อมูลที่วัดได้จากวิธีทดลอง ผลลัพธ์จากวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์ มีความสมเหตุสมผลระยะที่ยอมรับได้ และสามารถนำไปใช้คาดคะเนผลวิธีทดลองได้ โดยผลของการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้คาดว่าจะนำไปสู่แนวทางที่จะช่วยให้การออกแบบระบบระบายความร้อนด้วยสมรรถนะการระบายความร้อนที่ดีขึ้นของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อช่วยเพิ่มการทำงานที่เชื่อถือได้ของอุปกรณ์เหล่านี้ได้อย่างเหมาะสม

ไพศาล นาผล และสมชาย วงศ์วิเศษ (Paisarn Naphon; & Somchai Wongwises. 2010). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีการทดลองเพื่อศึกษาการแพร่กระจายความร้อนของของไหลแบบฉีดกระทบครีบน้ำระบายความร้อนแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กสำหรับหน่วยประมวลผลกลางของคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล การทดสอบนี้ได้รับการทดสอบกับชุดทดลองที่มีความกว้างของช่องครีบน้ำสามแบบภายใต้สภาวะการทำงานจริง ที่ไม่มีไหล และเงื่อนไขการไหลเพิ่มเติมที่ ระบบระบายความร้อนของของไหลแบบฉีดกระทบครีบน้ำระบายความร้อนแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กเป็นเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนแบบเชิงรุก และแบบเชิงรับ เมื่อพิจารณาผลกระทบของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิของหน่วยประมวลผลกลาง พบว่าอุณหภูมิหน่วยประมวลผลกลางที่ได้จากระบบระบายความร้อนแบบฉีดกระทบมีค่าต่ำกว่าระบบทำความเย็นแบบธรรมดา แต่อัตราการบริโภคพลังงานยังเพิ่มขึ้น ผลการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้มีความสำคัญทางเทคโนโลยีในการออกแบบระบบระบายความร้อนของเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อน

ยู-เฟิง และคลีเมนต์ เคลลินสเตรอร์ (Yu-Feng; & Clement Kleinstreuer. 2010). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีการทดลอง และวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาค่าการนำความร้อนต่ำของของไหลพื้นฐานเป็นตัวกำหนดข้อจำกัดหลักในการระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงซึ่งเป็นข้อกำหนดที่จำเป็นสำหรับระบบความร้อน และอุปกรณ์ขนาดเล็กจำนวนมาก ได้แก่ของไหลนาโน สารแขวนลอยเจือจางของอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ ในของไหลที่ใช้เป็นสารหล่อเย็นชนิด

ใหม่ ๆ ที่มีสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าของไหลที่เป็นของไหลบริสุทธิ์เพียงอย่างเดียว การใช้วิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลกับผลการทดลองการนำความร้อนของของไหลนาโน วิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์มีการนำมาใช้สำหรับของไหลนาโนอะลูมินาออกไซด์ ไหลขนานแผ่นดิสก์ เพื่อถ่ายเทความร้อนระหว่างดิสก์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าของไหลนาโนเป็นสารหล่อเย็นใหม่เมื่อเทียบกับน้ำบริสุทธิ์ โดยเฉพาะช่องการไหลของส่วนผสมที่ราบรื่น และการกระจายอุณหภูมิสามารถทำได้ดี ขนาดของอนุภาคนาโนที่เล็กกว่าลดระยะห่างแผ่นดิสก์ และแน่นอนว่า ค่าเลขเรย์โนลด์ส (Re) ที่มีค่ามาก ๆ สามารถแสดงเป็นรูปแบบเช่น $Nu = Nu(Re \text{ และ } Br)$ การไหลที่พัฒนาขึ้นอย่างสมบูรณ์สามารถสันนิษฐานได้ว่าเป็นไปตามระยะทางรัศมีวิกฤต และของไหลนาโนสามารถช่วยแก้ปัญหาโดยช่วยลดอัตราการสร้างเอนโทรปีของระบบในขณะที่แทบจะไม่เพิ่มพลังพลังงานที่ใช้ในเครื่องสูบน้ำ โดยเฉพาะการลดการสร้างเอนโทรปีโดยรวมจะช่วยให้การเพิ่มประสิทธิภาพระบบปฏิบัติการ และรูปทรงทางเรขาคณิต

เยี่ย-ซู่ หยาง และเฟิง-เซียง ไ่ (Yue-Tzu Yang; & Feng-Hsiang Lai. 2010). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีการทดลอง และวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาการพาความร้อนของการไหลเวียนของของไหลนาโนอะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ในระบบระบายความร้อนที่มีการไหลตามแนวรัศมีโดยใช้วิธีการแบบเฟสเดียว ข้อมูลที่ใช้ในแบบจำลองคณิตศาสตร์รวบรวมจาก ข้อมูลการทดลองที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรม ผลจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ แสดงให้เห็นถึงแนวโน้ม เช่นเดียวกับที่พบในงานที่ตีพิมพ์มากที่สุด คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่ม ค่าเลขเรย์โนลด์ส (Re) และจำนวนอนุภาคของอนุภาคนาโน อย่างไรก็ตามการเพิ่มความดันตกคร่อมมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของอนุภาคนาโน เมื่อพิจารณาทั้งสมรรถนะด้านความเย็น และผลกระทบจากความดันตกคร่อมไม่พบการเพิ่มของ การถ่ายเทความร้อนโดยการ ใช้ของไหลนาโน เทียบกับของน้ำบริสุทธิ์ภายใต้สภาวะความร้อน ที่มีความร้อนปานกลางในระบบไหลเวียนตามแนวรัศมี นอกจากนี้รูปแบบการพิจารณาสูตร Hamilton - Crosser สำหรับการนำไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพ พร้อมกับสมการที่พัฒนาขึ้นโดย Brinkman สำหรับความหนืดที่มีประสิทธิภาพของของไหลนาโนอาจส่งผลให้เกิดการผลลัพธ์ที่เกินความเป็นจริงของความสามารถในการใช้ของไหลนาโนเพื่อดึงความร้อนออกจากระบบที่ต้องการ

จูเลียน เซอราซิม และคณะ (Iulian Gherasim; et al. 2011). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของสารหล่อเย็นด้วยอนุภาคนาโนที่แขวนลอย (Al_2O_3 กระจายตัวอยู่ในน้ำ) ภายในเครื่องทำความเย็นแบบฉีดกระทบที่มีการไหลเวียนตามแนวรัศมีที่เป็นรูปทรงเรียวของของไหลนาโน โดยพิจารณากำหนดค่าแกนสมมาตรกับการฉีดน้ำหล่อเย็นตามแนวแกน ใช้แนวทางการศึกษาแบบเฟสเดียวเพื่อหาจำนวนพฤติกรรมของของไหลนาโนในการประยุกต์ใช้ในแบบจำลองคณิตศาสตร์ ข้อตกลงที่ีระหว่างผลลัพธ์แบบจำลองคณิตศาสตร์ และข้อมูลจากการทดลองที่มีอยู่ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสามารถประยุกต์ใช้ของไหลนาโนสำหรับการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน โดยทั่วไปพบว่า ค่าเลขนัสเซิลต์ (Nu) เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนอนุภาค และค่าเลขเรย์โนลด์ส (Re) และลดลง

ด้วยการเพิ่มระยะห่างของแผ่นดิสก์ ในทางกลับกันการเพิ่มขึ้นของพลังงานของเครื่องสูบน้ำที่เกี่ยวข้องอาจทำให้ข้อจำกัด บางอย่างในการประยุกต์ใช้งานของของไหลนาโนได้อย่างมีประสิทธิภาพในรูปแบบของการไหลตามแนวรัศมี

แนนดี้ พุตรา และคณะ (Nandy Putra; et al. 2011). ทำการ ศึกษาวิจัยโดยวิธีการทดลอง เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนของไมโครโปรเซสเซอร์ โดยการเพิ่มกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ และการเพิ่มขึ้นของขนาดไมโครโปรเซสเซอร์ ทำให้ค่าพลัสความร้อน มีค่าสูงมาก การเติบโตของเทคโนโลยีสารสนเทศเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 2 - 3 ปี ที่ผ่านมามีความต้องการไมโครโปรเซสเซอร์เพิ่มขึ้นทั้งจำนวน และ ความสามารถของคอมพิวเตอร์ สูงขึ้นด้วยเช่นกัน หน่วยประมวลผลกลาง (Central Processing Units: CPU) รุ่นก่อน ๆ มีทรานซิสเตอร์ จำนวน 1,170 ล้านตัวที่ฝังไว้ในตัวไมโครโปรเซสเซอร์ ทำให้ความร้อนสะสมภายในตัวไมโครโปรเซสเซอร์ จำนวนมาก เช่น กัน ความร้อนที่เกิดขึ้นใน CPU แบบไฮเอนด์ อยู่ที่ประมาณ 110 วัตต์ ถึง 140 วัตต์ ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้า และความถี่ของ CPU ที่เพิ่มมากขึ้น ระบบระบายความร้อนด้วยอากาศแบบดั้งเดิมไม่สามารถระบายความร้อนออกได้พอการเพิ่มจำนวนพัสดุระบบระบายความร้อนกับระบบระบายความร้อนแบบดั้งเดิมการระบายความร้อนก็ยังไม่พอ ทำให้ต้องปรับปรุงระบบระบายความร้อนให้มีความกระชับ และมีประสิทธิภาพสูงเพื่อทดแทนระบบดั้งเดิม งานวิจัยนี้ทำการศึกษากระบวนการระบายความร้อนโดยใช้ของไหลนาโนทำงานร่วมกันกับระบบระบายความร้อนแบบท่อความร้อน และแบบเทอร์โมอิเล็กทริก โดยทำการเปลี่ยนสัดส่วนความเข้มข้นของของไหลนาโนโดยปริมาตรกับน้ำ ผลลัพธ์ที่ได้จากเทคนิค นี้เปรียบเทียบกับเทคนิคการระบายความร้อนแบบดั้งเดิม พบว่าระบบระบายความร้อนแบบท่อความร้อนร่วมกับระบบเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้ของไหลนาโน เป็นสารทำงานสามารถระบายความร้อนออกจาก CPU ได้เป็นอย่างดี และพิสูจน์ได้ว่าของไหลนาโนมีศักยภาพที่จะใช้เป็นสารทำงานของระบบระบายความร้อน

ไพศาล นาผล และเศรษฐา กลางชาติ (Paisarn Naphon; & Setha Klangchart. 2011). ทำการ ศึกษาวิจัยโดยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาผลกระทบของตำแหน่งขาออกของลักษณะการถ่ายโอนความร้อนของเหลวแบบฉีดกระทบครีประบายความร้อนแบบสเกลลีเยนผืนผ้าขนาดเล็ก โดยใช้สมการสามมิติสำหรับการไหลของของเหลว และคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนใช้วิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์แบบไฟไนต์วอลุ่ม ใช้แบบจำลองการไหลปั่นป่วนแบบ $k-\epsilon$ เพื่อแก้รูปแบบการอธิบายพฤติกรรมถ่ายเทความร้อน ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองจะได้รับการยืนยันโดยข้อมูลจากการทดลองจริง ผลที่คาดการณ์ไว้เป็นข้อตกลงที่เหมาะสมกับข้อมูลที่วัดได้ ตำแหน่งของช่องขาออกมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความสม่ำเสมอของความเร็ว และอุณหภูมิ จากผลการศึกษาครั้งนี้คาดว่าจะนำไปสู่แนวทางที่จะทำให้สามารถออกแบบระบบระบายความร้อนเพื่อให้แน่ใจได้ว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะทำงานที่อุณหภูมิที่ปลอดภัยเหมาะสม

วิมล กุมาร และคณะ (Vimal Kumar; et al. 2011). ทำการ ศึกษาวิจัยโดยวิธีทดลอง เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อน ของไมโครฟลูอิด (Microfluidic) ในครีประบายความร้อนแบบจุลภาค (Microscale) ซึ่งเป็นกลไกการระบายความร้อน ที่เป็นทางเลือก และกำลังได้รับความสนใจอย่าง

มาก และมีแนวโน้มการเติบโตอย่างต่อเนื่อง การทดลองนี้ทำการทดลองแบบแบบเฟสเดียว และของไหลของสารทำงานผ่านครีบบางแบบจุลภาค ข้อมูลการทดลองวิเคราะห์จากปัจจัยความเสียดทานช่วงการไหลจากช่วงการไหลแบบราบเรียบถึงการไหลแบบปั่นป่วน และ ผลกระทบของความขรุขระที่มีผลกระทบต่อการไหลของของไหล ผลการทบทวนจากรูปร่างของครีบบางต่าง ๆ ผลการทดลองพบว่าครีบบางแบบผสมผสานมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานโดยพิจารณาวิเคราะห์จากตัวแปรต่าง ๆ เช่น ความสามารถในการบีบอัด การหดตัว ความขรุขระสัมผัส ความผันแปรของคุณสมบัติ และ ผลการกระจายความหนืด ค่าปริมาณตามช่วงการดำเนินงานของพวกเขา และลักษณะเฉพาะ เช่น ค่าเลขเรย์โนลด์ส (Re), ค่าเลขพริ้นด์เทิล (Pr), ค่าเลขสตราฮาล (Strouhal Number: St) และลักษณะการผสม

เยี่ย-ซู่ หยาง และเฟิง-เซียง ไ่ (Yue-Tzu Yang; & Feng Hsiang Lai. 2011). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนโดยการพาจากการไหลเวียนของของไหลนาโน อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3 - Water) ในระบบระบายความร้อนแบบไหลตามแนวรัศมีโดยใช้วิธีการแบบเฟสเดียว ทำการศึกษาเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรม ผลการศึกษารายงานแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มในทางเดียวกันกับผลการทดลองที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ ค่าเลขนัสเซลต์ (Nu) เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มของ ค่าเลขเรย์โนลด์ส (Re) และปริมาณสัดส่วนอนุภาคนาโนที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่าความดันตกคร่อมมีความสอดคล้องกับปริมาณสัดส่วนอนุภาคนาโนที่เพิ่มขึ้น สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของของไหลนาโน การจำลองภายใต้ภายใต้แรงดันคงที่ แสดงอัตราการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนสูงกว่าน้ำที่ค่าฟลักซ์ความร้อน 3,900 วัตต์ต่อตารางเมตร ขณะที่ฟลักซ์ความร้อนเพิ่มจากการเพิ่มประสิทธิภาพโดยใช้ของของไหลนาโน พบว่า ค่าเลขนัสเซลต์ เฉลี่ยลดลงจากค่าความต้านทานความร้อนภายในระบบ และค่าเลขนัสเซลต์ เฉลี่ยเพิ่มขึ้นประมาณ 4.0 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับค่าฟลักซ์ความร้อน 16,000 วัตต์ต่อตารางเมตร และ 34,000 วัตต์ต่อตารางเมตร และค่าความต้านทานความร้อนสามารถลดลงได้ 2.3 เปอร์เซ็นต์ และ 7.0 เปอร์เซ็นต์

อาเมียร์ ชาลโค ทาไบรซี และฮามิด ริซ่า เซฟ (Amir Shalchi-Tabrizi; & Hamid Reza Seyf. 2012). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีการทดลอง ในการศึกษาที่มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้สารละลายนาโนที่มีความแตกต่างกัน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่มีต่อปริมาณของอนุภาคที่แตกต่างกัน และสมรรถนะทางอุทกพลศาสตร์ และลักษณะการถ่ายเทความร้อนของอ่างความร้อนแบบหยด น้ำส้มผัสด (TMHS) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเป็นไปได้เมื่อใช้สารละลายของเหลวนาโนของอะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นสารหล่อเย็น และการเพิ่มประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้น ของอนุภาคเพิ่มขึ้น และลดขนาดของอนุภาคอย่างไรก็ตามการใช้ ของเหลวนาโน ยังก่อให้เกิดผลกระทบที่รุนแรงต่อพลังงานสูบน้ำ ที่เพิ่มขึ้นด้วยอนุภาคปริมาณอนุภาค และ ค่าเลขเรย์โนลด์ส (Re) สุดท้ายพบว่าการสร้างเอนโทรปีทั้งหมดลดลงเมื่อเพิ่มปริมาตร และจำนวนเรย์โนลด์ และลดขนาดของอนุภาค

โดริน ลีเลีย (Dorin Lele. 2012). ทำการศึกษาวิจัยโดยการนำเสนอการวิเคราะห์ความร้อน และอุทกพลศาสตร์ ของแผ่ระบายความร้อนขนาดเล็กที่มีท่อตรงขนาดเล็ก และหัวฉีดขาเข้าหลายตัว ส่วนหน้าตัดด้านในของท่อมีรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และวางแนวตรงกับแกนท่อ พิจารณา 4 รูปแบบ ที่แตกต่างกัน : ใน 3 แบบ มีหัวฉีดขาเข้า 3 หัวฉีด และอีก 1 แบบ มีหัวฉีดขาเข้า 5 หัวฉีด รูปแบบการไหลของของเหลวเป็น แบบราบเรียบ (Laminar) และน้ำที่มีคุณสมบัติของของเหลวผันแปรจะถูกใช้ เป็นของเหลวที่ใช้ในการทำงานพลัศความร้อนที่แผ่กระจายผ่านพื้นผิวด้านล่าง ของแผ่ระบายความร้อน คือ $q = 100$ วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ผลการระบายความร้อน และอุทกพลศาสตร์ของแผ่ระบายความร้อน ขนาดเล็กที่มีช่องป้อนหลาย ๆ ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการตั้งค่าทางเข้าสัมผัสเดียว สำหรับทุกกรณีการวิเคราะห์จะเพิ่มขึ้นโดยใช้หลักการจ่ายพลังงานคงที่ การพึ่งพาอาศัยแรงของตำแหน่ง และจำนวนของหัวฉีดขาเข้าที่มีต่อลักษณะความร้อนและอุทกพลศาสตร์ของแผ่ระบายความร้อนขนาดเล็ก

กิลส์ รอย และคณะ (Gilles Roy; et al. 2012). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน และพฤติกรรมทางอุทกพลศาสตร์ของของไหลนาโนชนิดต่าง ๆ ให้ไหลตามแนวรัศมีเพื่อหล่อเย็นอุปกรณ์ มีลักษณะการไหลแบบปั่นป่วนไหลคู่ขนานกับแผ่นดิสก์ไครฟ์การฉีดกระทบตามแนวแกนทำการประเมินรูปแบบการไหลปั่นป่วนหลายแบบ โดยใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน แบบ RANS และแบบจำลองย่อยแบบ $k-\varepsilon$, SST การฉีดกระทบของไหลแบบเฟสเดียวแล้วทำการศึกษาผลกระทบจาก อุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับของไหลนาโน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ถึงแม้จะมีการเพิ่มประสิทธิภาพ การถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโน ทุกชนิดการเปรียบเทียบสมรรถนะจากพลังงานแสดง ให้เห็นว่าไม่ได้เป็นตัวแทน ของสารหล่อเย็นที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับการใช้งาน และสภาพการไหลประเภทนี้

เฮช เอ โมฮัมหมัด และคณะ (H.A. Mohammed; et al. 2012). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีการทดลองลักษณะความปั่นป่วนของความร้อน และพลศาสตร์ของการไหลของของไหลนาโนฟลูอิด ในช่องที่ถูกแบ่งออกเป็นซี่ ๆ ด้วยการตรวจสอบเชิงตัวเลข ความต่อเนื่องของสมการโมเมนตัม และพลังงาน ได้รับการแก้ไขปัญหาโดยระเบียบวิธีการไฟไนต์วอลุ่ม (FVM) ผังด้านบน และด้านล่าง ของช่องถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิคงที่ มีการพิจารณารูปร่างของร่องซี่ ที่แตกต่างกันถึง 9 รูปแบบ ซึ่งมีรูปแบบซี่ร่อง 3 รูปแบบ ที่แตกต่างกัน โดยมีรูปร่างที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ ได้แก่ รูปสี่เหลี่ยม รูปสามเหลี่ยม และรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู และมีการแลกเปลี่ยนกัน อนุภาคนาโนชนิดต่าง ๆ 4 ชนิด อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3), ทองแดงออกไซด์ (CuO), ซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) และสังกะสีออกไซด์ (ZnO) มีขนาดอนุภาคนาโนที่ต่างกันในช่วง 25 นาโนเมตร ถึง 80 นาโนเมตร กระจายอยู่ในของเหลวที่แตกต่างกัน (น้ำ, กลีเซอริน, น้ำมันเครื่อง) ที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้มีการศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ค่าเลขเรย์โนลด์ส์ (Re) ที่ต่างกันในช่วง $5000 < Re < 20000$ และอัตราส่วนด้านระยะร่องซี่ที่แตกต่างกันในช่วง $0.5 \leq AR \leq 4$ เพื่อหาผลกระทบต่อการถ่ายเทความร้อนและของเหลว ลักษณะการไหล ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าร่องสามเหลี่ยมรูป

สี่เหลี่ยมผืนผ้ามี ค่าเลขนัสเซลล์ต์ (Nu) สูงที่สุดในรูปแบบร่องซี่อื่น ๆ ของเหลวนาโนซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) มีค่าเลขนัสเซลล์ต์ มากที่สุดเมื่อเทียบกับของเหลวนาโน ชนิดอื่น ๆ ค่าเลขนัสเซลล์ต์เพิ่มขึ้น เมื่อสัดส่วนปริมาตรของ อนุภาคนาโน, ค่าเลขเรย์โนลด์ส์ และอัตราส่วนกว้างยาว เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามมันลดลงเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคนาโนเพิ่มขึ้นพบว่า กลีเซอริน - ซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) แสดงการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับของเหลวที่ผ่านการทดสอบชนิดอื่น ๆ

ฮานา เบลเลอร์โวา และคณะ (Hana Bellerova; et al. 2012). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีทดลองเพื่อศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับ การถ่ายเทความร้อนโดยใช้วิธีการห้วนฉีดหล่อเย็น เพื่อประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยของไหลนาโนอะลูมินาออกไซด์ (Alumina - Water) จากการตรวจสอบความร้อนที่ฝังอยู่ในแผ่นทดสอบ ที่ให้ความร้อนเส้นโค้งความเย็นซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิชั่วคราว ของแผ่นได้รับการตรวจวัดในสภาพการผันผองต่าง ๆ เทคนิคการถ่ายเทความร้อนผกผันถูกนำมาใช้เพื่อแปลงเส้นโค้งความเย็นที่วัดได้เหล่านี้ลงในค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Coefficient: HTC) ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน มีเสถียรภาพมากเมื่อค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำกว่า 3 เปอร์เซ็นต์ ของค่าเฉลี่ย และ ค่าเฉลี่ยเดียวอาจเป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพของการระบายความร้อน ด้วยการฉีดพ่นสำหรับทุกกรณีที่พิจารณา ผลการวิจัยยังแสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของอัตราการใช้ของไหลตามความสัมพันธ์แบบกฏหมายอำนาจ พบว่ามีการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ในการระบายความร้อนแบบสเปรย์ลดลงประมาณ 45 เปอร์เซ็นต์ เมื่อปริมาณของอนุภาคนาโนเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 0.1645 การลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการผันผองเนื่องจากการมีอนุภาคนาโนได้รับการวิเคราะห์โดยเฉพาะและได้มีการวิเคราะห์สูตรที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบนี้เพื่ออธิบายถึงผลรวมของอนุภาคนาโนที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

เมาริซิโอ กิรอลโด และคณะ (Mauricio Giraldo; et al. 2012). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีการคำนวณ ของเหลวนาโนเป็นกลยุทธ์ใหม่ในการปรับปรุงลักษณะการถ่ายโอนความร้อนของของเหลวโดยการเพิ่มอนุภาคของแข็ง ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่า 100 นาโนเมตร การทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีนี้สามารถเพิ่มการนำความร้อนได้ดีกว่าที่คาดการณ์ไว้ในทฤษฎีของแมกซ์เวลล์ อย่างไรก็ตามยังไม่เป็นที่ชัดเจนว่ากลไกใดที่ทำให้การเพิ่มขึ้นนี้เป็นส่วนใหญ่ในการนำความร้อน ดังนั้นจึงมีความพยายามที่ยิ่งใหญ่ในการตรวจสอบปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในของเหลว บทความนี้แสดงการจำลองเชิงตัวเลขโดยตรงของการไหล และพฤติกรรมทางความร้อนของนาโนฟลูอิดที่บรรจุอนุภาคนาโนอลูมินาซึ่งจะพิจารณาถึงผลกระทบของการมีปฏิสัมพันธ์ของอนุภาค และอนุภาคกับของเหลว ใช้วิธีบาวนด์รีเอลิเมนต์ (BEM) เพื่อให้สามารถจัดการกับปัญหาขอบเขตที่เคลื่อนที่ได้ สูตรนี้ใช้ในการจำลองพฤติกรรมและการวิวัฒนาการของเวลาของอะลูมิเนียมนาโนที่ความเข้มข้น 30 นาโนเมตร และความเข้มข้นของอนุภาค 6 ชนิด เพื่อหาพื้นที่การไหลการกระจายของอุณหภูมิ และการไหลของความร้อนทั้งหมดผ่านโดเมน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงกระแสการ

หมุนเวียนที่เกิดจากการปรากฏตัวของอนุภาคนาโนซึ่งจะเพิ่มการไหลของความร้อนทั้งหมดในโพรงตามที่คาดไว้ความเข้มข้นของอนุภาคเพิ่มการไหลของความร้อนโดยรวมที่มีผลกระทบต่อไม่เพียงแต่ส่วนที่เป็นสื่อกระแสไฟฟ้าในการถ่ายเทความร้อนเท่านั้น แต่ยังรวมถึงส่วนที่มีการพาความร้อนอีกด้วย

เอ็ม ราฮิมิ-เอสโบ และคณะ (M. Rahimi-Esbo; et al. 2012). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีการเชิงตัวเลข ในบทความนี้มีการตรวจสอบตัวเลขในรูปแบบการไหลแบบไม่อัดแน่นแบบสองมิติในเครื่องเจ็ทไฮดรอลิกที่ถูกจำกัดไว้ในระบบไหลเวียนเลือดผนังตัดสามารถปรับปรุงการถ่ายเทความร้อนโดยการเพิ่มพื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด และเปลี่ยนพฤติกรรมของการไหล ผลลัพธ์ที่ได้จากโครงสร้างการไหลที่ ค่าเลขเรย์โนลด์ส ต่าง ๆ สำหรับการพัฒนาเจ็ทแบบ อสมมาตร สม่่าเสมอที่ค่าต่าง ๆ ของอัตราส่วนความกว้างของท่อต่ออากาศ (อัตราส่วนกว้างยาว) และแอมพลิจูด ที่แตกต่างกัน การนำเสนอการคำนวณมีความสัมพันธ์สอดคล้อง ที่ดีกับผลการทดลองในการ ทบทวนวรรณกรรม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่ม ค่าเลขเรย์โนลด์ส อัตราส่วน ความกว้างยาว และแอมพลิจูดของค่าเฉลี่ยของ ค่าเลขนัสเซลต์ (Nu) จะเพิ่มขึ้น

โอโรนซิโอ แมนคา และคณะ (Oronzio Manca; et al. 2012). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีการเชิงตัวเลข ในงานวิจัยนี้ได้มีการตรวจสอบเชิงตัวเลขเกี่ยวกับการพาความร้อนด้วยของไหลนาโน ประกอบด้วยน้ำ และอนุภาคนาโนอะลูมิเนียมในช่องสองมิติ มีการไหลของความร้อน สม่่าเสมอบนผนังภายนอก ใช้วิธีการแบบเฟสเดียวเพื่อสร้างแบบจำลองของเหลว และคุณสมบัติของของไหลจะถือว่ามีความคงตัว ขนาดของอนุภาคมีค่าเท่ากับ 38 นาโนเมตร และสัดส่วนปริมาตรของอนุภาคนาโนพิจารณาตั้งแต่ 0 ถึง 4 เปอร์เซ็นต์ รูปแบบการไหลเป็นการไหลแบบปั่นป่วน และค่าเลขเรย์โนลด์ (Re) อยู่ในช่วง 20,000 - 60,000 นอกจากนี้รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส และรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และการจัดเรียงซี่ร่อนรูปแบบต่าง ๆ มีการวิเคราะห์ในแง่ของมิติความสูง และระยะพิทของเอลิเมนต์ที่แตกต่างกัน การตรวจสอบทำได้โดยการใช้วิธีรหัส Fluent และจุดมุ่งหมายของการตรวจสอบ คือการจัดเรียงซี่ร่อน เพื่อให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูง และความดันต่ำลดลงเมื่อมีการเกิดของเหลวนาโนในน้ำอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ผลการวิจัยแสดงให้เห็นในแง่ของอุณหภูมิ และสนามของความเร็ว และรูปแบบของค่าเฉลี่ยของ ค่าเลขนัสเซลต์ (Nu) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยเฉลี่ย และกำลังสูบน้ำที่ต้องการ การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของปริมาตรของอนุภาค แต่จะมาพร้อมกับการเพิ่มกำลังสูบน้ำที่ต้องการ การถ่ายเทความร้อนจะดีขึ้นเนื่องจาก ค่าเลขเรย์โนลด์สจะเพิ่มขึ้น แต่ยังเพิ่มการสูบน้ำเพิ่มขึ้น

พี เซลวากุมาร และเอส ชวัเรส (P. Selvakumar; & S. Suresh. 2012). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีการทดลองการกระจายความร้อนในส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์ เป็นประเด็นที่สำคัญ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความร้อน ของฟลักซ์ของชิ้นส่วน ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และความต้องการขนาดจิ๋ว ในขนาดที่เพิ่มขึ้น ในงานวิจัยนี้ของเหลวนาโน น้ำ - ทองแดงออกไซด์ ของเศษส่วนปริมาตร 0.1 เปอร์เซ็นต์ และ 0.2 เปอร์เซ็นต์ เตรียมโดยการกระจายตัวของอนุภาคนาโนในน้ำปราศจากไอออน มีบล็อกน้ำทองแดงที่มีช่องผอมบางขนาด $55 \times 55 \times 19$ มิลลิเมตร ที่ใช้สำหรับ

การศึกษา อุณหภูมิของอินเตอร์เฟซของบล็อกน้ำวัดได้ และลดลงสูงสุดที่ 1.15 องศาเซลเซียส เมื่อใช้สารของเหลวนาโน ที่มีปริมาตร 0.2 เปอร์เซ็นต์ เป็นของเหลวที่ใช้ในการทำงานเมื่อเทียบกับน้ำปราศจากไอออน ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของอนุภาคของน้ำพบว่ามีความเพิ่มขึ้นตามอัตราการใช้ของปริมาตร และอนุภาคของอนุภาคนาโน และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด 29.63 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับน้ำปราศจากไอออน กำลังสูบน้ำปราศจากไอออน และ ของเหลวนาโน คำนวณจากความดันลดลงในบล็อกน้ำ และ การเพิ่มกำลังการสูบน้ำโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 15.11 เปอร์เซ็นต์ สำหรับส่วนของปริมาตร ของเหลวนาโน 0.2 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับน้ำปราศจากไอออน ความสัมพันธ์เป็น ข้อเสนอสำหรับ ค่าเลขนัสเซลล์ (Nu) ที่เหมาะสมกับ ค่าเลขนัสเซลล์ (Nu) การทดลองเท่ากับ ± 7.5 เปอร์เซ็นต์

เซียง ลี และคณะ (Qiang Li; et al. 2012). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีทดลองเพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนโดยการฉีดกระทบซึ่งเป็นเทคนิคที่สำคัญสำหรับการจัดการความร้อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความร้อนสูง โดยการฉีดกระทบของสารทำงานบนพื้นผิวอุปกรณ์ที่มีความร้อนสูง การทดลองนี้ใช้สารทำงานของไหลนาโนทองแดง (Cu - Water) ขนาดของอนุภาคทองแดง (Cu) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 นาโนเมตร และ 100 นาโนเมตร ลักษณะการฉีดกระทบของหัวฉีดเดี่ยวจมอยู่ภายใต้ของเหลวที่ใช้เป็นสารทำงาน โดยศึกษาถึงผลกระทบของความเข้มข้นของอนุภาคนาโน ค่าเลขเรย์โนลด์ ระยะห่างของหัวฉีดกับผิวงาน อุณหภูมิของของเหลว และเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคนาโน ที่มีต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของการกระทบของของไหลนาโน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนมีผลต่อการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในของเหลวฐาน ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบถ่ายเทของของไหลนาโนที่มีสัดส่วนโดยปริมาตรกับน้ำที่ 3.0 เปอร์เซ็นต์ และ 52 เปอร์เซ็นต์ สูงกว่าน้ำบริสุทธิ์

โซราบ มิตร และคณะ (Sourav Mitra; et al. 2012). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบการถ่ายเทความร้อนของน้ำร้อนไททาเนียมออกไซด์ (TiO_2) และท่อนาโนคาร์บอนนาโนที่มีความหนาแน่นสูง (Water - MWCNT) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราการระบายความร้อนจะเพิ่มขึ้นโดยใช้ของไหลนาโนเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำ แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนแบบผกผันแบบหนึ่งมิติแบบหนึ่งมิติได้รับการพัฒนาเพื่อถ่ายเทฟลักซ์ความร้อนออกจากผิวเหล็กกล้าร้อน นอกจากนี้ยังพบว่าในกรณีปัจจุบันนำไปประยุกต์ใช้กับการเคลือบฟิล์ม การเปลี่ยนสถานะการต้มชั่วคราว การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นกับผิวโลหะทันทีทันใด และดีกว่าการฉีดกระทบโดยใช้น้ำเป็นสารทำงาน ในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาลักษณะการถ่ายโอนความร้อนแบบเดือดของน้ำไททาเนียมออกไซด์ (TiO_2) และท่อนาโนคาร์บอนนาโนคาร์บอน (Water - MWCNT) การระบายความร้อนของแผ่นเหล็กที่ระบายความร้อนด้วยของไหลนาโนที่สัดส่วนโดยน้ำหนักกับน้ำ 0.1 เปอร์เซ็นต์ และ 0.01 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการระบายความร้อนดีกว่าน้ำ ในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาลักษณะการถ่ายโอนความร้อนแบบเดือดของน้ำไททาเนียมออกไซด์ (TiO_2) และท่อนาโนคาร์บอนนาโนคาร์บอน (Water - MWCNT) ภาพด้านล่างแสดงกราฟการระบายความร้อน ของแผ่นเหล็กที่ระบายความร้อน ด้วยน้ำ 0.1 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนัก น้ำไททาเนียมออกไซด์ (TiO_2)

และ 0.01 น้ำหนัก ของไหลนาโน Water - MWCNT จากรูปที่อัตราการระบายความร้อนจะเพิ่มขึ้น โดยการใช้ ของไหลนาโน เมื่อเทียบกับน้ำ

ท็อง-โบ ซาง และคณะ (Tong Bou Chang; et al. 2012). ทำการ ศึกษาวิจัยโดยวิธีการ ทดลองดำเนินการเป็นผลของสัดส่วนปริมาตรอนุภาคต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนด้วยการพ่น ของไหลนาโนที่มีน้ำปราศจากไอออน และอนุภาคอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่มีเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 35 นาโนเมตร ทำการทดสอบโดยใช้พื้นผิวร้อนแบบเรียบแนวราบ โดยใช้หัวฉีดที่มีเส้น ผ่านศูนย์กลางของรูหายใจ 0.7 มิลลิเมตร และระยะผิวหน้าของหัวฉีดถึง 17 มิลลิเมตร ค่าสเปคตรัม ของสเปรย์มีค่าแตกต่างกันไปในช่วง 26.433 - 176.751 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ในขณะที่เศษ อนุภาคมีการระบุเป็น 0 เปอร์เซ็นต์, 0.001 เปอร์เซ็นต์, 0.025 เปอร์เซ็นต์ หรือ 0.05 เปอร์เซ็นต์ พบว่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุดจะได้รับการใช้เศษอนุภาคขนาด 0.001 เปอร์เซ็นต์ องค์ประกอบพื้นผิวของตัวอย่างพ่นจะสังเกตได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผล การทดลองแสดงให้เห็นว่าพื้นผิวที่ฉีดด้วย ของเหลวนาโน ที่มี 0.025 เปอร์เซ็นต์ปริมาตร หรือ 0.05 เปอร์เซ็นต์ปริมาตร ของอนุภาคนาโนมีอะลูมิเนียม (Al) จำนวนน้อย อย่างไรก็ตาม ที่ระบายความ ร้อนด้วยของเหลวนาโน ที่มีอนุภาคขนาดอนุภาค 0 เปอร์เซ็นต์ หรือ 0.001 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีร่องรอย ของอะลูมิเนียม (Al)

วีระพันธ์ ดั่งทองสุข และสมชาย วงศ์วิเศษ (Weerapun Duangthongsuk; & Somchai Wongwises. 2012). ทำการ ศึกษาวิจัยโดยวิธีการสร้างแบบจำลองของเหลวนาโน เป็นสาร แฉนวนลอยของอนุภาคที่มีขนาดเล็กที่สุดในน้ำมันพื้นฐานธรรมดาซึ่งจะเพิ่มสมรรถนะในการถ่ายเท ความร้อนของของเหลวฐานเดิม พวกเขาแสดงประสิทธิภาพการระบายความร้อนที่สูงขึ้นกว่า ของเหลวฐานโดยเฉพาะอย่างยิ่งในแง่ของการนำความร้อน และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการศึกษาจำนวนมากเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน และลักษณะการไหล ของสารนาโนฟลูอิดทั้งในเชิงทดลอง และตามทฤษฎี วัตถุประสงค์ของบทความนี้คือ การนำเสนอ รูปแบบการกระจายตัวสำหรับทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มนาโนภายใต้ สภาวะการไหลแบบราบเรียบ อนุภาคนาโนไททาเนียมออกไซด์ (TiO_2) กระจายตัวอยู่ในน้ำที่มี สัดส่วนปริมาตรต่าง ๆ และไหลในท่อตรงแนวนอนภายใต้การไหลของความร้อนผนังคงที่ ถูก นำมาใช้ นอกจากนี้ค่าที่คาดการณ์ได้เปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ ฮี และคณะ ในการศึกษา ในครั้งนี้ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ารูปแบบที่เสนอสามารถใช้ทำนายพฤติกรรมถ่ายเทความร้อนของแผ่นฟิล์มนาโนได้ด้วยความถูกต้องเหมาะสม นอกจากนี้ยังพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเท ความร้อนที่คาดการณ์ไว้ในรูปแบบปัจจุบันแตกต่างจากที่ได้จากสมการของ ลี และ ซวน ประมาณ 3.5 เปอร์เซ็นต์ ที่ปริมาตรอนุภาค 2.0 เปอร์เซ็นต์

เอ อี คาบีล และคณะ (A.E. Kabeel; et al. 2013). ทำการ ศึกษาวิจัยเชิงการทดลองการ ใช้ nano ของเหลวมีความคิดว่ามีศักยภาพในการเสริมสร้างลักษณะการถ่ายเทความร้อนของแผ่น แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ แผ่นลูกฟูก - PHE แผ่นลูกฟูกเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้งาน ได้หลากหลายประเภทและกว้างที่สุด ในการศึกษาครั้งนี้ได้มีการสร้างชุดทดสอบทดลอง เพื่อศึกษา

ลักษณะความร้อนของ PHE; ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนประสิทธิภาพการส่งกำลัง และ ความดันลดลงที่ระดับปริมาตรที่แตกต่างกันของวัสดุอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) (1 - 4 เปอร์เซ็นต์) ในน้ำเหลวบริสุทธิ์เป็นของเหลวฐาน ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่วัดได้เปรียบเทียบ และ ตรวจสอบกับแบบจำลองทางทฤษฎีพบว่า มีความสอดคล้องกันที่สมเหตุสมผล การเพิ่มขึ้นของค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และการส่งผ่านพลังงานเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดโดยการเพิ่มความ เข้มข้นของวัสดุนาโน ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 13 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ ความเข้มข้นของสารของเหลวนาโน ที่ 4 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นถึง 13 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้ความไม่แน่นอนที่ 9.8 เปอร์เซ็นต์ ตามค่าคงที่ ถ้า เทียบกับอัตราการไหลคงที่การเพิ่มประสิทธิภาพชั้นขอบนี้จะลดลงอีก ดังนั้นการใช้นาโนเหลวเป็น ศักยภาพในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในแผ่นลูกฟูก PHE จึงเป็นที่น่าสงสัยสำหรับการศึกษาใน ปัจจุบัน ความดันลดลง และกำลังสูบน้ำที่ต้องการเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเหลวนาโน และ ค่าเลขเรย์โนลด์ส ค่าความดันลดลงสูงสุดอยู่ที่ 45 เปอร์เซ็นต์ เหนือค่าของเหลวฐานที่ 4 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร ของเหลวนาโน ในขณะที่กำลังสูบน้ำได้รับการบันทึก 90 เปอร์เซ็นต์ สูงขึ้นเนื่องจากผลสอง ของการเพิ่มขึ้นทั้งในความดันลดลง และการไหลเวียนของปริมาตรที่สภาพ ค่าเลขเรย์โนลด์ส คงที่ ต้องไหลปริมาณมากขึ้นเพื่อชดเชยความหนืดโคเนติก กับค่าเลขเรย์โนลด์ส งานวิจัยต่อไปสำหรับ สาขาเดียวกันนี้จำเป็นต้องมีการลบความไม่แน่นอนระหว่างนักวิจัยที่ต่างกัน

บี จาบีรี และคณะ (B. Jaber; et al. 2013). ทำการศึกษาวิจัยเชิงการทดลอง เพื่อศึกษา ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Coefficient: HTC) แบบการพาความร้อน ของเหลวนาโนอะลูมิเนียมออกไซด์ ($\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{H}_2\text{O}$) โดยใช้นิรนาถของเหลวบนแผ่นกลมแบน ของเหลวนาโนเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ที่วัดได้เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเท ความร้อนเมื่อใช้น้ำ ในกรณีนี้ของเหลวนาโน ถูกเตรียมด้วยความเข้มข้นของอนุภาคนาโน ที่ต่างกัน ในน้ำ pH ของของเหลวได้รับการปรับให้เหมาะสมกับค่า และโซเดียมโดเดซิลเบนโซอิกซัลเฟต (SDBS) ถูกเติมเข้าไปในของเหลวเป็นตัวทำละลาย สารประกอบของเหลวเหล่านี้แสดงให้เห็นว่ามี เสถียรภาพ และในระหว่างการทดลองไม่มีการตกตะกอน เพื่อศึกษาผลกระทบของ ค่าเลขเรย์โน ลด์ส รวมถึงความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ และ ค่าเลขเรย์โนลด์สเฉลี่ย มีค่าแตกต่างกันไปในช่วง 4,200 - 8,200 และความเข้มข้นของอนุภาคนาโน แตกต่างกันอย่างระหว่าง 0.0198 ถึง 0.0757 เปอร์เซ็นต์น้ำหนัก ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ถึงแม้ว่าสารของเหลวนาโน จะเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน การเพิ่มประสิทธิภาพสูงสุดจะ สอดคล้องกับของเหลวนาโน ที่มีความเข้มข้นของอนุภาคนาโน 0.0597 เปอร์เซ็นต์น้ำหนัก และการ เพิ่มอนุภาคนาโนไม่ได้เป็นประโยชน์ ในความเป็นจริงความเข้มข้นของอนุภาคนาโน 0.0757 เปอร์เซ็นต์น้ำหนัก แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มประสิทธิภาพต่ำสุดของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน การเพิ่มประสิทธิภาพสูงสุดของค่าเฉลี่ยของเหลวนาโนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน เทียบกับน้ำประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ สำหรับที่ ค่าเลขเรย์โนลด์ส 4,200 ค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์

การถ่ายเทความร้อนของเหลวนาโน ยังคงค่าคงที่กับการเพิ่มขึ้นของ ค่าเลขเรย์โนลด์ส์ เนื่องจากการพาของนาโน

ฮามิด ริซ่า เซฟ และคณะ (Hamid Reza Seyf; et al. 2013). ทำการศึกษาวิจัยเชิงการทดลองในบทความนี้ นำเสนอรูปแบบสามมิติ ที่อธิบายถึงลักษณะความร้อน และอุทกพลศาสตร์ของแผงระบายความร้อนแบบท่อขนาดเล็ก ที่มีการฉีดกระทบกันแบบสัมผัสกับวัสดุเปลี่ยนเฟสของนาโนเอนแคปซูลเลต (Nano - Encapsulated Phase Change Materials: NEPCM) เป็นสารหล่อเย็น ในการศึกษาครั้งนี้ ออกตะเตกเคน (Octadecane) สำหรับ NEPCM และโพลีอัลฟาโอเลฟิน (Polyalphaolefin: PAO) ใช้เป็นของเหลวพื้นฐานสมการความต่อเนื่องโมเมนตัม และสมการพลังงานจะได้รับการแก้ไขโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite Volume Method: FVM) แบบจำลองนี้ได้รับการตรวจสอบโดยการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับข้อมูลที่มีอยู่ในการทบทวนวรรณกรรม ผลของพารามิเตอร์ที่สำคัญรวมถึงความเข้มข้นของมวล และช่วงการหลอมของ NEPCM รวมทั้ง ค่าเลขเรย์โนลด์ส์ (Re) เมื่อมีความสม่ำเสมอของอุณหภูมิความต้านทานความร้อน ค่าเลขนัสเซิลต์ (Nu) ความดันตกคร่อม และการสร้างเอนโทรปี ที่เกิดขึ้นในระบบจะถูกตรวจสอบ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเติม NEPCM ลงในของเหลวจะนำไปสู่การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนอย่างมาก อย่างไรก็ตามการใช้สารละลายของ NEPCM เป็นสารหล่อเย็นยังก่อให้เกิดผลกระทบรุนแรงต่อความดันที่ลดลงซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของมวล และค่าเลขเรย์โนลด์ส์ พบว่าการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของอนุภาคนาโน ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ ด้านเข้า และช่วงการหลอมของ NEPCM ส่งผลให้ ค่าเลขนัสเซิลต์ สูงขึ้นความสม่ำเสมอของอุณหภูมิที่ดีขึ้น และความต้านทานต่อความร้อนลดลง นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการเกิดขึ้นของเอนโทรปีของสารละลาย พบว่าการเกิดขึ้นของเอนโทรปีทั้งหมดลดลงเมื่อความเข้มข้นของมวล และค่าเลขเรย์โนลด์ส์ เพิ่มขึ้น

มิชาล ดรซซกา และคณะ (Michal Drzazga; et al. 2013). ทำการศึกษาวิจัยเชิงการทดลอง มีวัตถุประสงค์ เพื่อหาผลกระทบของสารลดการตึงผิวต่อ สมรรถนะการลดแรงตึงของน้ำ และของไหลนาโนโลหะออกไซด์ ได้ทำการตรวจสอบสารลดแรงตึงผิว 2 ชนิด (Rokacet O7 และ Rokanol K7) และของเหลวนาโนทองแดงออกไซด์ (II) น้ำเป็นของเหลวฐานหาปัจจัยความเสียดทานของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร ค่าเลขเรย์โนลด์ส์ ระหว่าง 8,000 ถึง 50,000 ตามกำหนด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเติมสารลดแรงเสียดทานของสารลดการตึงผิวทำให้ลดแรงเสียดทานของน้ำ และของเหลวนาโน ผลการลดแรงตึงมีความคล้ายคลึงกันทั้งสองกรณีการปรากฏตัวของอนุภาคนาโนในระบบไม่มีผลต่อการลดแรงเสียดทาน

แซนดิพ ซาร์การ์ และคณะ (Sandip Sarkar; et al. 2013). ทำการศึกษาวิจัยเชิงการทดลองเสถียรภาพการไหลของการไหลเวียนของสารนาโนที่ไหลผ่านกระบอกสูบสี่เหลี่ยมจะถูกตรวจสอบโดยการสลายตัวของโหมดไดนามิก (Dynamic Mode Decomposition: DMD) ปริมาณพลังงานที่อยู่ในแต่ละโหมดของเหลวนาโน น้ำ - ทองแดง พบว่ามีค่าสูงกว่าของเหลวนาโน น้ำ - อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ผลการทดลอง DMD แสดงให้เห็นว่า ของเหลวนาโน น้ำ - ทองแดง มี

โครงสร้างขนาดเล็กมากขึ้นในโหมดความถี่สูงกว่า เมื่อเทียบกับของเหลวนาโน น้ำ - อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) โหมดไดนามิกชั่วขณะ ที่เด่นที่สุดจะสอดคล้องกับค่าเฉพาะของความถี่ต่ำ $\lambda = (0.99374, \pm 0.1117)$ สำหรับของเหลวนาโน น้ำ - อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และ $\lambda = (0.99451, \pm 0.10464)$ สำหรับของเหลวนาโน ของ น้ำ - ทองแดง ปริมาณของพลังงานในการไหลเฉื่อยของของเหลวฐานที่ระดับ ค่าเลขชี้กำลัง - 0.5 พบมากที่สุดเมื่อเทียบกับของเหลวนาโน

โทมัส อาร์ บาร์เรตต์ และคณะ (Thomas R. Barrett; et al. 2013). ทำการศึกษาวิจัยเชิงการทดลอง สมรรถนะทางความร้อนของส่วนประกอบของฟลักซ์ความร้อนสูงในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟิวชั่น อาจเพิ่มขึ้นอย่างมากโดยการใช้สารหล่อเย็นของของเหลวนาโน สารแขวนลอยของของเหลวที่มีความเข้มข้นต่ำของอนุภาคนาโนที่เป็นของแข็ง อย่างไรก็ตามก่อนที่จะถูกพิจารณาว่าเป็นไปได้สำหรับฟิวชั่นต้องมีการตรวจสอบพฤติกรรมในระยะยาว ของเหลวนาโน รายงานนี้การทดลองซึ่งกำลังเตรียมที่จะให้ข้อมูล เกี่ยวกับเสถียรภาพของเหลวนาโน การตกตะกอน และการพังทลายในอุปกรณ์ไฮเปอร์เวปโตรอน (Hyper Vapotron) มีการอธิบายขั้นตอนการสังเคราะห์ และประเมินคุณภาพของเหลวนาโน และมีการอธิบายวิธีวิเคราะห์ตัวอย่างของเหลว ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองที่ยาวนานนี้คาดว่าจะช่วยให้สามารถประเมินค่าเริ่มต้นของความเหมาะสมของเหลวนาโน เป็นสารหล่อเย็นในเครื่องปฏิกรณ์ฟิวชั่น

ที ยูเซฟา และคณะ (T. Yousefi; et al. 2013). ทำการศึกษาวิจัยเชิงการทดลอง ได้ใช้หัวฉีดของเหลวนาโน อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่ระดับปริมาตรสัดส่วนต่าง ๆ (0.02 เปอร์เซ็นต์, 0.05 เปอร์เซ็นต์, 0.1 เปอร์เซ็นต์ และ 0.15 เปอร์เซ็นต์) ในแนวตั้งบนยอดของแผ่นรูปตัววี ได้ทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของหัวฉีดของเหลว และค่าของมันเทียบกับของน้ำ การทดสอบได้ดำเนินการภายใต้การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) ด้วย ค่าเลขเรย์โนลด์ส ตั้งแต่ 1,732 ถึง 2,250 ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้ของเหลวนาโน อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่สัดส่วนปริมาณน้อย 0.02 เปอร์เซ็นต์ และ 0.05 เปอร์เซ็นต์ ผลการเพิ่มประสิทธิภาพทั้งคู่เฉพาะจุด และค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และผลกระทบเชิงบวกเหล่านี้ เพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่ม ค่าเลขเรย์โนลด์ส สำหรับสารละลายของเหลวนาโน ที่มีส่วนของปริมาตรที่มากขึ้น 0.1 เปอร์เซ็นต์ และ 0.15 เปอร์เซ็นต์ มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ที่ค่าเลขเรย์โนลด์ส ตั้งแต่ 1,732 ถึง 2,250 ลดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในเฉพาะจุด และค่าเฉลี่ยได้ลดลงเมื่อเพิ่มค่าเลขเรย์โนลด์ส อย่างไรก็ตาม ค่าเลขเรย์โนลด์ส ที่มากกว่า 2,250 ผลกระทบเหล่านี้ลดลง และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นแสดงว่าการใช้ของเหลวนาโน ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในเฉพาะจุด และค่าเฉลี่ย ของน้ำที่เพิ่มขึ้นในกรณีของสารของเหลวนาโน ที่มีปริมาตรร้อยละ 0.05 มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 21.7 และ 13.91 ตามลำดับ

ยี่มิน เจวียน และคณะ (Yimin Xuan; et al. 2013). ทำการศึกษาวิจัยโดยการทดลอง สารลดแรงตึงผิวหรือสารช่วยกระจายตัว มีความสำคัญสำหรับการเตรียมสารละลายของเหลวนาโน ที่มี

เสถียรภาพ และอทธิพลของพวกมันอาจถูกละเลยในระหว่างการประเมินผลการเพิ่มประสิทธิภาพ ผลกระทบของเหลวนาโน ในบทความนี้เราได้รายงานผลการตรวจสอบผลการทดลองเกี่ยวกับ อธิทธิพลของแรงตึงผิว โซเดียมโดเดซิลเบนโซอิกซัลเฟต (SDBS) เกี่ยวกับประสิทธิภาพการถ่ายเท ความร้อนของของเหลวนาโน สารละลายของเหลวนาโน น้ำ - ทองแดง มีปริมาตร 3 ส่วน และมวล ความเข้มข้นของ SDBS 2 ส่วน ผลจากการทดลองพบว่าสารลดแรงตึงผิวมีผลต่อสมบัติการขนส่ง และสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของของเหลวนาโน และยับยั้งการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเท ความร้อนของสารแขวนลอย

แอมแปร์ เอ เส็ง และคณะ (Ampere A. Tseng; et al. 2014). ทำการศึกษาวิจัยเชิง วิเคราะห์การทดลองการสเปย์ระบายความร้อนด้วยสารละลายไททาเนียมนาโนที่มีน้ำ อุณหภูมิของ แผ่นทดสอบภายใต้สภาวะการพ่นละอองต่าง ๆ นำเทคนิคการนำความร้อนผกผันมาประยุกต์ใช้ในการ เปลี่ยนอุณหภูมิที่วัดได้เหล่านี้เป็นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Coefficients: HTC's). พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น ลอการิทึม กับปริมาณ ของฟลักซ์ แต่ลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอนุภาคนาโน การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ได้ดำเนินการ เพื่อหาจำนวนการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการเพิ่มขึ้นของอนุภาคนาโน และยืนยันว่าสาเหตุสำคัญที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลง คือ ความแตกต่าง ในผลกระทบ (หรือการปะทะ) ระหว่างอนุภาคนาโนที่แข็ง และละอองของเหลว การศึกษา เปรียบเทียบผล การค้นพบในปัจจุบันกับผลการวิจัยที่เผยแพร่ ก่อนหน้านี้ได้ถูกนำมาใช้ และพบว่า ผลการเปรียบเทียบทั้งหมดสอดคล้อง กับสภาพการระบายความร้อนด้วยการฉีดด้วยของไหลนาโน หรือหัวฉีด ที่แตกต่างกัน ผลกระทบจากการใช้ของไหลนาโน ไททาเนียมในน้ำแทนการใช้ของไหล นาโน อะลูมินาในน้ำ และการใช้หัวฉีดแบบเติมรูปแบบแทนการใช้หัวฉีดที่เป็นของแข็ง และประเมิน ความแตกต่างของผลกระทบเหล่านี้

เคลาดิโอ เซียนฟรินิ และคณะ (Claudio Cianfrini; et al. 2014). ทำการศึกษาวิจัยเชิง การจำลองเชิงตัวเลข การพาความร้อนแบบธรรมชาติแบบราบเรียบ ของไหลนาโน ภายในช่อง สี่เหลี่ยมจัตุรัสบางส่วนที่ให้ความร้อนที่ด้านใดด้านหนึ่ง และระบายความร้อนที่ด้านตรงข้ามจะถูก ศึกษาเป็นตัวเลข รหัสคำนวณตามพื้นฐานอัลกอริทึม SIMPLE - C ใช้สำหรับการแก้ปัญหาของ ระบบของมวลโมเมนต์ และการถ่ายเทพลังงานที่ควบคุมสมการซึ่งสมบัติทางอุณหพลศาสตร์เป็น สมบัติที่มีประสิทธิภาพของไหลนาโน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำความร้อนที่มีประสิทธิภาพ และ ความหนืดแบบไดนามิก จะถูกคำนวณโดยใช้สมการเชิงประจักษ์สองชุดขึ้นอยู่กับชุดข้อมูลการ ทดลองที่มีอยู่ในการทบทวนวรรณกรรม ในขณะที่คุณสมบัติสมบัติที่มีความเกี่ยวข้องอื่น ๆ ได้รับความ ประเมินโดยทฤษฎีการผสมแบบเดิม ๆ การจำลองจะดำเนินการในสมมติฐานของสมบัติที่มี ประสิทธิภาพขึ้นกับอุณหภูมิโดยใช้เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคนาโนที่หาค่า และปริมาณ ปริมาตรขนาด ของโพรงความยาวของเครื่องทำความร้อน และตำแหน่งรวมทั้งอุณหภูมิของความ ร้อนและเย็น พื้นผิวขอบเป็นตัวแปรอิสระ พบว่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงสุดที่ไหลลด อนุภาค และตำแหน่งของฮีตเตอร์ จากผลที่ได้รับการพัฒนาชุดของความสัมพันธ์

เอ็ม เอ วาย แบ็คเกอร์ (M.A.Y. Bakier. 2014). ทำการศึกษาวิจัยเชิงการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข สำหรับการพาความร้อนตามธรรมชาติ ในตู้เปิดแบบปิด C บางส่วนที่เต็มไปด้วยของไหลนาโน ได้รับการดำเนินการแล้ว มีหลายปัจจัยที่ได้รับการศึกษาเพื่อให้แน่ใจว่าพลังงานภายในเกี่ยวข้องกับ AR สังเกตเห็นความสำคัญของพื้นที่เปิด และสถานที่ตั้งตามแนวขอบเขต การดำรงอยู่ของอนุภาคนาโน ช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน และมวลสารผ่านเขตแดนเปิดสำหรับ ค่าเลขเรย์โนลด์ (Re) ต่ำ อุณหภูมิทั่วทั้งโพรงเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวของแหล่งความร้อนเพิ่มขึ้นโดยที่อัตราแลกเปลี่ยนมวลกับโดเมนที่ขยายออกไปเล็กน้อย ใหญ่กว่า B ใหญ่ U, V และ ϕ ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับความยาวของแหล่งความร้อน

เอ็ม กู๊ดดาร์ซี และคณะ (M. Goodarzi; et al. 2014). ทำการศึกษาวิจัยเชิงแบบจำลองการศึกษาการถ่ายโอนความร้อนแบบผสมผสานระหว่างแบบราบเรียบ (Laminar) และแบบปั่นป่วน (Turbulent) กับของไหลนาโน น้ำ - ทองแดง (Cu) ในโพรงรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ใช้รูปแบบการผสมแบบ 2 เฟส ฝาด้านบนที่เคลื่อนย้ายได้ของโพรงมีอุณหภูมิต่ำกว่าผนังด้านล่าง แบบจำลองสำหรับค่าเลขกราสฮอฟ (Grashof number: Gr) 105 (แบบราบเรียบ) และ 1,010 (แบบปั่นป่วน) สำหรับค่าเลขริชาร์ดสัน (Richardson number: Ri) จาก 0.03 ถึง 30 และสัดส่วนปริมาตรของอนุภาคนาโน 0.00 - 0.04 มีสมการควบคุม 2 มิติ ที่ถูกการแปลงค่าของข้อมูลให้มีรายละเอียดต่ำลง (Discretization) โดยใช้วิธีระเบียบวิธีการทางไฟไนต์วอลุ่ม (Finite Volume Method: FVM) ศึกษาผลของความเข้มข้นของอนุภาคนาโน กำลังรับแรงเฉือน และแรงลอยตัว และความปั่นป่วนต่อการไหล และพฤติกรรมความร้อนของการไหลของ ของไหลนาโน การคาดการณ์แบบจำลองสำหรับสัดส่วนของปริมาตรของแข็งที่ต่ำมาก ($\phi \approx 0$) พบว่าสอดคล้องกับการศึกษาเชิงตัวเลขของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน ก่อนหน้านี้ แสดงให้เห็นว่าสำหรับ ค่าเลขกราสฮอฟ (Gr) และค่าเลขริชาร์ดสัน (Ri) ที่เฉพาะเจาะจงการเพิ่มส่วนของอนุภาคนาโนช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการหมุนเวียน และทำให้มีค่าเลขนัสเซิลด์ (Nu) ในขณะที่มีผลต่อความเค้นเฉือนของผนังปัจจัยแรงเสียดทานผิว

