

การศึกษาการพาความร้อนแบบอิสระโดยใช้ผลึกเหลวเป็นสารแขวนลอยในของไหล

A Study of Free Convection Using Thermochromic Liquid Crystals as Dilute Suspension in a Fluid

วีรชัย ชัยวรพฤษ และ ชวลิต กิตติชัยการ *

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถนนพหลโยธิน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

*ติดต่อ: โทรศัพท์: +6629428555 ต่อ 1801, โทรสาร: +6625794576, E-mail: fengclk@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอเทคนิคการประยุกต์ใช้ผลึกเหลว (Thermochromic Liquid Crystals) มาผสมให้เป็นสารแขวนลอยในน้ำเพื่อใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของน้ำเมื่อมีการพาความร้อนแบบอิสระ ในการศึกษาทำการทดลองและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) เพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องแม่นยำของเทคนิคใหม่ที่ได้นำเสนอ ในส่วนของการทดลองนั้นผลึกเหลวจะถูกนำมาผสมกับน้ำซึ่งเป็นตัวกลางในการพาความร้อนแบบอิสระระหว่างแผ่นระบายร้อน 2 แผ่นที่เลขไรย์ลีเท่ากับ 4.8×10^7 การกระจายอุณหภูมิของน้ำผสมผลึกเหลวระหว่างแผ่นระบายทั้งสองนี้จะอาศัยการเปลี่ยนแปลงเชิงกลของโครงสร้างเชิงโมเลกุลของผลึกเหลวซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่อมีแสงขาวซึ่งฉายเป็นระนาบบางลงบนน้ำซึ่งมีผลึกเหลวเป็นสารแขวนลอยจะทำให้เกิดการสะท้อนของสีของผลึกเหลวที่แตกต่างกัน เมื่อประมวลผลภาพด้วยโปรแกรมการประมวลผลภาพที่ได้พัฒนาขึ้น และนำไปสอบเทียบกับอุณหภูมิค่าต่างๆแล้วจะทำให้ได้ข้อมูลการกระจายอุณหภูมิของน้ำที่อยู่ระหว่างแผ่นระบายร้อนทั้งสองได้อย่างละเอียดแบบที่ไม่สามารถได้จากอุปกรณ์วัดอุณหภูมิใดๆ การกระจายอุณหภูมินี้สามารถนำไปคำนวณหาค่าตัวเลขนัสเซลท์ (Nusselt Number) สำหรับการพาความร้อนแบบอิสระภายในพื้นที่ปิดระหว่างแผ่นระบายร้อน 2 แผ่นได้

จากผลการทดลองและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทาง CFD พบว่าค่าการกระจายอุณหภูมิของน้ำผสมผลึกเหลวภายใต้การพาความร้อนแบบอิสระมีค่าที่สอดคล้องกัน มีรูปแบบการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำในทิศวนเข็มนาฬิกาที่เหมือนกัน จากผลการทดลองพบว่าค่าตัวเลขนัสเซลท์เฉลี่ยของการพาความร้อนแบบอิสระภายในพื้นที่ปิดที่ผนังเย็นและร้อนมีค่า 19.24 และ 20.28 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทาง CFD ดังนั้นเทคนิคการประยุกต์ใช้ผลึกเหลวเป็นสารแขวนลอยนี้สามารถให้ผลที่ได้ทั้งปริมาณและคุณภาพ ให้รายละเอียดและความถูกต้องแม่นยำมากกว่าการใช้อุปกรณ์วัดอุณหภูมิอื่นๆ เทคนิคนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการไหล 3 มิติ และการไหลที่ซับซ้อนได้อีกด้วย

คำหลัก: ผลึกเหลว, เทคนิคการวัดอุณหภูมิ, การแสดงลักษณะการไหล

Abstract

This paper presents a technique using thermochromic liquid crystals (TLCs) as dilute suspension in a water. The study focuses on a free convection heat transfer of water mixed with TLCs in a cubic enclosure. Commercial package of Computational Fluid Dynamics programme, FLUENT was used to

compare the accuracy of the new technique. The experiment was carried out in the test cell between 2 heated plates under Rayleigh number of 4.8×10^7 . The temperature distribution of the mixture is shown by physical changing of molecular structure of TLCs. When the white light is illuminated on the working fluid, light of only one particular wavelength corresponding to its temperature is reflected. The image processing programme was developed to calibrate the relationship between Hue and water temperature. The whole temperature mapping, which cannot be obtained from any other temperature measuring devices, is revealed simultaneously by dispersed TLCs. The local and average Nusselt numbers near both hot and cold walls are presented.

From the results obtained, it was found that the temperature profiles in the test cell, obtained from TLCs and computer simulation are consistent. Moreover, both results showed that the working fluid flows in a counter-clockwise direction. TLCs showed that the average free convective Nusselt numbers on cold and hot walls are 19.24 and 20.28 respectively. They agree well with the numerical results. This is indicated that the technique of applying TLCs as dilute suspension in water can provide temperature information in both quantity and quality. Moreover, this technique can also be applied to study both the 3D and complex flows.

