

การประยุกต์ใช้ผลึกเหลวเป็นเซนเซอร์วัดอุณหภูมิในกระบวนการถ่ายเทความร้อน

Use of Liquid Crystals as Temperature Sensors in Heat Transfer Processes

อาณัติ พิลลา^{1*}, ปภพ รื่นเรึง¹, พิชิต แก้วโกสม², ชินรัช เชียรพงษ์² และ สมิทธิ์ เอี่ยมสอาด¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร เลขที่ 140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530 เบอร์โทรศัพท์ 029883655

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลขที่ 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 เบอร์โทรศัพท์ 023298350

*ผู้ประพันธ์บทความ: arnut@mut.ac.th

บทคัดย่อ

ผลึกเหลวถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะนักวิจัยที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมของของไหลเพื่อเป็นเทคนิคในการถ่ายภาพความร้อนสำหรับการนำไปใช้ในการวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิ ผลึกเหลวมีส่วนผสมของสารเคมีที่มีคุณสมบัติที่ก่อให้เกิดสีที่มีความแตกต่างกันไปตามอุณหภูมิ ผลึกเหลวสามารถตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้อย่างต่อเนื่อง ในขณะที่เซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบดั้งเดิมไม่สามารถทำได้ เมื่อต้องการใช้ผลึกเหลวในการวัดอุณหภูมินั้นจำเป็นต้องมีการสอบเทียบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและสีของผลึกเหลว ซึ่งในการถ่ายภาพ การวัดสีและแสง ความเป็นเส้นตรงและฮิสเทอรีซิสเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในขณะที่ทำการสอบเทียบ บทความนี้จึงถูกออกแบบมาเพื่อให้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับผู้ที่ให้นำผลึกเหลวไปใช้งาน โดยเฉพาะหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับการสอบเทียบผลึกเหลว และเมื่อนำผลึกเหลวไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการถ่ายเทความร้อนในเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์แล้วแสดงให้เห็นว่าสามารถที่จะนำไปใช้วัดการกระจายตัวของอุณหภูมิได้อย่างถูกต้อง

คำหลัก: การสอบเทียบ, การแลกเปลี่ยนความร้อน, ผลึกเหลว, เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

ABSTRACT

Heat transfer mechanisms and fluid flow behavior researchers commonly use liquid crystals as a thermal imaging technique for monitoring temperature distributions. A liquid crystal is a chemical substance whose color varies with temperature. Liquid crystals are useful for visualizing continuous temperature changes when other typical temperature sensors cannot be used. To use liquid crystals for temperature measurements, calibration is required to determine the color and temperature relationship of liquid crystals. Imaging, colorimetry, illumination, linearity, and hysteresis are all significant considerations when calibrating liquid crystals. This paper is intended to provide relevant information to liquid crystal users, particularly on liquid crystal calibration. Liquid crystals used in heat transfer mechanisms in solar air heaters can correctly determine temperature distribution.

Keywords: Calibration, Heat Transfer, Liquid Crystals, Temperature Sensor

1. บทนำ

การวัดอุณหภูมิโดยใช้ผลึกเหลว (Liquid Crystals, LCs) นั้น เป็นเทคนิคการวัดแบบไม่สัมผัสโดยตรง โดยจะอาศัยคุณสมบัติของผลึกเหลว ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงสีอย่างต่อเนื่องเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง วิธีการวัดในลักษณะนี้เป็นวิธีที่ประหยัดและสะดวก ไม่ต้องการอุปกรณ์ที่มีความซับซ้อนในการวัด โดยสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบนพื้นผิวจากสีที่ปรากฏขึ้นได้ด้วยตาเปล่าและในปัจจุบันยังมีการพัฒนาเทคนิคและอุปกรณ์ที่ใช้ในการบันทึกภาพอย่างมากมาย รวมไปถึงโปรแกรมสำเร็จรูปที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์และจำแนกสีของภาพถ่ายได้ จึงส่งผลให้สามารถวัดการกระจายของอุณหภูมิได้อย่างสะดวกและมีความละเอียดของข้อมูลที่สูงขึ้น [1-2]

จากแนวคิดข้างต้น เราสามารถที่จะใช้เทคนิควิธีนี้ในการศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานทางด้านการศึกษาถ่ายเทความร้อนและงานด้านอื่นๆ ได้อย่างมากมาย เช่น การวัดความร้อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และการวัดความร้อนบนพื้นผิวต่างๆ [3] รวมไปถึงสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดอุณหภูมิของผู้ป่วยทางการแพทย์ได้อีกด้วย แต่ถึงอย่างไรก็ตาม ในการใช้ผลึกเหลวในการวัดอุณหภูมินั้นมีความจำเป็นที่ต้องเลือกชนิดของผลึกเหลวให้เหมาะสมกับช่วงอุณหภูมิที่ต้องการวัด และจำเป็นต้องทำการสอบเทียบ (Calibration) การเปลี่ยนแปลงสีที่อุณหภูมิต่างๆ ของผลึกเหลว ในการวัดอุณหภูมิมีความสำคัญมากในการศึกษาปรากฏการณ์ของการถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมของการไหล โดยเฉพาะวิธีการวัดค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว ซึ่งการวัดแบบเก่าที่นิยมใช้กันทั่วไปจะเป็นการวัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลที่จะมีการติดตั้งที่บริเวณพื้นผิวของวัสดุโดยตรง แต่ในกรณีที่ต้องการทราบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแบบละเอียดนั้น จำเป็นต้องมีการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเป็นจำนวนมากไว้บนพื้นผิวที่ต้องการทราบค่าอุณหภูมิและทำการวัดค่าต่างๆ ตำแหน่งที่เวลาเดียวกัน และในกรณีที่ต้องการทราบอุณหภูมิบนพื้นผิวในบริเวณแคบนั้นจะไม่สามารถทำได้ อีกทั้งวิธีนี้จะมีการสูญเสียความร้อนผ่านสายสัญญาณจากหัววัดโดยการนำความร้อนทำให้การวัดค่าอุณหภูมิมีความคลาดเคลื่อน จึงส่งผลให้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนมีค่าไม่ถูกต้อง นอกจากนี้แล้วยังมีเทคนิควิธีการวัดอีกหลายวิธี เช่น การใช้กล้องอินฟราเรด (Infrared Thermometry) ซึ่งเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สะดวกและง่าย เนื่องจากเป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัสโดยตรง แต่จะอาศัยการวัดการแผ่รังสีจากผิววัตถุและจำเป็นต้องทราบค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของพื้นผิวที่จะทำการวัดอุณหภูมินั้นเพื่อให้ได้ค่าอุณหภูมิที่แม่นยำและเชื่อถือ รวมไปถึงกล้องอินฟราเรดมีราคาค่อนข้างสูงเมื่อทำการเปรียบเทียบกับเทคนิควิธีวัดชนิดอื่นๆ [4]