เมจิต ไชต์ดี และโกลามรีซา คาริมิ (Majid Saidi; & Gholamreza Karimi. 2014). ทำการศึกษาวิจัยเชิงตรวจสอบการทดลอง จุดมุ่งหมายของการศึกษาในปัจจุบัน คือการตรวจสอบการระบายความร้อนด้วยการพาความร้อนแบบฟรี ในกล่องใส่รูปตัว L ซึ่งเต็มไปด้วยของไหลนาโน น้ำ - ทองแดง สมการที่ใช้ในการแก้ปัญหาจะได้รับการแก้ไขโดยใช้วิธีระเบียบวิธีการทางไฟไนต์วอลุ่ม (Finite Volume Method: FVM) การศึกษาผลกระทบของสัดส่วนปริมาณอนุภาคของอนุภาคนาโน ทองแดง, ค่าเลขเรย์โนลด์ (Re) และอัตราส่วนของกล่องรูปตัว L ที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน อุณหภูมิ และความเร็ว ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าในระดับ ค่าเลขเรย์โนลด์ สูง กลไกการถ่ายเทความร้อนที่สำคัญจะเปลี่ยนจากการนำไปสู่การพาความร้อนแบบอิสระ การเพิ่ม ค่าเลขเรย์โนลด์ จะทำให้จำนวนของวงล้อเพิ่มขึ้น แต่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะลดลง สำหรับทุกช่วงของ ค่าเลขเรย์โนลด์ การเพิ่มสัดส่วนปริมาณของอนุภาคนาโนทองแดง (Cu) ช่วยเพิ่มค่า

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าการใส่จำนวนหมุดภายในตู้มีผลอย่างมากต่อการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน นอกจากนี้มุมเอียงเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญในการพาความร้อนแบบอิสระในกล่อง ผลการคำนวณพบว่าตู้มีมุมเอียงของ $\omega = 225$ องศา มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุด

เฟิง ไท และคณะ (Peng Tie; et al. 2014). ทำการศึกษาวิจัยเชิงการทดลองด้วยการนำเอาสารของเหลวนาโน มาใช้ในการฉีดปะทะ การตรวจสอบการทดลองคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเหลวนาโน มีปริมาณขนาดสัดส่วนของอนุภาคนาโนทองแดง (Cu) แตกต่างกัน 4 ช่วง จาก 0.17 เปอร์เซ็นต์ปริมาตร ถึง 0.64 เปอร์เซ็นต์ปริมาตร และสารช่วยการกระจายตัว 2 ตัว โซเดียมโดเดซิลเบนโซอิกซัลเฟต (Sodium Dodecyl Benzoic Sulfate: SDBS) ที่กระจายตัวแตกต่างกันตั้งแต่ 0.05 เปอร์เซ็นต์น้ำหนัก ถึง 0.1 เปอร์เซ็นต์น้ำหนัก โดยน้ำหนัก มีการศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนปริมาตรของอนุภาคนาโน และสารช่วยการตัวกระจายตัว SDBS ต่อการถ่ายเทความร้อนของเหลวนาโนที่กล่าวถึง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนที่ถูกระงับได้เพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน ของระบบระบายความร้อนด้วยการจัดเรียงหัวฉีดปะทะ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเทียบกับกรณีของการใช้ของเหลวนาโน โดยไม่ต้องเติมสารช่วยกระจายตัวใด ๆ ของเหลวนาโน กับสารช่วยกระจายตัวจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลง และแม้แต่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนก็น้อยกว่าของเหลวฐาน

ซาอัด อายิบ จาตจา และคณะ (Saad Ayub Jajja; et al. 2014). ทำการศึกษาวิจัยเชิงการทดลอง สำหรับการจัดการความร้อนที่มีประสิทธิภาพของไมโครโปรเซสเซอร์ ที่ให้ความร้อนสูงจะมีการตรวจสอบ 5 แผงเก็บความร้อนที่แตกต่างกัน ซึ่งมีระยะห่างของครีป 0.2 มิลลิเมตร 0.5 มิลลิเมตร 1.0 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร พร้อมกับแผงเก็บความร้อนแบบแบน ความร้อนของไมโครโปรเซสเซอร์ถูกจำลองด้วยบล็อกทองแดงที่ให้ความร้อนกับน้ำเป็นสารหล่อเย็น เมื่อใช้กำลังความร้อน 325 วัตต์ อุณหภูมิของแผงเก็บความร้อนต่ำสุด 40.5 องศาเซลเซียส ทำได้โดยใช้แผงระบายความร้อนขนาด 0.2 มิลลิเมตร ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิฐานที่รายงาน 44 องศาเซลเซียส ประมาณ 9 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้สารของไหลนาโน ด้วยแผงเก็บความร้อนเชิงพาณิชย์ ในการทบทวนวรรณกรรม อุณหภูมิฐานและความต้านทานต่อความร้อนของแผงเก็บความร้อนลดลงโดยการลดระยะห่างของครีป และโดยการเพิ่มอัตราการไหลของปริมาตรของน้ำหมุนเวียนผ่านแผงเก็บความร้อน สำหรับแผ่นทำความร้อนแบบแบนค่าความต้านทานความร้อนสูงสุด คือ 0.216 องศาเคลวินต่อวัตต์ ซึ่งลดลงเหลือเพียง 0.03 องศาเคลวินต่อวัตต์ โดยใช้อ่างระบายความร้อนขนาด 0.2 มิลลิเมตร ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมเท่ากับ 1297 วัตต์ต่อตารางเมตร - องศาเคลวิน และ 2156 วัตต์ต่อตารางเมตร - องศาเคลวิน สำหรับกรณีที่มิครีปแบน และ 0.2 มิลลิเมตร ครีประบายความร้อนตามแนวราบแสดงให้เห็นว่ามีการเพิ่มประสิทธิภาพสองเท่าเมื่อเทียบกับก่อนหน้านี้

ยูนอล อากแดก และคณะ (Unal Akdag; et al. 2014). ทำการ ศึกษาวิจัยเชิงการทดลอง ในการศึกษาครั้งนี้จะมีการศึกษาลักษณะการถ่ายโอนความร้อนของสารละลายนาโนที่มีส่วนผสมของ

อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ในคลื่นขนาดเล็กที่มีการไหลของอากาศไหลเข้า การจำลองแบบนี้ทำขึ้นเพื่อหาเศษส่วนของอัตราการไหลของคลื่นความถี่ของไหลนาโน (Nanofluid) ความถี่ในการสั่นและความถี่ในขณะที่พารามิเตอร์อื่น ๆ จะถูกเก็บค่าคงที่โดยใช้ตัวควบคุม CFD Volume ควบคุมการไหลทั้งสองแบบมีความร้อนและอุทกพลศาสตร์ในขณะที่ผนังช่องเก็บอุณหภูมิคงที่ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ามีศักยภาพในการส่งเสริมการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนโดยการใช้อุณหภูมิภายในภายใต้การไหลแบบพัลซิ่ง การกระตุ้นในของไหลนาโน (Nanofluid) เป็นแนวคิดใหม่ในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน นอกจากนี้การไหลแบบพัลซิ่งยังมีข้อได้เปรียบในการป้องกันการตกตะกอนของอนุภาคนาโนในของเหลวฐาน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มอนุภาคนาโน และมีความกว้างของการเดินเป็นจังหวะขณะที่อัตราการเดินของซีพียูมีผลเล็กน้อย ในสภาพการไหลแบบพัลซิ่งผลรวมของการเดิน และอนุภาคนาโนเป็นผลดีต่อการเพิ่ม ค่าเลขนัสเซิลต์ (Nu) เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการไหลคงตัว ผลลัพธ์ที่ได้จะได้รับเป็นพารามิเตอร์แบบไม่มีมิติ

วี ลีลา วินอดัน และเค เอส ราจัน (V. Leela Vinodhan; & K.S. Rajan. 2014). ทำการศึกษาวิจัยเชิงการทดลองทางคอมพิวเตอร์ได้ดำเนินการเกี่ยวกับการไหล และการถ่ายเทความร้อนในการปรับค่าความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสลับแบบใหม่ (MCHS) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของพวกเขากับ MCHS แบบเดิม แผงเก็บความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แบบใหม่ประกอบด้วย 4 ช่อง โดยมีช่องระบายความร้อนทางเข้า และทางออก แยกต่างหาก สำหรับแต่ละช่อง การปรากฏตัวของหลายพื้นที่ในการพัฒนากระแสในการออกแบบใหม่ส่งผลให้ ค่าเลขนัสเซิลต์ (Nu) และอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น ที่พื้นผิวความชัน (Gradients) อุณหภูมิ ในการกำหนดค่าใหม่ต่ำกว่าที่ MCHS แบบเดิม เนื่องจากการกระจายตัวของน้ำหล่อเย็น และการไหลเวียนกลับได้ดีขึ้น ที่ความสามารถในการสูบน้ำเดียวกันค่าความต้านทานความร้อน ในรูปแบบใหม่ต่ำกว่าค่าความต้านทานความร้อนใน MCHS แบบเดิม การออกแบบนี้อาจได้รับการปรับให้เหมาะสมยิ่งขึ้นโดยการเปลี่ยนขนาดช่อง (Channel) การไหล

ซาน วู และเบงก์ ซันเดน (Zan Wu; & Bengt Sunden. 2014). ทำการศึกษาวิจัยเชิงวิเคราะห์การทดลอง ด้วยการให้พลังงานที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและ การทำอุปกรณ์ให้มีขนาดเล็กลงมา (Device Miniaturization) ช่องแบบ ไมโคร - มินิ จะดีกว่าช่องแบบมาโคร หรือช่องทางทั่วไปสำหรับการกระจายความร้อนสูง เนื่องจากพื้นที่ผิวที่มีขนาดใหญ่ของพวกเขเพื่ออัตราส่วนปริมาตรและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูง อย่างไรก็ตามการลดลงของความดัน และความไม่แน่นอนของการไหลของช่องแบบ ไมโคร - มินิ ทำให้เกิดความท้าทายในการใช้งานในทางปฏิบัติ ดังนั้นเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพจะต้องมีเสถียรภาพในการไหล และเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ในช่องแบบ ไมโคร - มินิ งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์การกระจายตัวของช่องแบบ ไมโคร - มินิ สำหรับการไหลแบบเฟสเดียว และการเดือดไหล และให้คำจำกัดความทั่วไปในการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน จากนั้นจะมีการนำเสนอภาพรวมล่าสุดของเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพล่าสุดสำหรับการไหล ได้รับการออกแบบมาเป็นพิเศษสำหรับการไหลแบบเฟสเดียว

และ การเพิ่มประสิทธิภาพการไหลของของเหลวในช่องแบบ ไมโคร - มินิ มีการกล่าวถึงสองเทคนิค การเพิ่มประสิทธิภาพที่มีแนวโน้ม ได้แก่ การขัดจังหวะไมโครฟิน และของเหลวที่ออกแบบด้วยสารเติมแต่งเพื่อการไหลแบบเฟสเดียว สำหรับการไหลเดือดจะให้ความสำคัญกับแนวทางการปรับปรุงคุณภาพที่เลือกไว้ซึ่งสามารถลดปัญหาความไม่แน่นอนของการไหลได้อย่างรวดเร็ว และหัวข้อการวิจัยที่ร้อนอีกอย่างหนึ่งนั้นคือการปรับพื้นผิวของนาโนสเกล นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอผลกระทบของตัวยึดจับยึดกับการเปลี่ยนแปลงของฟองสบู และเสนอแนวคิดเรื่องการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนแบบไหลตามรูปแบบ สำหรับการไหลแบบเฟสเดียว และการเพิ่มประสิทธิภาพการไหลของเดือดให้ความสำคัญเป็นพิเศษในเทคนิคการปรับปรุงเหล่านี้ที่มีสมรรถนะทางความร้อนสูง และลดโทษความดันต่ำลง

เหลียง ก๊อง และคณะ (Liang Gong; et al. 2015). ทำการศึกษาวิจัยการตรวจสอบการจำลองเชิงตัวเลขมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงโครงสร้างของแผงเก็บความร้อนแบบช่องขนาดเล็กสำหรับเทคนิคการระบายความร้อนด้วยชิป สี่ชนิดของแผงความร้อน ได้แก่ แผงระบายความร้อนแบบดั้งเดิม (Traditional Micro - Channel: TMC) แผงระบายความร้อนครีประบายความร้อนสี่เหลี่ยมผืนผ้าแผงทำความร้อนระบายความร้อนแบบแผงเดี่ยว และช่องระบายความร้อนขนาดเล็กสองชั้น ได้รับการสร้างแบบจำลอง และลักษณะของการไหล และการถ่ายเทความร้อน ในแผงความร้อนเหล่านี้ถูกตรวจสอบด้วยวิธีเชิงตัวเลข ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่ารูปแบบ ของแผงความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก มีความสำคัญต่อการไหลของของเหลว และการถ่ายเทความร้อนเป็นบวกสำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพการระบายความร้อนเพื่อเติมโพโมโลหะ ในส่วนหัวด้านในโดยการเพิ่มความสม่ำเสมอ ในการกระจายการไหล เมื่อเทียบกับแถวไมโครช่องแบบดั้งเดิม การจัดเรียงช่องไมโครช่องใส่จะช่วยให้เสริมสมรรถนะทางความร้อนของแผงความร้อนโดยรวมอันเนื่องมาจากลักษณะการประสานงานภาคสนามที่ดียิ่งขึ้นแม้ว่าเทคโนโลยีระบายความร้อนด้วยการระบายความร้อนแบบหัวฉีดปะทะ มีกำลังการทำความเย็นของชิปที่ดีที่สุด แต่ก็ไม่ได้มีการนำเสนอในด้านการระบายความร้อนด้วยช่องไมโครเนื่องจากความต้านทานการไหลขนาดใหญ่ โครงสร้างชั้นสองที่มีช่องรับเข้าที่ชั้นล่างช่วยให้ความสามารถในการทำความเย็นได้ดีที่สุดเป็นอันดับสองโดยมีค่าความดันที่ยอมรับได้มาก โดยทั่วไปภายใต้กำลังสูบน้ำเดียวกันมีศักยภาพในการพัฒนาที่สำคัญในช่องระบายความร้อนแบบไมโครช่องขนาดเล็กที่มีหัวต่อช่องป้อนโลหะ และแผงระบายความร้อนด้วยช่องระบายความร้อนขนาดเล็กรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ลีปิง เกิง และคณะ (Liping Geng; et al. 2015). ทำการศึกษาวิจัยเชิงการทดลองมีการทดลองแบบหลายช่วงซึ่งหัวฉีดลมแบบพิเศษที่ออกแบบมาเป็นพิเศษจะถูกนำไปใช้กับพื้นผิวร้อนเพื่อเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่สัมพันธ์กับไอน้ำที่สม่ำเสมอ หัวฉีดเป็นระยะที่ผลิตโดยตัวควบคุมอัตราการไหลของมวล การทดลองนี้ใช้สำหรับหัวฉีดปะทะแบบคงที่ และหัวฉีดปะทะแบบพิเศษ ที่ออกแบบมาเป็นพิเศษซึ่งรวมถึงหัวฉีดปะทะรูปสามเหลี่ยม และรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีความถี่ตั้งแต่ 1.25 ถึง 20 เฮิร์ตซ์ สัญญาณสามเหลี่ยมมีความสมมาตรที่ต่างกัน (แสดงอัตราส่วนของเวลาในการเพิ่มความเร็วในรอบหนึ่งรอบกับเวลารอบทั้งหมด) และหัวฉีดปะทะรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีรอบการ

ทำงานแบบตัวแปร (หมายถึงอัตราส่วนของรอบชีพจรในเวลาที่จะปิดเวลา) ที่ความถี่ของ 10 เฮิร์ตซ์ และ 20 เฮิร์ตซ์ หัวฉีดปะทะที่ไม่เสถียรจะแสดงการฟุ้งพาความถี่ที่แตกต่างกัน และการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนนั้น คือ การเพิ่มขึ้น หรือ ลดลงของสัญญาณอย่างฉับพลัน แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลที่เป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงการถ่ายเทความร้อนโดยเฉพาะอย่างยิ่งการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนในเชิงลบ ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพของสัญญาณรวมอยู่ระหว่างการแสดงของแต่ละสัญญาณ การเพิ่มประสิทธิภาพของรูปสามเหลี่ยม (หรือ คลื่นรูปไซน์) บวกกับสัญญาณสี่เหลี่ยมแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับสัญญาณสี่เหลี่ยมบวกกับรูปสามเหลี่ยม (หรือคลื่นรูปไซน์) การถ่ายโอนความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อ ค่าเลขสเตราฮาล (St) เพิ่มขึ้นจาก 0.004 เป็น 0.068 โดยรวมสำหรับการกระแทกหัวฉีดด้วยสัญญาณรวมดังกล่าว สัญญาณของสามเหลี่ยมหัวฉีดที่มีพารามิเตอร์สมมาตร 0 และ 1 มีการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นและหลังมีผลดีกว่าเล็กน้อยก่อน อัตราการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วของความเร็วยังมีอิทธิพลต่อการปรับปรุงการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นรอบการทำงานของ 1 : 2 จึงมีประสิทธิภาพดีที่สุดในส่วนของการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในการศึกษา

กัวดอง เซีย และคณะ (Guodong Xia; et al. 2015). ทำการศึกษาวิจัยเชิงการจำลองเชิงตัวเลข และการทดลองเกี่ยวกับการจัดการความร้อนกลายเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อให้แน่ใจถึงประสิทธิภาพ และความเชื่อถือได้ของชิปพลังงานสูง และระบบระบายความร้อนด้วยความเย็น การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนแบบไม่ใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นวิธีการที่มีแนวโน้มมาก ในเอกสารฉบับนี้จะใช้การทดลองในการลด อุณหภูมิและความดัน และการจำลองเชิงตัวเลขใช้เพื่อทำความเข้าใจ และตีความพฤติกรรมความร้อนที่ซับซ้อนด้วยการนำเสนอช่องการไหลในแผงระบายความร้อนแบบไมโครคลื่นไมโครเวฟ สมรรถนะที่ครอบคลุมได้รับการประเมินโดยค่าความต้านทานความร้อน และค่าความร้อนทั้งหมด เมื่อเทียบกับแผงระบายความร้อนแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาดเท่ากันอุณหภูมิเฉลี่ย และอุณหภูมิสูงสุดจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด และการกระจายตัวของอุณหภูมิจะสม่ำเสมอมากขึ้นแม้ว่าจะมีการปรับความดันสูงกว่า 100 มิลลิเมตรต่อวินาที สังเกตได้ว่ากระแสน้ำวนมีขนาดใหญ่ขึ้น และเลื่อนไปอยู่ตรงกลางช่องโดยให้อัตราการไหลเพิ่มขึ้น กลไกการถ่ายเทความร้อนจะช่วยเพิ่มพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนขยายขอบเขตความร้อนถูกขัดจังหวะ และพัฒนาใหม่ความวุ่นวายความร้อนน้ำหล่อเย็น และความร้อนที่ดีกว่าผสมโดยน้ำวนที่เกิดขึ้นในโพรงรัง กำลังสูบจะลดลง 18.99 เปอร์เซ็นต์ เมื่อค่าความต้านทานความร้อนทั้งหมดเท่ากับ 0.446 องศาเซลวินต่อวัตต์ เทียบกับแผงระบายความร้อนแบบช่องสี่เหลี่ยมจัตุรัส ปัจจัยการเพิ่มความสามารถในการระบายความร้อนสามารถเข้าถึง 1.24 สำหรับค่าเลขเรย์โนลด์ส์ 611 ดังนั้นการทำความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุแบบคลื่นลูกฟูก ที่ซับซ้อนจะช่วยประหยัดค่าใช้จ่าย สำหรับระบบระบายความร้อนด้วยชิป

โมฮาเม็ต เอ ทีม่า และโมฮาเม็ต เอ็ม ไกรราช (Mohamed A. Teamah; & Mohamed M. Khairat. 2015). ทำการศึกษาวิจัยเชิงการทดลองการถ่ายเทความร้อน และการไหลของของไหลระหว่างแผ่นความร้อนแนวนอนกับการฉีดกระทบแบบคู่ ของหัวฉีดแบบวงกลม พารามิเตอร์ที่ทำ

การตรวจสอบ คือ ค่าเลขเรย์โนลด์ (Re) ของแต่ละหัวฉีด และระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับหัวฉีด การทดลองจะดำเนินการครอบคลุมช่วงสำหรับ ค่าเลขเรย์โนลด์ จาก 7,100 ไปเป็น 30,800 สำหรับแต่ละหัวฉีดระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับหัวฉีดขนาดตั้งแต่ 22.73 ถึง 90.1 ในระหว่างขั้นตอนการทดลอง ค่าเลขเรย์โนลด์ ด้านขวามีจำนวนสูงกว่าค่าเลขเรย์โนลด์ ที่ด้านซ้ายได้มีการวางโครงสร้างเส้นชั้นของ ไอโซเทอร์มอล ไว้สำหรับกรณีที่แตกต่างกันรวมถึง การกระจายความหนาของฟิล์มน้ำเหนือแผ่นความร้อน ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มค่าเลขเรย์โนลด์ของหัวฉีดเดียวนั้นมากกว่าหัวฉีดอื่น ๆ จะเพิ่มค่าเลขนัสเซิลต์ (Nu) ทั้งในที่เฉพาะจุด และค่าเฉลี่ย นอกจากนี้การเพิ่มระยะห่างระหว่างหัวฉีดถึงหัวฉีดที่ ค่าเลขเรย์โนลด์ เดียวกันจะเพิ่ม ค่าเลขนัสเซิลต์ โดยเฉลี่ย

เมาโร โลมาสโคโล และคณะ (Mauro Lomascolo; et al. 2015). ทำการศึกษาวิจัยเชิงวิเคราะห์ผลของการทดลองเกี่ยวกับความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของเหลวนาโน จะนำเสนอโดยใช้ข้อมูลที่กระจายอยู่ทั่วไปจากแหล่งข้อมูลทางวรรณกรรมต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่าแม้จะมีจำนวนมากของสิ่งพิมพ์ที่มีเกี่ยวกับปัญหานี้ การศึกษาเพียงเล็กน้อยทำให้มีการประมาณการเชิงปริมาณเกี่ยวกับเงื่อนไขการทดลองที่สมบูรณ์แบบ และการศึกษาจำนวนมากไม่สอดคล้องกัน คำนี้ถึงปัญหานี้ในการศึกษาครั้งนี้ได้มีการเลือกเอกสารที่มีค่าที่สุดโดยคำนึงถึงจุด และมุมมองที่แตกต่างกัน แม้ว่าการวิจัยนี้จะไม่ได้รับการพิจารณาอย่างครบถ้วนจากวรรณคดีฉบับสมบูรณ์ในสาขาของเหลวนาโน แต่ก็สามารถนำมาพิจารณาเป็นคู่มืออ้างอิงฉบับย่อเพื่อให้ทราบภาพรวมของปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกันใน ของเหลวนาโน ของเหลวนาโน และพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุด (ขนาด, รูปร่าง, ความเข้มข้น, วัสดุ ฯลฯ) มีผลต่อประสิทธิภาพการระบายความร้อนที่คาดหวังของเหลวนาโน

มายัง โมดาค และคณะ (Mayank Modak; et al. 2015). ทำการศึกษาวิจัยเชิงการทดลองได้ดำเนินการวิเคราะห์ลักษณะการถ่ายเทความร้อนของฟอยล์สแตนเลสแนวดังที่ร้อนโดยการหัวฉีดน้ำแบบเป็นของเหลวแบบวงกลมและของเหลวนาโน น้ำ - อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ลักษณะการถ่ายเทความร้อนในเฉพาะที่ ค่าประมาณจากภาพความร้อนที่ได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อนแบบอินฟราเรด (A655sc, ระบบ FLIR) การทดลองจะดำเนินการสำหรับ ค่าเลขเรย์โนลด์ ที่แตกต่างกัน ($Re = 5,000-12,000$) ความเข้มข้นของเหลวนาโน ($\phi = 0.15$ เปอร์เซนต์, 0.6 เปอร์เซนต์) และสำหรับหัวฉีดที่แตกต่างกันไประยะทางแผ่น ($l/d = 6, 12$) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเหลวนาโนอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ดีกว่าน้ำ จากการตรวจสอบพบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ค่าเลขนัสเซิลต์ (Nu) ค่าเลขแพรนดัล (Pr) ระยะหัวฉีดต่อจาน (l/d) ค่าเลขเรย์โนลด์ (Re) และสัดส่วนอนุภาค (ϕ)

เรซา ดาวาร์เนจาต และมารีเยม จัมชิดซาเด (Reza Davarnejad; & Maryam Jamshidzadeh. 2015). ทำการศึกษาวิจัยเชิงแบบจำลองมีสองมิติได้ทำการศึกษารูปแบบของการถ่ายโอนความร้อนด้วยการไหลแบบปั่นป่วนของเหลวนาโน แมกนีเซียมออกไซด์ - น้ำ ในท่อแบบวงกลม แบบจำลองมีสองมิติ ภายใต้โมเดลการไหลแบบปั่นป่วน $k-\epsilon$ ปริมาณของเหลวพื้นฐาน

คือน้ำบริสุทธิ์ และปริมาตรของอนุภาคนาโนในของเหลวฐาน คือ 0.0625 เปอร์เซ็นต์, 0.125 เปอร์เซ็นต์, 0.25 เปอร์เซ็นต์, 0.5 เปอร์เซ็นต์ และ 1 เปอร์เซ็นต์ ช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ส (Re) ที่ใช้ คือ 3,000 - 19,000 ใช้แบบจำลองสามแบบได้แก่ เฟสเดียวปริมาตรของของเหลว (Volume of Fluid: VOF) และส่วนผสม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ใช้ในการจำลองมีความสอดคล้องกับผลการทดลองที่มีอยู่ในเอกสารทบทวนวรรณกรรม จากผลการทดลอง (ทบทวนวรรณกรรม) และการจำลอง (งานวิจัยนี้) ค่าเลขนัสเซลล์ (Nu) เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของเหลวนาโน อย่างไรก็ตามปัจจัยด้านแรงเสียดทานของเหลวนาโนเพิ่มขึ้น แต่ผลของมันไม่สามารถทำได้เมื่อเทียบกับค่าเลขนัสเซลล์ (Nu) ในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน สรุปได้ว่าแบบจำลองสองเฟสมีความแม่นยำมากกว่าตัวแบบอื่น ๆ สำหรับการทำนายการถ่ายเทความร้อนโดยเฉพาะอย่างยิ่งในสัดส่วนที่มีปริมาตรสูงกว่าอนุภาคนาโน ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยจากข้อมูลการทดลองสำหรับรุ่นเฟสเดียว คือ ประมาณ 11 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ สำหรับแบบจำลองสองเฟส

ราบา เนบบาติ และมาเฟา คาดจา (Rabah Nebbati; & Mahfoud Kadja. 2015). ทำการศึกษาวิจัยเชิงตัวเลข เพื่อความเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่มีประสิทธิภาพสูงเราสามารถใช้ในการไหลของเหลวนาโน ในช่องระบายความร้อนขนาดเล็ก รายงานผลฉบับนี้ศึกษาการไหลเวียนของการถ่ายเทความร้อนโดยการไหลเวียนของอนุภาคในรูปทรงเรขาคณิตดังกล่าว การศึกษาเป็นตัวเลขและประสบความสำเร็จโดยใช้ผสม น้ำ/ γ - อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นของเหลวนาโน และวิธีการแบบเฟสเดียวการกำหนดค่าทางเรขาคณิตที่ใช้ในการคำนวณมีสองขาเข้าหัวฉีด การคำนวณได้ถูกทำขึ้นเป็นครั้งแรกโดยมีสมบัติทางเทอร์โม - ฟิสิกส์คงที่ และทำขึ้นโดยอาศัยสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ปริมาตรของอนุภาคนาโนในส่วนผสมของเหลวนาโน ถูกนำมาเป็น 0 เปอร์เซ็นต์ (เช่นน้ำเท่านั้น), 1 เปอร์เซ็นต์ และ 4 เปอร์เซ็นต์ ใช้แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนแบบสามมิติและแบบจำลองเชิงตัวเลขโดยใช้วิธีระเบียบวิธีทางไฟไนต์วอลุ่ม (Finite Volume Method: FVM) ผลของเขตข้อมูลความร้อน และอุทกพลศาสตร์แสดงให้เห็นว่าของเหลวนาโนสามารถกระตุ้นการเพิ่มขึ้นของ ค่าเลขนัสเซลล์ (Nu) โดยเฉลี่ยและเฉพาะที่ การลดลงของอุณหภูมิพื้นผิวด้านล่าง และการลดลงเล็กน้อยของความดันเนื่องบนผนังเมื่อเทียบกับการคาดการณ์ที่ใช้คุณสมบัติคงที่ และอนุภาคนาโน น้ำฟรี ผลการทดลองนี้กล่าวถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของนาโนเมตร ที่ 38 นาโนเมตร และช่วงของ ค่าเลขเรย์โนลด์สตั้งแต่ 200 ถึง 1,200 นอกจากนี้ความร้อนจากพื้นผิวด้านล่าง ของแผงระบายความร้อนยังอยู่ในช่วง $q'' = 30$ วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ถึง 120 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

สัตยา วี ราวิคุมาร์ และคณะ (Satya V. Ravikumar; et al. 2015). ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการระบายความร้อน โดยใช้การฉีดละอองน้ำโดยใช้ของเหลวนาโน เป็นตัวกลางระบายความร้อน สำหรับการประยุกต์ใช้ฟลักซ์ความร้อนสูง ของเหลวนาโนได้ถูกจัดเตรียมโดยอนุภาคอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เชิงพาณิชย์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 13 นาโนเมตร และน้ำ การศึกษาการถ่ายเทความร้อน ได้ดำเนินการในตัวอย่างเหล็กที่ได้รับความร้อนก่อน ขนาด $100 \times 100 \times 6$ มิลลิเมตร อนุภาคนาโนเริ่มต้นของแผ่น ซึ่งอยู่ภายใต้การระบายความร้อน โดยใช้ละอองน้ำด้วย

ละอองน้ำมากกว่า 900 องศาเซลเซียส ใช้สารหล่อเย็นต่าง ๆ ที่ประกอบด้วย ความเข้มข้นปริมาตร 0.1 เปอร์เซ็นต์ ของ น้ำ - อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ผสมที่มีหรือ ไม่มีตัวทำละลาย (ลดแรงตึงผิว) ใช้ในการศึกษาการกระจายตัวที่ใช้ คือโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Sodium Dodecyl Sulphate: SDS) และโพลีออกซีเอทิลีน (Polyoxyethylene: 20) ซอร์บิแทน โมโนลอเรท (Sorbitan Monolaurate: Tween 20) ซอฟต์แวย์ การนำความร้อนผกผัน INTEMP ถูกใช้เพื่อประเมินค่าความร้อน และอุณหภูมิผิวโดยคำนึงถึงอุณหภูมิภายในที่วัดได้โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลระหว่างกระบวนการทำความเย็น ผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้สารหล่อเย็นของเหลวไหลโน เปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่น้ำบริสุทธิ์ (น้ำที่ผ่านการกรองแล้ว) ใช้เป็นสารทำความเย็น การวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าอัตราการระบายความร้อนความร้อนที่สำคัญและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อใช้สารของไหลไหลโน เป็นสารหล่อเย็นในกระบวนการพ่นละอองน้ำด้วยอากาศ นอกจากนี้สารหล่อเย็นแบบของเหลวไหลโน ด้วยตัวกระจายตัวยังแสดงให้เห็น ถึงการเพิ่มความสามารถ ในการถ่ายเทความร้อน ได้ดีกว่าวัสดุของไหลไหลโน โดยไม่ใช้สารกระจายตัว ของเหลวไหลโน ที่มีตัวกระจายตัว Tween 20 พบว่ามีประสิทธิภาพ มากกว่าของตัวทำละลาย (น้ำที่กรองได้) คือ 10.2 เปอร์เซ็นต์ สำหรับน้ำ - Al_2O_3 , 18.6 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ น้ำ - อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) - โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS) และไม่เกิน 32.3 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ น้ำ - อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) - ซอร์บิแทน โมโนลอเรท (Tween 20)

ที ยูเซฟา และคณะ (T. Yousefi; et al. 2015). ทำการศึกษาวิจัยเชิงทดลองได้ ทำการศึกษาผลของความเข้มข้น (เปอร์เซ็นต์น้ำหนัก) ของไหลไหลโนอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3 - H_2O) และค่าเลขเรย์โนลด์ (Re) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Coefficients: HTC) ในเฉพาะที่ และโดยเฉลี่ย และอุณหภูมิพื้นผิว ในการทำเช่นนั้นได้มีการสร้างชุดทดสอบขึ้นเพื่อตรวจสอบการกระทบของไหลไหลโน ผ่านทางช่องหัวฉีดบนพื้นผิวด้านในของท่อร้อน มีการใช้สารของไหลไหลโน ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน 5 ระดับ ตั้งแต่ 0.0073 ถึง 0.0757 เปอร์เซ็นต์น้ำหนัก โดยน้ำหนัก และที่ ค่าเลขเรย์โนลด์ ระหว่าง 1,259 และ 2,080 ค่าพลังงานเข้าและความร้อนจะถูกตั้งค่าไว้ที่ 300 วัตต์ และ 34.37 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร สำหรับทั้ง น้ำ และของไหลไหลโน มีแนวโน้มลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะจุดที่มีมุมกระทบ เนื่องจากการพัฒนาขอบเขตขอบเขตเกินกว่าจุดตรงบริเวณจุดชะงัก (Stagnation Point) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้นโดยการเติมอนุภาคนาโนที่มีความเข้มข้น 0.0597 เปอร์เซ็นต์น้ำหนัก (ในน้ำ) เปอร์เซ็นต์การเพิ่มประสิทธิภาพสูงสุดของในเฉพาะจุดที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน สำหรับความเข้มข้นนี้เท่ากับ 57.10 เปอร์เซ็นต์ ที่ $\text{Re} = 2,080$ เมื่อเทียบกับน้ำกลั่นพบว่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่มประสิทธิภาพของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุด คือ ร้อยละ 44.86 ซึ่งเกี่ยวข้องกับ 0.0597 เปอร์เซ็นต์น้ำหนัก ของไหลไหลโนสำหรับที่ ค่าเลขเรย์โนลด์ 1,908

หยุน เยีย และคณะ (Yun Yue; et al. 2015). ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวข้องกับการตรวจสอบสมรรถนะทางความร้อน และความร้อนของชุดระบายความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหลายชั้น

(Manifold Microchannel Heat Sink: MMHS) ที่มีและไม่มีสารของไหลนาโน เป็นของไหลทำงาน ได้รับการตรวจสอบด้วยวิธีระเบียบวิธีการทางไฟไนต์วอลุ่ม (Finite Volume Method: FVM) การประเมินผลของอนุภาคปริมาตรเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคนาโน และจำนวน ค่าเลขเรย์โนลด์ที่มีต่อค่าเลขนัสเซิลด์ (Nu) กำลังการสูบน้ำัดชั้นประสิทธิภาพ และการสร้างเอนโทรปีในเซลล์หน่วย 3 มิติ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณอนุภาคนาโนที่เพิ่มขึ้น ค่าเลขนัสเซิลด์ และกำลังสูบน้ำัดชั้น แต่การสร้างเอนโทรปีทั้งหมดลดลง การเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคจะทำให้ค่าเลขนัสเซิลด์ ลดลงกำลังการสูบน้ำัด และัดชั้นประสิทธิภาพ แต่จะเพิ่มการสร้างเอนโทรปีทั้งหมด ในที่สุดการเพิ่มจำนวนนาโนสไปนการเพิ่ม ค่าเลขนัสเซิลด์ และกำลังสูบน้ำัดแต่ลดัดชั้นประสิทธิภาพ และการสร้างเอนโทรปีทั้งหมด

เยี่ย-ซู หยาง และคณะ (Yue-Tzu Yang; et al. 2015). ทำการศึกษาวิจัยการตรวจสอบการจำลองเชิงตัวเลข ในงานวิจัยนี้โดยใช้รูปแบบการพาความร้อนแบบปั่นป่วน ของเหลวนาโน แบบเดี่ยว และแบบสองเฟสในช่องสามเหลี่ยมขนาดสามมิติที่มีอุณหภูมิผนังคงที่ การแก้สมการเชิงอนุพันธ์บางส่วนแบบรูปไข่คู่สมการเชิงอนุพันธ์บางส่วนสำหรับการพาความร้อนแบบปั่นป่วนของเหลวนาโน จะสามารถแก้ปัญหาได้โดยใช้วิธีระเบียบวิธีการทางไฟไนต์วอลุ่ม (Finite Volume Method: FVM) ใช้รูปแบบโมเดลแบบปั่นป่วน $k-\epsilon$ เพื่อแก้สมการที่มีการการไหลแบบปั่นป่วนอิทธิพลของรูปทรงเรขาคณิต ซี - ร่อง รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และความเข้มข้นปริมาตรของเหลวนาโน ที่มีต่อค่าเลขนัสเซิลด์ (Nu) เฉลี่ยอยู่ในการศึกษานี้ ค่าเลขนัสเซิลด์โดยเฉลี่ยของช่อง ซี - ร่อง พบว่ามีการปรับปรุงให้ดีขึ้นด้วยอัตราส่วนความสูง ซี - ร่อง ที่มีขนาดเล็ก และอัตราส่วนบางส่วนของสนาม ซี - ร่อง ที่มี ซี - ร่อง นอกจากนี้ผลการคำนวณของแบบจำลองแบบเดี่ยว และแบบสองเฟส แสดงให้เห็นว่ามีความแตกต่างบางประการในการไหลของการจำลอง และความสามารถในการถ่ายเทความร้อนแบบพาเวเตอร์ นอกจากนี้การเพิ่มประสิทธิภาพของปัญหานี้ยังนำเสนอโดยใช้วิธีการตอบสนองพื้นผิว (Response Surface Methodology: RSM) และวิธีทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ E ที่กำหนดให้เป็นตัวประกอบสมรรถนะได้พัฒนาฟังก์ชันความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์การออกแบบ 4 รูปแบบ พบว่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ E ดีกว่า $Re = 10,000$ และมี ซี - ร่อง สี่เหลี่ยมมีการเพิ่มประสิทธิภาพ 18.2 เปอร์เซ็นต์

อาห์เหม็ด เอ. ฮุสเซ็น และคณะ (Ahmed A. Hussien; et al. 2016). ทำการสรุปผลงานการศึกษาทบทวนวรรณกรรม เทคนิคการระบายความร้อนแบบใหม่กำลังถูกสำรวจเพื่อการกระจายตัวของฟลักซ์ความร้อน การศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนใน (Micro/Mini - Channels: M/MCs) กับ ของไหลนาโน (Nanofluids) ได้มุ่งเน้นไปที่การรวมข้อดีของทั้งสองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในเฟสเดียว การพัฒนาแอปพลิเคชันหลายอย่าง เช่น การทำความเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เซลล์แสงอาทิตย์ และเทคโนโลยียานยนต์ เป็นที่ต้องการอย่างมากในปัจจุบันเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูง และลดต้นทุนการดำเนินงาน บทความทบทวนนี้สรุปผลการศึกษาล่าสุดโดยเน้นสองประเด็นหลักส่วนแรกมีแนวคิดหลักเช่นการปรับขนาดของ M/MCs คุณสมบัติทางกายภาพ และการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน ส่วนที่สองจะแสดงแอปพลิเคชัน

หลัก ๆ ของ M/MCs ด้วย ของไหลนาโน กับความท้าทายที่จะใช้กันอย่างแพร่หลาย วัตถุประสงค์ของบทความนี้เพื่อให้การทบทวนอย่างละเอียดถี่ถ้วน และครอบคลุมของงานที่ปรับปรุงใหม่ที่เคยแพร่ในพื้นที่ใหม่นี้โดยมีข้อสรุปทั่วไป

อพาเรช เดตตา และคณะ (Aparesh Datta; et al. 2016). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการไหลของของไหล และพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของการไหลวนตามแนวยาวของครีประบายความร้อนสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดจิ๋วการไหลช่วง ค่าเลขเรย์โนลด์ส (Re) ตั้งแต่ 200 ถึง 1,100 ในช่วงอุณหภูมิที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะ การสร้างสภาวะให้เกิดการไหลวนสองแบบที่แตกต่างกันให้การไหลวนเกิดขึ้นก่อนทางไหลเข้าที่ระยะทางแตกต่างกัน จากการทดลองพบว่าความสูง และความยาวของการไหลวนที่มีประสิทธิภาพการโดยรวมดีที่สุดที่มุมลาดเอียง 30 องศา และค่าเลขเรย์โนลด์ส ไม่เกิน 600 แต่สำหรับ ค่าเลขเรย์โนลด์ส ต่ำค่าการไหลวนจะสูงมุมลาดเอียงมีความเหมาะสมกับความหนาของช่องครีประบายความร้อนทั้งสองพบว่าช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้นเนื่องจากการผสมผสานที่ดีขึ้นหลังจากน้ำวนเกิดขึ้นโดยผลการวิจัยเหล่านี้มีส่วนสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่ไม่เกี่ยวข้องกับการจัดรูปทรงเรขาคณิตที่ซับซ้อน

อโศก เค บาร์ริก และคณะ (Ashok K. Barik; et al. 2016). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีการตรวจสอบเชิงตัวเลขในงานวิจัยฉบับนี้ ได้ทำการศึกษาสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของไหลนาโนแบบฉีดกระทบตั้งฉากกับพื้นผิว ที่ยื่นออกมาได้ทำการศึกษาเชิงตัวเลขในโดเมนคอมพิวเตอร์สามมิติ สารละลายน้ำของไหลนาโนอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ถูกใช้เป็นของเหลวทำงานทั้งสำหรับหัวฉีดและท่อ เทคนิควิธีระเบียบวิธีการทางไฟไนต์วอลุ่ม (Finite Volume) ถูกใช้เพื่อแก้สมการอนุรักษ์สำหรับมวลโมเมนตัม และความปั่นป่วน (ความปั่นป่วนของ SST $k-\epsilon$) ท่อ และหัวฉีด ค่าเลขเรย์โนลด์ส (Re) เป็นการเปลี่ยนพลังงานการไหลเป็นพลังงานกลขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก จะแตกต่างกันในช่วง 6000 - 20,000 สัดส่วนปริมาณของไหลนาโน เปลี่ยนแปลงไปในช่วง 0 เปอร์เซ็นต์ $\leq \phi \leq 5$ เปอร์เซ็นต์ สำหรับสัดส่วนปริมาตรที่เฉพาะเจาะจงของไหลนาโน พบว่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นด้วยท่อ (Re_{Dh} Duct) รวมทั้งหัวฉีด (Re_{Dh} nz) ค่าเลขเรย์โนลด์ส สำหรับปริมาณสัดส่วนเฉพาะ ($\phi = 5$) เมื่อท่อ และค่าเลขเรย์โนลด์ส ของหัวฉีด เพิ่มขึ้นจาก 6,000 เป็น 20,000 ค่านัสเซลต์นัมเบอร์ (Nu) เฉลี่ยถ่วงน้ำหนักพื้นที่ (Nu_{DD} Duct) มีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 72.7 เปอร์เซ็นต์ และ 68.57 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้การเพิ่มอนุภาคนาโนที่เป็นของแข็งลงในของเหลวฐานช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามความต้องการพลังงานสูบน้ำเพิ่มขึ้นด้วยปริมาณของไหลนาโน นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงผลกระทบของการยื่นออกมาของ ตัวนำ - ไม่นำไฟฟ้า และคุณสมบัติขึ้นกับอุณหภูมิในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน มีการกล่าวถึงการไหลเวียนของการไหลเวียนของช่องว่างระหว่างการยื่นออกมาในบริบทของการถ่ายโอนความร้อน

โมฮาเม็ต เอ ทีมมา และคณะ (Mohamed A. Teamah; et al. 2016). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีการศึกษาเชิงตัวเลขและเชิงทดลองได้ทำการศึกษาโครงสร้างการไหล และการถ่ายเทความร้อน

ของหัวฉีดของไหลนาโน ที่เกิดขึ้นบนแผ่นแบน ใช้น้ำ - อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นน้ำสารทำงาน สมการที่ใช้ในการคำนวณจะได้รับการแก้ไขเป็นตัวเลขโดยใช้ระเบียบวิธีการไฟไนต์วอลุ่ม (FVM) ร่วมกับอัลกอริทึม SIMPLER ได้มีการจำลองการทดลองและการจำลองเชิงตัวเลขขึ้นมากมาย ผลการศึกษาครอบคลุมถึงค่าเลขเรย์โนลด์ส์ (Re) ตั้งแต่ 3000 ถึง 32,000, สัดส่วนปริมาณของไหลนาโน, ϕ , ตั้งแต่ 0 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ ระยะห่างจากหัวฉีด (Jet Nozzle) ไปยังแผ่นแนวนอนเป็นค่าคงที่ที่ 3 เครื่องทดลองถูกสร้างขึ้นเพื่อวัดการกระจายความหนาของฟิล์มอุณหภูมิม้วนและอุณหภูมิของของเหลวที่ไหลเวียน ผลกระทบของ Re และ ϕ มีการศึกษาเกี่ยวกับการกระจายความหนาของฟิล์ม รูปทรงแบบไอโซเทอร์มอล (Isothermal) และค่าเลขนัสเซลล์ต์ (Nu) และทั้งสองระดับข้อตกลงที่ดีระหว่างผลการทดลองเชิงตัวเลข และผลการทดลอง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคนาโนจะเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในการถ่ายเทเมื่อเทียบกับน้ำบริสุทธิ์ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าเท่ากับ 10.0 เปอร์เซ็นต์ และ $\text{Re} = 24,000$ โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น 62 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับน้ำบริสุทธิ์ ศึกษาผลของชนิดของของไหลนาโน (อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) - ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) - ทองแดงออกไซด์ (CuO)) พบว่าของไหลนาโนทองแดงออกไซด์ (CuO) ช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ 8.9 เปอร์เซ็นต์ และ 12 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับของไหลนาโน อะลูมิเนียมออกไซด์ และไทเทเนียมออกไซด์ ตามลำดับ

เอ เอ็ม เทียร์รา และคณะ (A.M. Tiara; et al. 2016). ทำการศึกษาวิจัยการตรวจสอบการทดลองอัตราการระบายความร้อนของแถบเหล็กบนโต๊ะ (Run - Out Table: ROT) ในโรงงานผลิตแถบร้อนมีผลกระทบต่อทั้งโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางกล การศึกษาในปัจจุบันมุ่งเน้นไปที่การเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนของแผ่นเหล็กกล้า AISI 304 ทั้งในช่วงการเปลี่ยนถ่าย และการเดือดแบบกลายเป็นนิวเคลียสด้วยวิธีการฉีดกระทบ การศึกษาการถ่ายเทความร้อนระหว่างการฉีดกระทบ ได้รับการดำเนินการในกรณีของแผ่นเหล็ก ($100 \times 100 \times 6$ มิลลิเมตร) จากอุณหภูมิเริ่มต้นประมาณ 900 องศาเซลเซียส ที่พื้นผิวของเหลวนาโน ใช้น้ำควบคู่ไปกับของเหลวฐานเพื่อปรับปรุงสมบัติทางความร้อนที่ส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน สารละลายของเหลวนาโนที่ใช้เป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ชนิด ทองแดง (Cu) - อะลูมิเนียม (Al) (Layered Double Hydroxide : LDH) ที่ 120 ppm. พร้อมกับสารเติมแต่งที่แตกต่างกันในปริมาณที่เหมาะสม ได้แก่ โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Sodium Dodecyl Sulfate: SDS), ซิทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Cetyl Trimethyl Ammonium Bromide: CTAB), โพลีออกซีเอทิลีน (Polyoxyethylene: 20) ซอร์บิแทน โมโนลอเรท (Sorbitan Monolaurate: Tween 20) และโพลีไวนิลไพร์โรลิโดน (Poly Vinyl Pyrrolidone: PVP) สารเติมแต่งที่ใช้สารของไหลนาโน ได้รับการพิจารณาตามคุณสมบัติทางกายภาพของเทอร์โม อัตราการระบายความร้อนสูงสุดในกรณีของไหลนาโน Cu - Al LDH/Tween 20 ได้รับการสนับสนุนโดยการเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าความร้อน และการลดความตึงผิว

อาลี แรดวาน และคณะ (Ali Radwan; et al. 2016). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีแบบจำลองการไหล เพื่อศึกษาเทคนิคการระบายความร้อนใหม่สำหรับระบบความร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีความเข้มข้นต่ำ (Low Concentrated Photovoltaic - Thermal: LCPV - T) ได้รับการพัฒนาโดยใช้แผงระบายความร้อนด้วยช่องทางการไหลขนาดเล็ก ด้วย ของไหลนาโน ในงานวิจัยนี้ได้ใช้อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum Oxide: Al_2O_3) - น้ำ และซิลิคอนคาร์ไบด์ (Silicon Carbide: SiC) - น้ำ ของไหลนาโน ที่มีสัดส่วนของปริมาตรต่างกันเป็นสารทำความเย็น อิทธิพลของอัตราการไหลของมวลเป็น และสัดส่วนปริมาตรของอนุภาคนาโนต่อสมรรถนะของระบบ LCPV - T จะถูกตรวจสอบด้วยค่าอัตราส่วนความเข้มข้นต่างกัน แบบจำลองที่ครอบคลุมได้รับการพัฒนาซึ่งรวมถึงรูปแบบความร้อนสำหรับชั้นโฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic) ควบคู่ไปกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิศาสตร์ของไหล ในแบบจำลองการไหลสองเฟสของอ่างความร้อนแบบช่องทางการไหลขนาดเล็ก แบบจำลองนี้ได้รับการจำลองเป็นตัวเลขเพื่อประมาณค่าประสิทธิภาพ เช่น อุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์ และประสิทธิภาพทางไฟฟ้า และความร้อน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการลดอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างมีนัยสำคัญโดยเฉพาะที่อัตราส่วนความเข้มข้นสูง โดยใช้ของไหลนาโน เมื่อเทียบกับการใช้น้ำ การใช้ ของไหลนาโนซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC - น้ำ) จะทำให้อุณหภูมิของเซลล์ลดลงได้ดีกว่าของไหลนาโนชนิดอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3 - น้ำ) การเพิ่มสัดส่วนปริมาตรของอนุภาคนาโน ทั้งของไหลนาโนซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC - น้ำ) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3 - น้ำ) ทำให้อุณหภูมิของเซลล์ลดลงอย่างมาก เป็นผลให้การใช้งานของไหลนาโน มีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานแสงอาทิตย์สูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ ค่าเลขเรย์โนลด์ส (Re) ต่ำกว่า และอัตราส่วนความเข้มข้นสูงกว่าการใช้น้ำ อิทธิพลของของไหลนาโน ต่อประสิทธิภาพความร้อนแตกต่างกันไปตามอัตราส่วนความเข้มข้น นอกจากนี้แรงเสียดทานจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่ม ค่าเลขเรย์โนลด์ส และการเพิ่มสัดส่วนปริมาตรของอนุภาคนาโน การเพิ่มสัดส่วนของอนุภาคนาโนจะเพิ่มพลังงานไฟฟ้าสุทธิที่อัตราส่วนความเข้มข้นสูงในขณะที่พลังงานความร้อนลดลง ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการใช้ ของไหลนาโน เป็นเทคนิคการระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้อัตราส่วนความเข้มข้นของแสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงเหลือ 38 องศาเซลเซียส และประสิทธิภาพทางไฟฟ้าดีขึ้นถึง 19 เปอร์เซ็นต์

เบนจามิน เฮอร์มันน์ เพรสนิตซ์ และคณะ (Benjamim Herrmann-Priesnitz; et al. 2016). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาความเร็ว และสนามการกระจายอุณหภูมิ โดยออกแบบแบบจำลองคณิตศาสตร์ นิดกระทบครีระบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋วแบบเฟสเดียวที่มีการไหลวนออกตามแนวรัศมี สำหรับปลั๊กความร้อนสูง ค่าความดันตกคร่อมรวม และค่าเฉลี่ยความร้อนจากผนังจะถูกคำนวณจากอัตราการไหลที่แตกต่างกัน และผลกระทบของการเปลี่ยนความสูงของช่องครีบ มุมทางเข้า และสารทำงาน การหมุนวนของของไหลก่อให้เกิดการไหลเวียน จากผลการศึกษาพบว่าช่วยเพิ่มการพาความร้อนเนื่องจากการเคลื่อนที่ของของไหลไปยังพื้นผิวการแลกเปลี่ยนความร้อน ความแข็งแรงของผลกระทบนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของชั้นขอบเขตของอุทกพลศาสตร์ซึ่งเป็นลักษณะของ ค่าเลขเรย์โนลด์ส (Re) และมุมของขาเข้าของการไหล ผล

ของการลด ค่าเลขพรีนดท์เทิล (Pr) ได้รับการประเมินการเปลี่ยนสารทำงานจากน้ำเป็นของไหลนาโนทองแดง (Cu) ในสัดส่วนต่อน้ำโดยปริมาตร 2.0 เปอร์เซ็นต์ และ 4.0 เปอร์เซ็นต์ สำหรับกรณีศึกษาพบว่า การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยการเพิ่มการหมุนเวียนของของไหลเข้ามามากกว่าการลด ค่าเลขพรีนดท์เทิล โดยใช้ของไหลนาโนแม้ว่าจะมีค่าใช้จ่ายในการสูบของไหลสูงกว่า เพื่อเพิ่มสมรรถนะของอุปกรณ์ สำหรับการใช้งานที่ฟลักซ์ความร้อนสูงการไหลเวียนของของเหลวควรเป็นส่วนที่เป็นไปได้ตามความเป็นไปได้ พบว่าเมื่อลดความสูงของครีกระบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว ขอบเขตชั้นการไหลอาจผสมผสาน และผลจากการรั่วไหลจะทำให้เกิดการสูญเสีย ดังนั้นการไหลของความร้อนทั้งหมดอาจไม่เพิ่มขึ้นพร้อมกับการลดลงของพื้นที่ทางเดินไหลซึ่งต่างกับครีระบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋วทั่วไป ช่องระบายความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบหมุนวนมีลักษณะการระบายความร้อนที่น่าสนใจสำหรับการใช้งาน เช่น การจัดการความร้อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หรือ โฟโตโวลตาอิก ที่มีอัตราส่วนการสูญเสียต่ออัตราความร้อน 0.02 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการศึกษาออกแบบ

บิน ซัน และคณะ (Bin Sun; et al. 2016). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีการทดลองเพื่อศึกษาสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบฉีดกระทบ โดยใช้สารทำงานของไหลนาโน โดยทำการศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนโดยการเปรียบเทียบ อัตราการไหลที่แตกต่างกัน ความสูงของตำแหน่งหัวฉีด และชนิดของของไหลนาโน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้ของไหลนาโน กับระบบทำความเย็นแบบฉีดกระทบทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และความดันที่ลดลงในระบบไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญจากสารทำงานดั้งเดิม แต่ที่มีความแตกต่างจากสภาพดั้งเดิม คือแตกต่างกันรูปร่างหัวฉีดที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อชนิดของไหลนาโนฟลูอิดถูกเปลี่ยนส่วนผสมสารทำงานทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของหัวฉีดแบบวงกลมสูงกว่าหัวฉีดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส นอกจากนี้มุมของฉีดที่มีขนาดใหญ่ยิ่งส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น ผลกระทบต่อการทำความเย็นของมุมหัวฉีดที่เหมาะสมจะเกิดขึ้นเมื่อปรับมุมของหัวฉีดถึง 90 องศา นอกจากนี้ขนาดหัวฉีดยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในสภาวะการทดลองตำแหน่งฉีดเดียวกัน

บี ยูเซฟา-ลาโฟรากิ และคณะ (B. Yousefi-Lafouraki; et al. 2016). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีแบบจำลองเชิงตัวเลข โดยการสร้างเอนโทรปีจากการถ่ายเทความร้อน และความเสียดทานของไหล ดำเนินการบนช่องแคบฉีดกระทบ ของไหลนาโน ที่ไม่ใช่นิวโทเนียน (Non - Newtonian) เป็นสารละลาย 0.5 เปอร์เซ็นต์น้ำหนัก คาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส (Carboxy Methyl Cellulose: CMC) กับอนุภาคนาโนไททาเนียมออกไซด์ (TiO_2) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นาโนเมตร มีการพิจารณาการไหลเวียนของชั้นสองมิติ และมีการใช้อุณหภูมิคงที่บนพื้นผิวการฉีดกระทบ ของไหลนาโนรวมทั้งของเหลวที่เป็นของเหลวพื้นฐาน แสดงพฤติกรรมของซูโดพลาสติก (Pseudoplastic) คุณสมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงรีโอโลยี (Rheological Properties) ของของเหลวฐาน และของไหลนาโน ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ในบทความนี้ได้มีการพัฒนาความสัมพันธ์สำหรับ กฎยกกำลัง

และดัชนีความสอดคล้องรวมทั้งการนำความร้อนเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิของของเหลวฐาน จากข้อมูลการทดลองที่มีอยู่ในการทบทวนวรรณกรรม เพื่อหาผลกระทบของการบรรจบกันของมุม และความกว้างของร่องกับการสร้างเอนโทรปีในช่องสัญญาณการจำลองเชิงตัวเลขจะดำเนินการสำหรับมุมการแปรสภาพระหว่าง 0 องศา และ 5 องศา และรัศมีของร่องในช่วง 0 – 0.007 เมตร ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการสร้างเอนโทรปีส่วนใหญ่จะมีความเข้มข้นในพื้นที่ผิวฉัดกระแทก การสร้างเอนโทรปีทั้งหมดเพิ่มขึ้นเมื่อมีสัดส่วนปริมาณเพิ่มขึ้น และมุมการรวมกัน ค่าต่ำสุดของการสูญเสียรายได้มักจะเกิดขึ้นที่มุมการบรรจบกันที่สูงขึ้นโดยการเพิ่ม ค่าเลขเรย์โนลด์ส (Re) และอัตราส่วนระหว่างผิวกระแทกกับระยะทาง นอกจากนี้การสูญเสียเอ็กเซอร์จี (Exergy) ลดลงด้วย ช่วงกว้างของคลื่นร่องเว้า

ดี ทอกห์เร่ (D. Toghraie. 2016). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการไหลเวียนของน้ำเดือด โดยฉีดน้ำอุณหภูมิต่ำไปกระทบผิวงานที่ร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส สัดส่วนของปริมาตร (Volume of Fluid: VOF) ถูกนำมาใช้เพื่อทำแบบจำลองคณิตศาสตร์การถ่ายเทความร้อนที่เดือด และการตรวจสอบปรากฏการณ์การหล่อเย็นผิวงานที่วางแนวนอนโดยการฉีดกระทบพื้นผิวงาน การจำลองโดยกำหนดให้อุณหภูมิน้ำคงที่ T_{Sub} เท่ากับ 55 องศาเซลเซียส, ค่าเลขเรย์โนลด์ส (Re) ตั้งแต่ 5,000 ถึง 50,000 และความแตกต่างของอุณหภูมิผิวงาน และอุณหภูมิน้ำ ($T_{Sub} = T_{Sat} - T_f$) ต่างกันระหว่าง 10 ถึง 95 องศาเซลเซียส ทำการศึกษผลกระทบของความเร็วของไหล อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นต่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้น การแพร่กระจายของน้ำที่พื้นเปียก อัตราการหล่อเย็น และฟลักซ์ความร้อนสูงสุด ผลของการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าโดยการเพิ่มความเร็วจนถึงของเหลวที่ฉีดกระทบผิวชิ้นงานทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาบริเวณจุดซังการไหลของของไหลเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการลดอุณหภูมิของไหลที่ฉีดกระทบผิวชิ้นงาน ยังจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาเพิ่มมากขึ้น