Keywords: Liquid Crystals, Temperature Measurement Technique, Flow Visualisation

1. บทนำ

ในปัจจุบัน ได้มีการนำผลึกเหลว (Thermochromic Liquid Crystals) มาใช้ในงานทางด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์เพื่อใช้ในการวัดอุณหภูมิมากขึ้น ผลึกเหลวนี้เป็นสารที่ถูกจัดกลุ่มอยู่ในตระกูลเดียวกับพอลิเมอร์ มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นแผ่นบางเป็นชั้นๆ ดังแสดงในรูปที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผลึกเหลวก็จะส่งผลทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นของโครงสร้างโมเลกุลมีการยืดหด ทำให้เมื่อมีแสงขาวมาตกกระทบกับโครงสร้างโมเลกุลนี้ จะมีการกระเจิงแสงออกมาในรูปของความยาวคลื่นในช่วงต่างๆ ตามระยะห่างระหว่างชั้นของโครงสร้างโมเลกุล ผลึกเหลวที่มีอุณหภูมิต่ำจะสะท้อนแสงออกมาในรูปของสีแดง เมื่อมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ก็จะไปเปลี่ยนเป็นสีเหลือง, เขียว, น้ำเงิน และม่วงตามลำดับ กระบวนการการเปลี่ยนสีของผลึกเหลวนี้สามารถทำซ้ำและทำกลับไปได้ถ้าไม่มีการทำลายคุณสมบัติทางด้านกายภาพและด้านเคมี จึงทำ

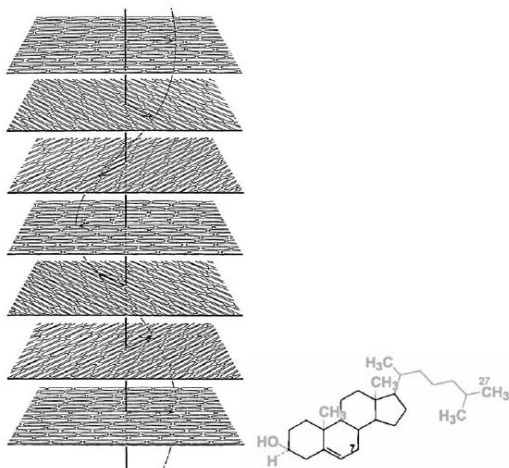
ให้ผลึกเหลวถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างจอโทรทัศน์แบบ LCD, หน้าปัดเครื่องคิดเลขและนาฬิกา รวมไปถึงการใช้งานทางการแพทย์เพื่อตรวจหาความผิดปกติของร่างกาย เช่นโรคมะเร็ง เป็นต้น โดยปกติผลึกเหลวสามารถทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ $-30 - 120$ °C แต่การแสดงผลจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง $0.5 - 20$ °C ตามลักษณะการใช้งาน อีกทั้งยังมีช่วงเวลาตอบสนองในการแสดงผลเพียง 0.003 วินาที

เทคนิคการวัดอุณหภูมิโดยการใช้ผลึกเหลว ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาตั้งแต่ปี 1968 Klein [1] นำผลึกเหลวมาแสดงลักษณะการไหลของอากาศในอุโมงค์ลมโดยการฉาบผลึกเหลวที่ผิวของแผ่นระนาบและศึกษาการไหลของอากาศผ่านแผ่นระนาบ

Kittichaikarn et al. [2] ใช้ผลึกเหลวแสดงการเปลี่ยนแปลงการไหลจากการไหลแบบราบเรียบเป็นแบบปั่นป่วน โดยใช้ผลึกเหลวฉาบลงบนแผ่นระนาบร้อนเพื่อสังเกตการเกิดจุดปั่นป่วน (Turbulent

Spot) อย่างไรก็ตามการนำผลึกเหลวมาใช้เป็นสารแขวนลอยในของไหลเพื่อศึกษาการไหลใน 3 มิติ ยังไม่เป็นที่แพร่หลายเท่าที่ควรเมื่อเทียบกับการฉาบที่ผิววัตถุ เนื่องจากมีความซับซ้อนทั้งในด้านการแสดงผลและการวิเคราะห์ผล [3]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาการนำเอาผลึกเหลวมาใช้เป็นสารแขวนลอยในน้ำ โดยศึกษาและพัฒนาทั้งเทคนิคการผสม, เทคนิคการสอบเทียบค่าสีของผลึกเหลวกับอุณหภูมิ รวมไปถึงการนำผลึกเหลวผสมน้ำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาการพาความร้อนแบบอิสระในพื้นที่ปิด เพื่อทดสอบความถูกต้องแม่นยำจนสามารถนำไปศึกษาการถ่ายเทความร้อนหรือการไหลที่สภาวะต่างๆ ได้อีกหลายรูปแบบต่อไป