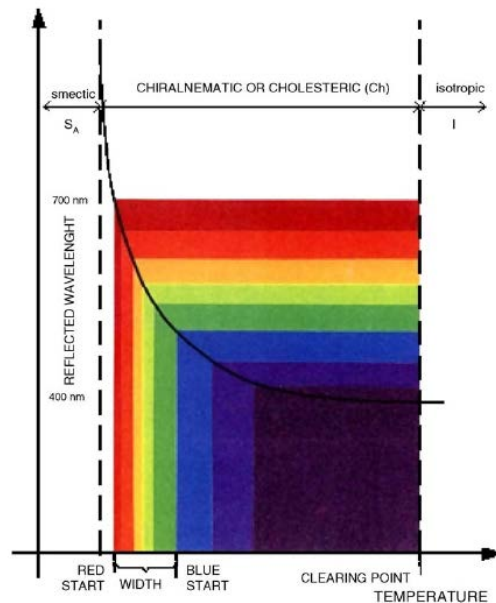
ดังนั้น บทความฉบับนี้จะแนะนำเกี่ยวกับคุณสมบัติต่างๆ ของผลึกเหลว การสอบเทียบ และวิธีการใช้ผลึกเหลวในการวัดอุณหภูมิ รวมไปถึงการนำเสนอวิธีการประยุกต์ใช้ผลึกเหลวในการวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวและคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

2. คุณสมบัติของเทอร์โมโครมิก

เทอร์โมโครมิก (Thermochromic) เป็นสารที่มีคุณสมบัติพิเศษสามารถเปลี่ยนสีได้เมื่ออุณหภูมิของสารเปลี่ยนไป สารเทอร์โมโครมิกมี 2 ประเภทคือ ผลึกเหลว (Liquid Crystal) และสารลูโคได (Leuco Cye) ซึ่งลักษณะของโทนสีที่ปรากฏของผลึกเหลวจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของโครงสร้างผลึกที่สะท้อนความยาวคลื่นแสง การเปลี่ยนแปลงของผลึกเหลวที่ปรากฏเป็นสีออกมาจะเกิดเฉพาะช่วงที่ผลึกเหลวอยู่ในสถานะเป็นนิมาติกเมโซเฟส (Nematic Mesophase) เมื่อผลึกเหลวมีอุณหภูมิเปลี่ยนไปจะทำให้ช่องว่างระหว่างชั้นในโครงสร้างผลึกเหลวเกิดการเปลี่ยนแปลงด้วย ทำให้มีการเปลี่ยนความยาวคลื่นแสง โดยผลึกเหลวสามารถเปลี่ยนสีอย่างต่อเนื่องจากสีดำเป็นสารที่มีสีและเปลี่ยนกลับมาเป็นสีดำอีกครั้งตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ในการประยุกต์ใช้ผลึกเหลวนั้นจำเป็นต้องบรรจุในไมโครแคปซูลทรงกลม (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ไมโครเมตร) แล้วไมโครแคปซูลนับพันล้านแคปซูลจะถูกผสมรวมกับอะคริลิก (Acrylic) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการยึดติดกับวัสดุต่างๆ สำหรับการนำไปใช้ เช่น กระดาษ ผ้า และพลาสติก เป็นต้น ส่วนลูโคไดจะเปลี่ยนสีเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากโครงสร้างของโมเลกุลสามารถเปลี่ยนได้อยู่ 2 รูปแบบ คือ แบบมีสีและแบบไม่มีสี ขณะที่สารลูโคไดมีอุณหภูมิต่ำจะแสดงสีเฉพาะตัวปรากฏออกมา และในขณะที่อุณหภูมิมีการเพิ่มขึ้นถึงระดับหนึ่ง สีของสารลูโคไดจะหายไปกลายเป็นสารไม่มีสี จึงนิยมนำไปใช้กับอุปกรณ์แสดงผลที่ไม่ต้องการความถูกต้องแม่นยำ เช่น ของเล่น แก้วน้ำเปลี่ยนสี เป็นต้น สารลูโคไดมีค่าอุณหภูมิที่ทำให้สารเปลี่ยนสีอยู่ในช่วงกว้างประมาณ 3-10 องศาเซลเซียส สารลูโคไดจึงมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ช้ากว่าและไม่เที่ยงตรงเท่าผลึกเหลว เช่นเดียวกับผลึกเหลวสารลูโคตาต้องบรรจุในไมโครแคปซูล และนำไปผสมกับสารอื่นที่ทำหน้าที่ยึดเกาะบนผิววัสดุ [5]

โดยที่ผลึกเหลวเป็นสารประกอบจำพวกออกแกนิตที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะระหว่างของเหลวและของแข็งตามอุณหภูมิ ในขณะที่ผลึกเหลวมีสถานะเป็นของแข็ง เมื่อส่องสารนี้ด้วยแสงสีขาวจะพบว่าสารนี้จะมีลักษณะใสไม่มีสี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นถึงจุดหนึ่ง จะเกิดการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงโครงสร้างโมเลกุลภายในสาร ทำให้แสงที่สะท้อนจากสารนี้จะเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นอย่างต่อเนื่อง ปรากฏการณ์การสะท้อนแสงนี้จะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิหนึ่งเมื่อมีการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิของสารนี้ [6]



รูปที่ 1 การเปลี่ยนสีของผลึกเหลว

รูปที่ 1 แสดงการเปลี่ยนสีของผลึกเหลวเมื่อสารนี้มีอุณหภูมิสูงถึงจุดหนึ่งคือ T_{rs} (rs: Red Start) จะเริ่มเปลี่ยนจากสารที่ใสไม่มีสีเป็นสีเทา หลังจากนั้นจะเปลี่ยนสีเป็นสีแดง ส้ม เหลืองและเขียว ตามลำดับ และจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน เมื่ออุณหภูมิถึงอีกจุดหนึ่งคือ T_{bs} (bs: Blue Start) และหากเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นอีกสีของสารจะเปลี่ยนเป็นสีม่วง ม่วงเข้ม และกลับไปเป็นใสไม่มีสีอีกครั้ง โดยทั่วไปผลึกเหลวจะมีหลายสูตรและเนื่องจากสารนี้จะอยู่ในรูปของน้ำมันและคุณสมบัติทางอุณหภูมิของสารจะสูญเสียได้ง่ายถ้าถูกปนเปื้อนจากสารเคมีอื่นหรือเมื่อถูกแสงอุลตราไวโอเล็ต ในการผลิตสารนี้จึงถูกบรรจุอยู่ในรูปของผงบรรจุในแคปซูลขนาดเล็กตามที่ได้นำเสนอมาในหัวข้อข้างต้น หรือเป็นของเหลวสำหรับทาบนผิวหรือเป็นโพลิเมอร์แบบแผ่นที่อยู่ในรูปของแผ่นฟิล์มพร้อมติด ซึ่งจะเห็นได้ว่าสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวที่มีรูปร่างซับซ้อนได้หลากหลายรูปแบบ [7]

3. ขั้นตอนการนำผลึกเหลวไปใช้ในการวัดอุณหภูมิพื้นผิว

ในการที่จะนำผลึกเหลวไปประยุกต์ใช้ในการวัดอุณหภูมิ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 การเลือกใช้งานผลึกเหลว

