



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาการเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยการไหล
แบบหมุนวน

A Study of Swirl Flow on Heat Transfer Coefficient Enhancement in Square Duct

นามผู้วิจัย นายอักรพล หวานระรื่น

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ชาลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์สมาน เจริญกิจพูลผล, M.Eng.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ชาลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาการเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ด้วยการไหลแบบหมุนวน

A Study of Swirl Flow on Heat Transfer Coefficient Enhancement in Square Duct

โดย

นายอักรพล หวานระรื่น

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อัครพล หวานระรื่น 2553: การศึกษาการเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ด้วยการไหลแบบหมุนควง ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D. 66 หน้า

งานวิจัยนี้นำเสนอการปรับปรุงสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของการไหลแบบหมุนควงในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาด $100 \times 100 \times 1000 \text{ mm}^3$ โดยการใช้ผลึกเหลว โดยในการทดลอง จะมีการฉาบผลึกเหลวที่พื้นผิวด้านล่างของผนังท่อ เพื่อใช้ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผนังท่อ แผ่นทำความร้อนจะถูกติดตั้งที่พื้นผิวด้านล่างของท่ออากาศ เพื่อที่จะให้ความร้อนกับอากาศที่ค่าฟลักซ์ความร้อนที่อากาศที่มีอุณหภูมิ 20°C จะไหลผ่านหัวฉีดขนาด 17 mm หัวฉีดนี้ ใช้สร้างการไหลแบบหมุนควงภายในท่อ โดยมุมระหว่างหัวฉีดและการไหลหลักมีค่า 45° , 60° และ 90° นอกจากนี้ หัวฉีดยังถูกติดตั้งให้เอียงทำมุม 30° จากผนังท่อ เพื่อที่จะสร้างการไหลหมุนควงแบบพุ่งชน (jet-like) และการไหลแบบกวกระแส (wake-like) ที่ระยะ 1000 mm หลังจากทางเข้า นอกจากนี้ ในงานวิจัยนี้ได้มีการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เพื่อจำลองลักษณะการไหลของอากาศภายในท่อ โดยมีการใช้ค่าข้อมูล แบบปริมาตรฐานสี่เหลี่ยมจำนวนประมาณ $200,000$ - $800,000$ เซลล์ เงื่อนไขค่าขอบได้ถูกกำหนดให้เป็นความเร็วที่ทางเข้าที่มีขนาด 2 - 3 m/s ซึ่งแสดงถึงค่าเลขเรย์โนลด์ $13,000$ - $20,000$ ขณะที่อากาศที่ฉีดออกจากหัวฉีด มีอัตราการไหลโดยมวลเทียบกับอัตราการไหลโดยมวลในท่อ เท่ากับ $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.09$ และ $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$ ที่ทางออกจะถูกกำหนดเป็น out flow ที่พื้นผิวด้านล่างของท่อ มีการให้ความร้อนโดยกระบวนการ ฟลักซ์ความร้อนคงที่ แบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้ในงานวิจัยนี้เลือกเป็น standard $k - \varepsilon$ model เพื่อใช้จำลองการไหลแบบคงที่ ที่อัดตัวไม่ได้ แบบ 3 มิติ ค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่กระจายอยู่บนพื้นผิวของท่อกับอุณหภูมิของก้อนอากาศ จะถูกนำมาใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน จากผลการวิเคราะห์พบว่าผลการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและลักษณะการไหลที่ได้จากโปรแกรมพลศาสตร์เชิงคำนวณ มีค่าสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาถึงลักษณะการกระจายอุณหภูมิต่อผนังท่อพบว่า การไหลแบบหมุนควง จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของการไหลของอากาศในท่อมีค่าเพิ่มขึ้น และการไหลหมุนควงแบบ wake-like จะมีค่าสมรรถนะทางความร้อนมากกว่าการไหลหมุนควงแบบ jet-like โดยค่าสมรรถนะทางความร้อนของการไหลหมุนควงแบบ wake-like มีค่าสูงถึง 1.39 ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ได้ต่อไป

Akkaraphon Wanrareun 2010: A Study of Swirl Flow on Heat Transfer Coefficient Enhancement in Square Duct. Master of Engineering (Mechanical Engineering),
Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering.
Thesis Advisor: Associate Professor Chawalit Kittichaikarn, Ph.D. 66 pages.

This research focuses on the enhancement of heat transfer coefficient of swirl flow in a square duct using thermochromic liquid crystals. The experiment was performed in the square duct of $100 \times 100 \times 1000 \text{ mm}^3$. Inside duct, thermochromic liquid crystal was sprayed on bottom wall to detect the variation of temperature on the wall surface. The heater was installed below the bottom wall of air duct to provide a constant heat flux. A 20°C air flows through the 17 mm diameter injectors which were used to make the swirl flow and were set up at different angles. The angles between injector and flow direction were 45°C , 60°C and 90°C . Also, the injectors were inclined at 30°C from duct wall to generate a wake-like swirl flow and jet-like swirl flow at the distance of 1000 mm after the inlet. Computational Fluid Dynamics software was also used to simulate the flow field inside duct. Details of swirl flow therefore were revealed. The 200,000-800,000 cells of tetrahedral elements were created over the physical model of the air. The boundary conditions were set to be velocity of 2-3 m/s that refers to the Reynolds number of 13000-20000 at the inlet while the flow from injector was set to be $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.09$ and $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$. At the outlet was set to be outflow. The temperature at the bottom surface of the duct was heated by the constant heat flux method. Turbulence model was chosen as standard $k - \varepsilon$ model over the 3D-steady incompressible domain. Heat transfer coefficient was calculated from the difference of temperature distribution over heated surface and bulk air temperature. From the simulation obtained, it was found that the predicted results for the heat transfer coefficient and flow characteristics were similar to those obtained from the experiment. Moreover from the contours of surface temperature obtained, it was found that the swirl flow increased convective heat transfer coefficient of air flow in duct and the wake-like swirl flow gave a higher thermal performance than jet-like swirl flow. Thermal performance of the wake-like swirl flow was 1.39. The results obtained can be used to enhance thermal performance of the solar air heater.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต กิตติชัยการ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ได้ให้ความรู้ให้คำปรึกษา และได้ให้ความช่วยเหลือในทุกๆ เรื่องตลอดการทำงานวิจัย อีกทั้งยังให้ความอบอุ่นและความเข้าใจ เสมือนข้าพเจ้าเป็นสมาชิกในครอบครัว เมื่อข้าพเจ้าเดินออกนอกเส้นทางอาจารย์เป็นคนให้โอวาท จนกลับมาทำงานวิจัยจนเสร็จสมบูรณ์ รองศาสตราจารย์ สมาน เจริญกิจพูลผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับงานวิจัย อาจารย์ ดร.อัญญา วงษ์โต ประธานการสอบปากเปล่าขั้นสุดท้าย และรองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์ ผู้ทรงคุณวุฒิจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่สละเวลาให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ อีกทั้งตรวจสอบวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนคุณภาพงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา เพื่อการตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติและนานาชาติ รวมถึงสถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RDPT) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ให้ความเอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับการทดลองและวิจัย

ขอขอบคุณ พี่อูฐ มาไฟโรจน์ พาลีบุตร ที่ได้ให้ความรู้และความเอื้อเฟื้อเกี่ยวกับอุปกรณ์การทดลอง จนทำให้งานวิจัยนี้ดำเนินต่อไปได้อย่างราบรื่น และขอขอบคุณเพื่อนห้อง CML ทุกคน ที่ให้ความเป็นกันเอง ให้คำแนะนำ ความรู้ และสนุกสนานกันได้แม้ยามเกิดปัญหา ทำให้ผ่านพ้นปัญหาต่างๆ ไปได้อย่างมีความสุข

ขอขอบคุณ วีรชัย ชัยวรพฤกษ์ ผู้อยู่เบื้องหลังความสำเร็จ คอยช่วยเหลือทุกอย่างที่ช่วยได้ เป็นเพื่อนที่อยู่เคียงข้างตลอด จนผ่านพ้นปัญหาต่างๆ ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ ศรสวรรค์ ภูพนมภูมิ ที่ให้กำลังใจ และเป็นผู้ช่วยในการทำการทดลอง ตั้งแต่เริ่มต้นจนเสร็จการทดลอง ทำให้งานวิจัยนี้มีความก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว

และสุดท้ายขอขอบคุณครอบครัวของข้าพเจ้าที่เคียงข้าง ให้กำลังใจ และทุนในการศึกษา ทำให้ข้าพเจ้าทำงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

อักรพล หวานระรื่น

เมษายน 2553

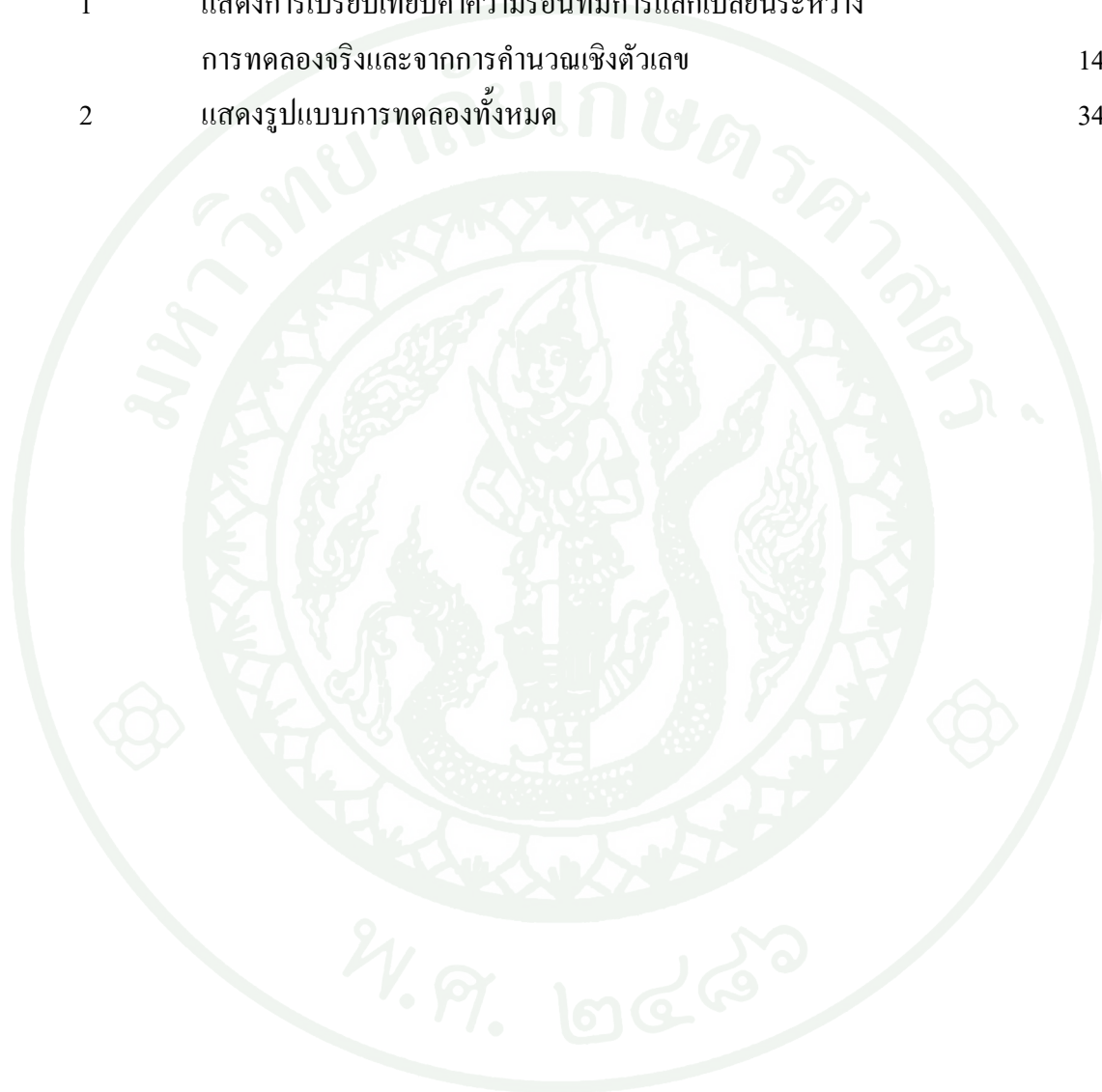
สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	22
อุปกรณ์	22
วิธีการ	23
ผลและวิจารณ์	38
ผล	38
วิจารณ์	59
สรุปและข้อเสนอแนะ	61
สรุป	61
ข้อเสนอแนะ	62
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	63
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	66

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงการเปรียบเทียบค่าความร้อนที่มีการแลกเปลี่ยนระหว่าง การทดลองจริงและจากการคำนวณเชิงตัวเลข	14
2	แสดงรูปแบบการทดลองทั้งหมด	34



สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงภาพของเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์	5
2	แสดงการติดตั้งสิ่งกีดขวางทางไหลด้วยครีบบนผนัง	7
3	แสดงการติดตั้งสิ่งกีดขวางทางไหลด้วยครีบบนผนัง, เฝ้าย และขวางทางไหล	8
4	แสดงการติดตั้งสิ่งกีดขวางทางไหลด้วยครีบบนผนังแบบขวางทางไหล และ V-shape	8
5	แสดงการติดตั้งสิ่งกีดขวางทางไหลด้วยครีบบนผนังแบบครีบบัดผนังที่มุมใดๆ	9
6	แสดงการติดตั้งสิ่งกีดขวางทางไหลด้วยครีบบนผนังและมีการเจาะช่อง	9
7	แสดงการติดตั้งสิ่งกีดขวางทางไหลด้วยครีบบนผนังแบบครีบบัดผนังและ มีการเจาะช่อง	10
8	แสดงใบพัดแบบต่างๆ	10
9	แสดงการกระจายอุณหภูมิบนผิวท่ออากาศ	14
10	แสดงการแสดงสีและค่า Hue ที่อุณหภูมิต่างๆ	15
11	แสดงการจัดเรียงโมเลกุลของผลึกเหลวแบบ Cholesteric	16
12	แสดงความยาวคลื่นแสงที่ถูกสะท้อนออกมาโดยผลึกเหลว	17
13	แสดงมุมระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและผู้มอง	18
14	แสดงระบบการแสดงสีแบบ RGB	19
15	แสดงระบบการแสดงสีแบบ HIS	19
16	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสีที่สะท้อนจากผลึกเหลวและอุณหภูมิ	20
17	แสดงการกระจายค่าของเลขดัชนีหักเหที่บนผิวท่อที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ	21
18	แสดงแบบจำลองของเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์	24
19	แสดงแบบจำลองของท่อฉีดอากาศ	24
20	แสดงแบบจำลองของอากาศที่ไหลภายในเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์	25
21	แสดงแบบจำลองตาข่ายข้อมูลในโปรแกรม GAMBIT	25
22	แสดงอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดลอง	28
23	แสดงแสดงบริเวณส่วนทดลองที่ถูกจำกัดแสงโดยใช้พลาสติกสีดำ	28

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
24	ชุดอุปกรณ์ควบคุมแผ่นทำความร้อน	29
25	แสดงส่วนทดลองและท่อนีดอากาศ	30
26	แสดงขั้นตอนการเทียบสปีลิคเหลวกับอุณหภูมิ	31
27	แสดงส่วนประกอบของภาพสีแบบ RGB	32
28	แสดงลักษณะ 3 มิติของส่วนประกอบของภาพสีแบบ RGB และ HIS	33
29	แสดงส่วนประกอบของภาพสีแบบ HIS	33
30	แสดงการกระจายตัวความร้อนทุกๆจุดบริเวณผิวด้านล่างของส่วนทดลอง	38
31	แสดงการกระจายตัวของความดันในหลายๆจุดบนก้อนอากาศ	39
32	แสดงค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ยของอากาศ โดยนีดอากาศแบบ Jet-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.09$	40
33	แสดงค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ยของอากาศ โดยนีดอากาศแบบ Jet-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$	40
34	แสดงค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ยของอากาศ โดยนีดอากาศแบบ Wake-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.09$	41
35	แสดงค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ยของอากาศ โดยนีดอากาศแบบ Wake-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$	41
36	แสดงค่าประกอบความเสียดทานของอากาศ โดยนีดอากาศแบบ Jet-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.09$	41
37	แสดงค่าประกอบความเสียดทานของอากาศ โดยนีดอากาศแบบ Jet-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$	42
38	แสดงค่าประกอบความเสียดทานของอากาศ โดยนีดอากาศแบบ Wake-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.09$	42
39	แสดงค่าประกอบความเสียดทานของอากาศ โดยนีดอากาศแบบ Wake-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$	42
40	แสดงสมรรถนะทางความร้อนของอากาศ โดยนีดอากาศแบบ Jet-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.09$	43

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
41	แสดงสมรรถนะทางความร้อนของอากาศ โดยฉีดอากาศแบบ Jet-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$	43
42	แสดงสมรรถนะทางความร้อนของอากาศ โดยฉีดอากาศแบบ Wake-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.09$	43
43	แสดงสมรรถนะทางความร้อนของอากาศ โดยฉีดอากาศแบบ Wake-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$	44
44	แสดงการกระจายตัวความเร็วของอากาศ โดยฉีดอากาศด้วยความเร็ว $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$ ที่มุม 45° การไหลหลัก $Re = 20000$ ด้วยโปรแกรม FLUENT	45
45	แสดงการเปรียบเทียบระยะพิตช์จากภาพแสดงลักษณะการไหลแบบหมุนควง ด้วยการฉีดอากาศแบบ Wake-like และ Jet-like	46
46	แสดงการเปรียบเทียบระยะพิตช์จากภาพแสดงลักษณะการไหลแบบหมุนควง ด้วยการฉีดอากาศด้วยความเร็ว $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.09$ และ $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$	47
47	แสดงการเปรียบเทียบระยะพิตช์จากภาพแสดงลักษณะการไหลแบบหมุนควง ด้วยการฉีดอากาศที่มุม 45° , 60° และ 90°	48
48	แสดงสีของผลึกเหลวโดยการประมวลผลภาพจะอยู่ในรูปของ RGB และ Hue	49
49	แสดงการเทียบสีของผลึกเหลว	50
50	สีของผลึกเหลวจากการทดลอง และภาพตัดส่วนวิเคราะห์	51
51	แสดงภาพต้นฉบับในปริภูมิ RGB	51
52	แสดงสีของภาพในขอบเขต Hue	51
53	แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิ	51
54	แสดงแสดงค่า (a) $T_s(i, j)$, (b) $h(i, j)$ และ (c) $Nu(i, j)$ ในทุกๆ จุดบนผิวท่อโดยบริเวณทางเข้าติดตั้งท่อฉีดอากาศแบบ Wake-like ที่ความเร็ว $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$ เอียงทำมุม 45°	53
55	แสดงการเปรียบเทียบการคำนวณค่าเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยของท่อเรียบจากผลึกเหลว, ทฤษฎี และ CFD	54

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
56	แสดงค่าเลขนัยสเกลต์เฉลี่ยของอากาศ โดยนิตอากาศแบบ Jet-like like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.09$	55
57	แสดงค่าเลขนัยสเกลต์เฉลี่ยของอากาศ โดยนิตอากาศแบบ Jet-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$	55
58	แสดงค่าเลขนัยสเกลต์เฉลี่ยของอากาศ โดยนิตอากาศแบบ Wake-like like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.09$	55
59	แสดงค่าเลขนัยสเกลต์เฉลี่ยของอากาศ โดยนิตอากาศแบบ Wake-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$	56
60	แสดงค่าประกอบความเสียดทานของอากาศ โดยนิตอากาศแบบ Jet-like like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.09$	56
61	แสดงค่าประกอบความเสียดทานของอากาศ โดยนิตอากาศแบบ Jet-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$	56
62	แสดงค่าประกอบความเสียดทานของอากาศ โดยนิตอากาศแบบ Wake-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.09$	57
63	แสดงค่าประกอบความเสียดทานของอากาศ โดยนิตอากาศแบบ Wake-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$	57
64	แสดงสมรรถนะทางควม ร้อนของอากาศ โดยนิตอากาศแบบ Jet-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.09$	57
65	แสดงสมรรถนะทางควม ร้อนของอากาศ โดยนิตอากาศแบบ Jet-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$	58
66	แสดงสมรรถนะทางควม ร้อนของอากาศ โดยนิตอากาศแบบ Wake-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.09$	58
67	แสดงสมรรถนะทางควม ร้อนของอากาศ โดยนิตอากาศแบบ Wake-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$	58

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A_s	=	พื้นที่ที่ทำการศึกษา
B	=	ค่าของสีน้ำเงิน (Blue)
c_p	=	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (kJ/(kgK))
D_h	=	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อสี่เหลี่ยม (m)
f	=	ค่าประกอบความเสียดทาน
f_0	=	ค่าประกอบความเสียดทานของท่อที่ไม่มีการติดตั้งท่อหนีอากาศ
G	=	ค่าของสีเขียว (Green)
H	=	ค่าของสี (Hue)
h	=	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะที่ (W/m ² K)
I	=	ค่าความสว่างของสี (Intensity)
k	=	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ (W/mK)
L	=	ระยะของการวัดความดันลด (m)
$\dot{m}$	=	อัตราการไหลโดยมวลของอากาศ (kg/s)
Nu	=	ค่าเลขนัสเซิลท์
Nu_{ave}	=	ค่าเลขนัสเซิลท์เฉลี่ย
Nu_0	=	ค่าเลขนัสเซิลท์ของท่อที่ไม่มีการติดตั้งท่อหนีอากาศ
ΔP	=	ผลต่างของความดันของส่วนทดลอง (Pa)
q	=	ฟลักซ์ความร้อนของการพาความร้อนที่ผิวของส่วนทดลอง (W/m ²)
R	=	ค่าของสีแดง (Red)
Re	=	ค่าเลขเรย์โนลด์
S	=	ค่าความเข้มของสี (Saturation)
T_{in}	=	อุณหภูมิของอากาศก่อนผ่านส่วนทดลอง (°C)
T_{out}	=	อุณหภูมิของอากาศหลังจากผ่านส่วนทดลอง (°C)
T_m	=	อุณหภูมิของอากาศตามระยะที่ผ่านส่วนทดลอง (°C)
T_s	=	อุณหภูมิผิวของส่วนทดลอง (°C)
TP	=	สมรรถนะทางความร้อน
V	=	ความเร็วของอากาศ (m/s)
ρ	=	ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m ³)
ν	=	ค่าความหนืดจลศาสตร์ของอากาศ (m ² /s)

การศึกษาการเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส
ด้วยการไหลแบบหมุนควง

A Study of Swirl Flow on Heat Transfer Coefficient Enhancement
in Square Duct

คำนำ

พลังงานแสงอาทิตย์นั้นจัดว่าเป็นแหล่งพลังงานที่มีปริมาณมหาศาลได้ถูกนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนในภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย โดยพลังงานแสงอาทิตย์นี้สามารถถูกกักเก็บไว้อย่างง่ายโดยการใช้เครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานความร้อนที่ถูกกักเก็บไว้ภายในเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์นี้จะถูกนำไปใช้ในการอุ่นอากาศที่ไหลผ่านท่อให้อากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งอากาศร้อนนี้จะสามารถนำไปใช้ในการลดความชื้นผลิตผลทางการเกษตร ทำให้สามารถรักษาผลผลิตไม่ให้เน่าเสียในระยะเวลานานขึ้นและเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลผลิตทางการเกษตรและเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกรในการลดค่าใช้จ่ายจากการใช้พลังงานไฟฟ้าหรือพลังงานเชื้อเพลิงอีกด้วย ท่ออุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์นั้น ส่วนใหญ่จะเป็นท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมและมีความใสโดยรอบ เพื่อให้แสงอาทิตย์สามารถส่องผ่านผิวด้านบนของท่อลงมายังแผ่นดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งถูกติดตั้งอยู่ที่ผิวด้านล่างได้ เมื่อมีอากาศไหลผ่านท่อสี่เหลี่ยมนี้ จะทำให้เกิดการพาความร้อนระหว่างบริเวณผิวของแผ่นดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์และอากาศที่ไหลผ่าน ส่งผลให้อากาศที่ไหลผ่านท่อมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics) ซึ่งเป็นองค์ความรู้ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะการไหลของของไหล รวมไปถึงถึงลักษณะการกระจายความเร็ว, อุณหภูมิ และความดันของของไหล เพื่อนำไปสู่การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้อง, น่าเชื่อถือ โดยผลการวิเคราะห์การไหลของของไหลก่อนการสร้างจริงจากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณนั้น จะสามารถนำไปสู่การสร้างชิ้นงานจริงเพื่อลดความเสี่ยงจากการลองผิดลองถูก อีกทั้งยังเป็นการลดต้นทุนในกระบวนการสร้างอีกด้วย งานวิจัยนี้จะมีการนำโปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะการไหลของอากาศภายในเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์จำลอง ให้มีการเพิ่มประสิทธิภาพ

การถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศและแผ่นดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยภายในท่อรูปสี่เหลี่ยมของเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ ขนาดหน้าตัด $100 \times 100 \text{ mm}^2$ ยาว 1000 mm นั้น จะมีการฉีดอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 17 mm เข้าไปเพื่อทำให้อากาศภายในเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์มีความปั่นป่วนเพื่อนำไปสู่การแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีขึ้นระหว่างอากาศและแผ่นดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ ท่อฉีดอากาศจะถูกติดตั้งโดยเอียงทำมุม 45° , 60° และ 90° กับระนาบของแนวการไหล นอกจากนี้ ท่อฉีดอากาศนี้จะติดตั้งให้เอียงขึ้นหรือลงที่ 30° กับพื้นผิวท่อ โดยที่ปลายท่อฉีดอากาศจะมีระยะห่างจากพื้นผิวด้านล่างที่ได้รับความร้อนแตกต่างกัน เพื่อให้เกิดฉีดอากาศแบบพุ่งชน (Jet-like) และฉีดอากาศแบบกวนกระแสน้ำ (Wake-like) การไหลหลักในท่อนี้จะไหลที่เลขเรย์โนลด์ $Re = 13000-20000$ ในขณะที่การไหลควงจะมีการฉีดอากาศออกจากหัวฉีดที่การไหล $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.09$ และ $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$ และมีการกำหนดฟลักซ์ความร้อนคงที่ที่ผิวผิวด้านล่างแทนความร้อนจากแผ่นดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณนี้ จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับความถูกต้องกับผลการทดลองจริงที่สภาวะการทดลองเดียวกัน ลักษณะการกระจายอุณหภูมิที่ผิวของท่อด้านล่างจะถูกตรวจวัดด้วยผลึกเหลว (Thermochromic Liquid Crystal) ที่ถูกฉาบไว้ที่ผิวท่อ โดยผลึกเหลวนี้อจะเป็นสารที่มีการเปลี่ยนลักษณะการจัดเรียงโมเลกุลตามช่วงอุณหภูมิ เมื่อมีแสงขาวตกกระทบไปที่ผิวที่มีการฉาบผลึกเหลวนี้อย่างที่ถูกระงับออกมาจะมีความยาวคลื่นขนาดเดียวกับช่องว่างระหว่างชั้นโมเลกุลของผลึกเหลว ทำให้แสงที่ถูกสะท้อนออกมามีสีตามความยาวคลื่นสีจากแดงไปม่วง โดยสีที่เกิดขึ้นจะถูกนำมาสร้างความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของผิวท่อ ทำให้สามารถนำผลที่ได้จากการทดลองนี้ไปเปรียบเทียบกับความถูกต้องกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณได้ ซึ่งตัวแปรที่ถูกนำมาเปรียบเทียบนี้จะถูกแสดงในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, เลขนัสเซิลต์, ค่าประกอบความเสียดทานและสมรรถนะทางความร้อน