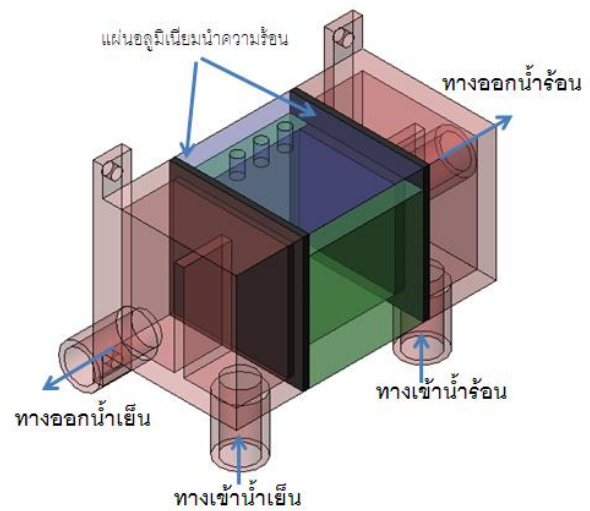


รูปที่ 1 แสดงลักษณะโครงสร้างของผลึกเหลว

2. กระบวนการทดลอง

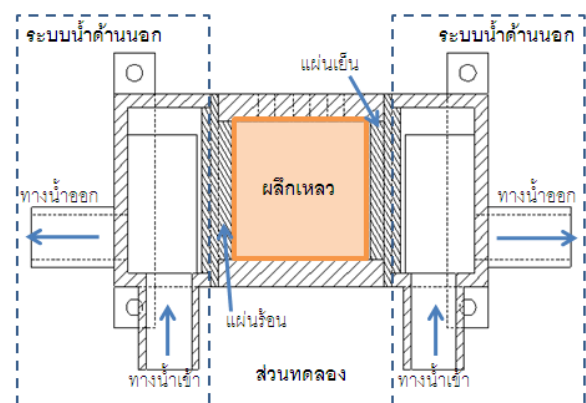
ในงานวิจัยนี้ได้มีการนำผลึกเหลวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 ไมโครเมตรและมีช่วงอุณหภูมิของการแสดงสีตั้งแต่ 30 – 35 °C มาใช้เป็นสารแขวนลอยโดยนำมาผสมกับน้ำบริสุทธิ์ในอัตราส่วน 0.07 % โดยมวล ส่วนทดลองที่ใช้บรรจุผลึกเหลวเพื่อทำการทดลองมีขนาด 5*5*5 ลูกบาศก์เซนติเมตรสร้างขึ้นจากอะคริลิกใสที่มีขนาดความหนา 10 มิลลิเมตร

ซึ่งมีความหนาพอที่จะเป็นฉนวนความร้อนได้ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงส่วนทดลองที่มีผลึกเหลวบรรจุอยู่ภายใน

แผ่นอลูมิเนียมได้รับการติดตั้งด้านซ้ายและขวาของส่วนทดลอง โดยจะทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนอันเนื่องมาจากผลต่างของอุณหภูมิระหว่างน้ำผสมผลึกเหลวและอุณหภูมิที่ผิวของแผ่นอลูมิเนียม อุณหภูมิที่ผิวของอลูมิเนียมนี้จะถูกกำหนดให้มีค่าคงที่โดยอาศัยระบบน้ำจากด้านนอกส่วนทดลองดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงส่วนทดลองและระบบน้ำ

ระบบน้ำด้านนอกจะต่อกับถังน้ำที่มีขนาด 0.03 ลูกบาศก์เมตร และปั๊มน้ำที่มีขนาด 70 วัตต์ ที่มีอัตราการไหลสูงสุด 2500 ลิตรต่อชั่วโมง ภายในถังน้ำจะมีการติดตั้งอุปกรณ์ทำความร้อนแบบแท่งขนาด 250 วัตต์เพื่อใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำในระบบ

อุปกรณ์ทำความร้อนนี้จะรับสัญญาณควบคุมมาจาก หัววัดอุณหภูมิแบบฟอยล์ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ผิวของแผ่นอลูมิเนียมด้านในส่วนทดลองเพื่อใช้ควบคุมอุณหภูมิผิวของอลูมิเนียมด้านข้างของส่วนทดลองให้มีค่าคงที่ตลอดเวลา สัญญาณนี้จะถูกส่งผ่านและควบคุมโดยอุปกรณ์ควบคุมความร้อนแบบ PID (Proportional, Integral, Derivative) แสงขาวจะถูกฉายโดยใช้หลอดเมทัลฮาไลด์ขนาด 400 วัตต์ ซึ่งเป็นหลอดที่มีอุณหภูมิสี 6500 K แสงนี้将被ทำให้เล็งลงจนเป็นระนาบบางขนาด 1 มิลลิเมตร และฉายให้ตัดกับส่วนทดลองที่ระนาบกลางส่วนทดลอง กล้อง CCD จะติดตั้งอยู่ห่างจากส่วนทดลอง 1 เมตรเพื่อบันทึกภาพการเปลี่ยนแปลงสีของผลึกเหลว โดยการทดลองได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