ยี ดี เชีย และคณะ (G.D. Xia; et al. 2016). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีการทดลองเพื่อศึกษา และวิเคราะห์โดยภาพรวมเกี่ยวกับ ของไหลนาโนที่ไหลผ่านช่องครีบบระบายความร้อนขนาดไมโครเมตร สารทำงานที่ศึกษาได้แก่ ของไหลนาโนอะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) และของไหลนาโนไททาเนียมออกไซด์ (TiO_2) โดยผสมกับน้ำในสัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาค คือ 0.0 เปอร์เซ็นต์ 0.1 เปอร์เซ็นต์ 0.5 เปอร์เซ็นต์ และ 1.0 เปอร์เซ็นต์ โดยวิธีการกระจายตัวไม่ให้อนุภาตกตะกอนแบบสองขั้นตอน คือการเติมสาร โพลีไวนิลไพโรลิโดน (Poly Vinyl Pyrrolidone: PVP) ลงในของไหลนาโนเพื่อหลีกเลี่ยงการรวมอนุภาค และเพิ่มเสถียรภาพ และใช้ Image IR 3350 สำหรับการกระจายอนุภาบบนพื้นผิวของครีบบระบายความร้อนแบบช่องขนาดไมโครเมตร ผลการทดลองพบว่าค่าการนำความร้อน และความหนืดแบบไดนามิกของของไหลนาโน อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) และไททาเนียมออกไซด์ (TiO_2) ดีขึ้นตามสัดส่วนปริมาตรอนุภาคนาโนที่เพิ่มขึ้นโดยเปรียบเทียบภายในครีบบระบายความร้อนแบบช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าพบว่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนเมื่อใช้สารทำงานของไหลนาโน อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) การเคลื่อนที่ทางความร้อน

ของอนุภาคนาโนช่วยกระตุ้นให้เกิดการหยุดชะงักของการไหลแบบราบเรียบ และเพิ่มการถ่ายเทความร้อนระหว่างของเหลวและผนังช่องครีประบายความร้อน การเปลี่ยนแปลงตามวัฏจักรที่มีคาบคงที่เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางที่เท่าวงคอนทอร์ความร้อนอาจช่วยทำลายชั้นขอบเขตการไหลของของไหลได้เช่นกัน

เอช อาเมดิ และคณะ (H. Ahmadi; et al. 2016). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีการศึกษาเชิงตัวเลข บทความนี้นำเสนอและกล่าวถึงผลของการคำนวณการไหลของสนาม และลักษณะการถ่ายเทความร้อนสำหรับเทอร์โบปั๊มของไหลนาโนอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3 - น้ำ) ที่กำลังเกิดขึ้นตามปกติกับพื้นผิวเครื่องวงกลม มีการพิจารณาพารามิเตอร์การไหล และทางเรขาคณิตที่หลากหลายรวม ถึงอนุภาคนาโนอนุภาคนาโน (ϕ), ค่าเลขเรย์โนลด์ส (Re) ของหัวฉีดและระยะทางจากปลายหัวฉีดถึงเป้าหมาย (h/B) ผลที่ได้จะนำเสนอในรูปแบบของเส้นกระแส ค่าเลขนัสเซิลต์ (Nu) เฉพาะจุดและค่าเฉลี่ยค่าเลขนัสเซิลต์ที่จุดสังเกตเช่นกัน การกระจายความเค้นแรงเฉือน และกำลังการสูบน้ำ ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นเนื่องจากมีอนุภาคนาโนที่อยู่ในน้ำ นอกจากนี้สำหรับอัตราส่วนของ h/B มากกว่า 3 อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยเฉลี่ยจากพื้นผิวจะเกิดขึ้นที่ $h/B = 5$ การเพิ่ม ค่าเลขเรย์โนลด์ส และความเข้มข้นของอนุภาคนาโนจะเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนของการแตกของหัวฉีดบนพื้นผิว อย่างไรก็ตามความหนืดที่สูงขึ้นของไหลนาโน มีผลกระทบต่อเพิ่มกำลังสูบน้ำที่จำเป็นต่อหน่วยความร้อนที่ถ่ายโอน

เอ็ม เคสฮวากท์-อะลีอะบาดี และคณะ (M. Khoshvaght-Aliabadi; et al. 2016). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีการทดลองเพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อน และลักษณะการไหลของของไหลที่เกิดจากการไหลของของไหลนาโนภายในท่อเกลียวขนาดเล็ก (Microtube) การทดลองครอบคลุมค่าเลขเรย์โนลด์สตั้งแต่ 700 ถึง 2,100 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อจิ๋ว 0.96×10^{-2} , 1.43×10^{-2} , 2.13×10^{-2} และ 2.87×10^{-2} เมตร และความเข้มข้นของของไหลนาโนทองแดง ($\text{Cu} - \text{Water}$) ในสัดส่วนโดยปริมาตรกับน้ำ 0.0 เปอร์เซ็นต์ 0.1 เปอร์เซ็นต์ และ 0.3 เปอร์เซ็นต์ ทองแดงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 787 ไมโครเมตร ภายในท่อจะมีปุ่มโค้ง 20 จุด การทดลองจะทำในต่อตรงเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับเปรียบเทียบ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสมรรถนะทางความร้อนของท่อเกลียวขนาดเล็ก (Microtube) ดีกว่าท่อตรง สำหรับท่อโค้งค่าเลขนัสเซิลต์ (Nu) และค่าเสียดสีจะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าของไหลนาโนช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนให้ดีขึ้น และความดันตกคร่อมลดลงเล็กน้อย ในทำนองเดียวกันการของไหลนาโนมีผลต่อสมรรถนะด้านการถ่ายเทความร้อน และแรงดันตกคร่อมสูงขึ้น

มานโซ เค สิงห์ และคณะ (Manoj K. Singh; et al. 2016). ทำการ ศึกษาวิจัยโดยวิธีการตรวจสอบการประเมินโดยวิธีทดลอง พื้นผิวเหล็กร้อนที่เป็นลงด้วยไอน้ำแบบของไหลนาโน และเปรียบเทียบกับหัวฉีดน้ำ ผลกระทบจากความเข้มข้นและความเร็วหัวฉีด ของไหลนาโน ที่ใช้ไททาเนียมออกไซด์ (TiO_2) บนอัตราการระบายความร้อนจะได้รับจากการทดลอง นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบอัตราการระบายความร้อนของไหลนาโนไททาเนียมออกไซด์ (TiO_2), อะลูมิเนียมออกไซด์

(Al_2O_3) และซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่มีความเข้มข้นและความเร็วเท่ากัน พลังค์ความร้อนทั้งหมดจะถูกอนุภาคนาโนจากเส้นโค้งการระบายความร้อนที่ได้จากการทดลองโดยใช้ระเบียบวิธีการไฟในดิวอลุ่ม (FVM) แบบหนึ่งมิติโดยใช้แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนผกผันแบบชั่วคราว พบว่าการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นโดยใช้หัวฉีดแบบนาโนฟลูอิดเมื่อเทียบกับน้ำ ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไททาเนียมในของไหลนาโน เพิ่มขึ้นทำให้ค่าพลังค์ความร้อนวิกฤติ (Critical Heat Flux: CHF) เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าการเปลี่ยนจากฟิล์มที่ต้มลงสู่การเปลี่ยนแปลงการเดือดจะเร็วกว่าสำหรับพื้นผิวที่ได้รับความร้อนด้วยไอของไหลนาโน

เอ็ม เชโคเลสลามิ และ ดี ดี เก็นจิ (M. Sheikholeslami; & D.D. Ganji. 2016). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีการวิเคราะห์กึ่งตัวเลข และเชิงตัวเลข ในการใช้สารเติมแต่ง เจือปน ในของเหลวพื้นฐาน เช่น น้ำ หรือ เอทิลีนไกลคอล เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเพื่มีอนุภาคนาโนเมตรที่เป็นนวัตกรรมใหม่ได้รับการกระจายตัวในของเหลวพื้นฐาน ในของไหลที่ถ่ายเทความร้อน ของเหลวที่มีการกระจายตัวของอนุภาคนาโนเมตรที่เรียกว่า ของไหลนาโน (Nanofluids) สองประเภทหลักได้กล่าวถึงในรายละเอียดเป็นแบบจำลองเฟสเดียวซึ่งการรวมกันของอนุภาคของอนุภาคนาโนและของเหลวพื้นฐาน ถือเป็นส่วนผสมระยะเดียวที่มีคุณสมบัติคงที่ และแบบจำลองสองเฟสซึ่งคุณสมบัติ และพฤติกรรมของอนุภาคนาโนจะพิจารณาแยกจาก สมบัติของเหลว และพฤติกรรมพื้นฐาน ทั้งแบบเฟสเดียว และแบบสองเฟสได้รับการนำเสนอในเอกสารฉบับนี้ บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับการไหล และการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีการกึ่งวิเคราะห์ และเชิงตัวเลข นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าเลขนัสเซลต์ (Nu) เป็นฟังก์ชันที่เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนปริมาตรของอนุภาคนาโน ค่าเลขราเลย์ (Rayleigh number: Ra) และ ค่าเลขเรย์โนลด์ส (Re) ในขณะที่ฟังก์ชันของ ค่าเลขฮาร์ทแมน (Hartmann number) ลดลง

มุสตาฟา เดกียิลมาซอกลู (Mustafa Turkyilmazoglu. 2016). ทำการศึกษาวิจัยการตรวจสอบการทดลองในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการศึกษากาไหลแบบราบเรียบของหัวฉีดแบบระนาบสองมิติแบบดั้งเดิม จะศึกษาเมื่อตัวกลางประกอบด้วยอนุภาคนาโนของ เงิน(Ag), ทองแดง (Cu), ทองแดงออกไซด์ (CuO), อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) และไททาเนียมออกไซด์ (TiO_2) มีวัตถุประสงค์เพื่อทำความเข้าใจถึงผลกระทบของสารเหลวนาโน ต่อพฤติกรรมกาไหลของอากาศ และการไหลของผนัง ความสัมพันธ์ของโมเมนตัม และความร้อนภายในของไหลจะได้รับในตอนแรก ต่อมามีการกำหนดปัจจัยสำคัญบางประการในการออกแบบชั้นขอบเขตของโมเมนตัมชั้นเฉือน และชั้นขอบเขตความร้อน เมื่อผนังต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขข้อ จำกัด ของผนังอะเดียแบติก หรืออุณหภูมิผนังคงที่ โดยใช้พารามิเตอร์เหล่านี้ช่องไหลจะแสดงให้เห็นว่ามีการชะลอตัวลง และส่งผลให้ความดันเฉือนบนผนังเพิ่มขึ้น หากไม่มีการแก่สมการพลังงานตัวประกอบรูปร่างของชั้นความร้อนจะช่วยให้สามารถจับภาพผลการทำความเข้าใจของฟิล์มกรองนาโนได้อย่างเต็มที่สำหรับกรณีผนังทั้งแบบอะเดียแบติก และแบบผนังอุณหภูมิความร้อนคงที่ ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนจึงเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อมีอนุภาคนาโน สรุปได้จากแบบจำลองของเหลวนาโนสองแบบที่นิยมใช้กันในงานวิจัยล่าสุดของเหลวนาโน

โอโรนซีโอ แมนคา และคณะ (Oronzio Manca; et al. 2016). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข เกี่ยวกับการกระแทกสล็อตหัวฉีด ที่ทำงานด้วยน้ำบริสุทธิ์ หรือของเหลว พื้นฐานของไหลนาโนอะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3 - Water) ตามที่นำเสนอ การไหลเป็นชั้น ๆ และมีอุณหภูมิสม่ำเสมอบนพื้นผิวเป้าหมาย วิธีแบบจำลองเฟสเดียวได้รับการรับรองเพื่ออธิบายถึงพฤติกรรมของไหลนาโน และมีการพิจารณาความเข้มข้นของอนุภาคต่าง ๆ นอกจากนี้ยังได้มีการจำลองแบบสำหรับอัตราส่วนทางเรขาคณิต ที่ต่างกันเพื่อที่จะคำนึงถึงผลกระทบที่จำกัด และค่าเลขเรย์โนลด์ส (Re) พฤติกรรมของระบบได้รับการวิเคราะห์ ในแง่ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในการถ่ายเทความร้อนโดยเฉลี่ยและเฉพาะจุด ค่าเลขนัสเซลต์ (Nu) และโปรไฟล์การสูญเสียพลังงานที่จำเป็น สำหรับความสัมพันธ์ตรงบริเวณที่ความเร็วเป็นศูนย์ (Stagnation Point) และค่าเฉลี่ยของ ค่าเลขนัสเซลต์ สำหรับ $100 \leq \text{Re} \leq 400$, $0 \leq \phi \leq 5$ เปอร์เซ็นต์ และ $4 \leq H/W \leq 10$

โอมิเดรซา ซาดิจี และคณะ (Omidreza Sadeghi; et al. 2016). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีการตรวจสอบเชิงตัวเลขใช้ระเบียบวิธีการไฟไนต์วอลุ่ม (FVM) เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อน ด้วยการพาความร้อนแบบราบเรียบ และของไหลนาโน ไหลผ่านท่อแบบวงกลม พร้อมกับแผ่นแทรกแบบขดลวด ผนังของท่อได้รับความร้อนสม่ำเสมอ ความต่อเนื่องโมเมนตัมและสมการพลังงาน การแบ่งค่าต่อเนื่องออกเป็นช่วงย่อย ๆ และใช้รูปแบบอัลกอริทึม SIMPLE ถูกนำมาใช้เพื่อเชื่อมโยงความดันและความเร็วภายในเขตข้อมูลสำหรับท่อล้วน สี่อัตราส่วนการบิดแตกต่างกันของ 1.95 - 4.89 อนุภาคนาโนสองชนิด คือ อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) และซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) ที่มีรูปทรงของอนุภาคนาโน รูปทรงกลม รูปทรงกระบอก และเกล็ดเลือด และสัดส่วนปริมาตร 0.5 - 2.0 เปอร์เซ็นต์ ในของเหลวฐาน (น้ำ) และเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคนาโนอยู่ในช่วง 20 - 50 นาโนเมตร ถูกนำมาใช้เพื่อระบุถึงผลกระทบ ต่อการถ่ายเทความร้อน และลักษณะการไหลของของเหลว ผ่านท่อรูปทรงกลม ที่มีการติดตั้งเทปรูปทรงเรขาคณิตแทรกแบบเกลียว ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสาร ของไหลนาโน 4 ชนิด มีปริมาณ ค่าเลขนัสเซลต์ (Nu) สูงกว่าน้ำบริสุทธิ์ ของไหลนาโนที่มีอนุภาคอะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) มีค่าเลขนัสเซลต์ มากที่สุด สำหรับกรณีทั้งหมดที่ศึกษาพบว่าค่าเลขนัสเซลต์ เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่ม ค่าเลขเรย์โนลด์ส และลดลงด้วยอัตราส่วนเกลียวของแผ่นขดลวด

ประสานต์ อานันท์ कुमार ลัม และเค อรุล ปราภาซ (Prasanth Anand Kumar Lam; & K. Arul Prakash. 2016). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนแบบหลาย ๆ วัตถุประสงค์ด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของการศึกษาการหล่อเย็น การประมาณการตอบสนองของพื้นผิว (Response Surface Approximation: RSA) วัตถุประสงค์ของฟังก์ชัน และการเพิ่มประสิทธิภาพโดยวิธี Multi - Objective Genetic Algorithm (MOGA) เพื่อทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและเอนโทรปีขั้นต่ำ แบบจำลองคณิตศาสตร์แสดงให้เห็นว่าระบบหล่อเย็นแบบการฉีดกระทบด้วยสารทำงานของไหลนาโนอะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3 - Water) เพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าเลขเรย์โนลด์ส, ความสูงของช่องทางที่ไม่มีมิติ (H/L) และ

สัดส่วนของอนุภาคนาโน (ϕ) การถ่ายเทความร้อน และการสร้างเอนโทรปี ผลแบบจำลองคณิตศาสตร์แสดงให้เห็นการไหลหมุนเวียนของฟองไอเดือดที่สองที่พื้นผิวด้านบนของท่อ ค่าเลขเรย์โนลด์ส (Re) มากกว่า 500 และที่หาค่าเลขเรย์โนลด์ส มากกว่า 800 แหล่งกำเนิดความร้อน นำไปสู่การสะสมความร้อน ความเข้มข้นของ ค่าเลขนัสเซลล์ต์ (Nu) บริเวณผิวจุดชะงักไหลพบว่ามีค่าสูงสุดของวงการไหลเวียนที่สองจะมีค่าต่ำสุด นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของพื้นผิวโดยรวมค่าเลขนัสเซลล์ต์ และการสร้างเอนโทรปี ทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นกับ ค่าเลขเรย์โนลด์ส สัดส่วนของอนุภาคนาโน (ϕ) และการลดความสูงของช่องทางที่ไม่มีมิติ (H/L) ค่าเลขเรย์โนลด์สเฉลี่ย และการเซาะร่องรูโอเมกา (Ω) ถูกเลือกเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์และสรุปได้ว่าการประมาณการตอบสนองของพื้นผิว (Response Surface Approximation: RSA) วัตถุประสงค์ของฟังก์ชัน และการเพิ่มประสิทธิภาพโดยวิธี Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA) มีค่าที่เหมาะสมสำหรับระบบระบายความร้อนแบบจืดกระแทบ

ชาดิก คาคัช และอัญชสา ประมวลเจริญกิจ (Sadik Kakaç; & Anchasa Pramuanjaroenkij . 2016). ทำการสรุปผลงานการศึกษาทบทวนวรรณกรรม ของไหลนาโน (Nanofluids) แสดงให้เห็นถึงข้อได้เปรียบ และศักยภาพในการปรับปรุงอัตราการถ่ายเทความร้อน เมื่อใช้ของไหลนาโน ใช้เป็นของเหลวสารทำงาน ในระบบระบายความร้อน กลุ่มนักวิจัยที่ให้ความสำคัญกับของไหลนาโน ได้เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และมุ่งเน้นไปที่ด้านต่าง ๆ ตามทฤษฎีการทดลอง และตัวเลข การทบทวนนี้สรุปผลงานที่สำคัญที่ตีพิมพ์เกี่ยวกับการเตรียมคุณสมบัติคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนแบบทดลอง และแบบตัวเลข ในการจำลองแบบสองประเภทหลักได้กล่าวถึงรายละเอียดเป็นแบบจำลองเฟสเดียวซึ่งการผสมผสานของอนุภาคนาโนและเบสจะถือเป็นส่วนผสมแบบเฟสเดียวที่มีคุณสมบัติคงที่ และแบบจำลองสองเฟสซึ่งคุณสมบัติของอนุภาคนาโน และพฤติกรรมจะได้รับการพิจารณา แยกออกจากสมบัติและพฤติกรรมของเหลวฐาน

ไซอิด ซุลฟิการ์ อาลี ซาอี และไซอิด ทอซีฟ โมไฮต์-ดิง (Syed Zulfiqar Ali Zaidi; & Syed Tauseef Mohyud-Din. 2016). ทำการศึกษาวิจัยการตรวจสอบการทดลองเนื่องจากความต้องการที่เพิ่มขึ้น ของระบบระบายความร้อน และความร้อนที่มีประสิทธิภาพในด้านอุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมการบิน และอวกาศ เทคโนโลยีการถ่ายเทความร้อนกำลังได้รับความสำคัญสำหรับการแก้ปัญหาที่พึงประสงค์ เมื่อพิจารณาถึงความต้องการของระบบระบายความร้อน/ความร้อน ที่มีประสิทธิภาพเราได้พิจารณาถึงปัญหาของการไหลเวียนของอากาศแบบไหลเวียนของอากาศแบบสองชั้นที่มีความหนืดแบบเหนียวหนืด ผลกระทบของการแพร่กระจายความร้อน และการเคลื่อนที่แบบบราวน์เนียน (Brownian Motion) ได้รับการพิจารณาในระหว่างการตรวจสอบ พร้อมกับเงื่อนไขขอบเขตการหมุนเวียนสภาพการควบคุมแบบพาสซีฟ (Passive Control Condition) ใช้เพื่อควบคุมความเข้มข้น ของอนุภาคนาโนที่ผิว หลังจากใช้วิธีแก้ปัญหาความคล้ายคลึงกัน สมการได้รับการแก้ไขโดยใช้วิธีเชิงตัวเลข ที่มีชื่อเสียงซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีในรูปแบบวิธี Runge – Kutta - Fehlberg การเปลี่ยนแปลงความแปรผันของความเร็วอุณหภูมิ และความเข้มข้น ที่เกิดจากแรงแม่เหล็กแรง

ค่าเลขลิวอิส (Lewis) และค่าเลขพรันด์เทิล (Prandtl) จะถูกบันทึกไว้ ได้รับการสังเกตว่าแรงลอเรนซ์ (Lorentz) มีความสำคัญในการควบคุมการสั่นสะเทือนพิเศษในการไหลของของเหลว เนื่องจากสภาพขอบเขตการควบคุมแบบพาสซีฟเราจึงบันทึกผลการเคลื่อนไหวนวของพารามิเตอร์บราวน์เนียน (Brownian) ไม่สำคัญในอัตราการถ่ายเทความร้อน

วาย เอฟ ลี และคณะ (Y.F. Li; et al. 2016). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนของครีบบระบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจี้ยาว โดยการสอดแท่งสามเหลี่ยม และสี่เหลี่ยมผืนผ้าบิดให้เป็นเกลียวคลื่น (Triangular Cavities and Rectangular Ribs: TC - RR) และศึกษาคุณลักษณะของการไหลของของไหล และการถ่ายเทความร้อนที่ ค่าเลขเรย์โนลด์ส์ ตั้งแต่ 173 ถึง 635 ผลกระทบของโพรง และร่องเกลียวกับ ค่าเลขนัสเซลล์ต์ และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน นอกจากนี้ยังใช้วิธีลดการเกิดเอนโทรปีเพื่อวิเคราะห์สมรรถนะทางความร้อนของครีบบระบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจี้ และกลไกพื้นฐานของการเพิ่มความสามารถ ผลการใช้เทคนิค TC - RR กับครีบบระบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจี้ ทำให้ความสามารถถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญอันเนื่องมาจากการหยุดชะงัก และการปรับปรุงชั้นเขตร้อนมีความปั่นป่วนที่ทวีความรุนแรงขึ้น และการผสมที่ไร้ระเบียบระหว่างน้ำเย็นและน้ำร้อน นอกจากนี้ยังศึกษาอิทธิพลของความกว้างร่องสัมผัส (α) และความกว้างของโพรงสัมผัส (β) ต่อสมรรถนะการไหลและถ่ายเทความร้อน ปัจจัยความสามารถถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นสำหรับของครีบบระบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจี้แบบเพิ่ม TC - RR ที่มีค่า $\alpha = 0.3$ และ $\beta = 2.24$ มีค่าเท่ากับ 1.619 ที่ ค่าเลขเรย์โนลด์ส์ (Re) = 500 เนื่องจากอุณหภูมิพื้นผิวด้านล่างไม่สม่ำเสมอ และมีสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้นโดยการสอดแท่งสามเหลี่ยม และสี่เหลี่ยมผืนผ้าบิดให้เป็นเกลียวคลื่นทำให้ระบบหล่อเย็นแบบครีบบระบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจี้มีความสามารถถ่ายเทความร้อนมากขึ้น

เอ เอ็ม เทียรา และคณะ (A.M. Tiara; et al. 2017). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีการทดลองเพื่อศึกษาการนำความร้อนของของไหลนาโนอะลูมินา โดยระบายความร้อนออกจากแผ่นเหล็ก ของไหลนาโนมีความเข้มข้นของอะลูมินา 10 ppm. พื้นผิวชั้นงานไม่มีประจุออน สารทำงานไหลฉีดกระทบชิ้นงานขนาดความกว้าง 100.0 มิลลิเมตร ขนาดความยาว 100.0 มิลลิเมตร และขนาดความหนา 6.0 มิลลิเมตร อุณหภูมิของชิ้นงานเริ่มหล่อเย็นจาก 900 องศาเซลเซียส แผ่นเหล็ก ($100 \times 100 \times 6$ มิลลิเมตร) ความร้อนจะถูกระบายออกที่อุณหภูมิเริ่มต้น 900 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าค่าการนำความร้อนเพิ่มสูงสุดถึง 21.0 เปอร์เซ็นต์ และมุมการฉีดกระทบสัมผัสต่ำสุดที่ 40.48 องศา อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่ 139 องศาเซลเซียสต่อวินาที และค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤติที่ 2.93 เมกะวัตต์ต่อตารางเมตร ที่ความเข้มข้นของของไหลนาโนอะลูมินา 55 ppm.

ซ่ง ชี และคณะ (Cong Qi; et al. 2017). ทำการศึกษาวิจัยโดยการทดลองเพื่อศึกษาความเสถียรภาพของของไหลนาโน อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3 - Water) และ ไททาเนียมออกไซด์ (TiO_2 - Water) และวิเคราะห์โครงสร้างของอนุภาคนาโน ชุดทดลองสำหรับศึกษาคุณลักษณะการ

ถ่ายเทความร้อนของ CPU. ที่ระบายความร้อนโดยใช้ของไหลนาโนทำการศึกษาคูณลักษณะการถ่ายเทความร้อน และการไหลของของไหลนาโนของครีระบายความร้อนของ CPU. สัดส่วนของอนุภาคนาโนต่อน้ำกลั่นโดยปริมาตรที่ทำการศึกษาดังนี้ อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3 - Water): 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์ ไททาเนียมออกไซด์ (TiO_2 - Water): 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, และ 1.0 เปอร์เซ็นต์ และค่าเลขเรย์โนลด์ส์ (Re) 146, 275, 406, 479, 541, 593, 707 และ 812 เพื่อใช้ศึกษาคูณลักษณะการถ่ายเทความร้อน และการไหลของของไหลนาโน นอกจากนี้ยังทำการตรวจสอบการประเมินสมรรถนะของของไหลนาโนพบว่าของไหลนาโนที่มีสัดส่วนอนุภาคนาโนสูงสุดประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนไม่ดี และค่าเลขนัสเซลต์ จะเพิ่มขึ้นและลดลงตามสัดส่วนโดยมวลของอนุภาคนาโน และสัดส่วนโดยมวลของของไหลนาโน มีนัยสำคัญสำคัญสำหรับประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุดของของไหลนาโน อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3 - Water) และ ไททาเนียมออกไซด์ (TiO_2 - Water) มีค่าเท่ากับ $\omega = 1.0$ เปอร์เซ็นต์ และ $\omega = 0.4$ เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าของไหลนาโน Al_2O_3 และ TiO_2 สามารถลดอุณหภูมิของ CPU. ได้ถึง 23.2 เปอร์เซ็นต์ และ 14.9 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำตามลำดับ

ฟาติห์ ซิลิมอีฟินไดกิล และฮาแกน เอฟ ออซท็อป (Fatih Selimefendigil; & Hakan F. Oztop. 2017). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของการระบายความร้อนด้วยตัววิธีการฉีดกระทบชิ้นงานพื้นผิวโค้งด้วยสารทำงานของไหลนาโนทองแดงออกไซด์ (CuO - Water) ดำเนินการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์โดยระเบียบวิธีถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Galerkin Weighted Residual Finite Element Method) และระเบียบวิธี COBYLA (Constrained Optimization By Linear Approximation) พิจารณาเลือกอัลกอริทึมที่เหมาะสม พื้นผิวทดลองมีลักษณะโค้งบางส่วน และรูปร่างกึ่งรูปวงรี และอุณหภูมิคงที่การทดลองโดยการเปลี่ยน ค่าเลขเรย์โนลด์ส์ (Re) และสัดส่วนอนุภาคของของไหลนาโนโดยปริมาตร พบว่าผนังโค้งการกระจายตัวของของไหล และลักษณะการถ่ายเทความร้อนมีความเด่นชัดมากขึ้นตาม ค่าเลขเรย์โนลด์ส์ ที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับผนังแบนการถ่ายเทความร้อนจะเกิดสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับผนังโค้ง และค่าเลขนัสเซลต์ (Nu) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างผนังผิวเรียบกับผนังผิวโค้ง ค่าเลขนัสเซลต์ เฉลี่ยเป็นฟังก์ชันที่เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนอนุภาคนาโนที่เพิ่มขึ้น และแนวโน้มการถ่ายเทความร้อนบริเวณพื้นผิว และค่าเฉลี่ยมีความคล้ายคลึงกับผนังผิวโค้ง และผนังผิวแบบราบเมื่อสัดส่วนอนุภาคนาโนเพิ่ม ค่าเลขนัสเซลต์ เฉลี่ยเพิ่มขึ้นประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ที่สัดส่วนอนุภาคนาโนสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าเลขนัสเซลต์ เฉลี่ยขึ้นอยู่กับ ค่าเลขเรย์โนลด์ส์ (Re) และสัดส่วนอนุภาคของของไหลนาโน

เค. วงษ์ขารี่ และคณะ (K. Wongcharee; et al. 2017). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีการทดลองเพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเครื่องกระทบแบบการสั่นสะเทือนหมุนกับสารทำงานของไหลนาโนไททาเนียม โดยใช้เทคนิคคริสตัลเหลวแบบเทอร์โมโครมิก (Thermochromic Liquid Crystal) ในอัตราส่วนระหว่างพื้นฉีดกระทบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด (L/D) 1.0, 2.0,

3.0 และ 4.0 สำหรับ ค่าเลขเรย์โนลด์ส (Re) ตั้งแต่ 5,000 ถึง 20,000 การทดลองได้ดำเนินการโดยใช้สารทำงานของไหลนาโนไททาเนียม ที่มีความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์, 1.0 เปอร์เซ็นต์, 1.5 เปอร์เซ็นต์ และ 2.0 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร โดยแผ่นบิต และมุมบิต ที่มีอัตราส่วนการบิต (y/w) 4.0, 5.0, 6.0 และ 7.0 ได้มีการทดสอบการฉีดกระทบแบบธรรมดา และการฉีดกระทบ แบบหมุนวนด้วยน้ำบริสุทธิ์เพื่อเปรียบเทียบ ในสภาพการทำงานที่คล้ายคลึงกัน พบว่าการฉีดกระทบแบบหมุนวนมีการถ่ายเทความร้อนที่เหนือกว่า การฉีดกระทบแบบธรรมดาแบบเดิม ๆ นอกจากนี้ยังพบว่าสารทำงานของไหลนาโนไททาเนียม ที่มีความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์, 1.0 เปอร์เซ็นต์, 1.5 เปอร์เซ็นต์ และ 2.0 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรให้ ค่าเลขนัสเซลล์ต์ (Nu) สูงกว่าของเหลวพื้นฐาน (น้ำ) ในขณะที่สารทำงานของไหลนาโนไททาเนียม ความเข้มข้น 2.5 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นผลตรงข้าม ในช่วงที่ทำการศึกษามีสภาวะที่เหมาะสมสูงสุด ในการทดลองนี้สารทำงานของไหลนาโนไททาเนียม ที่มีความเข้มข้น 2.0 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร และแผ่นบิต และมุมบิต ที่มีอัตราส่วนการบิต (y/w) เท่ากับ 6.0

เค วงษ์ชารี และคณะ (K. Wongcharee; et al. 2017). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีการทดลองเพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนทองแดงออกไซด์ (CuO - Water) นำมาประยุกต์ใช้กับการฉีดกระทบพร้อมกับมีการไหลเวียนแบบหมุนวนตามร่องเกลียวที่มีอัตราส่วนการบิต (y/w) ที่ 1.43, 2.86 และ 4.28 ใช้อัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดกับแผ่นงาน (H/d) ที่แตกต่างกัน 3 ระดับเท่ากับ 2.0, 3.0 และ 4.0 โดยมีการใช้ของไหลนาโนที่มีความเข้มข้นของทองแดงออกไซด์ (CuO) 2.0 เปอร์เซ็นต์ 3.0 เปอร์เซ็นต์ และ 4.0 เปอร์เซ็นต์ ในสัดส่วน โดยปริมาตรกับน้ำ สำหรับ ค่าเลขเรย์โนลด์ส (Re) ตั้งแต่ 1,600 ถึง 9,400 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าของไหลนาโนที่มีความเข้มข้นของ CuO เท่ากับ 2.0 เปอร์เซ็นต์ และ 3.0 เปอร์เซ็นต์ ในสัดส่วน โดยปริมาตรกับน้ำให้ ค่าเลขนัสเซลล์ต์ (Nu) ที่สูงกว่าน้ำในขณะที่ของไหลนาโนที่มีความเข้มข้นของทองแดงออกไซด์ (CuO) เท่ากับ 4.0 เปอร์เซ็นต์ จะแสดงผลลัพธ์ตรงกันข้าม อัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดกับแผ่นงาน (H/d) เท่ากับ 2.0 ค่าเลขนัสเซลล์ต์ จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่มีการปรับอัตราส่วนมุมบิต (y/w) ลดลงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดกับแผ่นงาน (H/d) ที่ 3.0 และ 4.0 ค่าเลขนัสเซลล์ต์ เพิ่มขึ้นเมื่อมีอัตราส่วนการบิตเพิ่มขึ้น จากการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ $H/d = 2.0$ และ y/w เท่ากับ 1.43 และของไหลนาโนที่มีความเข้มข้นของทองแดงออกไซด์ (CuO) เท่ากับ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

จิโซ แอลวี และคณะ (Jizu Lv; et al. 2017). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีการทดลองศึกษาสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน ด้วยการฉีดกระทบแบบอิสระ ด้วยหัวฉีดเดี่ยวด้วยสารทำงานของไหลนาโนซิลิคอน ที่มีสัดส่วนกับน้ำโดยปริมาตรต่างกัน 1.0 เปอร์เซ็นต์, 2.0 เปอร์เซ็นต์ และ 3.0 เปอร์เซ็นต์ โดยศึกษาถึงผลกระทบของสัดส่วนของอนุภาคนาโน ที่แตกต่างกัน ค่าเลขเรย์โนลด์ส (Re) ระยะของหัวฉีดกับแผ่นรับการฉีดกระทบ และมุมฉีดกระทบ ที่มีผลต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของการฉีดกระทบของสารของไหลนาโน นอกจากนี้ยังทำการวิเคราะห์สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนตามแนวรัศมี ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้สารของไหลนาโน ช่วยเพิ่ม

คุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนของการฉีดกระทบแบบอิสระด้วยหัวฉีดเดี่ยว สำหรับสารทำงานของไหลนาโนซิลิคอน ที่มีความเข้มข้นของอนุภาคนาโน 3.0 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร ตัวเลขเรย์โนลด์ส จาก 8,000 ถึง 13,000 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าน้ำบริสุทธิ์ประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในการถ่ายเทเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของอนุภาคนาโน ที่เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคนาโน และค่าเลขเรย์โนลด์ส (Re) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลงตามแนวรัศมี ในที่สุดความสัมพันธ์ในการถ่ายเทความร้อนของไหลนาโนซิลิคอน สำหรับการฉีดกระทบแบบอิสระเพิ่มขึ้นโดยอาศัยผลของอนุภาคนาโนที่เพิ่มขึ้น และสภาวะของการฉีดกระทบที่เหมาะสม

จิโซ แอลวี และคณะ (Jizu Lv; et al. 2017). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีการทดลองเพื่อศึกษาสัดส่วนโดยปริมาตรของของไหลนาโนอะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3 - Water) จำนวน 4 ตัวอย่าง ได้แก่ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์ การทดลองด้วยการฉีดกระทบแบบอิสระด้วยหัวฉีดเดี่ยว ค่าเลขเรย์โนลด์ส มุมตกกระทบ และระยะห่างของหัวฉีดต่อแผ่นชิ้นงาน (H/D) เป็นตัวแปรในการตรวจสอบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน เพื่อสังเกตคุณลักษณะการไหลของของไหลนาโน สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ในการถ่ายเทความร้อน และสัดส่วนของของไหลนาโน โดยปริมาตรกับน้ำ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเป็นสัดส่วนกับสัดส่วนความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่เพิ่มขึ้น ค่าเลขเรย์โนลด์ส (Re) ลดลงเมื่อมุมตกกระทบเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ควรพิจารณาถึงอิทธิพลของความเข้มข้นอนุภาคนาโนลดลง และสภาวะของการกระฉีดกระทบ

เอ็ม โมฮิบ เออร์ ริชแมน และคณะ (M. Mohib Ur Rehman; et al. 2017). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีการทดลอง และวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาเทคนิคการฉีดกระทบบนพื้นผิวแบบอิสระสารหล่อเย็นแบบสองสถานะที่ได้รับความนิยมอย่างมากในการนำไปใช้งานสำหรับหล่อเย็น อย่างไรก็ตามความเข้าใจวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์ของ ของการฉีดกระทบบนพื้นผิวแบบอิสระงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาลักษณะการไหล และการระเหยถ่ายเทความร้อน ของการฉีดกระทบแผ่นทองแดง ที่ให้ความร้อนแบบคงที่ โดยการใช้ น้ำ ของไหลนาโนแบบแคปซูล ภายในมีสองสถานะเป็นของเหลวชั้น (Nano - Encapsulated Phase - Change Material: NEPCM.) และของไหลนาโนเป็นสารหล่อเย็น สมการความต่อเนื่องสามมิติโมเมนตัม และสมการพลังงาน ถูกป้อนอยู่ในโปรแกรมไฟไนต์วอลุ่ม (FVM) ของการไหลแบบปั่นป่วนแบบ $k-\epsilon$ การไหลเชิงปริมาณแบบหลายสถานะของของเหลวถูกนำมาใช้ในการศึกษานี้เพื่อสร้างแบบจำลองของการฉีดกระทบบนพื้นผิวอิสระของของเหลวกับอากาศรอบข้าง วิธีการฉีดของเหลวแบบเฟสเดียวเป็นแบบจำลองอ้างอิงสำหรับการศึกษาเพื่อหาคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพของสารละลาย NEPCM. และของไหลนาโน การคำนวณคาดการณ์ ค่าเลขนัสเซลต์ และค่าความดันตกคร่อม และผลทดลองใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง ข้อมูลทางกายภาพ เช่น อุณหภูมิขาเข้าของไหล ระยะห่างของหัวฉีดต่อระยะห่างผิวงาน และความเข้มข้นของอนุภาคนาโน การเติมอนุภาคของ NEPCM. และสัดส่วนอนุภาคของอะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) กับน้ำมีส่วนช่วยให้ ค่าเลขนัสเซลต์เพิ่มขึ้น และการลดลงอุณหภูมิชะงัก

ตามด้วยการลดลงของความดันตกคร่อม สารละลาย NEPCM. ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการระบายความร้อนของระบบโดยการเพิ่มความสามารถในการเก็บความร้อนในขณะที่ของไหลนาโนช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพในการระบายความร้อนด้วยการเพิ่มความสามารถในการนำความร้อน สมรรถนะด้านความร้อนสามารถปรับปรุงได้ดีขึ้นด้วยความเข้มข้นของอนุภาคที่เพิ่มขึ้น ส่วนสารละลาย NEPCM. แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการทำงานที่เหนือกว่าการทำงานของของไหลนาโน

เอ็น ซันดิฟ และไอ แอล เอนิมาซา (N. Sandeep; & I.L. Animasaun. 2017). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นของ ของไหลนาโนสแนมแม่เหล็กไฟฟ้า กับการแผ่รังสีความร้อน และผลกระทบที่เกิดจากสแนมแม่เหล็กแบบเอียง โดยพิจารณาใช้น้ำเป็นสารทำงานพื้นฐาน สำหรับใช้เปรียบเทียบความแตกต่างของของไหลนาโนอลูมิเนียมทั้ง 2 ชนิด คือ AA 7072 และ AA 7075 อลูมิเนียม AA 7072 เป็น โลหะผสมอลูมิเนียมอัลลอยด์ ชนิดพิเศษ ที่มีความร้อนทนต่อความร้อนได้ดีส่วนผสมที่สำคัญ ดังนี้ อลูมิเนียม 98.0 เปอร์เซ็นต์ สังกะสี 5.0 ถึง 6.0 เปอร์เซ็นต์ แมกนีเซียม 2.0 ถึง 3.0 เปอร์เซ็นต์ และสารเติมแต่งอื่น ๆ 1.0 ถึง 2.0 เปอร์เซ็นต์ เช่น ทองแดง ซิลิคอน เหล็ก และแมงกานีส ผลของแบบจำลองคณิตศาสตร์ $R-k$ และใช้เทคนิคของนิวตัน ผลของกราฟความเร็ว และอุณหภูมิ แสดงให้เห็นว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโน AA 7075 สูงกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโน AA 7072

ซาเยส อับราฮิม แกเซมิ และคณะ (Seyed Ebrahim Ghasemi; et al. 2017). ทำการศึกษาวิจัยโดยการทดลอง และวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาช่องระบายความร้อนแบบต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับระบายความร้อนชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ระบายความร้อนที่มีความยาว และความกว้าง 60.0 มิลลิเมตร และความสูงโดยรวม 16.0 มิลลิเมตร ทำจากวัสดุอะลูมิเนียม ระบายความร้อนออกแบบเป็นแท่งวงกลมขนาดเล็กจำนวน 4 แท่ง และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางไหลของของไหล 3 ขนาดได้แก่ ช่องขนาด 4.0 มิลลิเมตร, 6.0 มิลลิเมตร และ 8.0 มิลลิเมตร ระบายความร้อนถูกป้อนความร้อนด้วยฟลักซ์ความร้อนแบบคงที่สม่ำเสมอ นอกจากนี้การแก้ปัญหาด้วยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์แบบไฟไนท์วอลุ่ม (Finite Volume Method: FVM) และเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลของวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์แสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์เป็นที่ยอมรับได้ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางไหลเพิ่มขึ้นส่งผลกระทบต่อการถ่ายเทความร้อน และลักษณะของความดันตกคร่อมลดลง นอกจากนี้ช่องทางไหลขนาดเล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก 4.0 มิลลิเมตร มีค่าความต้านทานความร้อนต่ำกว่าช่องทางไหล ขนาดเล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก 6.0 มิลลิเมตร และ 8.0 มิลลิเมตร นอกจากนี้การเพิ่มประสิทธิภาพของระบายความร้อนจะทำให้มี ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุด และความดันตกคร่อมลดลงต่ำสุด

เอส ลูฮาร์ และคณะ (S. Lohar; et al. 2017). ทำการศึกษาวิจัยโดยการทดลอง และวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์ เพื่อถ่ายเทความร้อนออกจากชิปไมโครโพรเซสเซอร์ ที่จัดวางเรียงกันเป็นชุดหลาย ๆ ตัวซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาตามภาระที่เกิดขึ้นเป็นความท้าทาย

ทางเทคโนโลยีที่สำคัญอย่างมาก การเพิ่มอุณหภูมิที่สูงขึ้นเป็นสิ่งที่ไม่พึงปรารถนาเพราะมีผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพการทำงาน และความน่าเชื่อถือ การฉีดกระทบเพื่อหล่อเย็นอุปกรณ์เป็นเทคนิคที่มีใช้กันอย่างกว้างขวางมากเพราะเป็นเทคนิคที่มีศักยภาพในการถ่ายโอนความร้อนออกจากระบบ การฉีดกระทบมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนในบริเวณที่ต้องการ โดยแบบจำลองทางทฤษฎี และความสัมพันธ์ที่ได้นำเสนอสำหรับสถานการณ์ที่หลากหลาย เพื่อศึกษาทดลองอย่างไรก็ตามการกระจายอุณหภูมิที่เกิดขึ้นสามารถนำไปการพัฒนาแบบและการวิเคราะห์ที่มั่นคง และแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนแบบชั่วขณะที่กำลังถึงความผันแปรของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบไม่เชิงเส้น และการไหลของความร้อนที่ไม่คงรูปแบบ การแก้ปัญหาในรูปแบบอนันต์ค่าสัมประสิทธิ์ของที่ถูกกำหนดโดยการแก้สมการทางพีชคณิต การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่คาดการณ์ไว้ในแบบจำลองพบว่าผลจากการทดลองกับการจำลองแบบไฟไนต์เอลิเมนต์สองคล้องกัน สรุปได้ว่าการถ่ายเทความร้อนโดยวิธีการฉีดกระทบสามารถเพิ่มประสิทธิภาพที่การทำงานของชิปไมโครโปรเซสเซอร์ ได้อย่างเหมาะสมกับสถานการณ์ที่จำลองขึ้น และสามารถนำไปประยุกต์ออกแบบระบบระบายความร้อน และเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของชิปไมโครโปรเซสเซอร์ได้จริง

เสี่ยวหมิง หวง และคณะ (Xiaoming Huang; et al. 2017). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว และความสามารถปรับปรุงสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของการฉีดกระทบครีประบายความร้อนขนาดเล็กจิ๋ว โดยโครงสร้างครีที่แตกต่างกันได้แก่ แบบนูน แบบร่อง และแบบผสมนูนกับร่อง ทำการศึกษาเปรียบเทียบโดยการฉีดกระทบด้วยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์ และการประยุกต์ใช้หลักการผสมผสานครี ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า (1) การฉีดกระทบครีแบบผสมผสานการระบายความร้อนที่ดีที่สุด ตามมาด้วยครีแบบผสม และครีแบบร่อง โดยไม่มีการรบกวนร่องสลาย และมีร่องลึกว่า (2) ครีแบบนูนช่วยลดความต้านทานการไหลของการฉีดกระทบ และ (3) ในการฉีดกระทบทั้งหมดครีแบบผสมผสานมีประสิทธิภาพโดยรวมดีที่สุดรองลงมาครีแบบผสมผสาน และครีร่อง

จื่อกั๋ว ถัง และคณะ (Zhiguo Tang; et al. 2017). ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการหล่อเย็นแบบฉีดที่ค่าฟลักซ์ความร้อนสูง และการฉีดกระทบที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ปัจจัยที่ทำการศึกษารูปทรงกรวยแบบเรียงแถว และลักษณะการฉีดกระทบด้วยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์ ใช้เพื่อประเมินผลกระทบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยใช้ ค่าเลขนัสเซลต์ (Nu) เฉลี่ยโดยการฉีดของไหลกระทบครีระบายความร้อนรูปทรงกรวยที่มีมุมลาดเอียง ($A = 0.0 - 70$ องศา) ขนาดอัตราส่วนความลาดเอียงของ หัวฉีดกับเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด ($d1/d = 1 - 3$) และอัตราส่วนระยะห่างของหัวฉีดกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด ($H/d = 3 - 7$) ค่าเลขเรย์โนลด์ส ($Re = 16,000 - 32,000$) และความหนาแน่นของฟลักซ์ความร้อน ($q = 60 - 100$ วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าผลของการถ่ายเทความร้อนโดยวิธีการฉีดกระทบครีระบายความร้อนทรงกรวยลาดเอียงให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนดีกว่าครีระบายความร้อนทั่วไป ผลการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่มุมลาดเอียง 50 องศา อัตราส่วนความลาด

เอียงของหัวฉีดกับเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด d_1/d เท่ากับ 2 และอัตราส่วนระยะห่างของหัวฉีดกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด H/d เท่ากับ 5 นอกจากนี้ ค่าเลขนัสเซลล์ (Nu) เพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์ส (Re) เพิ่มขึ้นในช่วง 16,000 - 32,000 และค่าฟลักซ์ความร้อนสูงสุด

2 สรุปผลการทบทวนวรรณกรรม

จากการศึกษาทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ทำให้ทราบถึงผลการวิเคราะห์ และการทดลองของที่ใช้เป็นสารทำงานพื้นฐาน และของไหลนาโนชนิดต่าง ๆ เป็นสารทำงาน และครีบนชนิดต่าง ๆ เช่น แผ่นเรียบ ช่องการไหลขนาดเล็ก และช่องการไหลขนาดเล็กจิ๋ว การฉีดกระทบแบบต่าง ๆ เช่น แบบฉีดในห้องเปิด แบบฉีดในห้องกึ่งเปิด และแบบฉีดในห้องปิด เป็นต้น การทดลองส่วนใหญ่จะฉีดกระทบบนแผ่นเรียบในห้องแบบเปิด และห้องแบบกึ่งเปิดเพื่อศึกษาคุณลักษณะต่าง ๆ ของการไหล การถ่ายเทความร้อน โดยตัวแปรส่วนใหญ่ที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ ค่าเลขเรย์โนลด์ส ค่าเลขนัสเซลล์ ค่าความเข้มข้นของสารนาโนทั้งสัดส่วนโดยปริมาตร หรือสัดส่วนโดยน้ำหนัก จะพบว่าการวิเคราะห์โดยวิธีการทดลอง และวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการฉีดกระทบแผ่นระบายความร้อนแบบมีครีบนแบบช่องสี่เหลี่ยมขนาดเล็กจิ๋วในห้องปิดโดยการฉีดภายใต้ของเหลว และใช้ของไหลนาโนไททาเนียมมีอยู่น้อยมาก โดยส่วนใหญ่จะใช้ของไหลนาโน อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) และทองแดงออกไซด์ (CuO) เป็นต้น ดังนั้นการทำการศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงเห็นประโยชน์ที่จะได้รับจากวิธีการทดลอง และวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อน และการฉีดกระทบของของไหลนาโนในครีบนระบายความร้อนที่มีช่องการไหลขนาดเล็กจิ๋ว โดยการศึกษา ระยะห่างของการฉีดกระทบ และสารทำงานโดยใช้ น้ำ ของไหลนาโนไททาเนียม ใช้ส่วนผสมน้ำกับผงอนุภาคไททาเนียม 0.005, 0.010 และ 0.015 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร และค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนโดยการฉีดกระทบครีบนที่มีช่องการไหลขนาดเล็กจิ๋วภายใต้ของเหลวในห้องปิด

บทที่ 3

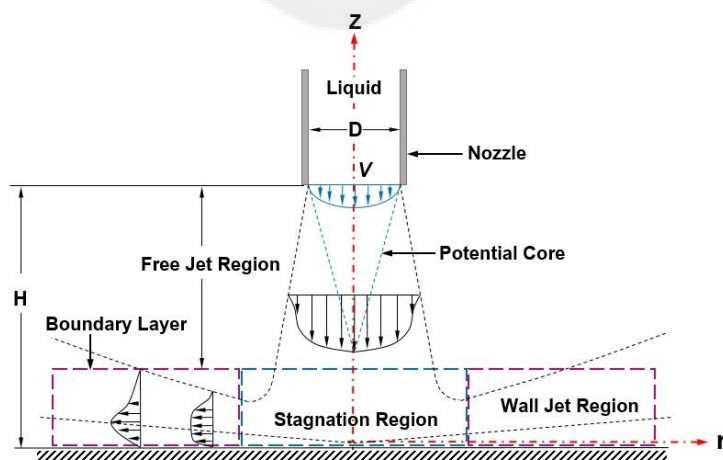
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1 บทนำ

การถ่ายเทความร้อนแบบฉีดกระทบเป็นการไหลอีกรูปแบบหนึ่งที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางสำหรับงานหล่อเย็น หรือระบายความร้อนของผิวชิ้นงานที่ต้องการ และถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรมตั้งแต่การอบแห้งของสิ่งทอ และงานเคลือบ การผลิตแผ่นโลหะเพื่อระบายความร้อนกังหันก๊าซ เนื่องจากอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงในบริเวณที่ถูกฉีดกระทบ พบว่ามีการใช้งานในด้านการระบายความร้อนของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ด้วย

2 พื้นฐานของการฉีดกระทบ

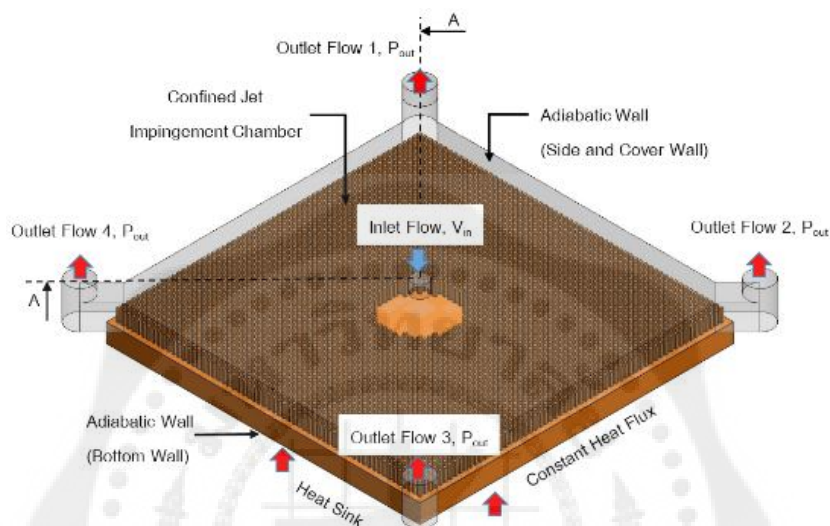
การฉีดกระทบ คือการกำหนดค่าการไหลอย่างง่ายในการที่ฉีดพุ่งออกจากหัวฉีดไปชนกระทบในแนวตั้งฉากกับแผ่นเป้าหมายตาม ภาพประกอบ 4 ลักษณะเด่นของการจัดกระแสน้ำของไหลอย่างเข้มข้นบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างของเหลว และแผ่นเป้าหมายวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนแบบฉีดกระทบโดยการควบคุมโครงสร้างของน้ำวนในการไหลโดยการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ ทางเรขาคณิต และความร้อนต่าง ๆ สำหรับการทำงานที่แตกต่างกันในกระแสน้ำวนหรือไหลวนโครงสร้างที่แตกต่างกันตัวอย่าง เช่นระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นเป้าหมาย การเพิ่มขนาดหัวฉีดเพื่อเพิ่มกระแสน้ำวนเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อผลการดำเนินการถ่ายเทความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ เงื่อนไขในการปฏิบัติการอื่น ๆ เช่น การใช้ชุดระบายความร้อนแบบครีปสี่เหลี่ยมจัตุรัส



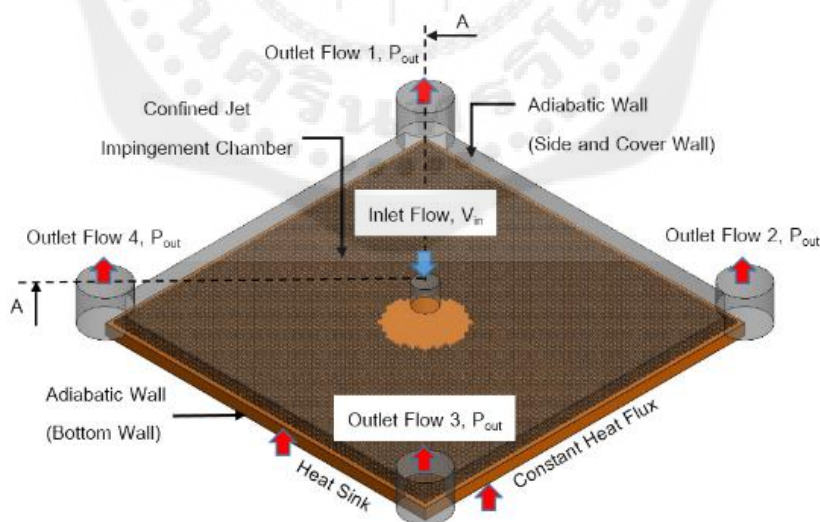
ภาพประกอบ 4 การกำหนดค่าทางเรขาคณิตของการฉีดกระทบ

3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการฉีดกระทบ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการฉีดกระทบสำหรับครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก และครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋วใช้แบบจำลองเดียวกันโดยมีแบบจำลองที่ใช้ศึกษาวิจัยดังนี้



ก. ครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก



ข. ครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว

ภาพประกอบ 5 แสดงแบบจำลองคณิตศาสตร์แบบเต็มของชุดทดลองครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก และครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว

ภาพประกอบ 5 แสดงแบบจำลองมีทางเข้าเพียงหนึ่งช่องทางตรงกลาง และทางออกของสารหล่อเย็นเป็นสี่ช่องทาง โดยให้สารทำความเย็นฉีดเข้ากระทบบนพื้นครึ่งระบายความร้อนตรงกลาง แล้วไหลผ่านแผ่นครึ่งระบายความร้อนไปตลอด หลังจากนั้นให้ไหลออกที่ตำแหน่งทางออกที่อยู่ทางด้านข้างทั้งสองด้าน

3.1 วิธีการแบบจำลองเฟสเดียว

วิธีการแบบจำลองเฟสเดียวที่ใช้ในกระบวนการการจำลองในการทำนายการถ่ายเทความร้อนและคุณลักษณะของการไหลมีสมมติฐานดังต่อไปนี้

- ของเหลวพื้นฐานและอนุภาคนาโนที่แขวนลอยอยู่ในสถานะสมดุลความร้อน
- การไหลคงตัวแบบราบเรียบทั้งสามมิติ
- คุณสมบัติทางกายภาพทางความร้อนคงที่และการกระจายตัวของความหนา

เล็กน้อย

- ของเหลวพื้นฐาน และอนุภาคนาโนมีความเร็วเท่ากัน
- สมการต่อไปนี้เป็นตัวแทนของสูตรทางคณิตศาสตร์ของรูปแบบวิธีการแบบจำลอง

เฟสเดียวสำหรับการควบคุม

สมการความต่อเนื่อง:

$$\nabla \cdot (\rho_m V) = 0 \quad (1)$$

สมการโมเมนตัม:

$$\nabla \cdot (\rho_m VV) = -\nabla p + \nabla \tau + \rho_m g \quad (2)$$

สมการพลังงาน:

$$\nabla \cdot (\rho_m V C_{pm} T) = \nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla T) \quad (3)$$

ความหนาแน่นของของไหลนาโนคำนวณจากสมการของ บ็อค ชอน ปาค และยอง อี โช (Bock Choon Pak; & Young I. Cho. 1998) โดยใช้สมการต่อไปนี้:

$$\rho_m = \phi \rho_p + (1 - \phi) \rho_w \quad (4)$$

โดยที่

- ρ_m คือ ความหนาแน่นของของไหลนาโน
- ρ_p คือ ความหนาแน่นของอนุภาคนาโน
- ρ_w คือ ความหนาแน่นของของไหลพื้นฐาน
- ϕ คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคนาโน

โดนอลด์ เอ ดริว และสตีเฟน แอล พาสแมน (Donald A. Drew; & Stephen L. Passman. 1999) แนะนำสมการที่รู้จักกันดีสำหรับการคำนวณความหนืดซึ่งใช้ได้กับอนุภาคทรงกลมในส่วปริมาณน้อยกว่า 5.0% และอัตราที่กำหนดไว้ดังต่อไปนี้

$$\mu_m = (1 + 2.5\phi)\mu_w \quad (5)$$

โดยที่

- μ_m คือ ค่าความหนืดของของไหลนาโน
- μ_w คือ ค่าความหนืดของของไหลพื้นฐาน

ค่าความร้อนจำเพาะคำนวณได้จากสมการของ ยี่มิน เฉวียน และวิลฟรีด โรเอทเซล (Yimin Xuan; & Wilfried Roetzel. 2000). ดังต่อไปนี้:

$$(\rho C_p)_{nf} = \phi(\rho C_p)_p + (1 - \phi)(\rho C_p)_w \quad (6)$$

โดยที่

- $(\rho C_p)_{nf}$ คือ ความจุความร้อนของของไหลนาโน
- $(\rho C_p)_w$ คือ ความจุความร้อนของของไหลพื้นฐาน
- $(\rho C_p)_p$ คือ ความจุความร้อนของอนุภาคนาโน

ค่าการนำความร้อนของของไหลนาโนคำนวณจากสมการของ ดับเบิลยู ยู และ เอส ยู เอส ชอย (W. Yu; & S. U. S. Choi. 2004). ดังสมการต่อไปนี้:

$$k_{nf} = \left[\frac{k_p + 2k_w - 2\phi(k_w - k_p)}{k_p + 2k_w + \phi(k_w - k_p)} \right] k_w \quad (7)$$