วัตถุประสงค์

1. สามารถประยุกต์ใช้โปรแกรมทางพลศาสตร์เชิงคำนวณมาวิเคราะห์และสร้างแบบจำลองที่น่าเชื่อถือได้
2. สามารถประยุกต์ใช้ผลึกเหลวในงานวิศวกรรมเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน
3. สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนภายในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสของเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ได้

ขอบเขตของงานวิจัย

1. ออกแบบ, จำลอง และสร้างชุดอุปกรณ์ทดลองการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยม
2. การเพิ่มประสิทธิภาพการพาความร้อนภายในท่อสี่เหลี่ยมด้วยการฉีดอากาศให้เกิดการไหลแบบหมุนวน
3. ศึกษาวิธีการใช้โปรแกรมทางพลศาสตร์เชิงคำนวณในการแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดจากการพาความร้อนในท่อสี่เหลี่ยม
4. ศึกษาวิธีการใช้ผลึกเหลวในการแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดจากการพาความร้อนในท่อสี่เหลี่ยม
5. คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะที่และค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะที่เกิดขึ้นภายในท่อสี่เหลี่ยม
6. เปรียบเทียบค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ยที่ได้จากโปรแกรมทางพลศาสตร์เชิงคำนวณกับการทดลองที่ใช้ผลึกเหลว
7. วิเคราะห์ผลการทดลองโดยเปรียบเทียบการพาความร้อนหลังจากทำการติดตั้งท่อฉีดอากาศ

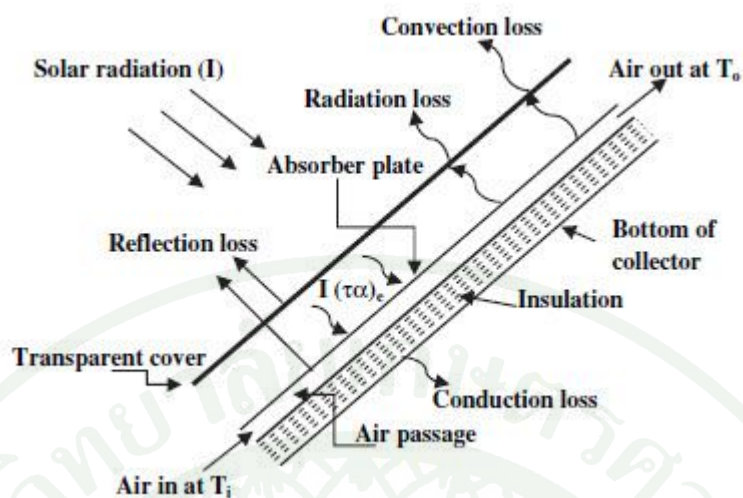
การตรวจเอกสาร

ในปัจจุบันการเกษตรกรรม และอุตสาหกรรมในประเทศไทยกำลังนิยมใช้เครื่องอุ่นอากาศ พลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อประโยชน์ในการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ โดยเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ส่วนใหญ่จะอาศัยท่อรูปเหลี่ยมผืนผ้า หรือรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยเครื่องอุ่นอากาศ พลังงานแสงอาทิตย์ใน จะใช้ท่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยการไหลของอากาศจะไหลเข้าบริเวณทางเข้า อากาศจะไหลผ่านพื้นผิวด้านล่างซึ่งมีแผ่นดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ ในขณะที่ผิวด้านบนของท่อ มีลักษณะโปร่งแสง เพื่อให้แสงอาทิตย์ไหลผ่านไปยังแผ่นดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์จนมีความร้อนสูงขึ้นที่พื้นผิวด้านล่าง ทำให้เกิดการพาความร้อนสู่อากาศที่ไหลภายในท่อ อากาศที่ไหลออกจากท่อบริเวณทางออกจึงมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น กระบวนการทั้งหมดเรียกว่า “การอุ่นอากาศ” ซึ่งอากาศอุ่นที่ได้จากเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในมากมาย ส่วนมากนิยมใช้ในการลดความชื้นในพืชผลทางการเกษตรกรรม และลดความชื้นในอุตสาหกรรมไม้

งานวิจัยนี้จะศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการพาความร้อนของเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ โดยท่อสี่เหลี่ยมของเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ ที่ศึกษาเป็นท่อรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส การเพิ่มประสิทธิภาพการพาความร้อนของเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ในงานวิจัยนี้จะกระทำโดยการทำให้การไหลของอากาศเป็นการไหลแบบหมุนควง เนื่องจากการไหลแบบหมุนควงนั้น จะไปทำลายชั้นไหลหนืดบริเวณพื้นผิวท่อ การไหลแบบหมุนควงจึงทำให้เกิดการเพิ่มประสิทธิภาพการพาความร้อน

1. การวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์

การวิเคราะห์สมรรถนะทางความร้อนและค่าประกอบความเสียหายของเครื่องอุ่นอากาศ พลังงานแสงอาทิตย์ มีความจำเป็นที่จะต้องคำนวณ สำหรับการออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพใน รูปแบบต่างๆ นั้น ซึ่งค่าสมรรถนะทางความร้อนมีความสัมพันธ์กับกระบวนการการถ่ายเท ความร้อนบนแผ่นดูดกลืนพลังงานความร้อน และค่าประกอบความเสียหายมีความสัมพันธ์กับ ค่าความดันลดในท่อ เครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ ดังภาพที่ 1 แสดงการวิเคราะห์อย่างง่าย ของค่าสมรรถนะทางความร้อนและค่าประกอบความเสียหาย รายละเอียดของการออกแบบ และการสร้างสิ่งกีดขวางขวางการไหลรูปแบบต่างๆ นั้น จะถูกอธิบายโดย (Grag and Prakash, 1997)



ภาพที่ 1 แสดงภาพของเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์

1.1 ค่าสมรรถนะทางความร้อน

ลำดับในหาค่าสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์สามารถหาได้จากสมการ Hottel-Whillier-Bliss โดย (Duffie and Beckman, 1980)

$$Q_u = A_c F_R [I(\tau\alpha)_e - U_L(T_i - T_a)] \quad (1)$$

หรือ

$$q_u = Q_u / A_c = F_R [I(\tau\alpha)_e - U_L(T_i - T_a)] \quad (2)$$

อัตราพลังงานที่เพิ่มขึ้นที่ใช้งานได้ของอากาศที่ผ่านท่อของเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ โดยสามารถหาได้จากสมการ

$$Q_u = \dot{m} C_p (T_o - T_i) = h A_c (T_{pm} - T_{am}) \quad (3)$$

อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) สามารถเพิ่มขึ้นได้จากการสร้างสิ่งกีดขวางทางไหลขึ้นบริเวณพื้นผิวของแผ่นดูดกลืนความร้อน และแสดงในแบบไม่มีหน่วยจากสมการค่าเลขนัสเซิลท์ โดย (Duffie and Beckman, 1980)

$$Nu = hL / k \quad (4)$$

ซึ่งประสิทธิภาพความร้อนของเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์สามารถหาได้จากสมการ

$$\eta_{th} = \frac{q_u}{I} = F_R \left[(\tau\alpha)_e - U_L \left(\frac{T_i - T_a}{I} \right) \right] \quad (5)$$

จากสมการที่ (5) เมื่อแสดงกราฟเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง η_{th} และ $(T_i - T_a)/I$ จะได้กราฟเป็นกราฟเส้นตรง ซึ่งความชันของกราฟหาได้โดยค่าของ $F_R(\tau\alpha)_e$ และ $F_R U_L$ ตามลำดับ

1.2 ค่าประกอบความเสียดทาน

ค่าประกอบความเสียดทานของเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์มีความสัมพันธ์กับค่าความดันลดในท่อ (ΔP) ความดันลดนั้น คือ พลังงานสูญเสียจากพัดลม เพื่อขับเคลื่อนอากาศผ่านท่อ ซึ่งความดันลดจะถูกแสดงในรูปไม่มีหน่วย ความสัมพันธ์ของค่าประกอบความเสียดทานจากงานวิจัยของ (Frank and Mark, 2001)

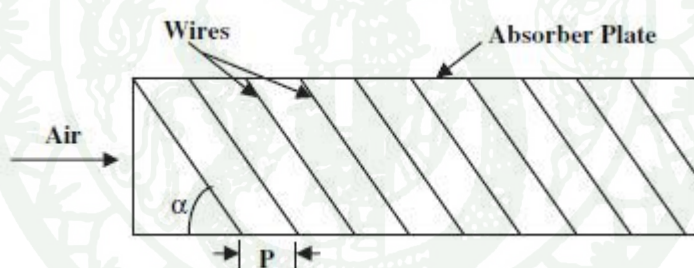
$$f = \frac{(\Delta P) D_h}{2\rho L V^2} \quad (6)$$

2. วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการพาความร้อนของอากาศ

ภายในท่อของเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ จะมีชั้นไหลหนึ่ระหว่างแผ่นดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ และอากาศ ซึ่งเป็นเสมือนกับตัวด้านการถ่ายเทความร้อน แผ่นดูดกลืนที่มีการสร้างสิ่งกีดขวางการไหลเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมสูง ที่จะทำให้เกิดการไหลควงซึ่งจะไปทำลาย

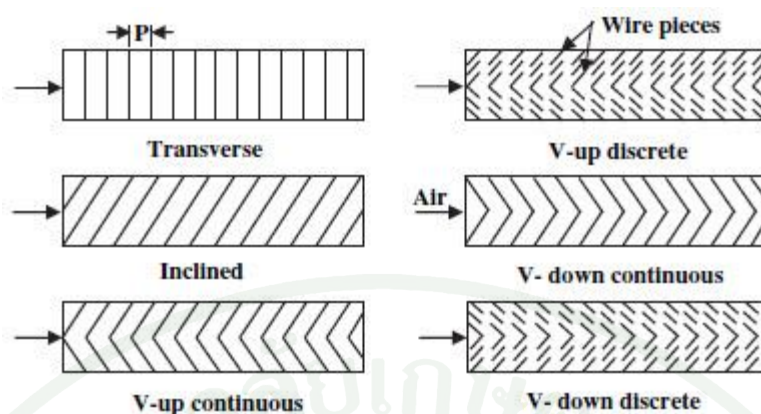
ชั้นไหลหนืดทำให้สามารถลดการด้านการถ่ายเทความร้อน อีกทั้งยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้อีกด้วย การสร้างสิ่งกีดขวางด้วยการสร้างครีบบนพื้น จะทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนเกิดขึ้นไปทำลายชั้นไหลหนืด ทำให้การไหลแยกออกและไม่รวมตัวระหว่างครีบบนพื้นกับครีบบนพื้นถัดไป เป็นผลให้ช่วยลดการด้านการถ่ายเทความร้อน และเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้เป็นอย่างดีอีกด้วย อย่างไรก็ตามในขณะที่มีการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน ก็จะมีค่าประกอบความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน เมื่อมีการติดตั้งสิ่งกีดขวางด้วยการสร้างครีบบนแผ่นดูดกลืนความร้อน จึงมีงานวิจัยเพื่อลดค่าประกอบความเสียดทานโดยการติดตั้งครีบบนแผ่นดูดกลืนความร้อน และมีระยะห่างต่างๆ กัน

ในงานวิจัยของ (Gupta *et al.*, 1997) ทำการติดตั้งสิ่งกีดขวางทางไหลด้วยครีบบนแผ่นดูดกลืนความร้อน ดังภาพที่ 2 โดย $P/e = 10$ จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อนดีที่สุดที่มุม $\alpha = 60^\circ$ โดยค่าของการถ่ายเทความร้อน และค่าประกอบความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น 1.8 และ 2.7 เท่าตามลำดับ



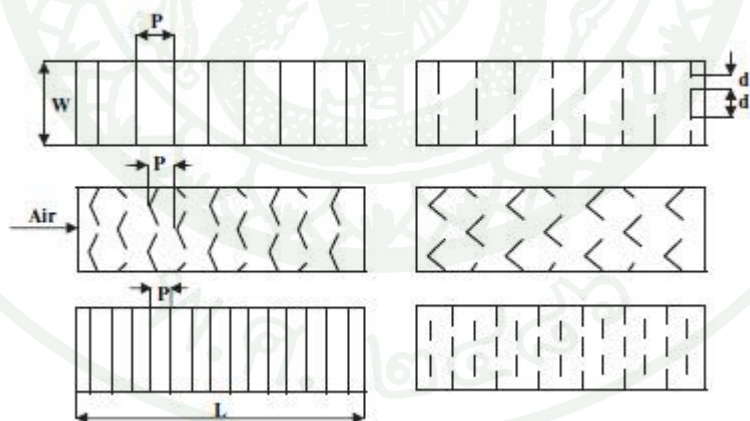
ภาพที่ 2 แสดงการติดตั้งสิ่งกีดขวางทางไหลด้วยครีบบนแผ่นดูดกลืนความร้อน

จากงานวิจัยของ (Karwa, 2003) พบว่า ได้ทำการวิเคราะห์ค่าสมรรถนะทางความร้อนที่ค่าเลขเรย์โนลด์ $Re = 2800-15000$ ซึ่งทำการติดตั้งสิ่งกีดขวางทางไหลด้วยครีบบนแผ่นดูดกลืนความร้อน และขวางทางไหล ดังภาพที่ 3 โดยมีความสูงของครีบบนพื้น $0.0467-0.050$, $P = 10$ และอัตราส่วนของท่อที่ $7.19-7.75$ จากผลการทดลองพบว่าค่าเลขนัสเซิลท์ และค่าประกอบความเสียดทานมีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับท่อเรียบ $65-90\%$ และ $2.68-2.94$ เท่าตามลำดับ โดยครีบบนแผ่น 60° มีค่าดีที่สุด



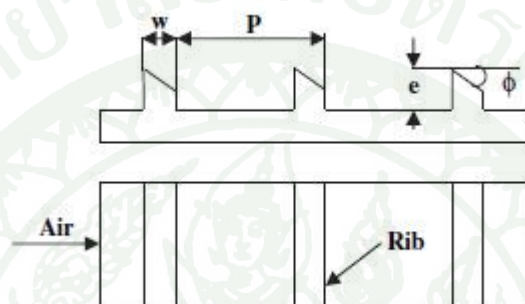
ภาพที่ 3 แสดงการติดตั้งสิ่งกีดขวางทางไหลด้วยครีบบางแบบเฉียง, เอียง และขวางทางไหล

งานวิจัย (Tanda, 2004) ได้ประยุกต์ใช้ผลึกเหลวในการหาค่าการกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนด้วยการติดตั้งสิ่งกีดขวางทางไหลด้วยครีบบางแบบขวางทางไหลและ V-shape ดังภาพที่ 4 จากผลการทดลองพบว่า ค่าเลขนัสเซลล์ที่มีค่าสูงที่สุด คือ ครีบบางขวางทางไหลที่มีค่า $P/e = 4$ โดยที่การติดตั้งครีบบางแบบนี้ยังให้ค่าประกอบความเสียดทานน้อยกว่ารูปแบบอื่นๆ อีกด้วย



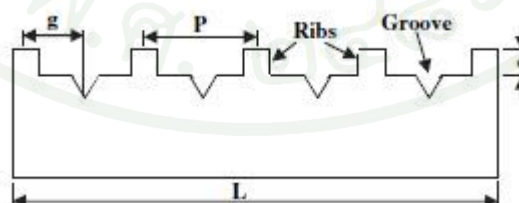
ภาพที่ 4 แสดงการติดตั้งสิ่งกีดขวางทางไหลด้วยครีบบางแบบขวางทางไหล และ V-shape

งานวิจัยของ (Karwa *et al.*, 1999) ทำการทดลองโดยการติดตั้งสิ่งกีดขวางทางไหลด้วยครีบบนแบบครีบบัดเฉียงที่มุม -15° , 0° , 5° , 10° , 15° และ 18° ดังภาพที่ 5 ที่อัตราส่วนของท่อที่ 4.8, 6.1, 7.8, 9.66 และ 12 ที่ $Re = 3000-20000$, e/D 0.0141-0.0328 และ P/e 4.5-8.5 จากผลการทดลองเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพและค่าประกอบความเสียดทานกับท่อเรียบพบว่าการติดตั้งสิ่งกีดขวางทางไหลด้วยครีบบนแบบครีบบัดเฉียงที่มุม 0° ดีที่สุดมีค่าประสิทธิภาพและค่าประกอบความเสียดทานเพิ่มขึ้น 2 เท่า และ 3 เท่าตามลำดับ



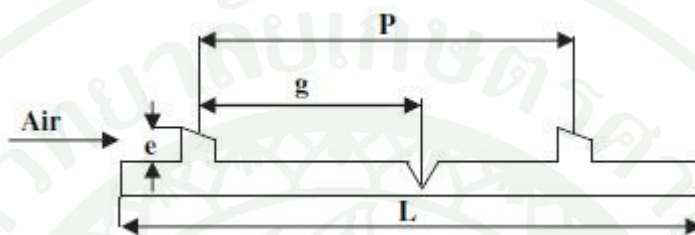
ภาพที่ 5 แสดงการติดตั้งสิ่งกีดขวางทางไหลด้วยครีบบนแบบครีบบัดเฉียงที่มุมใดๆ

จากงานวิจัยของ (Jaurker *et al.*, 2006) ได้ทำการทดลองโดยการติดตั้งสิ่งกีดขวางทางไหลด้วยครีบบนและมีการเจาะร่องดังภาพที่ 6 โดยการทดลองพบว่าการไหลแบบเต็มท่อนก่อนถึงส่วนทดลอง ทำการทดลองที่ $Re = 3000-21000$, e/D 0.0181-0.0363, P/e 4.5-10 และ $g/P = 0.3-0.7$ จากผลการทดลองพบว่าค่าเลขประสิทธิภาพมีค่าสูงกว่าแบบท่อเรียบสูงถึง 2.75 เท่า ซึ่งพบว่าค่าประกอบความเสียดทานก็มีค่าสูงขึ้น 3 เท่าด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 6 แสดงการติดตั้งสิ่งกีดขวางทางไหลด้วยครีบบนและมีการเจาะร่อง

งานวิจัยของ (Layek *et al.*, 2007) ได้ทำการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและค่าประกอบความเสียดทานของเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์โดยการติดตั้งสิ่งกีดขวางทางไหลด้วยครีบบนแบบครีบบัดเฉียงและมีการเจาะร่อง ดังภาพที่ 7 โดยทำการทดลองที่ $Re = 3000-21000$, $P 4.5-10$ และมุม $5-30^\circ$ ระยะร่อง $0.3-0.6$ จากผลการทดลองพบว่าการเพิ่มขึ้นของค่าเลขนัสเซลท์ดีที่สุดที่ระยะร่อง 0.4



ภาพที่ 7 แสดงการติดตั้งสิ่งกีดขวางทางไหลด้วยครีบบนแบบครีบบัดเฉียงและมีการเจาะร่อง

อย่างไรก็ตามนอกจากการติดตั้งสิ่งกีดขวางทางไหลแบบครีบบัดและการเจาะร่องในรูปแบบต่างๆ ซึ่งเป็นการหมุนควงแบบทางอ้อม (Passive) แบบการหมุนควงทางไหลแล้ว ซึ่งเป็นการหมุนควงที่เกิดขึ้นโดยไม่มีพลังงานจากภายนอก ยังมีการหมุนควงแบบทางอ้อม แบบการหมุนควงตามแนวการไหล เช่น การติดตั้งใบพัด ดังภาพที่ 8 ซึ่งวิธีนี้จะทำให้เกิดค่าประกอบความเสียดทานน้อยกว่าการหมุนควงทางไหล



ภาพที่ 8 แสดงใบพัดแบบต่างๆ

โดยงานวิจัยนี้จะทำการทดลองเพิ่มประสิทธิภาพการพาความร้อนโดยทำให้เกิดการไหลแบบหมุนควงแบบทางตรง (Active) เป็นการหมุนควงที่เกิดขึ้นโดยมีพลังงานจากภายนอก โดยการฉีดอากาศ ซึ่งท่อฉีดอากาศจะถูกติดตั้งโดยเอียงทำมุม 45° , 60° และ 90° กับระนาบของแนวการไหล นอกจากนี้ ท่อฉีดอากาศนี้จะติดตั้งให้เอียงขึ้นหรือลงที่ 30° กับพื้นผิวท่อ โดยที่ปลายท่อฉีดอากาศจะมีระยะห่างจากพื้นผิวด้านล่างที่ได้รับความร้อนแตกต่างกัน เพื่อให้เกิดฉีดอากาศแบบพุ่งชน (Jet-like) และฉีดอากาศแบบกวนกระแส (Wake-like) ซึ่งงานวิจัยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการพาความร้อนโดยทำให้เกิดการไหลแบบหมุนควงแบบทางตรง ยังไม่นิยมทำกันอย่างแพร่หลาย จึงต้องมีการวิจัยและพัฒนาต่อไปในอนาคต

3. ระเบียบวิธีที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิ

3.1 การจำลองการไหลของของไหลโดยใช้กระบวนการเชิงตัวเลข

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics-CFD) ได้เข้ามามีบทบาทมากขึ้นในงานวิจัยในปัจจุบัน เนื่องจากการทดลองจะต้องมีการเสียเวลาและการลงทุนสูง ทำให้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นที่นิยมสูงขึ้น (John, 2005) พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณคือ ศาสตร์ที่มีการนำสมการทางด้านคณิตศาสตร์มาใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์การไหลของของไหลทั้งในเชิงกลและเชิงเคมี คุณสมบัติการไหลจะถูกคำนวณจากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่งผ่านความสัมพันธ์ทางด้านคณิตศาสตร์โดยใช้คอมพิวเตอร์ คุณสมบัติทางกลของของไหลที่ถูกคำนวณจะเริ่มต้นจาก 3 สมการพื้นฐาน คือ

- Conservation of mass

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (7)$$

โดย S_m คือ mass

- Conservation of momentum

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (8)$$

โดย p คือ static pressure

$\rho \vec{g}$ คือ gravitational body force

$\vec{F}$ คือ external body forces

สามารถคำนวณ Stress tensor ($\bar{\tau}$) ได้ โดย

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (9)$$

และ Conservation of energy

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (10)$$

โดย k_{eff} คือ effective conductivity

$\vec{J}_j$ คือ diffusion flux ของ species j

S_h คือ ความร้อนของ chemical reaction

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (11)$$

Sensible enthalpy (h) สำหรับ incompressible flows

$$h = \sum_j Y_j h_j + \frac{p}{\rho} \quad (12)$$

โดย Y_j คือ mass fraction ของ species j

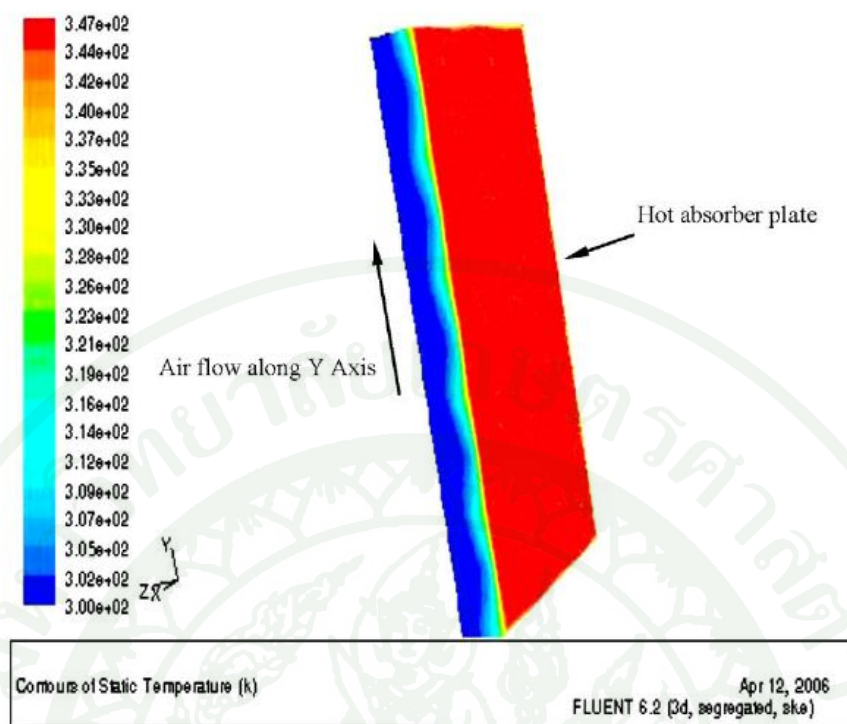
$$h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{p,j} dT \quad (13)$$

โดย $T_{ref} = 298.15 K$

โดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานหลายแบบในปัจจุบัน รวมไปถึงการจำลองการไหลของอากาศในเครื่องอุณหอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ด้วย (Lee and Abdel-Moniem, 2001) ได้ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาช่วยในการพัฒนาการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยเพิ่มสิ่งกีดขวางทางไหลของอากาศ และ (Liou *et al.*, 1993) ก็ได้ใช้กระบวนการเชิงตัวเลขร่วมกับการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลและการแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหลในท่อสี่เหลี่ยม ได้มีการเปรียบเทียบผลการคำนวณจากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่มีการใช้แบบจำลองความปั่นป่วนต่างๆ เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงโดยการเปรียบเทียบผลของการถ่ายเทความร้อนด้วย (Tanda, 2004) ซึ่งพบว่าพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นระเบียบวิธีที่มีความแม่นยำในการทำนายการไหลและการถ่ายเทความร้อนของของไหล

การถ่ายเทความร้อนจากการทดลองและการคำนวณเชิงตัวเลขเมื่อมีการใช้แบบจำลองความปั่นป่วนต่างๆ คือ Shear Stress k- ω , Standard k- ω , Renormalization k- ϵ , Realizable k- ϵ ได้ถูกเปรียบเทียบโดย (Alok *et al.*, 2005) พบว่าผลการคำนวณจากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง นอกจากนั้น (Tanda, 2004) ยังได้ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในการทำนายผลการถ่ายเทความร้อนในรูปของเลขนัสเซลที่เทียบกับการทดลองจริง โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน SST k- ω พบว่า เลขนัสเซลที่ได้มาจากการคำนวณเชิงตัวเลขมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองจริง

นอกจากนั้น (Kamare and Tikekar, 2010) ยังได้ยืนยันว่าพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามารถถูกใช้เป็นเครื่องมือในการทำนายการไหลของอากาศในเครื่องอุณหอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ แบบจำลองความปั่นป่วน k- ϵ ได้ถูกนำมาใช้ทำนายการไหลของอากาศที่มีสิ่งกีดขวางรูปทรงกระบอก, สามเหลี่ยม และสี่เหลี่ยม การกระจายอุณหภูมิของของไหลได้ถูกแสดงในภาพที่ 9 และถูกแปลงเป็นค่าความร้อนที่ได้ถ่ายเทสู่อากาศ เมื่อเปรียบเทียบค่าความร้อนที่ได้ถ่ายเทนี้กับผลการทดลองจริงดังแสดงในตารางที่ 1 แล้วจะพบว่ามีความแตกต่างสูงสุดประมาณ 0.48%