2.1 การทดลองสอบเทียบสี

กระบวนการสอบเทียบสีได้ถูกทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสีของผลึกเหลวและอุณหภูมิของน้ำในส่วนทดลอง ในการสอบเทียบสีได้มีการติดตั้งหัววัดอุณหภูมิแบบจุ่มเข้าไปภายในส่วนทดลอง 3 หัวเพื่อวัดอุณหภูมิของน้ำผสมผลึกเหลวที่อยู่ใกล้กับตำแหน่งของหัววัดอุณหภูมิ ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิจะอยู่ที่ความสูง 4 เซนติเมตรจากพื้นของส่วนทดลอง และห่างจากขอบด้านซ้าย 1.5, 2.5 และ 3.5 เซนติเมตรตามลำดับ หัวอ่านอุณหภูมิเหล่านี้จะต่อกับระบบรับสัญญาณ Acquisition System เพื่อบันทึกค่าอุณหภูมิของผลึกเหลว ณ เวลาที่ถูกบันทึกภาพ ผลึกเหลวจะได้รับความร้อนทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจากแผ่นอลูมิเนียมด้านข้าง ซึ่งได้ถูกกำหนดอุณหภูมิที่ผิวให้มีค่าคงที่ตั้งแต่ 31 ถึง 32.4 °C ผลจากการพาความร้อนแบบอิสระระหว่างน้ำผสมผลึกเหลวและผิวของแผ่นอลูมิเนียม จะทำให้ผลึกเหลวซึ่งเป็นสารแขวนลอยในน้ำเปลี่ยนเป็นสีต่างๆตามอุณหภูมิของน้ำ เมื่อนำภาพการเปลี่ยนสีที่ได้นี้มาทำการแปลงสัญญาณของสี โดยเปลี่ยนปริภูมิของสีจาก RGB เป็น HSI เพื่อนำค่า Hue เฉลี่ยและอุณหภูมิที่วัดได้จาก

หัววัดอุณหภูมิทั้ง 3 หัวมาทำการสร้างความสัมพันธ์ จะทำให้ได้สมการการเปลี่ยนสีค่า Hue เป็นอุณหภูมิ

สำหรับการแปลงสัญญาณของสีจากระบบปริภูมิ RGB ซึ่งก็คือ สีแดง, สีเขียว และสีน้ำเงิน ซึ่งเกิดจากแสงที่มีความยาวคลื่น 700, 546 และ 435 นาโนเมตร ตามลำดับ ให้เป็น HSI (Hue, Saturation, Intensity) ซึ่งสีของภาพจะอยู่ในรูปของค่า Hue (H), ค่าความสว่างหรือมีดของรูปภาพจะขึ้นกับค่า Intensity (I) และค่าที่แสดงความบริสุทธิ์ของสีคือค่า Saturation (S) Russ [4] ได้แสดงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างระบบ HSI กับระบบ RGB ดังแสดงในสมการที่ (1)-(3)

$$I = \frac{R + G + B}{3} \quad (1)$$

$$S = \frac{[I - \min(R, G, B)]}{I} \quad (2)$$

$$H = \cos^{-1} \left(\frac{(2B - G - R)/2}{\sqrt{(B - G)^2 + (B - R)(G - R)}} \right) \quad \text{if } G \geq R$$

$$H = 2\pi - \cos^{-1} \left(\frac{(2B - G - R)/2}{\sqrt{(B - G)^2 + (B - R)(G - R)}} \right) \quad \text{if } G < R \quad (3)$$

เมื่อ R, G และ B คือ ค่าปริมาณสีแดง, เขียว และน้ำเงิน ตามลำดับ

2.2 การทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบอิสระ

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนอิสระได้ถูกทดลองขึ้นที่สภาวะเดียวกันกับการสอบเทียบสี ด้านร้อนจะถูกควบคุมให้มีอุณหภูมิคงที่ 32.4 °C และด้านเย็นมีอุณหภูมิ 31 °C เลขไรย์ลีเฉลี่ยสำหรับการไหลในพื้นที่ปิดสามารถคำนวณได้จาก

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_1 - T_2)L_c^3}{\nu^2} Pr \quad (4)$$

เมื่อ L_c คือระยะห่างระหว่างแผ่นร้อนและแผ่นเย็น, T_1 และ T_2 คืออุณหภูมิที่ผิวของแผ่นร้อนและแผ่นเย็นตามลำดับ

ในการทดลองนี้จะมีค่าของเลขไรย์ต่ำกว่า 4.8×10^7 ซึ่งอยู่ในช่วงการไหลแบบราบเรียบ โดยภาพสีของผลึกเหลวจะถูกบันทึกเมื่อลักษณะการกระจายอุณหภูมิของของไหลอยู่ในสภาวะคงตัวเพื่อนำไปหาค่าอุณหภูมิและเลขนัสเซลล์ของการพาความร้อนแบบอิสระ Ampofo and Karayiannis [5] ได้แสดงการหาค่าของเลขนัสเซลล์เฉพาะที่, Nu_x สำหรับการไหลที่มีการถ่ายเทความร้อนแบบอิสระที่ผนังมีอุณหภูมิคงที่ ได้ดังแสดงในสมการ

$$Nu_x = \frac{L}{T_H - T_c} \frac{dT}{dx} \quad (5)$$

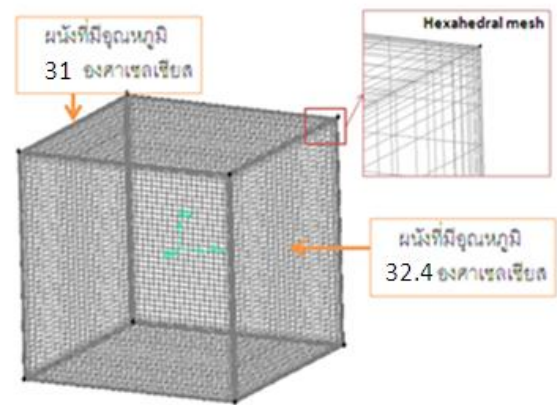
เมื่อ T_H คืออุณหภูมิที่ผิวร้อน, T_c คืออุณหภูมิที่ผิวเย็น, L คือความกว้างของส่วนทดลอง และค่าของเลขนัสเซลล์เฉลี่ย, $\bar{Nu}$ คำนวณได้จากสมการ