โดยที่

k_{nf} คือ ค่าการนำความร้อนของของไหลนาโน

k_w คือ ค่าการนำความร้อนของของไหลพื้นฐาน

k_p คือ ค่าการนำความร้อนของอนุภาคนาโน

3.2 วิธีการแบบจำลองสองเฟส

ของไหลนาโนประกอบด้วยน้ำ และอนุภาคนาโนไททาเนียมซึ่งไหลผ่านช่องครีบริบายความร้อนขนาดเล็กที่สนใจศึกษาสำหรับวิธีการแบบจำลองสองเฟสทุก ๆ เฟสจะผสมกันอยู่ในรูปแบบเวกเตอร์ความเร็วของตัวเองที่อยู่ในการควบคุมปริมาณ และแทนที่อยู่ในสมการควบคุมคือถูกนำมาใช้แยกต่างหากสำหรับส่วนผสมได้ ดังนั้นสมการสามมิติสำหรับสภาวะคงตัวเงื่อนไขค่าเฉลี่ย คือ

สมการความต่อเนื่อง:

$$\nabla \cdot (\rho_m V_m) = 0 \quad (8)$$

สมการโมเมนตัม:

$$\nabla \cdot (\rho_m V_m V_m) = -\nabla p_m + \nabla \tau + \rho_m g + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \phi_k \rho_k V_{dr,k} V_{dr,k} \right) \quad (9)$$

สมการพลังงาน:

$$\nabla \cdot (\phi_k V_k (\rho_k h_k + p)) = \nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla T) \quad (10)$$

สมการสัดส่วนปริมาตร:

$$\nabla \cdot (\phi_p \rho_p V_m) = -\nabla \cdot (\phi_p \rho_p V_{dr,p}) \quad (11)$$

ความหนาแน่นของส่วนผสมและความหนืดสามารถคำนวณได้จาก

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \phi_k \rho_k \quad (12)$$

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \phi_k \mu_k \quad (13)$$

โดยที่

ϕ คือ ค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของเฟส k

μ_m คือ ค่าความหนืดของของผสม

$V_{dr,k}$ คือ ค่าความเร็วยกของเฟสทุติยภูมิ k , เช่น อนุภาคที่เราสนใจศึกษา.

$$V_{dr,k} = V_k - V_m \quad (14)$$

$$\tau = \mu_m \nabla V_m \quad (15)$$

ความเร็วของแรงดันที่สัมพันธ์กับความเร็ว

$$V_{dr,p} = V_{pf} - \sum_{k=1}^n \frac{\phi_k \rho_k}{\rho_m} V_{fk} \quad (16)$$

ความสัมพันธ์ของความเร็วสัมพันธ์ที่เสนอโดย เอ็ม แมนนิเนน และคณะ (M. Manninen; et al. 1996) และการทำงานจากคำนวณจากความสัมพันธ์ที่เสนอโดย แอล ชิลเลอร์ และเอ นัวแมนน์ (L. Schiller; & A. Naumann. 1935)

$$V_{pf} = \frac{\rho_p d_p^2}{18 \mu_f f_{drag}} \frac{(\rho_p - \rho_m)}{\rho_p} (g - (V_m \cdot \nabla) V_m) = V_p - V_f \quad (17)$$

$$f_{drag} = \begin{cases} 1 + 0.15 Re_p^{0.687} & Re \leq 1000 \\ 0.0183 Re_p & Re > 1000 \end{cases} \quad (18)$$

แบบจำลองความหนืดที่มีผลกระทบจากอนุภาคนาโนสามารถคำนวณโดยใช้สมการความสัมพันธ์ของ เอ มิลเลอร์ และดี ยีดาซโปว์ (A. Miller; & D. Gidaspow. 1992)

$$\mu_s = -0.188 + 537.42 \phi \quad (19)$$

3.3 วิธีการแบบจำลองสองเฟสแบบอยเลอร์เรียน

ของไหลนาโน ประกอบด้วย น้ำ และอนุภาคนาโนไททาเนียม ซึ่งไหลผ่านช่องคืบระบายความร้อนขนาดเล็กที่สนใจศึกษา สำหรับวิธีการแบบจำลองสองเฟสทุก ๆ เฟสจะผสมกันอยู่ในรูปแบบเวกเตอร์ความเร็วของตัวเองที่อยู่ในการควบคุมปริมาณ และแทนที่อยู่ในสมการควบคุมคือถูกนำมาใช้แยกต่างหากสำหรับส่วนผสมได้ ดังนั้นสมการสามมิติสำหรับสภาวะคงตัวเงื่อนไขค่าเฉลี่ย คือ

สมการความต่อเนื่อง:

$$\nabla \cdot (\rho_m V_m) = 0 \quad (20)$$

สมการโมเมนตัม:

$$\nabla \cdot (\rho_m V_m V_m) = -\nabla p_m + \nabla \tau + \rho_m g + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \phi_k \rho_k V_{dr,k} V_{dr,k} \right) \quad (21)$$

สมการพลังงาน:

$$\nabla \cdot (\phi_k V_k (\rho_k h_k + p)) = \nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla T) \quad (22)$$

สมการสัดส่วนปริมาตร:

$$\nabla \cdot (\phi_p \rho_p V_m) = -\nabla \cdot (\phi_p \rho_p V_{dr,p}) \quad (23)$$

ความหนาแน่นของส่วนผสม และความหนืดสามารถคำนวณได้จาก

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \phi_k \rho_k \quad (24)$$

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \phi_k \mu_k \quad (25)$$

โดยที่

ϕ คือ ค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของเฟส k

μ_m คือ ค่าความหนืดของของผสม

$V_{dr,k}$ คือ ค่าความเร็วยกของเฟสทุติยภูมิ k , เช่น อนุภาคที่เราสนใจศึกษา

$$V_{dr,k} = V_k - V_m \quad (26)$$

$$\tau = \mu_m \nabla V_m \quad (27)$$

ความเร็วของแรงดันที่สัมพันธ์กับความเร็ว

$$V_{dr,p} = V_{pf} - \sum_{k=1}^n \frac{\phi_k \rho_k}{\rho_m} V_{fk} \quad (28)$$

ความสัมพันธ์ของความเร็วสัมพัทธ์ที่เสนอโดย เอ็ม แมนนิเนน และคณะ (M. Manninen; et al. 1996) และการทำงานจากคำนวณจากความสัมพันธ์ที่เสนอโดย แอล ชิลเลอร์ และเอ นิวแมนน์ (L. Schiller; & A. Naumann. 1935)

$$V_{pf} = \frac{\rho_p d_p^2}{18 \mu_f f_{drag}} \frac{(\rho_p - \rho_m)}{\rho_p} (g - (V_m \cdot \nabla) V_m) = V_p - V_f \quad (29)$$

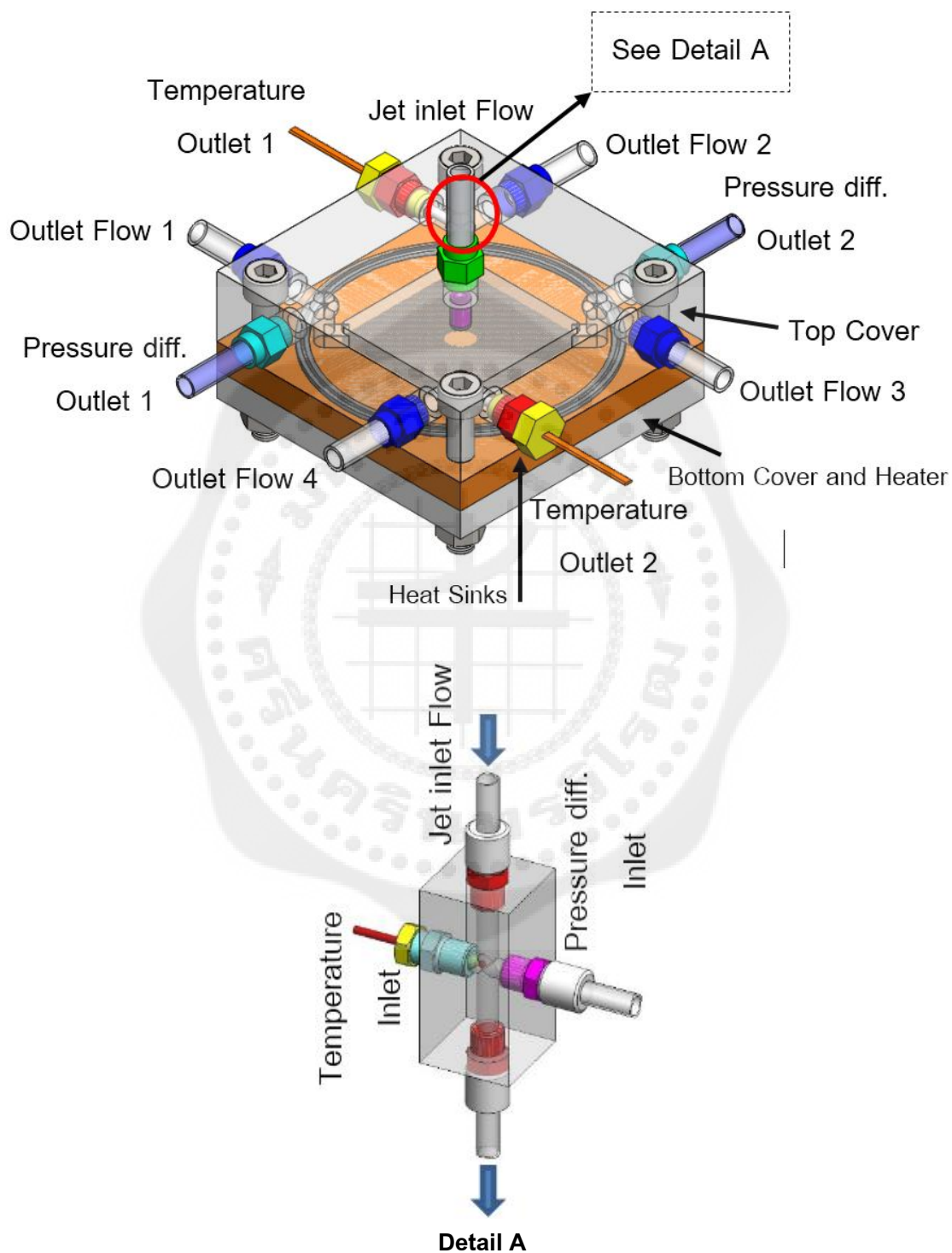
$$f_{drag} = \begin{cases} 1 + 0.15 Re_p^{0.687} & Re \leq 1000 \\ 0.0183 Re_p & Re > 1000 \end{cases} \quad (30)$$

แบบจำลองความหนืดที่มีผลกระทบจากอนุภาคนาโนสามารถคำนวณโดยใช้สมการความสัมพันธ์ของ เอ มิลเลอร์ และดี ยีดาซโพว์ (A. Miller; & D. Gidaspow. 1992)

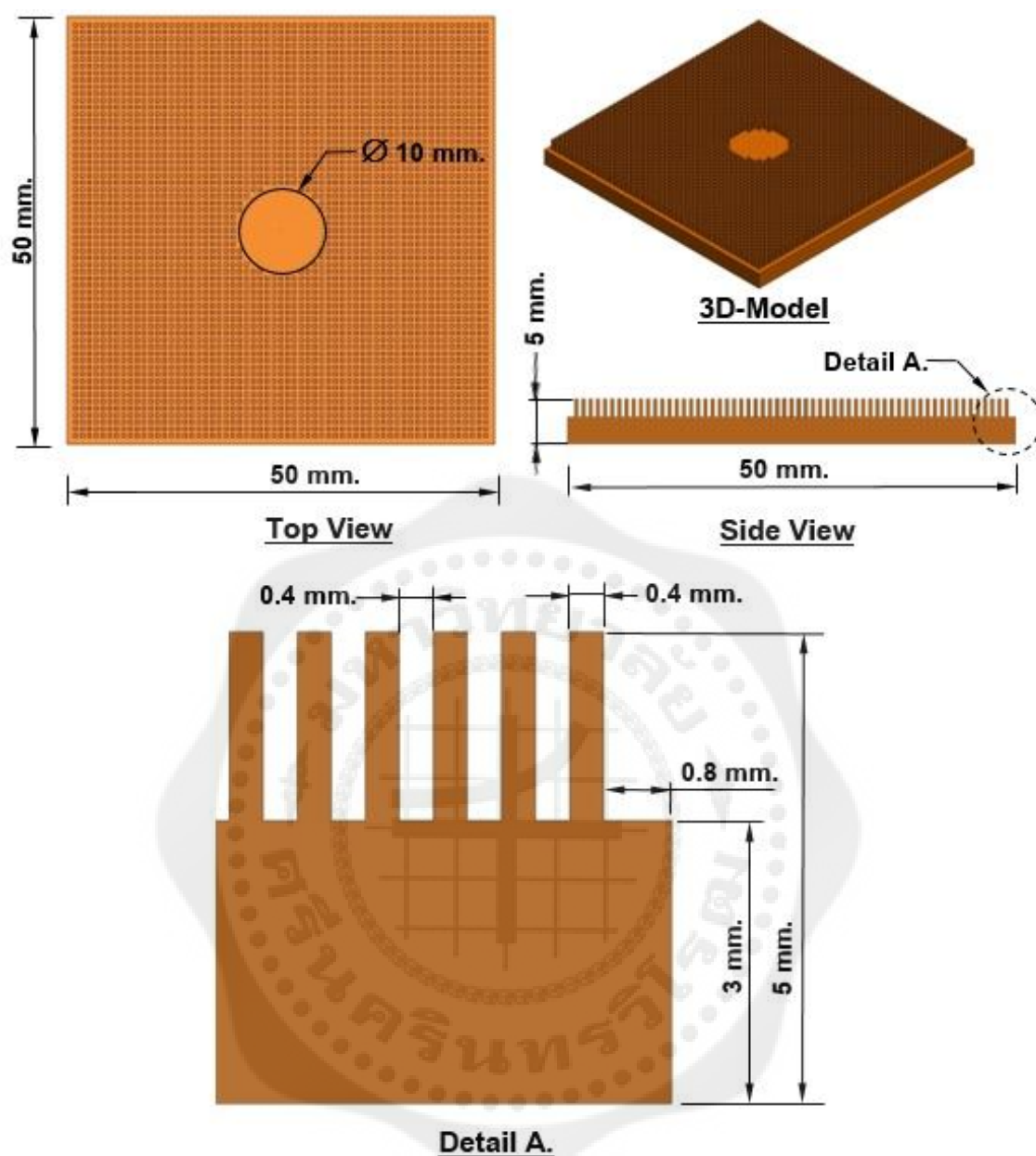
$$\mu_s = -0.188 + 537.42 \phi \quad (31)$$

ในการทำการจำลองของแบบจำลองนี้ได้นำเอาเงื่อนไขที่สอดคล้องกันกับการทดลองมาเป็นเงื่อนไขในการป้อนค่าต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิของของฐานกริบ อุณหภูมิของสารหล่อเย็นที่ทางเข้าในส่วนแรกนั้นจะเป็นการหาขนาดของจำนวน กริดที่เหมาะสม เมื่อได้ขนาดของกริดที่เหมาะสมแล้วก็จะทำการจำลองการเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลองโดยที่นำค่าอุณหภูมิที่ทางออกเฉลี่ย เมื่อได้ขนาดของช่องการไหลที่เหมาะสมแล้วก็จะทำการ

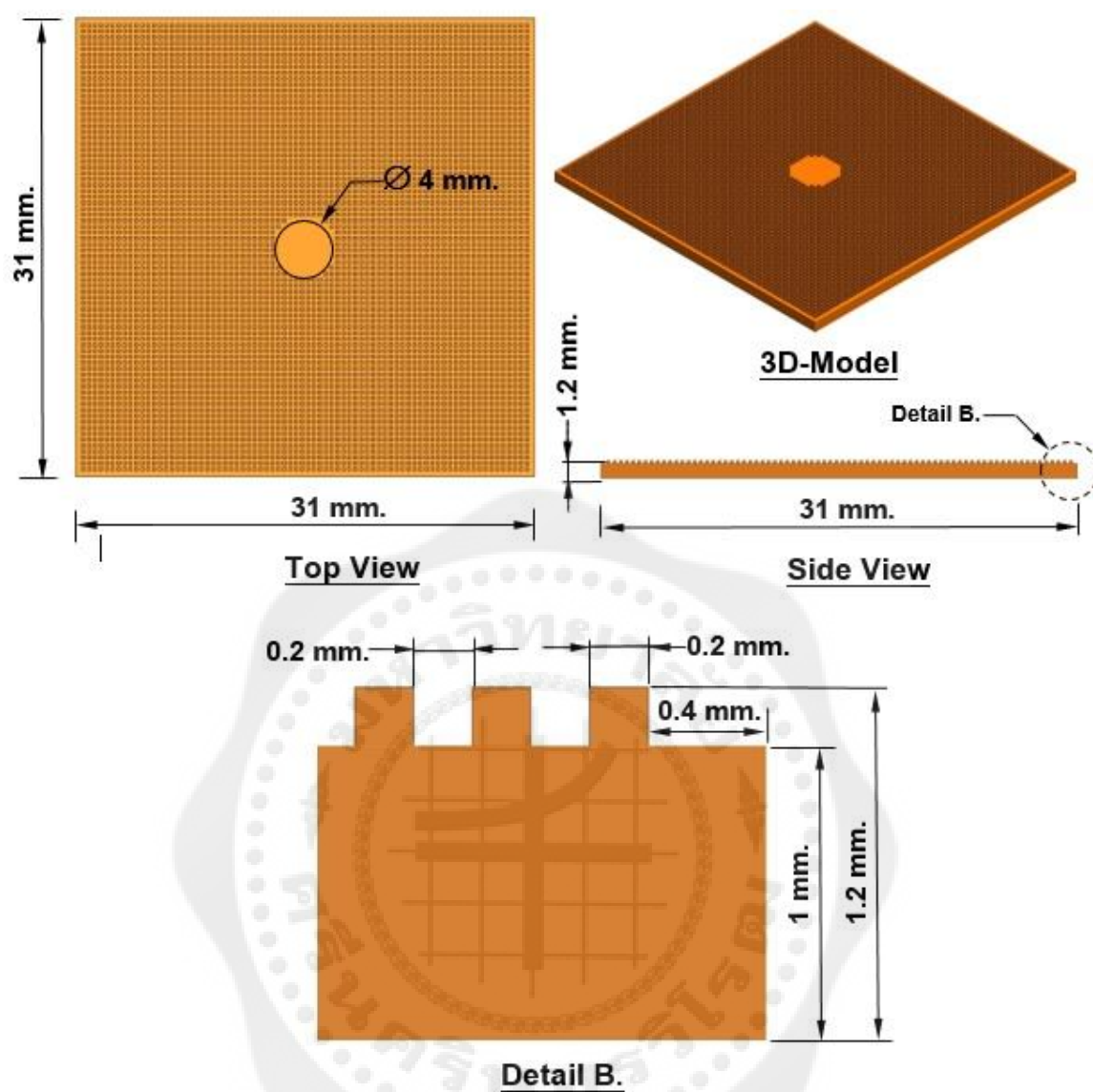
ปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของสารหล่อเย็นที่ทางเข้า เปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำแผ่นกระจายความร้อนตามลำดับ



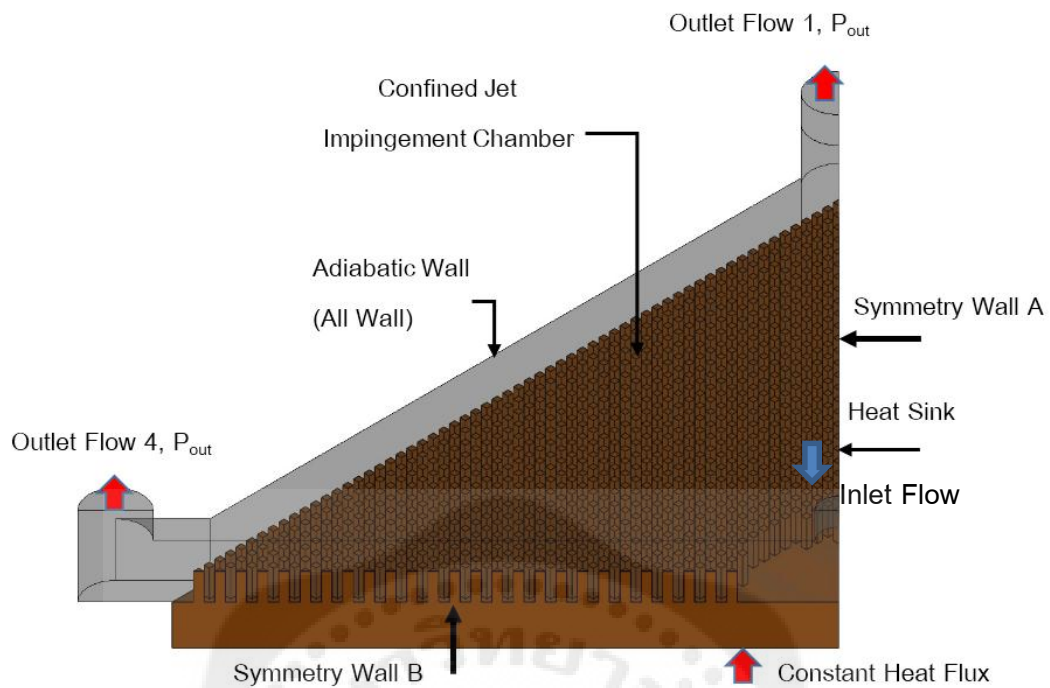
ภาพประกอบ 6 แสดงจุดติดตั้งเครื่องมือวัดของชุดทดสอบ



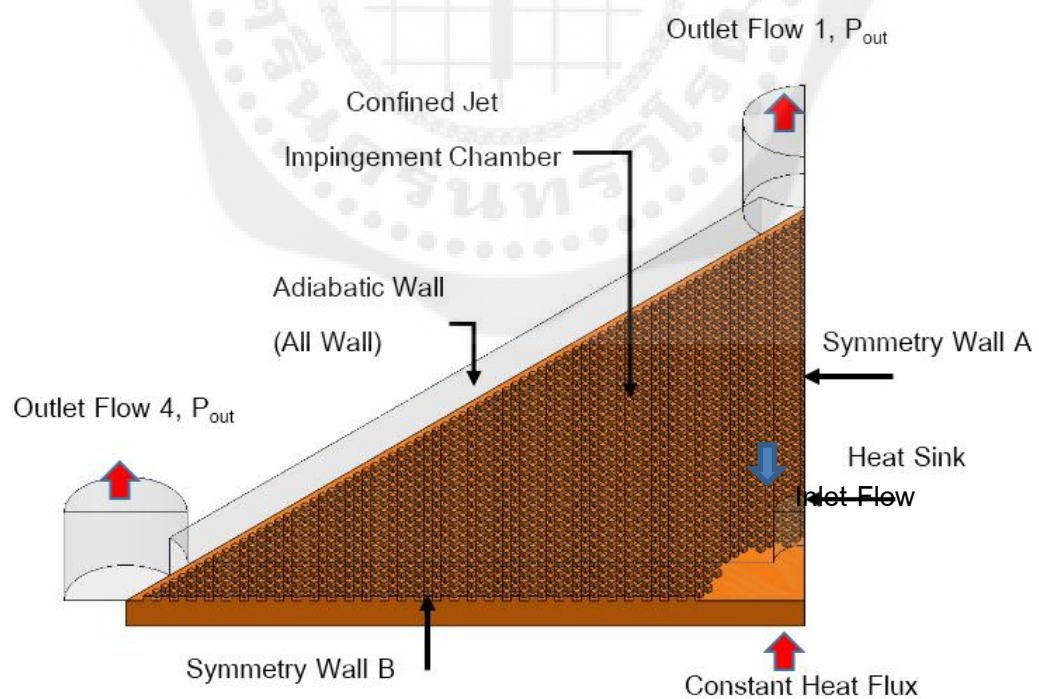
ภาพประกอบ 7 แสดงครีบรรยายความร้นแบบช่องขนาดเล็ก



ภาพประกอบ 8 แสดงครีบบระบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว



ภาพประกอบ 9 แสดงแบบจำลองคณิตศาสตร์ภาคตัดตามเส้น A-A (ภาพประกอบ 5 (ก)) แบบสมมาตร ของชุดทดลองครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก



ภาพประกอบ 10 แสดงแบบจำลองคณิตศาสตร์ภาคตัดตามเส้น A-A (ภาพประกอบ 5 (ข)) แบบสมมาตร ของชุดทดลองครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว

ภาพประกอบ 9 และภาพประกอบ 10 แสดงแบบจำลองแบบสมมาตร (Symmetry) หนึ่งในสี่ส่วนมีทางเข้าเพียงหนึ่งช่องทางตรงกลางและทางออกของสารหล่อเย็นเป็นสองช่องทาง โดยให้สารทำความเย็นฉีดเข้ากระทบบนครึ่งระบายความร้อนตรงกลางแล้วไหลผ่านแผ่นครึ่งระบายความร้อนไปตลอด หลังจากนั้นให้ไหลออกที่ตำแหน่งทางออกที่อยู่ทางด้านข้างได้แก่ ช่องทางออกที่ 1 และช่องทางออกที่ 4

4 การวิเคราะห์ความอิสระของกริด

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบฉีดกระทบบนครึ่งระบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก และครึ่งระบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจั่ว ใช้แบบจำลองเดียวกันโดยมีผลการวิเคราะห์ความอิสระของกริดแบบจำลองที่ใช้ศึกษาวิจัยมีผลตามตาราง 2 และตาราง 3 สำหรับครึ่งระบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก และ ตาราง 4 และตาราง 5 สำหรับครึ่งระบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก และรูปแบบของเมช ดัง ภาพประกอบ 11

ตาราง 2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของกริดของอุณหภูมิขาออกของครึ่งระบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก

Flow rate (g/s)	8.87	9.43	9.98	10.54	11.09	11.65
Elements	%Errors	%Errors	%Errors	%Errors	%Errors	%Errors
84,000	-	-	-	-	-	-
2,010,000	0.78	0.37	2.27	0.25	0.68	0.39
6,140,000	0.16	0.12	0.54	0.22	0.26	0.13

ตาราง 3 เปรียบเทียบอุณหภูมิขาออกที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการทดลองของครึ่งระบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก

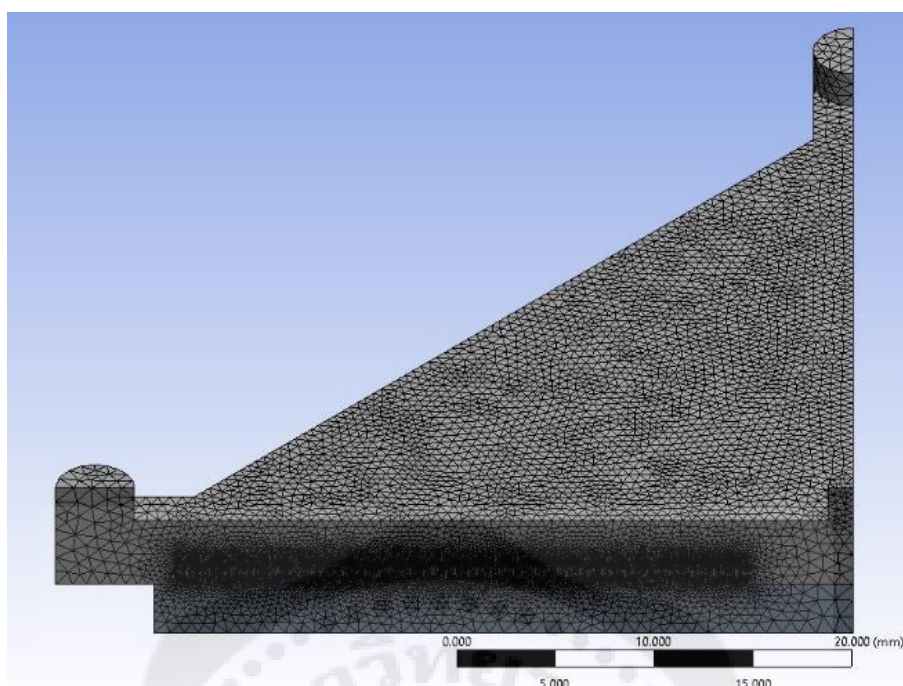
Flow rate (g/s)	8.87	9.43	9.98	10.54	11.09	11.65
Outlet Temp. (Exp.)	23.70	23.50	23.30	23.10	22.90	22.70
Outlet Temp. (Math. Model)	24.48	24.24	24.00	23.81	23.46	23.28
%Errors	3.30	3.16	3.01	3.07	2.43	2.54

ตาราง 4 การตรวจสอบความเป็นอิสระของกริดของอุณหภูมิขาออกของครีประบายความร้อนแบบ
ช่องขนาดเล็กจิ๋ว⁺

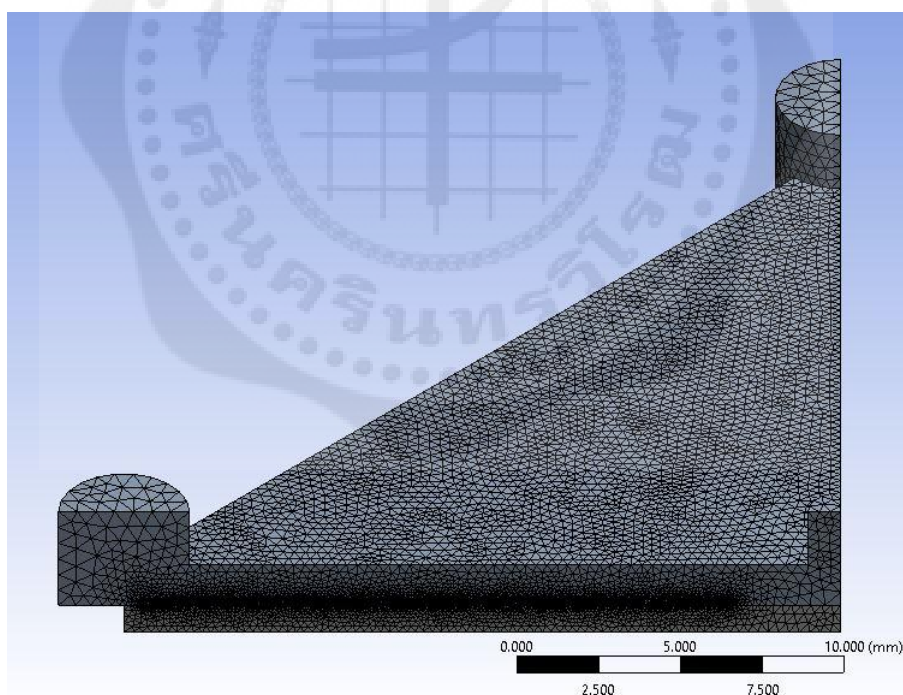
Flow rate (g/s)	8.34	8.90	9.45	10.01	10.56	11.12
Elements	%Errors	%Errors	%Errors	%Errors	%Errors	%Errors
4,066,653	-	-	-	-	-	-
5,574,718	-0.96	-5.60	-7.04	-8.29	-3.35	0.37
28,068,671	-3.24	-3.30	-3.03	-2.16	0.38	2.27

ตาราง 5 เปรียบเทียบอุณหภูมิขาออกที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการทดลองของครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว⁺

Flow rate (g/s)	8.34	8.90	9.45	10.01	10.56	11.12
Outlet Temp. (Exp.)	24.11	23.93	23.77	23.63	23.50	23.38
Outlet Temp. (Math. Model)	24.20	24.01	23.84	23.81	23.65	23.66
%Errors	0.37	0.33	0.31	0.77	0.63	1.18



ก. ครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก



ข. ครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว

ภาพประกอบ 11 แสดงรูปแบบของเมชของแบบจำลองคณิตศาสตร์ภาคตัดตามเส้น A-A
(ภาพประกอบ 5) แบบสมมาตร ของชุดทดลอง

5 เงื่อนไขเริ่มต้นในการจำลอง

ในการจำลองการไหลนั้นเราจำเป็นต้องมีการบ่อนค่าในครั้งแรกก่อนเพื่อให้โปรแกรมสามารถรู้ได้ว่าการคำนวณนั้นจะต้องได้รับเอาค่าของส่วนใดบ้าง ซึ่งในการจำลองนั้นจะมีการกำหนดและบ่อนค่าต่าง ๆ เช่น เงื่อนไขขอบที่ทางเข้า ที่ทางออก และบริเวณติดกับผนัง รวมจนถึงกระบวนการควบคุมการหาคำตอบของโปรแกรม แบบจำลองที่เลือกใช้ และท้ายสุดการกำหนดรอบเพื่อให้โปรแกรมมีการคำนวณ เป็นต้น ซึ่งสามารถแสดงไว้ในตาราง 6 และตาราง 7

ตาราง 6 แสดงเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองแบบเฟสเดียว

รายละเอียดของเงื่อนไข	กลุ่มของเงื่อนไขหลัก	เงื่อนไขรองที่เลือกใช้
ข้อกำหนดเงื่อนไขที่ป้อน	แบบจำลองเป็นลักษณะ	3D
	สมการพลังงาน	เลือกใช้
	แบบจำลองปั่นป่วน	Standard $k-\epsilon$
	ขอไหลที่ใช้	น้ำ (H_2O)
เงื่อนไขขอบ	ที่ทางเข้า	V, T_{in} (Constant)
	ที่ติดผนัง	Standard Wall Function, T_{wall} (Constant), No Slip Condition
	ที่ทางออก	-Pressure Outlet -ไม่คิดความดันย้อนกลับ
การควบคุมกระบวนการหาคำตอบ	กระบวนการหาคำตอบ	SIMPLE
	การดีสครีตไทเซชัน	First Order Upwind
	จำนวนรอบที่ให้คำนวณ	2,000 รอบ

ตาราง 7 แสดงเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองแบบสองเฟส

รายละเอียดของเงื่อนไข	กลุ่มของเงื่อนไขหลัก	เงื่อนไขรองที่เลือกใช้
ข้อกำหนดเงื่อนไขที่ป้อน	แบบจำลองเป็นลักษณะ	3D
	สมการพลังงาน	เลือกใช้
	แบบจำลองปั่นป่วน	Standard $k - \varepsilon$
	ของไหลที่ใช้	Nanofluids ($H_2O + TiO_2$)
เงื่อนไขขอบ	ที่ทางเข้า	V, T_{in} (Constant)
	ที่ติดผนัง	Standard Wall Function, T_{wall} (Constant), No Slip Condition
	ที่ทางออก	- Pressure Outlet - ไม่คิดความดันย้อนกลับ
การควบคุมกระบวนการหาคำตอบ	กระบวนการหาคำตอบ	Phase Coupled SIMPLE
	การดีสครีตไทเซชัน	First Order Upwind
	จำนวนรอบที่ให้คำนวณ	2,000 รอบ

6 กระบวนการหาคำตอบ

เพื่อให้ค่าความดันและความเร็วในสมการโมเมนตัมสอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง ดังนั้นกระบวนการหาคำตอบแบบ SIMPLE (Semi – implicit Method for Pressure – Linked Equations), SIMPLER (Semi – implicit Method for Pressure – Linked Equations Consistent) และ PISO (Pressure implicit with Splitting of Operators) จึงถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบค่าความดันและความเร็วให้มีความสอดคล้องกัน (Versteeg & Malalasekera. 1995; Patankar & Spalding. 1972) จากสมการ (11) เราจะกำหนด p เพื่อให้ได้ค่าของ u และเพื่อปรับค่าที่ได้จากการคำนวณในรอบแรกเพื่อช่วยให้ลู่เข้าหาคำตอบเราจะเพิ่มขึ้นมา ดังนั้นสมการ (24) สามารถเขียนได้เป็น

$$a_p u_p^* = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb}^* + \sum (p_w^* - p_e^*) A_f + B \quad (32)$$

โดยที่ p_w^* และ p_e^* เป็นค่าความดันของแต่ละปริมาตรที่ติดกันในการแก้สมการจะเริ่มต้นด้วยการสมมติค่าความดัน p^* เพื่อให้ได้ค่า u^* , v^* และ w^* ค่าที่ได้จะต้องที่สอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง ดังนั้นความสัมพันธ์ที่ได้เพิ่มเทอม p' เข้ามาเพื่อปรับค่า p^* ในการคำนวณรอบต่อไปซึ่งมีดังนี้

$$p = p^* + p', \quad u = u^* + u' \quad (33)$$

โดยที่ p' เรียกว่า การตรวจสอบค่าความดัน (Pressure correction) ดังนั้นสมการ (3 – 34) สามารถเขียนได้เป็น

$$a_p u'_p = \sum_{nb} a_{nb} u'_{nb} + \sum (p'_w - p'_e) A_f + B \quad (34)$$

ในกระบวนการหาคำตอบแบบ SIMPLE จะไม่พิจารณาเทอม $\sum_{nb} a_{nb} u'_{nb}$ ดังนั้นจะได้สมการที่ดิสครีตของการตรวจสอบค่าความดันในปริมาตรเป็นดังนี้

$$u_p^* \Delta d_f (p_f^* - p_e^*) \quad (35)$$

โดยที่เทอม d_f มีค่าเท่ากับ $d_f = A_f / a_p$ ในสมการโมเมนตัมที่ดิสครีตแล้ว การปรับค่าความดันและอัตราการไหลผ่านผนังปริมาตรในแต่ละครั้งนั้น จะเป็นไปตามสมการนี้

$$p = p^* + \alpha_p p' \quad (36)$$

โดยที่ α_p เป็นค่าแฟคเตอร์ของการปรับค่าสำหรับกระบวนการหาคำตอบแบบ SIMPLEC นั้นเริ่มต้นจะเหมือนกับกระบวนการหาคำตอบแบบ SIMPLE ที่กล่าวมาข้างต้น แตกต่างกันได้ นำเทอม $\sum_{nb} a_{nb} u'_{nb}$ มาพิจารณาด้วยซึ่งจะมีสัมประสิทธิ์ของ d_f เป็นฟังก์ชันของ $1 - \sum_{nb} a_{nb} / a_p$ ดังนั้นสมการ $u'_p \Delta \left(d_f / \left(1 - \sum_{nb} a_{nb} / a_p \right) \right) (p_w^* - p_e^*)$ ที่ดิสครีตของการตรวจสอบค่าความดันในปริมาตรที่พิจารณาจะเป็นส่วนประกอบของการหาคำตอบแบบ PISO นั้นได้ปรับปรุงประสิทธิภาพของการคำนวณจาก SIMPLE โดยการเพิ่ม Neighbor correction และ Skewness correction ซึ่งได้พิจารณาวงจร (Loop) ในการคำนวณเพื่อให้ค่าความดัน และความเร็วของสมการโมเมนตัมสอดคล้องกับสมการความต่อเนื่องเร็วขึ้นกระบวนการทำซ้ำนี้เรียกว่าการปรับโมเมนตัม (Momentum correction) หรือ Neighbor correction กระบวนการหาคำตอบแบบ PISO นั้นทำให้การใช้เวลาในการประมวลผลต่อการคำนวณมากขึ้นเพียงเล็กน้อยแต่จะทำให้จำนวนรอบในการทำซ้ำเพื่อเข้าสู่หาคำตอบลดลงสำหรับ Skewness correction นั้นเป็นตัวปรับค่าฟลักซ์ ของมวลที่ผนังของปริมาตร และค่าความแตกต่างของการตรวจสอบค่าความดัน

7 เงื่อนไขขอบ

ในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่สำคัญที่ขาดเสียไม่ได้คือเงื่อนไขขอบ ดังนั้นเงื่อนไขขอบเป็นตัวบ่งชี้ถึงลักษณะของความเป็นจริงที่เกิดขึ้นในบริเวณขอบเขตของการคำนวณ ในการกำหนดเงื่อนไขขอบจำเป็นต้องคำนึงถึงความเป็นจริงที่เกิดขึ้น เพื่อให้การจำลองปัญหาเหมือนจริงมากที่สุด ซึ่งส่งผลถึงความถูกต้องของผลที่ได้จากการคำนวณสำหรับการจำลองการไหลในงานวิจัยนี้มีเงื่อนไขขอบดังต่อไปนี้

7.1 เงื่อนไขขอบที่ทางเข้า

ลักษณะของน้ำที่ทางเข้ากำหนดเป็นค่าความเร็วเฉลี่ย และค่าความเข้มของการปั่นป่วน (Turbulence intensity, I) ซึ่งจากค่าความเข้มของการปั่นป่วน สามารถคำนวณหาค่า k และ ε ได้จาก

$$k = \frac{3}{2}(\overline{u}I)^2 \quad (37)$$

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{\ell} \quad (38)$$

เมื่อ C_μ คือ ค่าคงที่โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 0.09 และ $\ell = 0.7l$ โดยที่ l คือ ค่าคุณลักษณะความยาว (Characteristic length) และ ℓ คือ สเกลของความยาว

7.2 เงื่อนไขขอบเขตที่ผนัง

สำหรับเงื่อนไขขอบเขตที่บริเวณผนัง กำหนดให้ความเร็วมีค่าเป็นศูนย์ (No Slip Condition) และบริเวณใกล้ๆ ผนังกำหนดให้ใช้ฟังก์ชันผนังมาตรฐาน (Standard Wall Function) (Yakhot; & Orzag. 1986) โดยกำหนดให้ค่าความเร็วเฉลี่ยสมการฟังก์ชันผนังมาตรฐานเขียนได้เป็น

$$u^+ = \frac{1}{k} \ln(Ey^+) \quad (39)$$

$$u^+ = \frac{\bar{u}_p C_\mu^{1/4} k_p^{1/2}}{\tau_w / p} \quad (40)$$

$$y^+ = \frac{pC_\mu^{1/4} k_p^{1/2} y_p}{\mu} \quad (41)$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่ของวอนการ์มันน์ (Von Karman Constant) มีค่าเท่ากับ 0.42 ส่วน E คือ ค่าคงที่จากการทดลองมีค่าเท่ากับ $9.81 lu_p$ คือ ค่าความเฉื่อยที่จุด P , k_p คือ ค่าพลังงานจลน์ ของความปั่นป่วนที่จุด p , y_p คือ ระยะทางที่จุด P กับผนัง และ u คือ ค่าความหนืดของของไหล โดยทั่วไปแล้ว เมื่อ ค่าความเร็วเฉื่อยที่ได้จะเป็นไปตาม สมการ (34) (Patankar & Spalding. 1972) แต่ที่ $y^+ > 11.25$ ค่าของความเร็วเฉื่อยจะเป็นไปตามความสัมพันธ์ของความเค้น และความเครียด แบบราบเรียบ (Laminar Stress-strain Relationship) ดังนี้

$$u^+ = y^+ \quad (42)$$

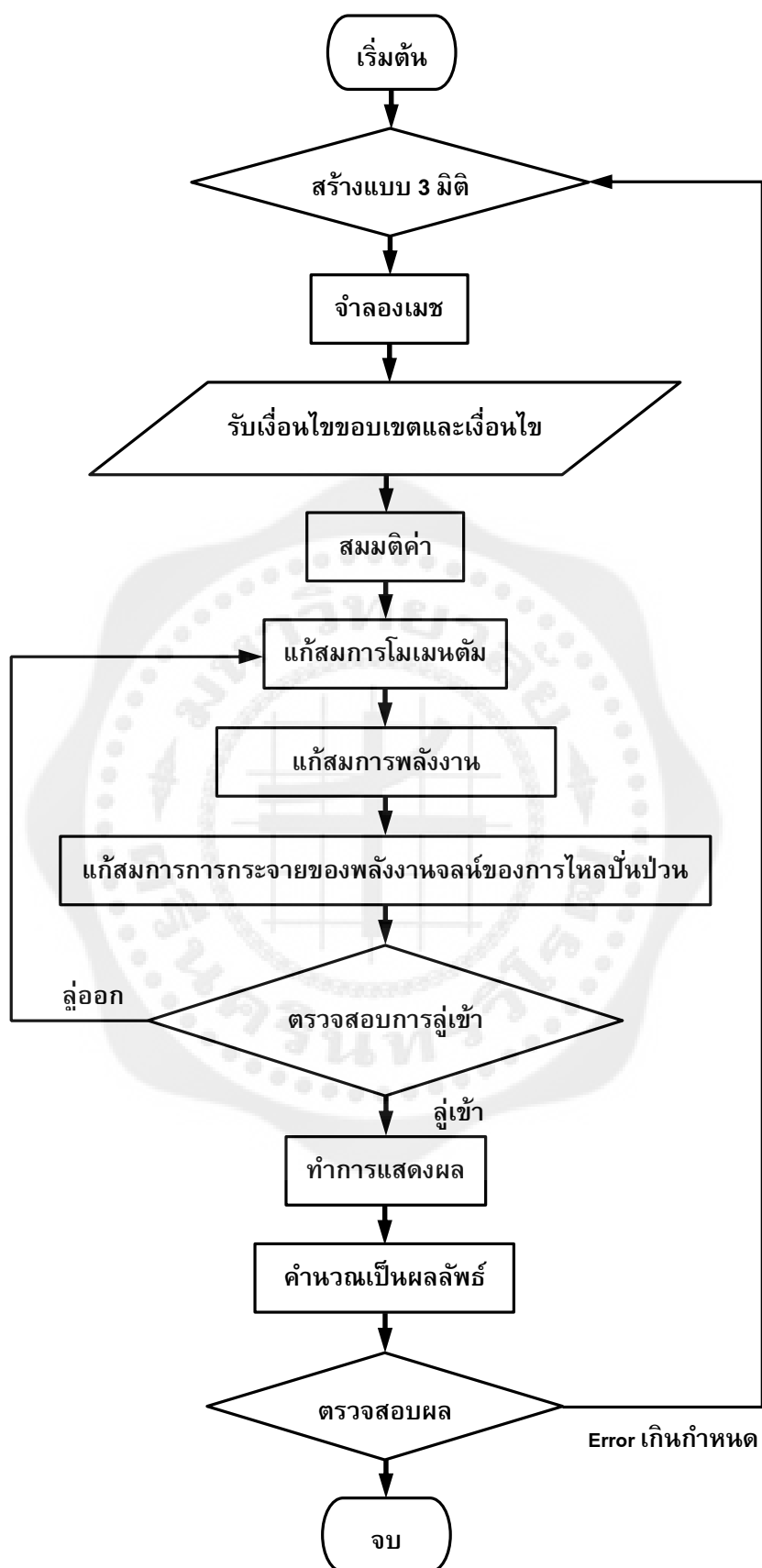
7.3 เงื่อนไขขอบที่ทางออก

สำหรับเงื่อนไขขอบที่ทางออกกำหนดเป็นแบบ Out flow ซึ่งได้ค่าฟลักซ์ ของการแพร่ มีค่าเท่ากับศูนย์ โดยไม่คิดผลจากความดันที่ทางออกย้อนกลับ (Back pressure) และการไหลอยู่ในช่วงพัฒนาเต็มที่แล้ว (Fully developed)

8 ขั้นตอนและลำดับการแก้สมการ

สำหรับการหาผลเฉลยนั้นจะใช้การคำนวณซ้ำซึ่งขั้นตอนในแต่ละรอบมีรายละเอียดแสดงดังใน ภาพประกอบ 12 ซึ่งมีขั้นตอน ดังนี้

- 1 กำหนดเงื่อนไขขอบเขตเริ่มต้น และทำการสมมติค่าเริ่มต้นในการคำนวณ
- 2 กำหนดเงื่อนไขในการคำนวณ เป็นไหลผ่านรูปทรงแบบมีครีระบายความร้อน โดยให้มีการไหลแบบปั่นป่วน รวมทั้งมีการถ่ายเทความร้อน
- 3 แก้สมการโมเมนตัมเพื่อทำการหาความเร็ว
- 4 แก้สมการพลังงานเพื่อทำการหาพลังงานรวมจำเพาะ
- 5 แก้สมการแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน และอัตราการสูญเสียของพลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วน โดยใช้แบบจำลอง $k-\varepsilon$ Model
- 6 กลับไปทำในขั้นตอนที่ 3 – 5 ใหม่กระทั่งได้ค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่าเดิม จะได้ผลการคำนวณที่ลู่เข้าหาคำตอบโดยใช้ Criterion convergence 10^{-5}



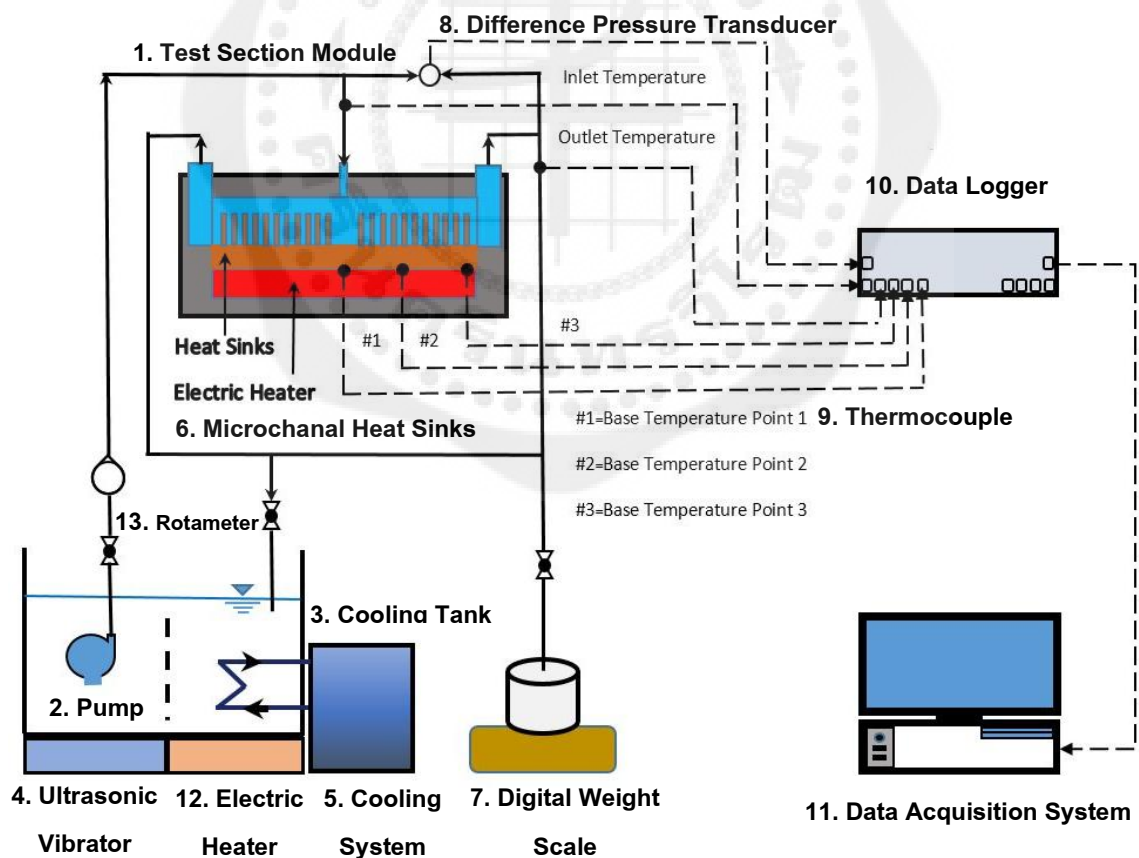
ภาพประกอบ 12 ขั้นตอนการคำนวณ และลำดับการแก้สมการแบบจำลองคณิตศาสตร์

บทที่ 4

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1 บทนำ

ในการทดลองจะใช้ชุดครีบบระบายความร้อนที่มีช่องการไหลจำนวน 1 ชุดคือ ชุดครีบบระบายความร้อนที่มีช่องการไหลขนาดเล็กจิ๋ว (Microchannel heat sinks) ขนาดความสูง 200.00 ไมโครเมตร ขนาดความหนาฐานครีบบ 1.00 มิลลิเมตร ขนาดความกว้างของช่องไหล 200.00 ไมโครเมตร และความหนาครีบบ 200.00 ไมโครเมตร ครีบบระบายความร้อนทั้งสองชุดวางอยู่ในชุดทดลองตามแนวนอนโดยสารทำงาน (Working fluids) ที่ใช้ได้แก่ น้ำ และของไหลนาโนไททาเนียมไดออกไซด์พื้นฐานครีบบในแนวดิ่ง โดยสามารถปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของสารทำงานตั้งแต่ 8.34, 8.90, 9.45, 10.01, 10.56, และ 11.12 กรัมต่อวินาที (g/s) การควบคุมอัตราการความร้อนของครีบบใช้อิทธิเตอร์ที่ประกอบอยู่ด้านล่างของครีบบเป็นตัวควบคุมอัตราการความร้อนตามต้องการ

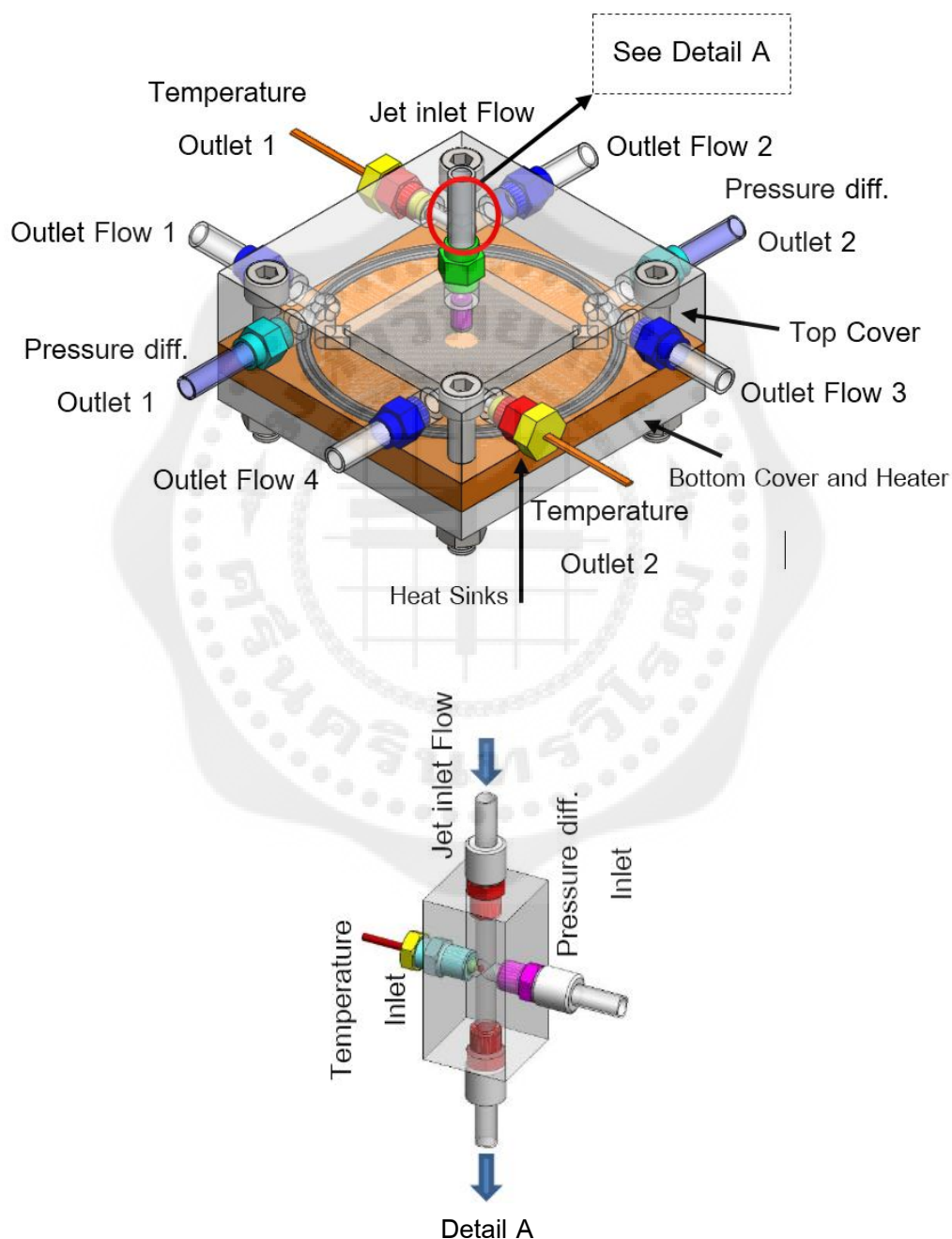


ภาพประกอบ 13 แสดงไดอะแกรมของอุปกรณ์การทดลอง

2 อุปกรณ์ในการทดลอง

จากภาพประกอบ 13 ประกอบด้วยชุดทดลองและอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1 ชุดทดสอบ (Test section module) ทำหน้าที่เป็นที่ติดตั้งชุดทดสอบ เช่น ครีบบระบายความร้อน ฮีทเตอร์ และเครื่องมือวัดต่าง ๆ ดัง ภาพประกอบ 14



ภาพประกอบ 14 แสดงตำแหน่งจุดวัดอุณหภูมิและความดันของชุดทดสอบ

2 ปั๊มไหลเวียน (Circulation pump) ทำหน้าที่เพิ่มแรงดันสารทำงานเพื่อจ่ายให้กับครีบริบายความร้อนที่มีช่องการไหลขนาดเล็ก ที่ทำการทดลอง

3 ถังหล่อเย็น (Cooling tank) ทำหน้าที่บรรจุของสารทำงานเพื่อให้สารทำงานเข้าสู่ระบบเพื่อไปถึงความร้อนจากครีบริบายความร้อนที่มีช่องการไหลขนาดเล็ก และระบายความร้อนออกจากสารทำงานด้วยระบบทำความเย็น

4 ชุดเครื่องสั่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic vibrator) ทำหน้าที่สั่นสะเทือนถึงเก็บของสารทำงานเพื่อป้องกันการตกตะกอนของสารไหลที่เหนียวที่ผสมอยู่ในสารทำงาน

5 ชุดหล่อเย็น (Cooling system) ทำหน้าที่ดึงความร้อนออกจากสารทำงานด้วยระบบทำความเย็น

6 ชุดครีบริบายความร้อนที่มีช่องการไหลขนาดเล็ก (Microchannel heat sinks) ทำหน้าที่ดึงความร้อนออกจากฮีตเตอร์

7 เครื่องชั่งน้ำหนัก (Digital weight scale) ใช้สำหรับตวงวัดอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานให้มีค่าเท่ากันตลอดการทดลอง

8 เครื่องมือวัดความดันตกคร่อม (Difference pressure transducer)

9 เครื่องมือวัดอุณหภูมิ (Thermocouple)

10 ชุดเก็บข้อมูล (Data logger)

11 คอมพิวเตอร์แสดงผลการทดลอง (Data acquisition system)

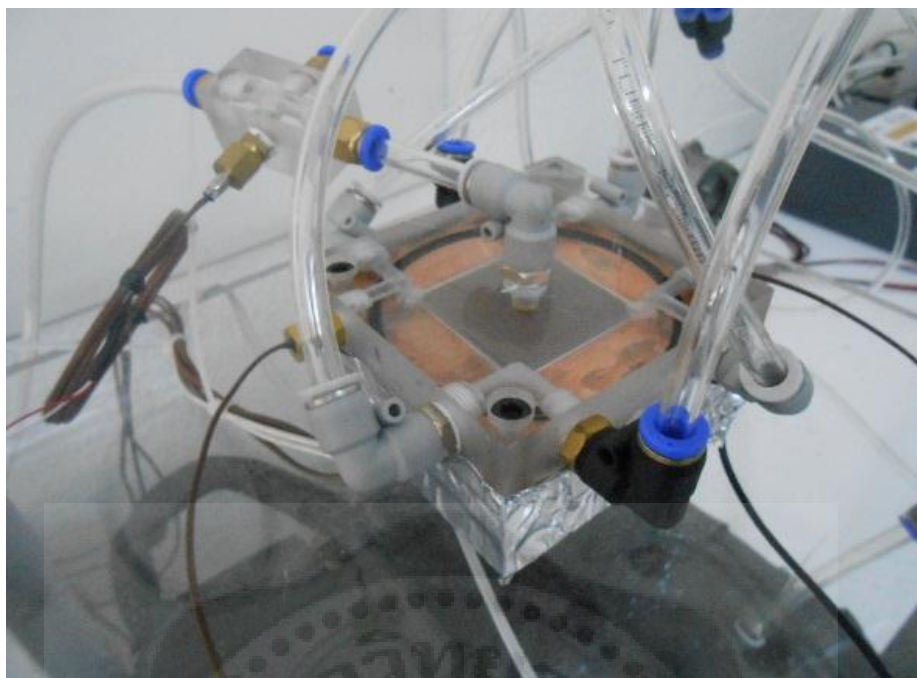
12 ฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electric heater)