ภาพที่ 9 แสดงการกระจายอุณหภูมิบนผิวท่ออากาศ

ที่มา: Kamare and Tikekar (2010)

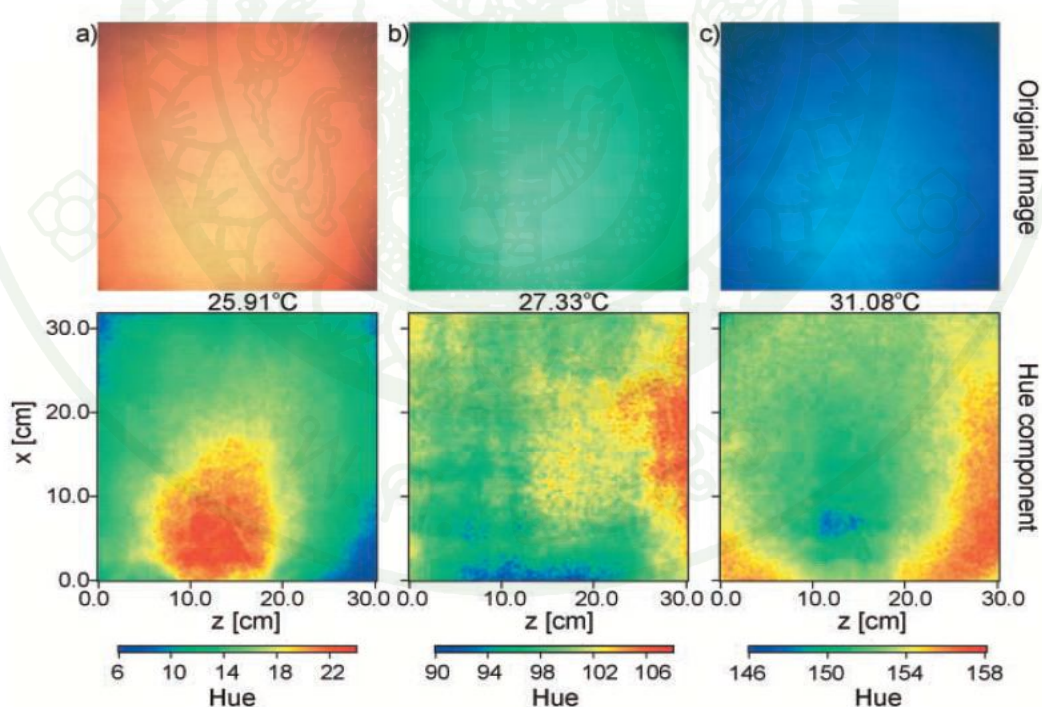
ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบค่าความร้อนที่มีการแลกเปลี่ยนระหว่างการทดลองจริงและจากการคำนวณเชิงตัวเลข

Geometry	Heat transfer (W)	
	By experimentally	By CFD analysis
Circular	65.52	65.8327
Triangular	64.01	64.2079
Square	66.97	67.0224

ที่มา: Kamare and Tikekar (2010)

3.2 ผลึกเหลว

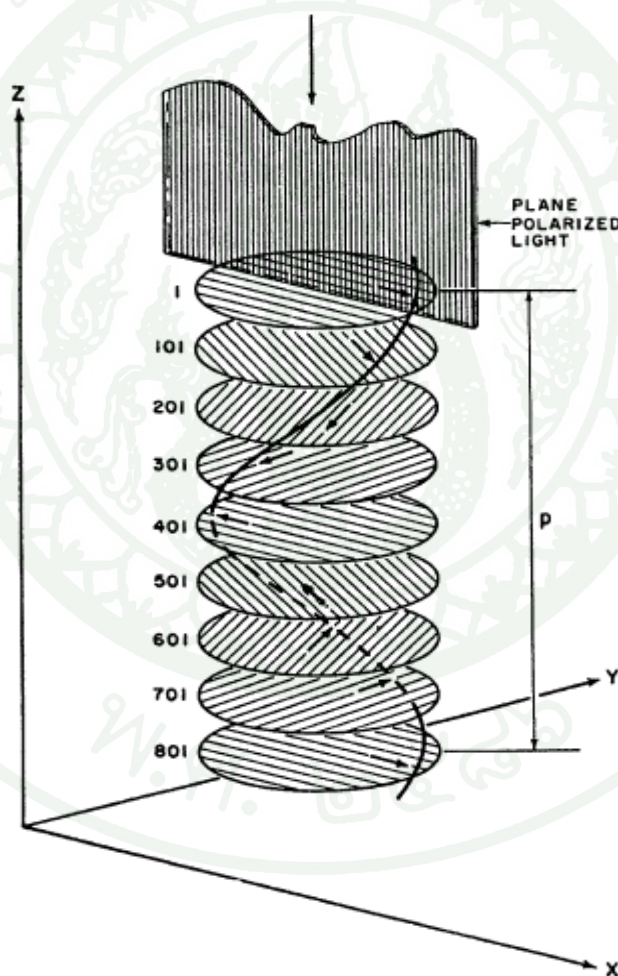
ผลึกเหลวแบบที่ใช้วัดอุณหภูมิได้ถูกนำมาใช้ในการแสดงการไหลของของไหลมากกว่า 30 ปี แต่ในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา ได้มีการพัฒนาเทคนิคการใช้ผลึกเหลวทำให้สามารถนำผลึกเหลวมาใช้ในการตรวจวัดอุณหภูมิของของไหลและผนังของช่องทางไหล ผลึกเหลวจะมีคุณสมบัติการมองเห็นเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ทำให้สามารถนำมาใช้ในการทำนายอุณหภูมิที่เกิดขึ้นได้ อีกทั้งยังมีคุณสมบัติการทำซ้ำอีกด้วย โดยผลึกเหลวสามารถแสดงสีออกมาได้เมื่อมีแสงมาตกกระทบ เมื่อแสงขาวตกกระทบกับโมเลกุลของผลึกเหลวนี้ ด้วยสมบัติการเป็นผลึกของผลึกเหลว ก็จะสามารถสะท้อนแสงที่มีความยาวคลื่นแสงในช่วงระหว่าง 400-700 nm ออกมา ซึ่งก็คือ สีม่วง-แดงนั่นเอง ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความยาวคลื่นนี้จึงถูกนำไปใช้เพื่อการทำนายอุณหภูมิของของไหลและผนังของช่องทางไหลโดยรอบด้วยความละเอียดและแม่นยำสูง ภาพที่ 10 แสดงตัวอย่างของผลึกเหลวที่อุณหภูมิต่างๆ และรูปแบบของการกระจายอุณหภูมิในแต่ละรูปหลังการใส่เงื่อนไขค่าขอบที่เหมาะสมและการผ่านกระบวนการเทียบสี



ภาพที่ 10 แสดงการแสดงสีและค่า Hue ที่อุณหภูมิต่างๆ

ที่มา: Sabatini *et al.* (2000)

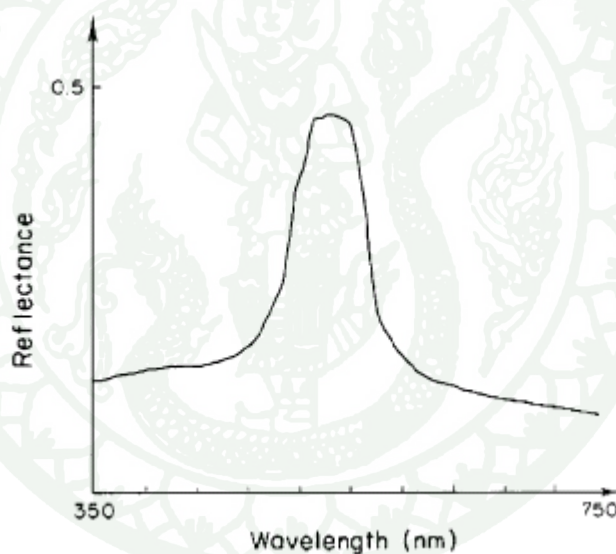
ผลึกเหลวได้ถูกจัดกลุ่มตามรูปแบบการจัดเรียงโมเลกุล โดยผลึกเหลวที่ถูกนำมาใช้ในการวัดอุณหภูมินั้นเป็นแบบ Smectic, Nematic และ Cholesteric ผลึกเหลวแบบ Cholesteric ซึ่งมีลักษณะการจัดเรียงโมเลกุล ดังแสดงในภาพที่ 11 ได้ถูกตั้งชื่อขึ้นตามชนิดของสารตั้งต้นที่เป็น Cholesterol อย่างไรก็ตามผลึกเหลวแบบ non-sterol ได้ถูกตั้งเคราะห์ขึ้นมาในชื่อของ Chiral-Nematic เป็นผลึกเหลวที่เป็นที่นิยมมากในปัจจุบันที่นำมาใช้ตรวจวัดอุณหภูมิ โดยผลึกเหลวแบบ Chiral-Nematic จะเป็นผลึกเหลวที่สามารถกระเจิงแสงที่มีสีชัดเจนและมีความสามารถในการป้องกันการทำลายเชิงเคมีและเชิงกลมากกว่าแบบ Cholesteric แต่ก็มีราคาสูงกว่าด้วย



ภาพที่ 11 แสดงการจัดเรียงโมเลกุลของผลึกเหลวแบบ Cholesteric

ที่มา: Makow (1991)

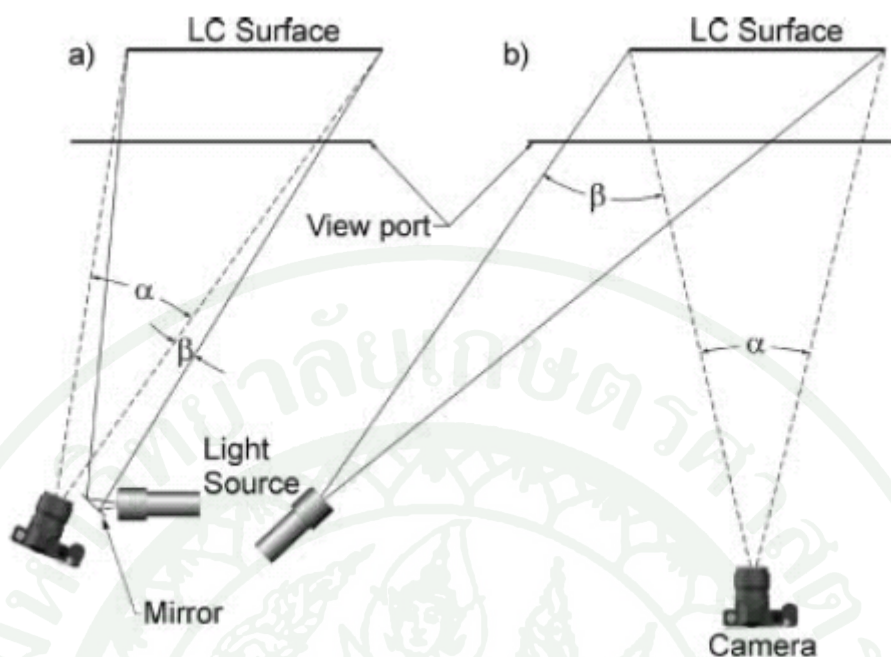
ผลึกเหลวมีความสามารถในการกระเจิงสีตามช่วงอุณหภูมิ เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นสีใสของผลึกเหลวจะเริ่มเปลี่ยนเป็นสีแดง, สีเหลือง, สีเขียว และสีน้ำเงิน ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 12 และจะเปลี่ยนเป็นสีใสอีกครั้งเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปอีก ในการตรวจวัดอุณหภูมิของผิวหนังนั้น สีจะต้องถูกเคลือบไว้อยู่ภายใต้ชั้นของผลึกเหลวเพื่อดูดและป้องกันการสะท้อนแสงจากแหล่งกำเนิดแสงที่ถูกส่งผ่านชั้นของผลึกเหลว เวลาตอบสนองต่อการแสดงสีของผลึกเหลว (Time Response) ได้ถูกหาโดย (Ireland and Jones, 1987) มีค่า 3 มิลลิวินาที เมื่อทำการเคลือบผลึกเหลวบนผิวหนัง 10 ไมโครเมตร (Moffat, 1990) ได้กล่าวว่าผลึกเหลวจะมีเวลาจัดเรียงโมเลกุลหลังการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิประมาณ 5-10 มิลลิวินาที สำหรับ Chiral-Nematic และ 50-100 มิลลิวินาที สำหรับ Cholesteric *et al.* (1998) ได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์คำนวณเวลาตอบสนองต่อการแสดงสีของผลึกเหลวชนิด Chiral-Nematic มีค่าประมาณ 150 มิลลิวินาที



ภาพที่ 12 แสดงความยาวคลื่นแสงที่ถูกสะท้อนออกมาโดยผลึกเหลว

ที่มา: McDonnell (1987)

การส่องให้กับผลึกเหลวนั้นควรมีการใช้หลอดไฟที่มีแสงสีขาวที่มีความต่อเนื่อง เนื่องจากมีราคาถูกและสามารถหาได้ง่าย (Gluckman *et al.*, 1993) มุมระหว่างแหล่งกำเนิดแสงที่ฉายแสงขาวเข้าสู่ผลึกเหลวและผู้มองจะมีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนสีของผลึกเหลว(มุม β) ดังแสดงในภาพที่ 13



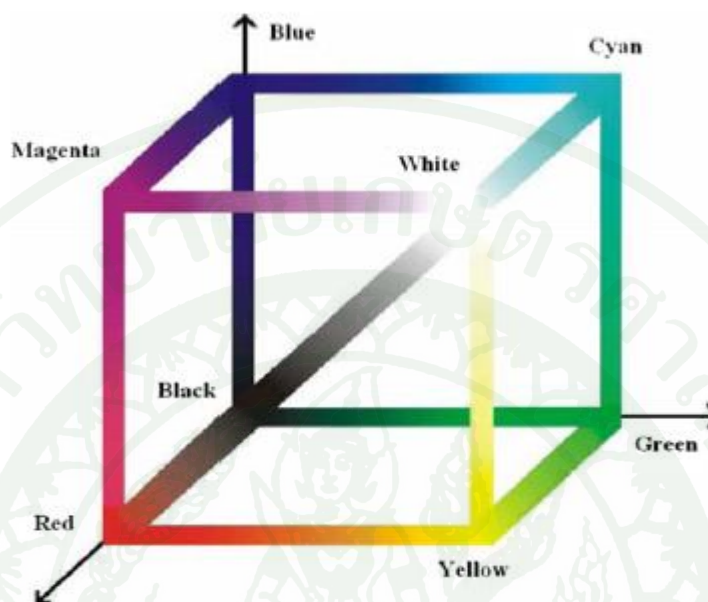
ภาพที่ 13 แสดงมุมระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและผู้มอง

ที่มา: Sabatino *et al.* (2000)

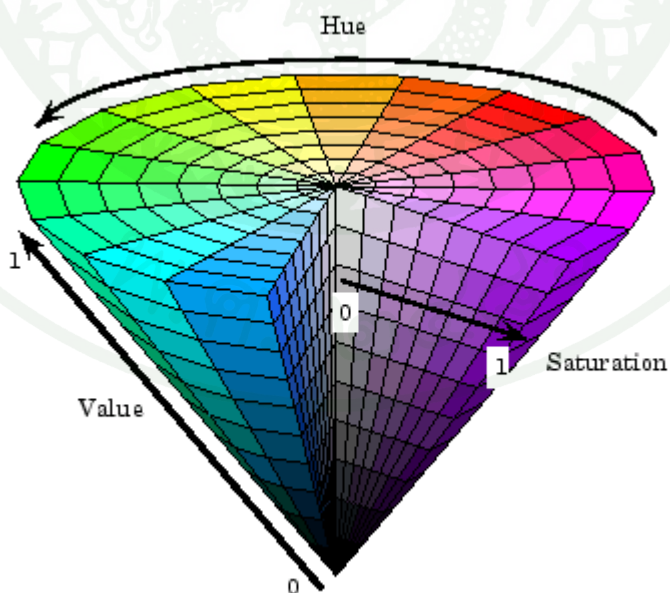
รูปการกระจายสีของผลึกเหลวจะถูกบันทึกโดยการใช้อุปกรณ์ CCD หรือฟิล์มสี กล้องที่ใช้ฟิล์มจะมีข้อดีทำให้รูปถ่ายมีการแสดงความเข้มของสีที่ดี (Saturation) (Praisner *et al.*, 1997) แต่เมื่อมีการใช้อุปกรณ์ CCD เพื่อจับภาพผลึกเหลวแล้วจะทำให้ข้อมูลที่ได้รับมีความแม่นยำสูงตามความเข้มของสีแดง, เขียว และน้ำเงิน (RGD System) จากแสงตกกระทบ (Hacker and Eaton, 1995) เมื่อมีการนำกล้องดิจิทัลมาใช้ในการได้มาซึ่งผลการวิเคราะห์ทั้งสี, อุณหภูมิ และตัวแปรอื่นๆ จะมีความเร็วมากขึ้น โดยจะสามารถลดแสงสะท้อนลงได้เมื่อมีการใช้แผ่นโพลาไรซ์ (Farina *et al.*, 1994)

กระบวนการการเทียบสีจะเริ่มจากการแปลงภาพที่อยู่ในระบบ RGB ดังแสดงในภาพที่ 14 เป็นระบบ HSI ดังแสดงในภาพที่ 15 ค่า Hue ในระบบ HSI จะแสดงค่าความยาวคลื่นแสงที่สะท้อนจากผลึกเหลว การใช้ค่า Hue นั้นจะทำให้สามารถลดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความสว่างของแหล่งกำเนิดแสงได้ และค่า Hue นี้จะถูกนำไปสร้างความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของของไหลทำให้

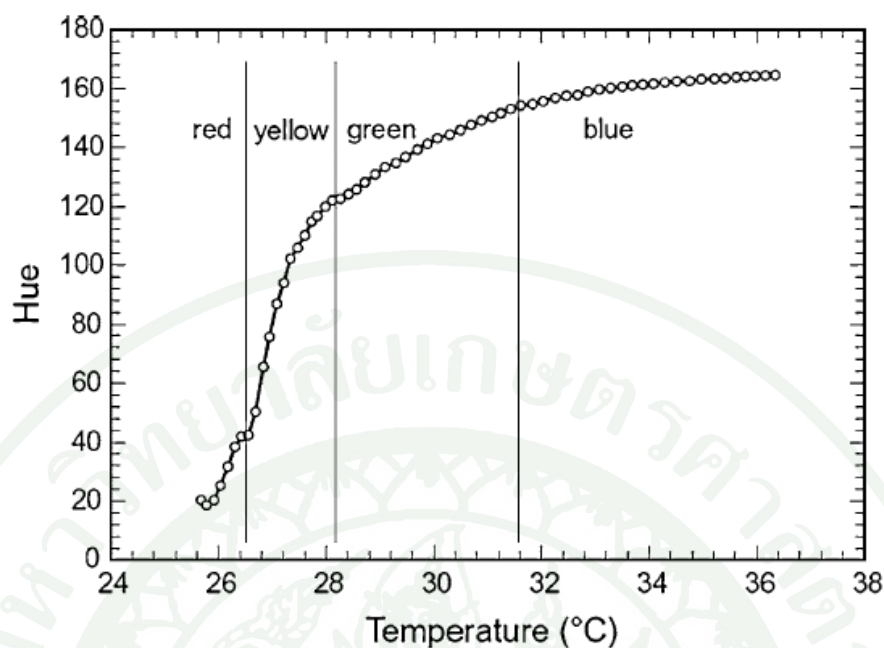
ได้มาซึ่งสมการความสัมพันธ์ระหว่างสีของผลึกเหลวและอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 16 นั้นเอง



ภาพที่ 14 แสดงระบบการแสดงสีแบบ RGB



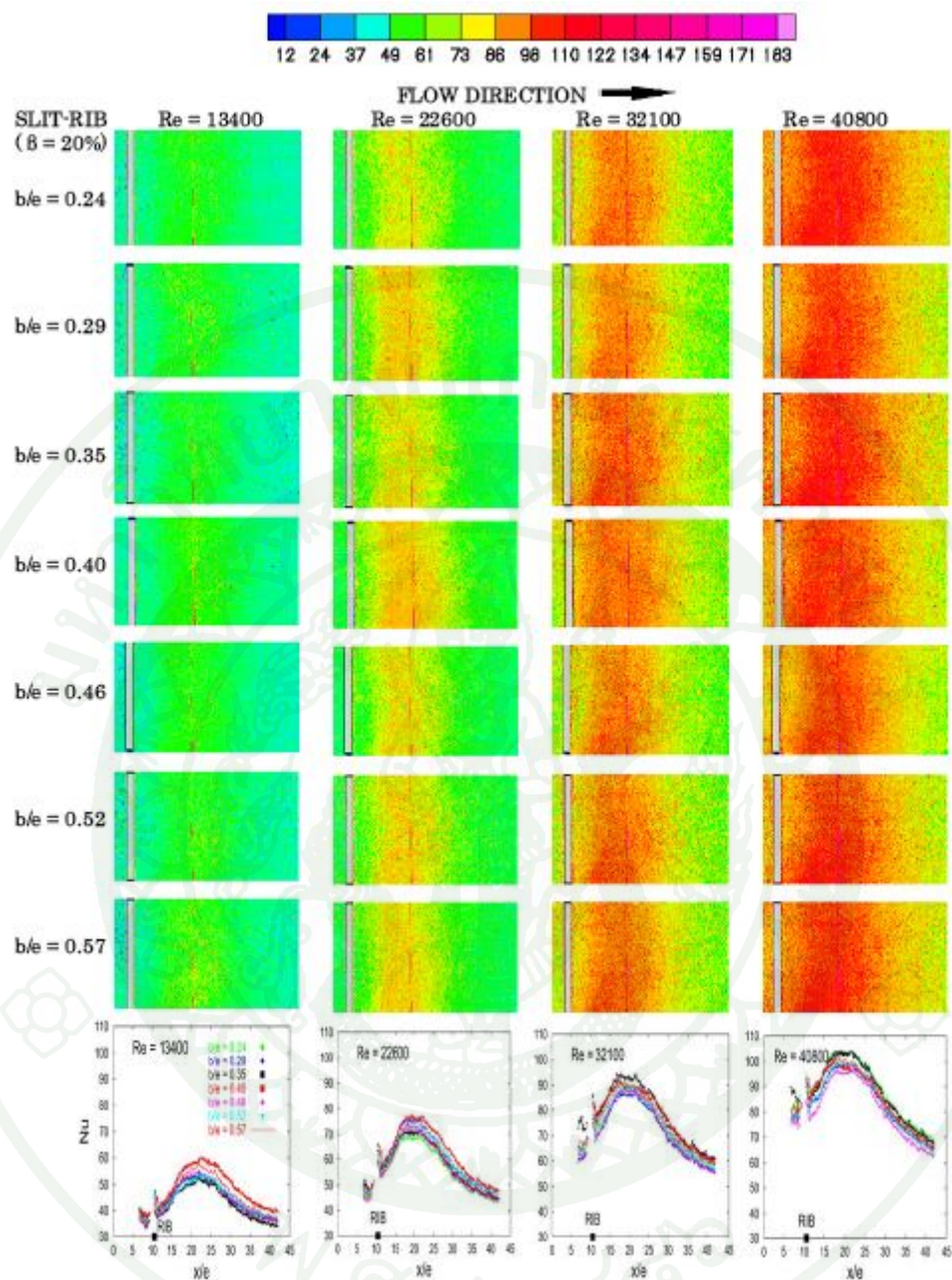
ภาพที่ 15 แสดงระบบการแสดงสีแบบ HSI



ภาพที่ 16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสีที่สะท้อนจากผลึกเหลวและอุณหภูมิ

ที่มา: Sabatino *et al.* (2000)

ได้มีการทดลองใช้ผลึกเหลวในการทดสอบหาค่าเลขดัชนีสเกลท์ซึ่งถูกคำนวณจากผนังท่อที่มีการถ่ายเทความร้อน (Ekkad and Han, 1997) แสดงการกระจายค่าเลขดัชนีสเกลท์จากผิวท่ออากาศที่มีการถ่ายเทความร้อนที่ผนังท่อโดยมีสิ่งกีดขวางทางไหลของอากาศโดยใช้ผลึกเหลว รวมไปถึง Panigrahi and Tariq (2003) ได้ทำการใช้ผลึกเหลวเคลือบที่ผิวของผนังท่ออากาศที่มีการถ่ายเทความร้อนโดยอากาศในท่อจะมีความเร็วที่เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 13400, 22600, 32100 และ 40800 ดังแสดงในภาพที่ 17 ซึ่งพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่จากการใช้ผลึกเหลวมีค่าประมาณ 10%



ภาพที่ 17 แสดงการกระจายค่าของเลขนัสเซิลที่บนผิวท่อที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ

ที่มา: Panigrahi and Tariq (2003)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. คอมพิวเตอร์และโปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
2. ท่อสี่เหลี่ยมทำจากพลาสติกใส (Acrylic)
3. ท่อลดขนาดพร้อมชุดปรับปริมาณอากาศ
4. พัดลม (Blower)
5. ท่ออ่อน
6. เทอร์โมคัปเปิลชนิด K
7. แผ่นทำความร้อนและคิมเมอร์
8. เครื่องอ่านอุณหภูมิแบบ PID และ SSR (Solid-State Relay)
9. ผลึกเหลว (Thermochromic Liquid Crystals)
10. กาแฟสีและเครื่องอัดลม
11. กล้องถ่ายภาพ
12. แผ่นพลาสติกสีดำ
13. Anemometer
14. หลอดฟลูออเรสเซนต์
15. Micro Manometer
16. โปรแกรม MATLAB สำหรับวิเคราะห์

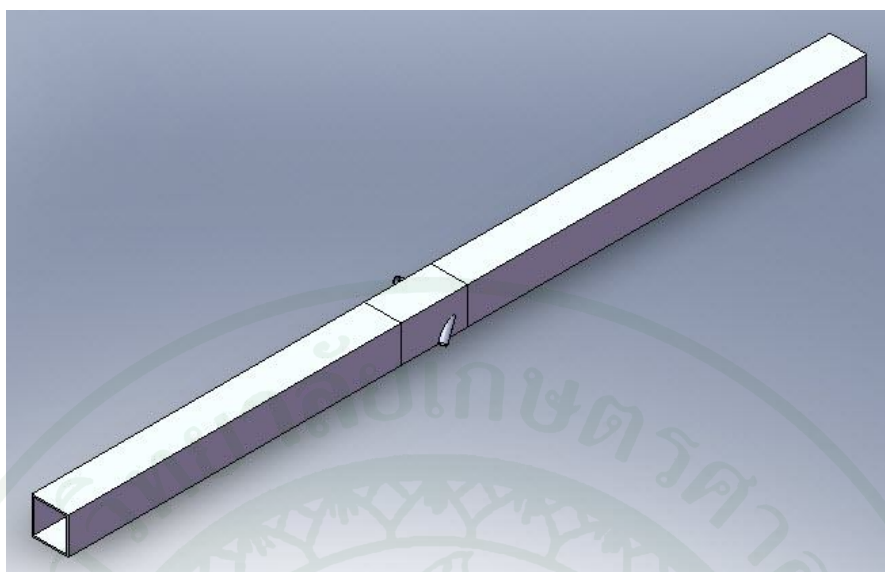
วิธีการ

1. ส่วนพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD)