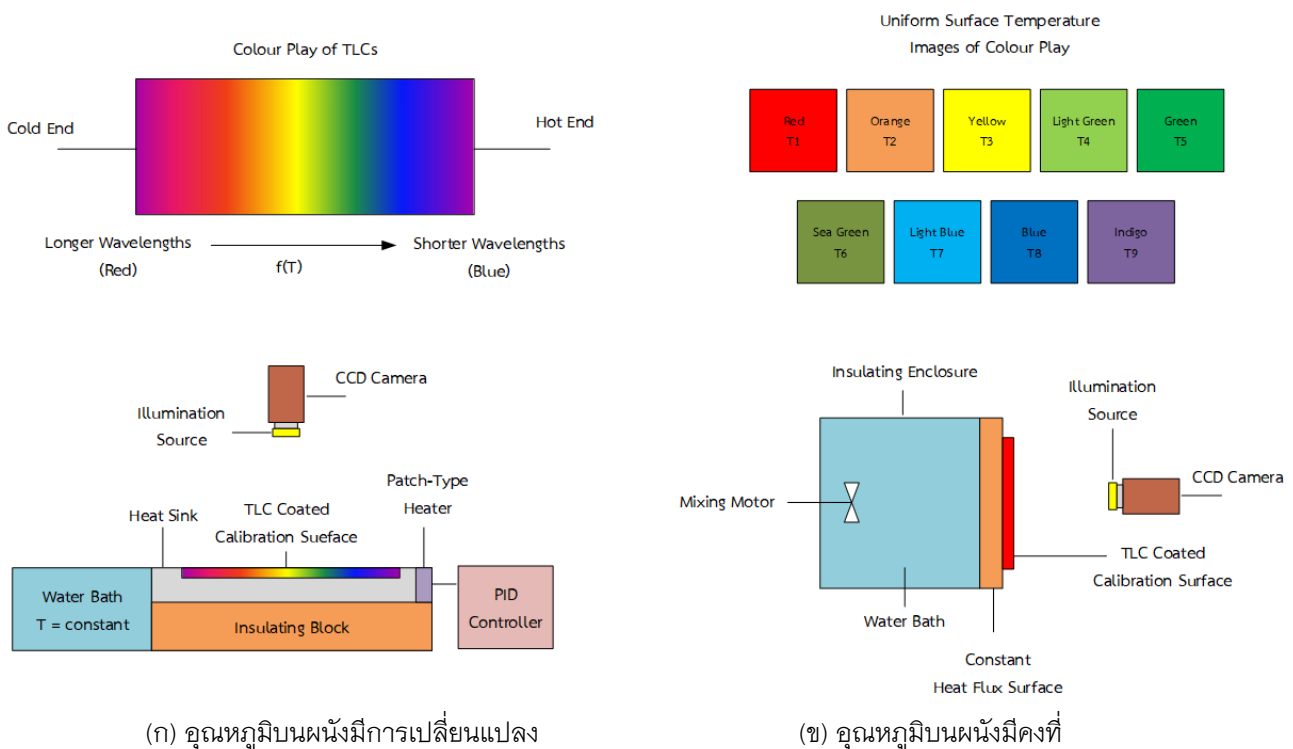
ผลึกเหลวสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามช่วงความกว้างของอุณหภูมิที่เปลี่ยนสี คือ ประเภทเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิแคบ (Narrow Band) จะมีการเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิ 1-2 องศาเซลเซียส และประเภทเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิกว้าง (Wide Band) จะมีการเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิ 5-20 องศาเซลเซียส สำหรับผลึกเหลวประเภทเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิแคบมีข้อดีคือ มีความถูกต้องความละเอียดในการวัดสูงและสะดวกในการแปลงสีเป็นอุณหภูมิ โดยใช้ระบบประมวลผลภาพที่ไม่ซับซ้อน แต่มีข้อด้อยคือจะไม่สามารถใช้ในการ

วัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวที่มีช่วงกว้างได้ ในขณะที่ประเภทเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิกว้าง สามารถดูการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวทั้งหมด แต่ต้องใช้ระบบประมวลภาพที่ซับซ้อนเพื่อวัดการกระจายอุณหภูมิแบบเชิงปริมาณที่แม่นยำ

บทความฉบับนี้จะขอยกตัวอย่างผลึกเหลวแบบแผ่นจากบริษัท โอเมก้าเอ็นจิเนียริง จำกัด [8] ที่อยู่ในรูปแบบแผ่นฟิล์มหรือแบบแผ่นพลาสติกพร้อมติด ซึ่งสามารถนำไปใช้ได้สะดวกและง่ายในการติดตั้งบนพื้นผิวที่เรียบมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงอุณหภูมิที่ไม่กว้างมากนัก ซึ่งมีช่วงความกว้างของอุณหภูมิที่มีให้เลือกอยู่ 2 ช่วง คือ ช่วงอุณหภูมิแคบ (1 องศาเซลเซียส) และช่วงอุณหภูมิกว้าง (5 องศาเซลเซียส) โดยในการทดลองนี้ได้เลือกใช้ช่วงอุณหภูมิใช้งานอยู่ในช่วง 30 องศาเซลเซียส จนถึง 35 องศาเซลเซียส

3.2 การสอบเทียบผลึกเหลว

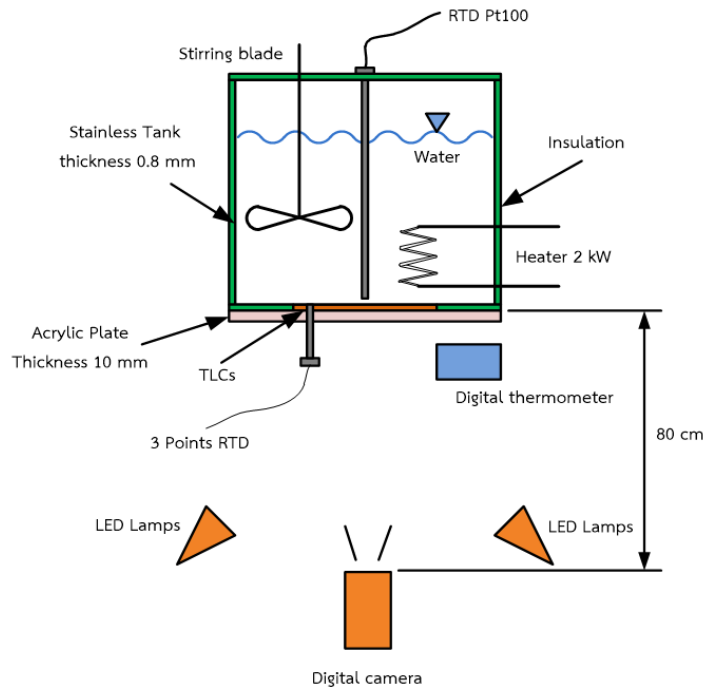
ในการสอบเทียบผลึกเหลวเป็นกระบวนการที่สำคัญที่สุดมีผลต่อความแม่นยำในการวัดอุณหภูมิ สามารถทำได้ 2 วิธี คือวิธีสอบเทียบบนผนังที่มีอุณหภูมิคงที่ (Isotherm) และวิธีสอบเทียบบนผนังที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature Gradient) ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 วิธีที่ใช้ในการสอบเทียบผลึกเหลว