13 โรตاميเตอร์ (Rotameter) เป็นอุปกรณ์ใช้วัดการไหล

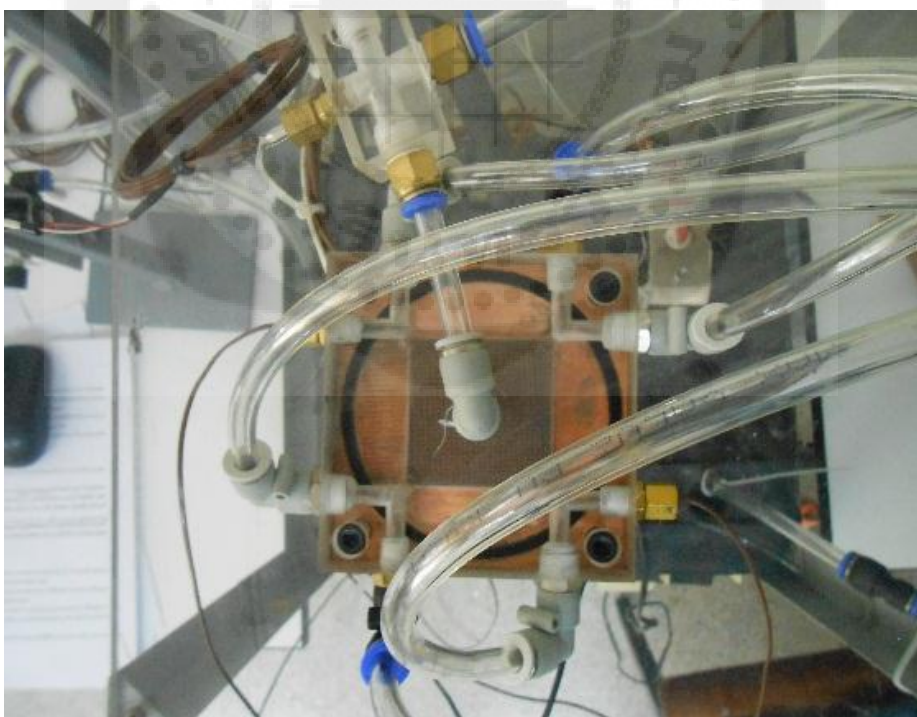
14 แหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply) ทำหน้าที่จ่ายไฟให้กับฮีตเตอร์ไฟฟ้า มอเตอร์ปั๊มน้ำ ระบบทำความเย็น และชุดเครื่องสั่นอัลตราโซนิก

15 เครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า (Volt and ampere meter) ทำหน้าที่วัดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับฮีตเตอร์ มอเตอร์ปั๊มน้ำ

16 อุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับป้อนให้กับฮีตเตอร์ไฟฟ้า



ภาพประกอบ 15 แสดงอุปกรณ์ในขณะทำการทดลอง



ภาพประกอบ 16 แสดงการประกอบชุดรีปเข้ากับชุดทดสอบ



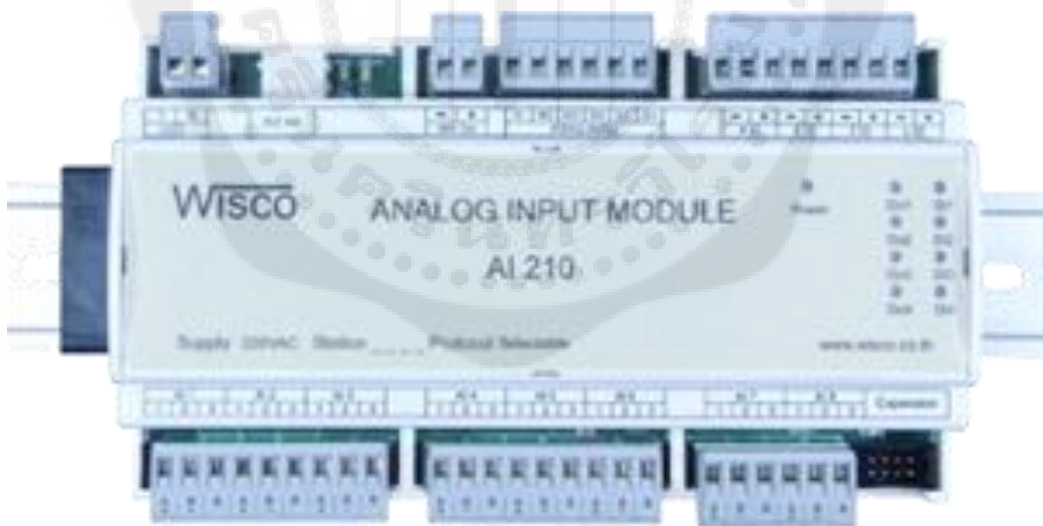
ภาพประกอบ 17 ฮีตเตอร์แท่งสำหรับให้ความร้อน



ภาพประกอบ 18 ชุดเครื่องมือวัดความดันตกคร่อม



ภาพประกอบ 19 เครื่องมือวัดกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า (Volt amp meter)



ภาพประกอบ 20 แสดงเครื่องเก็บข้อมูล (Data logger)



ภาพประกอบ 21 อุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC voltage regulator)



ภาพประกอบ 22 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล (Digital weigh scale)

ชุดทดลองประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก คือ ส่วนปรับควบคุม ประกอบด้วยชุดปรับฟลักซ์ความร้อน (Heat flux) อัตราการไหลของสารทำงาน และชุดวัดอุณหภูมิความร้อนเป็นระบบดิจิทัลโดยบรรจุรวมไว้ในตู้ควบคุมอุปกรณ์ ส่วนหล่อเย็นทำหน้าที่รักษาอุณหภูมิของสารทำงานให้ได้ตามค่าที่ต้องการ โดยชุดทดสอบพร้อมอุปกรณ์แสดงใน ภาพประกอบ 13

ตาราง 8 แสดงคุณสมบัติและขนาดต่าง ๆ ของครีปที่ใช้ในการทดลอง

ลักษณะครีป	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)
Minichannel	ทองแดง*	0.4 – 0.4 – 2.0	50 – 50 – 3	3,584	0.0025	0.01397
Microchannel	ทองแดง*	0.2 – 0.2 – 0.2	31 – 31 – 1	5,444	0.00074	0.00183

ตาราง 9 แสดงค่าความแม่นยำ และค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง

ชนิดของอุปกรณ์	ค่าความแม่นยำ	ค่าความคลาดเคลื่อน
ชุดเครื่องมือวัดความความดันตกคร่อม	0.02 %	± 0.02
ชุดเครื่องมือวัดความร้อน (ชนิด T)	0.10 %	± 0.10
ชุดเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล (g)	0.01 %	± 0.01
ชุดเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้า (V)	0.20 %	± 0.50
ชุดเครื่องมือวัดกระแสไฟฟ้า (A)	0.20 %	± 0.50

3 วิธีการทดลอง

การเก็บข้อมูลจากการทดลองเพื่อนำไปวิเคราะห์ผลมีลำดับขั้นตอน ดังนี้

- ประกอบชุดครีปที่ต้องการทดสอบ
- เตรียมอุปกรณ์สำหรับการทดลองให้พร้อมใช้งาน
- ทำการเติมสารทำงานลงในถังหล่อเย็น (Cooling tank)
- เปิดชุดทำความเย็นให้ทำงานโดยปรับตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 20 องศาเซลเซียส
- เปิดปั๊มน้ำให้ทำงานและปรับอัตราการไหลของน้ำไว้ที่ 30 ลิตรต่อชั่วโมง
- เปิดคอมพิวเตอร์ และเปิดเครื่องเก็บข้อมูล (Data logger)
- เมื่ออุณหภูมิของสารทำงานคงที่ที่ 20 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจึงเปิดชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าของขดลวดความร้อน (Electric heater) ที่ 121.20 วัตต์
- เมื่อกราฟอุณหภูมิของสารทำงานทางเข้า ทางออก อุณหภูมิฐานครีปทางเข้า ทางออก และอุณหภูมิของถังหล่อเย็นแสดงค่าคงที่ จึงสามารถเก็บข้อมูลไปคำนวณหาประสิทธิภาพได้

9 เมื่อเก็บข้อมูลและคำนวณสมดุลพลังงานได้ตามเกณฑ์ที่กำหนด ± 10 เปอร์เซ็นต์ จึงสามารถเก็บค่าอุณหภูมิ และค่าความดันตกคร่อมได้

10 ปรับอัตราการไหลของน้ำไว้ที่ 8.34, 8.90, 9.45, 10.01, 10.56, และ 11.12 กรัมต่อวินาที (g/s) ตามลำดับ

11 เปลี่ยนกำลังไฟฟ้าของขดลวดความร้อนเป็น 131.25 วัตต์ และ 141.70 วัตต์ตามลำดับ

12 ดำเนินการตามข้อ 1–11 แต่เปลี่ยนสารทำงานเป็นของไหลนาโนไททาเนียมในสัดส่วน 0.005 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรกับน้ำ และเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าของขดลวดความร้อนเป็น 121.20, 131.25 และ 141.70 วัตต์ ตามลำดับ

13 ดำเนินการตามข้อ 1–11 แต่เปลี่ยนขนาดของหัวฉีดจาก 1.0 มิลลิเมตร เป็นขนาด 1.5 มิลลิเมตร และเป็นขนาด 2.0 มิลลิเมตรตามลำดับ

14 ดำเนินการตามข้อ 1–11 แต่เปลี่ยนระยะความสูงของตำแหน่งของหัวฉีดจาก 0.5 มิลลิเมตร เป็นขนาด 1.0 มิลลิเมตร และเป็นขนาด 1.5 มิลลิเมตรตามลำดับ

15 ดำเนินการทดลองจนได้ค่าครบตามตารางการทดลองดังตาราง 10 และตาราง 11

เนื่องจากชุดครีบทดลองเป็นแบบสมมาตร (Symmetry) จึงทำการทดลองและศึกษาโดยทำการวัดอุณหภูมิของฐานครีบทดลอง และอุณหภูมิของสารทำงาน แต่ละจุดและนำมาหาค่าเฉลี่ย การวัดอุณหภูมิของฐานครีบทดลองแบ่งออกเป็น 3 จุด คือ บริเวณฐานของครีบทดลองด้านทางเข้า ($T_{b,in}$) บริเวณตรงกลาง ($T_{b,m}$) และบริเวณฐานของครีบทดลองด้านทางออก ($T_{b,out}$) เพื่อหาค่าเฉลี่ย และบันทึกผลในรูปแบบของตาราง

ในส่วนอุณหภูมิของสารทำงานแบ่งการวัดเป็น 2 จุด คือด้านทางเข้า ($T_{f,in}$) และด้านทางออก ($T_{f,out}$) ตามลำดับ อุณหภูมิของสารทำงาน (T_r) สำหรับการปฏิบัติการส่งถ่ายความร้อนควบคุมอุณหภูมิไว้ประมาณ 20 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิห้องควบคุม (T_r) ไว้ประมาณ 25 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่สะดวกในการทดลอง

4 ตัวแปรที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

จัดตัวแปรที่จะทำการศึกษาวิจัยออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

1 กลุ่มตัวแปรที่กำหนดให้เปลี่ยนแปลง (ตัวแปรอิสระ) ได้แก่

- ค่าฟลักซ์ความร้อน (Heat flux) ที่ให้กับครีบทดลอง
- อัตราการไหลของสารทำงาน (Flow rate) ที่ผ่านครีบทดลอง
- ความสูงของตำแหน่งฉีด
- ขนาดของหัวฉีด

2 กลุ่มตัวแปรตามที่ต้องการวัดค่า (ตัวแปรตาม) ได้แก่

- อุณหภูมิของฐานครีป
- อุณหภูมิของสารทำงานที่ผ่านครีป
- ความดันตกคร่อมของการไหลของสารทำงานที่ผ่านครีป

ตาราง 10 แสดงเงื่อนไขในการทดลองของครีปลักษณะแบบช่องการไหลขนาดเล็ก (Minichannel heat sinks)

อุณหภูมิทางเข้า (°C)	อัตราความร้อนที่ป้อน (W)	สารทำงานต่าง ๆ	อัตราการไหล (g/s)
20.00			8.88
	133.00	น้ำ	9.44
	147.00	TiO ₂ 0.005%	9.99
	และ	TiO ₂ 0.010%	10.55
	162.75	TiO ₂ 0.015%	11.10
			11.66

ตาราง 11 แสดงเงื่อนไขในการทดลองของครีปลักษณะแบบช่องการไหลขนาดเล็ก (Microchannel heat sinks)

อุณหภูมิทางเข้า (°C)	อัตราความร้อนที่ป้อน (W)	สารทำงานต่าง ๆ	อัตราการไหล (g/s)
20.00			8.33
	121.20	น้ำ	8.89
	131.25	TiO ₂ 0.005%	9.44
	และ	TiO ₂ 0.010%	10.00
	141.70	TiO ₂ 0.015%	10.56
			11.11

5 คุณลักษณะทั่วไปของทองแดงแบน JIS H 3140

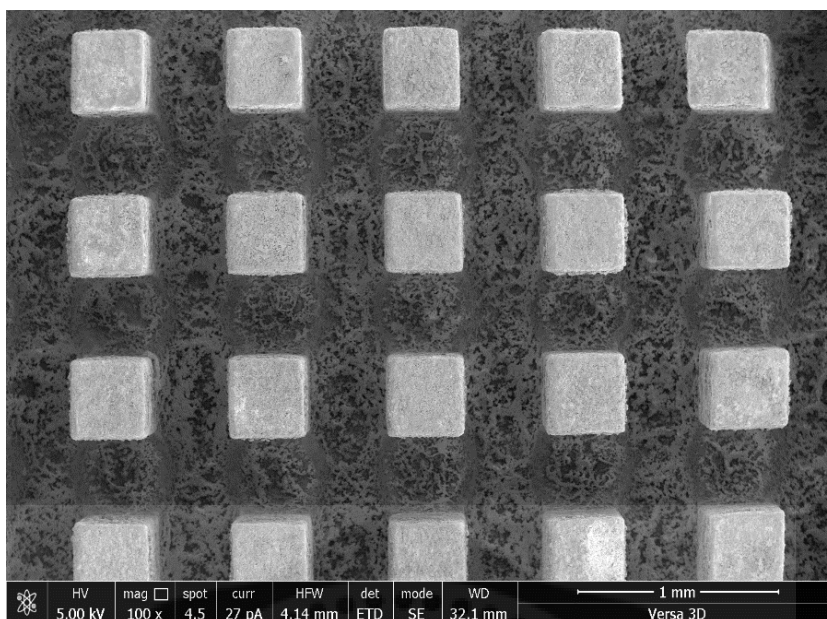
ทองแดงแบน JIS H3140 C1020 (CU OF–OKTM99.99%), ASTM B170–82–grade, UK BS 1981 Cu–OF, Germany DIN 1787 OF–CU ใช้ทำครีระบายความร้อนเป็นทองแดงแบน Oxygen free คือ เนื้อของทองแดงจะมีอากาศเหลืออยู่น้อยมากจนถึงไม่มีเลย เป็นทองแดงที่มีความบริสุทธิ์ 99.99% ขึ้นไป ทองแดงแบนภายใต้มาตรฐาน OF–OK (Oxygen free) มีคุณสมบัติที่คงทนต่อการดัดงอในการนำมาขึ้นรูปตามชนิดงานแล้วผิวยังคงสภาพเรียบไม่แตกสามารถนำกระแสไฟฟ้าได้เป็นอย่างดีมีความต้านทานกระแสไฟฟ้าสูง และปลอดภัยจากการลัดวงจรของไฟฟ้าเมื่อนำไปใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ จึงเป็นที่มาของคำว่า High conductivity ซึ่งเป็นที่ยอมรับจากหลายประเทศทั่วโลก ทองแดงเส้นแบน Oxygen free เหมาะกับการนำไปใช้งานชนิดต่าง ๆ เช่น ตู้สวิตช์บอร์ด ตู้คอนโทรล หม้อแปลงไฟฟ้า Bus ways, Bus duct งานโรงชุบต่าง ๆ หรืองานไฟฟ้าที่ต้องการความเสถียรของกระแสไฟฟ้าสูง ตาม ภาพประกอบ 23

ตาราง 12 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่สำคัญของทองแดงแบน

คุณสมบัติ	ค่าเฉลี่ย
ความหนาแน่น (kg/m^3)	8,978
ค่าความร้อนจำเพาะ C_p ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$)	381
อุณหภูมิหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)	1,293
การนำความร้อน ที่ 300 K ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)	387.6



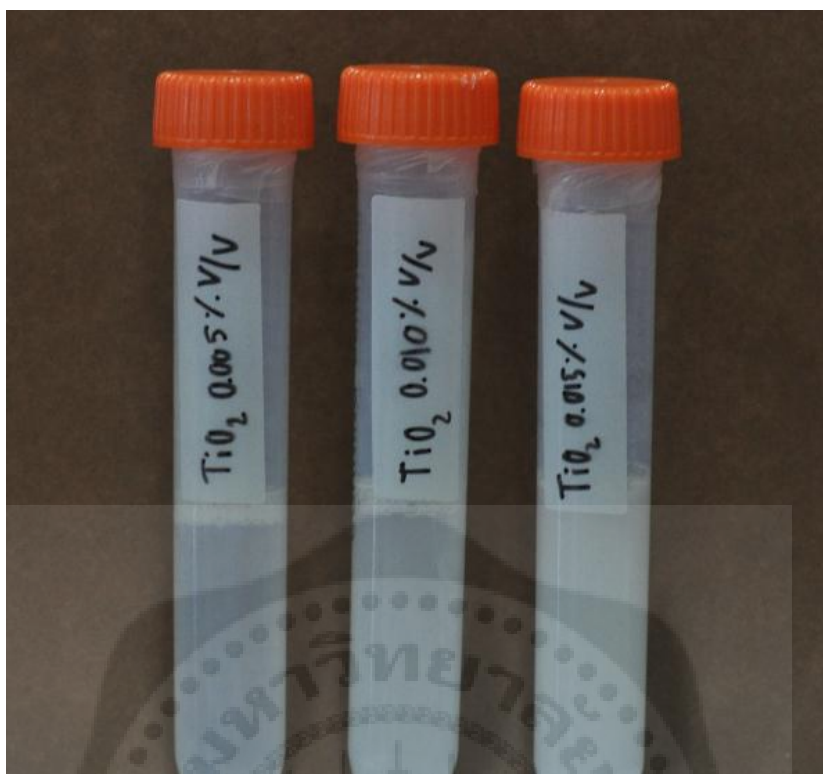
ภาพประกอบ 23 ทองแดงแบน JIS H3140 C1020 (CU OF– OKTM 99.99%)



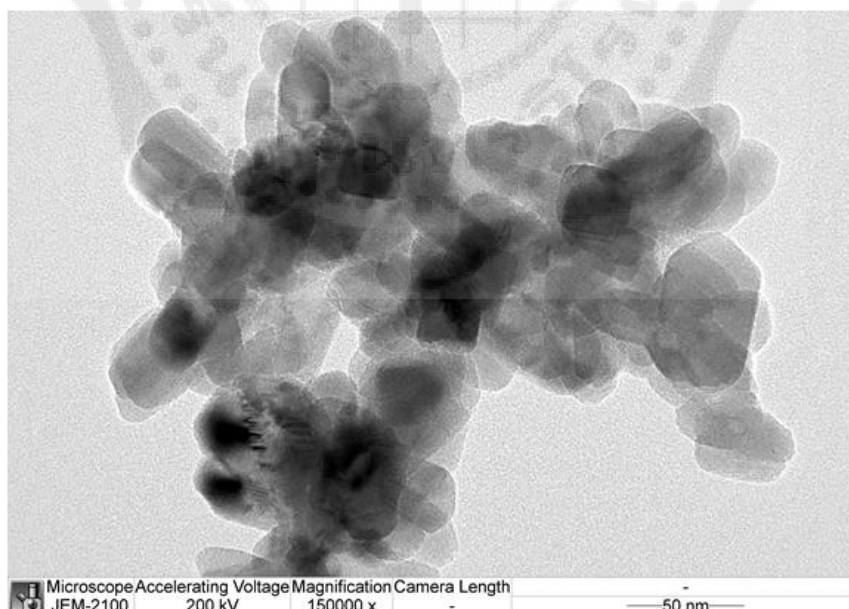
ภาพประกอบ 24 ภาพถ่ายของ Microchannel heat sinks ด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า

ตาราง 13 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่สำคัญของอนุภาคนาโน

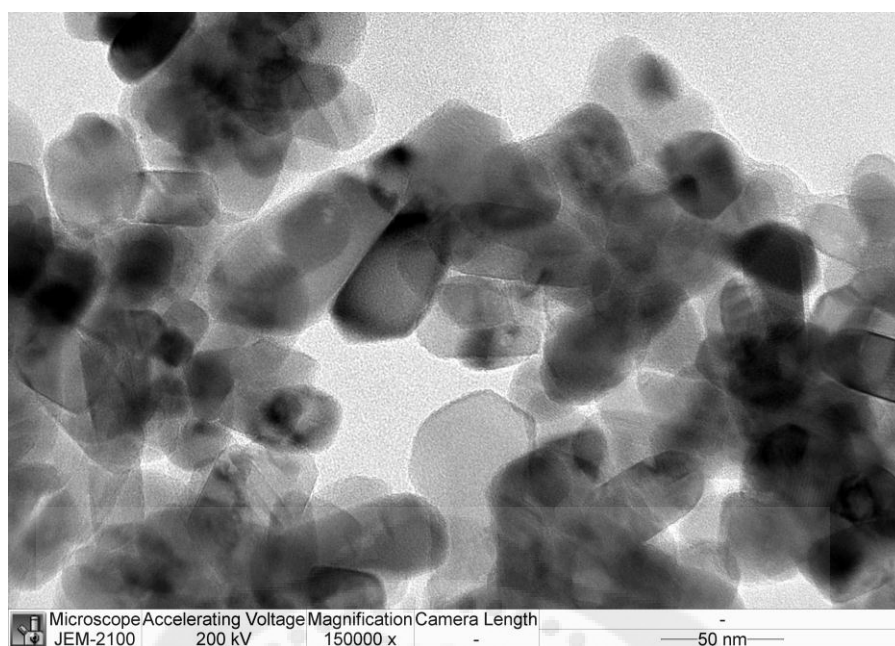
คุณสมบัติ	ค่าเฉลี่ย
ขนาดอนุภาคนาโน (nm)	50
ความหนาแน่น (kg/m^3)	4230
ค่าความร้อนจำเพาะ C_p ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$)	544.25
การนำความร้อน ที่ 300 K ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)	7.44
ความบริสุทธิ์ (%)	99.99



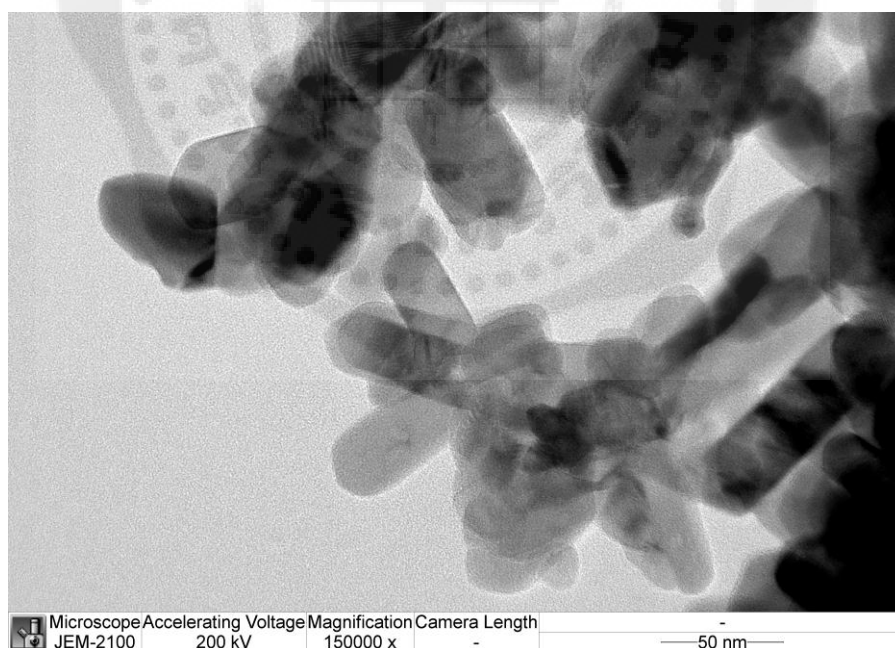
ภาพประกอบ 25 ของไฮลนาโนไททาเนียมผสมน้ำที่ความเข้มข้น 0.005 0.010 และ 0.015 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร



ภาพประกอบ 26 ของไฮลนาโนไททาเนียมผสมน้ำที่ความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 150,000 เท่า



ภาพประกอบ 27 ของไหลนาโนไททาเนียมผสมน้ำที่ความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 150,000 เท่า



ภาพประกอบ 28 ของไหลนาโนไททาเนียมผสมน้ำที่ความเข้มข้น 0.015 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 150,000 เท่า

6 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

6.1 อัตราการถ่ายเทความร้อน

อัตราการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนมีสมการความสัมพันธ์ ดังนี้

$$Q_{nf} = \dot{m}_{nf} c_{p,nf} (T_{in} - T_{out})_{nf} \quad (43)$$

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

6.2 อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย

อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเป็นการพิจารณานำเอาอัตราความร้อนที่ให้กับอัตราความร้อนที่ได้รับมาเฉลี่ยกันโดยมีสมการดังนี้

$$Q_{ave} = \frac{Q_{ele} + Q_{nf}}{2} \quad (44)$$

โดยที่

Q_{ave} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของของไหลนาโน, W

Q_{ele} คือ อัตราความร้อนที่ป้อนให้แผ่นกำเนิดความร้อน, W

Q_{nf} คือ อัตราความร้อนที่ของของไหลนาโนได้รับ, W

6.3 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของของไหลนาโนพิจารณาจากสมการพื้นฐานโดยมีสมการดังนี้

$$\bar{h}_{nf} = \frac{\bar{q}_{ave}}{T_s - T_{out,nf}} \quad (45)$$

โดยที่

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

$\bar{q}_{ave}$ คือ ฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ย, W/m^2

T_s คือ อุณหภูมิผิวศรีบรรยายความร้อน, $^\circ C$

$T_{out,nf}$ คือ อุณหภูมิขาออกของของไหลนาโน, $^\circ C$

6.4 ค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ย

ค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยของของไหลนาโนพิจารณาจากสมการพื้นฐานโดยมีสมการดังนี้

$$\bar{Nu} = \frac{\bar{h}_{nf} D_h}{k} \quad (46)$$

โดยที่

$\bar{Nu}$ คือ ค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยของของไหลนาโน

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

D_h คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของไฮดรอลิก, m.

k_{nf} คือ ค่าสภาพนำความร้อนของของไหลนาโน, $W/m.K$

บทที่ 5

ผลและการวิเคราะห์ผล

1 บทนำ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อน และการไหลของของไหลนาโนไททาเนียม และน้ำบริสุทธิ์โดยการฉีดกระทบครีประบายความร้อนที่มีช่องการไหลขนาดเล็กจิ๋ว โดยวิธีการทดลอง และวิธีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้สารทำงาน 2 ชนิด คือ น้ำ และของไหลนาโนไททาเนียม โดยใช้อุณหภูมิของไททาเนียม ขนาด 50 นาโนเมตร ผสมกับน้ำในสัดส่วน 0.005 0.010 และ 0.015 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร ทำการสร้างครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว สำหรับใช้ในการทดลองเก็บข้อมูล แล้วนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาตัวแปรที่ต้องการต่าง ๆ ผลที่ได้จากทดลองจะถูกบันทึกในรูปแบบของตาราง และนำผลการทดลองไปทำการศึกษาโดยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อเปรียบเทียบผลกับการทดลอง และนำผลการทดลองมาแสดงในลักษณะของกราฟแสดงการเปรียบเทียบของตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองสามารถแสดงอยู่ในรูปตัวแปรต่าง ๆ และแสดงลักษณะเป็นภาพดังนี้

ผลกระทบจากการทดลองของครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก และครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว

- กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิทางออกเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล
- กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิผิวครีเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล
- กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล
- กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขนัสเซิลต์ และค่าอัตราการไหลเชิงมวล
- กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล

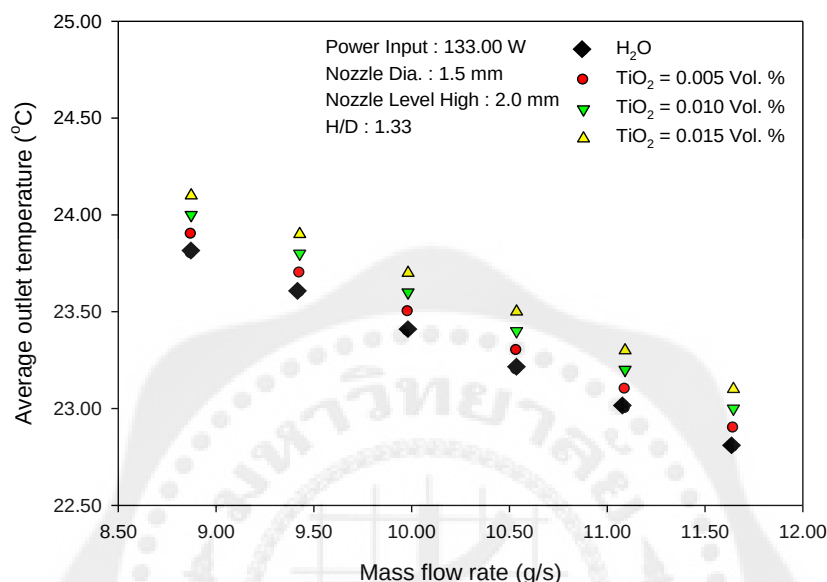
ผลกระทบของแบบจำลองคณิตศาสตร์ของครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก และครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว

- ภาพแสดงเส้นรูปร่างการแพร่กระจายของเวกเตอร์ความเร็ว
- ภาพแสดงเส้นรูปร่างการแพร่กระจายของความดันรวม
- ภาพแสดงเส้นรูปร่างการแพร่กระจายของค่าอุณหภูมิโดยรวมของชิ้นงาน อุณหภูมิที่ปลายครีของชิ้นงาน และอุณหภูมิที่ผิวครีของชิ้นงาน

2 ผลกระทบจากการทดลองของครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก

2.1 ผลกระทบของสารทำงาน

ผลของความเข้มข้นของของไหลนาโนที่มีต่ออุณหภูมิทางออก

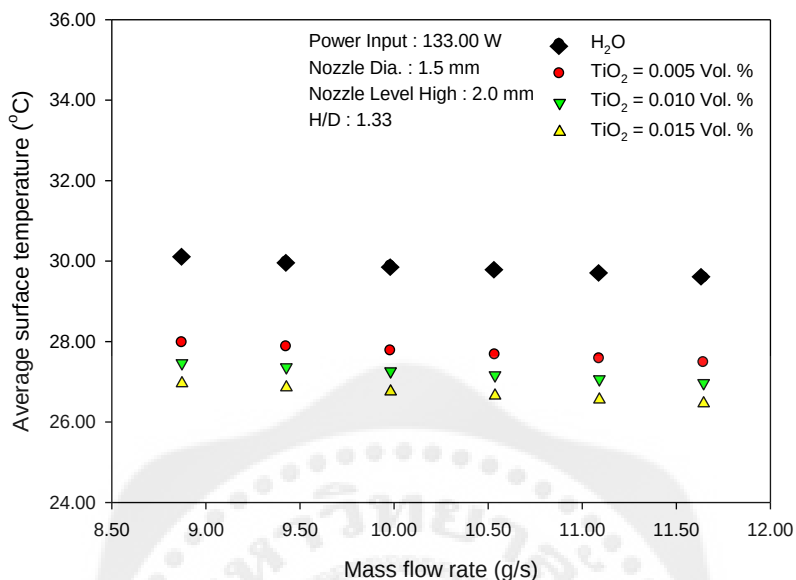


ภาพประกอบ 29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และสารทำงานต่าง ๆ และครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก

ภาพประกอบ 29 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล ของครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก โดยสารทำงานได้แก่ น้ำ และของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ 0.010 เปอร์เซ็นต์ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์ โดยอุณหภูมิของของไหลที่ทางออกวัดทั้งหมด 2 ช่องทางออกใช้ค่าเฉลี่ยจากการวัด 3 ครั้ง จากกราฟพบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลเชิงมวลสูงขึ้นอุณหภูมิทางออกมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามการไหลของของไหลเพิ่มขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิทางออกจึงมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบสารทำงาน ได้แก่ น้ำ และของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ 0.010 เปอร์เซ็นต์ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์ พบว่าสารทำงานของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.015 เปอร์เซ็นต์ มีค่าอุณหภูมิทางออกเฉลี่ยสูงที่สุดตลอดช่วงการทดลอง และของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์ 0.005 เปอร์เซ็นต์ ลดลงตามลำดับ และน้ำให้ค่าต่ำที่สุด

ผลของความเข้มข้นของของไหลนาโนที่มีต่ออุณหภูมิผิวครีป

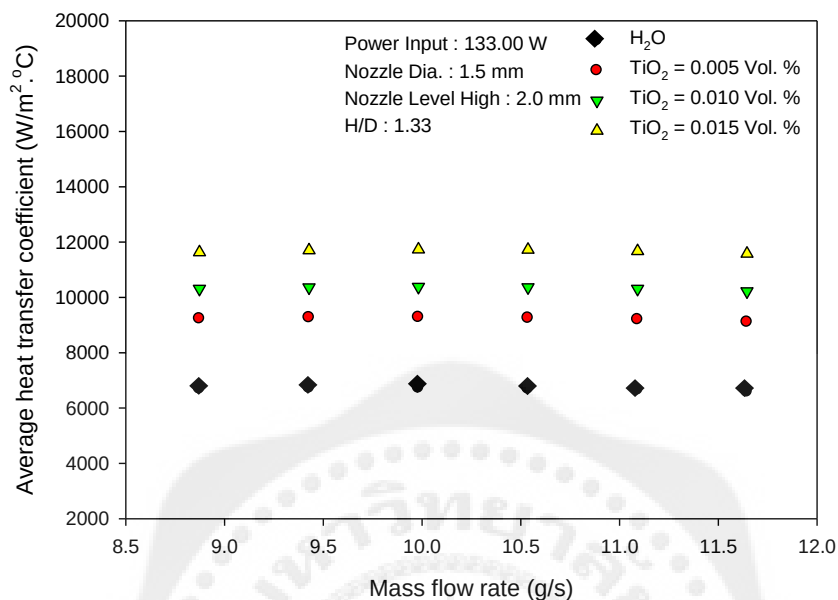


ภาพประกอบ 30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และสารทำงานต่าง ๆ และครีบรรยายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก

ภาพประกอบ 30 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล ของครีบรรยายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก โดยสารทำงานได้แก่ น้ำ และของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ 0.010 เปอร์เซ็นต์ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์ โดยอุณหภูมิของฐานครีบวัดทั้งหมด 3 จุด และใช้ค่า 3 จุดเฉลี่ย และใช้ค่าเฉลี่ยจากการวัด 3 ครั้ง และนำไปคำนวณค่า จากกราฟพบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลเชิงมวลสูงขึ้นอุณหภูมิผิวครีบเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อการไหลของของไหลสูงขึ้น อัตราการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของของไหล ดังนั้นอุณหภูมิผิวครีบเฉลี่ยจึงมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยอย่างช้า ๆ และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบสารทำงาน ได้แก่ น้ำ และของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ 0.010 เปอร์เซ็นต์ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์ พบว่าสารทำงานของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.015 เปอร์เซ็นต์มีค่าอุณหภูมิทางออกเฉลี่ยต่ำที่สุดตลอดช่วงการทดลอง และของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์ 0.005 เปอร์เซ็นต์ เพิ่มขึ้นตามลำดับ และน้ำให้ค่าสูงที่สุด

ผลของความเข้มข้นของของไหลนาโนที่มีต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

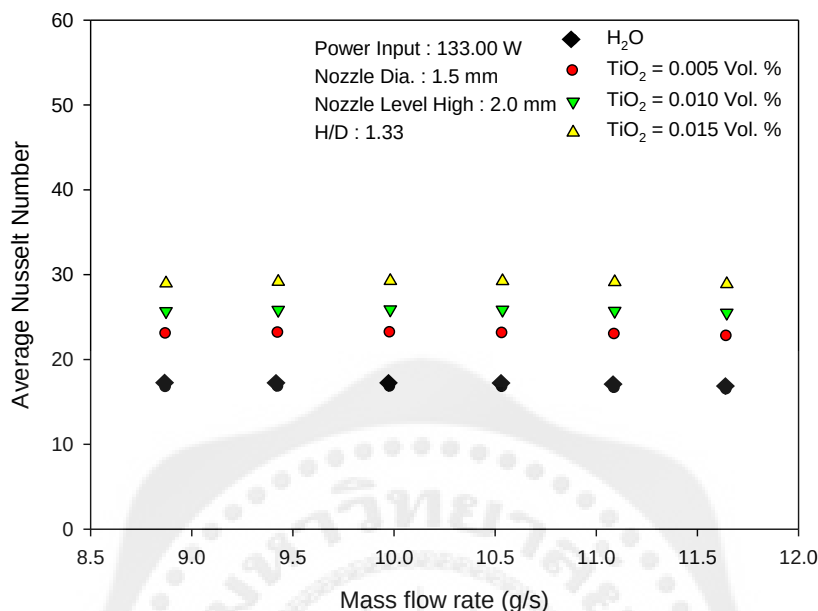


ภาพประกอบ 31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และสารทำงานต่าง ๆ และครีบรรยายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก

ภาพประกอบ 31 แสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล ของครีบรรยายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก โดยสารทำงานได้แก่ น้ำ และของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ 0.010 เปอร์เซ็นต์ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์ โดยข้อมูลพื้นฐานสำหรับการคำนวณใช้ค่าเฉลี่ยจากการวัด 3 ครั้งจากกราฟพบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลเชิงมวลสูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อการไหลของของไหลสูงขึ้น อัตราการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของของไหล ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบสารทำงาน ได้แก่ น้ำ และของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ 0.010 เปอร์เซ็นต์ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์ พบว่าสารทำงานของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.015 เปอร์เซ็นต์มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงที่สุดตลอดช่วงการทดลอง และของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์ 0.005 เปอร์เซ็นต์ สูงขึ้นตามลำดับ และนำไปสู่ค่าต่ำที่สุด

ผลของความเข้มข้นของของไหลนาโนที่มีต่อค่าเลขนัสเซลล์

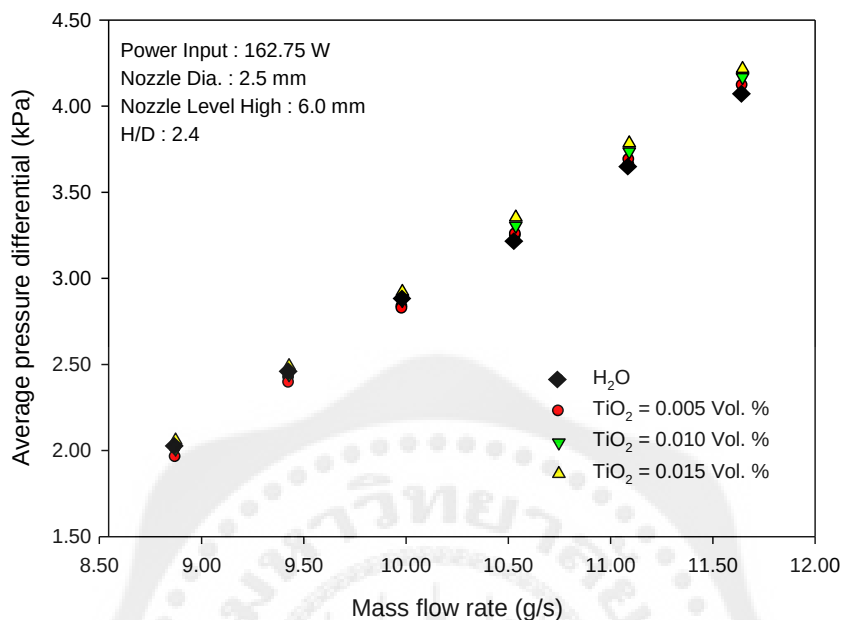


ภาพประกอบ 32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และสารทำงานต่าง ๆ และครีบรรยายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก

ภาพประกอบ 32 แสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล ของครีบรรยายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก โดยสารทำงานได้แก่ น้ำ และของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ 0.010 เปอร์เซ็นต์ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์ โดยข้อมูลพื้นฐานสำหรับการคำนวณใช้ค่าเฉลี่ยจากการวัด 3 ครั้ง จากกราฟพบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลเชิงมวลสูงขึ้นค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อการไหลของของไหลสูงขึ้น อัตราการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของของไหล ดังนั้นค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ยจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบสารทำงาน ได้แก่ น้ำ และของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ 0.010 เปอร์เซ็นต์ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์ พบว่าสารทำงานของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.015 เปอร์เซ็นต์มีค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ยสูงที่สุดตลอดช่วงการทดลอง และของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์ 0.005 เปอร์เซ็นต์ ลดลงตามลำดับ และน้ำให้ค่าต่ำที่สุด

ผลของความเข้มข้นของของไหลนาโนที่มีต่อความดันตกคร่อม



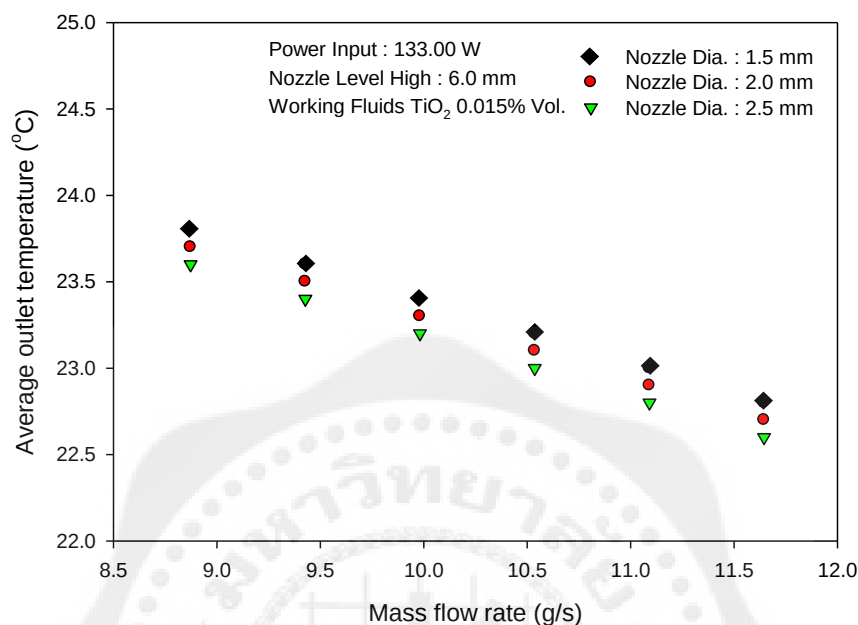
ภาพประกอบ 33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันตกคร่อมเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และสารทำงานต่าง ๆ และครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก

ภาพประกอบ 33 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล ของครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก โดยสารทำงานได้แก่ น้ำ และของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ 0.010 เปอร์เซ็นต์ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์โดยข้อมูลพื้นฐานจากการวัดที่ทางออก 1 จุด และเฉลี่ยจากการวัด 3 ครั้งจากกราฟพบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลเชิงมวลสูงขึ้นค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลสูงขึ้น ดังนั้นค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ยจึงมีแนวโน้มเพิ่ม และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบสารทำงาน ได้แก่ น้ำ และของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ 0.010 เปอร์เซ็นต์ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์ พบว่าแม้เปลี่ยนแปลงสารทำงานแต่ค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ยมีค่าเกาะกลุ่ม และเพิ่มขึ้นตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น

2.2 ผลกระทบของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด

ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดที่มีต่ออุณหภูมิทางออก

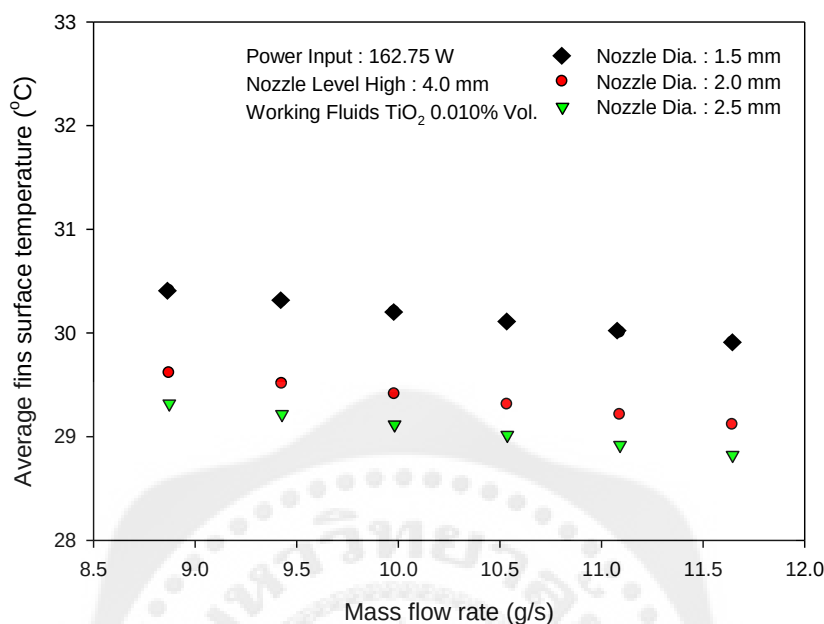


ภาพประกอบ 34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ และอธิบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก

ภาพประกอบ 34 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล ของอธิบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก ขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร 2.0 มิลลิเมตร และ 2.5 มิลลิเมตร จากกราฟพบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลเชิงมวลสูงขึ้นค่าอุณหภูมิทางออกเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลสูงขึ้นส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้นดังความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิทางออกเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลง และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาอธิบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก ขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร 2.0 มิลลิเมตร และ 2.5 มิลลิเมตร พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร ให้ค่าอุณหภูมิทางออกเฉลี่ยสูงที่สุด และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร และ 2.5 มิลลิเมตร ลดลงตามลำดับ

ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดที่มีต่ออุณหภูมิผิวครีป

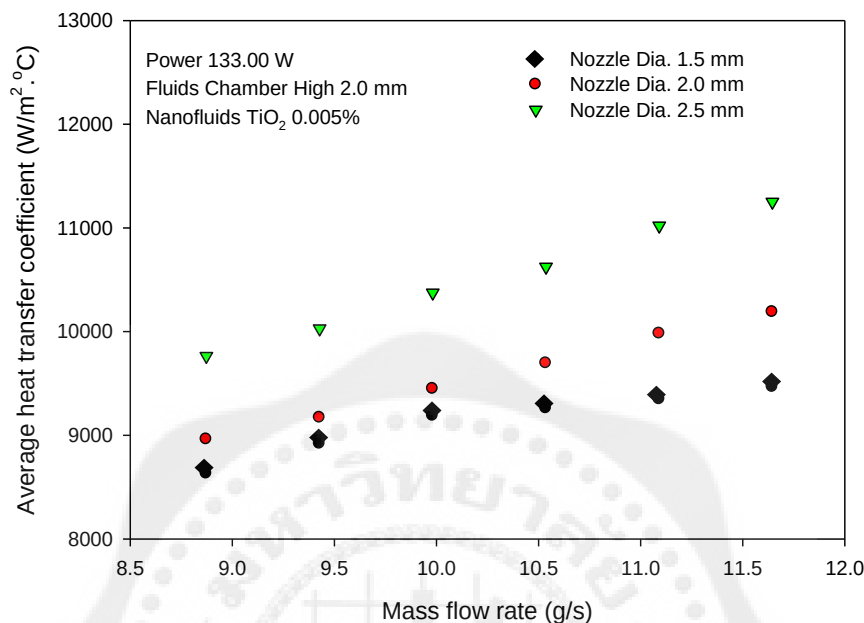


ภาพประกอบ 35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิผิวครีปเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ และครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก

ภาพประกอบ 35 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิผิวครีปเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล ของครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก ขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร 2.0 มิลลิเมตร และ 2.5 มิลลิเมตร จากกราฟพบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลเชิงมวลสูงขึ้นค่าอุณหภูมิผิวครีปเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลสูงขึ้นส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น ดังความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิผิวครีปเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลง และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก ขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร 2.0 มิลลิเมตร และ 2.5 มิลลิเมตร พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร ให้ค่าอุณหภูมิทางออกเฉลี่ยสูงที่สุด และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร และ 2.5 มิลลิเมตร ลดลงตามลำดับ

ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดที่มีต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

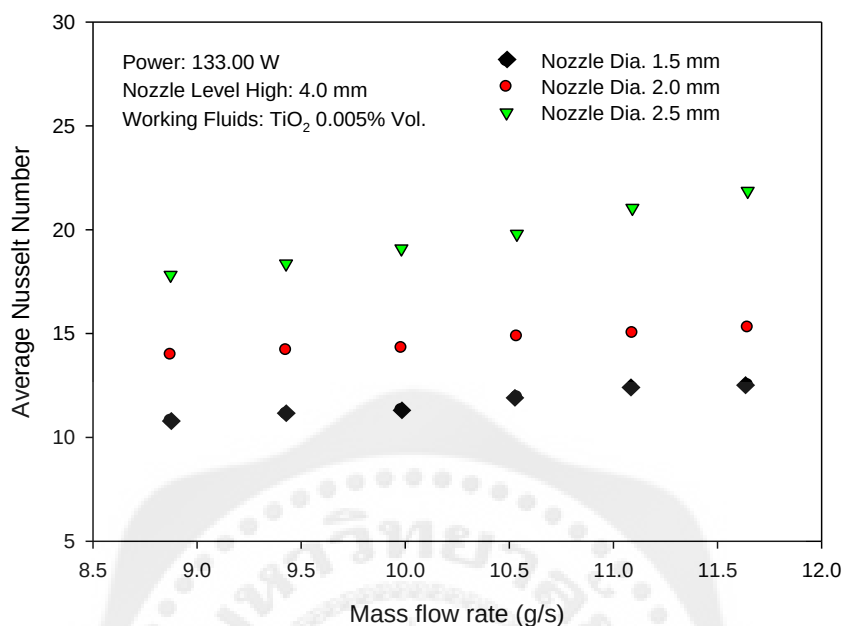


ภาพประกอบ 36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ และอธิบายความหมายของขนาดเล็ก

ภาพประกอบ 36 แสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล ตำแหน่งหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร สารทำงานได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ป้อน 133.00 วัตต์ ขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร 2.0 มิลลิเมตร และ 2.5 มิลลิเมตร จากกราฟพบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลเชิงมวลสูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลสูงขึ้นส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น ดังความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดจาก 1.5 มิลลิเมตร 2.0 มิลลิเมตร และ 2.5 มิลลิเมตร สารทำงานได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่งหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร และพลังงานที่ป้อน 133.00 วัตต์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่ม และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 2.5 มิลลิเมตรให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงสุด และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร ลดลงตามลำดับ

ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดที่มีต่อค่าเลขนัสเซิลด์

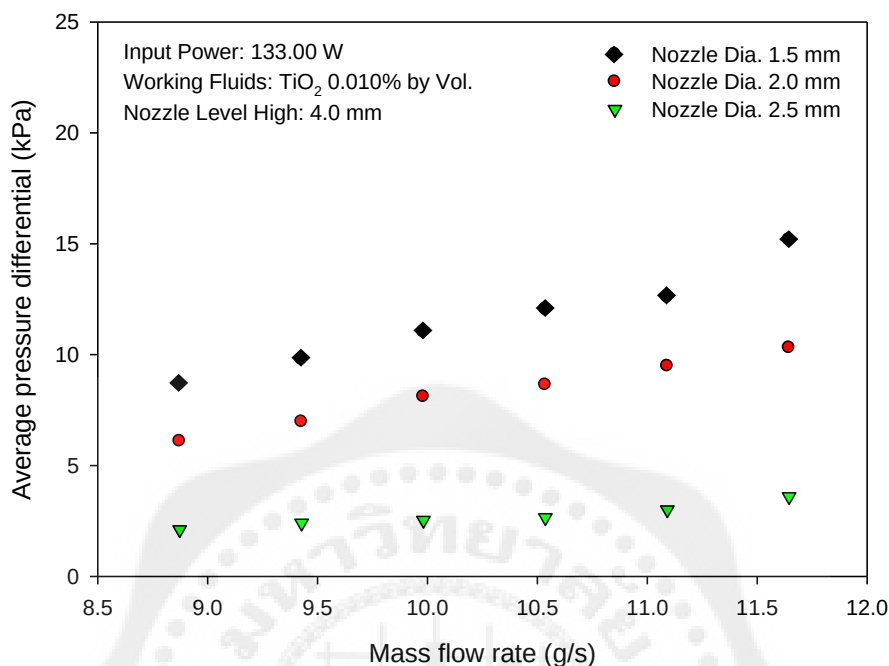


ภาพประกอบ 37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าเลขนัสเซิลด์เฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ และอธิบายความร่อนแบบช่องขนาดเล็ก

ภาพประกอบ 37 แสดงความสัมพันธ์ของค่าเลขนัสเซิลด์เฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล ตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร สารทำงานได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ป้อน 133.00 ขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร 2.0 มิลลิเมตร และ 2.5 มิลลิเมตร จากกราฟพบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลเชิงมวลสูงขึ้นค่าเลขนัสเซิลด์เฉลี่ย มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลสูงขึ้นส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น ดังความสัมพันธ์กับค่าเลขนัสเซิลด์เฉลี่ย และตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดจาก 1.5 มิลลิเมตร 2.0 มิลลิเมตร และ 2.5 มิลลิเมตร สารทำงาน ได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร และพลังงานที่ป้อน 133.00 วัตต์ พบว่าค่าเลขนัสเซิลด์เฉลี่ย มีแนวโน้มเพิ่มอย่างชัดเจน ตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 2.5 มิลลิเมตรให้ค่าเลขนัสเซิลด์เฉลี่ยสูงสุด และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร ลดลงตามลำดับ

ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดที่มีต่อความดันตกคร่อม



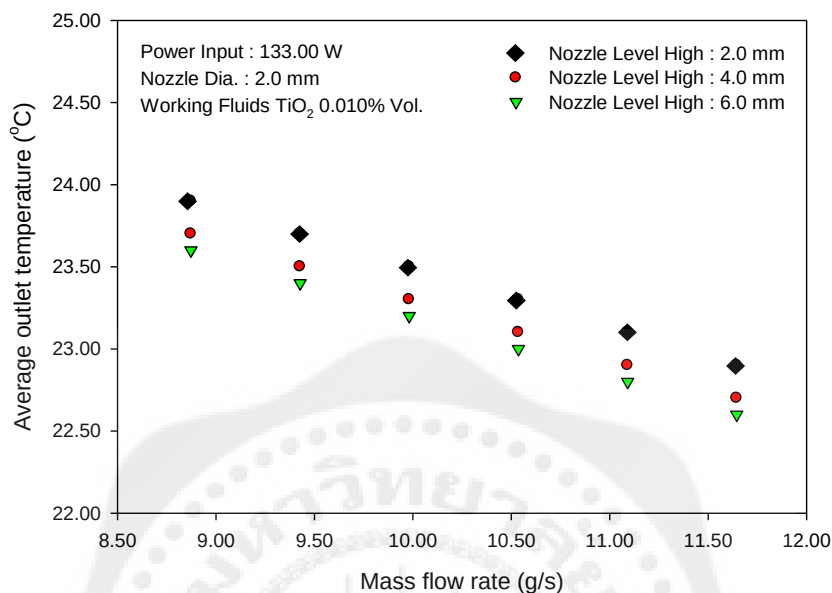
ภาพประกอบ 38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันตกคร่อมเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ และอธิบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก

ภาพประกอบ 38 แสดงความสัมพันธ์ของความดันตกคร่อมเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล ตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร สารทำงานได้แก่ น้ำ และของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ป้อน 133.00 วัตต์ ขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร 2.0 มิลลิเมตร และ 2.5 มิลลิเมตร จากกราฟพบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลเชิงมวลสูงขึ้นค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ย มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลสูงขึ้น ส่งผลให้ความเร็วภายในหัวฉีดสูงมากขึ้นและเกิดการไหลปั่นป่วนภายในหัวมากขึ้นเช่นกัน ดังความสัมพันธ์กับค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดจาก 1.5 มิลลิเมตร 2.0 มิลลิเมตร และ 2.5 มิลลิเมตร สารทำงานได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียม ความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร และพลังงานที่ป้อน 133.00 วัตต์ พบว่าค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ย มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตรให้ค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ยสูงสุด และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร และ 2.5 มิลลิเมตร ลดลงตามลำดับ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 2.5 มิลลิเมตรมีค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ยต่ำที่สุด

2.3 พิจารณาผลกระทบของระยะห่างของตำแหน่งหัวฉีด

ผลของระยะห่างของตำแหน่งหัวฉีดที่มีต่ออุณหภูมิทางออก

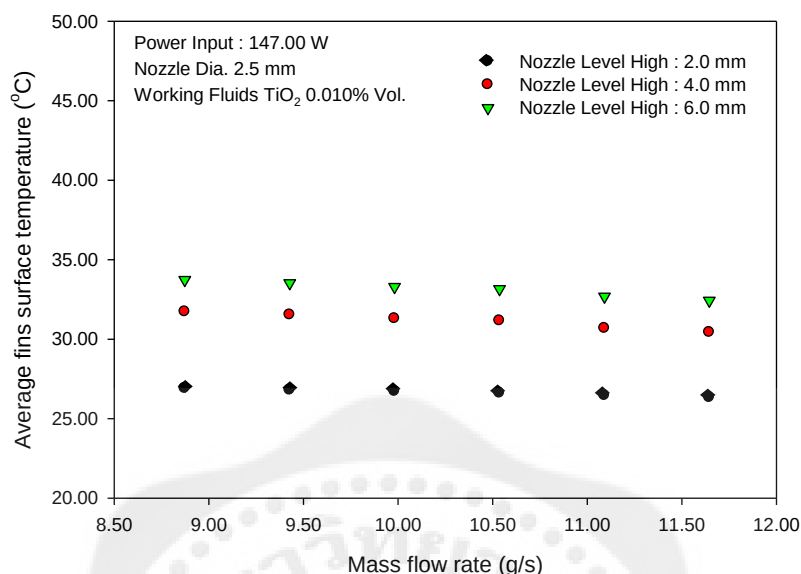


ภาพประกอบ 39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และตำแหน่งหัวฉีดที่ระยะห่างต่าง ๆ และอธิบายความรบกวนแบบช่องขนาดเล็ก

ภาพประกอบ 39 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล ขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตร สารทำงานได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ป้อน 133.00 วัตต์ ตำแหน่งหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร 4.0 มิลลิเมตร และ 6.0 มิลลิเมตร จากกราฟพบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลเชิงมวลสูงขึ้นค่าอุณหภูมิทางออกเฉลี่ย มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลสูงขึ้นส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้นดังความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิทางออกเฉลี่ย มีแนวโน้มลดลง และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตำแหน่งหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร 4.0 มิลลิเมตร และ 6.0 มิลลิเมตร สารทำงาน ได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียม ความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร และพลังงานที่ป้อน 133.00 วัตต์ พบว่าค่าอุณหภูมิทางออกเฉลี่ย มีแนวโน้มลดลง และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น และตำแหน่งหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร ให้ค่าอุณหภูมิทางออกเฉลี่ยสูงสุด และตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร และ 6.0 มิลลิเมตร ลดลงตามลำดับ