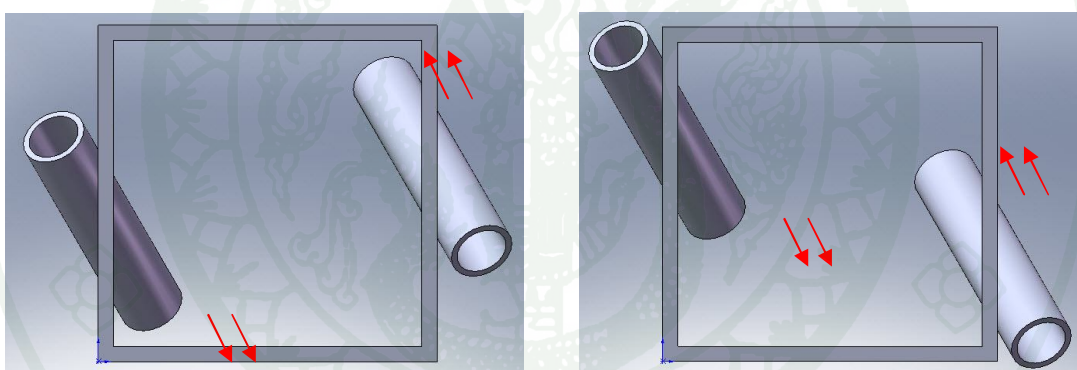
1.1 การสร้างแบบจำลอง

1.1.1 แบบจำลองทางกายภาพ

งานวิจัยทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) จะต้องมีการเก็บค่าต่างๆ ในการทดลองจริงที่ใช้ป้อนในโปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ จึงต้องทำการทดลองจริงและเก็บค่าต่างๆ ในงานวิจัยนี้จะเก็บค่าอุณหภูมิที่บริเวณทางเข้า และทางออกของท่อรูปสี่เหลี่ยมในแบบต่างๆ ในแต่ละความเร็วที่ต้องใช้ในการประมวลผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ จากนั้นสร้างแบบจำลองท่อรูปสี่เหลี่ยมขนาด $100 \times 100 \text{ mm}^2$ ยาว 1000 mm ด้วยโปรแกรม Solid Works ดังภาพที่ 18 และทำการจำลองเฉพาะส่วนของของไหลเพื่อนำไปประมวลผล ดังภาพที่ 20 โดยงานวิจัยนี้จะสร้างแบบจำลองท่อนี้อากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 17 mm เพื่อสร้างการไหลควง โดยท่อนี้อากาศจะถูกติดตั้งโดยเอียงทำมุม 45° , 60° และ 90° กับระนาบของแนวการไหล นอกจากนี้ ท่อนี้อากาศนี้จะติดตั้งให้เอียงขึ้นหรือลงที่ 30° กับพื้นผิวท่อ โดยที่ปลายท่อนี้อากาศจะมีระยะห่างจากพื้นผิวด้านล่างที่ได้รับความร้อนแตกต่างกัน เพื่อให้เกิดการหนีอากาศแบบพุ่งชน (Jet-like) และการหนีอากาศแบบกวนกระแส (Wake-like) ดังภาพที่ 19 การไหลหลักในท่อนี้จะไหลที่เลขเรย์โนลด์ $Re = 13000-20000$ ในขณะที่การไหลควงจะมีการหนีอากาศออกจากหัวฉีดที่การไหล $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.09$ และ $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$ และมีการกำหนดฟลักซ์ความร้อนคงที่ที่พื้นผิวด้านล่างแทนความร้อนจากแผ่นดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์



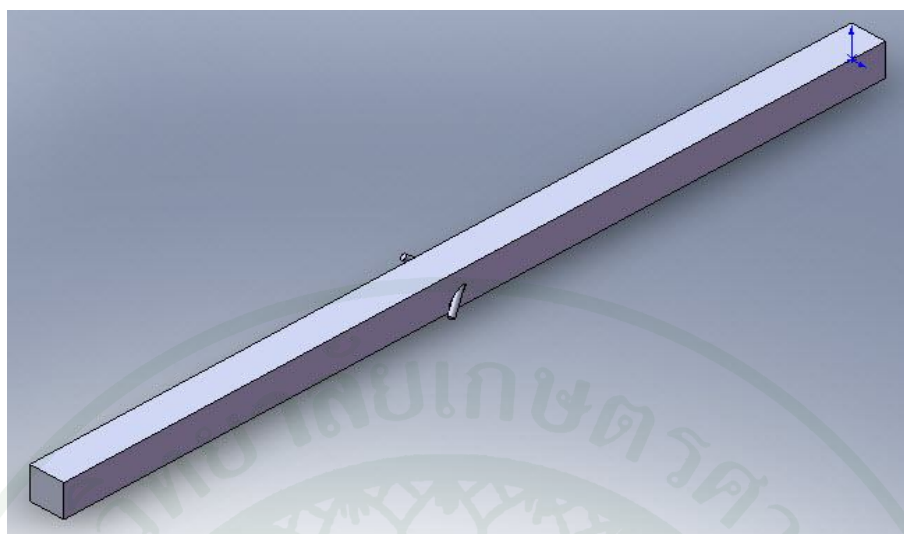
ภาพที่ 18 แสดงแบบจำลองของเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์



ก) นี้อากาศแบบพุ่งชน (Jet-like)

ข) นี้อากาศแบบกวนกระแสน้ำ (Wake-like)

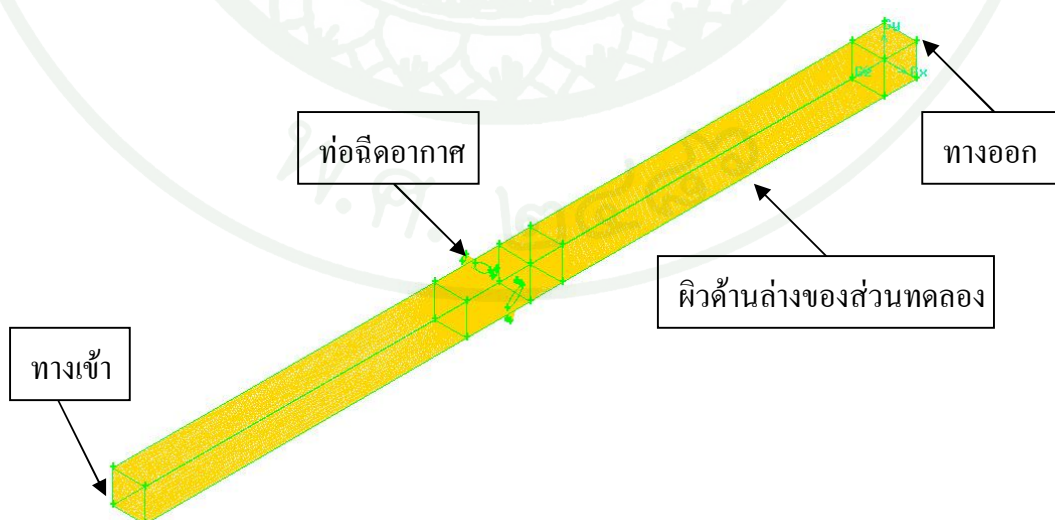
ภาพที่ 19 แสดงแบบจำลองของท่อนี้อากาศ



ภาพที่ 20 แสดงแบบจำลองของอากาศที่ไหลภายในอุณหอากาศพลังงานแสงอาทิตย์

1.1.2 แบบจำลองตาข่ายข้อมูล

ในโปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ แบบจำลองตาข่ายข้อมูล (mesh) ของอากาศที่ไหลภายในเครื่องอุณหอากาศพลังงานแสงอาทิตย์จะถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการคำนวณค่าสมบัติของอากาศที่แต่ละตำแหน่ง แบบจำลองนี้ประกอบด้วยอนุภาคสามมิติทรงสี่หน้า (Tetrahedral Element) ซึ่งถูกสร้างโดยโปรแกรม GAMBIT ดังแสดงในภาพที่ 21



ภาพที่ 21 แสดงแบบจำลองตาข่ายข้อมูลใน โปรแกรม GAMBIT

1.1.3 การตรวจสอบความเป็นอิสระของตาข่ายข้อมูล (Grid Independent Study)

ในขั้นตอนการสร้างตาข่ายข้อมูลจะต้องมีการตรวจสอบความเป็นอิสระของตาข่ายข้อมูล (Grid Independent Study) ก่อนนำแบบจำลองไปใช้ทำนายในกรณีอื่นๆ ซึ่งการตรวจสอบความเป็นอิสระของตาข่ายข้อมูลทำได้โดยการเพิ่มจำนวนตาข่ายข้อมูลครึ่งละ 1/2 ของจำนวนตาข่ายข้อมูลเดิม แล้วตรวจสอบว่าจำนวนตาข่ายข้อมูลเท่าใดที่ไม่ทำให้คำตอบเปลี่ยนแปลง

โดยจำนวนตาข่ายข้อมูลเซลล์ของแบบจำลองของท่อรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้ทำการตรวจสอบความเป็นอิสระของตาข่ายข้อมูลอยู่ในช่วงประมาณ 200,000-800,000 เซลล์

1.2 จำลองลักษณะการไหล

1.2.1 เงื่อนไขค่าขอบ (Boundary Condition)

แบบจำลองชิ้นงาน โครงร่างตาข่ายข้อมูลที่สร้างบนโปรแกรม GAMBIT จะถูกนำเข้าสู่โปรแกรม FLUENT ซึ่งจะถูกแสดงในรูปของตาข่ายข้อมูล (grid) ดังแสดงในภาพที่ 21 โดยในการศึกษาจะมีการกำหนดเงื่อนไขค่าขอบดังนี้

- ที่บริเวณทางเข้าการไหลหลัก จะกำหนดให้อากาศมีความเร็วเท่ากับ 2, 2.6 และ 3 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ซึ่งเป็นความเร็วที่วัดได้จริงจากการทดลอง

- ที่บริเวณทางเข้าของท่อหนีอากาศ จะกำหนดให้อากาศมีความเร็วเท่ากับ 8 และ 10.5, 10.5 และ 13.5, 12 และ 15.5 เมตรต่อวินาที เมื่อความเร็วทางเข้าการไหลหลักเท่ากับ 2, 2.6 และ 3 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ซึ่งเป็นความเร็วที่วัดได้จริงจากการทดลอง

- ที่บริเวณทางออก จะถูกกำหนดเป็นค่าอากาศไหลผ่าน (OUTFLOW) ที่ทางออก

- ที่บริเวณที่ติดกับผิวของเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ จะกำหนดให้เป็นผิว WALL

- ที่บริเวณที่ติดกับผิวของท่อหนีอากาศ จะถูกกำหนดให้เป็นผิว WALL

- ที่บริเวณผิวด้านล่างของส่วนทดลอง จะถูกกำหนดให้เป็นผิว WALL และกำหนดฟลักซ์ความร้อนคงที่ แทนความร้อนจากแผ่นดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์

1.2.2 Turbulence model

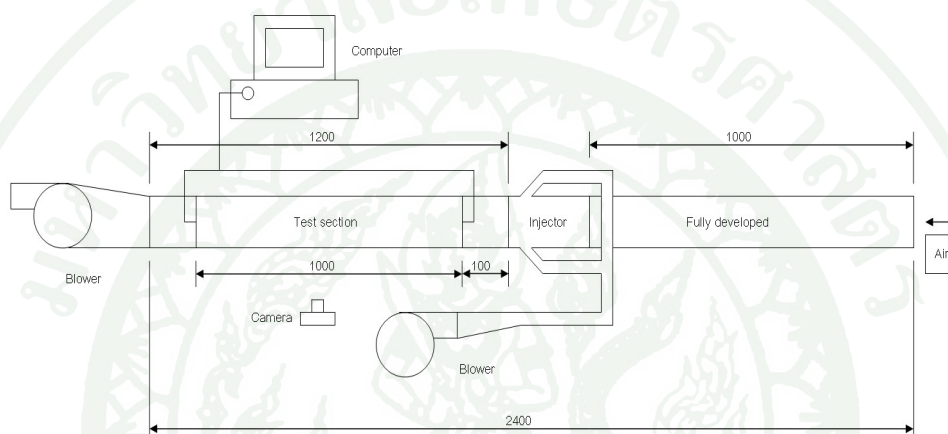
งานวิจัยต้องการวิเคราะห์หาค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิ แล้วนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Heat Transfer Coefficient) ดังนั้น จึงเลือกใช้ Turbulence model เป็น standard k- ϵ model และ 3D-steady incompressible ในการวิเคราะห์ เนื่องจากเป็น Turbulence model ที่งานวิจัยเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน และอากาศไหลในท่อนิยมใช้ และแนะนำ

หลังจากทำการสร้างตาข่ายข้อมูล (MESH) บนแบบจำลองเฉพาะส่วนของของไหล และกำหนดปัญหาค่าขอบด้วยโปรแกรม GAMBIT แล้ว ทำการประมวลผลการทดลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (FLUENT) ทำการเก็บค่าอุณหภูมิที่จุดต่างๆ และวิเคราะห์คำนวณผลการทดลองที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และทำนายลักษณะการไหลของแบบจำลอง จากนั้นเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากการคำนวณจากค่าอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณกับผลที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี และผลการทดลองจริง ว่าได้ค่าที่สอดคล้องใกล้เคียงกันถูกต้อง และน่าเชื่อถือ

2. ส่วนการทดลอง

ในงานวิจัยนี้จะทำการทดลองในท่อน้ำัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ทำจากอะคริลิกใส ขนาดหน้าตัด $100 \times 100 \text{ mm}^2$ ยาว 1000 mm ที่บริเวณทางเข้าติดตั้งท่อนี้อากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 17 mm เพื่อสร้างการไหลควง โดยติดตั้งให้ท่อเอียงทำมุม 45° , 60° และ 90° กับระนาบของแนวการไหล นอกจากนี้ ท่อนี้อากาศนี้จะติดตั้งให้เอียงขึ้นหรือลงที่ 30° กับพื้นผิวท่อ โดยที่ปลายท่อนี้อากาศจะมีระยะห่างจากพื้นผิวด้านล่างที่ได้รับความร้อนแตกต่างกัน เพื่อให้เกิดการน็อคอากาศแบบพุ่งชน (Jet-like) และการน็อคอากาศแบบกวนกระแส (Wake-like) การไหลหลักในท่อนี้จะไหลที่เลขเรย์โนลด์ $Re = 13000-20000$ ในขณะที่การไหลควงจะมีการน็อคอากาศออกจากหัวฉีดที่การไหล $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.09$ และ $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$ ที่ผิวท่อมีการใช้อุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater)

เพื่อให้ความร้อนที่ผิวด้านล่างของท่อแทนความร้อนจากแสงอาทิตย์ ทำให้เกิดฟลักซ์ความร้อนคงที่ ที่ผิวท่อ ด้านบนของอุปกรณ์ให้ความร้อนมีการฉาบผลึกเหลว (Thermochromic Liquid Crystals) ซึ่งมีคุณสมบัติเปลี่ยนสีตามอุณหภูมิที่ผิว เมื่อนำสีของผลึกเหลวมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ จะทำให้ได้การกระจายอุณหภูมิที่ผิวของแผ่นให้ความร้อนทั้งหมด โดยภาพที่ 22, 23 และ 25 จะแสดงอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง, แสดงบริเวณส่วนทดลองที่ถูกจำกัดแสงโดยใช้พลาสติกสีดำ และแสดงส่วนทดลองและท่อนี้อากาศ



ภาพที่ 22 แสดงอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 23 แสดงบริเวณส่วนทดลองที่ถูกจำกัดแสงโดยใช้พลาสติกสีดำ



ก) ดิมเมอร์

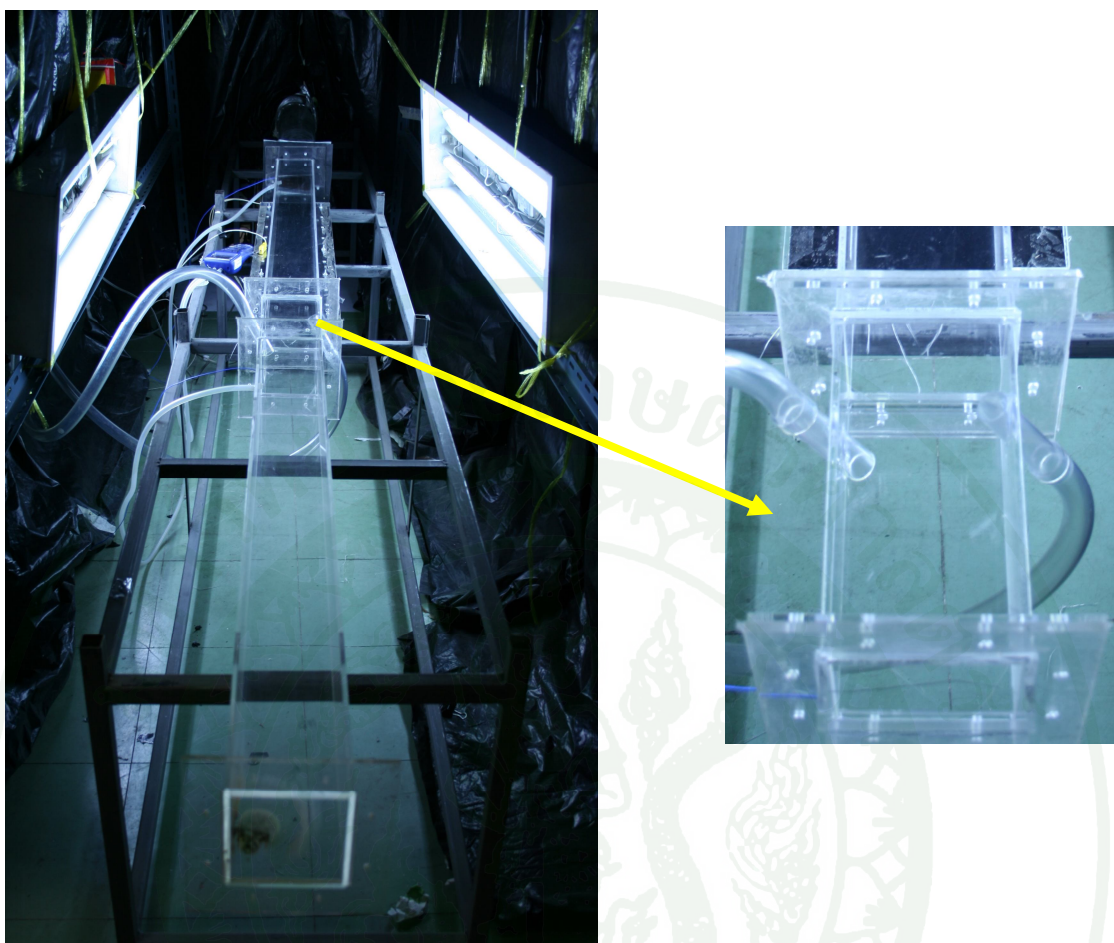


ข) อุปกรณ์อ่านค่าอุณหภูมิและควบคุมแบบ PID



ค) Solid-State Relay

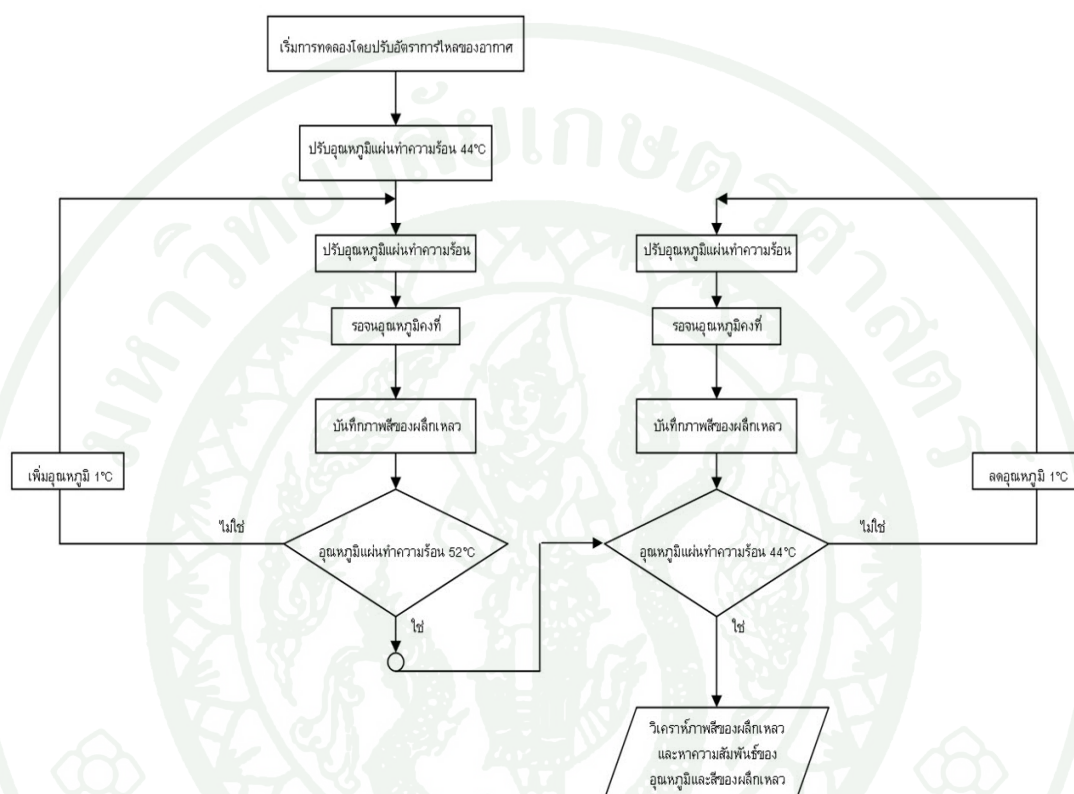
ภาพที่ 24 ชุดอุปกรณ์ควบคุมแผ่นทำความร้อน



ภาพที่ 25 แสดงส่วนทดลองและท่อนิดอากาศ

อย่างไรก็ตามก่อนการนำผลึกเหลวไปใช้ทุกครั้ง ต้องมีการสอบเทียบวัดสีของผลึกเหลวกับอุณหภูมิที่พื้นผิวที่มีการนำผลึกเหลวไปฉายไว้เสมอ เนื่องจากมุมกล้องและแหล่งกำเนิดแสงจะมีผลต่อการแสดงสีของผลึกเหลว ในการสอบเทียบสีของผลึกเหลวนี้อาจทำได้โดยการให้ความร้อนกับผิวที่อบบริเวณส่วนทดลองโดยควบคุมอุณหภูมิให้เพิ่มขึ้นครั้งละ 1°C โดยในการควบคุมอุณหภูมินี้ จะมีการเพิ่มพลังความร้อนของอุปกรณ์ให้ความร้อนทีละน้อยโดยใช้อุปกรณ์ควบคุมซึ่งประกอบด้วย Dimmer, Relay และชุดคอมพิวเตอร์ ดังภาพที่ 24 ซึ่งจะทำให้การควบคุมอุณหภูมิตนแผ่นระนาบเป็นไปด้วยความแม่นยำ ในการเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นระนาบที่ทุกๆ 1°C นี้ สีของผลึกเหลวบนแผ่นระนาบจะได้รับการบันทึกภาพ พร้อมทั้งใช้คอมพิวเตอร์บันทึกค่าอุณหภูมิที่อ่านได้จาก Thermocouple จากนั้นปล่อยให้อุณหภูมิค่อยๆ ลดลง โดยบันทึกภาพทุกๆ การลดลง 1°C เช่นเดียวกัน เพื่อทดสอบคุณสมบัติการคืนตัวของผลึกเหลว ภาพการเปลี่ยนสีของผลึกเหลวที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ได้จากการบันทึกจะนำเข้าสู่โปรแกรมประมวลผลภาพ (Image Processing

Program) เพื่อแปลงค่าอุณหภูมิให้เป็นค่า Hue หลังจากนั้นจึงทำการแสดงค่า Hue และอุณหภูมิที่วัดได้จาก Thermocouple ลงบนกราฟเดียวกัน โดยกราฟนี้จะใช้ในการแปลงสีของผลึกเหลวให้เป็นอุณหภูมิในการทดลองต่อไป โดยภาพที่ 26 จะแสดงขั้นตอนการเทียบสีผลึกเหลวกับอุณหภูมิ



ภาพที่ 26 แสดงขั้นตอนการเทียบสีผลึกเหลวกับอุณหภูมิ

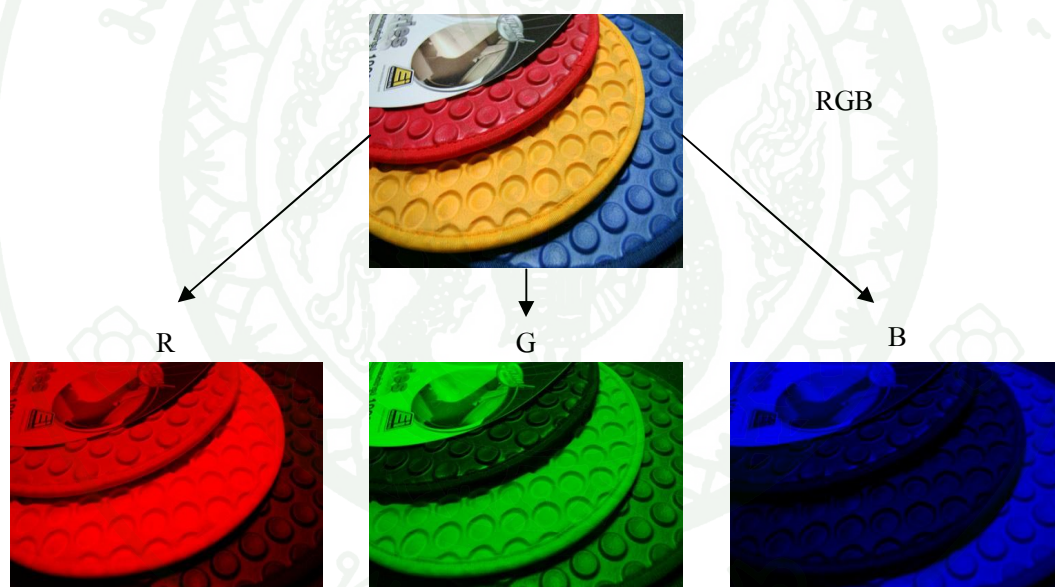
ผิวท่อในบริเวณส่วนทดลองซึ่งได้รับฟลักซ์ความร้อนคงที่จากอุปกรณ์ให้ความร้อนเมื่อมีการไหลเกิดขึ้นในท่อทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนที่บริเวณผิวท่อซึ่งได้มีการฉาบผลึกเหลวไว้ การเปลี่ยนแปลงสีของผลึกเหลวบนผิวของท่อบริเวณส่วนทดลองนี้ จะได้รับการบันทึกและประมวลผลโดยใช้โปรแกรมประมวลผลภาพ ค่าที่ได้จะอยู่ในส่วนประกอบของภาพสีแบบ RGB ดังภาพที่ 27 เนื่องจากค่า RGB เป็นเมตริกซ์ 3 มิติ ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากในการนำมาใช้ จึงต้องทำการแปลงค่าเมตริกซ์ RGB ให้อยู่ในส่วนประกอบของภาพสีแบบ HSI ดังภาพที่ 29 ซึ่ง Hue เป็นเมตริกซ์ 2 มิติ ดังภาพที่ 28 โดยใช้สมการ (14) และ (15)

$$H = \frac{1}{360} \left[90 - \text{Arctan} \left(\frac{F}{\sqrt{3}} \right) + \{0, G > B; 180, G < B\} \right] \quad (14)$$