วิธีสอบเทียบอุณหภูมิบนผนังที่มีอุณหภูมิคงที่ วิธีนี้จะควบคุมอุณหภูมิบนผิวที่เคลือบสารหรือแผ่นผลึกเหลวให้คงที่เท่ากันตลอดทั้งแผ่นและใช้กล้องดิจิตอลในการบันทึกสี เพื่อสร้างข้อมูลสอบเทียบระหว่างสีกับอุณหภูมิ โดยในการสอบเทียบจะสามารถทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิบนผนังจนผลึกเหลวเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงสี หลังจากนั้นจะทำการบันทึกอุณหภูมิบนผนังในขณะนั้นและบันทึกภาพของผลึกเหลว กระบวนการนี้จะทำซ้ำที่อุณหภูมิผนังสูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงอุณหภูมิที่ผลึกเหลวเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเข้มหรือม่วงเข้ม ถึงแม้ขั้นตอนของการสอบเทียบและอุปกรณ์ที่ใช้ไม่ซับซ้อน แต่ใช้เวลาในการสอบเทียบค่อนข้างนาน เนื่องจากต้องทำการสอบเทียบข้อมูลเป็นจำนวนมากและมีความละเอียดเพื่อให้ได้ข้อมูลของสีสำหรับใช้วัดอุณหภูมิที่เพียงพอ และวิธีการสอบเทียบบนผนังที่มีการกระจายอุณหภูมิ (Gradient Method) วิธีที่นี้จะทำการติดแผ่นหรือเคลือบสารผลึกเหลวบนผนังที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เช่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบนพื้นผิวแบบเชิงเส้นและทราบอุณหภูมิแต่ละจุด วิธีนี้สามารถสอบเทียบอุณหภูมิได้อย่างต่อเนื่อง เพราะการเปลี่ยนแปลงสีบนผนังของผลึกเหลวเป็นแบบต่อเนื่อง ทำให้ได้ข้อมูลของการสอบเทียบมากกว่าวิธีแรก และเวลาในการสอบเทียบน้อยกว่า ซึ่งสามารถบันทึกข้อมูลของสีกับอุณหภูมิจากการบันทึกภาพเพียงครั้งเดียว

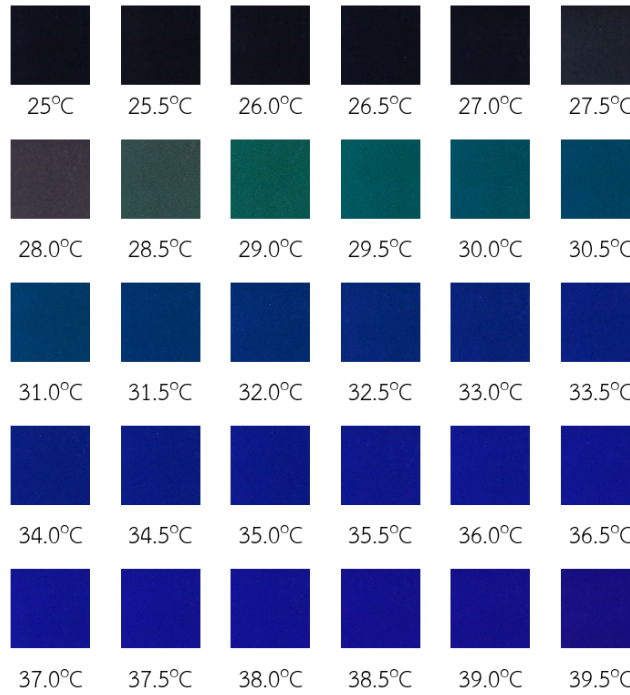
แต่อย่างไรก็ตาม ไม่ว่าใช้การสอบเทียบโดยวิธีใดก็ตาม ระบบบันทึกภาพ เงื่อนไขการให้แสงสว่างและการปรับค่าของการถ่ายภาพ เช่น มุมการให้แสงและมุมบันทึกภาพที่ใช้ในการสอบเทียบสีกับอุณหภูมิ เป็นต้น ควรจะใช้เหมือนกับเงื่อนไขที่ใช้งานจริง การใช้งานผลึกเหล่านั้นจำเป็นต้องทำการสอบเทียบอุณหภูมิกับสีที่มีการเปลี่ยนแปลงของผลึกเหลวเสียก่อน (วิธีสอบเทียบอุณหภูมิบนผนังที่มีอุณหภูมิคงที่)



รูปที่ 3 ชุดทดลองที่ใช้ในการสอบเทียบผลึกเหลว

รูปที่ 3 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการสอบเทียบสี โดยจะมีถังน้ำที่ทำมาจากสแตนเลสที่มีความหนา 0.8 มิลลิเมตร ทำการติดตั้งขดลวดความร้อนขนาด 2 กิโลวัตต์ ไว้ภายในถังน้ำเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำ ขดลวดความร้อนจะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับที่สามารถปรับกระแสและแรงดันของไฟฟ้าได้ รวมไปถึงการติดตั้งชุดใบกวนไว้ภายในถังน้ำเพื่อทำหน้าที่ผสมและคลุกเคล้าให้น้ำภายในถังมีอุณหภูมิที่มีความใกล้เคียงกัน ภายนอกของถังน้ำจะทำการติดตั้งฉนวนเพื่อลดการสูญเสียความร้อนไปยังสิ่งแวดล้อมภายนอก ที่บริเวณด้านล่างของถังน้ำจะทำการติดตั้งแผ่นผลึกเหลวเพื่อแสดงภาพสีที่อุณหภูมิต่างๆ โดยถังสแตนเลสบางจะมีหน้าที่รับความร้อนจากน้ำและกระจายความร้อนให้ทั่วทั้งแผ่นของผลึกเหลว และบริเวณทางด้านล่างของถังน้ำจะทำการติดตั้งกล้องดิจิทัลความละเอียดสูงเพื่อทำการบันทึกภาพการเปลี่ยนแปลงสี อุณหภูมิน้ำและอุณหภูมิผิวของแผ่นสแตนเลสสามารถวัดค่าได้จากการติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ (ชนิด RTD Pt100) โดยการสอบเทียบการเปลี่ยนแปลงสีในแต่ละครั้งจะกำหนดช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 25 องศาเซลเซียส จนถึง 50 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงที่แผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตอลไม่แสดงสี (สีดำ) จนถึงช่วงที่มีการแสดงสีเป็นน้ำเงินเข้มหรือม่วงเข้ม สำหรับขั้นตอนในการสอบเทียบสีนั้นจะต้องทำการติดตั้งอุปกรณ์ให้อยู่ในสภาวะเดียวกันกับการทดลองหรือการนำไปใช้งาน

การสอบเทียบผลึกเหลวจะแบ่งเป็น 2 กรณี คือ การปรับค่าจากอุณหภูมิต่ำไปหาอุณหภูมิสูงและจากอุณหภูมิสูงไปหาอุณหภูมิต่ำเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของการเกิดฮิสเทอรีซิส โดยจะทำการบ่อนกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดความร้อนจนกระทั่งอุณหภูมิของแผ่นสแตนเลสมีค่าเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งจะไม่แสดงสี (สีดำ) แล้วรอให้อุณหภูมิของผลึกเหลวมีค่าคงที่และสม่ำเสมอ จึงทำการบันทึกภาพแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตอล และทำซ้ำในลักษณะเดียวกันโดยการเพิ่มอุณหภูมิบนแผ่นสแตนเลสครั้งละ 0.1 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส (สีน้ำเงินเข้มหรือม่วงเข้ม) ดังรูปที่ 4 และหลังจากนั้นจะปล่อยให้อุณหภูมิของน้ำเย็นลงครั้งละ 0.1 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิลดลงมาอยู่ที่ 25 องศาเซลเซียส โดยจะทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง



รูปที่ 4 ตัวอย่างสีของผลึกเหลวที่ได้จากการสอบเทียบ

รูปที่ 4 แสดงผลการสอบเทียบสีของผลึกเหลวที่อุณหภูมิต่างๆ และเมื่อนำภาพทั้งหมดที่ได้จากการสอบเทียบมาวิเคราะห์สีให้อยู่ในระบบสี RGB จากนั้นทำการแปลงให้เปลี่ยนไปเป็นระบบสี HSI [9] ดังสมการต่อไปนี้

$$H = \begin{cases} \theta & \text{if } B \leq G \\ 360 - \theta & \text{if } B > G \end{cases} \quad (1)$$