ผลของระยะห่างของตำแหน่งหัวฉีดที่มีต่ออุณหภูมิผิวครีป

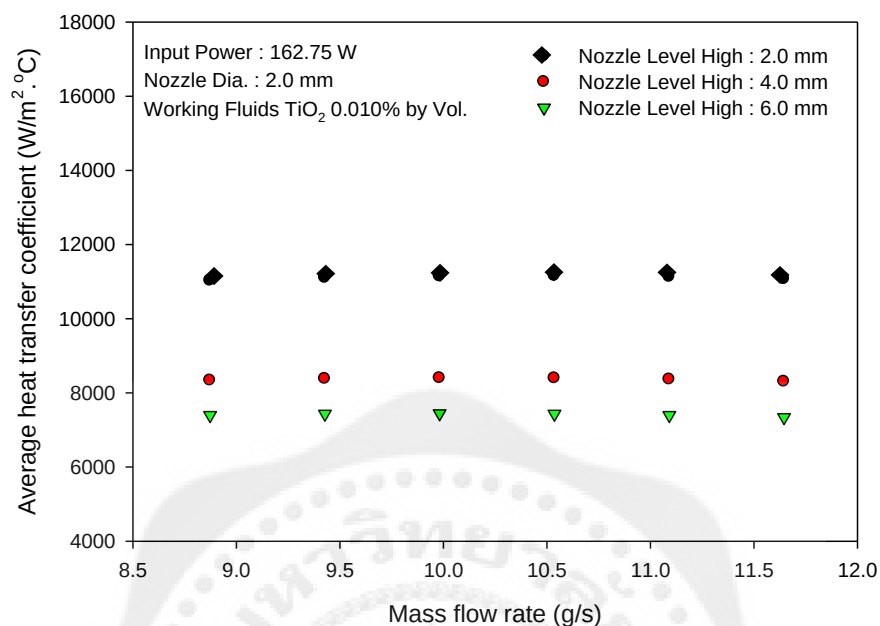


ภาพประกอบ 40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิผิวครีปเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และตำแหน่งหัวฉีดที่ระยะห่างต่าง ๆ และครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก

ภาพประกอบ 40 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิผิวครีปเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล ขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร สารทำงานได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ป้อน 147.00 วัตต์ ตำแหน่งหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร 4.0 มิลลิเมตร และ 6.0 มิลลิเมตร จากกราฟพบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลเชิงมวลสูงขึ้นค่าอุณหภูมิผิวครีปเฉลี่ย มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลสูงขึ้นส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้นดังความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิผิวครีปเฉลี่ย มีแนวโน้มลดลง และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตำแหน่งหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร 4.0 มิลลิเมตร และ 6.0 มิลลิเมตร สารทำงาน ได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียม ความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร และพลังงานที่ป้อน 133.00 วัตต์ พบว่าค่าอุณหภูมิผิวครีปเฉลี่ย มีแนวโน้มลดลง และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น และตำแหน่งหัวฉีด 6.0 มิลลิเมตร ให้ค่าอุณหภูมิผิวครีปเฉลี่ย และตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร และ 2.0 มิลลิเมตร ลดลงตามลำดับ

ผลของระยะห่างของตำแหน่งหัวฉีดที่มีต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

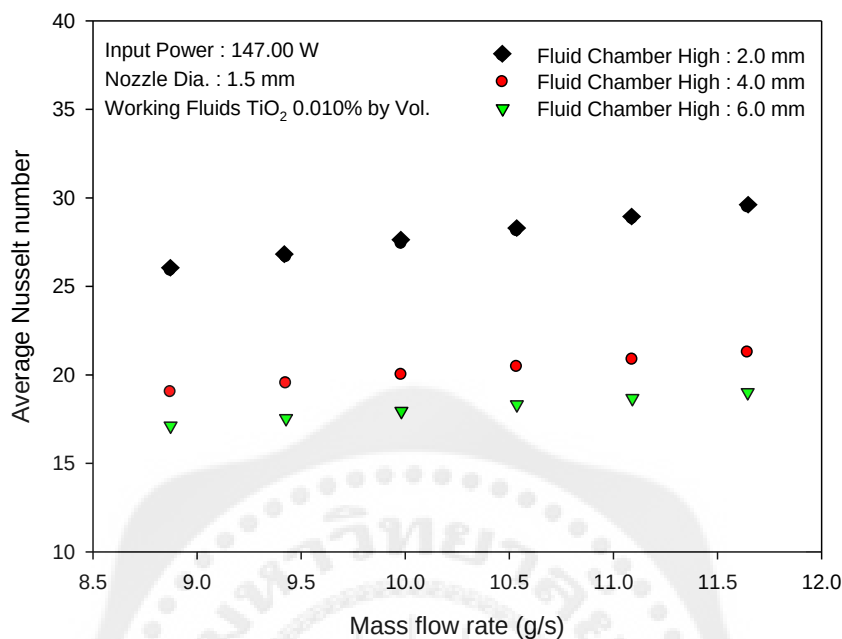


ภาพประกอบ 41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และตำแหน่งหัวฉีดที่ระยะห่างต่าง ๆ และอธิบายความหมายของขนาด

ภาพประกอบ 41 แสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล ขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตร สารทำงานได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ป้อน 162.75 วัตต์ ตำแหน่งหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร 4.0 มิลลิเมตร และ 6.0 มิลลิเมตร จากกราฟพบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลเชิงมวลสูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลสูงขึ้นส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้นดังความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตำแหน่งหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร 4.0 มิลลิเมตร และ 6.0 มิลลิเมตร สารทำงาน ได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียม ความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร และพลังงานที่ป้อน 162.75 วัตต์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น และตำแหน่งหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตรให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงที่สุด และตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร และ 6.0 มิลลิเมตร ลดลงตามลำดับ

ผลของระยะห่างของตำแหน่งหัวฉีดที่มีต่อค่าเลขนัสเซลล์

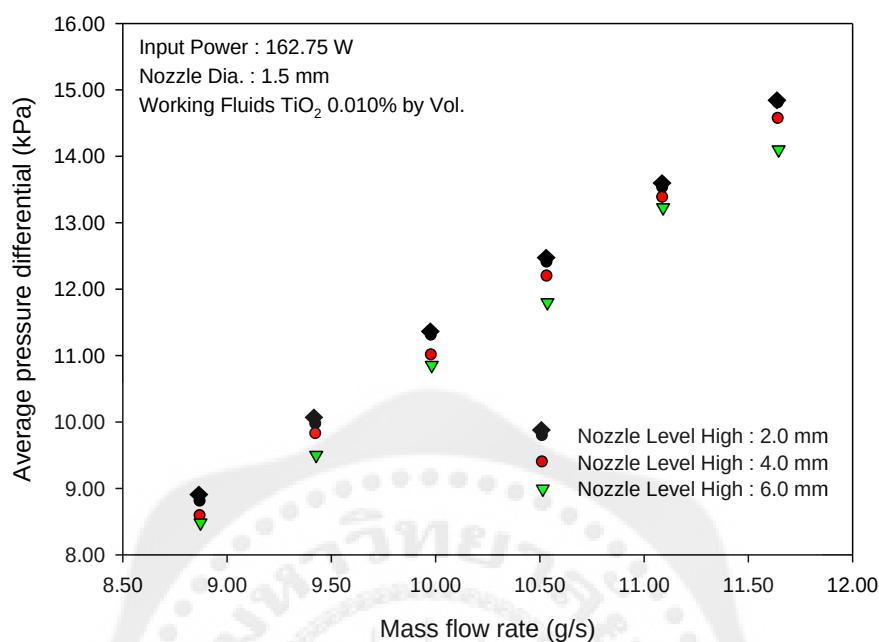


ภาพประกอบ 42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และตำแหน่งหัวฉีดที่ระยะห่างต่าง ๆ และอธิบายความรู้อันแบบช่องขนาดเล็ก

ภาพประกอบ 42 แสดงความสัมพันธ์ของค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล ขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร สารทำงานได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ป้อน 147.00 วัตต์ ตำแหน่งหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร 4.0 มิลลิเมตร และ 6.0 มิลลิเมตร จากกราฟพบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลเชิงมวลสูงขึ้นค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ย มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลสูงขึ้นส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้นดังความสัมพันธ์กับค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ย มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตำแหน่งหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร 4.0 มิลลิเมตร และ 6.0 มิลลิเมตร สารทำงาน ได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร และพลังงานที่ป้อน 147.00 วัตต์ พบว่าค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น และตำแหน่งหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร ให้ค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ยสูงที่สุด และตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร และ 6.0 มิลลิเมตร ลดลงตามลำดับ

ผลของระยะห่างของตำแหน่งหัวฉีดที่มีต่อความดันตกคร่อม



ภาพประกอบ 43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และตำแหน่งหัวฉีดที่ระยะห่างต่าง ๆ และอธิบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก

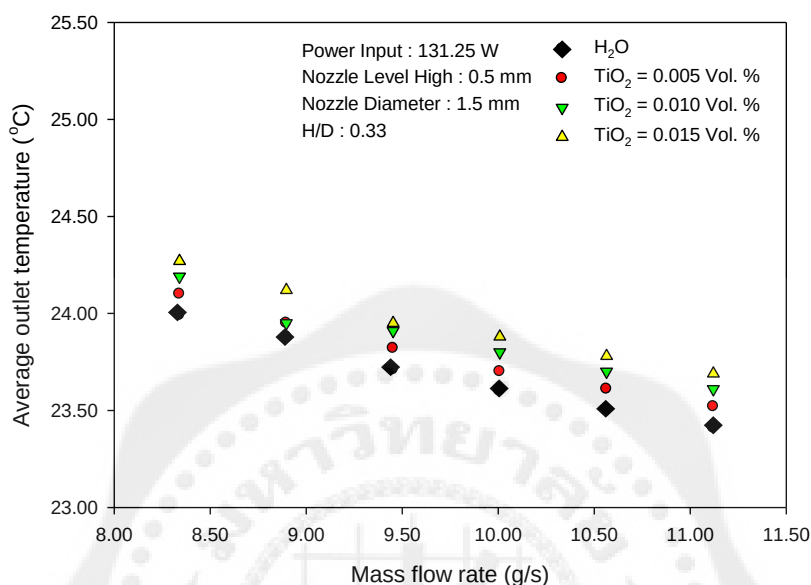
ภาพประกอบ 43 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล ขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร สารทำงานได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ป้อน 162.75 วัตต์ ตำแหน่งหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร 4.0 มิลลิเมตร และ 6.0 มิลลิเมตร จากกราฟพบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลเชิงมวลสูงขึ้นค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ย มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลสูงขึ้น ส่งผลให้ความเร็วภายในหัวฉีดสูงมากขึ้นและเกิดการไหลปั่นป่วนภายในหัวมากขึ้นเช่นกัน ดังความสัมพันธ์กับค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตำแหน่งหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร 4.0 มิลลิเมตร และ 6.0 มิลลิเมตร สารทำงาน ได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร พลังงานที่ป้อน 162.75 วัตต์ พบว่าค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ย มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น และตำแหน่งหัวฉีด 6.0 มิลลิเมตรให้ค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ยต่ำที่สุด และตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร และ 2.0 มิลลิเมตร เพิ่มขึ้นตามลำดับ

3 ผลกระทบจากการทดลองของครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว

3.1 ผลกระทบของสารทำงาน

ผลของความเข้มข้นของของไหลนาโนที่มีต่ออุณหภูมิทางออก

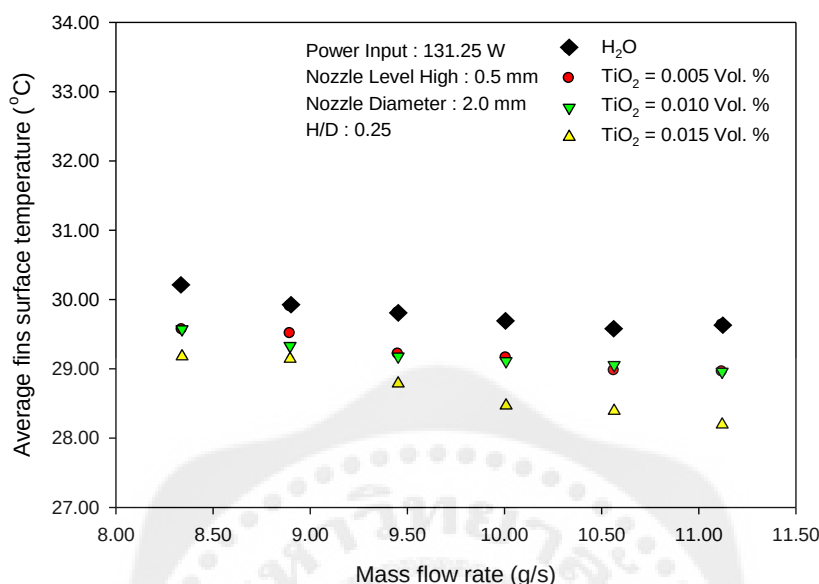


ภาพประกอบ 44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และสารทำงานต่าง ๆ และครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว

ภาพประกอบ 44 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล ของครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว โดยสารทำงานได้แก่ น้ำ และของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ 0.010 เปอร์เซ็นต์ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์ โดยอุณหภูมิของของไหลที่ทางออกวัดทั้งหมด 2 ช่องทางออกใช้ค่าเฉลี่ยจากการวัด 3 ครั้ง จากกราฟพบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลเชิงมวลสูงขึ้นอุณหภูมิทางออกมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อการไหลของของไหลสูงขึ้น อัตราการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของของไหล ดังนั้นอุณหภูมิทางออกจึงมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบสารทำงาน ได้แก่ น้ำ และของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ 0.010 เปอร์เซ็นต์ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์ พบว่าสารทำงานของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.015 เปอร์เซ็นต์ มีค่าอุณหภูมิทางออกเฉลี่ยสูงที่สุดตลอดช่วงการทดลอง และของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์ 0.005 เปอร์เซ็นต์ ลดลงตามลำดับ และน้ำให้ค่าต่ำที่สุด

ผลของความเข้มข้นของของไหลนาโนที่มีต่ออุณหภูมิผิวครีป

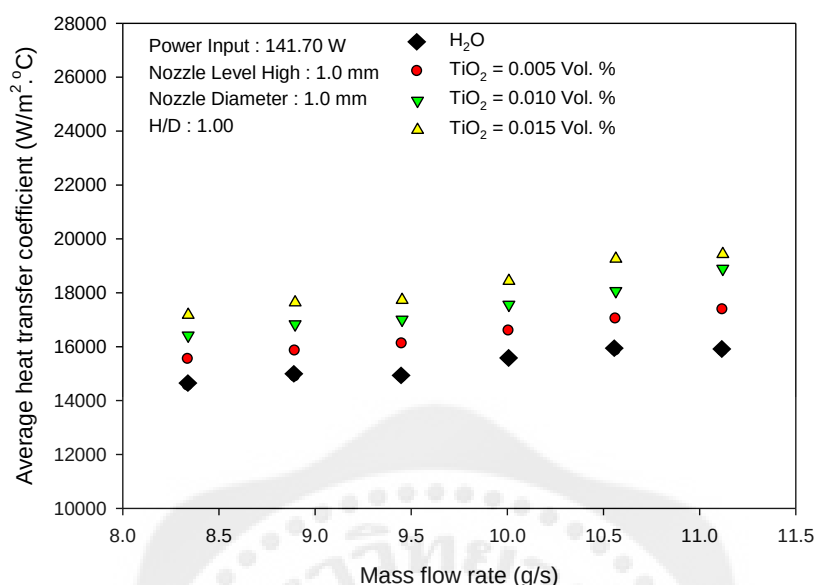


ภาพประกอบ 45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และสารทำงานต่าง ๆ และครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว

ภาพประกอบ 45 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล ของครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว โดยสารทำงานได้แก่ น้ำ และของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ 0.010 เปอร์เซ็นต์ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์ โดยอุณหภูมิของฐานครีปวัดทั้งหมด 3 จุด และใช้ค่า 3 จุดเฉลี่ย และใช้ค่าเฉลี่ยจากการวัด 3 ครั้ง และนำไปคำนวณค่า จากกราฟพบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลเชิงมวลสูงขึ้นอุณหภูมิผิวครีปเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อการไหลของของไหลสูงขึ้น อัตราการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของของไหล ดังนั้นอุณหภูมิผิวครีปเฉลี่ยจึงมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยอย่างช้า ๆ และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบสารทำงาน ได้แก่ น้ำ และของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ 0.010 เปอร์เซ็นต์ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์ พบว่าสารทำงานของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.015 เปอร์เซ็นต์มีค่าอุณหภูมิทางออกเฉลี่ยต่ำที่สุดตลอดช่วงการทดลอง และของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์ 0.005 เปอร์เซ็นต์ เพิ่มขึ้นตามลำดับ และน้ำให้ค่าสูงที่สุด

ผลของความเข้มข้นของของไหลนาโนที่มีต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

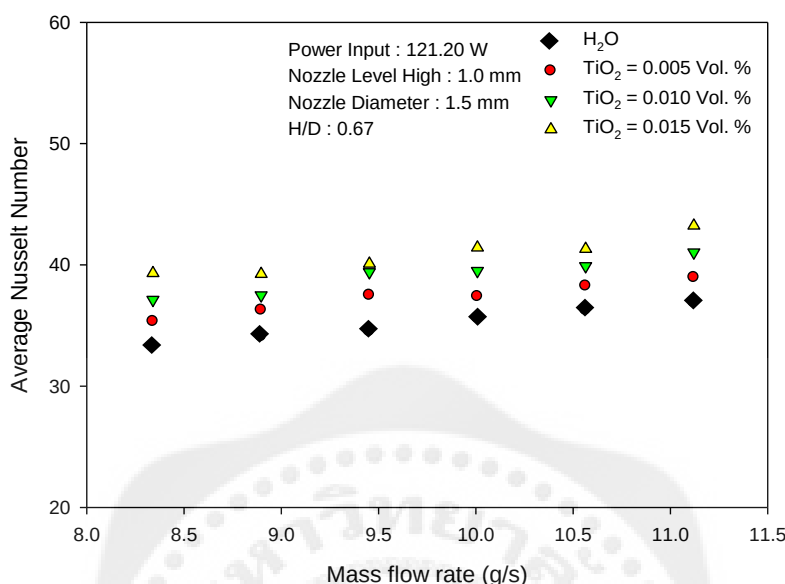


ภาพประกอบ 46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และสารทำงานต่าง ๆ และอธิบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว

ภาพประกอบ 46 แสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล ของอธิบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว โดยสารทำงานได้แก่ น้ำ และของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ 0.010 เปอร์เซ็นต์ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์ โดยข้อมูลพื้นฐานสำหรับการคำนวณใช้ค่าเฉลี่ยจากการวัด 3 ครั้งจากกราฟพบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลเชิงมวลสูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อการไหลของของไหลสูงขึ้น อัตราการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของของไหล ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบสารทำงาน ได้แก่ น้ำ และของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ 0.010 เปอร์เซ็นต์ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์ พบว่าสารทำงานของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.015 เปอร์เซ็นต์มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงที่สุดตลอดช่วงการทดลอง และของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์ 0.005 เปอร์เซ็นต์ สูงขึ้นตามลำดับ และน้ำให้ค่าต่ำที่สุด

ผลของความเข้มข้นของของไหลนาโนที่มีต่อค่าเลขนัสเซลล์

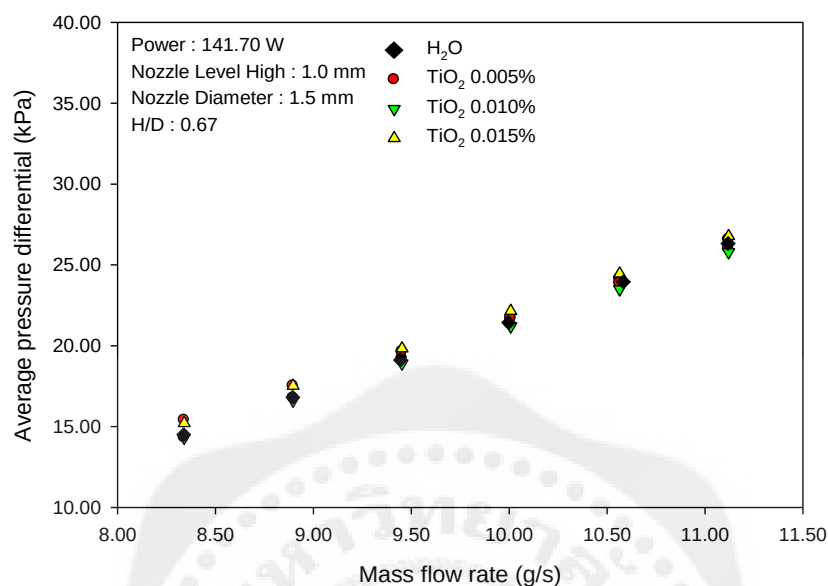


ภาพประกอบ 47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และสารทำงานต่าง ๆ และครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว

ภาพประกอบ 47 แสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล ของครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว โดยสารทำงานได้แก่ น้ำ และของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ 0.010 เปอร์เซ็นต์ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์ โดยข้อมูลพื้นฐานสำหรับการคำนวณใช้ค่าเฉลี่ยจากการวัด 3 ครั้ง จากกราฟพบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลเชิงมวลสูงขึ้นค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อการไหลของของไหลสูงขึ้น อัตราการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของของไหล ดังนั้นค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ยจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบสารทำงาน ได้แก่ น้ำ และของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ 0.010 เปอร์เซ็นต์ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์ พบว่าสารทำงานของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.015 เปอร์เซ็นต์มีค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ยสูงที่สุดตลอดช่วงการทดลอง และของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์ 0.005 เปอร์เซ็นต์ ลดลงตามลำดับ และน้ำให้ค่าต่ำที่สุด

ผลของความเข้มข้นของของไหลนาโนที่มีต่อความดันตกคร่อม

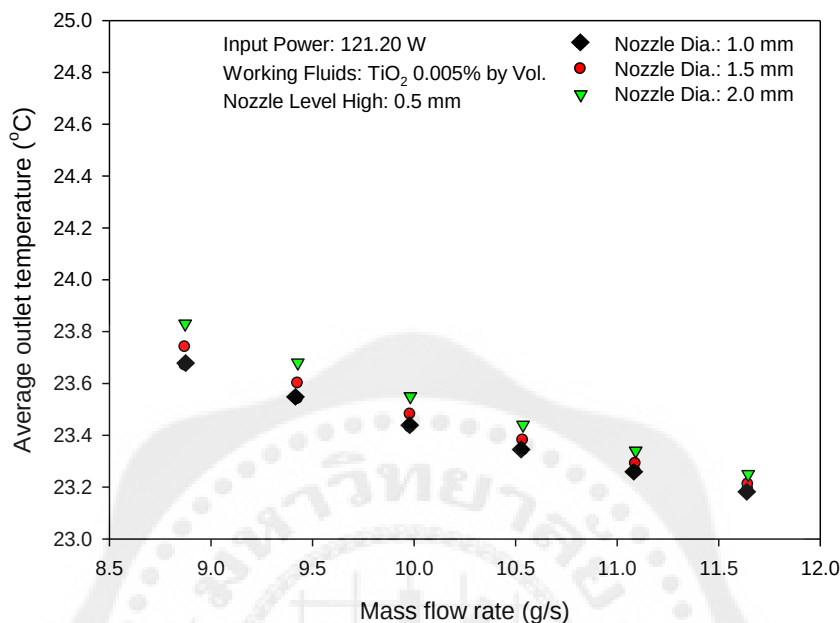


ภาพประกอบ 48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันตกคร่อมเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และสารทำงานต่าง ๆ และครีกระบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจั่ว

ภาพประกอบ 48 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล ของครีกระบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจั่วโดยสารทำงานได้แก่ น้ำ และของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ 0.010 เปอร์เซ็นต์ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์โดยข้อมูลพื้นฐานจากการวัดที่ทางออก 1 จุด และเฉลี่ยจากการวัด 3 ครั้งจากกราฟพบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลเชิงมวลสูงขึ้นค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลสูงขึ้น ดังนั้นค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ยจึงมีแนวโน้มเพิ่ม และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบสารทำงาน ได้แก่ น้ำ และของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ 0.010 เปอร์เซ็นต์ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์ พบว่าแม้เปลี่ยนแปลงสารทำงานแต่ค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ยมีค่าเกาะกลุ่ม และเพิ่มขึ้นตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น

3.2 ผลกระทบจากการทดลองของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดที่มีต่ออุณหภูมิทางออก

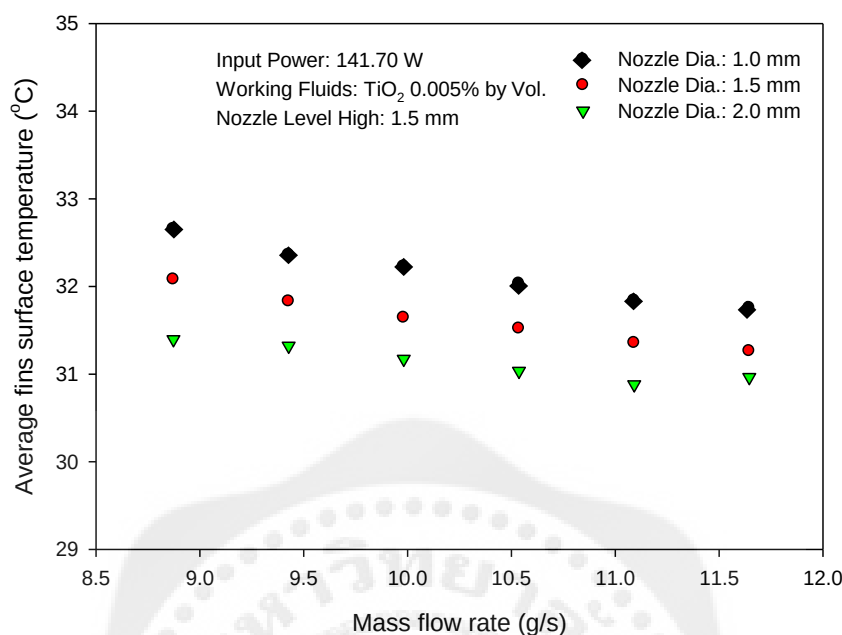


ภาพประกอบ 49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ และครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว

ภาพประกอบ 49 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล ของครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว ขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 มิลลิเมตร 1.5 มิลลิเมตร และ 2.0 มิลลิเมตร จากกราฟพบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลเชิงมวลสูงขึ้นค่าอุณหภูมิทางออกเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลสูงขึ้นส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้นดังความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิทางออกเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลง และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว ขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 มิลลิเมตร 1.5 มิลลิเมตร และ 2.0 มิลลิเมตร พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 1.0 มิลลิเมตรให้ค่าอุณหภูมิทางออกเฉลี่ยสูงที่สุด และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และ 2.0 มิลลิเมตร ลดลงมา

ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดที่มีต่ออุณหภูมิผิวครีป

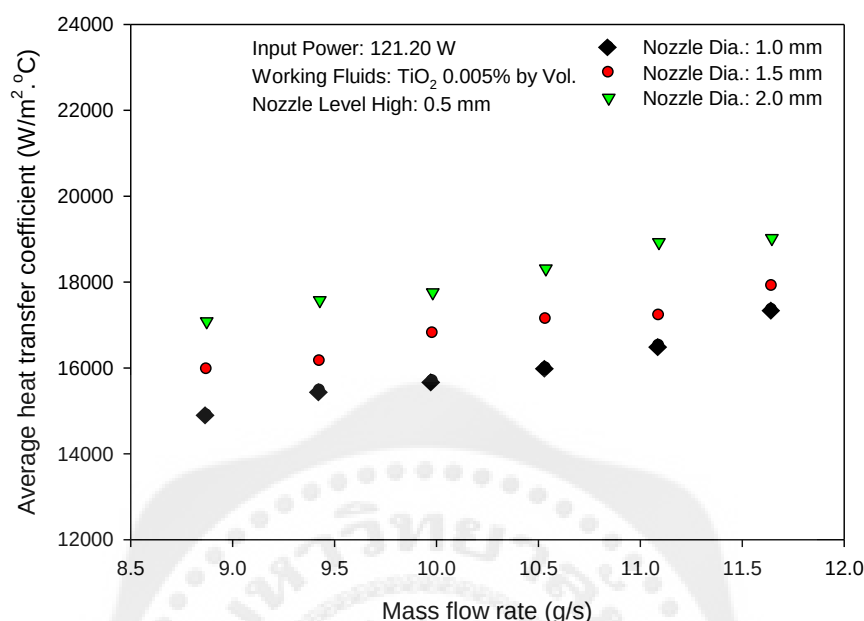


ภาพประกอบ 50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิผิวครีปเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ และครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว

ภาพประกอบ 50 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิผิวครีปเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล ของครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋วขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 มิลลิเมตร 1.5 มิลลิเมตร และ 2.0 มิลลิเมตร จากกราฟพบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลเชิงมวลสูงขึ้นค่าอุณหภูมิผิวครีปเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลสูงขึ้นส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น ดังความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิผิวครีปเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลง และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาครีประบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋วขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 มิลลิเมตร 1.5 มิลลิเมตร และ 2.0 มิลลิเมตร พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 1.0 มิลลิเมตรให้ค่าอุณหภูมิทางออกเฉลี่ยสูงที่สุด และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และ 2.0 มิลลิเมตร ลดลงมา

ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดที่มีต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

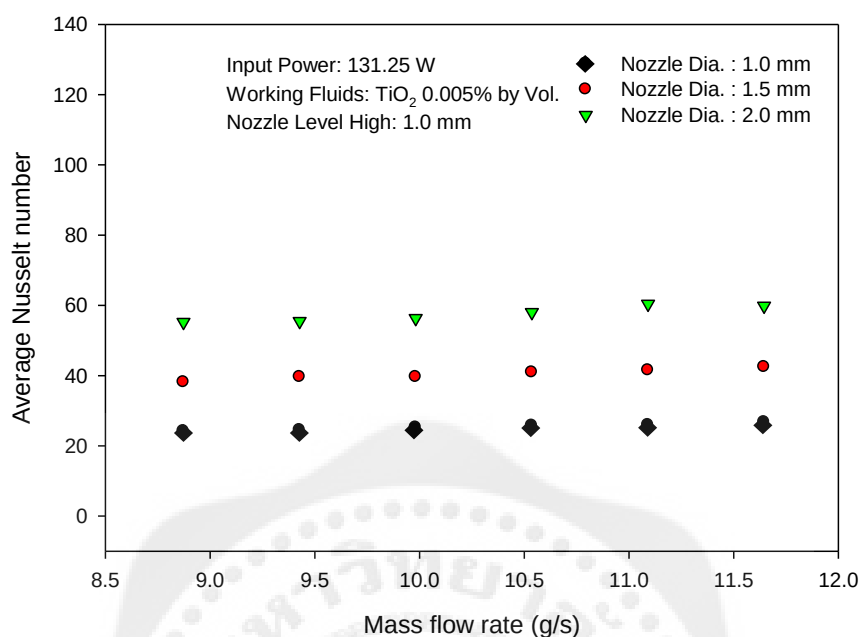


ภาพประกอบ 51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ และอธิบายความหมายของขนาดเล็กจิ๋ว

ภาพประกอบ 51 แสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล ตำแหน่งหัวฉีด 0.5 มิลลิเมตร สารทำงานได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ป้อน 121.20 วัตต์ ขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 มิลลิเมตร 1.5 มิลลิเมตร และ 2.0 มิลลิเมตร จากกราฟพบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลเชิงมวลสูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลสูงขึ้นส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น ดังความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดจาก 1.0 มิลลิเมตร 1.5 มิลลิเมตร และ 2.0 มิลลิเมตร สารทำงาน ได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่งหัวฉีด 0.5 มิลลิเมตร และพลังงานที่ป้อน 121.20 วัตต์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่ม และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตรให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงสุด และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และ 1.0 มิลลิเมตร ลดลงตามลำดับ

ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดที่มีต่อค่าเลขนัสเซิลด์

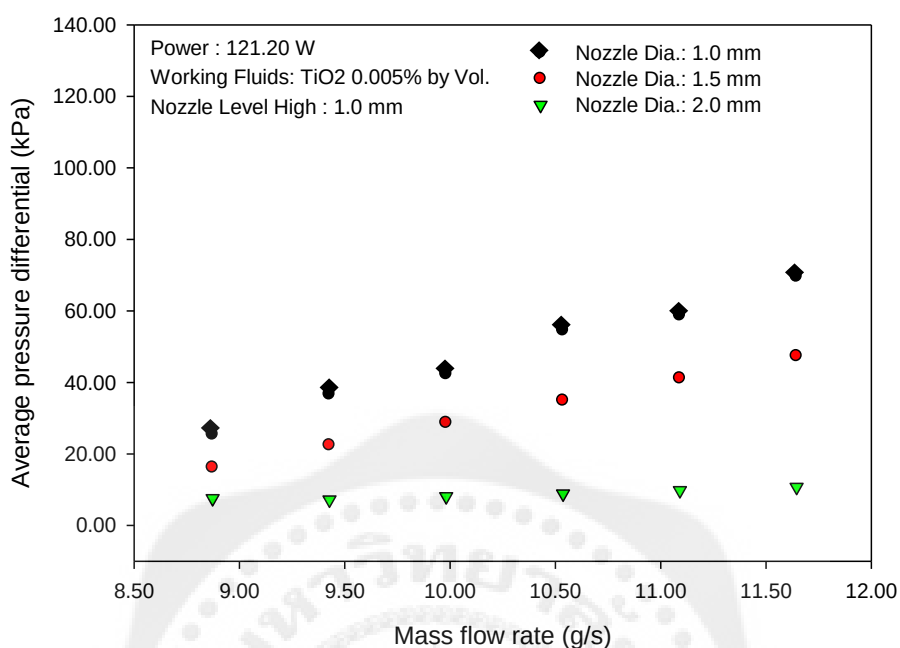


ภาพประกอบ 52 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าเลขนัสเซิลด์เฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ และอธิบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว

ภาพประกอบ 52 แสดงความสัมพันธ์ของค่าเลขนัสเซิลด์เฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล ตำแหน่งหัวฉีด 1.0 มิลลิเมตร สารทำงานได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ป้อน 131.25 วัตต์ ขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 มิลลิเมตร 1.5 มิลลิเมตร และ 2.0 มิลลิเมตร จากกราฟพบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลเชิงมวลสูงขึ้นค่าเลขนัสเซิลด์เฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลสูงขึ้นส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น ดังความสัมพันธ์กับค่าเลขนัสเซิลด์เฉลี่ย และตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดจาก 1.0 มิลลิเมตร 1.5 มิลลิเมตร และ 2.0 มิลลิเมตร สารทำงาน ได้แก่ น้ำ และของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่งหัวฉีด 1.0 มิลลิเมตร และพลังงานที่ป้อน 131.25 วัตต์ พบว่าค่าเลขนัสเซิลด์เฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มอย่างช้า ๆ ตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตรให้ค่าเลขนัสเซิลด์เฉลี่ยสูงสุด และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และ 1.0 มิลลิเมตร ลดลงตามลำดับ

ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดที่มีต่อความดันตกคร่อม

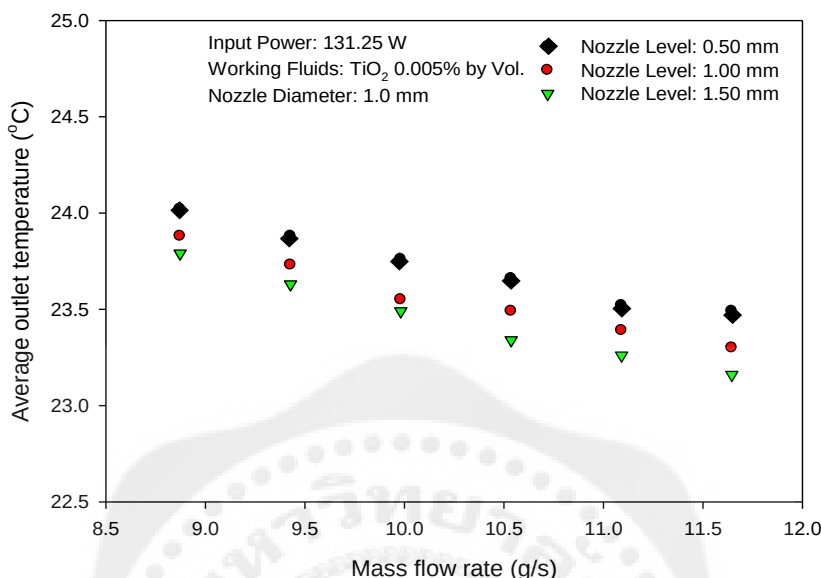


ภาพประกอบ 53 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันตกคร่อมเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ และอธิบายความรบกวนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว

ภาพประกอบ 53 แสดงความสัมพันธ์ของความดันตกคร่อมเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล ตำแหน่งหัวฉีด 1.0 มิลลิเมตร สารทำงานได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ป้อน 121.20 วัตต์ ขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 มิลลิเมตร จากกราฟพบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลเชิงมวลสูงขึ้นค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลสูงขึ้นส่งผลให้ความเร็วภายในหัวฉีดสูงมากขึ้นและเกิดการไหลปั่นป่วนภายในหัวมากขึ้นเช่นกัน ดังความสัมพันธ์กับค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดจาก 1.0 มิลลิเมตร 1.5 มิลลิเมตร และ 2.0 มิลลิเมตร สารทำงาน ได้แก่ ไหลนาโนไททาเนียม ความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่งหัวฉีด 1.0 มิลลิเมตร และพลังงานที่ป้อน 121.20 วัตต์ พบว่าค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 1.0 มิลลิเมตรให้ค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ยสูงสุด และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และ 2.0 มิลลิเมตร ลดลงตามลำดับ

3.3 พิจารณาผลกระทบจากการทดลองของระยะห่างของตำแหน่งหัวฉีด ผลของระยะห่างของตำแหน่งหัวฉีดที่มีต่ออุณหภูมิทางออก

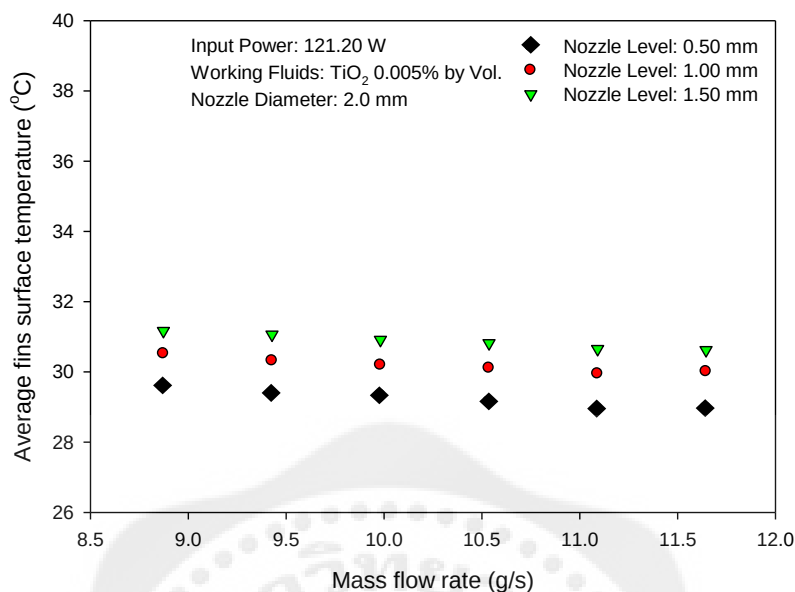


ภาพประกอบ 54 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และตำแหน่งหัวฉีดที่ระยะห่างต่าง ๆ และอธิบายความรบกวนแบบช่องขนาดเล็ก

ภาพประกอบ 54 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิทางออกเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล ขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 มิลลิเมตร สารทำงานได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ป้อน 131.25 วัตต์ ตำแหน่งหัวฉีด 0.5 มิลลิเมตร 1.0 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร จากกราฟพบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลเชิงมวลสูงขึ้นค่าอุณหภูมิทางออกเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลสูงขึ้นส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้นดังความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิทางออกเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลง และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตำแหน่งหัวฉีด 0.5 มิลลิเมตร 1.0 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร สารทำงาน ได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียม ความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 1.0 มิลลิเมตร และพลังงานที่ป้อน 131.25 วัตต์ พบว่าค่าอุณหภูมิทางออกเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลง และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น และตำแหน่งหัวฉีด 0.5 มิลลิเมตร ให้ค่าอุณหภูมิทางออกเฉลี่ยสูงสุด และตำแหน่งหัวฉีด 1.0 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร ลดลงตามลำดับ มีค่าแตกต่างของค่าอุณหภูมิทางออกเฉลี่ยในช่วงเริ่มต้นจะน้อยสุด และเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และมีค่าแตกต่างมากที่สุดที่จุดสุดท้ายโดยมีลักษณะคล้ายคลึงกันทั้งหมดแม้เปลี่ยนแปลงสารทำงาน

ผลของระยะห่างของตำแหน่งหัวฉีดที่มีต่ออุณหภูมิผิวครีบ

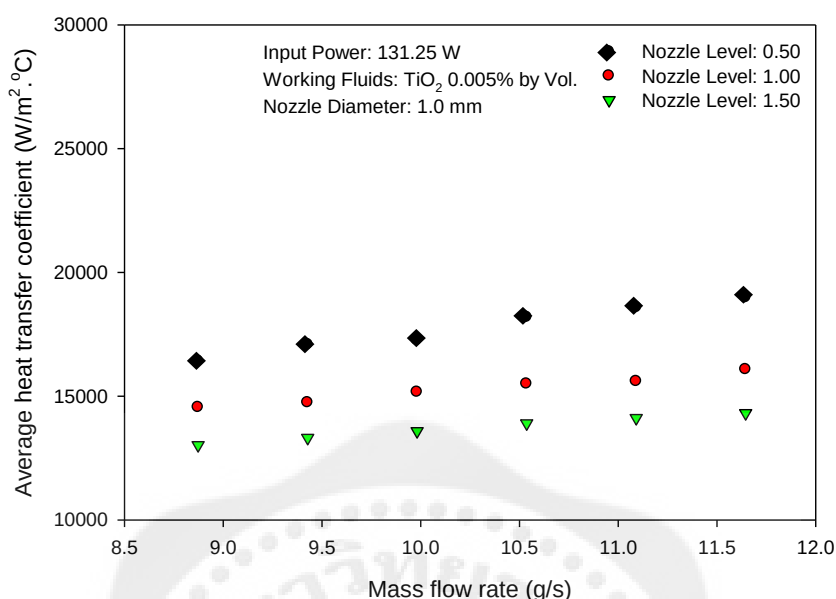


ภาพประกอบ 55 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิผิวครีบเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และตำแหน่งหัวฉีดที่ระยะห่างต่าง ๆ และอธิบายความร่อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว

ภาพประกอบ 55 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิผิวครีบเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล ขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตร สารทำงานได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ป้อน 121.20 วัตต์ ตำแหน่งหัวฉีด 0.5 มิลลิเมตร 1.0 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร จากกราฟพบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลเชิงมวลสูงขึ้นค่าอุณหภูมิผิวครีบเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงอย่างช้า ๆ และชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลสูงขึ้นส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้นดังความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิผิวครีบเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงและชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตำแหน่งหัวฉีด 0.5 มิลลิเมตร 1.0 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร สารทำงาน ได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียม ความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร และพลังงานที่ป้อน 121.20 วัตต์ พบว่าค่าอุณหภูมิผิวครีบเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลง และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น และตำแหน่งหัวฉีด 0.5 มิลลิเมตร ให้ค่าอุณหภูมิผิวครีบเฉลี่ยต่ำที่สุด และตำแหน่งหัวฉีด 1.0 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร สูงขึ้นตามลำดับ

ผลของระยะห่างของตำแหน่งหัวฉีดที่มีต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

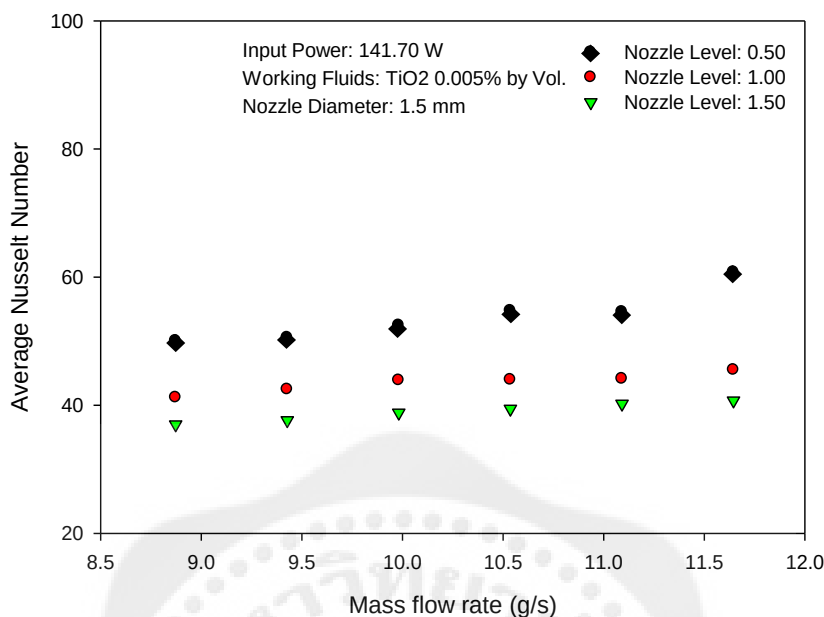


ภาพประกอบ 56 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และตำแหน่งหัวฉีดที่ระยะห่างต่าง ๆ และอธิบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กรู้

ภาพประกอบ 56 แสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล ขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 มิลลิเมตร สารทำงานได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ป้อน 131.25 วัตต์ ตำแหน่งหัวฉีด 0.5 มิลลิเมตร 1.0 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร จากกราฟพบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลเชิงมวลสูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลสูงขึ้นส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้นดังความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตำแหน่งหัวฉีด 0.5 มิลลิเมตร 1.0 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร สารทำงาน ได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียม ความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 1.0 มิลลิเมตร และพลังงานที่ป้อน 131.25 วัตต์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น และตำแหน่งหัวฉีด 0.5 มิลลิเมตรให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงที่สุด และตำแหน่งหัวฉีด 1.0 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร ลดลงตามลำดับ แนวโน้มการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมีลักษณะคล้ายคลึงกันทั้งหมดแม้เปลี่ยนแปลงสารทำงาน โดยตำแหน่งหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยต่ำที่สุด

ผลของระยะห่างของตำแหน่งหัวฉีดที่มีต่อค่าเลขนัสเซิลต์

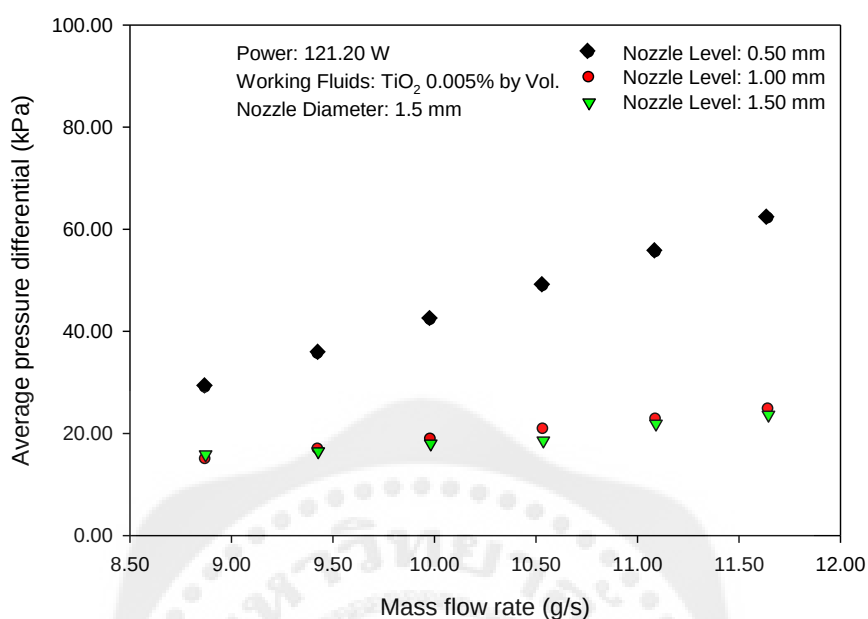


ภาพประกอบ 57 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และตำแหน่งหัวฉีดที่ระยะห่างต่าง ๆ และอธิบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว

ภาพประกอบ 57 แสดงความสัมพันธ์ของค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล ขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร สารทำงานได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ป้อน 141.70 วัตต์ ตำแหน่งหัวฉีด 0.5 มิลลิเมตร 1.0 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร จากกราฟพบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลเชิงมวลสูงขึ้นค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลสูงขึ้นส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้นดังความสัมพันธ์กับค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตำแหน่งหัวฉีด 0.5 มิลลิเมตร 1.0 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร สารทำงาน ได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และพลังงานที่ป้อน 141.70 วัตต์ พบว่าค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น และตำแหน่งหัวฉีด 0.5 มิลลิเมตรให้ค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยสูงที่สุด และตำแหน่งหัวฉีด 1.0 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร ลดลงตามลำดับ แนวโน้มการลดลงของค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยมีลักษณะคล้ายคลึงกันทั้งหมดแม้เปลี่ยนแปลงสารทำงาน โดยตำแหน่งหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร มีค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยต่ำที่สุด

ผลของระยะห่างของตำแหน่งหัวฉีดที่มีต่อความดันตกคร่อม



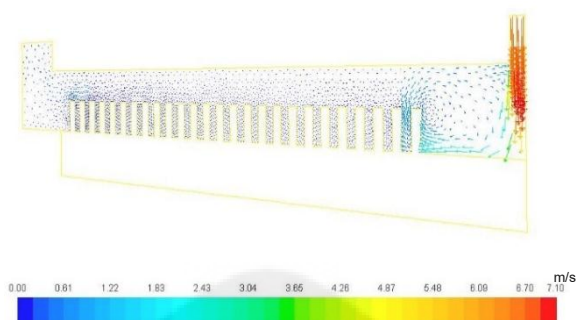
ภาพประกอบ 58 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล และตำแหน่งหัวฉีดที่ระยะห่างต่าง ๆ และอธิบายความรบกวนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว

ภาพประกอบ 58 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ย และค่าอัตราการไหลเชิงมวล ขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร สารทำงานได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ป้อน 121.20 วัตต์ ตำแหน่งหัวฉีด 0.5 มิลลิเมตร 1.0 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร จากกราฟพบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลเชิงมวลสูงขึ้น ค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ย มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการไหลเชิงมวลของไหลสูงขึ้นส่งผลให้ความเร็วภายในหัวฉีดสูงมากขึ้นและเกิดการไหลปั่นป่วนภายในหัวมากขึ้นเช่นกัน ดังความสัมพันธ์กับค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น

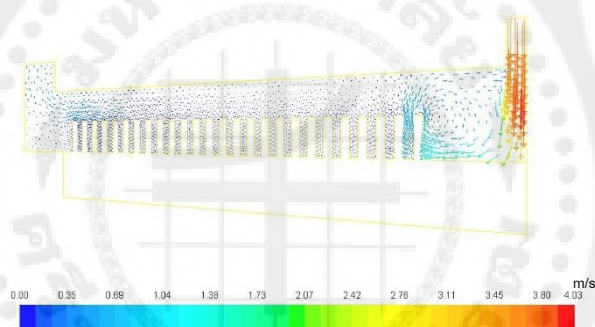
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตำแหน่งหัวฉีด 0.5 มิลลิเมตร 1.0 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร สารทำงาน ได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร พลังงานที่ป้อน 121.20 วัตต์ พบว่าค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ย มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และชัดเจนตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่เพิ่มขึ้น และตำแหน่งหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตรให้ค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ยต่ำที่สุด และตำแหน่งหัวฉีด 1.0 มิลลิเมตร และ 0.5 มิลลิเมตร เพิ่มขึ้นตามลำดับ ตำแหน่งหัวฉีด 0.5 มิลลิเมตร มีค่าความดันตกคร่อมเฉลี่ยสูงที่สุด

4 ผลกระทบของแบบจำลองคณิตศาสตร์ของครีกระบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็ก

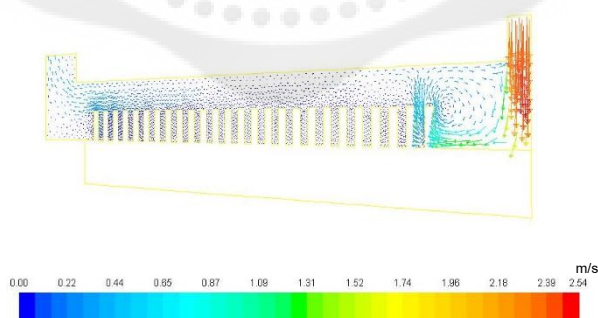
4.1 ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดที่มีต่อความเร็วของของไหล



ก. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร



ข. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร

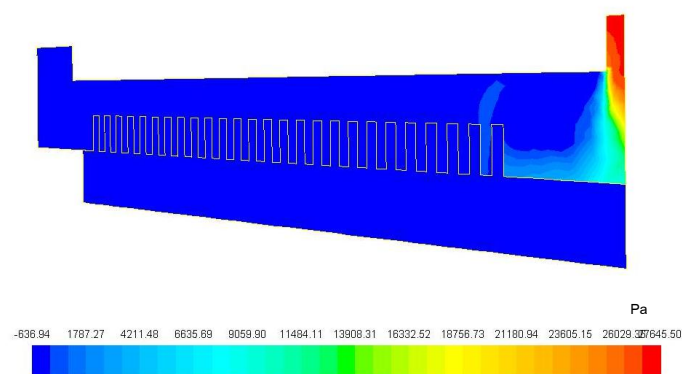


ค. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.5 มิลลิเมตร

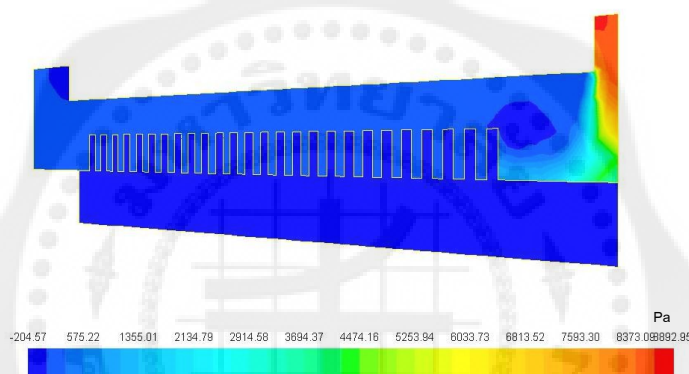
ภาพประกอบ 59 แสดงการแพร่กระจายของเวกเตอร์ความเร็วของของไหลที่สภาวะอัตราการไหล 11.65 กรัมต่อนาที TiO_2 $\phi = 0.015$ % ตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ

ภาพประกอบ 59 แสดงคอนทัวร์การแพร่กระจายของเวกเตอร์ความเร็วของของไหลที่สภาวะ อัตราการไหล 11.65 กรัมต่อวินาที อุณหภูมิทางเข้า 20.0 องศาเซลเซียส สารทำงานได้แก่ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.015 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ป้อน 162.75 วัตต์ ตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร และขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร 2.0 มิลลิเมตร และ 2.5 มิลลิเมตร จากผลของการศึกษาโดยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์พบว่าคอนทัวร์การแพร่กระจายของเวกเตอร์ความเร็วของของไหลโดยค่าเวกเตอร์ความเร็วของของไหลมีค่าสูงสุดภายในหัวฉีด และค่าเวกเตอร์ความเร็วของของไหลลดลงเมื่อของไหลเข้าสู่ห้องฉีดกระทบเมื่อกระทบกับกับพื้นผิวจะเปลี่ยนทิศทางไหลไปตามแนวรัศมี และกระทบกับครีบบระบายความร้อนทำให้ของไหลบางส่วนไหลเชิดขึ้น แล้วไปกระทบผนังส่วนบนของห้องฉีดกระทบทำให้ของไหลแบ่งเป็นสองส่วนโดยส่วนหนึ่งยังคงไหลตามแนวรัศมีไปยังทางออกตามปกติ และอีกส่วนหนึ่งไหลวนกลับไปรวมกับของไหลจากหัวฉีด และพบว่าพบว่าเวกเตอร์ความเร็วของของไหลสูงที่สุด 7.10 เมตรต่อวินาที ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร 4.03 เมตรต่อวินาที ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร และ 2.54 เมตรต่อวินาที ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.5 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าต่ำที่สุด

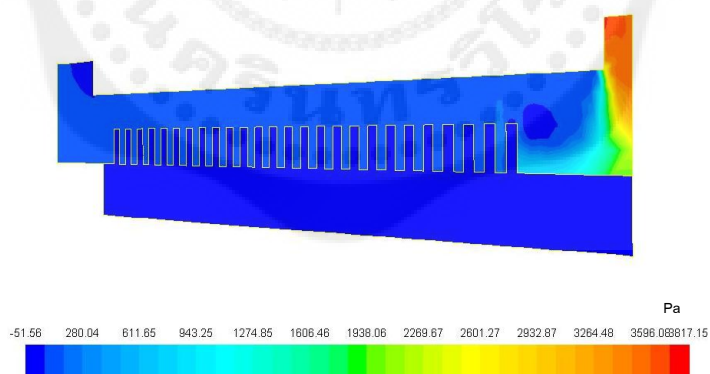
4.2 ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดที่มีต่อความดัน



ก. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร



ข. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร



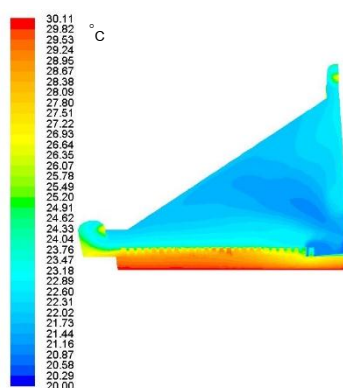
ค. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.5 มิลลิเมตร

ภาพประกอบ 60 แสดงการแพร่กระจายของความดันรวมที่สภาวะอัตราการไหล 11.65 กรัมต่อวินาที $\text{TiO}_2 \phi = 0.015$ เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ

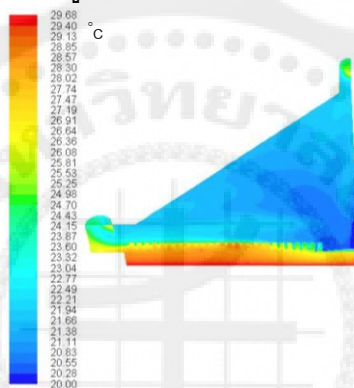
ภาพประกอบ 60 แสดงการแพร่กระจายของความดันรวมที่สภาวะอัตราการไหล 11.65 กรัมต่อวินาที อุณหภูมิทางเข้า 20.0 องศาเซลเซียส สารทำงานได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียม ความเข้มข้น 0.015 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ป้อน 162.75 วัตต์ ตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร และ ขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร 2.0 มิลลิเมตร และ 2.5 มิลลิเมตร จากผลของการศึกษา โดยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์พบว่าคอนทัวร์การแพร่กระจายของความดันรวมโดยค่าความดันรวม มีค่าสูงสุดภายในหัวฉีด และความดันรวมลดลงเมื่อของไหลเข้าสู่ห้องฉีดกระทบ เมื่อของไหลไหล กระทบครีประบายความร้อนและมีบางส่วนไหลเซดขึ้นและถูกอิทธิพลของเวนจูรีดูดให้ไหลไปรวมกับ ของไหลจากหัวฉีดดังภาพคอนทัวร์บริเวณนี้จะแสดงค่าความดันที่ค่าเป็นลบ และพบว่าพบว่าค่า ความดันรวมสูงที่สุด 26,745.53 ปาสคาล ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร 9,892.96 ปาสคาล ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร และ 3,104.00 ปาสคาล ที่ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางหัวฉีด 2.5 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าต่ำที่สุด