$$\bar{Nu} = \frac{1}{L} \int_0^L Nu(x) dx \quad (6)$$

3. การจำลองการไหลโดยใช้โปรแกรมทาง

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

งานวิจัยนี้ได้มีการนำโปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาช่วยในการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิของผลึกเหลวผสมน้ำที่มีการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนอิสระ โดยการนำขนาดของขอบเขตจากการทดลองจริงมาสร้างแบบจำลองตาข่ายข้อมูลได้ถูกสร้างขึ้นในแบบ Hexahedral จำนวน 148877 เซลล์ โดยการใช้โปรแกรมช่วย GAMBIT ดังแสดงในรูปที่ 4 ในการวิเคราะห์จะใช้แบบจำลองของ Boussinesq Model และมีสมการความหนืดคือ Laminar Model เมื่อได้ทำการวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองนี้โดยการเปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซลล์เฉลี่ยกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากคำนวณตามทฤษฎีโดยนักวิจัยต่างๆ จากสภาวะการไหลที่มีค่าตัวเลขไรย์ต่ำกว่า 10^7 จะพบว่าแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 2.88% ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 4 แสดงแบบจำลองตาข่ายข้อมูลและเงื่อนไขค่าขอบที่ถูกระบุ

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้

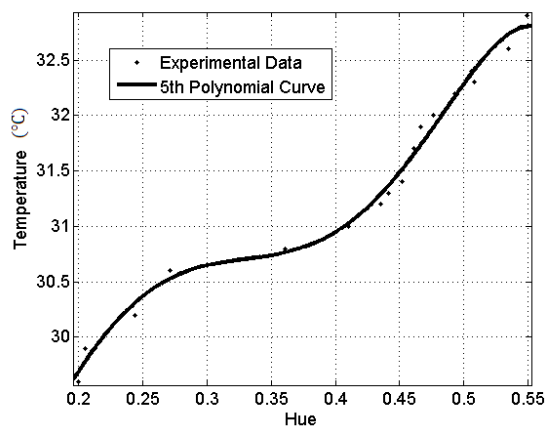
Numerical model	$\bar{Nu}$	%diff.
present work	17.04	2.88
Pesso and Piva [6]	16.55	

4. ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองสอบเทียบสี

จากผลการทดลองสอบเทียบสี พบว่าสีของผลึกเหลวเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีเหลือง, เขียว และน้ำเงินเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นจาก 31 ถึง 32.4 °C และเมื่อมีการนำค่า Hue ที่ได้ไปสร้างความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของผลึกเหลวดังแสดงในรูปที่ 5 จะพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสีของผลึกเหลวและอุณหภูมิสามารถแสดงได้ดังนี้

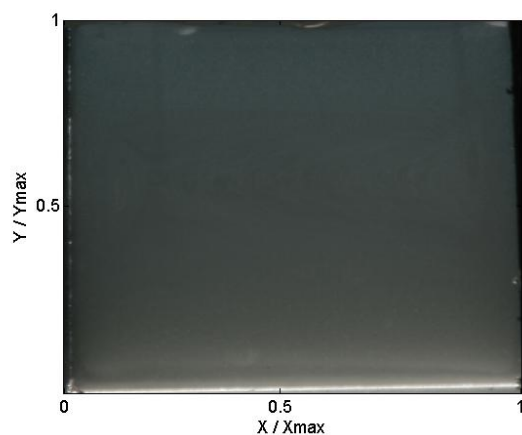
$$T = -4989.18681097 \cdot H^5 + 8106.23268962 \cdot H^4 - 4829.10462852 \cdot H^3 + 1276.61185155 \cdot H^2 - 132.80190223 \cdot H + 32.44183213 \quad (7)$$



รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสีของผลึกเหลวและอุณหภูมิของน้ำ

4.2 ผลการทดลองการแสดงผลการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนอิสระ

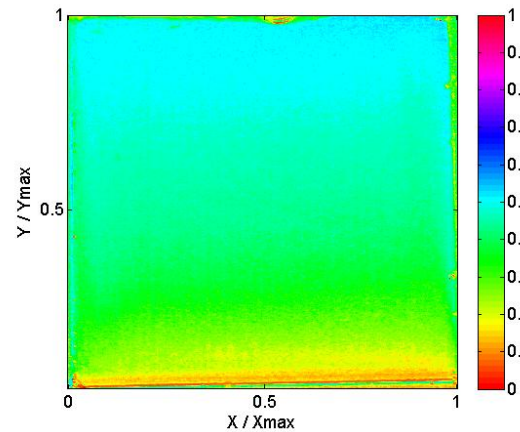
จากผลการทดลองแสดงผลการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนอิสระ เมื่อการกระจายอุณหภูมิของไหลอยู่ในสภาวะคงตัวแล้วพบว่าภาพของน้ำที่มีผลึกเหลวผสมเป็นสารแขวนลอยสามารถบันทึกได้ดังแสดงในรูปที่ 6 ภาพของผลึกเหลวที่อยู่ในปริภูมิ RGB นอกจากสีของผลึกเหลวจะสามารถมองเห็นได้แล้ว ยังสามารถมองเห็นอนุภาคเล็กๆของผลึกเหลวที่เคลื่อนที่ตามลักษณะการไหลได้ในส่วนทดลอง