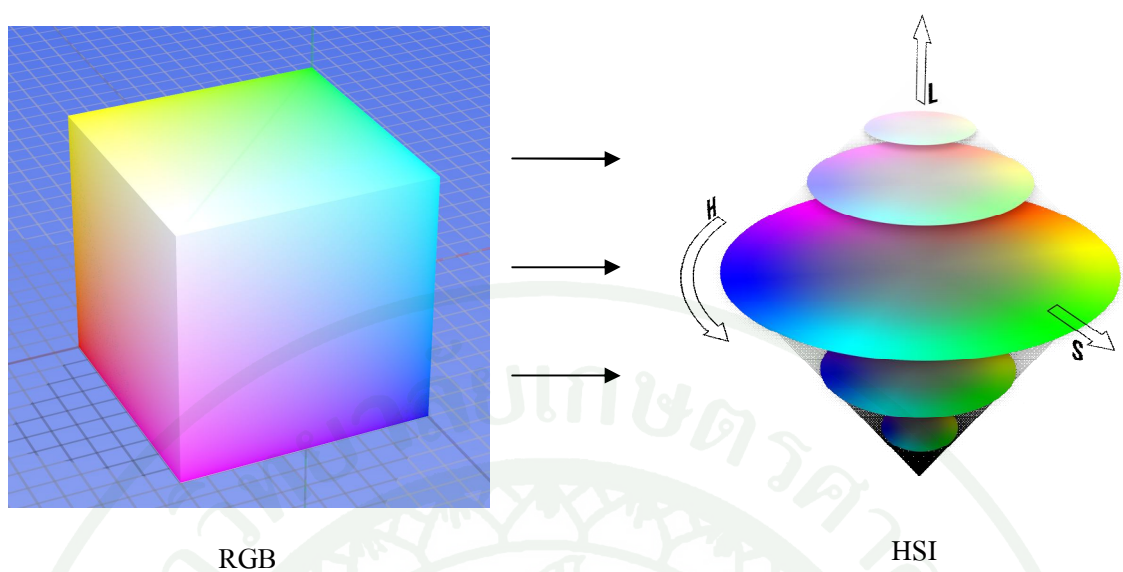
$$F = \frac{2R - G - B}{G - B} \quad (15)$$

โดย H คือ ค่า Hue และค่า Hue ที่ได้จากการประมวลผลภาพการเปลี่ยนสีของผลึกเหลวนี้ จะนำไปแปลงเป็นค่าอุณหภูมิที่ผิวโดยใช้กราฟการสอบเทียบสีของผลึกเหลว

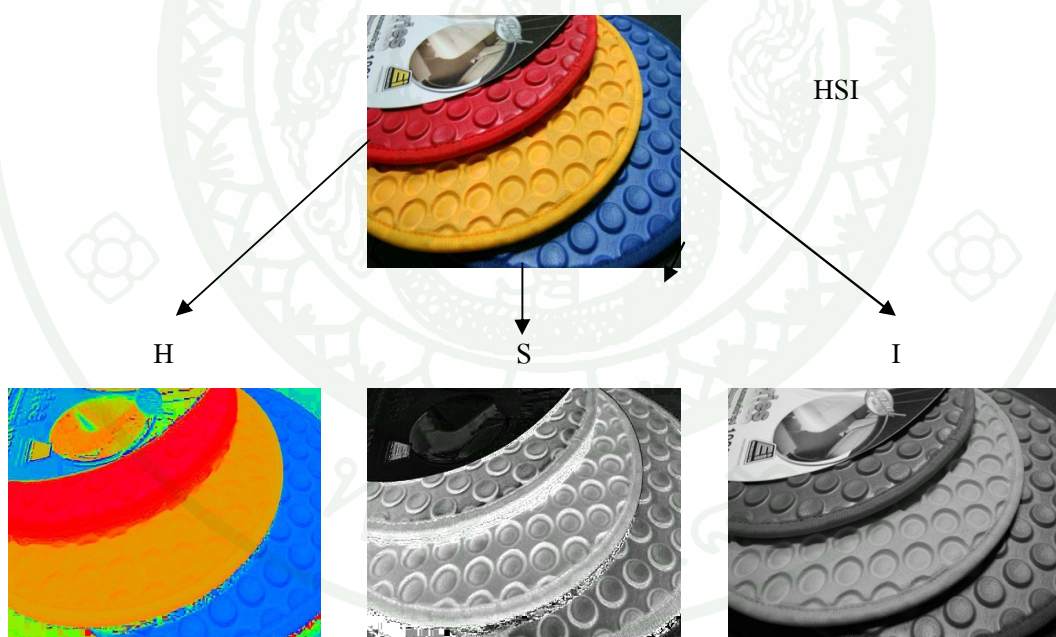
หลังจากที่ได้ประมวลผลภาพโดยใช้โปรแกรมประมวลผลภาพร่วมกับการเทียบสีของผลึกเหลวแล้ว จะได้ค่าอุณหภูมิที่ผิวของท่อบริเวณส่วนทดลองที่ตำแหน่งใดๆ, $T_s(i, j)$ โดยค่านี้สามารถนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะที่, $h(i, j)$



ภาพที่ 27 แสดงส่วนประกอบของภาพสีแบบ RGB



ภาพที่ 28 แสดงลักษณะ 3 มิติของส่วนประกอบของภาพสีแบบ RGB และ HSI



ภาพที่ 29 แสดงส่วนประกอบของภาพสีแบบ HSI

ตารางที่ 2 แสดงรูปแบบการทดลองทั้งหมด

Re	ท่อเรียบ	$\dot{m}_j/\dot{m}$	ฉีดแบบพุ่งชน (Jet-like)			ฉีดแบบกวนกระแสด (Wake-like)		
			45°	60°	90°	45°	60°	90°
13000	✓	0.09	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		0.12	✓	✓	✓	✓	✓	✓
17000	✓	0.09	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		0.12	✓	✓	✓	✓	✓	✓
20000	✓	0.09	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		0.12	✓	✓	✓	✓	✓	✓

สมการที่ใช้ในงานวิจัย

สมการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ได้แก่

การจำแนกลักษณะการไหลของของไหลภายในท่อซึ่งจะพิจารณาจากเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number: Re) ซึ่งมีค่าดังนี้

$$Re = \frac{VD_h}{\nu} \quad (16)$$

โดย V คือ ความเร็วเฉลี่ยของอากาศในท่อ, m/s

D_h คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก, m

ν คือ ความหนืดจลนศาสตร์ของอากาศในท่อ, m²/s

โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic Radius: D_h) มีค่าดังนี้

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \quad (17)$$

โดย A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ, m²

P คือ ความยาวของเส้นรอบรูปท่อ, m

ค่าฟลักซ์ความร้อนที่พื้นผิว (Constant Surface Heat Flux: $\dot{q}_s$) มีค่าดังนี้

$$\dot{q}_s = \frac{\dot{m} C_p (T_e - T_i)}{A_s} \quad (18)$$

โดย C_p คือ ความร้อนจำเพาะ, J/kg·°C

T_e คือ อุณหภูมิของอากาศในท่อที่บริเวณทางออก, °C

T_i คือ อุณหภูมิของอากาศในท่อที่บริเวณทางเข้า, °C

A_s คือ พื้นที่ผิวของท่อที่ได้รับความร้อน, m²

โดยที่อัตราการไหลโดยมวล, $\dot{m}$ มีค่าดังนี้

$$\dot{m} = \rho V A_c \quad (19)$$

โดย ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศในท่อ, kg/m³

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะที่ (Local Heat Transfer Coefficient: $h_{(i,j)}$) มีค่าดังนี้

$$h_{(i,j)} = \frac{\dot{q}_s}{(T_{s(i,j)} - T_{m(i,j)})} \quad (20)$$

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i r_i}{\sum_{i=1}^n r_i} \quad (21)$$

โดย $T_{s(i,j)}$ คือ อุณหภูมิที่พื้นผิวที่ตำแหน่งใดๆ, °C

$T_{m(i,j)}$ คือ อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดหน้าตัดภายในท่อรูปสี่เหลี่ยมที่ตำแหน่งใดๆ
ในแนวการไหล, °C

$\bar{h}$ คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย

r_i คือ จำนวนพิกเซลของค่า Hue ที่นำมาวิเคราะห์

n คือ จำนวนพื้นที่บริเวณที่มีเลขรหัสสีที่คงที่

เลขนัสเซิลต์เฉพาะที่ (Local Nusselt Number) สามารถคำนวณได้จาก

$$Nu_{(i,j)} = \frac{h_{(i,j)} D_h}{k} \quad (22)$$

$$\overline{Nu} = \frac{\overline{h} D_h}{k} \quad (23)$$

โดย $\overline{Nu}$ คือ เลขนัสเซิลต์เฉลี่ย

k คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของอากาศ, W/m K

อย่างไรก็ตาม Dittus and Boelter (1930) ได้นำเสนอการคำนวณหาเลขนัสเซิลต์ของการไหลในท่อ ดังนี้

$$Nu = 0.023 Re^{4/5} Pr^{0.4} \quad (24)$$

โดย Pr คือ เลขแพรนเทิล (Prandtl Number)

ค่าความเสียดทานของการไหลในท่อ (Friction Factor: f) หาได้จากค่าของความดันลด (Pressure Drop: ΔP) ดังนี้

$$f = \frac{2 D_h \Delta P}{L \rho V^2} \quad (25)$$

ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน (Thermal Performance) คืออัตราส่วนระหว่างค่าเลขนัสเซิลต์กับแฟกเตอร์ความเสียดทาน โดยค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนควรจะมีค่ามากกว่า 1 ซึ่งจะแสดงได้ว่าความสามารถในการพาความร้อนของอากาศในท่อที่เพิ่มขึ้นมีค่าสูงกว่าแรงเสียดทานของการไหลในท่อที่เพิ่มขึ้น โดยแรงเสียดทานของการไหลในท่อจะส่งผลโดยตรงต่อกำลังของตัวดูด (Blower) ที่ต้องใช้ ซึ่ง

$$TP = \frac{(\overline{Nu} / \overline{Nu}_0)}{(f / f_0)^{1/3}} \quad (26)$$

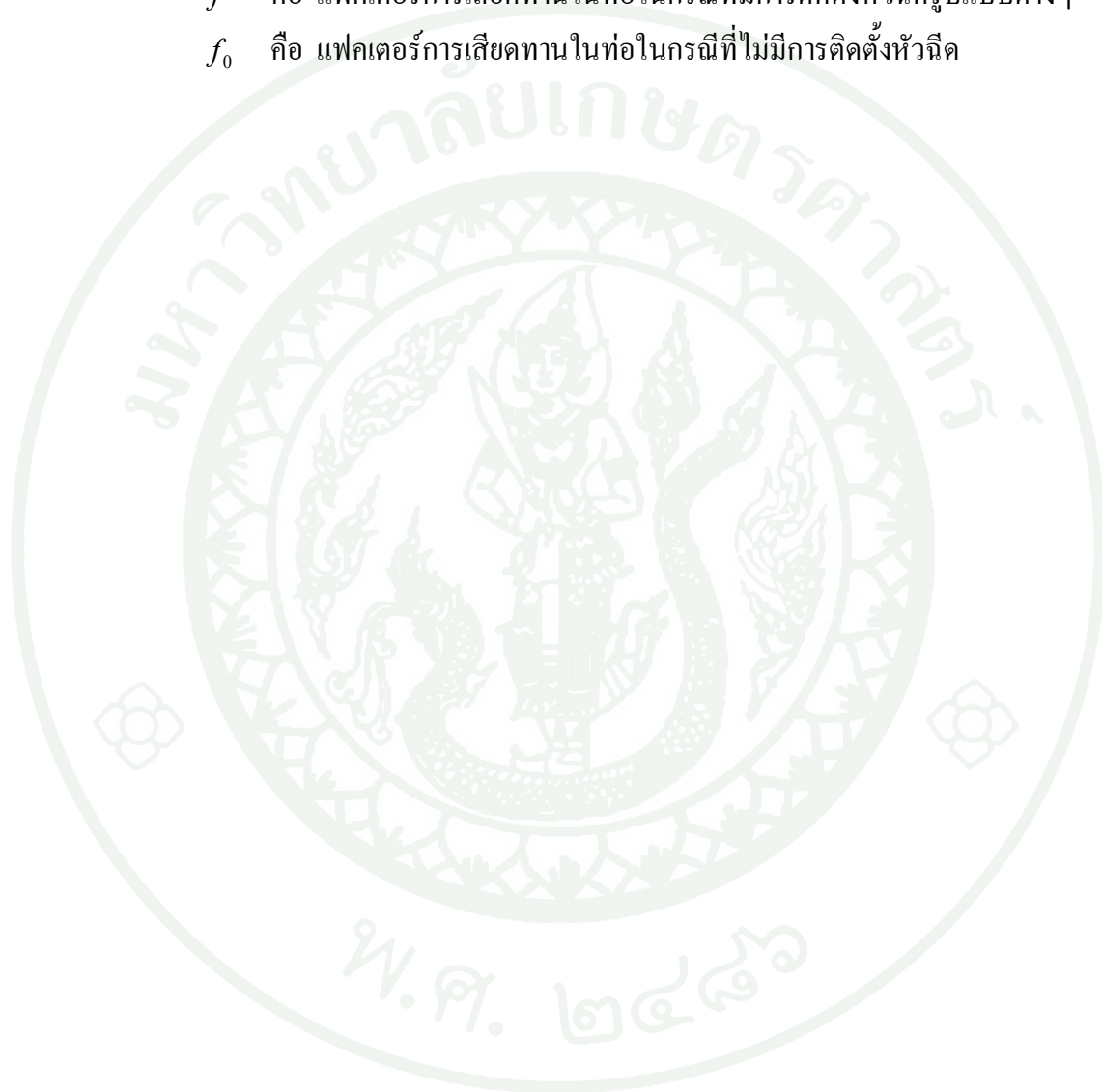
โดย TP คือ ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน

$\overline{Nu}$ คือ ค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยของการไหลในท่อในกรณีที่มีการติดตั้งหัวฉีด
รูปแบบต่างๆ

$\overline{Nu}_0$ คือ ค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยของการไหลในท่อในกรณีที่ไม่มีการติดตั้งหัวฉีด

f คือ แฟคเตอร์การเสียดทานในท่อในกรณีที่มีการติดตั้งหัวฉีดรูปแบบต่างๆ

f_0 คือ แฟคเตอร์การเสียดทานในท่อในกรณีที่ไม่มีการติดตั้งหัวฉีด

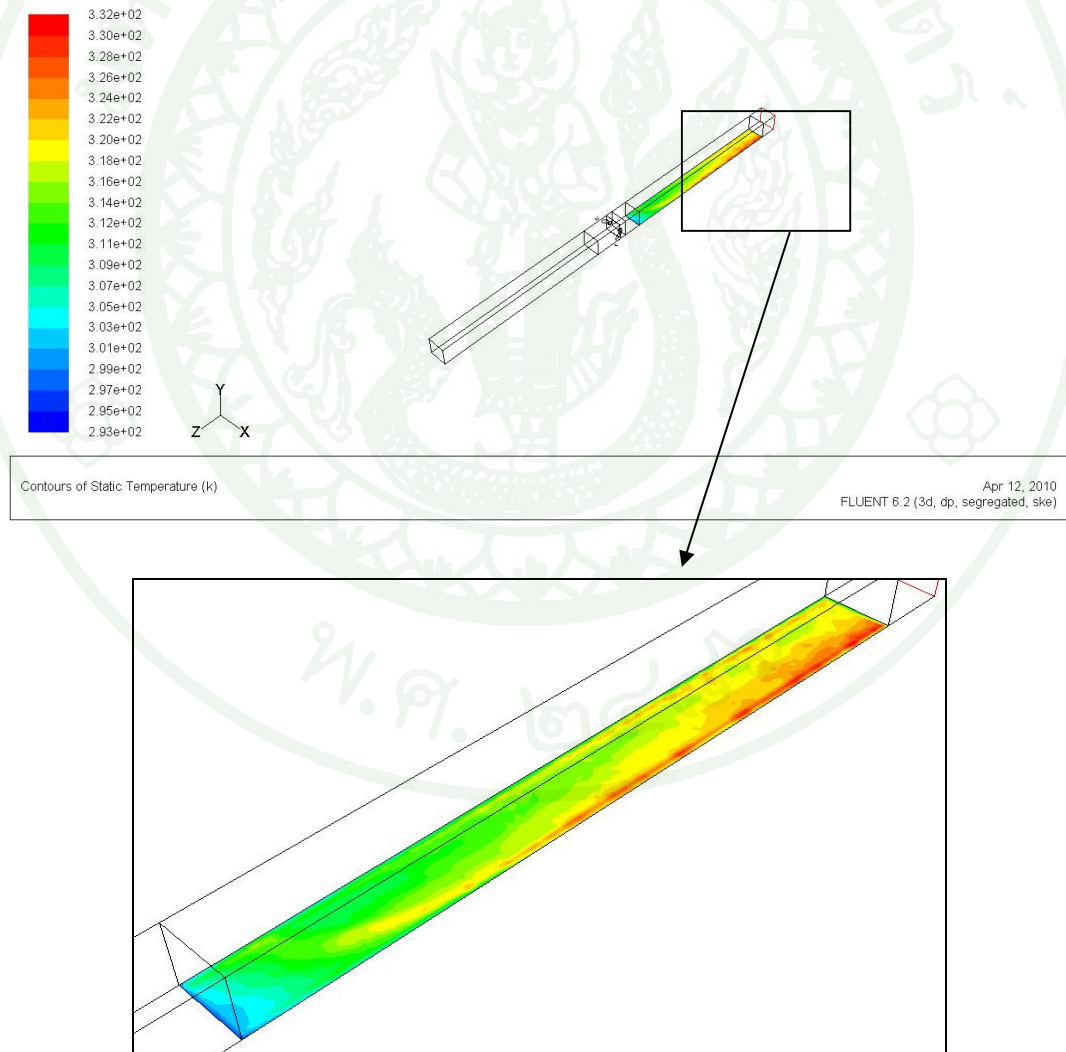


ผลและวิจารณ์

ผล

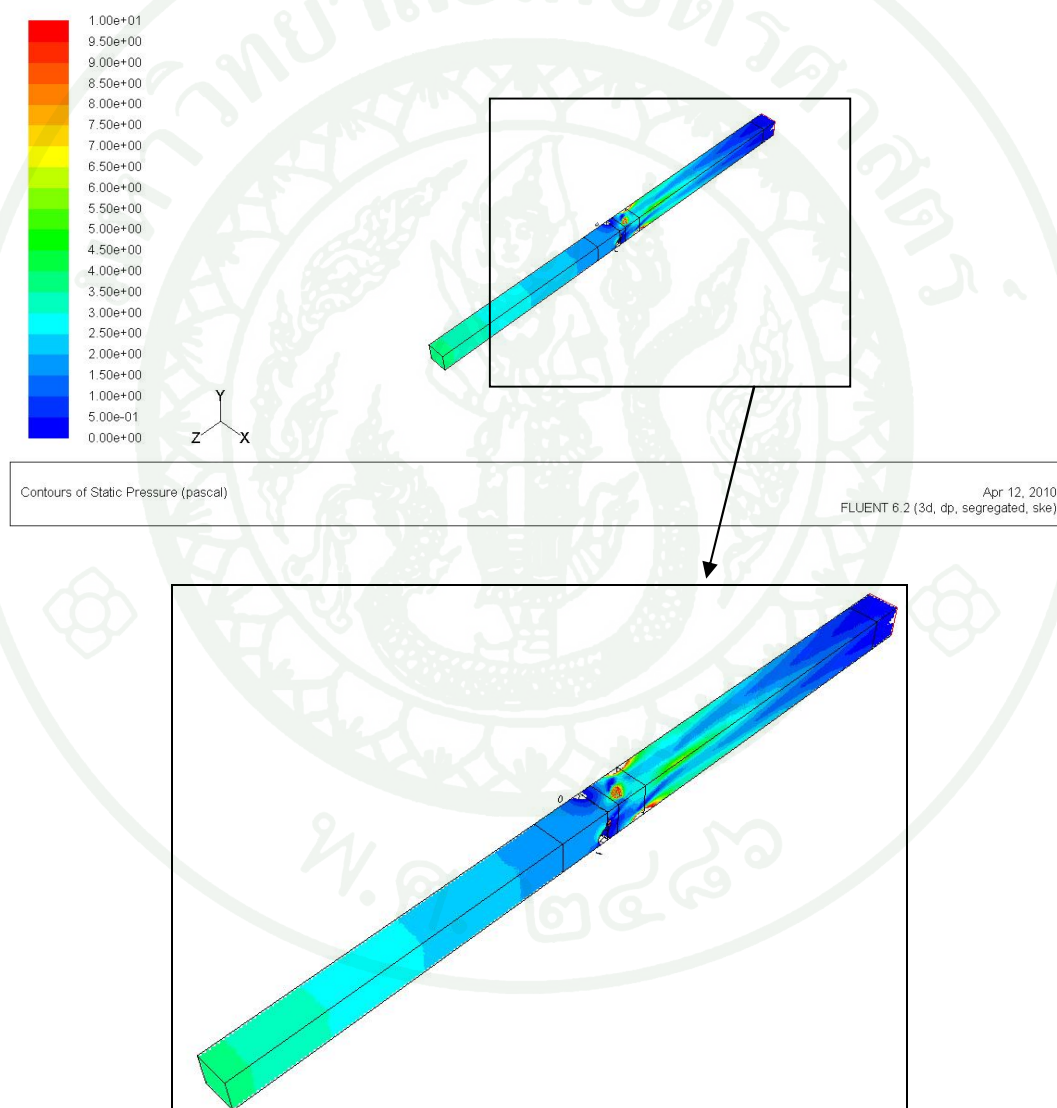
1. ผลการทดลองจากการประมวลผลทางคอมพิวเตอร์ (CFD)

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ด้วยโปรแกรม FLUENT ทำให้ทราบการกระจายตัวความร้อนในทุกๆจุดบนก้อนอากาศที่ได้ทำการวิเคราะห์ จึงทำให้สามารถทราบการกระจายตัวความร้อนบริเวณพื้นผิวด้านล่างของส่วนทดลองได้ ดังภาพที่ 30



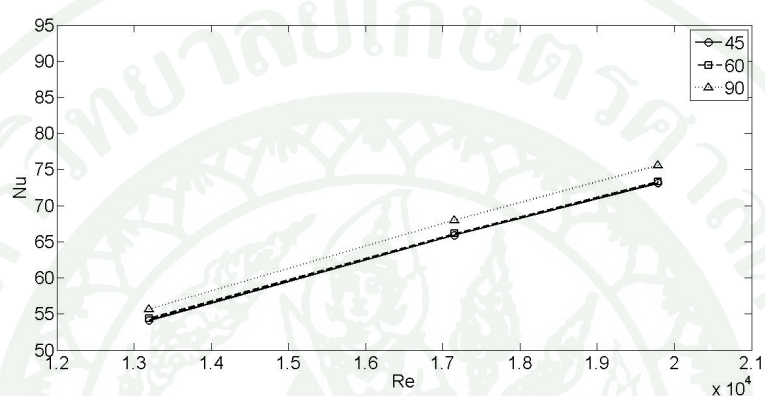
ภาพที่ 30 แสดงการกระจายตัวความร้อนทุกๆจุดบริเวณพื้นผิวด้านล่างของส่วนทดลอง

เมื่อได้ค่าการกระจายตัวความร้อนทุกๆ จุดบริเวณผิวด้านล่างของส่วนทดลอง และจากการวิเคราะห์ทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ด้วยโปรแกรม FLUENT สามารถนำไปคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, ค่าเลขนัสเซิลท์ และสมรรถนะทางความร้อน นอกจากนี้ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ด้วยโปรแกรม CFD ยังทราบการกระจายตัวของความดันในทุกๆ จุดของก๊อนอากาศ ดังแสดงในภาพที่ 31 ทำให้ทราบค่าความดันลดเฉพาะที่และสามารถคำนวณหาค่าประกอบความเสียดทานเฉพาะที่



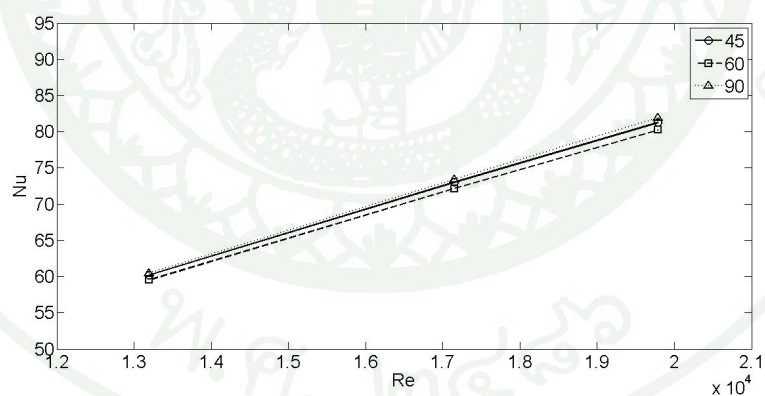
ภาพที่ 31 แสดงการกระจายตัวของความดันในทุกๆ จุดบนก๊อนอากาศ

จึงสามารถแสดงผลการทดลองที่ได้จากการคำนวณหาค่าเลขนัสเซิลที่เฉลี่ย, ค่าประกอบความเสียดทานเฉลี่ย และสมรรถนะทางความร้อนได้ ดังแสดงในภาพที่ 32-43 ที่ค่าอัตราส่วน $\dot{m}_j / \dot{m}$ ค่าต่างๆ โดยภาพที่ 32-33, 36-37 และ 40-41 เป็นการฉีดอากาศเข้าสู่ท่อแบบพุ่งชน (Jet like) และภาพที่ 34-35, 38-39 และ 42-43 เป็นการฉีดอากาศเข้าสู่ท่อแบบกวกระแส (Wake like)



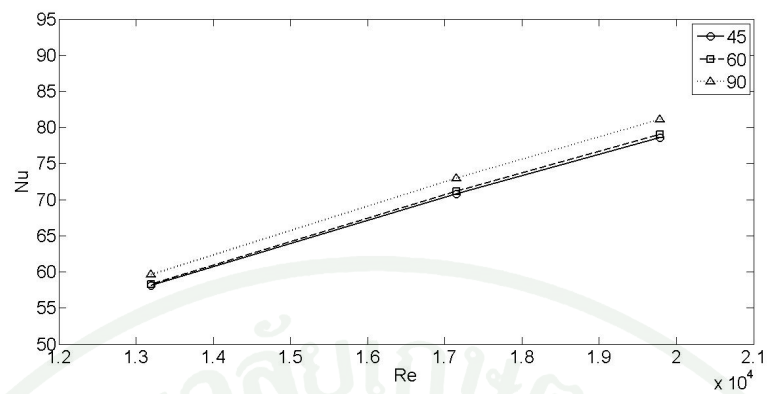
CFD

ภาพที่ 32 แสดงค่าเลขนัสเซิลที่เฉลี่ยของอากาศ โดยฉีดอากาศแบบ Jet-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.09$