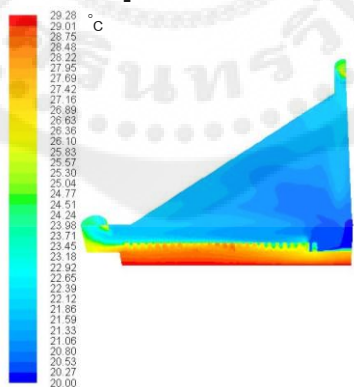
4.3 ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดที่มีต่ออุณหภูมิ



ก. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร

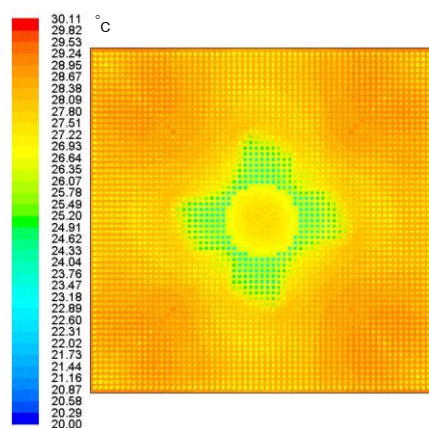


ข. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร

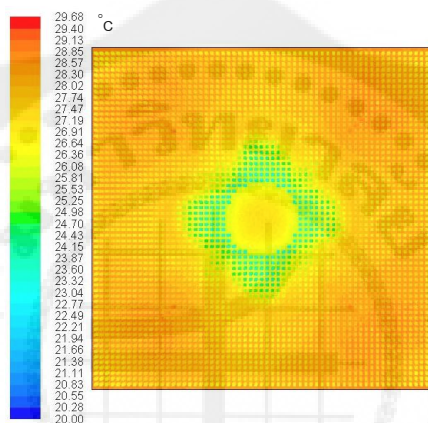


ค. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.5 มิลลิเมตร

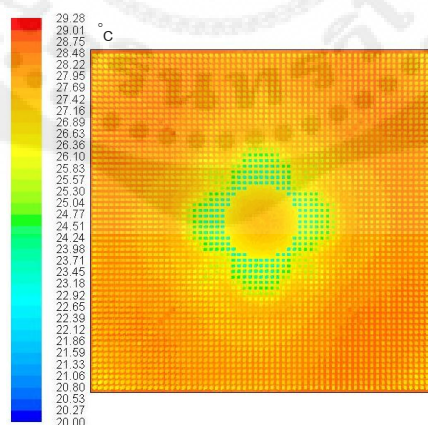
ภาพประกอบ 61 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิโดยรวม ที่สภาวะอัตราการไหล 11.65 กรัมต่อวินาที $\text{TiO}_2 \phi = 0.015$ เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ



ก. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร

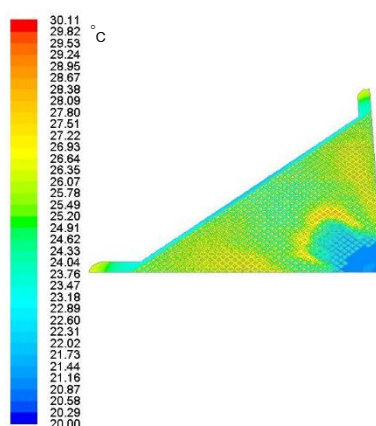


ข. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร

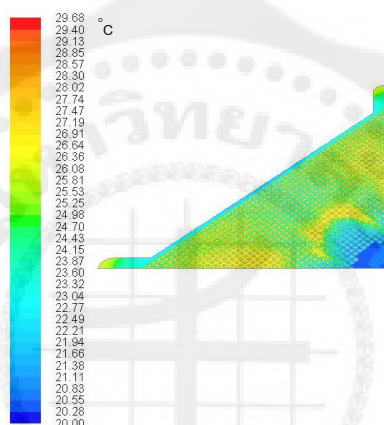


ค. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.5 มิลลิเมตร

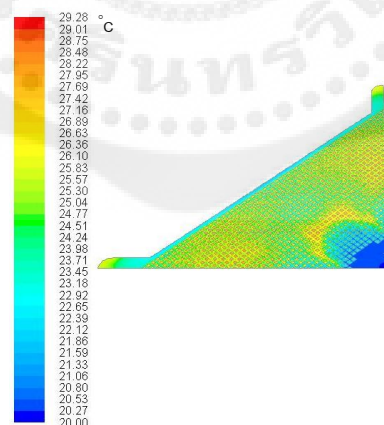
ภาพประกอบ 62 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิของครีกระบายความร้อนที่สภาวะอัตราการไหล 11.65 กรัมต่อวินาที $\text{TiO}_2 \phi = 0.015$ เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ



ก. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร



ข. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร



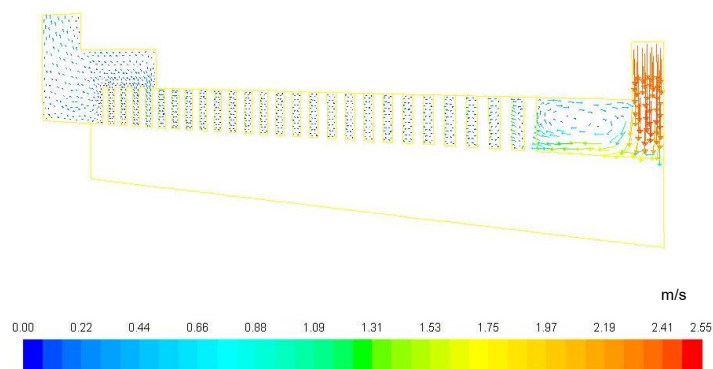
ค. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.5 มิลลิเมตร

ภาพประกอบ 63 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิที่สภาวะอัตราการไหล 11.65 กรัมต่อวินาที TiO_2
 $\phi = 0.015$ เปอร์เซนต์ตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ

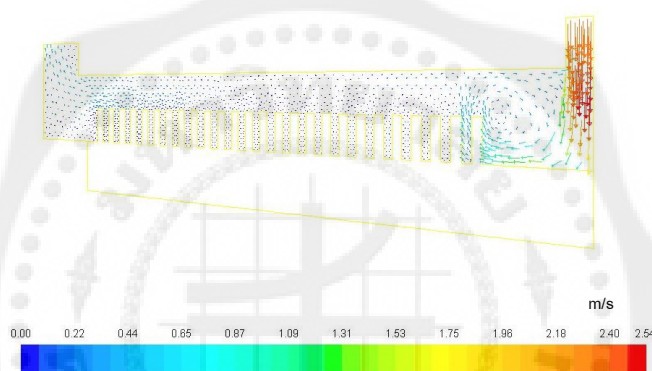
ภาพประกอบ 61 ถึง 63 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิที่สภาวะ อัตราการไหล 11.65 กรัมต่อวินาที อุณหภูมิทางเข้า 20.0 องศาเซลเซียส สารทำงานได้แก่ ของไหล นาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.015 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ป้อน 162.75 วัตต์ ตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร และขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร 2.0 มิลลิเมตร และ 2.5 มิลลิเมตร จาก ผลของการศึกษาโดยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์พบว่าคอนทักต์การแพร่กระจายอุณหภูมิต่ำที่สุดที่ จุดของไหลฉีดกระทบ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นในลักษณะวงกลมแล้วกระจายเป็นร่องตามร่องไหลของครีปร ะบายความร้อน และบางส่วนไหลข้ามครีปรในช่องว่างของห้องฉีดกระทบและหลังจากนั้นอุณหภูมิจะ เพิ่มขึ้นอย่างช้าจนกระทั่งถึงทางขาออก

ภาพประกอบ 59 แสดงคอนทักต์การแพร่กระจายของเวกเตอร์ความเร็วของของไหลพบว่า ของไหลมีการไหลวนกลับเพิ่มขึ้นตามระยะหัวฉีดที่สูงขึ้นเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร 2.0 มิลลิเมตร และ 2.5 มิลลิเมตร ที่สภาวะ อัตราการไหล 11.65 กรัมต่อวินาที อุณหภูมิทางเข้า 20.0 องศาเซลเซียส สารทำงาน ได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียม ความเข้มข้น 0.015 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ป้อน 162.75 วัตต์ พบว่าค่าอุณหภูมิฐานครีปรสูงสุด 29.65 องศาเซลเซียส ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร 29.53 องศาเซลเซียส ที่ขนาดเส้น ผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร และ 29.11 องศาเซลเซียส ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.5 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าต่ำที่สุด

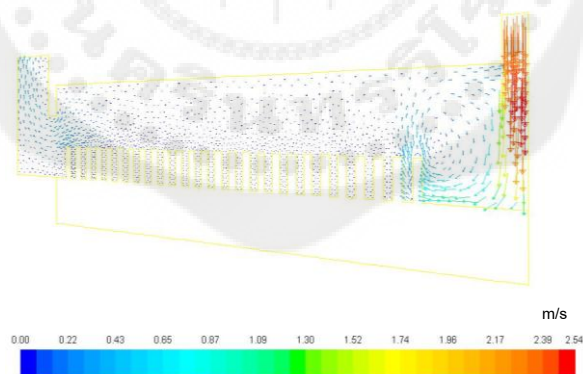
4.4 ผลของระยะห่างของหัวฉีดที่มีต่อความเร็วของของไหล



ก. ระยะห่างของหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร



ข. ระยะห่างของหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร

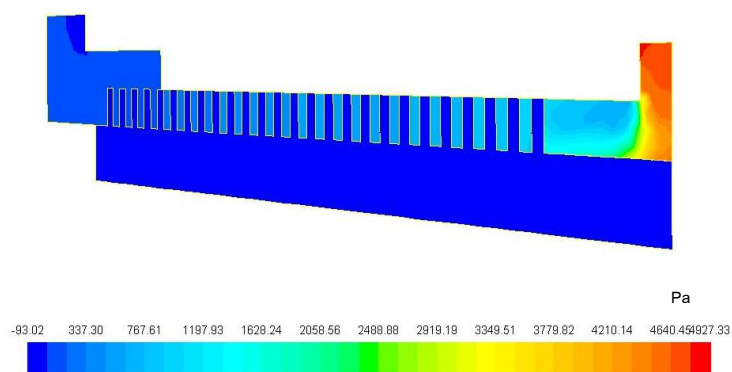


ค. ระยะห่างของหัวฉีด 6.0 มิลลิเมตร

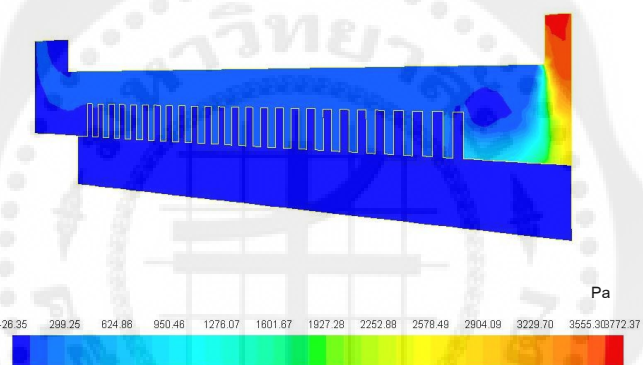
ภาพประกอบ 64 แสดงการแพร่กระจายของเวกเตอร์ความเร็วของของไหลที่หัวฉีดที่สภาวะ อัตราการไหล 11.65 กรัมต่อวินาที TiO_2 $\phi = 0.015$ เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง หัวฉีด 2.5 มิลลิเมตร และตำแหน่งหัวฉีดต่าง ๆ

ภาพประกอบ 64 แสดงคอนทัวร์การแพร่กระจายของเวกเตอร์ความเร็วของของไหลที่สภาวะ อัตราการไหล 11.65 กรัมต่อวินาที อุณหภูมิทางเข้า 20.0 องศาเซลเซียส สารทำงานได้แก่ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.015 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ป้อน 162.75 วัตต์ ขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร ตำแหน่งหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร 4.0 มิลลิเมตร และ 6.0 มิลลิเมตร จากผลของการศึกษาโดยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์พบว่าคอนทัวร์การแพร่กระจายของเวกเตอร์ความเร็วของของไหลโดยค่าเวกเตอร์ความเร็วของของไหลมีค่าสูงสุดภายในหัวฉีด และค่าเวกเตอร์ความเร็วของของไหลลดลงเมื่อของไหลเข้าสู่ห้องฉีดกระทบเมื่อกระทบกับกับพื้นผิวจะเปลี่ยนทิศทางไหลไปตามแนวรัศมีและกระทบกับครีบรรยายความร้อนทำให้ของไหลบางส่วนไหลเซดขึ้นแล้วไปกระทบผนังส่วนบนของห้องหล่อเย็นทำให้ของไหลแบ่งเป็นสองส่วนโดยส่วนหนึ่งยังคงไหลตามแนวรัศมีไปยังทางออกตามปกติ และอีกส่วนหนึ่งไหลวนกลับไปรวมกับของไหลจากหัวฉีด และพบว่าพบว่าเวกเตอร์ความเร็วของของไหลสูงที่สุด 2.77 เมตรต่อวินาที ตำแหน่งหัวฉีด 6.0 มิลลิเมตร 2.54 เมตรต่อวินาที ตำแหน่งหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร และ 2.54 เมตรต่อวินาที ที่ตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าต่ำที่สุด โดยภาพรวมแล้วถือได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก

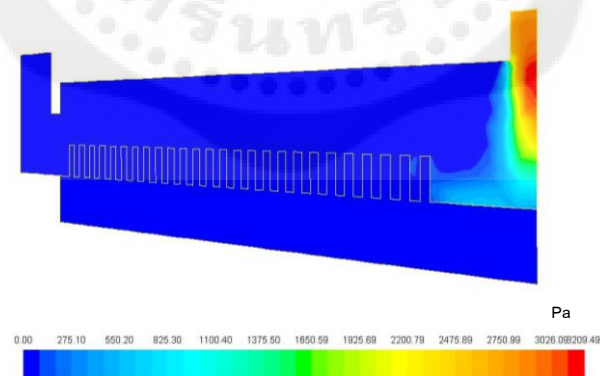
4.5 ผลของระยะห่างของหัวฉีดที่มีต่อความดัน



ก. ระยะห่างของหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร



ข. ระยะห่างของหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร



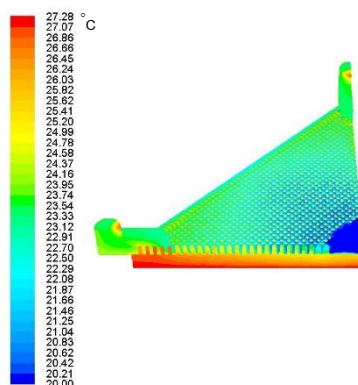
ค. ระยะห่างของหัวฉีด 6.0 มิลลิเมตร

ภาพประกอบ 65 แสดงการแพร่กระจายของความดันรวมที่สภาวะอัตราการไหล 11.65 กรัมต่อวินาที $\text{TiO}_2 \phi = 0.015$ เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.5 มิลลิเมตร และตำแหน่งหัวฉีดต่าง ๆ

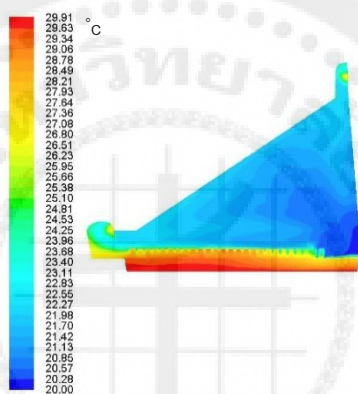
ภาพประกอบ 65 แสดงคอนทัวร์การแพร่กระจายของความดันรวมที่สภาวะอัตราไหล 11.65 กรัมต่อวินาที อุณหภูมิทางเข้า 20.0 องศาเซลเซียส สารทำงานได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.015 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ป้อน 162.75 วัตต์ ขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร ตำแหน่งหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร 4.0 มิลลิเมตร และ 16.0 มิลลิเมตร จากผลของการศึกษาโดยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์พบว่าคอนทัวร์การแพร่กระจายของความดันรวมโดยค่าความดันรวมมีค่าสูงสุดภายในหัวฉีด และความดันรวมลดลงเมื่อของไหลเข้าสู่ห้องฉีดกระทบ เมื่อของไหลไหลกระทบครีประบายความร้อนและมีบางส่วนไหลเซดขึ้นและถูกอิทธิพลของเวนจูรีดูดให้ไหลไปรวมกับของไหลจากหัวฉีดดังภาพคอนทัวร์บริเวณนี้จะแสดงค่าความดันที่ค่าเป็นลบ และพบว่าพบว่าค่าความดันรวมสูงที่สุด 4,828.13 ปาสคาล ที่ตำแหน่งหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร 3,772.30 ปาสคาล ที่ตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร และ 3,497.17 ปาสคาล ที่ตำแหน่งหัวฉีด 6.0 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าต่ำที่สุด



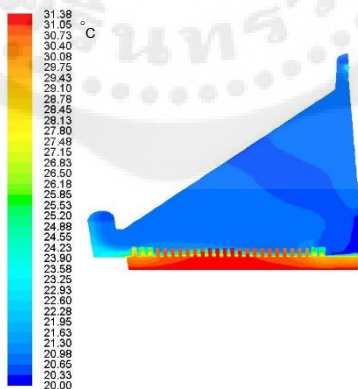
4.6 ผลของระยะห่างของหัวฉีดที่มีต่ออุณหภูมิ



ก. ระยะห่างของหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร

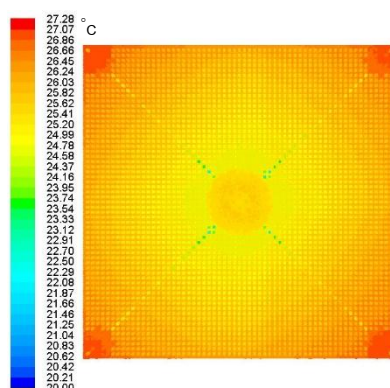


ข. ระยะห่างของหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร

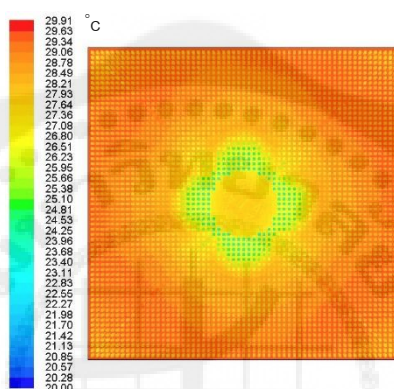


ค. ระยะห่างของหัวฉีด 6.0 มิลลิเมตร

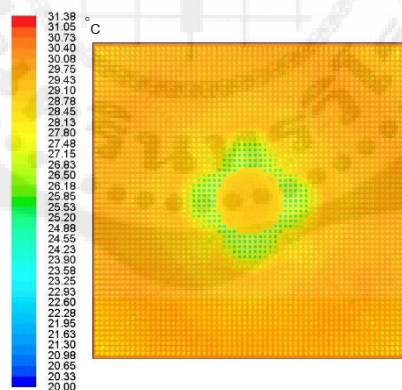
ภาพประกอบ 66 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิโดยรวมที่สภาวะอัตราการไหล 11.65 กรัมต่อวินาที $\text{TiO}_2 \phi = 0.015$ เปอร์เซนต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.5 มิลลิเมตร และตำแหน่งหัวฉีดต่าง ๆ



ก. ระยะห่างของหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร

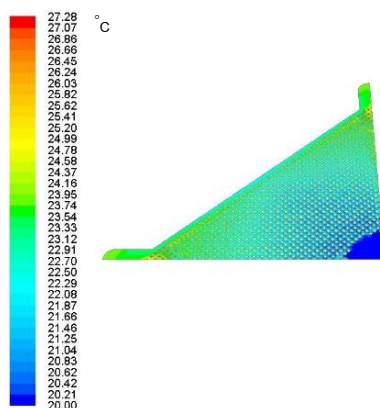


ข. ระยะห่างของหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร

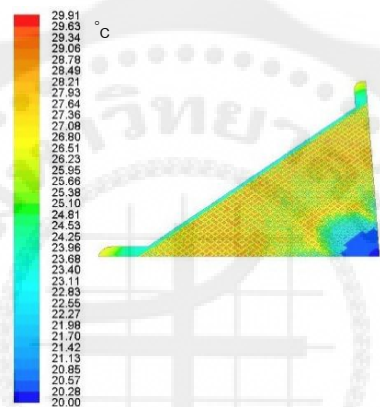


ค. ระยะห่างของหัวฉีด 6.0 มิลลิเมตร

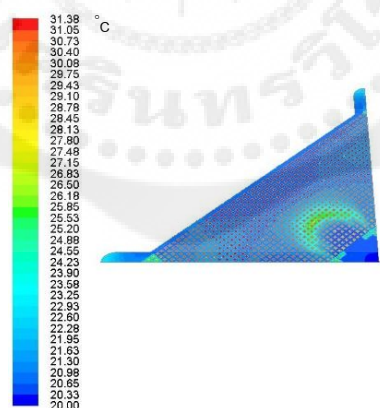
ภาพประกอบ 67 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิของครีประบายความร้อนที่สภาวะอัตราการไหล 11.65 กรัมต่อวินาที $\text{TiO}_2 \phi = 0.015$ เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.5 มิลลิเมตร และตำแหน่งหัวฉีดต่าง ๆ



ก. ระยะห่างของหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร



ข. ระยะห่างของหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร



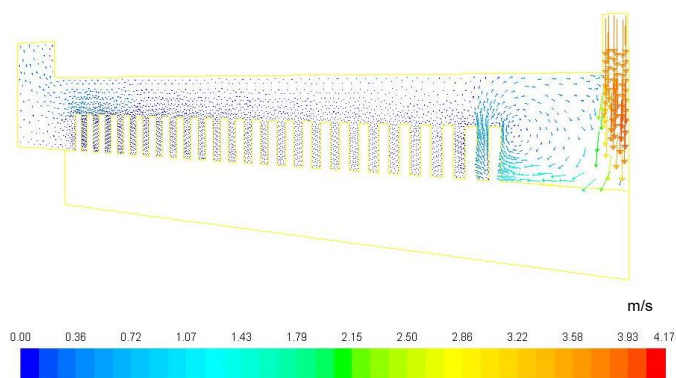
ค. ระยะห่างของหัวฉีด 6.0 มิลลิเมตร

ภาพประกอบ 68 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิที่ส่วนปลายของครีบริบายความร้อนที่สภาวะ อัตราการไหล 11.65 กรัมต่อวินาที TiO_2 $\phi = 0.015$ เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.5 มิลลิเมตร และตำแหน่งหัวฉีดต่าง ๆ

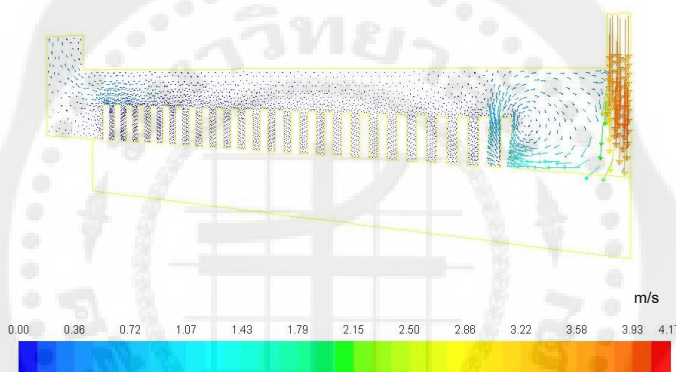
ภาพประกอบ 66 ถึง 68 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิที่สภาวะ อัตราการไหล 11.65 กรัมต่อวินาที อุณหภูมิทางเข้า 20.0 องศาเซลเซียส สารทำงานได้แก่ ของไหล นาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.015 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ป้อน 162.75 วัตต์ ขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร ตำแหน่งหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร 4.0 มิลลิเมตร และ 6.0 มิลลิเมตร จากผลของการศึกษาโดยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์พบว่าคอนทัวร์การแพร่กระจายอุณหภูมิต่ำที่สุดที่จุดของไหลฉีดกระทบ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นในลักษณะวงกลมแล้วกระจายเป็นร่องตามร่องไหลของครีประบายความร้อน และบางส่วนไหลข้ามครีบในช่องว่างของห้องฉีดกระทบและหลังจากนั้นอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนกระทั่งถึงทางขาออก

ภาพประกอบ 64 แสดงคอนทัวร์การแพร่กระจายของเวกเตอร์ความเร็วของของไหลพบว่าของไหลมีการไหลวนกลับเพิ่มขึ้นตามระยะหัวฉีดที่สูงขึ้นเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตำแหน่งหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร 4.0 มิลลิเมตร และ 6.0 มิลลิเมตร ที่สภาวะอัตราการไหล 11.65 กรัมต่อวินาที อุณหภูมิทางเข้า 20.0 องศาเซลเซียส สารทำงาน ได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.015 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ป้อน 162.75 วัตต์ และขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร พบว่าค่าอุณหภูมิฐานครีบสูงสุด 32.62 องศาเซลเซียส ที่ตำแหน่งหัวฉีด 6.0 มิลลิเมตร 29.02 องศาเซลเซียส ที่ตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร และ 27.27 องศาเซลเซียสที่ตำแหน่งหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าต่ำที่สุด

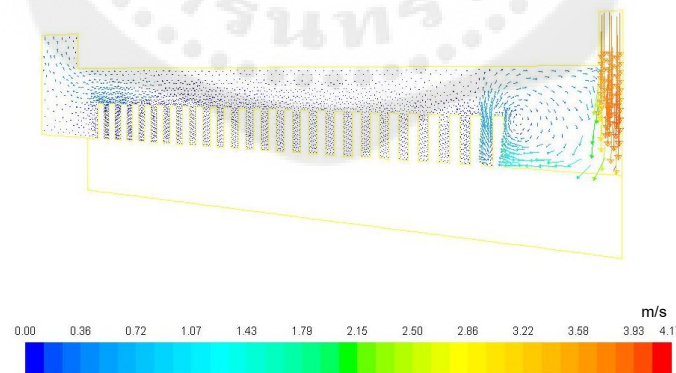
4.7 ผลของความเข้มข้นของของไหลนาโนที่มีต่อความเร็วของของไหล



ก. ความเข้มข้นของของไหลนาโน 0.005 เปอร์เซ็นต์



ข. ความเข้มข้นของของไหลนาโน 0.010 เปอร์เซ็นต์

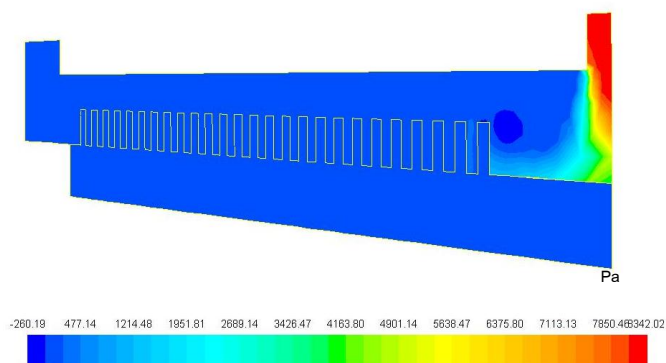


ค. ความเข้มข้นของของไหลนาโน 0.015 เปอร์เซ็นต์

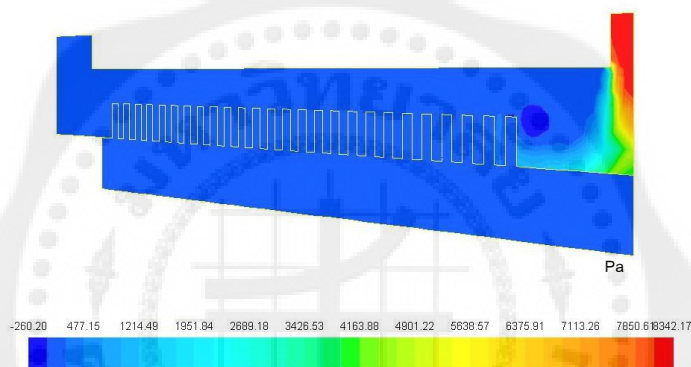
ภาพประกอบ 69 แสดงการแพร่กระจายของเวกเตอร์ความเร็วที่สภาวะอัตราการไหล 11.65 กรัมต่อวินาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.5 มิลลิเมตร ตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร และ TiO_2 $\phi = 0.005, 0.010$ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์

ภาพประกอบ 69 แสดงการแพร่กระจายของเวกเตอร์ความเร็วของของไหลที่สภาวะ อัตราการไหล 11.65 กรัมต่อวินาที อุณหภูมิทางเข้า 20.0 องศาเซลเซียส พลังงานที่ป้อน 162.75 วัตต์ ตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร และขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร สารทำงาน ได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ 0.010 เปอร์เซ็นต์ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์ จากผลของการศึกษาโดยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์พบว่าคอนทัวร์การแพร่กระจายของ เวกเตอร์ความเร็วของไหลโดยค่าเวกเตอร์ความเร็วของของไหลมีค่าสูงสุดภายในหัวฉีด และค่า เวกเตอร์ความเร็วของของไหลลดลงเมื่อของไหลเข้าสู่ห้องฉีดกระทบ เมื่อของไหลกระทบกับกับ พื้นผิวที่ระบายความร้อนจะเปลี่ยนทิศทางไหลไปตามแนวรัศมี และกระทบกับที่ระบายความร้อนทำให้ของไหลบางส่วนไหลเชิดขึ้นและกระทบผนังส่วนบนของห้องฉีดกระทบทำให้ของไหล แบ่งเป็นสองส่วนโดยส่วนหนึ่งยังคงไหลตามแนวรัศมีไปยังทางออกตามปกติ และอีกส่วนหนึ่ง ไหลวนกลับไปรวมกับของไหลจากหัวฉีด และพบว่าพบว่าเวกเตอร์ความเร็วของของไหลสูงที่สุด 7.10 เมตรต่อวินาที ที่ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ 4.03 เมตรต่อวินาที ที่ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์ และ 2.54 เมตรต่อวินาที ที่ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.015 เปอร์เซ็นต์

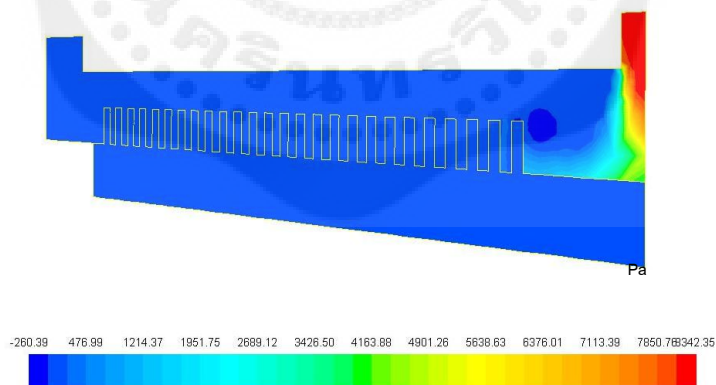
4.8 ผลของความเข้มข้นของของไหลนาโนที่มีต่อความดัน



ก. ความเข้มข้นของของไหลนาโน 0.005 เปอร์เซ็นต์



ข. ความเข้มข้นของของไหลนาโน 0.010 เปอร์เซ็นต์



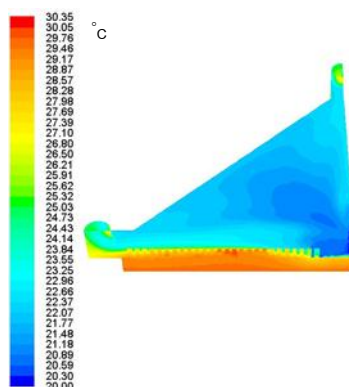
ค. ความเข้มข้นของของไหลนาโน 0.015 เปอร์เซ็นต์

ภาพประกอบ 70 แสดงการแพร่กระจายของความดันรวมที่สภาวะอัตราการไหล 11.65 กรัมต่อวินาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.5 มิลลิเมตร ตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร และ TiO_2 $\phi = 0.005, 0.010$ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์

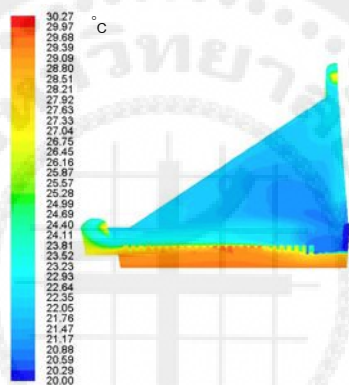
ภาพประกอบ 70 แสดงคอนทัวร์การแพร่กระจายของความดันรวมที่สภาวะอัตราไหล 11.65 กรัมต่อวินาที อุณหภูมิทางเข้า 20.0 องศาเซลเซียส พลังงานที่ป้อน 162.75 วัตต์ ตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร และขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร สารทำงานได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ 0.010 เปอร์เซ็นต์ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์ จากผลของการศึกษาโดยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์พบว่าคอนทัวร์การแพร่กระจายของความดันรวมโดยค่าความดันรวมมีค่าสูงสุดภายในหัวฉีด และความรวมลดลงเมื่อของไหลเข้าสู่ห้องฉีดกระทบ เมื่อของไหลไหลกระทบครีกระบายความร้อนและมีบางส่วนไหลเซดขึ้นและถูกอิทธิพลของเวนจูรีดูดให้ไหลไปรวมกับของไหลจากหัวฉีดดังภาพคอนทัวร์บริเวณนี้จะแสดงค่าความดันที่ค่าเป็นลบ และพบว่าค่าความดันรวมสูงที่สุด 27,645.53 ปาสคาล ที่ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.015 เปอร์เซ็นต์ 8,892.46 ปาสคาล ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์ และ 3,104.00 ปาสคาล ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าต่ำที่สุด



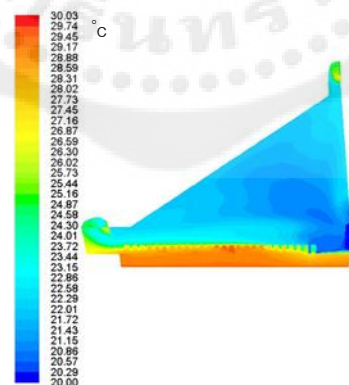
4.9 ผลของความเข้มข้นของของไหลนาโนที่มีต่ออุณหภูมิ



ก. ความเข้มข้นของของไหลนาโน 0.005 เปอร์เซ็นต์

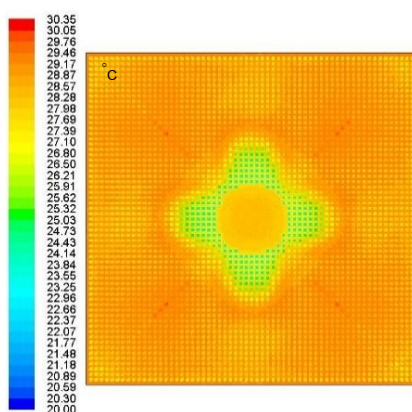


ข. ความเข้มข้นของของไหลนาโน 0.010 เปอร์เซ็นต์

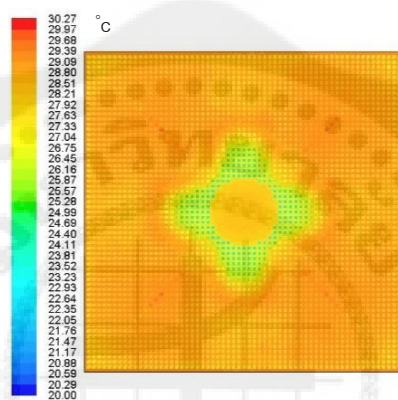


ค. ความเข้มข้นของของไหลนาโน 0.015 เปอร์เซ็นต์

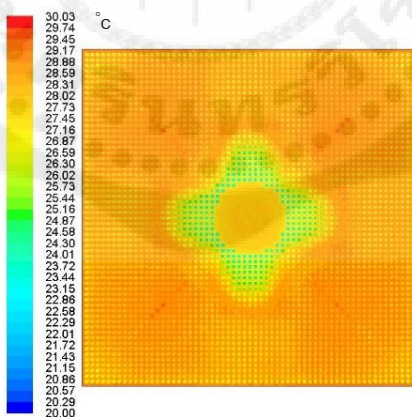
ภาพประกอบ 71 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิโดยรวมที่สภาวะอัตราการไหล 11.65 กรัมต่อวินาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.5 มิลลิเมตร ตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร และ TiO_2 $\phi = 0.005, 0.010$ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์



ก. ความเข้มข้นของของไทลนาโน 0.005 เปอร์เซ็นต์

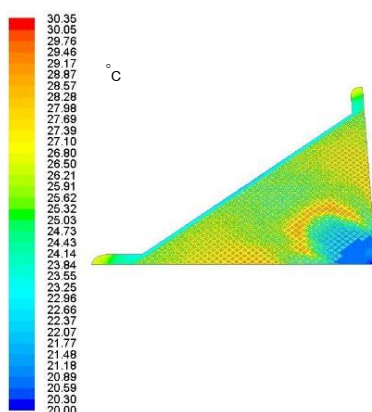


ข. ความเข้มข้นของของไทลนาโน 0.010 เปอร์เซ็นต์

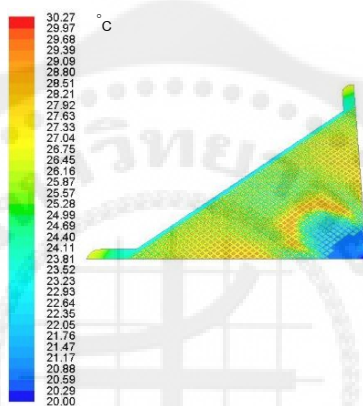


ค. ความเข้มข้นของของไทลนาโน 0.015 เปอร์เซ็นต์

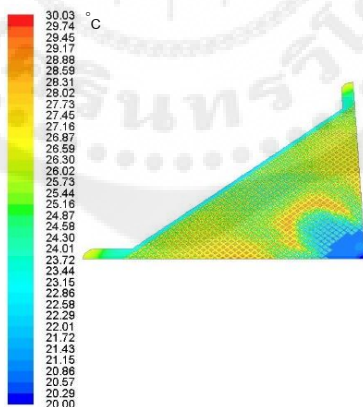
ภาพประกอบ 72 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิของครีประบายความร้อนที่สภาวะอัตราการไหล 11.65 กรัมต่อวินาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.5 มิลลิเมตร ตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร และ TiO_2 ϕ = 0.005, 0.010 และ 0.015 เปอร์เซ็นต์



ก. ความเข้มข้นของของไททนาโน 0.005 เปอร์เซนต์



ข. ความเข้มข้นของของไททนาโน 0.010 เปอร์เซนต์



ค. ความเข้มข้นของของไททนาโน 0.015 เปอร์เซนต์

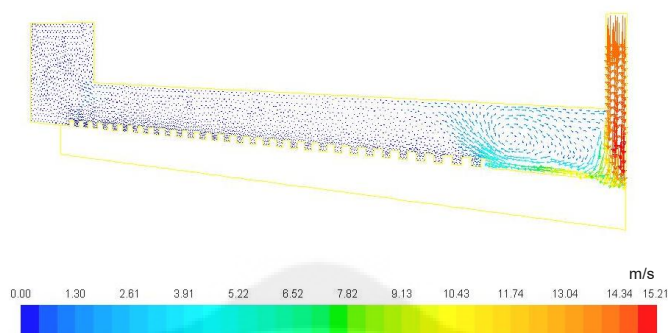
ภาพประกอบ 73 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิที่ส่วนปลายของครีบบระบายความร้อนที่สภาวะ อัตราการไหล 11.65 กรัมต่อวินาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.5 มิลลิเมตร ตำแหน่ง หัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร และ TiO_2 ϕ = 0.005, 0.010 และ 0.015 เปอร์เซนต์

ภาพประกอบ 71 ถึง 73 แสดงคอนทัวร์การแพร่กระจายอุณหภูมิที่ระบายความร้อนที่สภาวะอัตราการใช้ 11.65 กรัมต่อวินาที อุณหภูมิทางเข้า 20.0 องศาเซลเซียส พลังงานที่ป้อน 162.75 วัตต์ ตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร และขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร สารทำงานได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ 0.010 เปอร์เซ็นต์ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์ จากผลของการศึกษาโดยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์พบว่าคอนทัวร์การแพร่กระจายอุณหภูมิต่ำที่สุดที่จุดของไหลฉีดกระทบ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นในลักษณะวงกลมแล้วกระจายเป็นร่องตามร่องไหลของครีประบายความร้อน และบางส่วนไหลข้ามครีบในช่องว่างของห้องฉีดกระทบ และหลังจากนั้นอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนกระทั่งถึงทางขาออก

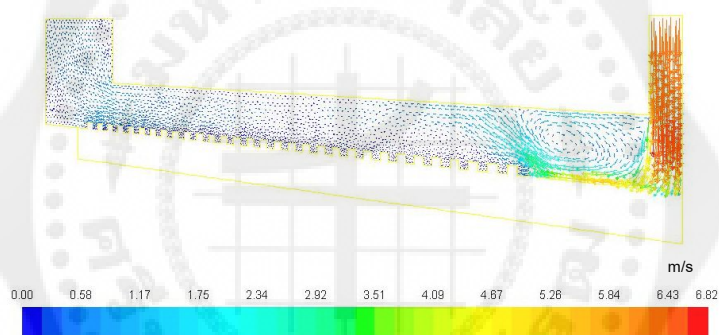
ภาพประกอบ 69 แสดงคอนทัวร์การแพร่กระจายของเวกเตอร์ความเร็วของของไหลพบว่าของไหลมีการไหลวนกลับเพิ่มขึ้นตามระยะหัวฉีดที่สูงขึ้นเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับสารทำงาน ได้แก่ น้ำ และของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ 0.010 เปอร์เซ็นต์ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่งหัวฉีด 4.0 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.5 มิลลิเมตร พลังงานที่ป้อน 162.75 วัตต์ พบว่าค่าอุณหภูมิฐานครีประบายความร้อนสูงสุด 29.65 องศาเซลเซียส ที่ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ 29.53 องศาเซลเซียส ที่ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์ และ 29.11 องศาเซลเซียส ที่ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.015 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าต่ำสุด

5 ผลกระทบของแบบจำลองคณิตศาสตร์ของครีกระบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กจิ๋ว

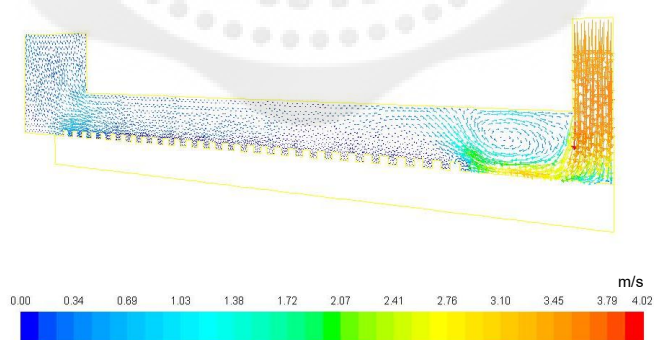
5.1 ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดที่มีต่อความเร็วของของไหล



ก. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 1.0 มิลลิเมตร



ข. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร

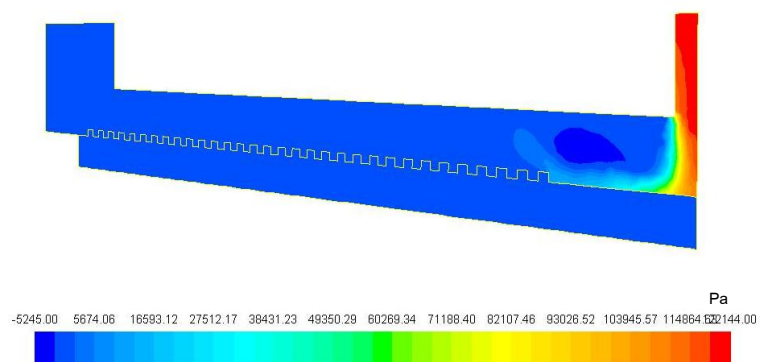


ค. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร

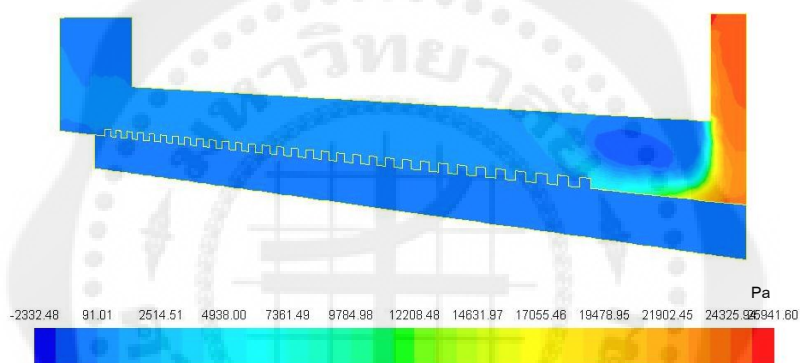
ภาพประกอบ 74 แสดงการแพร่กระจายของเวกเตอร์ความเร็วของของไหลที่สภาวะอัตราการไหล 11.12 กรัมต่อนาที $\text{TiO}_2 \phi = 0.015$ เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่งหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ

ภาพประกอบ 74 แสดงคอนทัวร์การแพร่กระจายของเวกเตอร์ความเร็วของของไหลที่สภาวะ อัตราการไหล 11.12 กรัมต่อวินาที อุณหภูมิทางเข้า 20.0 องศาเซลเซียส สารทำงานได้แก่ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.015 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ป้อน 131.25 วัตต์ ตำแหน่งหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 มิลลิเมตร 1.5 มิลลิเมตร และ 2.0 มิลลิเมตร จากผลของการศึกษาโดยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์พบว่าคอนทัวร์การแพร่กระจายของเวกเตอร์ความเร็วของของไหลโดยค่าเวกเตอร์ความเร็วของของไหลมีค่าสูงสุดภายในหัวฉีด และค่าเวกเตอร์ความเร็วของของไหลลดลงเมื่อของไหลเข้าสู่ห้องฉีดกระทบเมื่อกระทบกับกับพื้นผิวจะเปลี่ยนทิศทางไหลไปตามแนวรัศมี และกระทบกับครีบบระบายความร้อนทำให้ของไหลบางส่วนไหลเชิดขึ้น แล้วไปกระทบผนังส่วนบนของห้องฉีดกระทบทำให้ของไหลแบ่งเป็นสองส่วนโดยส่วนหนึ่งยังคงไหลตามแนวรัศมีไปยังทางออกตามปกติ และอีกส่วนหนึ่งไหลวนกลับไปรวมกับของไหลจากหัวฉีด และพบว่าพบว่าเวกเตอร์ความเร็วของของไหลสูงที่สุด 15.21 เมตรต่อวินาที ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 1.0 มิลลิเมตร 6.82 เมตรต่อวินาที ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และ 4.02 เมตรต่อวินาที ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าต่ำที่สุด

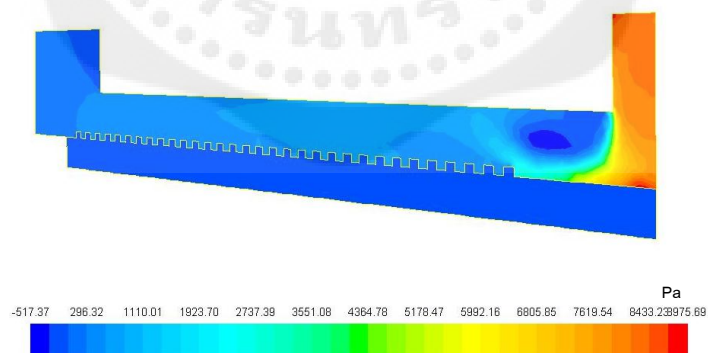
5.2 ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดที่มีต่อความดัน



ก. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 1.0 มิลลิเมตร



ข. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร



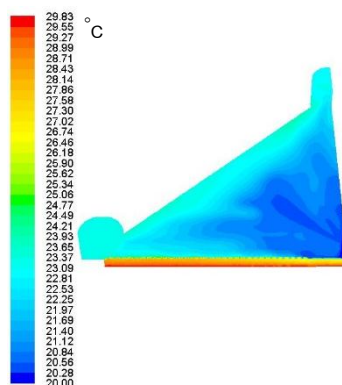
ค. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร

ภาพประกอบ 75 แสดงการแพร่กระจายของความดันรวมที่สภาวะอัตราการไหล 11.12 กรัมต่อวินาที $\text{TiO}_2 \phi = 0.015$ เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่งหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ

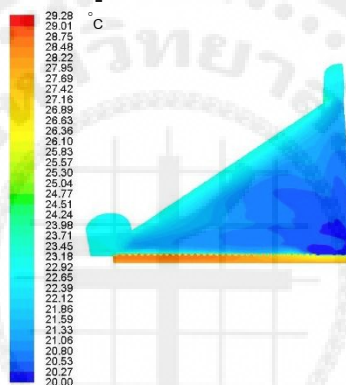
ภาพประกอบ 75 แสดงการแพร่กระจายของความดันรวมที่สภาวะอัตราการไหล 11.12 กรัมต่อวินาที อุณหภูมิทางเข้า 20.0 องศาเซลเซียส สารทำงานได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียม ความเข้มข้น 0.015 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ป้อน 131.25 วัตต์ ตำแหน่งหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และ ขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 มิลลิเมตร 1.5 มิลลิเมตร และ 2.0 มิลลิเมตร จากผลของการศึกษา โดยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์พบว่าคอนทัวร์การแพร่กระจายของความดันรวมโดยค่าความดันรวม มีค่าสูงสุดภายในหัวฉีด และความดันรวมลดลงเมื่อของไหลเข้าสู่ห้องฉีดกระทบ เมื่อของไหลไหล กระทบครีประบายความร้อนและมีบางส่วนไหลเซดขึ้นและถูกอิทธิพลของเวนจูรีดูดให้ไหลไปรวมกับ ของไหลจากหัวฉีดดังภาพคอนทัวร์บริเวณนี้จะแสดงค่าความดันที่ค่าเป็นลบ และพบว่าพบว่าค่า ความดันรวมสูงที่สุด 122,159.48 ปาสคาล ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 1.0 มิลลิเมตร 25,942.40 ปาสคาล ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และ 9,978.94 ปาสคาล ที่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าต่ำที่สุด



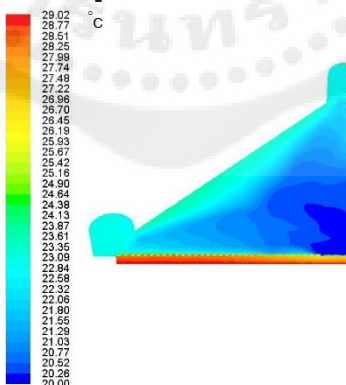
5.3 ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดที่มีต่ออุณหภูมิ



ก. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 1.0 มิลลิเมตร

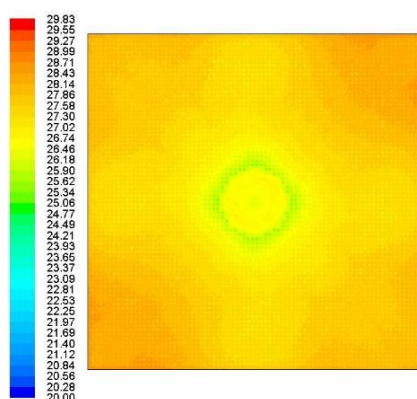


ข. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร

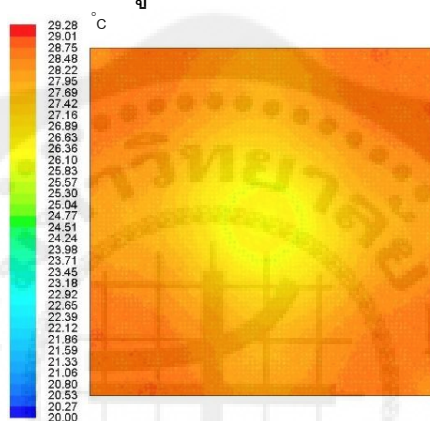


ค. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร

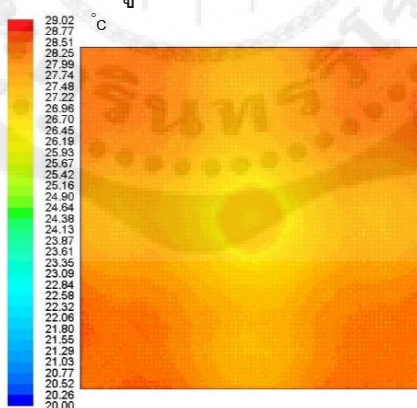
ภาพประกอบ 76 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิโดยรวมที่สภาวะอัตราการไหล 11.12 กรัมต่อวินาที TiO_2 $\phi = 0.015$ เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่งหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ



ก. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 1.0 มิลลิเมตร

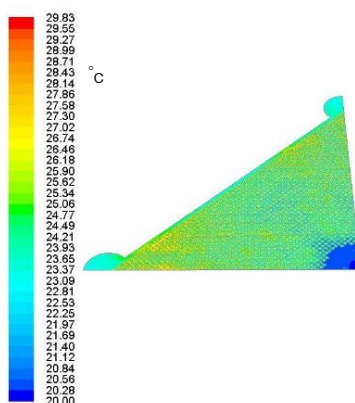


ข. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร

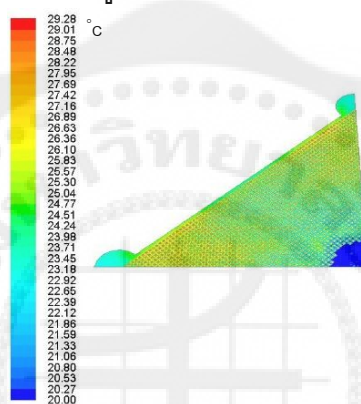


ค. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร

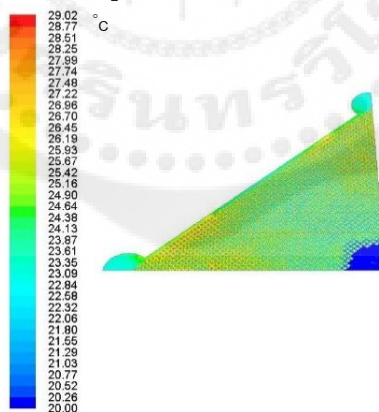
ภาพประกอบ 77 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิของครีประบายความร้อนที่สภาวะอัตราการไหล 11.12 กรัมต่อวินาที $\text{TiO}_2 \phi = 0.015$ เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่งหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ



ก. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 1.0 มิลลิเมตร



ข. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร



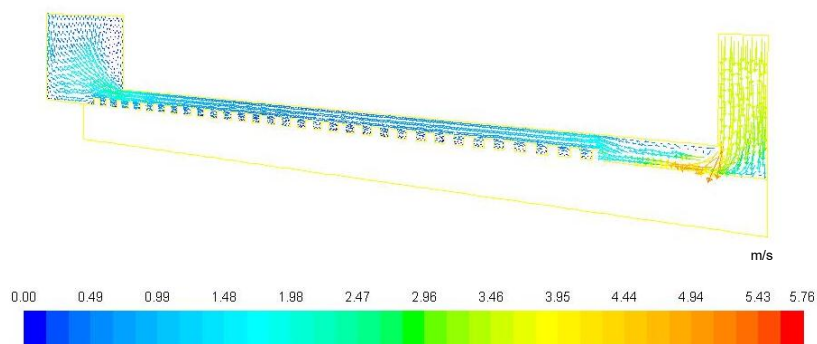
ค. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร

ภาพประกอบ 78 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิที่ส่วนปลายของครีกระบายความร้อนที่สภาวะอัตรา
การไหล 11.12 กรัมต่อวินาที TiO_2 $\phi = 0.015$ เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่งหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และ
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่าง ๆ

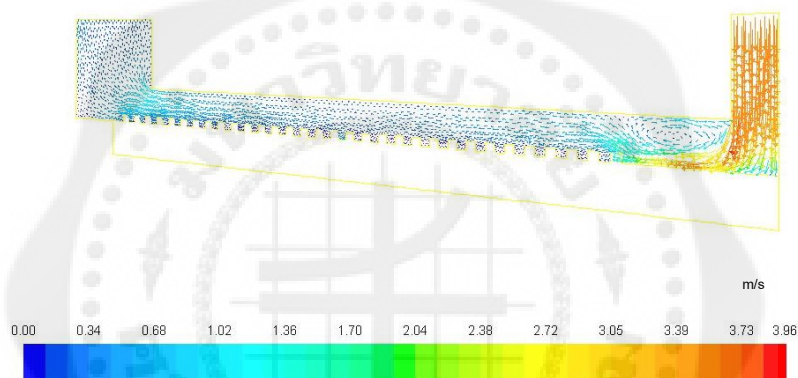
ภาพประกอบ 78 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิครีประบายความร้อนที่สภาวะ อัตราการไหล 11.12 กรัมต่อวินาที อุณหภูมิทางเข้า 20.0 องศาเซลเซียส สารทำงานได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.015 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ป้อน 131.25 วัตต์ ตำแหน่งหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 มิลลิเมตร 1.5 มิลลิเมตร และ 2.0 มิลลิเมตร จากผลของการศึกษาโดยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์พบว่าคอนทัวการแพร่กระจายอุณหภูมิต่ำที่สุดที่จุดของไหลฉีดกระทบ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นในลักษณะวงกลมแล้วกระจายเป็นร่องตามร่องไหลของครีประบายความร้อน และบางส่วนไหลข้ามครีปในช่องว่างของห้องฉีดกระทบและหลังจากนั้นอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าจนกระทั่งถึงทางขาออก

ภาพประกอบ 74 แสดงคอนทัวการแพร่กระจายของเวกเตอร์ความเร็วของของไหลพบว่าของไหลมีการไหลวนกลับเพิ่มขึ้นตามระยะหัวฉีดที่สูงขึ้นเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 1.0 มิลลิเมตร 1.5 มิลลิเมตร และ 2.0 มิลลิเมตร ที่สภาวะ อัตราการไหล 11.12 กรัมต่อวินาที อุณหภูมิทางเข้า 20.0 องศาเซลเซียส สารทำงานได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.015 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ป้อน 131.25 วัตต์ พบว่าค่าอุณหภูมิต่ำสุด 29.83 องศาเซลเซียส ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 1.0 มิลลิเมตร 28.93 องศาเซลเซียส ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และ 28.06 องศาเซลเซียส ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าต่ำที่สุด

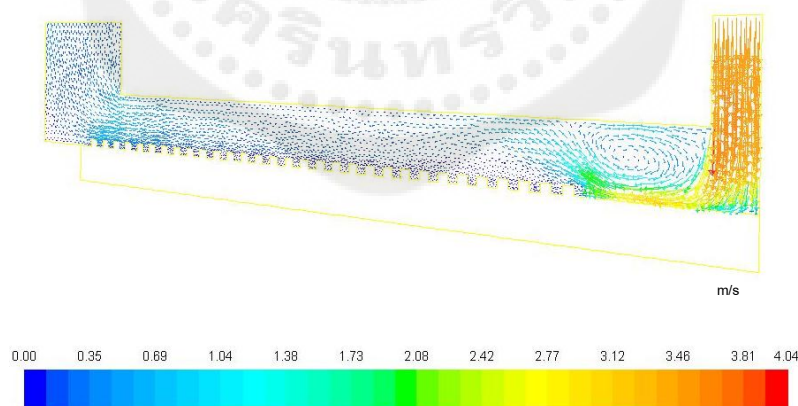
5.4 ผลของระยะห่างของตำแหน่งหัวฉีดที่มีต่อความเร็วของของไหล