รูปที่ 6 แสดงภาพน้ำผสมผลึกเหลวในปริภูมิ RGB

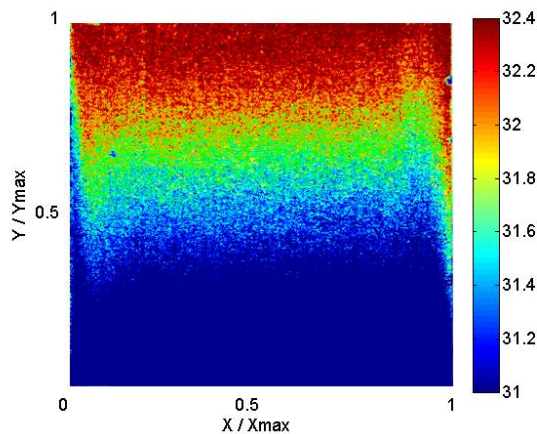
เมื่อนำภาพ RGB ของน้ำผสมผลึกเหลวนี้ไปแปลงเป็นค่า Hue จากปริภูมิ HIS ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่าน้ำผสมผลึกเหลวจะมีสีตั้งแต่เขียวซึ่งเป็นช่วงสี

ของผลึกเหลวที่มีอุณหภูมิต่ำที่บริเวณผิวเป็นทางด้านซ้ายของส่วนทดลอง จะเปลี่ยนเป็นสีฟ้าบางๆที่บริเวณผิวร้อนทางด้านขวาของส่วนทดลอง



รูปที่ 7 แสดงภาพ Hue ของน้ำผสมผลึกเหลว

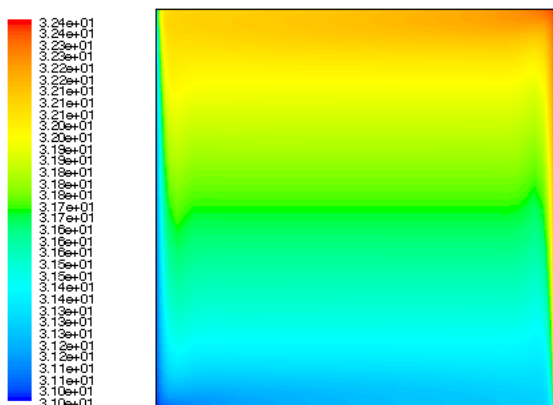
หลังจากการนำภาพ Hue ของน้ำผสมผลึกเหลวมาแทนค่าลงในสมการที่ 7 และแสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำผสมผลึกเหลวเป็นภาพดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่าน้ำผสมผลึกเหลวนี้จะแสดงชั้นขีดผิวความร้อนที่บริเวณผนังร้อนอย่างชัดเจนซึ่งโดยหลักการแล้ว เมื่อน้ำผสมผลึกเหลวมีอุณหภูมิสูงทำให้ความหนาแน่นลดลง แรงแลอยตัวจะทำให้ น้ำผสมผลึกเหลวบริเวณนี้เคลื่อนที่ขึ้น ส่งผลให้ชั้นขีดผิวจากล่างขึ้นบนที่บริเวณผิวร้อนนี้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันเมื่อของไหลร้อนปะทะกับผนังเย็นทางด้านซ้ายมือ น้ำผสมผลึกเหลวก็จะมีอุณหภูมิต่ำลง ทำให้มีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้น้ำผสมผลึกเหลวเคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่าง ลักษณะการแลกเปลี่ยนความร้อนและการเคลื่อนที่นี้ส่งผลให้การไหลในส่วนทดลองนี้มีการเคลื่อนที่แบบทวนเข็มนาฬิกาโดยจะมีความเร็วสูงที่บริเวณผิวด้านซ้ายและขวา และลดต่ำลงจนหยุดนิ่งที่บริเวณตรงกลางของส่วนทดลอง



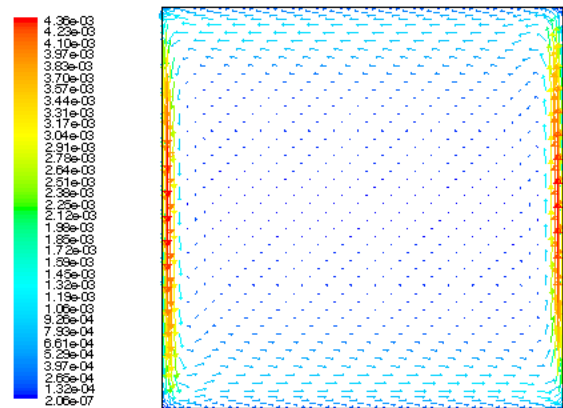
รูปที่ 8 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำผสมผลึกเหลวที่ถูกวัดโดยใช้ผลึกเหลวเป็นสารแขวนลอย