โดยที่

$$\theta = \cos^{-1} \left\{ \frac{0.5[(R-G) + (R-B)]}{[(R-G)^2 + (R-B) + (G-B)]^{1/2}} \right\} \quad (2)$$

พารามิเตอร์ของค่าสี (S และ I) หาจากสมการดังนี้

$$S = 1 - \frac{3}{(R+G+B)} [\min(R, G, B)] \quad (3)$$

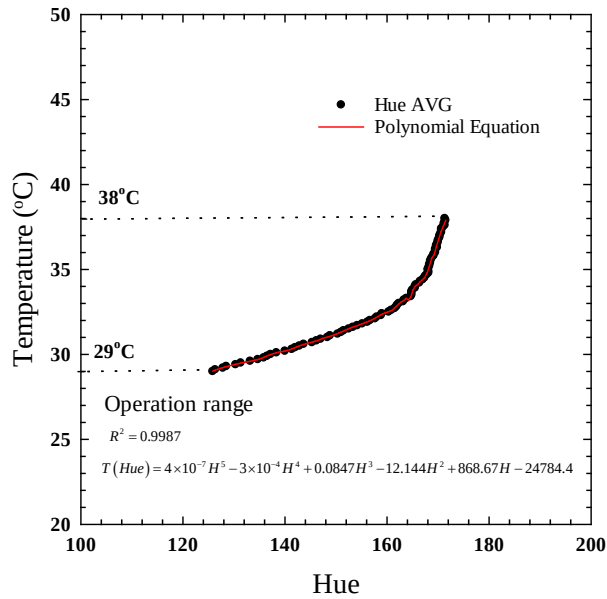
$$I = \frac{1}{3}(R+G+B) \quad (4)$$

เมื่อค่าตัวประกอบสี (H) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเป็นสีจริงซึ่งเกิดมาจากการนำแม่สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินมาผสมกัน ซึ่งจะเป็นส่วนของมุมมองสีที่ทำมุมกันรอบแกนในแนวตั้ง มีช่วงตั้งแต่ 0 องศา จนถึง 360 องศา โดยจะมีระดับสีแต่ละมุม 60 องศา หมุนกันจนกลายเป็นรูปหกเหลี่ยม ส่วนค่า S (Saturation) คือ คุณสมบัติที่ใช้วัดอัตราที่สีบริสุทธิ์ถูกทำให้เจือจางด้วยสีขาว ซึ่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 และค่า I (Intensity) คือ คุณสมบัติที่ใช้อธิบายความเข้มหรือความสว่างของสี

สมการที่ (1)–(4) เราสามารถที่จะคำนวณหาค่าตัวประกอบสี (H) เฉลี่ยที่อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์แล้วนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าตัวประกอบของสี (H) ดังรูปที่ 5

รูปที่ 5 สามารถนำไปหาสมการที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของตัวประกอบสี (H) ในระบบสี HSI กับค่าอุณหภูมิที่อยู่ในรูปแบบสมการโพลีโนเมียลลำดับที่ห้า โดยวิธีการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น ดังสมการต่อไปนี้

$$T(H) = 4 \times 10^{-7} H^5 - 3 \times 10^{-4} H^4 + 0.0847 H^3 - 12.144 H^2 + 868.67 H - 24784.4 \quad (5)$$

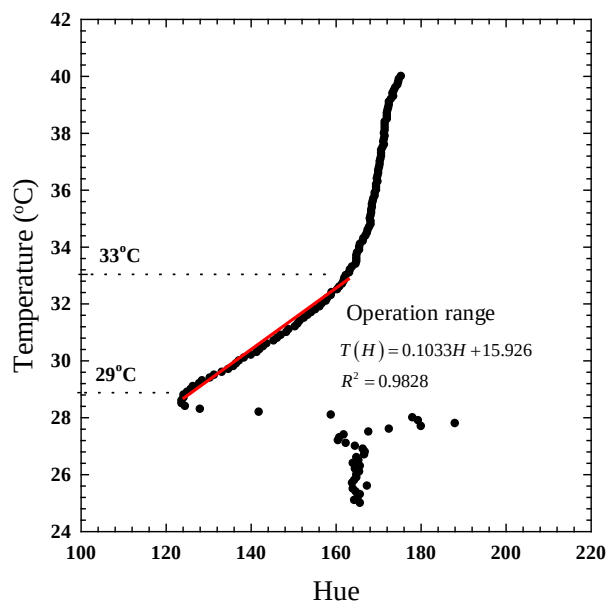


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทียบกับตัวประกอบของสี

สมการที่ (5) มีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (R-squared หรือ Coefficient of Determination) เท่ากับ 0.9884 ซึ่งสามารถที่จะนำไปใช้ในการคำนวณหาอุณหภูมิในแต่ละจุดของภาพ (Pixel) ที่เชื่อมโยงค่าตัวประกอบสี (H) ที่อยู่ภายในช่วงของอุณหภูมิ 29–38 องศาเซลเซียส เท่านั้น

3.3 ความเป็นเชิงเส้น

คุณสมบัติของความเป็นเชิงเส้น (Linearity) คือ ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตของเซนเซอร์ที่มีคุณสมบัติเป็นเชิงเส้นหรือมีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรง โดยคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นจะยังแสดงถึงช่วงสูงสุดที่กราฟคุณสมบัติยังคงเป็นเชิงเส้นอยู่หรือเรียกช่วงดังกล่าวนี้ว่า ช่วงในการปฏิบัติงาน (Operation Range) ของเซนเซอร์ โดยทั่วไปนิยมบอกในหน่วยของเปอร์เซ็นต์ [10]



รูปที่ 6 การตรวจสอบความเป็นเชิงเส้น

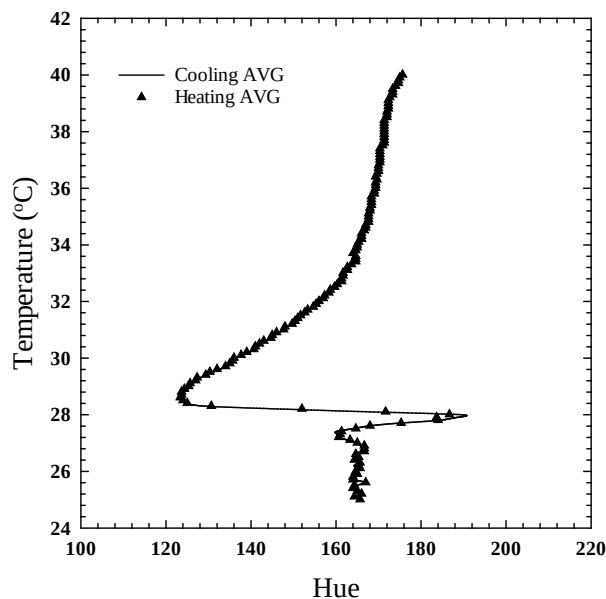
รูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของผลึกเหลวจะอยู่ในช่วงของอุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส จนถึง 33 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงสูงสุดที่กราฟคุณสมบัติยังคงเป็นเชิงเส้นอยู่ (ช่วงในการปฏิบัติงานของเซนเซอร์) และเมื่อนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบสี (H) กับค่าอุณหภูมิที่อยู่ในรูปแบบสมการเส้นตรง ได้ดังนี้

$$T(H) = 0.1033H + 15.926 \quad (6)$$

สมการที่ (6) มีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (R-Squared หรือ Coefficient of Determination) เท่ากับ 0.9828 ซึ่งสามารถที่จะนำไปใช้ในการคำนวณหาอุณหภูมิในแต่ละจุดของภาพ (Pixel) ที่เงื่อนไขค่าตัวประกอบสี (H) ที่อยู่ภายในช่วงของอุณหภูมิ 29-33 องศาเซลเซียส เท่านั้น