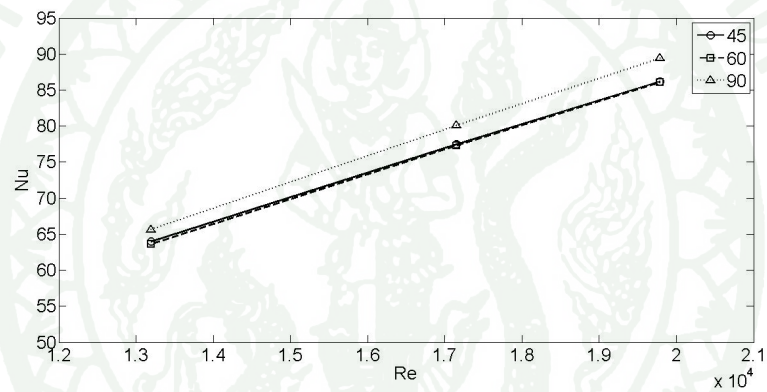
CFD

ภาพที่ 33 แสดงค่าเลขนัสเซิลที่เฉลี่ยของอากาศ โดยฉีดอากาศแบบ Jet-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$



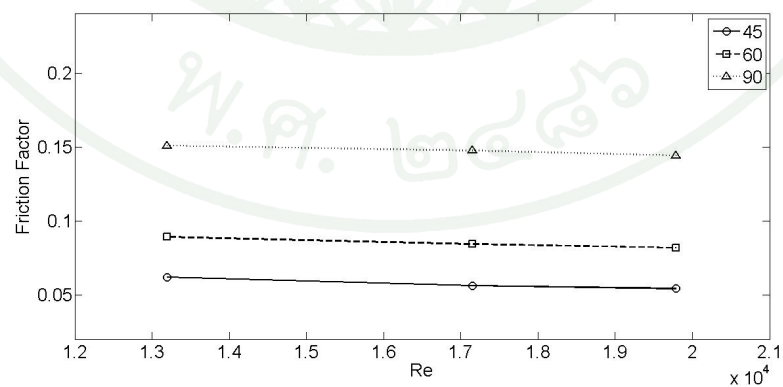
CFD

ภาพที่ 34 แสดงค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยของอากาศ โดยฉีดอากาศแบบ Wake-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.09$



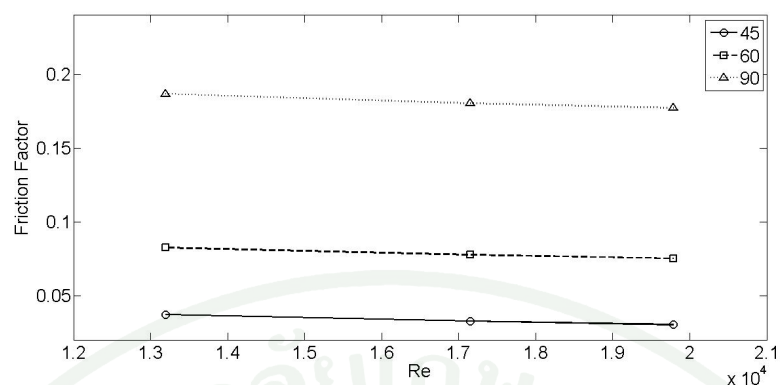
CFD

ภาพที่ 35 แสดงค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยของอากาศ โดยฉีดอากาศแบบ Wake-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$



CFD

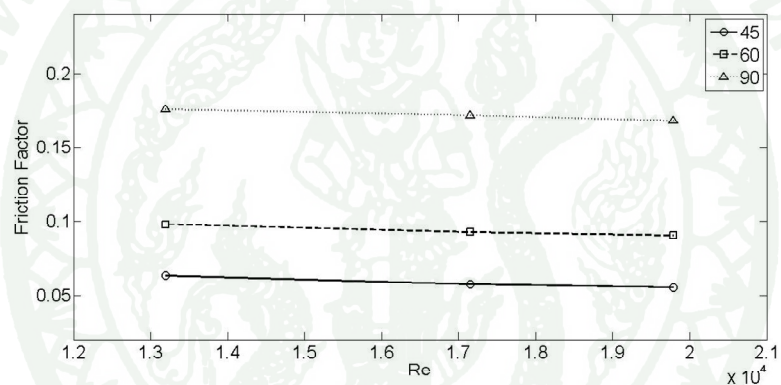
ภาพที่ 36 แสดงค่าประกอบความเสียดทานของอากาศ โดยฉีดอากาศแบบ Jet-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.09$



CFD

ภาพที่ 37 แสดงค่าประกอบความเสียดทานของอากาศ โดยฉีดอากาศแบบ Jet-like ด้วย

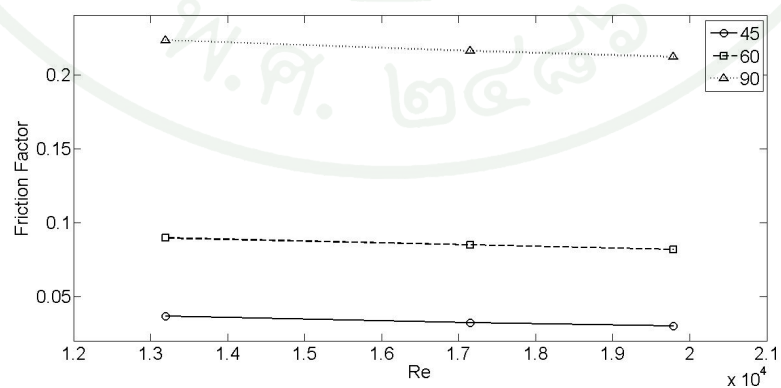
$$\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$$



CFD

ภาพที่ 38 แสดงค่าประกอบความเสียดทานของอากาศ โดยฉีดอากาศแบบ Wake-like ด้วย

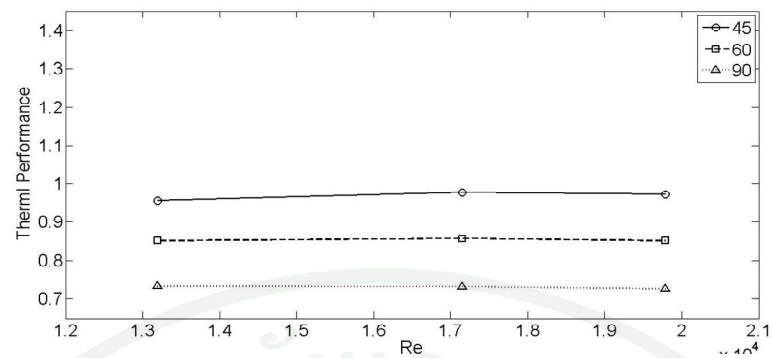
$$\dot{m}_j / \dot{m} = 0.09$$



CFD

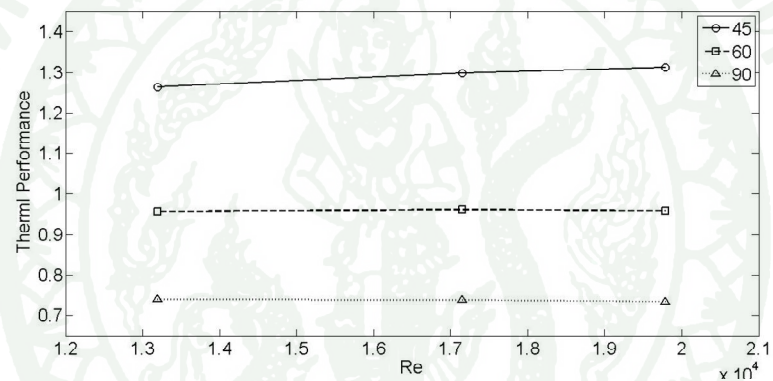
ภาพที่ 39 แสดงค่าประกอบความเสียดทานของอากาศ โดยฉีดอากาศแบบ Wake-like ด้วย

$$\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$$



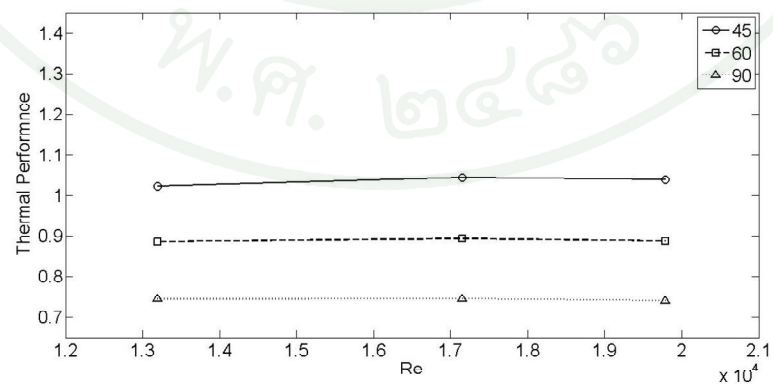
CFD

ภาพที่ 40 แสดงสมรรถนะทางความร้อนของอากาศ โดยฉีดอากาศแบบ Jet-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.09$



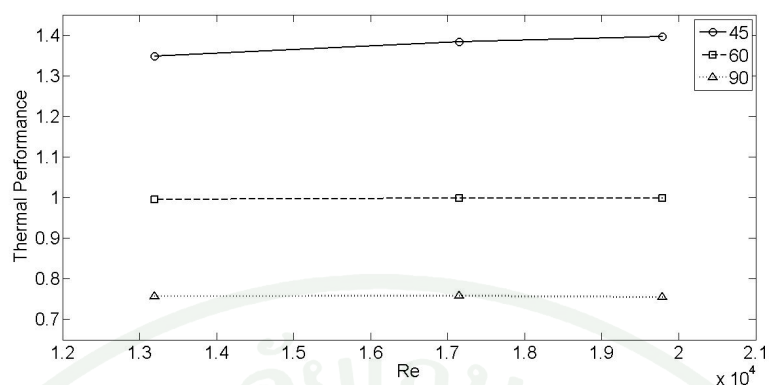
CFD

ภาพที่ 41 แสดงสมรรถนะทางความร้อนของอากาศ โดยฉีดอากาศแบบ Jet-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$



CFD

ภาพที่ 42 แสดงสมรรถนะทางความร้อนของอากาศ โดยฉีดอากาศแบบ Wake-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.09$

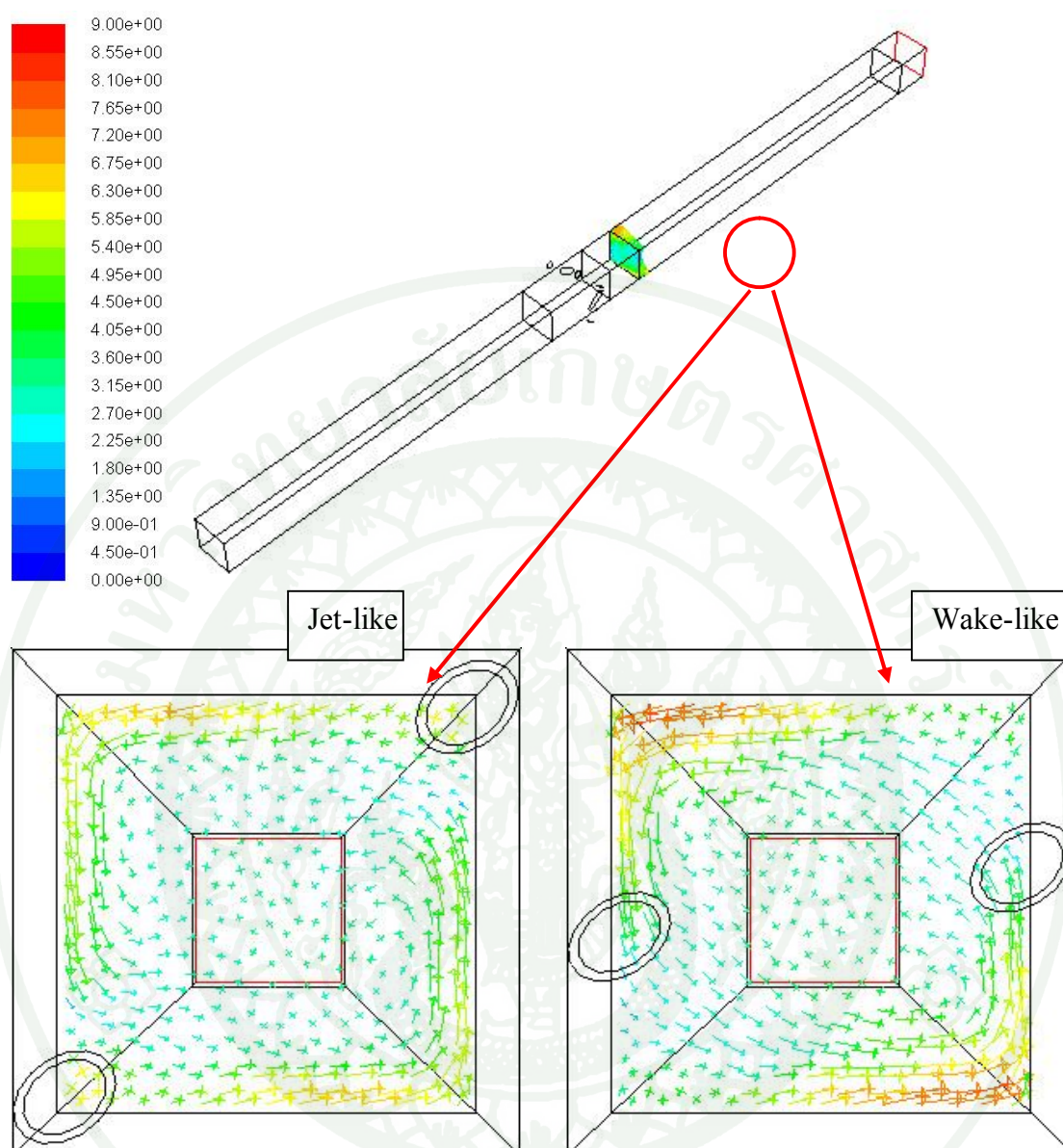


CFD

ภาพที่ 43 แสดงสมรรถนะทางความร้อนของอากาศ โดยฉีดอากาศแบบ Wake-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$

ผลการทดลองภาพจากโปรแกรม FLUENT

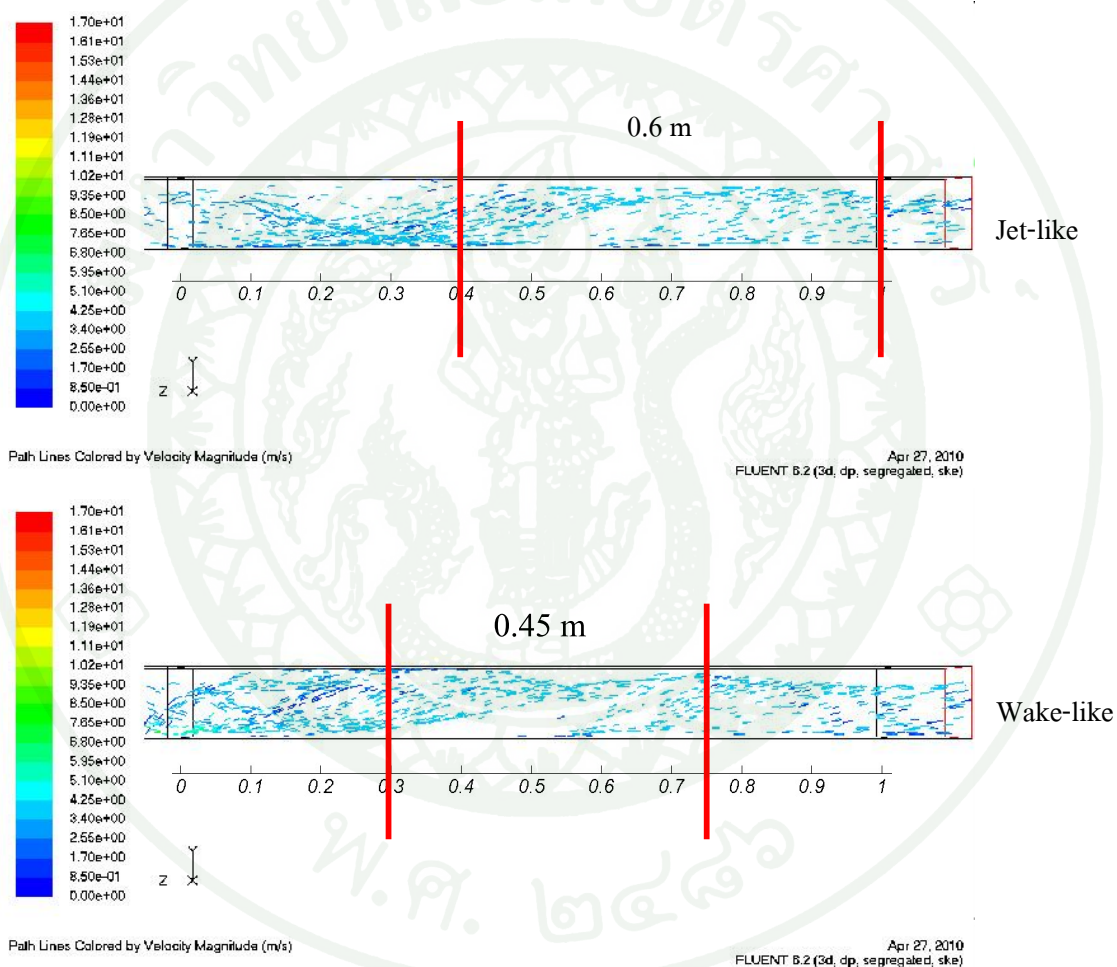
จากผลการทดลองจะเห็นว่ารูปแบบการฉีดอากาศที่ให้ค่าสมรรถนะทางความร้อนสูงจะเป็นการฉีดอากาศที่มุม 45° โดยฉีดด้วยความเร็ว $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$ ซึ่งการฉีดอากาศแบบกว่นกระแสด (Wake-like) จะมีค่าที่สูงกว่าฉีดอากาศแบบพุ่งชน (Jet-like) อยู่เล็กน้อย สามารถอธิบายได้ด้วยภาพแสดงลักษณะการไหลของอากาศจากโปรแกรม FLUENT ดังแสดงในภาพที่ 44



ภาพที่ 44 แสดงการกระจายตัวความเร็วของอากาศ โดยฉีดอากาศด้วยความเร็ว $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$ ที่มุม 45° การไหลหลัก $Re = 20000$ ด้วยโปรแกรม FLUENT

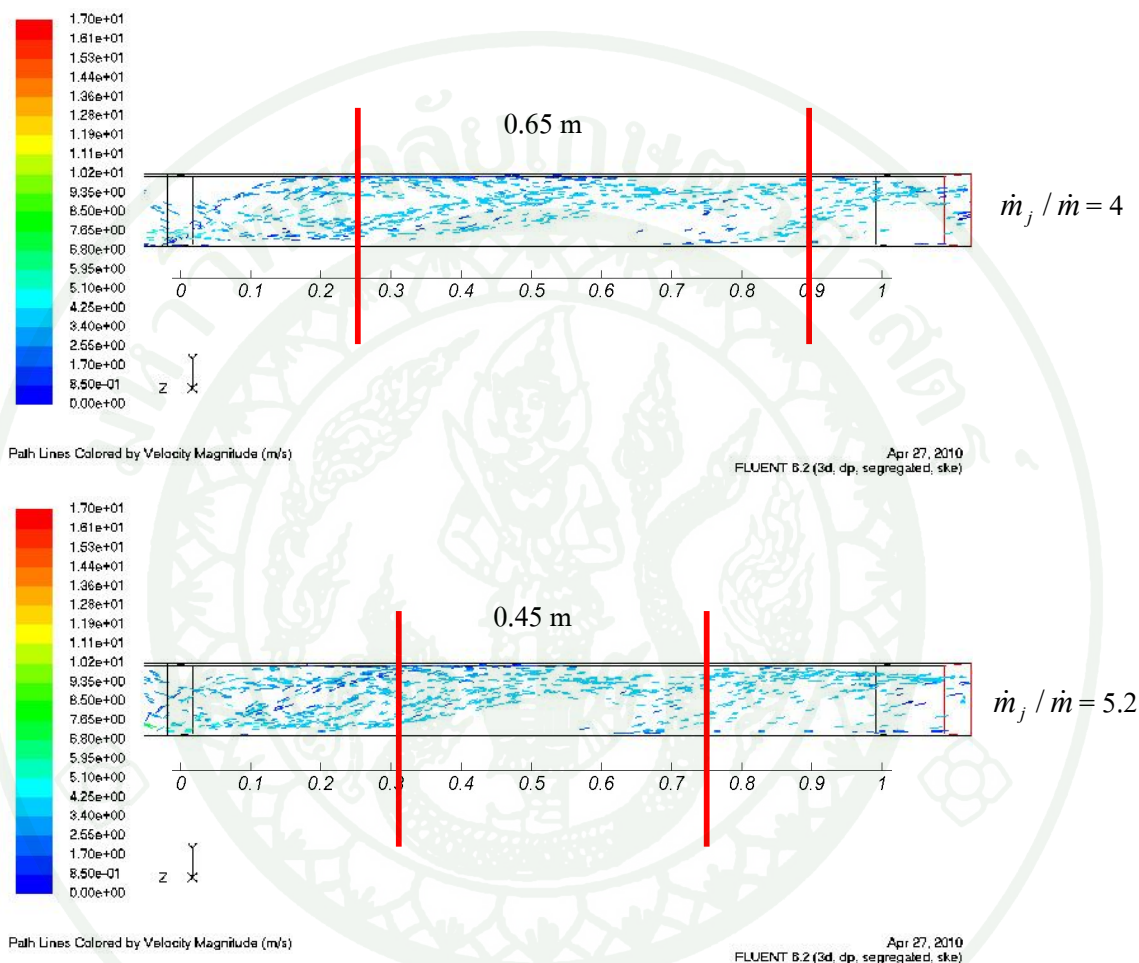
นอกจากผลการศึกษาการกระจายตัวความเร็ว, ความดัน และอุณหภูมิ ในทุกๆ จุดที่วิเคราะห์ ได้จากการวิเคราะห์ทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ด้วยโปรแกรม FLUENT แล้ว การวิเคราะห์ทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณยังสามารถทำนายลักษณะการไหลภายในท่อ รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ดังภาพที่ 45-47

จากภาพที่ 45 แสดงการเปรียบเทียบระยะพิชจากภาพแสดงลักษณะการไหลแบบหมุนควงด้วยการฉีดอากาศแบบ Wake-like และ Jet-like ที่การไหลหลัก $Re = 20000$ และฉีดอากาศด้วยความเร็ว $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$ ที่มุม 45° โดยระยะพิชสามารถหาได้จากระยะห่างระหว่างจุดบนสุดของเกลียวของการไหลแบบหมุนควงสองเกลียวที่อยู่ติดกัน ซึ่งระยะพิชจะบอกจำนวนเกลียวของการไหลแบบหมุนควงต่อหนึ่งหน่วยความยาว โดยที่ระยะพิชที่มีค่าน้อยกว่าจะมีจำนวนเกลียวของการไหลแบบหมุนควงต่อหนึ่งหน่วยความยาวมากกว่า



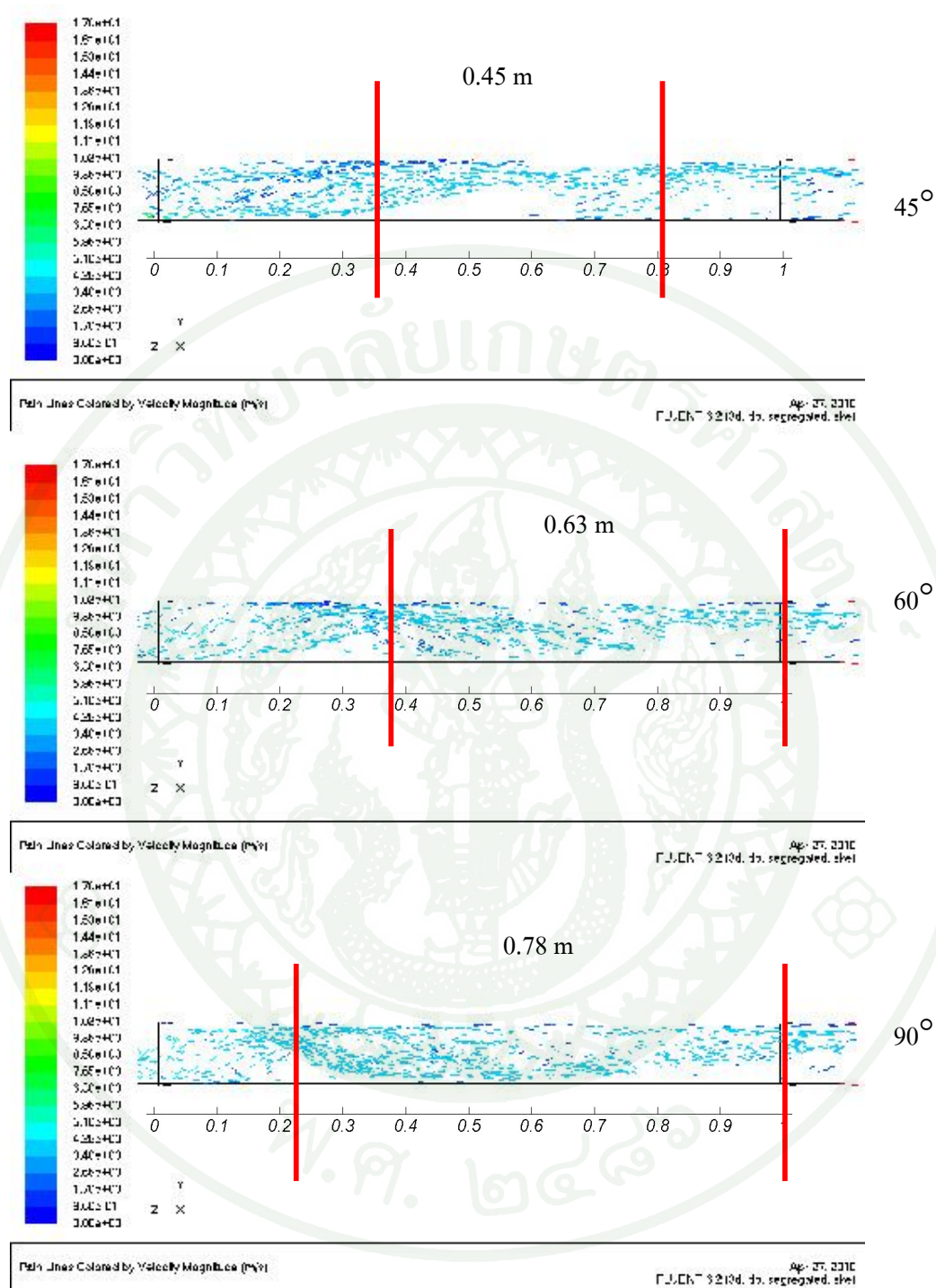
ภาพที่ 45 แสดงการเปรียบเทียบระยะพิชจากภาพแสดงลักษณะการไหลแบบหมุนควงด้วยการฉีดอากาศแบบ Wake-like และ Jet-like