ก. ระยะห่างของหัวฉีด 0.5 มิลลิเมตร



ข. ระยะห่างของหัวฉีด 1.0 มิลลิเมตร

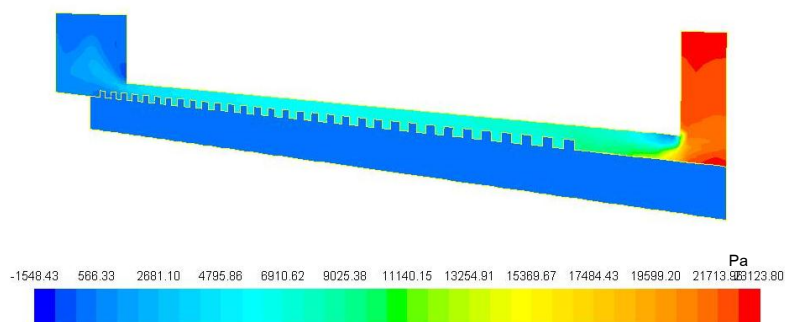


ค. ระยะห่างของหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร

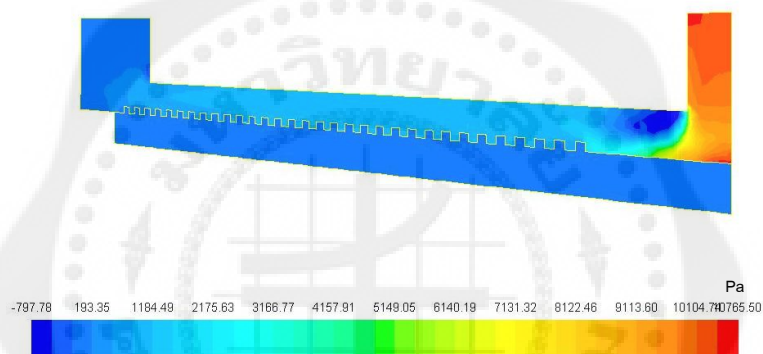
ภาพประกอบ 79 แสดงการแพร่กระจายของเวกเตอร์ความเร็วของของไหลที่หัวฉีดที่สภาวะ อัตราการไหล 11.12 กรัมต่อนาที TiO_2 $\phi = 0.015$ เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร และตำแหน่งหัวฉีดต่าง ๆ

ภาพประกอบ 79 แสดงคอนทัวร์การแพร่กระจายของเวกเตอร์ความเร็วของของไหลที่สภาวะ อัตราการไหล 11.12 กรัมต่อวินาที อุณหภูมิทางเข้า 20.0 องศาเซลเซียส สารทำงานได้แก่ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.015 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ป้อน 131.25 วัตต์ ขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตร ตำแหน่งหัวฉีด 0.5 มิลลิเมตร 1.0 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร จากผลของการศึกษาโดยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์พบว่าคอนทัวร์การแพร่กระจายของเวกเตอร์ความเร็วของของไหลโดยค่าเวกเตอร์ความเร็วของของไหลมีค่าสูงสุดภายในหัวฉีด และค่าเวกเตอร์ความเร็วของของไหลลดลงเมื่อของไหลเข้าสู่ห้องฉีดกระทบเมื่อกระทบกับกับพื้นผิวจะเปลี่ยนทิศทางไหลไปตามแนวรัศมีและกระทบกับครีบรรยายความร้อนทำให้ของไหลบางส่วนไหลเซดขึ้นแล้วไปกระทบผนังส่วนบนของห้องหล่อเย็นทำให้ของไหลแบ่งเป็นสองส่วนโดยส่วนหนึ่งยังคงไหลตามแนวรัศมีไปยังทางออกตามปกติ และอีกส่วนหนึ่งไหลวนกลับไปรวมกับของไหลจากหัวฉีด และพบว่าพบว่าเวกเตอร์ความเร็วของของไหลสูงที่สุด 6.77 เมตรต่อวินาที ตำแหน่งหัวฉีด 0.5 มิลลิเมตร 3.96 เมตรต่อวินาที ตำแหน่งหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และ 4.04 เมตรต่อวินาที ที่ตำแหน่งหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าต่ำที่สุด

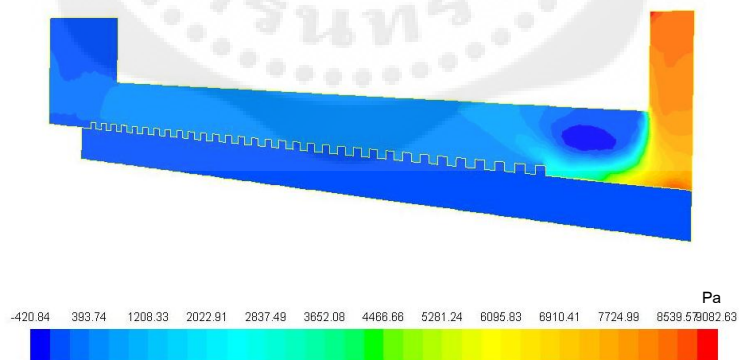
5.5 ผลของระยะห่างของตำแหน่งหัวฉีดที่มีต่อความดัน



ก. ระยะห่างของหัวฉีด 0.5 มิลลิเมตร



ข. ระยะห่างของหัวฉีด 1.0 มิลลิเมตร



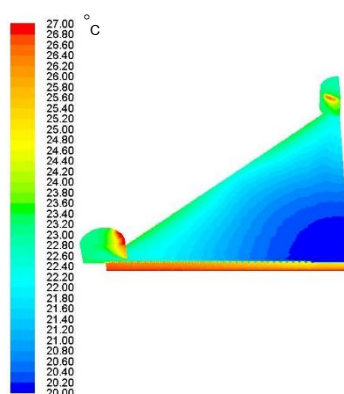
ค. ระยะห่างของหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร

ภาพประกอบ 80 แสดงการแพร่กระจายของความดันรวมที่สภาวะอัตราการไหล 11.12 กรัมต่อวินาที $\text{TiO}_2 \phi = 0.015$ เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.0 มม. และตำแหน่งหัวฉีดต่าง ๆ

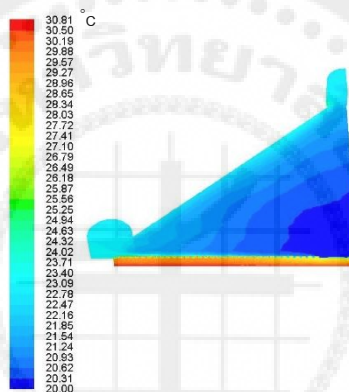
ภาพประกอบ 80 แสดงคอนทัวร์การแพร่กระจายของความดันรวมที่สภาวะอัตราไหล 11.12 กรัมต่อวินาที อุณหภูมิทางเข้า 20.0 องศาเซลเซียส สารทำงานได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ป้อน 131.25 วัตต์ ขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตร ตำแหน่งหัวฉีด 0.5 มิลลิเมตร 1.0 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร จากผลของการศึกษาโดยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์พบว่าคอนทัวร์การแพร่กระจายของความดันรวมโดยค่าความดันรวมมีค่าสูงสุดภายในหัวฉีด และความดันรวมลดลงเมื่อของไหลเข้าสู่ห้องฉีดกระทบ เมื่อของไหลไหลกระทบครีประบายความร้อนและมีบางส่วนไหลเซดขึ้นและถูกอิทธิพลของเวนจูรี่ดูดให้ไหลไปรวมกับของไหลจากหัวฉีดดังภาพคอนทัวร์บริเวณนี้จะแสดงค่าความดันที่ค่าเป็นลบ และพบว่าพบค่าความดันรวมสูงที่สุด 23,109.48 ปาสคาล ที่ตำแหน่งหัวฉีด 0.5 มิลลิเมตร 10,778.17 ปาสคาล ที่ตำแหน่งหัวฉีด 1.0 มิลลิเมตร และ 9,094.61 ปาสคาล ที่ตำแหน่งหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตรซึ่งมีค่าต่ำที่สุด



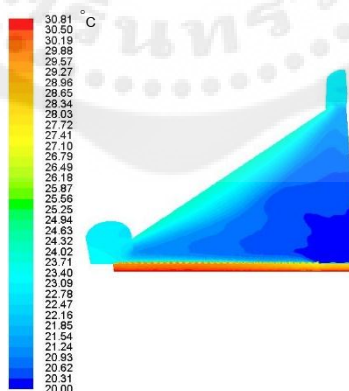
5.6 ผลของระยะห่างของตำแหน่งหัวฉีดที่มีต่ออุณหภูมิ



ก. ระยะห่างของหัวฉีด 0.5 มิลลิเมตร

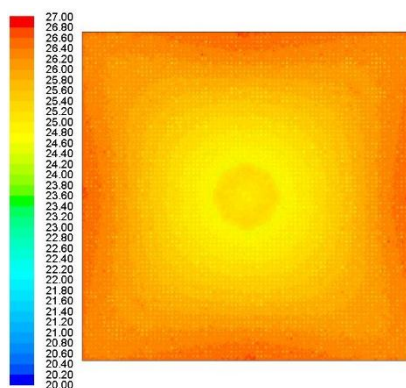


ข. ระยะห่างของหัวฉีด 1.0 มิลลิเมตร

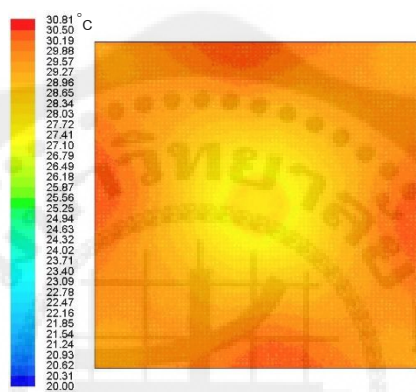


ค. ระยะห่างของหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร

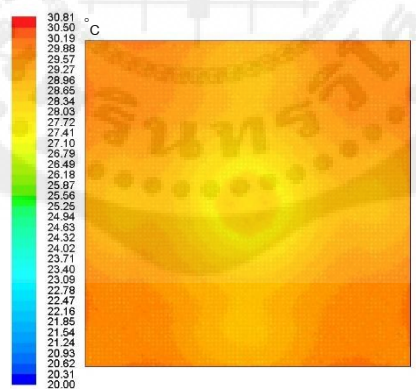
ภาพประกอบ 81 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิโดยรวมที่สภาวะอัตราการไหล 11.12 กรัมต่อวินาที $\text{TiO}_2 \phi = 0.015$ เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร และตำแหน่งหัวฉีดต่าง ๆ



ก. ระยะห่างของหัวฉีด 0.5 มิลลิเมตร

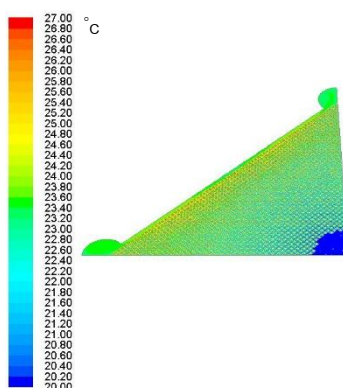


ข. ระยะห่างของหัวฉีด 1.0 มิลลิเมตร

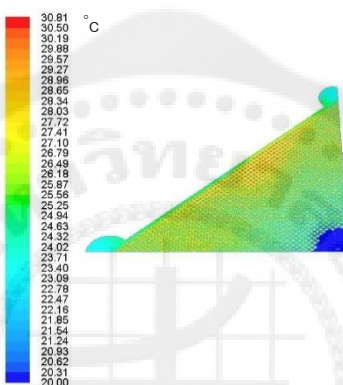


ค. ระยะห่างของหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร

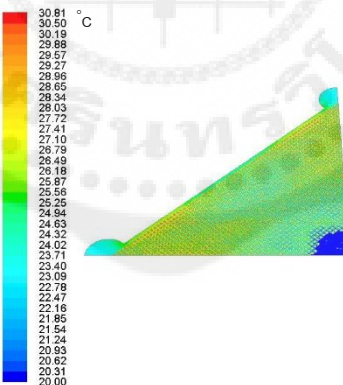
ภาพประกอบ 82 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิของครีประบายความร้อนที่สภาวะอัตราการไหล 11.12 กรัมต่อวินาที $\text{TiO}_2 \phi = 0.015$ เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร และตำแหน่งหัวฉีดต่าง ๆ



ก. ระยะห่างของหัวฉีด 0.5 มิลลิเมตร



ข. ระยะห่างของหัวฉีด 1.0 มิลลิเมตร



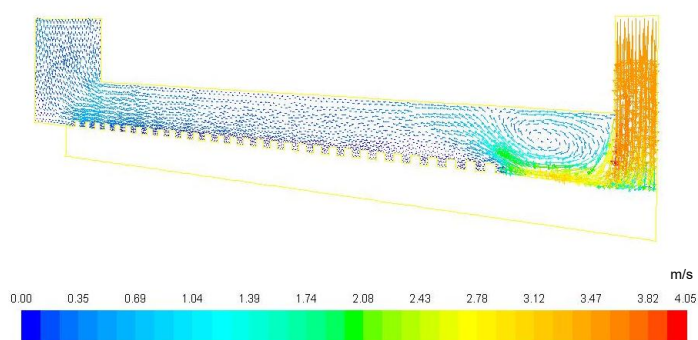
ค. ระยะห่างของหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร

ภาพประกอบ 83 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิที่ส่วนปลายของครีบริบายความร้อนที่สภาวะ อัตราการไหล 11.12 กรัมต่อวินาที $\text{TiO}_2 \phi = 0.015$ เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร และตำแหน่งหัวฉีดต่าง ๆ

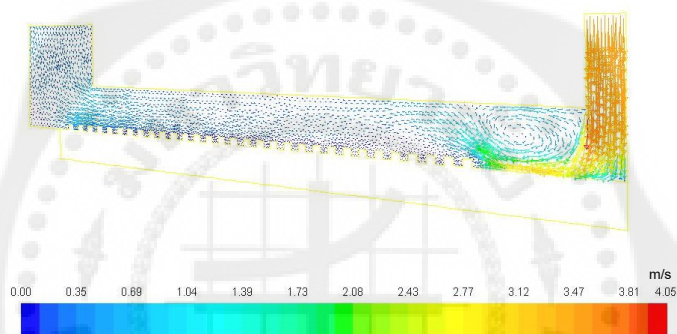
ภาพประกอบ 81 ถึง 83 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิที่สภาวะ อัตราการไหล 11.12 กรัมต่อวินาที อุณหภูมิทางเข้า 20.0 องศาเซลเซียส สารทำงานได้แก่ ของไหล นาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.015 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ป้อน 131.25 วัตต์ ขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตร ตำแหน่งหัวฉีด 0.5 มิลลิเมตร 1.0 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร จากผลของการศึกษาโดยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์พบว่าคอนทัวร์การแพร่กระจายอุณหภูมิต่ำที่สุดที่จุดของไหลฉีดกระทบ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นในลักษณะวงกลมแล้วกระจายเป็นร่องตามร่องไหลของครีบบรรเทาความร้อน และบางส่วนไหลข้ามครีบบนช่องว่างของห้องฉีดกระทบและหลังจากนั้นอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนกระทั่งถึงทางขาออก

ภาพประกอบ 79 แสดงคอนทัวร์การแพร่กระจายของเวกเตอร์ความเร็วของของไหลพบว่าของไหลมีการไหลวนกลับเพิ่มขึ้นตามระยะหัวฉีดที่สูงขึ้นเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตำแหน่งหัวฉีด 0.5 มิลลิเมตร 1.0 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร ที่สภาวะอัตราการไหล 11.12 กรัมต่อวินาที อุณหภูมิทางเข้า 20.0 องศาเซลเซียส สารทำงาน ได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.015 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ป้อน 131.25 วัตต์ และขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตร พบว่าค่าอุณหภูมิฐานครีบบสูงสุด 30.67 องศาเซลเซียส ที่ตำแหน่งหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร 29.88 องศาเซลเซียส ที่ตำแหน่งหัวฉีด 1.0 มิลลิเมตร และ 26.88 องศาเซลเซียสที่ตำแหน่งหัวฉีด 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าต่ำที่สุด

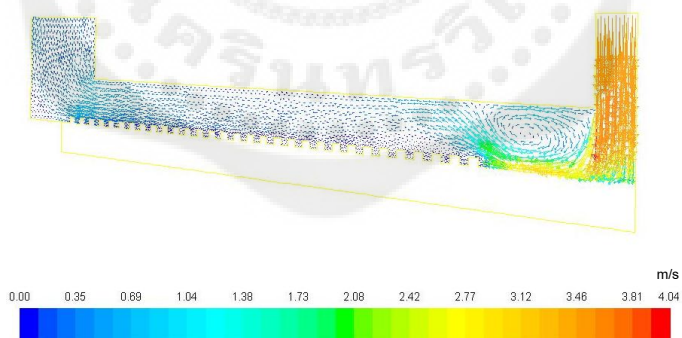
5.7 ผลของความเข้มข้นของของไหลนาโนไททาเนียมที่มีต่อความเร็วของของไหล



ก. ความเข้มข้นของของไหลนาโน 0.005 เปอร์เซ็นต์



ข. ความเข้มข้นของของไหลนาโน 0.010 เปอร์เซ็นต์

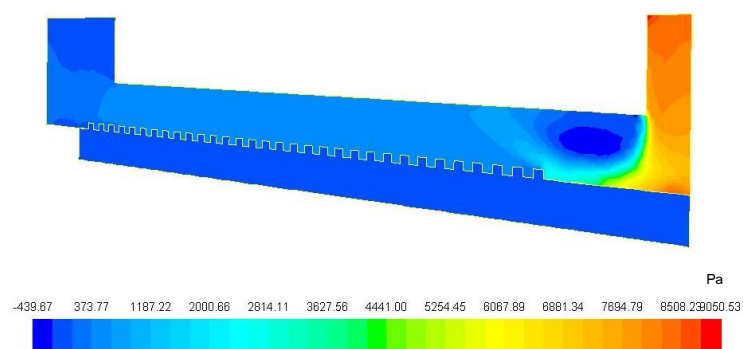


ค. ความเข้มข้นของของไหลนาโน 0.015 เปอร์เซ็นต์

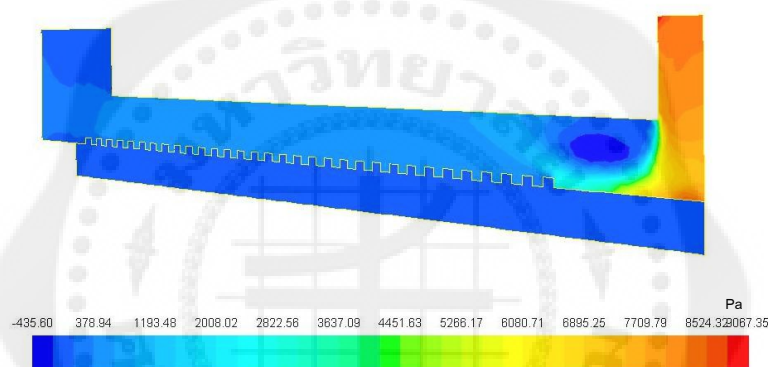
ภาพประกอบ 84 แสดงการแพร่กระจายของเวกเตอร์ความเร็วที่สภาวะอัตราการไหล 11.12 กรัมต่อวินาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร ตำแหน่งหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และ TiO_2 $\phi = 0.005, 0.010$ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์

ภาพประกอบ 84 แสดงการแพร่กระจายของเวกเตอร์ความเร็วของของไหลที่สภาวะ อัตราการไหล 11.12 กรัมต่อวินาที อุณหภูมิทางเข้า 20.0 องศาเซลเซียส พลังงานที่ป้อน 131.25 วัตต์ ตำแหน่งหัวฉีด 1.0 มิลลิเมตร และขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตร สารทำงาน ได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ 0.010 เปอร์เซ็นต์ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์ จากผลของการศึกษาโดยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์พบว่าคอนทัวร์การแพร่กระจายของ เวกเตอร์ความเร็วของไหลโดยค่าเวกเตอร์ความเร็วของของไหลมีค่าสูงสุดภายในหัวฉีด และค่า เวกเตอร์ความเร็วของของไหลลดลงเมื่อของไหลเข้าสู่ห้องฉีดกระทบ เมื่อของไหลกระทบกับกับ พื้นผิวที่ระบายความร้อนจะเปลี่ยนทิศทางไหลไปตามแนวรัศมี และกระทบกับที่ระบายความร้อนทำให้ของไหลบางส่วนไหลเชิดขึ้นและกระทบผนังส่วนบนของห้องฉีดกระทบทำให้ของไหล แบ่งเป็นสองส่วนโดยส่วนหนึ่งยังคงไหลตามแนวรัศมีไปยังทางออกตามปกติ และอีกส่วนหนึ่ง ไหลวนกลับไปรวมกับของไหลจากหัวฉีด และพบว่าพบว่าเวกเตอร์ความเร็วของของไหลสูงที่สุด 4.04 เมตรต่อวินาที เท่ากันที่ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ 0.010 เปอร์เซ็นต์ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์

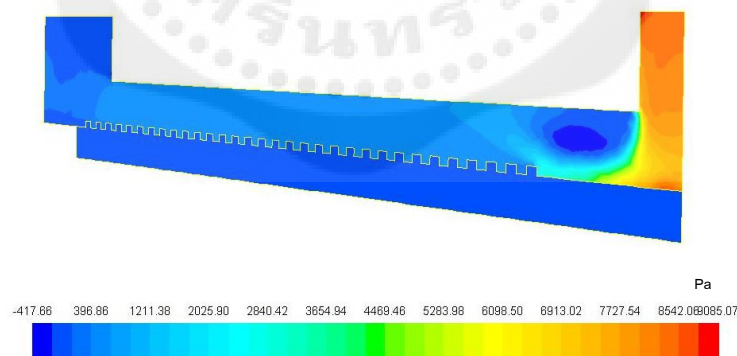
5.8 ผลของความเข้มข้นของของไหลนาโนไททาเนียมที่มีต่อความดัน



ก. ความเข้มข้นของของไหลนาโน 0.005 เปอร์เซ็นต์



ข. ความเข้มข้นของของไหลนาโน 0.010 เปอร์เซ็นต์



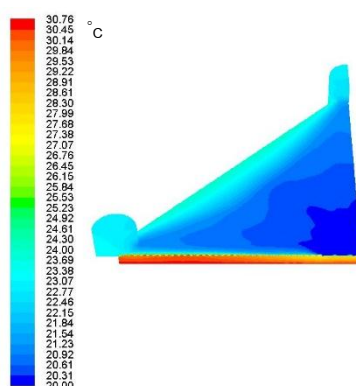
ค. ความเข้มข้นของของไหลนาโน 0.015 เปอร์เซ็นต์

ภาพประกอบ 85 แสดงการแพร่กระจายของความดันรวมที่สภาวะอัตราการไหล 11.12 กรัมต่อวินาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร ตำแหน่งหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และ TiO_2 $\phi = 0.005, 0.010$ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์

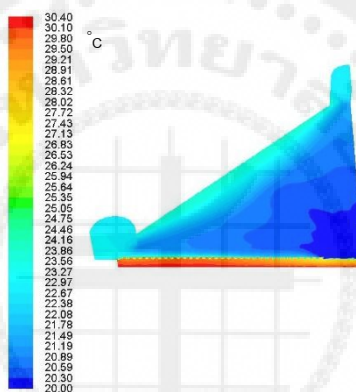
ภาพประกอบ 85 แสดงคอนทัวร์การแพร่กระจายของความดันรวมที่สภาวะอัตราการใช้
 11.12 กรัมต่อวินาที อุณหภูมิทางเข้า 20.0 องศาเซลเซียส พลังงานที่ป้อน 131.25 วัตต์ ตำแหน่ง
 หัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตร สารทำงานได้แก่ ของไหล
 นาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ 0.010 เปอร์เซ็นต์ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์ จากผล
 ของการศึกษาโดยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์พบว่าคอนทัวร์การแพร่กระจายของความดันรวมโดย
 ค่าความดันรวมมีค่าสูงสุดภายในหัวฉีด และความรวมลดลงเมื่อของไหลเข้าสู่ห้องฉีดกระทบ เมื่อ
 ของไหลไหลกระทบครีกระบายความร้อนและมีบางส่วนไหลเซดขึ้นและถูกอิทธิพลของเวนจูรีดูดให้
 ไหลไปรวมกับของไหลจากหัวฉีดดังภาพคอนทัวร์บริเวณนี้จะแสดงค่าความดันที่ค่าเป็นลบ และ
 พบว่าค่าความดันรวมสูงที่สุด 9,100.40 ปาสคาล ที่ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.015
 เปอร์เซ็นต์ 9,077.65 ปาสคาล ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์ และ
 9,069.96 ปาสคาล ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าต่ำที่สุด



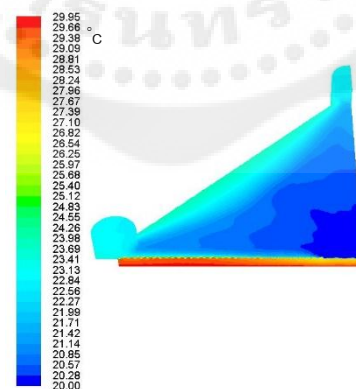
5.9 ผลของความเข้มข้นของของไหลนาโนไททาเนียมที่มีต่ออุณหภูมิ



ก. ความเข้มข้นของของไหลนาโน 0.005 เปอร์เซ็นต์

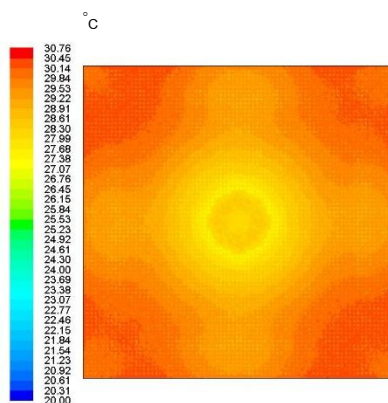


ข. ความเข้มข้นของของไหลนาโน 0.010 เปอร์เซ็นต์

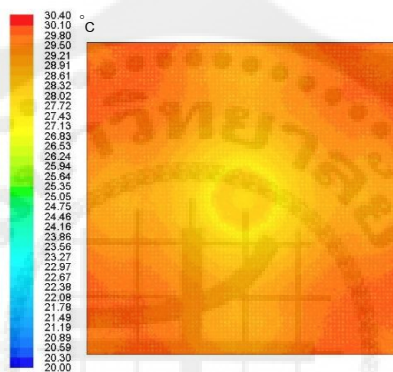


ค. ความเข้มข้นของของไหลนาโน 0.015 เปอร์เซ็นต์

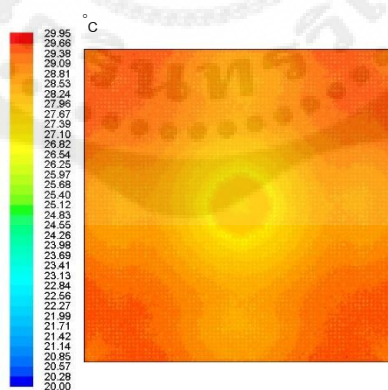
ภาพประกอบ 86 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิโดยรวมที่สภาวะอัตราการไหล 11.12 กรัมต่อวินาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร ตำแหน่งหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และ TiO_2 $\phi = 0.005, 0.010$ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์



ก. ความเข้มข้นของของไทลนาโน 0.005 เปอร์เซนต์

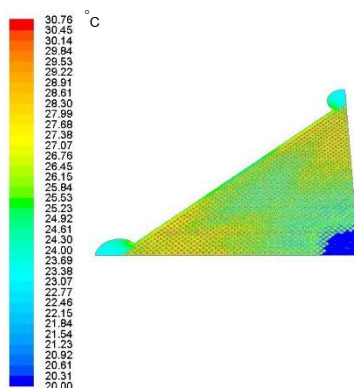


ข. ความเข้มข้นของของไทลนาโน 0.010 เปอร์เซนต์

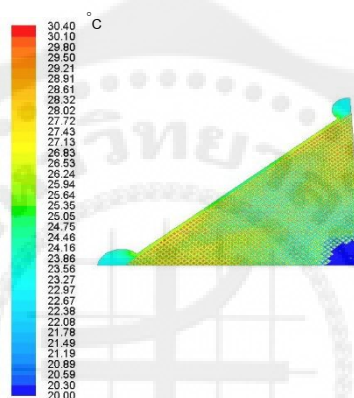


ค. ความเข้มข้นของของไทลนาโน 0.015 เปอร์เซนต์

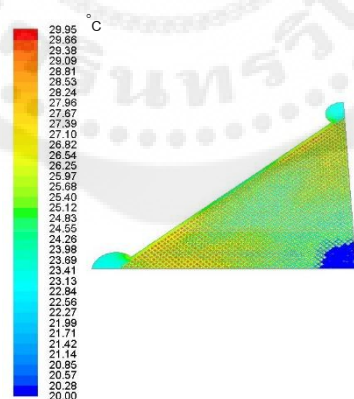
ภาพประกอบ 87 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิของครีบบายความร้อนที่สภาวะอัตราการไหล 11.12 กรัมต่อวินาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร ตำแหน่งหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และ TiO_2 ϕ = 0.005, 0.010 และ 0.015 เปอร์เซนต์



ก. ความเข้มข้นของของไหลนาโน 0.005 เปอร์เซ็นต์



ข. ความเข้มข้นของของไหลนาโน 0.010 เปอร์เซ็นต์



ค. ความเข้มข้นของของไหลนาโน 0.015 เปอร์เซ็นต์

ภาพประกอบ 88 แสดงการแพร่กระจายอุณหภูมิที่ปลายของครีประบายความร้อนที่สภาวะอัตราการไหล 11.12 กรัมต่อวินาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร ตำแหน่งหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และ $\text{TiO}_2 \phi = 0.005, 0.010$ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์

ภาพประกอบ 86 ถึง 88 แสดงคอนทัวร์การแพร่กระจายอุณหภูมิที่ระบายความร้อนที่สภาวะอัตราไหล 11.12 กรัมต่อวินาที อุณหภูมิทางเข้า 20.0 องศาเซลเซียส พลังงานที่ป้อน 131.25 วัตต์ ตำแหน่งหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และขนาดหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตร สารทำงานได้แก่ ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ 0.010 เปอร์เซ็นต์ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์ จากผลของการศึกษาโดยวิธีแบบจำลองคณิตศาสตร์พบว่าคอนทัวร์การแพร่กระจายอุณหภูมิต่ำที่สุดที่จุดของไหลฉีดกระทบ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นในลักษณะวงกลมแล้วกระจายเป็นร่องตามร่องไหลของครีประบายความร้อน และบางส่วนไหลข้ามครีบในช่องว่างของห้องฉีดกระทบ และหลังจากนั้นอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนกระทั่งถึงทางขาออก

ภาพประกอบ 84 แสดงคอนทัวร์การแพร่กระจายของเวกเตอร์ความเร็วของของไหลพบว่าของไหลมีการไหลวนกลับเพิ่มขึ้นตามระยะหัวฉีดที่สูงขึ้นเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับสารทำงาน ได้แก่ น้ำ และของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ 0.010 เปอร์เซ็นต์ และ 0.015 เปอร์เซ็นต์ ตำแหน่งหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร พลังงานที่ป้อน 131.25 วัตต์ พบว่าค่าอุณหภูมิฐานครีประบายความร้อนสูงสุด 30.67 องศาเซลเซียส ที่ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.005 เปอร์เซ็นต์ 30.31 องศาเซลเซียส ที่ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.010 เปอร์เซ็นต์ และ 29.86 องศาเซลเซียส ที่ของไหลนาโนไททาเนียมความเข้มข้น 0.015 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าต่ำสุด

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

1 บทนำ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อน และการไหลของของไหลนาโนไททาเนียม และน้ำบริสุทธิ์โดยการฉีดกระทบครีประบายความร้อนที่มีช่องการไหลขนาดเล็กจิ๋ว (Microchannel heat sinks) โดยวิธีการทดลอง และวิธีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้วนำผลมาคำนวณหาตัวแปรที่ต้องการ ซึ่งผลที่ได้มาเสนอในลักษณะกราฟ แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ กราฟที่ใช้ในการศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนในลักษณะต่าง ๆ และความดันตกคร่อมของครีประบายความร้อนกับสารทำงานที่นำเสนอใน บทที่ 5 สามารถสรุปผลได้ ดังนี้

- อุณหภูมิทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิผิวชุดครีเฉลี่ย ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และ ค่าเลขนัสเซิลต์ เฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อ ค่าฟลักซ์ความร้อนสูงขึ้น ซึ่งผลที่ได้จากการทดลอง และวิธีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสอดคล้องกันดี

- อุณหภูมิทางออกเฉลี่ย อุณหภูมิผิวครีเฉลี่ยมีค่าน้อยลงเมื่ออัตราการไหลของสารทำงานทั้งน้ำ และของไหลนาโนไททาเนียมสูงขึ้น ซึ่งผลที่ได้จากวิธีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าใกล้เคียงกันโดยให้ค่าความ คลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 0.23 เปอร์เซ็นต์ สำหรับอุณหภูมิทางออกเฉลี่ย และประมาณ 0.46 เปอร์เซ็นต์ สำหรับอุณหภูมิผิวครีเฉลี่ย

- ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และค่าเลขนัสเซิลต์ เฉลี่ยมีค่าสูงขึ้น โดยแปรตามการเพิ่มขึ้น ของอัตราการไหลของสารทำงานทั้งน้ำ และของไหลนาโนไททาเนียม ซึ่งผลที่ได้จากการทดลอง และวิธีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีความสอดคล้องกันดี และใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความ คลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 2.49 เปอร์เซ็นต์ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการฉีดกระทบ และประมาณ 2.48 เปอร์เซ็นต์ สำหรับค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ย

- การถ่ายเทความร้อนในส่วนของครีประบายความร้อนแบบช่องไหลขนาดเล็ก และครีแบบช่องไหลขนาดเล็กจิ๋ว (Minichannel and Microchannel heat sinks) พบว่าครีประบายความร้อนแบบช่องไหลขนาดเล็กจิ๋วถ่ายเทความร้อนได้มากกว่าครีประบายความร้อนแบบช่องไหลขนาดเล็ก

- การถ่ายเทความร้อนในส่วนของสารทำงานพบว่าสารทำงานที่ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเรียงลำดับจากมากที่สุดไปสู่น้อยที่สุดตามลำดับ ของไหลนาโนไททาเนียมในอัตราส่วนความเข้มข้นของอนุภาคกับน้ำโดยปริมาตร 0.015 เปอร์เซ็นต์ 0.010 เปอร์เซ็นต์ 0.005 เปอร์เซ็นต์ และน้ำ

- การถ่ายเทความร้อนในส่วนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดพบว่าขนาดของหัวฉีด 2 มิลลิเมตร ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 1.0 มิลลิเมตร เรียงลดลงตามลำดับ
- การถ่ายเทความร้อนในส่วนของระยะห่างของหัวฉีดกับผิวครีประบายความร้อนฉีดกระทบพบว่าระยะห่างของหัวฉีดกับผิวครีประบายความร้อนฉีดกระทบที่ระยะ 0.5 มิลลิเมตร ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด ระยะห่างหัวฉีด 1.0 มิลลิเมตร และระยะห่างหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตรเรียงลดลงตามลำดับ
- ความดันตกคร่อมในส่วนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดพบว่าขนาดของหัวฉีด 1.0 มิลลิเมตร ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 2.0 มิลลิเมตร เรียงลดลงตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลอง และวิธีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดีตลอดช่วงการศึกษาวิจัย
- ความดันตกคร่อมในส่วนของระยะห่างของหัวฉีดกับผิวครีประบายความร้อนฉีดกระทบพบว่าระยะห่างของหัวฉีดกับผิวครีประบายความร้อนฉีดกระทบที่ระยะ 0.5 มิลลิเมตร ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด ระยะห่างหัวฉีด 1.0 มิลลิเมตร และ ระยะห่างหัวฉีด 1.5 มิลลิเมตร เรียงลดลงตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลอง และวิธีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดีตลอดช่วงการศึกษาวิจัย
- จากมากที่สุดไปสู่น้อยที่สุดตามลำดับ ของไหลนาโนไททาเนียมในอัตราส่วนความเข้มข้นของอนุภาคกับน้ำโดยปริมาตร 0.015 เปอร์เซ็นต์ 0.010 เปอร์เซ็นต์ 0.005 เปอร์เซ็นต์ และน้ำ

2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

การศึกษาคูณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการไหลของการฉีดกระทบของของไหลนาโนในครีประบายความร้อนที่มีช่องการไหลขนาดเล็กจิ๋ว เป็นการศึกษาที่มีขอบเขตที่กว้าง และมีรายละเอียดมาก ในงานวิจัยได้ทำการศึกษาได้บางส่วนเท่านั้น เพราะว่ามีขีดจำกัดในด้านอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองในการเก็บข้อมูล ทำให้ไม่สามารถศึกษาการถ่ายเทความร้อนครอบคลุมได้ทั้งหมด ในอนาคตอาจมีการเพิ่มเติมเงื่อนไขหรืออุปกรณ์อย่าง เช่น

- 1 อาจทำการเพิ่มอัตราการไหลของของไหลให้สูงขึ้น
- 2 อาจทำการลดอัตราการไหลของของไหลให้ลดลงเพื่อศึกษาผลการฉีดกระทบที่ความเร็วต่ำ
- 3 อาจทำการลดขนาดช่องไหลให้เล็กลงสู่ระดับ Nanoscale เพื่อทำการศึกษการถ่ายเทความร้อนโดยการพาของครี
- 4 อาจทำการศึกษาถึงผลกระทบในกรณีที่อุณหภูมิทางเข้าของระบบไม่คงที่ และอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงสุด

5 อาจออกแบบให้ตัวครีบริบมีรูปแบบชนิดอื่น ๆ โดยใช้ฐานครีบริบ และชุดให้ความร้อน (Heater) ตัวเดียวกันเพื่อศึกษารูปทรง และขนาดของครีบริบได้หลากหลาย

6 อาจออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนแบบจืดโดยใช้ครีบริบขนาดเล็กลงกว่างานวิจัยนี้

7 อาจออกทำการทดลองเพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนโดยใช้ครีบริบบางชนิดขนาดเล็กขึ้นเดิมแต่เปลี่ยนสารทำงานเป็นสารทำงานอื่น หรือที่ความเข้มข้นใหม่เพื่อหาจุดที่ดีที่สุด

8 สารทำงานของไหลนาโนทดลองเพิ่มสารกันตกตะกอนแทน เครื่องอัลตราโซนิกส์

9 อาจทำการหาความดันลด (Pressure drop) ในระบบเพิ่มเติม





บรรณานุกรม

- ไพศาล นาผล. (2558). *การถ่ายเทความร้อน และการระบายความร้อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ทริปเพิ้ล เอ็ดยูเคชั่น.
- ราชบัณฑิตยสถาน. (2551). *พจนานุกรมศัพท์พลังงาน อังกฤษ-ไทย ฉบับราชบัณฑิตยสถาน*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์คอมฟอร์ม.
- กรมวิชาการ กระทรวงศึกษาธิการ. (2532). *แนวปฏิบัติเกี่ยวกับการแปลหนังสือ*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: กรมวิชาการ กระทรวงศึกษาธิการ.
- Donald A. Drew; & Stephen L. Passman. (1999). *Theory of Multicomponent Fluids*. Edition Number 1. Publisher Springer-Verlag New York.
- Bock Choon Pak; & Young I. Cho. (1998). Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particle. *Experimental Heat Transfer*. 11: 151–170.
- Yimin Xuan; & Wilfried Roetzel. (2000). Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 43: 3701–3707.
- Gilles Roy; et al. (2004). Numerical investigation of laminar flow and heat transfer in a radial flow cooling system with the use of nanofluids. *Superlattices and Microstructures*. 35: 497–511.
- W. Yu; & S.U.S. Choi. (2004). The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: A renovated Hamilton–Crosser model. *Journal of Nanoparticle Research*. 6: 355–361.
- Samy Joseph Palm; et al. (2006). Heat transfer enhancement with the use of nanofluids in radial flow cooling systems considering temperature-dependent properties. *Applied Thermal Engineering*. 26: 2209–2218.
- Cong Tam Nguyen; et al. (2007). Heat transfer enhancement using Al_2O_3 –water nanofluid for an electronic liquid cooling system. *Applied Thermal Engineering*. 27: 1501–1506.
- A.G. Agwu Nnanna; et al. (2009). Assessment of thermoelectric module with nanofluid heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*. 29: 491–500.
- Cong Tam Nguyen; et al. (2009). An experimental study of a confined and submerged impinging jet heat transfer using Al_2O_3 –water nanofluid. *International Journal of Thermal Sciences*. 48: 401–411.
- Iulian Gherasim; et al. (2009). Experimental investigation of nanofluids in confined laminar radial flows. *International Journal of Thermal Sciences*. 48: 1486–1493.

- Paisarn Naphon; et al. (2009). Numerical investigation on the heat transfer and flow in the mini-fin heat sink for CPU. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 36: 834–840.
- Paisarn Naphon; & Somchai Wongwises. (2010). Investigation on the jet liquid impingement heat transfer for the central processing unit of personal computers. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 37: 822–826.
- Yu–Feng; & Clement Kleinstreuer. (2010). Nanofluid convective heat transfer in a parallel-disk system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 53: 4619–4628.
- Yue–Tzu Yang; & Feng–Hsiang Lai. (2010). Numerical study of heat transfer enhancement with the use of nanofluids in radial flow cooling system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 53: 5895–5904.
- Iulian Gherasim; et al. (2011). Heat transfer enhancement and pumping power in confined radial flows using nanoparticle suspensions (nanofluids). *International Journal of Thermal Sciences*. 50: 369–377.
- Nandy Putra; et al. (2011). Application of nanofluids to a heat pipe liquid–block and the thermoelectric cooling of electronic equipment. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 35: 1274–1281.
- Paisarn Naphon; & Setha Klangchart. (2011). Effects of outlet port positions on the jet impingement heat transfer characteristics in the mini-fin heat sink. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 38: 1400–1405.
- Vimal Kumar; et al. (2011). Single-phase fluid flow and mixing in microchannels. *Chemical Engineering Science*. 66: 1329–1373.
- Yue–Tzu Yang; & Feng Hsiang Lai. (2011). Numerical investigation of cooling performance with the use of Al_2O_3 /water nanofluids in a radial flow system. *International Journal of Thermal Sciences*. 50: 61–72.
- Amir Shalchi–Tabrizi; & Hamid Reza Seyf. (2012). Analysis of entropy generation and convective heat transfer of Al_2O_3 nanofluid flow in a tangential micro heat sink, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 55: 4366–4375.
- Dorin Lelea. (2012). The tangential micro-heat sink with multiple fluid inlets, *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 39: 190–195.
- Gilles Roy; et al. (2012). Heat transfer performance and hydrodynamic behavior of turbulent nanofluid radial flows. *International Journal of Thermal Sciences*. 58: 120–129.

- H.A. Mohammed; et al. (2012). Thermal and hydraulic characteristics of turbulent nanofluids flow in a rib–groove channel, *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 39: 1584–1594.
- Hana Bellerova; et al. (2012). Spray cooling by solid jet nozzles using alumina/water nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences*. 62: 127–137.
- Mauricio Giraldo; et al. (2012). Heat transfer in nanofluids: A computational evaluation of the effects of particle motion, *Applied Mathematics and Computation*. 219: 3308–3315.
- M. Rahimi-Esbo; et al. (2012). Numerical study of turbulent forced convection jet flow in a converging sinusoidal channel, *International Journal of Thermal Sciences*. 59: 176–185.
- Oronzio Manca; et al. (2012). A numerical study of nanofluid forced convection in ribbed channels. *Applied Thermal Engineering*. 37: 280–292.
- P. Selvakumar; & S. Suresh. (2012). Convective performance of CuO/water nanofluid in an electronic heat sink, *Experimental Thermal and Fluid Science*. 40: 57–63.
- Qiang Li; et al. (2012). Experimental investigation of submerged single jet impingement using Cu–water nanofluid. *Applied Thermal Engineering*. 36: 426–433.
- Sourav Mitra; et al. (2012). Study on boiling heat transfer of water–TiO₂ and water–MWCNT nanofluids based laminar jet impingement on heated steel surface. *Applied Thermal Engineering*. 37: 353–359.
- Tong Bou Chang; et al. (2012). Effects of particle volume fraction on spray heat transfer performance of Al₂O₃–water nanofluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 55: 1014–1021.
- Weerapun Duangthongsuk; & Somchai Wongwises. (2012). A dispersion model for predicting the heat transfer performance of TiO₂–water nanofluids under a laminar flow regime. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 55: 3138–3146.
- A.E. Kabeel; et al. (2013). The effect of using nano-particles on corrugated plate heat exchanger performance, *Applied Thermal Engineering*. 52: 221–229.
- B. Jaber; et al. (2013). Experimental investigation on heat transfer enhancement due to Al₂O₃–water nanofluid using impingement of round jet on circular disk. *International Journal of Thermal Sciences*. 74: 199–207.

- Hamid Reza Seyfi; et al. (2013). Three-dimensional numerical study of heat-transfer enhancement by nano-encapsulated phase change material slurry in microtube heat sinks with tangential impingement. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 56: 561–573.
- Michal Drzazga; et al. (2013). Influence of Nonionic Surfactant Addition on Drag Reduction of Water Based Nanofluid in a Small Diameter Pipe. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 21: 104–108.
- Sandip Sarkar; et al. (2013). Mixed convective flow stability of nanofluids past a square cylinder by dynamic mode decomposition. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 44: 624–634.
- Thomas R. Barrett; et al. (2013). Investigating the use of nanofluids to improve high heat flux cooling systems. *Fusion Engineering and Design*. 88: 2594–2597.
- T. Yousefi; et al. (2013). An experimental investigation on the impingement of a planar jet of Al_2O_3 -water nanofluid on a V-shaped plate. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 50: 114–126.
- Yimin Xuan; et al. (2013). The effect of surfactants on heat transfer feature of nanofluids, *Experimental Thermal and Fluid Science*. 46: 259–262.
- Ampere A. Tseng; et al. (2014). Effects of Titania nanoparticles on heat transfer performance of spray cooling with full cone nozzle. *Applied Thermal Engineering*. 62: 20–27.
- Claudio Cianfrini; et al. (2014). Buoyancy-induced convection in Al_2O_3 /water nanofluids from an enclosed heater. *European Journal of Mechanics – B/Fluids*. 48: 123–134.
- M.A.Y. Bakier; et al. (2014). Flow in open C-shaped cavities: How far does the change in boundaries affect nanofluid?. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 17: 116–130.
- M. Goodarzi; et al. (2014). Investigation of nanofluid mixed convection in a shallow cavity using a two-phase mixture model. *International Journal of Thermal Sciences*. 75: 204–220.
- Majid Saidi; & Gholamreza Karimi. (2014). Free convection cooling in modified L-shape enclosures using copper-water nanofluid. *Energy*, 70: 251–271.
- Peng Tie; et al. (2014). Heat transfer performance of Cu-water nanofluids in the jet arrays impingement cooling system. *International Journal of Thermal Sciences*. 77: 199–205.
- Saad Ayub Jajja; et al. (2014). Water cooled minichannel heat sinks for microprocessor cooling: Effect of fin spacing. *Applied Thermal Engineering*. 64: 76–82.

- Unal Akdag; et al. (2014). Heat transfer enhancement with laminar pulsating nanofluid flow in a wavy channel. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 59: 17–23.
- V. Leela Vinodhan; & K.S. Rajan. (2014). Computational analysis of new microchannel heat sink configurations. *Energy Conversion and Management*. 86: 595–604.
- Zan Wu; & Bengt Sunden. (2014). On further enhancement of single-phase and flow boiling heat transfer in micro/mini-channels, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 40: 11–27.
- Liang Gong; et al. (2015). Numerical study on layout of micro-channel heat sink for thermal management of electronic devices. *Applied Thermal Engineering*. 88: 480–490.
- Liping Geng; et al. (2015). Heat transfer characteristics of impinging jets: The influence of unsteadiness with different waveforms. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 66: 105–113.
- Guodong Xia; et al. (2015). Experimental and numerical study of fluid flow and heat transfer characteristics in microchannel heat sink with complex structure. *Energy Conversion and Management*. 105: 848–857.
- Mohamed A. Teamah; & Mohamed M. Khairat. (2015). Heat transfer due to impinging double free circular jets. *Alexandria Engineering Journal*. 54: 281–293.
- Mauro Lomascolo; et al. (2015). Review of heat transfer in nanofluids: Conductive, convective and radiative experimental results. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 43: 1182–1198.
- Mayank Modak; et al. (2015). Experimental investigation of heat transfer characteristics of the hot surface using Al_2O_3 –water nanofluids. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 91: 104–113.
- Reza Davarnejad; & Maryam Jamshidzadeh. (2015). CFD modeling of heat transfer performance of MgO –water nanofluid under turbulent flow. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 18: 536–542.
- Rabah Nebbati; & Mahfoud Kadja. (2015). Study of Forced Convection of a Nanofluid Used as a Heat Carrier in a Microchannel Heat Sink. *Energy Procedia*. 74: 633–642.
- Satya V. Ravikumar; et al. (2015). Heat transfer enhancement using air-atomized spray cooling with water– Al_2O_3 nanofluid, *International Journal of Thermal Sciences*. 96: 85–93.
- T. Yousefi; et al. (2015). Heat transfer enhancement in T–Tube convertor concept using nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences*. 91: 125–132.

- Yun Yue; et al. (2015). Analysis of performances of a manifold microchannel heat sink with nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*. 89: 305–313.
- Yue–Tzu Yang; et al. (2015). Numerical simulation and optimization of turbulent nanofluids in a three–dimensional rectangular rib–grooved channel. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 66: 71–79.
- Ahmed A. Hussien; et al. (2016). Single–phase heat transfer enhancement in micro/mini–channels using nanofluids: Theory and applications. *Applied Energy*. 164: 733–755.
- Aparesh Datta; et al. (2016). Numerical investigation of heat transfer in microchannel using inclined longitudinal vortex generator. *Applied Thermal Engineering*. 108: 1008–1019.
- Ashok K. Barik; et al. (2016). Numerical investigation of heat transfer enhancement from a protruded surface by cross–flow jet using Al_2O_3 –water nanofluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 101: 550–561.
- Mohamed A. Teamah; et al. (2016). Numerical and experimental investigation of flow structure and behavior of nanofluids flow impingement on horizontal flat plate. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 74: 235–246.
- A.M. Tiara; et al. (2016). Heat transfer in jet impingement on a hot steel surface using surfactant –based Cu–Al layered double hydroxide nanofluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 101: 825–833.
- Ali Radwan; et al. (2016). Performance enhancement of concentrated photovoltaic systems using a microchannel heat sink with nanofluids. *Energy Conversion and Management*. 119: 289–303.
- Benjamim Herrmann–Priesnitz; et al. (2016). Thermal design exploration of a swirl flow microchannel heat sink for high heat flux applications based on numerical simulations. *Applied Thermal Engineering*. 109: 22–34.
- Bin Sun; et al. (2016). Heat transfer of Single Impinging Jet with Cu Nanofluids. *Applied Thermal Engineering*. 102: 701–707.
- B. Yousefi–Lafouraki; et al. (2016). Entropy generation analysis of a confined slot impinging jet in a converging channel for a shear thinning nanofluid. *Applied Thermal Engineering*. 105: 675–685.
- D. Toghraie. (2016). Numerical thermal analysis of water's boiling heat transfer based on a turbulent jet impingement on heated surface. *Physical E: Low–dimensional Systems and Nanostructures*. 84: 454–465.

- G.D. Xia; et al. (2016). The characteristics of convective heat transfer in microchannel heat sinks using Al_2O_3 and TiO_2 nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 76: 256–264.
- H. Ahmadi; et al. (2016). Numerical investigation of semi-confined turbulent slot jet impingement on a concave surface using an Al_2O_3 – water nanofluid. *Applied Mathematical Modelling*. 40: 1110–1125.
- M. Khoshvaght–Aliabadi; et al. (2016). Experimental investigation of water based nanofluid containing copper nanoparticles across helical microtubes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 70: 84–92.
- Manoj K. Singh; et al. (2016). Effect of nanofluid concentration and composition on laminar jet impinging cooling of heated steel plate. *Applied Thermal Engineering*. 100: 237–246.
- M. Sheikholeslami; & D.D. Ganji. (2016). Nanofluid convective heat transfer using semi analytical and numerical approaches: A review. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 65: 43–77.
- Mustafa Turkyilmazoglu. (2016). Flow of nanofluid plane wall jet and heat transfer. *European Journal of Mechanics – B/Fluids*. 59: 18–24.
- Oronzio Manca; et al. (2016). Thermal and fluid dynamic behaviors of confined laminar impinging slot jets with nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 70: 15–26.
- Omidreza Sadeghi; et al. (2016). Heat transfer and nanofluid flow characteristics through a circular tube fitted with helical tape inserts. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 71: 234–244.
- Prasanth Anand Kumar Lam; & K. Arul Prakash. (2016). Thermodynamic investigation and multi- objective optimization for jet impingement cooling system with Al_2O_3 / water nanofluid. *Energy Conversion and Management*. 111: 38–56.
- Sadik Kakaç; & Anchasa Pramuanjaroenkij. (2016). Single–phase and two–phase treatments of convective heat transfer enhancement with nanofluids – A state–of–the–art review. *International Journal of Thermal Sciences*. 100: 75–97.
- Syed Zulfiqar Ali Zaidi; & Syed Tauseef Mohyud–Din. (2016). Convective heat transfer and MHD effects on two-dimensional wall jet flow of a nanofluid with passive control model. *Aerospace Science and Technology*. 49: 225–230.

- Y.F. Li; et al. (2016). Characteristics of laminar flow and heat transfer in microchannel heat sink with triangular cavities and rectangular ribs. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 98: 17–28.
- A.M. Tiara; et al. (2017). Heat transfer enhancement using surfactant-based alumina nanofluid jet from a hot steel plate. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 89: 295–303.
- Cong Qi; et al. (2017). Experimental study on thermo-hydraulic performances of CPU cooled by nanofluids. *Energy Conversion and Management*. 153: 557–565.
- Fatih Selimefendigil; & Hakan F. Oztop. (2017). Jet impingement cooling and optimization study for a partly curved isothermal surface with CuO– water nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 89: 211–218.
- K. Wongcharee; et al. (2017). Influence of CuO/water nanofluid concentration and swirling flow on jet impingement cooling. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 88: 277–283.
- K. Wongcharee; et al. (2017). Heat transfer of swirling impinging jets with TiO₂– water nanofluids. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 114: 16–23.
- Jizu Lv; et al. (2017). Experimental investigation of free single jet impingement using SiO₂-water nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 84: 39–46.
- Jizu Lv; et al. (2017). Experimental investigation of free single jet impingement using Al₂O₃– water nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 88: 126–135.
- M. Mohib Ur Rehman; et al. (2017). Numerical study on free-surface jet impingement cooling with nanoencapsulated phase–change material slurry and nanofluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 109: 312–325.
- N. Sandeep; & I.L. Animasaun. (2017). Heat transfer in wall jet flow of magnetic-nanofluids with variable magnetic field. *Alexandria Engineering Journal*. 56: 263–269.
- Seyed Ebrahim Ghasemi; et al. (2017). Experimental and numerical investigation of circular minichannel heat sinks with various hydraulic diameter for electronic cooling application. *Microelectronics Reliability*. 73: 97–105.
- S. Luhan; et al. (2017). Steady state and transient analytical modeling of non-uniform convective cooling of a microprocessor chip due to jet impingement. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 110: 768–777.

- Xiaoming Huang; et al. (2017). Heat transfer enhancement on a microchannel heat sink with impinging jets and dimples. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 112: 113–124.
- Zhiguo Tang; et al. (2017). Numerical simulation of heat transfer characteristics of jet impingement with a novel single cone heat sink. *Applied Thermal Engineering*. 127: 906–914.





ภาคผนวก

ภาคผนวก

รายการสัญลักษณ์

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	=	ความเร่งอันเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก, 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	=	ความยาวครึ่ง, $m.m$.
L_2	=	ความยาวผิวฐานครึ่งด้านที่ของไหลไม่ไหลผ่าน, $m.m$.
L_3	=	ความยาวผิวฐานครึ่งด้านที่ของไหลไหลผ่าน, $m.m$.
$\dot{m}$	=	อัตราการไหลของมวลของของไหล, kg/s
Nu	=	ค่าเลขนัสเซิลต์ (Nusselt number)
N_t	=	จำนวนครึ่งทั้งหมด
P	=	เส้นรอบรูป, m
p	=	ค่าความดัน, kPa
Pr	=	ค่าเลขพรันด์เทิล (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, °C/W
Re	=	ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Raynolds number)
T	=	อุณหภูมิ, °C
V	=	ปริมาตรการแลกเปลี่ยนความร้อน, m.m. ³
$\dot{V}$	=	ปริมาตรอัตราการไหลของของไหล, m.m. ³ /s
W	=	ความกว้าง, m.m.
X_t	=	ระยะห่างของครีปที่ของไหลไหลผ่าน, m.m.
$X_{fd,h}$	=	ความยาวทางอุทกพลวัต, m
$X_{fd,t}$	=	ความยาวทางเข้าของความร้อน, m

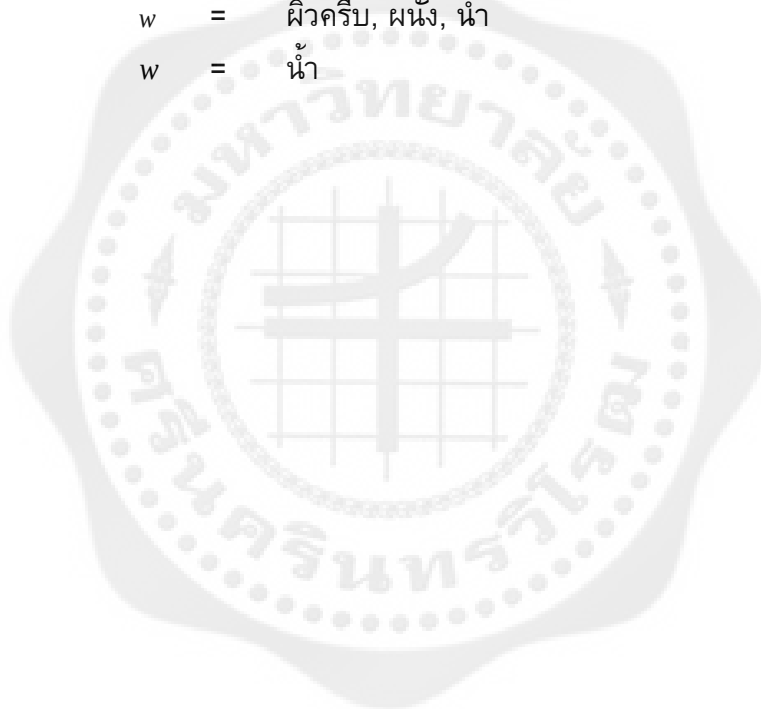
สัญลักษณ์ภาษากรีก

u_m	=	ความเร็วเฉลี่ย, m/s
v	=	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

ae_v	=	ค่าเฉลี่ย
b	=	ฐานครีป
$cond$	=	การนำความร้อน
$conv$	=	การพาความร้อน

<i>elec</i>	=	ไฟฟ้า
<i>f</i>	=	ในส่วนผิวของกริป
<i>fd</i>	=	เงื่อนไขพัฒนาเต็มรูป
<i>in</i>	=	ทางเข้า
<i>m</i>	=	ค่าเฉลี่ย
<i>nf</i>	=	ของไหลนาโน
<i>out</i>	=	ทางออก
<i>p</i>	=	ในส่วนบริเวณฐานกริป, อนุภาคของวัตถุ
<i>t</i>	=	ค่าโดยรวม
<i>tank</i>	=	ถังหล่อเย็น
<i>w</i>	=	ผิวกริป, ผืน, น้ำ
<i>w</i>	=	น้ำ





ประวัตย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นายเลิศศักดิ์ นาครินทร์
วันเดือนปีเกิด	28 กันยายน 2509
สถานที่เกิด	อ.ไพรบึง จ.ศรีสะเกษ
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	47/2 หมู่ 7 ต. บางไผ่ อ. เมืองฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา 24000
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	วิศวกรความปลอดภัย อาวุโส
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	บริษัท พีทีที โกลบอล เคมิคอล จำกัด (มหาชน)

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2523	ประถมศึกษา (ป.6) จากโรงเรียนชุมชนบ้านไพรบึง
พ.ศ. 2526	มัธยมศึกษาตอนต้น (ม.3) จากโรงเรียนไพรบึงวิทยาคม
พ.ศ. 2529	ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปว.ช.) สาขาวิชาช่างยนต์ จากวิทยาลัยเทคนิคศรีสะเกษ
พ.ศ. 2531	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปว.ส.) สาขาวิชาช่างเทคนิค ยานยนต์ จากวิทยาลัยเทคนิคอุบลราชธานี
พ.ศ. 2537	วิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต จากวิทยาลัยครูฉะเชิงเทรา
พ.ศ. 2546	ประกาศนียบัตร ทักษะวิศวกรรมเคมีแบบบูรณาการ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
พ.ศ. 2547	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
พ.ศ. 2549	ประกาศนียบัตร วิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
พ.ศ. 2552	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
พ.ศ. 2560	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ปร.ด.) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