3.4 ฮิสเทอรีซิส

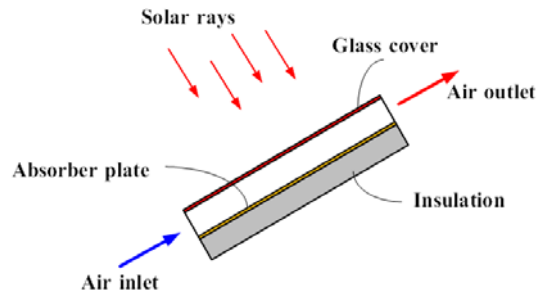
ฮิสเทอรีซิสเป็นการเกิดขึ้นจากผลต่างของสัญญาณเอาต์พุตของเซนเซอร์ เมื่อทำการการวัดปริมาณทางฟิสิกส์ทางอินพุต โดยปรับค่าจากน้อยไปมากและปรับค่าลดลงจากมากไปน้อย คุณสมบัติฮิสเทอรีซิสนี้ก่อให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนขึ้นและส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของระบบหรืออุปกรณ์ ปริมาณอินพุตของเซนเซอร์ซึ่งเป็นค่าที่ทำการวัดหรือต้องการตรวจสอบจะถูกปรับให้มีค่ามากขึ้นจนกระทั่งถึงย่านในการวัดสูงสุด ในทางกลับกันก็ทำการปรับค่าให้ลดลงจนกระทั่งถึงย่านในการวัดต่ำสุดเช่นกัน โดยจะเรียกค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณเอาต์พุตที่เกิดขึ้นนี้ว่า ฮิสเทอรีซิส [10] ซึ่งจากการทดสอบพบว่า การสอบเทียบผลึกเหลวไม่เกิดค่าความคลาดเคลื่อนฮิสเทอรีซิสหรือผลต่างของสัญญาณเอาต์พุต ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 การตรวจสอบฮิสเทอรีซิส

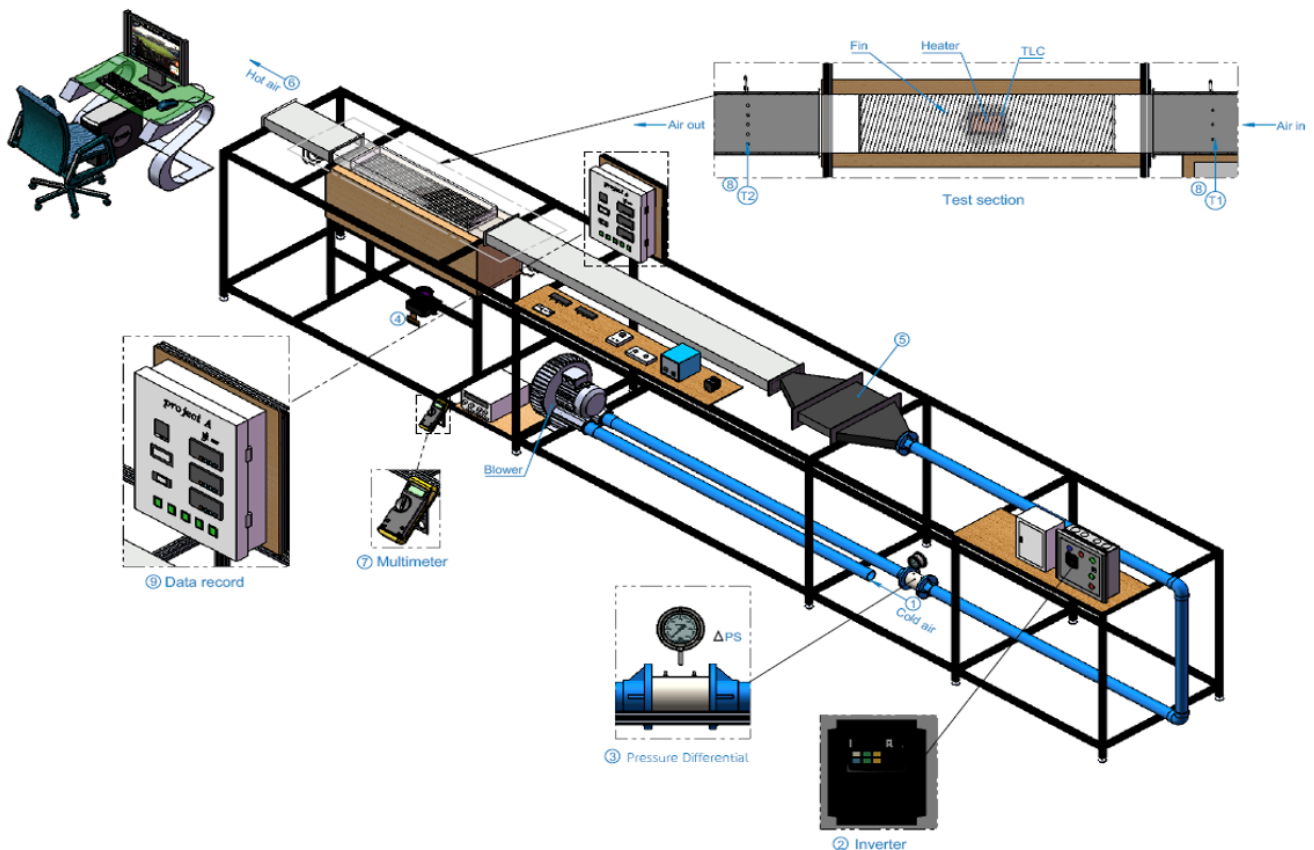
4. การประยุกต์ใช้ผลึกเหลวเป็นเซนเซอร์วัดอุณหภูมิในกระบวนการถ่ายเทความร้อน

เครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Air Heater) เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่ต้องการรับความร้อนจากแสงอาทิตย์มาใช้ในการใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น การบ่มผลไม้ การอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร เป็นต้น โดยชิ้นส่วนที่มีความสำคัญของเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ คือ แผ่นดูดซับความร้อน (Absorber Plate) เป็นส่วนที่มีการรับพลังงานจากรังสีแสงอาทิตย์แล้วมีการถ่ายเทความร้อนไปยังอากาศ ซึ่งแผ่นดูดซับความร้อนแบบดั้งเดิมจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากเป็นแบบช่องทางที่มีผนังเรียบ (ท่อเปล่า) ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ท่ออุ้มน้ำอากาศพลังงานแสงอาทิตย์แบบช่องทางที่มีผนังเรียบ