จากภาพที่ 46 แสดงการเปรียบเทียบระยะพิตช์จากภาพแสดงลักษณะการไหลแบบหมุนควงด้วยการฉีดอากาศด้วยความเร็ว $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.09$ และ $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$ ที่การไหลหลัก $Re = 20000$ และฉีดอากาศแบบ Wake-like ที่มุม 45°



ภาพที่ 46 แสดงการเปรียบเทียบระยะพิตช์จากภาพแสดงลักษณะการไหลแบบหมุนควงด้วยการฉีดอากาศด้วยความเร็ว $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.09$ และ $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$

จากภาพที่ 47 แสดงการเปรียบเทียบระยะพิตช์จากภาพแสดงลักษณะการไหลแบบหมุนควงด้วยการฉีดอากาศที่มุม 45° , 60° และ 90° ที่การไหลหลัก $Re = 20000$ และฉีดอากาศแบบ Wake-like ที่ความเร็ว $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$

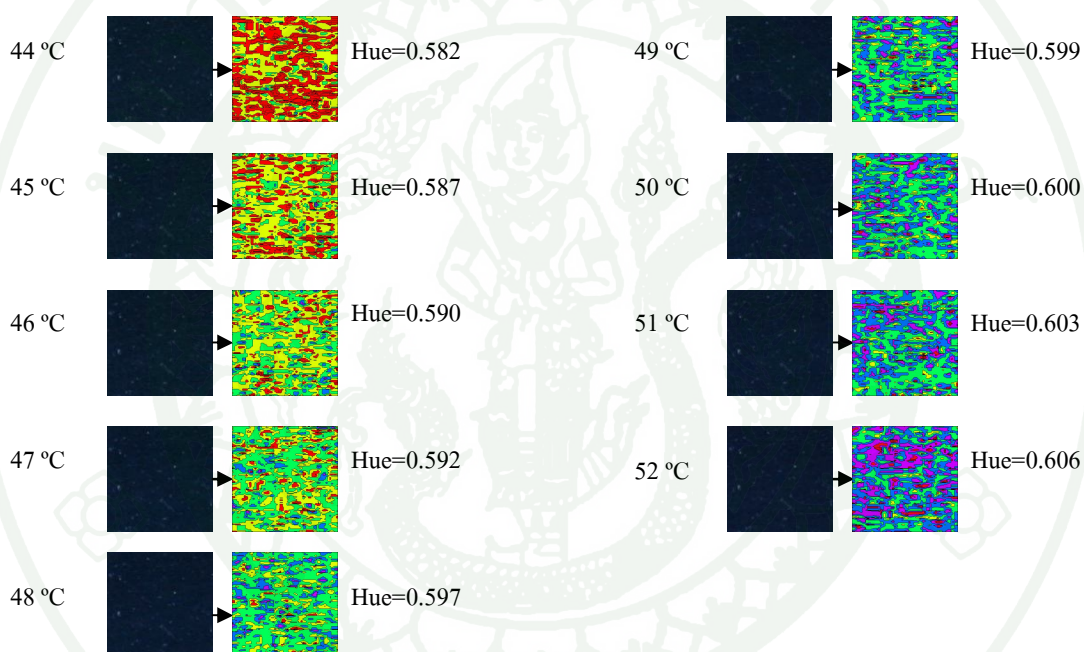


ภาพที่ 47 แสดงการเปรียบเทียบระยะพัดจากรูปแสดงลักษณะการไหลแบบหมุนควงด้วยการฉีด
อากาศที่มุม 45°, 60° และ 90°

2. ผลการทดลองจากการใช้ผลึกเหลว

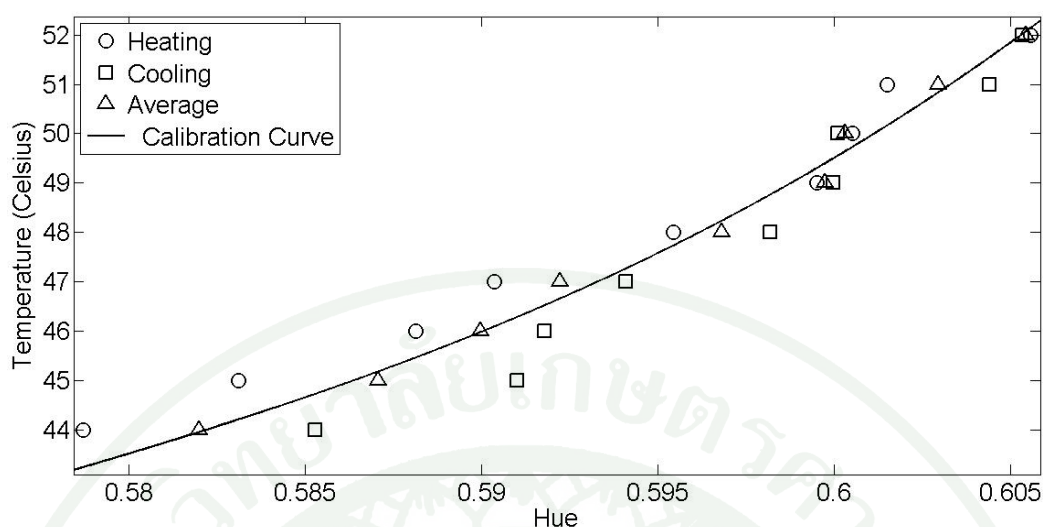
ผลการสอบเทียบสีของผลึกเหลว

เมื่อทำการสอบเทียบสีของผลึกเหลวแล้วพบว่าได้ผลเป็นดังแสดงในภาพที่ 48 โดยพบว่าสามารถประมวลผลภาพสีของผลึกเหลวออกมาจากสีของผลึกเหลว (RGB) ให้อยู่ในรูปของ Hue ซึ่งเป็นเมตริก 2 มิติได้อย่างถูกต้อง ทำให้สามารถนำไปเทียบกับค่าอุณหภูมิที่ผิวท่อซึ่งวัดค่าด้วย Thermocouple ได้



ภาพที่ 48 แสดงสีของผลึกเหลวโดยการประมวลผลภาพจะอยู่ในรูปของ RGB และ Hue

ผลึกเหลวที่นำมาใช้ทดสอบหาอุณหภูมิที่ผิวของแผ่นระนาบในส่วนทดลองนี้ จะมีการเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิ 44-52 °C ซึ่งจะมีการเปลี่ยนเป็นสีแดง, สีเขียว และสีน้ำเงิน ตามลำดับ โดยแต่ละสีจะมีค่า Hue ที่ต่างกัน ดังภาพที่ 49



ภาพที่ 49 กราฟการเทียบสีของผลึกเหลว

จากภาพที่ 49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสีของผลึกเหลว และอุณหภูมิ สามารถหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างสีของผลึกเหลว และอุณหภูมิด้วยวิธี Least Square Method ในรูปแบบของ Cubic Polynomial ได้สมการดังนี้

$$T = 98490h^3 - 169100h^2 + 96970h - 18530 \quad (27)$$

Goodness of fit:

SSE: 0.5261, R-square: 0.9912, Adjusted R-square: 0.986, RMSE: 0.3244

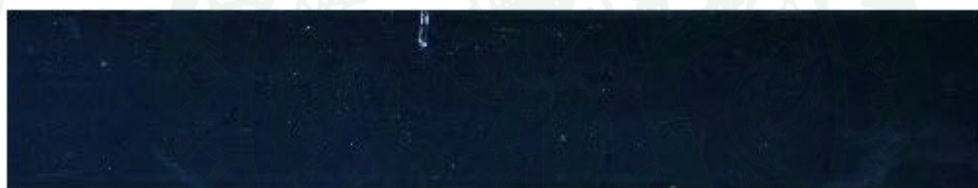
ผลการศึกษาการพาความร้อน

ภาพจากการทดลองขนาด 300 Pixels × 3180 Pixels ดังแสดงในภาพที่ 50 พบว่า ในบางช่วงของผลึกเหลวนบนส่วนทดลองไม่สามารถแสดงสีได้จึงต้องมีการตัดภาพส่วนวิเคราะห์เพื่อให้ผลการทดลองมีความถูกต้อง

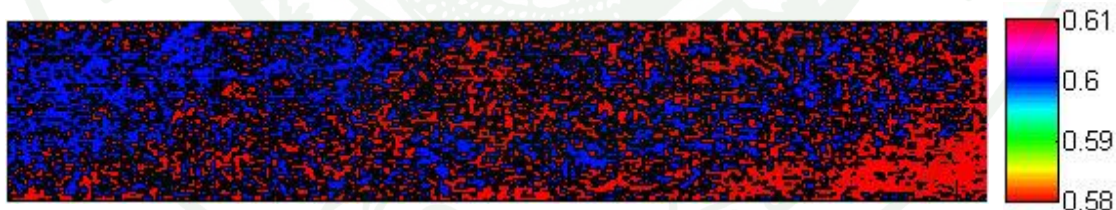


ภาพที่ 50 แสดงสีของผลึกเหลวจากการทดลอง และภาพตัดส่วนวิเคราะห์

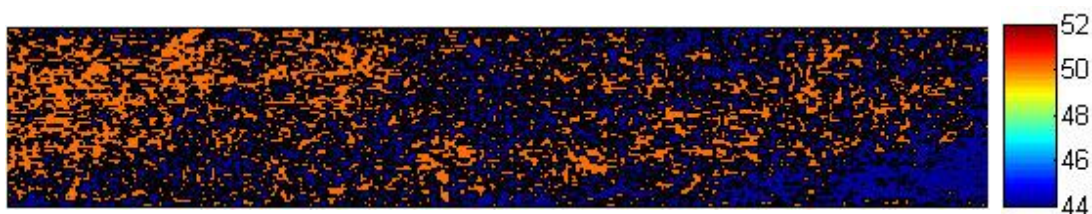
ดังนั้น ส่วนวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ จะเริ่มที่ ระยะ $\frac{X}{L} = 0.3$ ถึง $\frac{X}{L} = 0.8$ ดังแสดงในภาพที่ 51 ซึ่งจะได้ภาพต้นฉบับในปริภูมิ RGB แปลงเป็นข้อมูลอยู่ในปริภูมิ HIS ได้ภาพสีของผลึกเหลวในขอบเขต Hue ดังภาพที่ 52



ภาพที่ 51 แสดงภาพต้นฉบับในปริภูมิ RGB



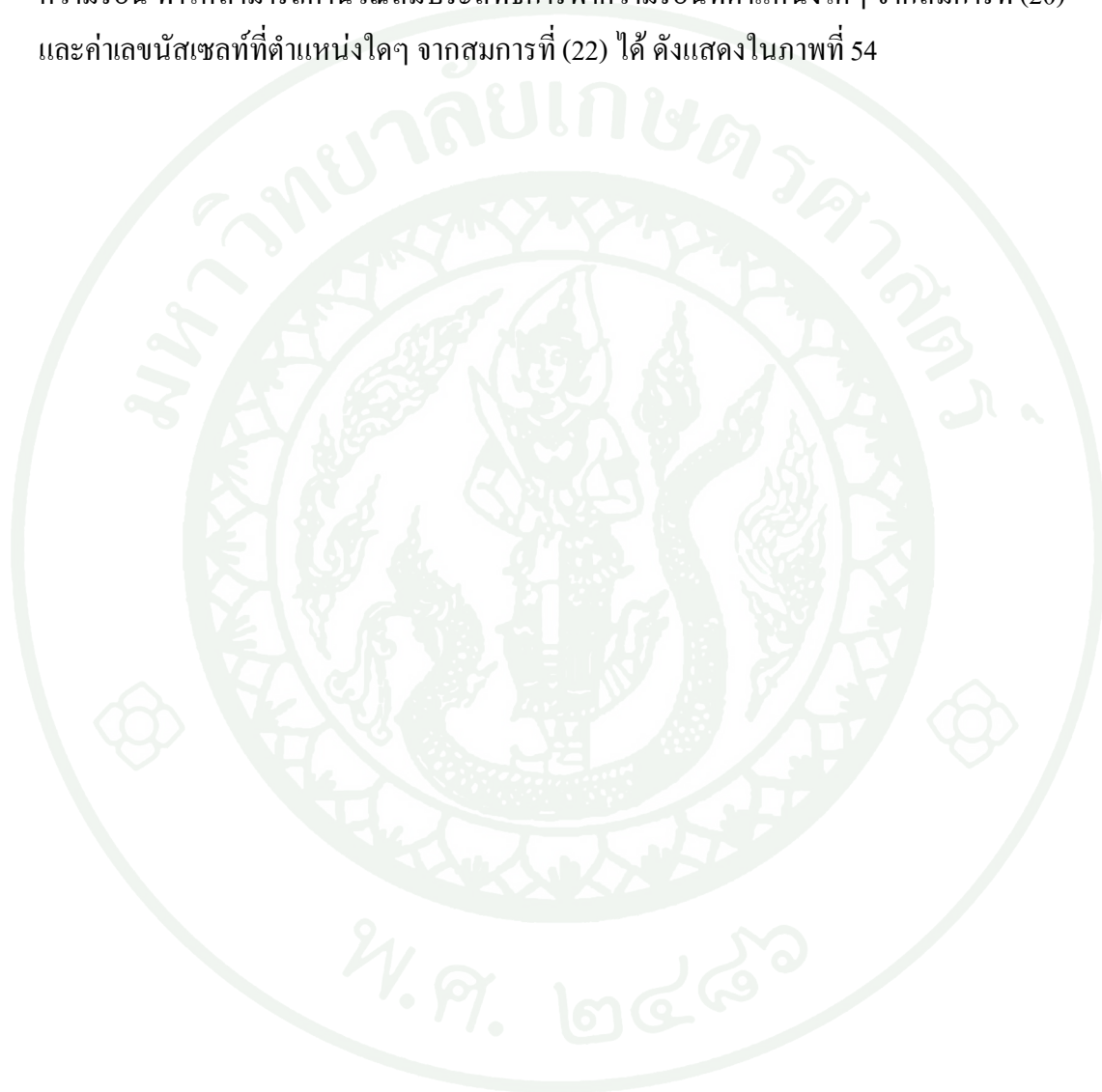
ภาพที่ 52 แสดงสีของภาพในขอบเขต Hue

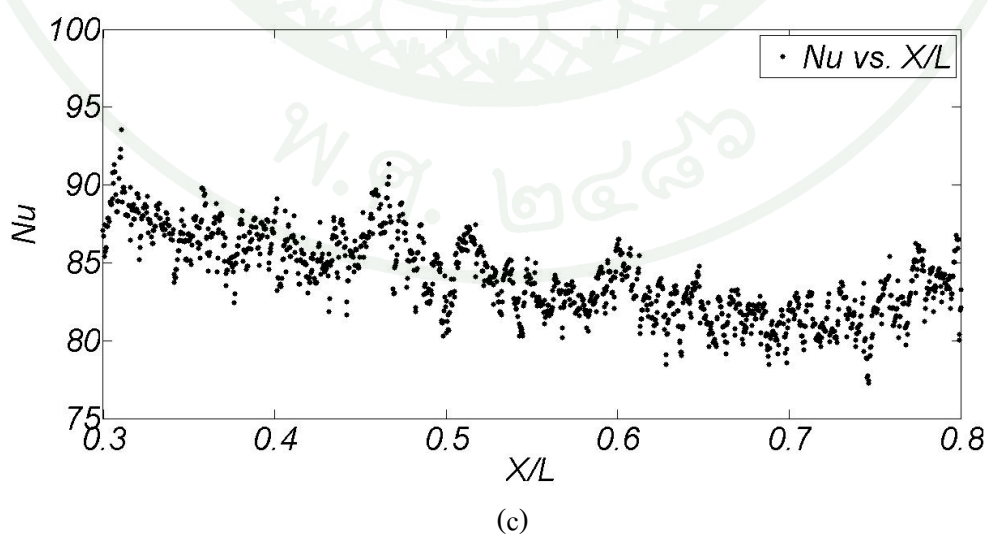
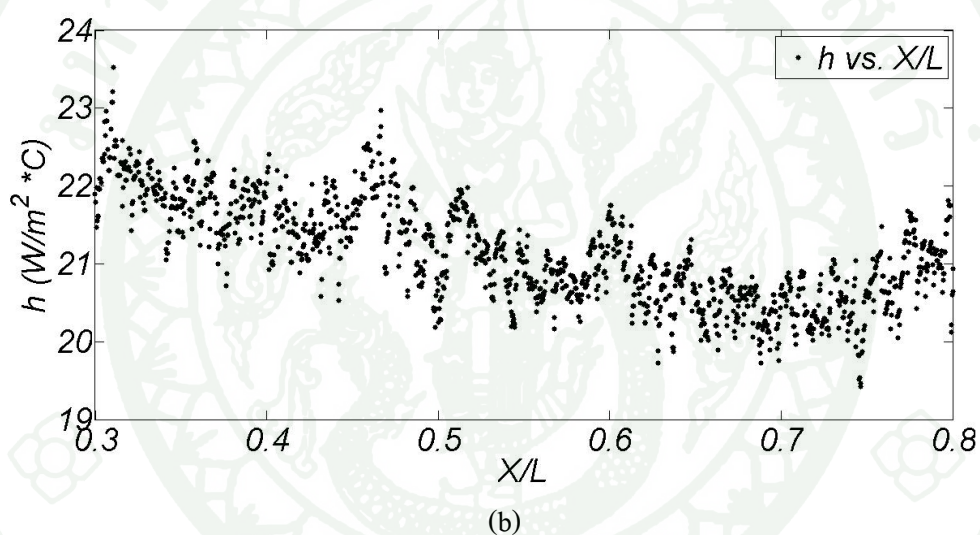
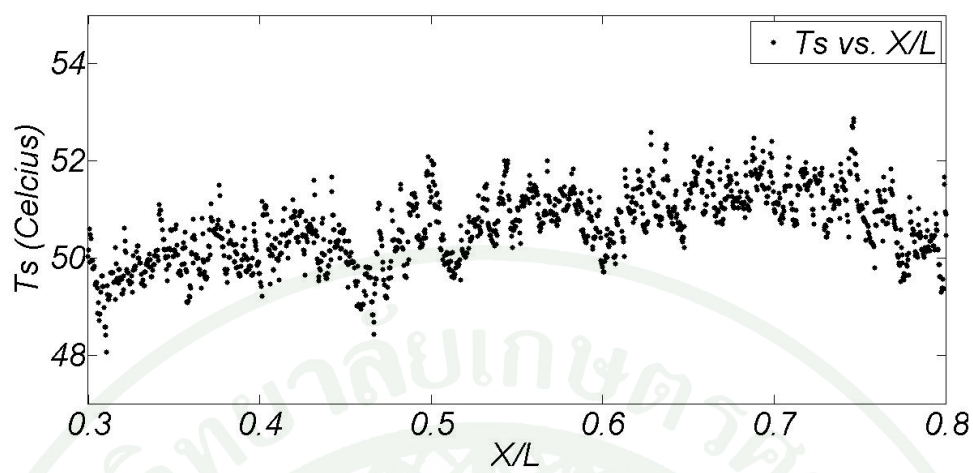


ภาพที่ 53 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิ

จากสมการ (22) สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสีและอุณหภูมิแปลงค่าข้อมูลที่อยู่ในขอบเขตของ Hue ให้เป็นการกระจายตัวของอุณหภูมิ ดังแสดงในภาพที่ 53

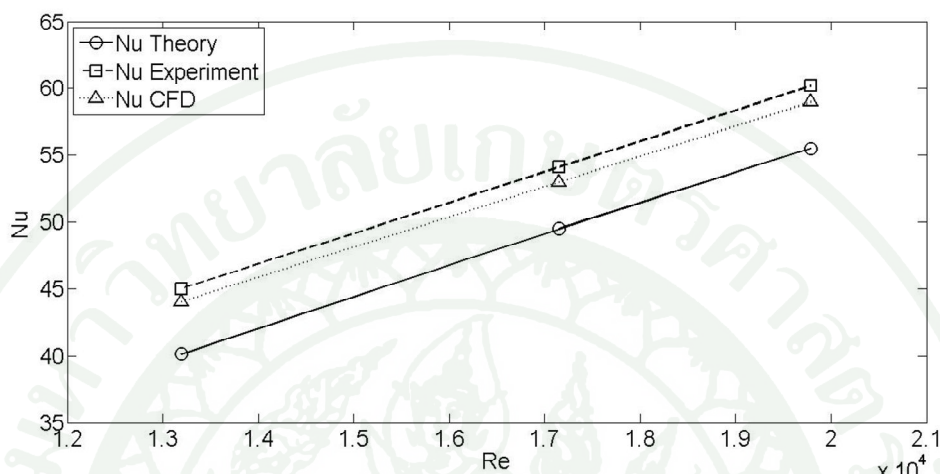
จากการทดลองจะได้ค่า $T_s(i, j)$ ที่ทุกๆ จุดบนพื้นผิวด้านล่างซึ่งติดตั้งชุดอุปกรณ์ทำความร้อน ทำให้สามารถคำนวณสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ตำแหน่งใดๆ จากสมการที่ (20) และค่าเลขนัยเซลล์ที่ตำแหน่งใดๆ จากสมการที่ (22) ได้ ดังแสดงในภาพที่ 54





ภาพที่ 54 แสดงค่า (a) $T_s(i, j)$, (b) $h(i, j)$ และ (c) $Nu(i, j)$ ในทุกๆจุดบนผิวท่อโดยบริเวณทางเข้าติดตั้งท่อฉีดอากาศแบบ Wake-like ที่ความเร็ว $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$ เอียงทำมุม 45°

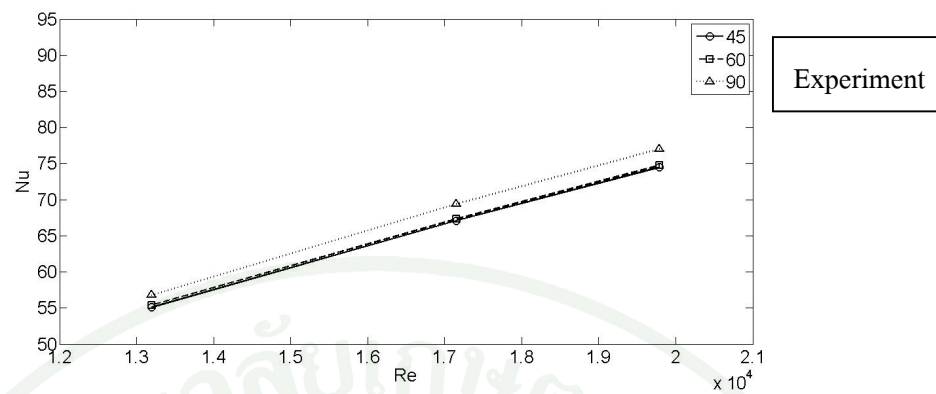
จากอุณหภูมิในทุกๆจุดบนพื้นผิวสามารถคำนวณค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยของท่อเรียบแล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎีโดยใช้สมการที่ (24) ดังแสดงในภาพที่ 55



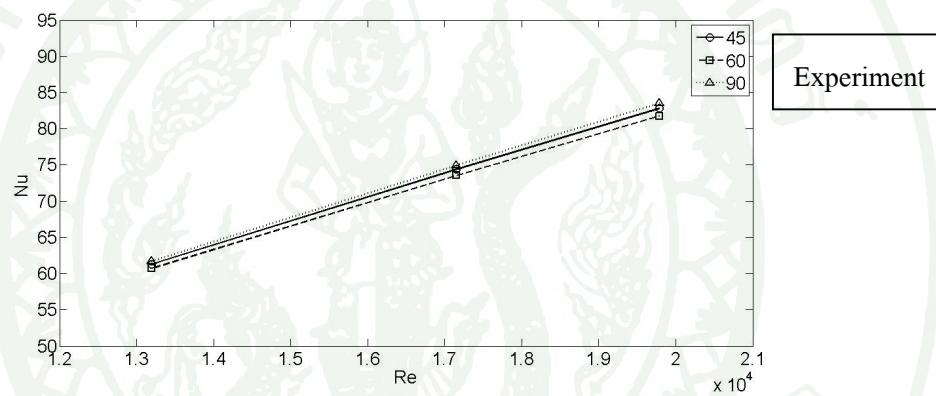
ภาพที่ 55 แสดงการเปรียบเทียบการคำนวณค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยของท่อเรียบจากผลึกเหลว, ทฤษฎี และ CFD

จากภาพที่ 55 จะเห็นได้ว่า ค่าเลขนัสเซิลต์ที่ได้จากการทดลองในท่อเรียบในช่วงเลขเรย์โนลด์ $Re = 13000-20000$ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าเลขนัสเซิลต์ที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎีในสมการที่ (24) มีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าต่างกัน 7 % และแนวโน้มของกราฟไปในทางเดียวกัน

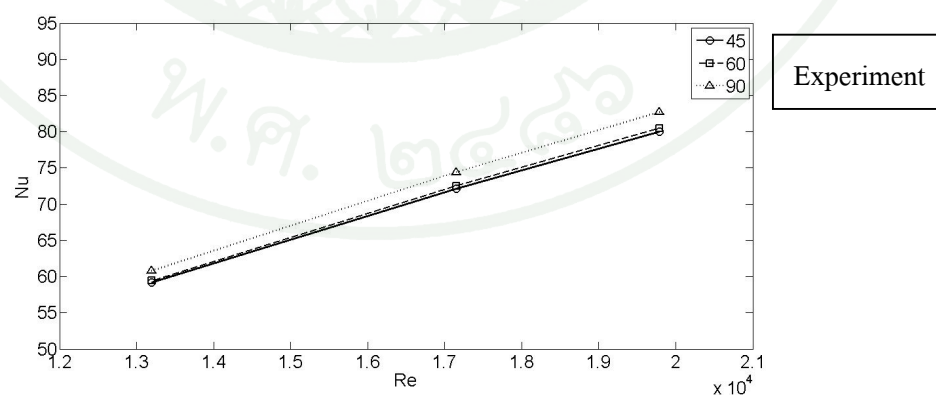
ผลการทดลองและการคำนวณค่าต่างๆ โดยใช้สมการ (21), (23), (25) และ (26) ทำให้ได้ค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยของอากาศในท่อ เมื่อนี้อากาศแบบพุ่งชน (Jet-like) และนี้อากาศแบบกวนกระแส (Wake-like) ที่มุมต่างๆ, ค่าประกอบความเสียดทาน และ ค่าสมรรถนะทางความร้อน (Thermal Performance) สามารถแสดงได้ดังในภาพที่ 56-67 ที่ค่าอัตราส่วน $\dot{m}_j / \dot{m}$ ค่าต่างๆ โดยภาพที่ 56-57, 60-61 และ 64-65 เป็นการนํานี้อากาศเข้าสู่ท่อแบบพุ่งชน (Jet like) และภาพที่ 58-59, 62-63 และ 66-67 เป็นการนํานี้อากาศเข้าสู่ท่อแบบกวนกระแส (Wake like)