4.3 ผลการวิเคราะห์การไหลด้วยโปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

จากการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิของน้ำผสมผลึกเหลวตามสภาวะและตำแหน่งเดียวกับการทดลองจริงพบว่าน้ำผสมผลึกเหลวมีลักษณะการกระจายอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 9 อีกทั้งยังมีลักษณะการเคลื่อนตัวของน้ำในทิศทางเข้มนาฬิกาแสดงในรูปที่ 10 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ทั้งหมดนี้มีลักษณะสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองจริง อีกทั้งยังพบว่าที่ผนังเย็นและร้อนจะมีค่าของเลขนัสเซลล์เฉลี่ยเท่ากับ 17.25 และ 15.93 ตามลำดับ



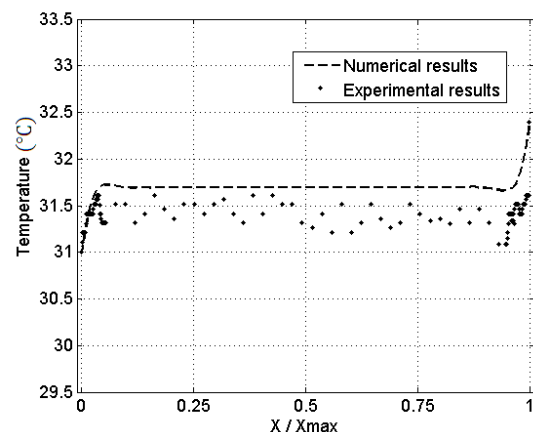
รูปที่ 9 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำจากการวิเคราะห์โดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ



รูปที่ 10 แสดงลักษณะการไหลของน้ำจากผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

4.4 การเปรียบเทียบผลการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนอิสระ

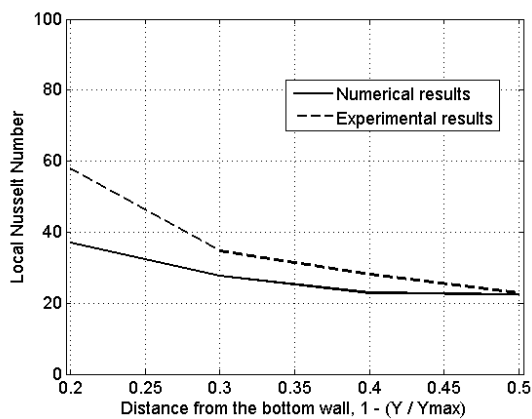
เมื่อทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ระยะความสูง $Y / Y_{max} = 0.5$ ตลอดแนว X / X_{max} ดังแสดงในรูปที่ 11 พบว่าค่าอุณหภูมิของน้ำผสมผลึกเหลวที่บริเวณกลางส่วนทดลองที่วัดได้จากการทดลองจริงมีค่าสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ



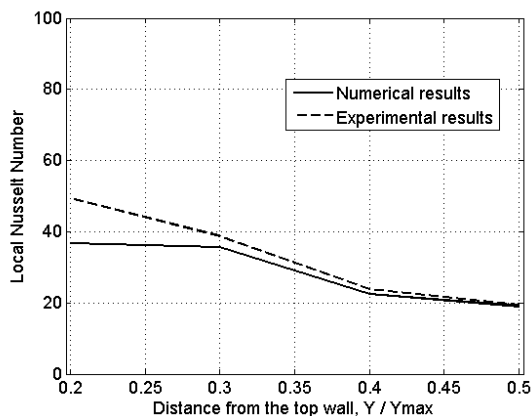
รูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ระยะ $Y/Y_{max} = 0.5$ ระหว่างผลวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการทดลองจริง

จากการเปรียบเทียบเลขนัสเซลล์เฉพาะที่ ที่ผิวร้อนและผิวเย็นจากการทดลองและการวิเคราะห์เชิงตัวเลข พบว่าที่ผิวร้อนจะมีค่าของเลขนัสเซลล์เฉพาะที่มากที่สุดที่ด้านล่าง เนื่องจากด้านล่างเป็น

บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ เมื่อสัมผัสกับผนังร้อนน้ำผสม
ผลึกเหลวที่บริเวณนี้จึงแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดี โดย
ค่าของเลขนัสเซิลต์เฉพาะที่จะลดลงตามลำดับเมื่อ
พิจารณาที่ตำแหน่งสูงขึ้นเนื่องจากความสามารถใน
การแลกเปลี่ยนความร้อนที่ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 12
ในทางกลับกันที่ผนังเย็นค่าของเลขนัสเซิลต์เฉพาะที่
จะมีค่าสูงสุดที่บริเวณด้านบนและจะลดต่ำลงเมื่อระยะ
 Y / Y_{max} ลดต่ำลงดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบเลขนัสเซิลต์เฉพาะที่
ตำแหน่งใกล้ผิวร้อน ระหว่างผลวิเคราะห์เชิงตัวเลข
และการทดลองจริง



รูปที่ 13 แสดงการเปรียบเทียบเลขนัสเซิลต์เฉพาะที่
ตำแหน่งใกล้ผิวเย็น ระหว่างผลวิเคราะห์เชิงตัวเลข
และการทดลองจริง

เมื่อทำการเปรียบเทียบเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยจาก
การทดลองจริงและจากโปรแกรมทางพลศาสตร์ของ
ไหลเชิงคำนวณดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าค่าของ
เลขนัสเซิลต์เฉลี่ยที่ผนังเย็นมีค่าความแตกต่างระหว่าง

ผลจากการทดลองและผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเท่ากับ
10% และที่ผนังร้อนซึ่งมีความแตกต่างเท่ากับ 21% ซึ่ง
ค่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลอันเนื่องมาจากแสงที่
ตกกระทบลงสู่ผนังไม่คมเพียงพอ ทำให้เกิดการกระเจิง
แสงที่บริเวณผิวและนำไปสู่ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น
นั่นเอง

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบเลขนัสเซิลต์ระหว่างผนัง
เย็นและร้อน

	$Nu_{y,max}$	$Nu_{y,min}$	$\bar{Nu}$	%Diff. of $\bar{Nu}$
Cold wall, CFD	36.68	1.31	17.25	10
Cold wall, Experiment	49.32	1.76	19.24	
Hot wall, CFD	37.14	1.33	15.93	21
Hot wall, Experiment	58.07	2.07	20.28	

5.สรุป

จากการทดลองใช้น้ำซึ่งมีผลึกเหลวเป็นสาร
แขวนลอยมาศึกษาการถ่ายเทความร้อนอิสระภายใน
พื้นที่ปิด ซึ่งมีเลขไรย์ลีเท่ากับ 4.8×10^7 พบว่า น้ำ
ภายในส่วนทดลองจะเคลื่อนที่โดยอาศัยหลักการ
เปลี่ยนแปลงความหนาแน่นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง
อุณหภูมิของของไหล ทำให้น้ำสามารถพาความร้อน
ภายใต้การพาความร้อนแบบอิสระจากผนังด้านหนึ่งสู่
ผนังอีกด้านหนึ่งในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาได้ อีกทั้ง
ยังพบว่าเลขนัสเซิลต์เฉพาะที่ มีการเปลี่ยนแปลง
ตลอดตามแนวความสูงซึ่งจะแสดงถึงความแตกต่าง
ของความสามารถในการพาความร้อน โดยจะมีค่ามาก
ที่สุดเมื่อน้ำเริ่มไหลเข้าสู่ชั้นขีดผิวความร้อนทั้งใน
บริเวณเริ่มต้นของผนังร้อนและเย็น แล้วจึงลดลงเมื่อมี
การไหลขึ้นและลงตลอดแนวผนังร้อนและเย็น
ตามลำดับ

จากการทดลองนี้ยังพบอีกว่าผลึกเหลว
สามารถแสดงลักษณะการกระจายอุณหภูมิทั้งด้าน
ปริมาณและคุณภาพได้ทั่วทั้งส่วนทดลองพร้อมกันซึ่ง

เป็นการยากที่จะได้ข้อมูลอุณหภูมิจำนวนมากพร้อมๆ กันแบบนี้จากเครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบอื่น โดยเมื่อทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนที่บริเวณผิวเย็นและผิวร้อนแล้ว พบว่าการถ่ายเทความร้อนของน้ำผสมผลึกเหลวนี้มีค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ยเท่ากับ 19.24 และ 20.28 ที่ผนังเย็นและร้อนตามลำดับ

เมื่อทำการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนที่สภาวะเดียวกันนี้โดยใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่มีการสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองแล้วพบว่าการกระจายอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนที่ได้มีลักษณะสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองจริง โดยสามารถวิเคราะห์ค่าของเลขนัสเซลล์เฉลี่ยได้เท่ากับ 17.25 และ 20.28 ที่ผนังเย็นและร้อนตามลำดับ

ดังนั้นเทคนิคการใช้ผลึกเหลวเป็นสารแขวนลอยในน้ำเพื่อการแสดงอุณหภูมิของน้ำนั้นสามารถนำไปใช้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนรูปแบบอื่นๆ ที่สามารถให้ผลที่แม่นยำได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์(KURDI) ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือบางส่วนสำหรับใช้ในงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Klein E.J. (1968b). Application of liquid crystals to boundary-layer flow visualization, AIAA paper, 68-376.
- [2] Dabiri D. (2008). Digital particle image thermometry/velocimetry: a review, Exp Fluids, Volume 46, Number 2, pp. 191-241.
- [3] Kittichaikarn C., Ireland P.T., Zhong S., Hodson H.P. (1999). An investigation on the onset of wake-induced transition and turbulent

spot production rate using thermochromic liquid crystals, ASME Paper 99-GT-126.

- [4] Russ J.C. (2002). The image processing handbook. CRC, Boca Raton.
- [5] Ampofo F. and Karayiannis T.G. (2003). Experimental benchmark data for turbulent natural convection in an air filled square cavity, International Journal of Heat and Mass Transfer 46, pp. 3551-3572.
- [6] Pessoa T. and Piva S. (2009). Laminar natural convection in a square cavity: Low Prandtl numbers and large density differences, International Journal of Heat and Mass Transfer 52, pp. 1036-1043.