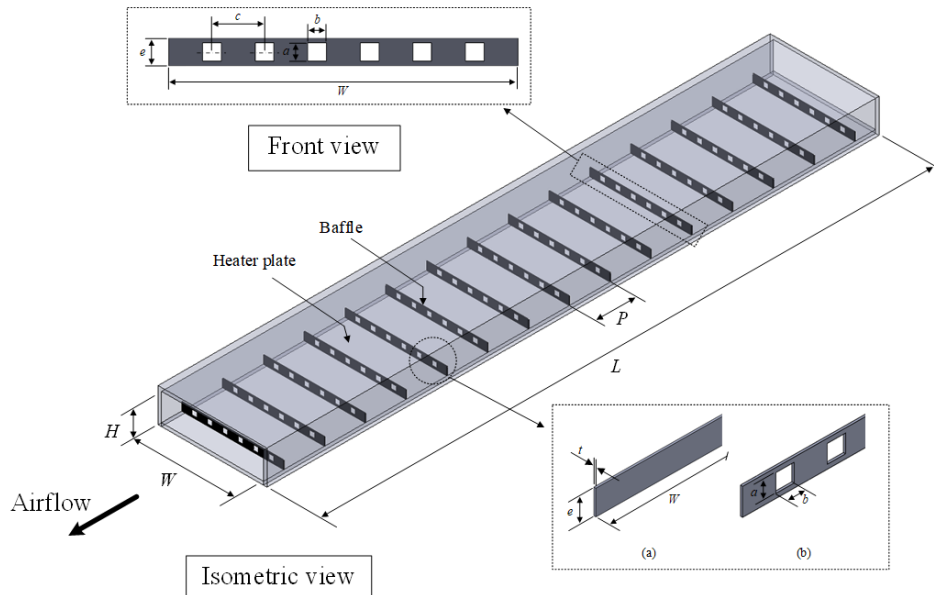
การพัฒนาแผ่นดูดซับความร้อนเพื่อให้ค่าการถ่ายเทความร้อนโดยรวมมีค่าเพิ่มสูงขึ้น อาจแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ซึ่งประกอบด้วยวิธีที่ 1 เป็นเทคนิควิธีที่ไม่ต้องการพลังงานจากภายนอกมาช่วยในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ซึ่งเป็นวิธีที่มีการเพิ่มชิ้นงานเข้าไปภายในท่อหรือมีการปรับปรุงพื้นผิวในรูปแบบต่างๆ เช่น การติดตั้งแผ่นกั้น (Baffle) ใช้ครีบริบทรงต่างๆ (Ribs) เป็นต้น เราเรียกรูปแบบนี้ว่า พาสซีฟ (Passive Method) ส่วนวิธีที่ 2 เป็นเทคนิควิธีที่จำเป็นต้องใช้พลังงานจากภายนอกมาช่วยในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เช่น การสั่นของไหลและสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น เราเรียกรูปแบบนี้ว่า แอกทีฟ (Active Method) โดยเทคนิควิธีแบบพาสซีฟเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมใช้กันมากและให้ผลลัพธ์ที่ดีในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากทำได้ง่าย มีต้นทุนค่อนข้างต่ำ และมีสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีพอสมควร



รูปที่ 9 ชุดจำลองสถานะการทำงานของเครื่องอุ้มน้ำอากาศพลังงานแสงอาทิตย์

รูปที่ 9 แสดงหลักการประยุกต์ใช้ผลึกเหลวเป็นเซนเซอร์วัดอุณหภูมิในกระบวนการถ่ายเทความร้อนจะดำเนินการทดสอบในอุปกรณ์ที่มีส่วนประกอบหลักๆ ดังนี้ ระบบจ่ายอากาศ (เครื่องเป่าลม) ส่วนทางเข้าของท่อทดสอบ และระบบให้ความร้อน ทางเข้าของชุดทดสอบมีความยาว 2,000 มิลลิเมตร มีความยาวที่เพียงพอสำหรับการพัฒนาการไหลอย่างเต็มที่ [11] เพื่อป้องกันการแยกหรือข้ามชั้นของการไหล แผ่นดูดซับความร้อนที่มีผนังเรียบถูกสร้างมาจากท่ออะคริลิกที่มีขนาดความกว้าง 150 มิลลิเมตร มีความสูง 40

มิลลิเมตร และมีความยาว 900 มิลลิเมตร โดยจะมีการติดตั้งแผ่นกั้นตรง (มุมปะทะการไหล เท่ากับ 90°) และแผ่นกั้นเจาะรูที่มีสัดส่วนของความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงท่อ (e/H) เท่ากับ 0.3 และมีสัดส่วนของระยะห่างแผ่นกั้นต่อความสูงท่อ (P/H) เท่ากับ 1.5 ดังแสดงในรูปที่ 10 ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆ ดังตารางที่ 1



รูปที่ 10 แผ่นดูดซับความร้อนที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นวางขวาง

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

ท่อทดสอบ (Test section)

ความสูงของท่อ, H (mm)	40
ความกว้างของท่อ, W (mm)	150
ความยาวของท่อ, L (mm)	900

แผ่นกั้น (Baffles)

รูปแบบของแผ่นกั้น	แผ่นกั้นตรงและแผ่นกั้นเจาะรู
วัสดุที่ใช้ทำ	พลาสติกพีแอลเอ (PLA)
ความหนาของแผ่นกั้น, t (mm)	1.5
ความกว้างของแผ่นกั้น, w (mm)	150
ความสูงของแผ่นกั้น, L (mm)	12 ($e/H=0.3$)
ระยะห่างของแผ่นกั้น, P (mm)	60 ($P/H=1.5$)
ขนาดของรูเจาะ, $a \times b$ (mm ²)	8×8

เงื่อนไขของการทดสอบ (Test condition)

ของไหลที่ใช้ในการทดสอบ	อากาศ
ค่าเลขเรย์โนลด์ส, Re	6,000 จนถึง 24,000
ค่าเลขพรานด์เทิล, Pr	0.7

ท่อทดสอบจะทำการติดตั้งขดลวดความร้อนชนิดแบบแผ่น (กำลังไฟฟ้า 2.5 วัตต์ต่อตารางนิ้ว) เป็นเครื่องกำเนิดความร้อนที่ท่อทดสอบในสภาวะพลังความร้อนที่มีค่าคงที่จะทำการติดตั้งที่ผนังด้านล่างของส่วนทดสอบเพียงด้านเดียว โดยจะเชื่อมต่อและควบคุมโดยใช้เครื่องควบคุมไฟฟ้ากระแสสลับ ผนังด้านนอกของท่อทดสอบจะทำการหุ้มฉนวนกันความร้อนเป็นอย่างดีเพื่อลดการสูญเสียของความร้อนไปยังสภาพแวดล้อม และแผ่นฟิล์มเคลือบจะถูกติดตั้งไว้ที่ผนังด้านล่างของท่อทดสอบเพื่อตรวจสอบอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของพื้นผิวที่มีการถ่ายเทความร้อน ในขณะที่อุณหภูมิของอากาศ (ทางเข้าและทางออกของท่อทดสอบ) จะถูกวัดด้วยเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ (RTD Pt100) และบันทึกผ่านอุปกรณ์แสดงผลและเก็บข้อมูล (Data Logger) โดยอุปกรณ์และเครื่องมือในการวัดค่าอุณหภูมิจะต้องผ่านการสอบเทียบมาก่อน ความดันลดในส่วนของท่อทดสอบจะใช้เครื่องมือวัดความดันที่แตกต่าง (Pressure Differential Transmitter) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัด และอัตราการไหลของอากาศจะถูกวัดโดยใช้ชุดออร์ฟิสมิเตอร์ที่ถูกสร้างขึ้นตามมาตรฐาน ASME [12] และได้ทำการสอบเทียบกับเครื่องมือวัดความเร็วของอากาศ (Hot Wire Anemometer) ซึ่งมีรายละเอียดของเครื่องมือวัดในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 รายละเอียดต่างๆ ของเครื่องมือวัด