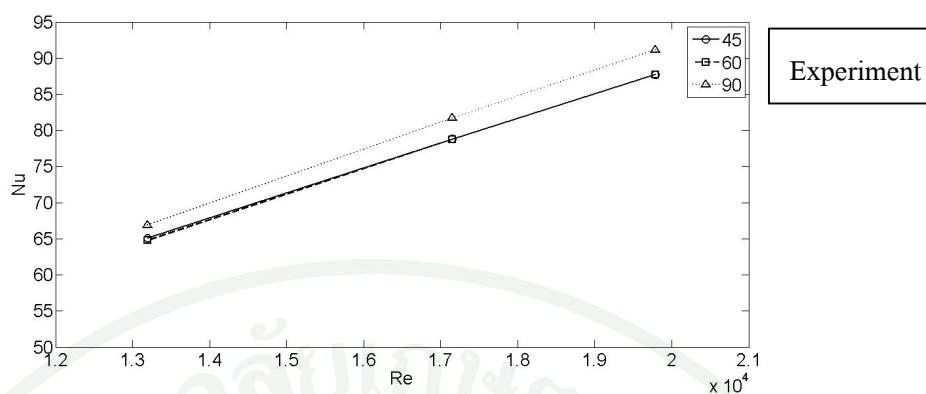
ภาพที่ 56 แสดงค่าเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยของอากาศ โดยฉีดอากาศแบบ Jet-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.09$



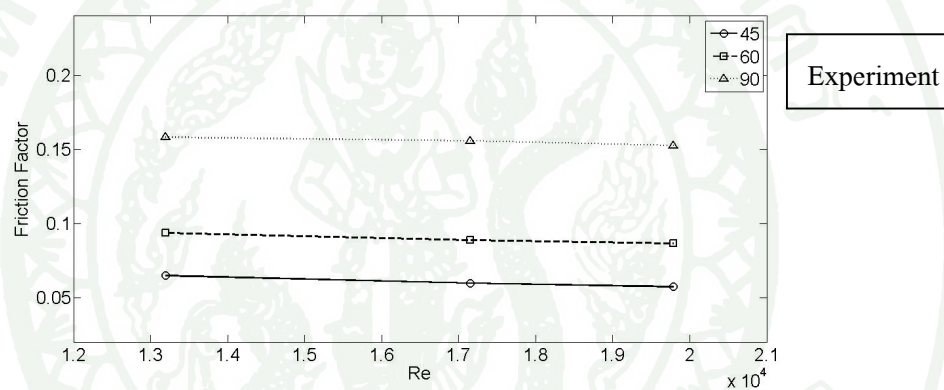
ภาพที่ 57 แสดงค่าเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยของอากาศ โดยฉีดอากาศแบบ Jet-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$



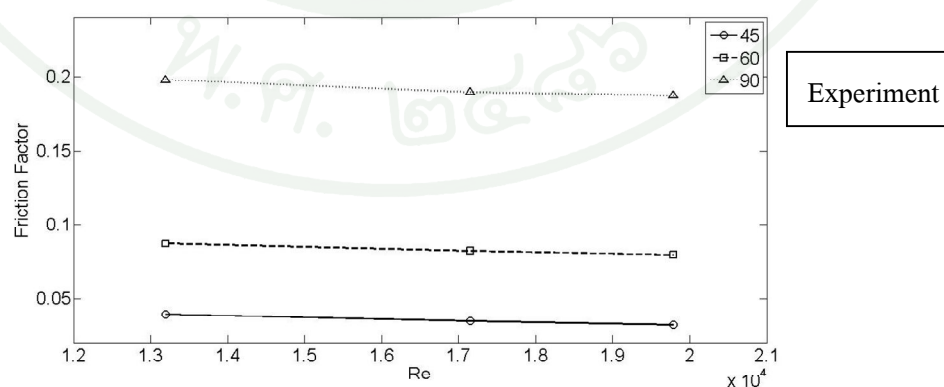
ภาพที่ 58 แสดงค่าเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยของอากาศ โดยฉีดอากาศแบบ Wake-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.09$



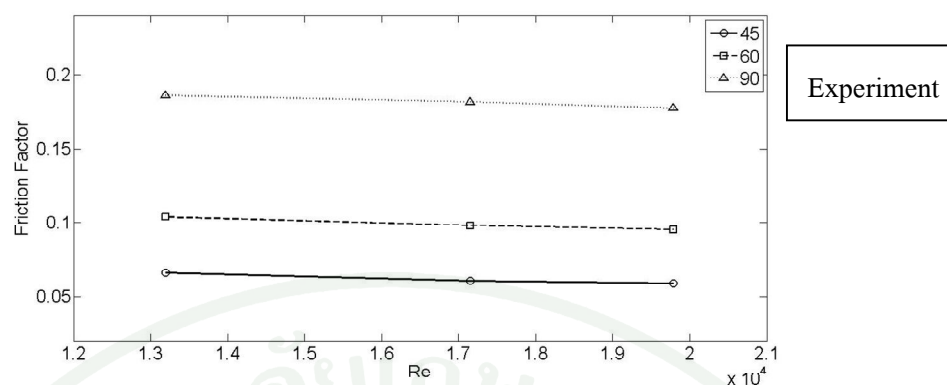
ภาพที่ 59 แสดงค่าเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยของอากาศ โดยฉีดอากาศแบบ Wake-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$



ภาพที่ 60 แสดงค่าประกอบความเสียดทานของอากาศ โดยฉีดอากาศแบบ Jet-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.09$

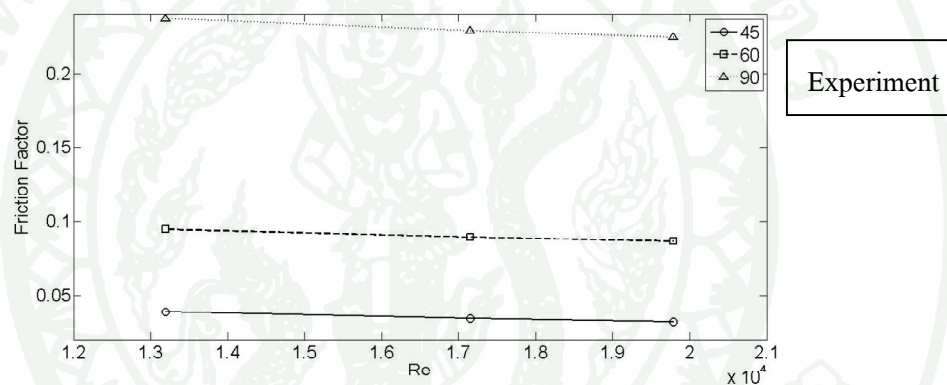


ภาพที่ 61 แสดงค่าประกอบความเสียดทานของอากาศ โดยฉีดอากาศแบบ Jet-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$



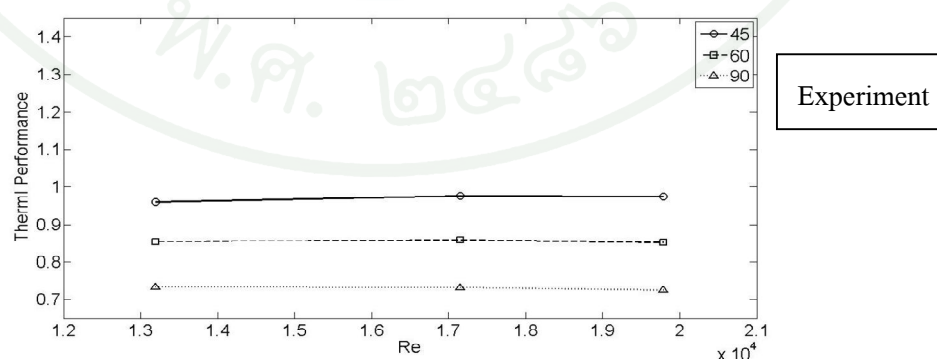
ภาพที่ 62 แสดงค่าประกอบความเสียดทานของอากาศ โดยฉีดอากาศแบบ Wake-like ด้วย

$$\dot{m}_j / \dot{m} = 0.09$$



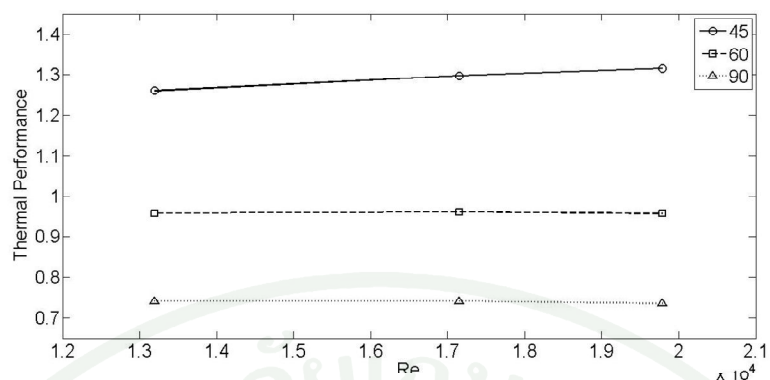
ภาพที่ 63 แสดงค่าประกอบความเสียดทานของอากาศ โดยฉีดอากาศแบบ Wake-like ด้วย

$$\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$$



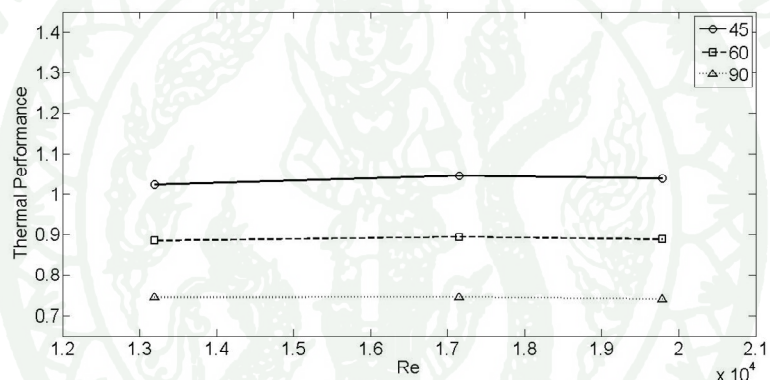
ภาพที่ 64 แสดงสมรรถนะทางความร้อนของอากาศ โดยฉีดอากาศแบบ Jet-like ด้วย

$$\dot{m}_j / \dot{m} = 0.09$$



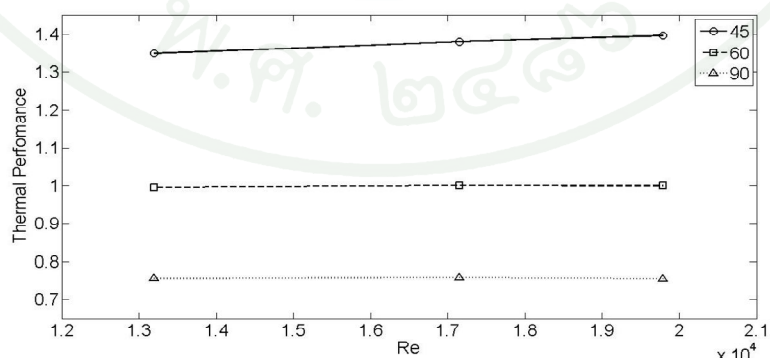
Experiment

ภาพที่ 65 แสดงสมรรถนะทางความร้อนของอากาศ โดยฉีดอากาศแบบ Jet-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$



Experiment

ภาพที่ 66 แสดงสมรรถนะทางความร้อนของอากาศ โดยฉีดอากาศแบบ Wake-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.09$



Experiment

ภาพที่ 67 แสดงสมรรถนะทางความร้อนของอากาศ โดยฉีดอากาศแบบ Wake-like ด้วย $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$

วิจารณ์

1. จากผลการทดลอง จะเห็นได้ว่าผลการทดลองจากการประมวลผลทางคอมพิวเตอร์ (CFD) ด้วยโปรแกรม FLUENT มีค่าใกล้เคียงและสอดคล้องกับผลจากการทดลองจริง โดยมีค่าแตกต่างประมาณ 3% เปรียบเทียบจากค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ย และค่าประกอบความเสียหายในภาพที่ 32-39 และภาพที่ 56-63 ผลการทดลองจากการประมวลผลทางคอมพิวเตอร์ (CFD) ด้วยโปรแกรม FLUENT จึงมีความถูกต้อง และน่าเชื่อถือ

2. จากภาพที่ 55 แสดงการเปรียบเทียบการคำนวณค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ยของท่อเรียบจากผลึกเหลว, ทฤษฎี และ CFD จะเห็นว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าต่างจากทฤษฎีประมาณ 7% และโดยสาเหตุที่ค่าแตกต่างเนื่องจากค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎีนั้น เป็นท่อเรียบรูปวงกลม ซึ่งงานวิจัยนี้กระทำที่ท่อเรียบรูปสี่เหลี่ยม แต่เนื่องจากแนวโน้มของกราฟไปในทางเดียวกัน เพราะฉะนั้นการนำผลึกเหลวมาใช้ในการวัดค่าอุณหภูมิผิวที่ตำแหน่งต่างๆ สามารถให้ค่าเลขนัสเซลล์ที่ได้ถูกต้องแม่นยำและสอดคล้องกับค่าทางทฤษฎี

3. จากภาพที่ 32-35 และ 56-59 แสดงค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ยของอากาศ จะเห็นว่าเมื่อนิดอากาศแบบ Wake-like จะมีค่าเลขนัสเซลล์มากกว่าแบบ Jet-like เพราะเมื่อนิดอากาศแบบ Wake-like ดังภาพที่ 44 พบว่า ความเร็วของอากาศบริเวณพื้นผิวด้านล่างสูงกว่าจึงทำลายชั้นไหลหนืดได้ดีกว่าแบบ Jet-like และ นิดอากาศด้วยความเร็ว $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$ จะมีค่าเลขนัสเซลล์มากกว่า $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.09$ เพราะเป็นการฉีดที่ความเร็วสูงกว่า ในขณะที่การฉีดอากาศที่มุม 45° , 60° และ 90° จะมีค่าเลขนัสเซลล์แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เพราะการฉีดอากาศของแต่ละมุมเป็นการฉีดอากาศในรูปแบบเดียวกัน และความเร็วเดียวกัน

4. จากภาพที่ 36-39 และ 60-63 แสดงค่าประกอบความเสียหาย จะเห็นว่าเมื่อนิดอากาศที่มุม 45° จะมีค่าประกอบความเสียหายน้อยกว่า 60° และ 90° ตามลำดับ เพราะการฉีดอากาศที่มุม 90° จะมีลักษณะการไหลที่ขวางการไหลหลักมากกว่าที่มุม 60° และ 45° ตามลำดับ โดยที่เมื่อนิดอากาศด้วยความเร็ว $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$ เฉพาะที่มุม 45° จะทำให้ค่าประกอบความเสียหายน้อยกว่าฉีดอากาศที่ความเร็ว $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.09$ เพราะเมื่อนิดอากาศที่มุม 45° จะมีลักษณะการไหลที่ไม่ขวางการไหลหลัก ดังนั้น เมื่อนิดอากาศด้วยความเร็วสูงกว่า จึงเป็นการช่วยให้การไหลคล่องตัวมากยิ่งขึ้น แต่เมื่อนิดอากาศด้วยความเร็ว $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$ ที่มุม 90° จะทำให้ค่าประกอบ

ความเสียหายมากกว่าน็อคอากาศที่ความเร็ว $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.09$ เพราะลักษณะการไหลของอากาศขวางการไหลหลัก ในขณะที่เมื่อน็อคอากาศด้วยความเร็วทั้งสองที่มุม 60° มีค่าประกอบความเสียหายไม่แตกต่างกัน เพราะมีลักษณะการไหลของอากาศขวางการไหลหลักเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และการน็อคอากาศแบบ Wake-like และ Jet-like ก็มีประกอบความเสียหายค่าไม่แตกต่างกัน เพราะการน็อคอากาศทั้งสองรูปแบบต่างก็มีลักษณะการไหลของอากาศขวางการไหลหลักมากที่สุดที่มุม 90° , 60° และ 45° ตามลำดับเหมือนกัน

5. จากภาพที่ 40-43 และ 64-67 แสดงค่าสมรรถนะทางความร้อนของอากาศ จะเห็นได้ว่าเมื่อน็อคอากาศแบบ Wake-like ด้วยความเร็ว $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$ ที่มุม 45° มีค่าสมรรถนะทางความร้อนมากที่สุด โดยมีค่าสูงถึง 1.39 เนื่องจากน็อคอากาศแบบ Wake-like และน็อคด้วยความเร็ว $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$ มีค่าเลขนัสเซลล์มากกว่า ตามวิจารณ์ผลข้อที่ 3 ในขณะที่เมื่อน็อคอากาศด้วยความเร็ว $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$ ที่มุม 45° มีค่าประกอบความเสียหายที่น้อยกว่า ตามวิจารณ์ผลข้อที่ 4 ทำให้มีค่าค่าสมรรถนะทางความร้อนสูงที่สุด

6. จากภาพที่ 44 แสดงการกระจายตัวความเร็วของอากาศ โดยน็อคอากาศด้วยความเร็ว $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$ ที่มุม 45° การไหลหลัก $Re = 20000$ ด้วยโปรแกรม FLUENT จะเห็นได้ว่าเมื่อน็อคอากาศแบบกวนกระแสด (Wake-like) จะมีการไหลแบบหมุนควงด้วยความเร็วสูงกว่าน็อคอากาศแบบพุ่งชน (Jet-like) เนื่องจากการไหลแบบ Jet-like จะทำให้เกิดจุดหยุดนิ่งบริเวณจุดกระทบทำให้สูญเสียพลังงาน และการน็อคอากาศแบบ Wake-like มีลักษณะการไหลแบบหมุนควงไปทั่วหน้าตัดของท่อรูปสี่เหลี่ยมมากกว่า การน็อคอากาศแบบ Jet-like ทำให้มีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนดีกว่า

7. จากภาพที่ 45-47 แสดงเปรียบเทียบประสิทธิภาพจากภาพแสดงลักษณะการไหลแบบหมุนควง จะเห็นได้ว่าการน็อคอากาศที่ดีที่สุดคือ การน็อคอากาศแบบ Wake-like ด้วยความเร็ว $\dot{m}_j / \dot{m} = 0.12$ ที่มุม 45° เนื่องจากจะให้ระยะพิทช์ที่มีค่าน้อยที่สุดทำให้มีจำนวนเกลียวของการไหลแบบหมุนควงต่อหนึ่งหน่วยความยาวมากที่สุด ซึ่งเมื่อมีจำนวนเกลียวของการไหลแบบหมุนควงมากกว่า ทำให้การไหลแบบหมุนควงมีความปั่นป่วนสูงกว่าตามไปด้วย ทำให้การพาความร้อนเกิดขึ้นได้ดีกว่า

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากผลการทดลองพบว่าการฉีดอากาศแบบกวนกระแส (Wake-like) จะให้ค่าสมรรถนะทางความร้อนของอากาศที่สูงกว่าฉีดอากาศแบบพุ่งชน (Jet-like) โดยมุมของการฉีดที่ดีที่สุด คือ 45° ระบายของแนวการไหล เพราะให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงถึง 1.39 จึงเหมาะกับการนำไปใช้ในการออกแบบท่อสี่เหลี่ยมในเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งจะสามารถเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อนได้เป็นอย่างดี

งานวิจัยนี้สามารถนำผลึกเหลวมาใช้ในการวัดอุณหภูมิที่บริเวณพื้นผิวได้อย่างถูกต้องแม่นยำ และสามารถใช้ในการประมวลผลทางคอมพิวเตอร์ (CFD) ด้วยโปรแกรม FLUENT มาทำนายผลการทดลองได้อย่างถูกต้องและน่าเชื่อถือ เนื่องจากมีค่าเลขนัสเซลล์ และค่าประกอบความเสียดทานใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง โดยมีค่าต่างกันประมาณ 3% และยังสอดคล้องกับค่าทางทฤษฎีโดยค่าต่างกันประมาณ 7% ช่วยทำให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลองจริง

ผลึกเหลวสามารถทราบอุณหภูมิในทุกๆ จุดบนพื้นผิวที่ฉาบ และการประมวลผลทางคอมพิวเตอร์ (CFD) ด้วยโปรแกรม FLUENT สามารถทราบอุณหภูมิในทุกๆ จุดบนก้อนของไหล ทำให้สามารถทำนายไปถึงลักษณะการไหล เป็นประโยชน์ในการวิจัยและพัฒนาทางวิศวกรรมเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนได้ต่อไปในอนาคต

ข้อเสนอแนะ

1. การถ่ายภาพผลึกเหลวโดยใช้แสงไฟจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ซึ่งมีค่าของสีแดงอยู่น้อยนั้น ทำให้ช่วงสีแดงจากการเทียบสีของงานวิจัย มีช่วงที่สั้นมาก จึงควรเลือกใช้แสงไฟจากหลอดไฟที่มีค่าของสีแดงอยู่มาก จะทำให้มีความถูกต้อง และน่าเชื่อถือมากขึ้น ซึ่งงานวิจัยนี้จำเป็นต้องใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ เนื่องจากสะดวกในการติดตั้ง และภาพที่ได้จากแสงไฟจากหลอดฟลูออเรสเซนต์สามารถแสดงสีได้ถูกต้องเพียงพอแล้วสำหรับงานวิจัยนี้
2. ควรใช้การประมวลผลทางคอมพิวเตอร์ (CFD) ทำนายผลการทดลองก่อนการทดลองจริง จะช่วยลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลองจริง เนื่องจากการทดลองจริงนั้นมีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก และ CFD ยังช่วยให้ทราบถึงลักษณะการไหล ความเร็ว ความดัน และอุณหภูมิ ซึ่งทำให้วิเคราะห์ได้ว่าการไหลแบบหมุนควงแบบไหนน่าจะดีที่สุด
3. ระยะเวลาในการทำการทดลองกับการสอบเทียบสีไม่ควรห่างกันเป็นเวลานาน เนื่องจากผลึกเหลวที่ฉาบไว้นานๆ จะเริ่มมีการเสื่อมสภาพ ซึ่งอาจให้สีไม่เหมือนตอนเทียบสี

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- Alok, C., P.K. Sahoo and S.C. Solanki. 2006. Analysis of heat transfer augmentation and flow characteristics due to rib roughness over absorber plate of a solar air heater. **Renewable Energy** 31: 317-331.
- Dittus, F.W. and L.M.K. Boelter. 1930. **Engineering 2**. University Berkley, California.
- Duffie, J.A. and W.A. Beckman. 1980. **Solar engineering of thermal processes**. Wiley, New York.
- Ekkad, S.V. and J.C. Han. 1997. Detailed Heat Transfer Distributions in Two-pass Square Channels with Rib Turbulators. Int. J. **Heat Mass Transfer** 40: 2525-2537.
- Farina, D.J., J.M. Ahcker, R.J. Moffat and J.K. Eaton. 1994. Illuminant invariant calibration of thermochromic liquid crystals. **Exp Therm Fluid Sci.** 9: 1-12
- Frank, K. and S.B. Mark. 2001. **Principles of heat transfer**. Thomson Learning Inc, Colorado:
- Garg, H.P. and J. Prakash. 1997. **Solar energy fundamentals and applications**. Tata McGraw-Hill, New Delhi:
- Gluckman, B.J., H. Willaime and J.P. Gollub. 1993. Geometry of iso-thermal and isoconcentration surfaces in thermal turbulence. **Phy Fluids**. 5: 647-661.
- Gupta, D., S.C. Solanki and J.S. Saini. 1997. Thermo hydraulic performance of solar air heaters with roughened absorber plates. **Sol Energy** 61(1): 33-42.

- Hacker, J.M. and J.K. Eaton. 1995. **Heat transfer measurements in a backward facing step flow with arbitrary wall temperature variations**. Report No MD-71. Thermosciences Division. Department of Mechanical Engineering. Stanford University.
- Ireland, P.T. and T.V. Jones. 1987. Response time of a surface thermometer employing encapsulated thermochromic liquid crystals. **J. Phys.** 20: 1195-1199
- Jaurker, A.R., J.S. Saini and B.K. Gandhi. 2006. Heat transfer and friction characteristics of rectangular solar air heater duct using rib-grooved artificial roughness. **Sol. Energy** 80(8): 895-907.
- John, D.A. 2005. **Computational Fluid Dynamic**. McGraw-Hill International Editions, New York.
- Karmare, S.V. and A.N. Tikekar. 2010. Analysis of fluid flow and heat transfer in a rib grit roughened surface solar air heater using CFD. **Solar Energy** 84: 409-417.
- Karwa, R. 2003. Experimental studies of augmented heat transfer and friction in asymmetrically heated rectangular ducts with ribs on the heated wall in transverse, inclined, v-continuous and v-discrete pattern. **Int Comm Heat Mass Transfer** 30(2): 241-50.
- Karwa, R., S.C. Solanki and J.S. Saini. 1999. Heat transfer coefficient and friction factor correlations for the transitional flow regime in rib-roughened rectangular ducts. **Int J Heat Mass Transfer** 42: 1597-615.
- Kobayashi, T., T. Saga and D. Doeg-Hee. 1998. Time response characteristics of microcapsulated liquid-crystal particle. **Heat Transfer-Jpn Res.** 27: 390-398.
- Layek, A., J.S. Saini and S.C. Solanki. 2007. Second law optimization of a solar air heater having chamfered rib-groove roughness on absorber plate. **Renew Energy** 32: 1967-80.

- Lee, C.K. and S.A. Abdel-Moneim. 2001. Computational analysis of heat transfer in turbulent flow past a horizontal surface with 2-D ribs. **Int Commun Heat Mass Transfer** 28(2): 161-70.
- Liou, T.M., J.J. Hwang and S.H. Chen. 1993. Simulation and measurement of enhanced turbulent heat transfer in a channel with periodic ribs on one principal wall. **Int J Heat Mass Transfer** 36: 507-17.
- McDonnell, D.G. 1987. Thermochromic cholesteric liquid crystals. In: Gray GW (ed) Thermotropic liquid crystals. vol 22. **Wiley, London.** 2(80): 120-144
- Makow, D. 1991. **Liquid crystals in decorative and visual arts. In: Bahadur B (ed) Liquid crystals applications and uses vol 2.** World Scientific, New Jersey.
- Moffat, R.J. 1990. Some experimental methods for heat transfer studies. **Exp Therm Fluid Sci.** 3: 14-32.
- Panigrahi, P.K. and A. Tariq. 2003. Liquid Crystal Heat Transfer Measurements in a Rectangular Channel with Solid and Slit Rib. **Journal of Visualization.** 6(4): 407-416.
- Praisner, T.J., C.V. Seal, L. Takmaz and C.R. Smith. 1997. Spatial-temporal turbulent flow-field and heat transfer behavior in endwall junctions. **Int J Heat Fluid Flow** 18: 142-151
- Sabatino, D.R., T.J. Praisner and C.R. Smith. 2000. A high-accuracy calibration technique for thermochromic liquid crystal temperature measurements. **Exp Fluid** 28:497-505.
- Tanda, G. 2004. Heat transfer in rectangular channels with transverse and V-shaped broken ribs. **Int J Heat Mass Transfer** 47: 229-43.

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นายอักรพล หวานระรื่น
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 23 กรกฎาคม 2524
สถานที่เกิด	จังหวัดระยอง
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	รางวัลโครงการ Industrial Awards for Outstanding Engineering Project จากผลงาน “การพัฒนาปั๊มน้ำขนาดเล็กในเชิงวิศวกรรม เพื่อการประหยัดพลังงาน” ประจำปี 2547 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนสนับสนุนคุณภาพงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา เพื่อการตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติและนานาชาติ จากบัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์