เครื่องมือวัด (Instruments)	รายละเอียดของเครื่องมือวัด (Specification)
Nikon DSLR Camera	effective pixel: 16.2 million (4928×3264-pixel size)
TLC Sheet	accuracy: $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$, 30 to 35°C (86 to 95°F)
RTD Pt100	accuracy: $\pm 0.001^{\circ}\text{C}$ at 0°C (-130 to 95°C $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$)
TSI/Alnor 9565-A	accuracy: $\pm 3\%$ for reading (± 0.015 m/s), range: 0–50 m/s, resolution: 0.01 m/s
Dwyer MS-111 LCD	accuracy: $\pm 2\%$ for 250 Pa, $\pm 1\%$ for 250 to 1250 Pa
Dwyer DM-2004 LCD	accuracy: $\pm 1\%$ FS at 70°C
HIOKI Data Logger	10 ms high-speed sampling (with 40-channel as standard)

5. สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณ

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าเลขนัสเซลต์ (Nu) ตัวประกอบความเสียหาย (f) และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อน (TPF) ที่ค่าเลขเรย์โนลด์ส (Re) ในช่วงของการไหลแบบปั่นป่วนทั้งกรณีที่มีแผ่นดูดซับความร้อน มีการติดตั้งแผ่นกันตรง แผ่นกันเจาะรู และกรณีที่เป็นท่อผิวเรียบ

อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ สามารถคำนวณได้จาก

$$\dot{m} = \rho A_x V_i \quad (7)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3), A_x คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ (m^2) และ V_i คือ ความเร็วเฉลี่ยของอากาศ (m/s)

ความเร็วของอากาศภายในท่อทดสอบ หาได้จาก

$$V = \dot{m} / \rho_b A_x \quad (8)$$

เมื่อ ρ_b คือ ความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิของของไหลเฉลี่ย (kg/m^3)

ความร้อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากขดลวดความร้อน สามารถคำนวณได้จาก

$$Q_i = V_i I \quad (9)$$

เมื่อ V_i คือ แรงดันของไฟฟ้า (V) และ I คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดความร้อน (A)

ความร้อนที่สูญเสีย (Q_{loss}) ผ่านฉนวนกันความร้อนสามารถคำนวณได้จากการวัดค่าอุณหภูมิที่ผนังเฉลี่ยและอุณหภูมิภายนอกของอากาศ โดยมีค่าประมาณ 5–8% ของความร้อนทั้งหมดที่คำนวณได้จากขดลวดความร้อน ดังนั้น ความร้อนที่เกิดขึ้นจริงที่ได้มาจากขดลวดความร้อน คือ

$$Q_1 = Q_t - Q_{loss} \quad (10)$$

ความร้อนที่อากาศได้รับ คำนวณได้จาก

$$Q_2 = \dot{m}C_p (T_o - T_i) \quad (11)$$

เมื่อ C_p คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศ (J/kg K) และ T_i , T_o คือ อุณหภูมิของอากาศทางเข้าและทางออกของท่อทดสอบ (K) ตามลำดับ

สมดุลความร้อนระหว่างความร้อนที่เกิดขึ้นจริง (Q_1) และความร้อนที่อากาศได้รับ (Q_2) มีค่าเท่ากับ 1-5% สำหรับทุกเงื่อนไขการทดลอง ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของอัตราการถ่ายเทความร้อนรวม (Q) ที่ได้รับจากความร้อนที่เกิดขึ้นจริงมาจากขดลวดไฟฟ้าและความร้อนที่อากาศได้รับ สามารถคำนวณหาได้จาก

$$Q = (Q_1 + Q_2)/2 \quad (12)$$

ฟลักซ์ความร้อน คำนวณหาได้โดย

$$q = \frac{Q}{wL} \quad (13)$$

เมื่อ w คือ ความกว้างของขดลวดความร้อนชนิดแบบแผ่น (m) และ L คือ ความยาวของท่อทดสอบ (m)

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ณ ตำแหน่ง x ใดๆ หาได้จาก

$$h_x = \frac{q}{(T_{wx} - T_{bx})} \quad (14)$$

เมื่อ T_{bx} คือ อุณหภูมิของไหลเฉลี่ยที่ตำแหน่ง x ใดๆ (K), T_{wx} คือ อุณหภูมิที่ผนังท่อที่เราสามารถวัดได้จากการเปลี่ยนแปลงของแผ่นเทอร์โมลิตวิตคริสตอล (K)

อุณหภูมิของอากาศ ณ ตำแหน่ง x ใดๆ สามารถกำหนดได้โดยสมการสมดุลพลังงาน ดังต่อไปนี้

$$T_{bx} = T_i + \frac{qwx}{\dot{m}C_p} \quad (15)$$

เมื่อ w คือ เส้นรอบรูปของท่อทดสอบ (m) และ x คือระยะทางตามแนวยาวของท่อทดสอบ (m)

ค่าเลขนัสเซิลต์ ณ ตำแหน่ง x ใดๆ สามารถคำนวณได้จาก

$$Nu_x = \frac{h_x D_h}{k} \quad (16)$$

เมื่อ k คือ ค่าการนำความร้อนของอากาศ (W/m K) และ D_h คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า (m)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย หาได้จาก

$$h = \frac{q}{(\bar{T}_w - \bar{T}_b)} \quad (17)$$

เมื่อ T_b คือ อุณหภูมิของไหลเฉลี่ย (K) และ T_w คือ อุณหภูมิที่ผนังท่อที่วัดได้จากแผ่นเทอร์โมลิตวิตคริสตอล (K)

ค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ย ได้จากสมการต่อไปนี้

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (18)$$

ตัวประกอบความเสียดทาน สามารถหาได้จาก

$$f = \frac{\Delta P}{\left(\frac{L}{D_h}\right)\left(\rho_b \frac{V^2}{2}\right)} \quad (19)$$

เมื่อ ΔP คือ ความดันลดของชุดทดสอบ (N/m²)

6. ผลลัพธ์และการวิจารณ์ผล

การศึกษานี้เป็นการศึกษาผลของการถ่ายเทความร้อน การสูญเสียความดัน และการเพิ่มสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อน ด้วยการติดตั้งแผ่นกันที่ค่าเลขเรย์โนลด์สเท่ากับ 6,000 จนถึง 24,000 โดยก่อนเริ่มต้นการทดสอบจะต้องนำค่าเลขนัสเซลต์และตัวประกอบความเสียหายที่ทดสอบได้จากแผ่นดูดซับที่มีผนังเรียบไปตรวจสอบกับค่าสหสัมพันธ์พื้นฐานเพื่อที่จะนำข้อมูลที่ได้มาใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลทางความร้อนของท่อทดสอบต่อไป

6.1 การตรวจสอบผลจากท่อผิวเรียบ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันภายในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่แสดงอยู่ในรูปของค่าเลขนัสเซลต์และที่แสดงในรูปของค่าตัวประกอบแรงเสียดทาน ตามลำดับ และทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองและผลที่ได้จากสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter และ Gnielinski ของค่าเลขนัสเซลต์และสหสัมพันธ์ของ Blasius และ Petukhov ของค่าตัวประกอบเสียดทานสำหรับในช่วงการไหลปั่นป่วน [13] ดังสมการต่อไปนี้

- 1) สมการสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter

$$Nu_s = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (20)$$

- 2) สมการสหสัมพันธ์ของ Blasius

$$f_s = 0.316 Re^{-0.25} \quad (21)$$

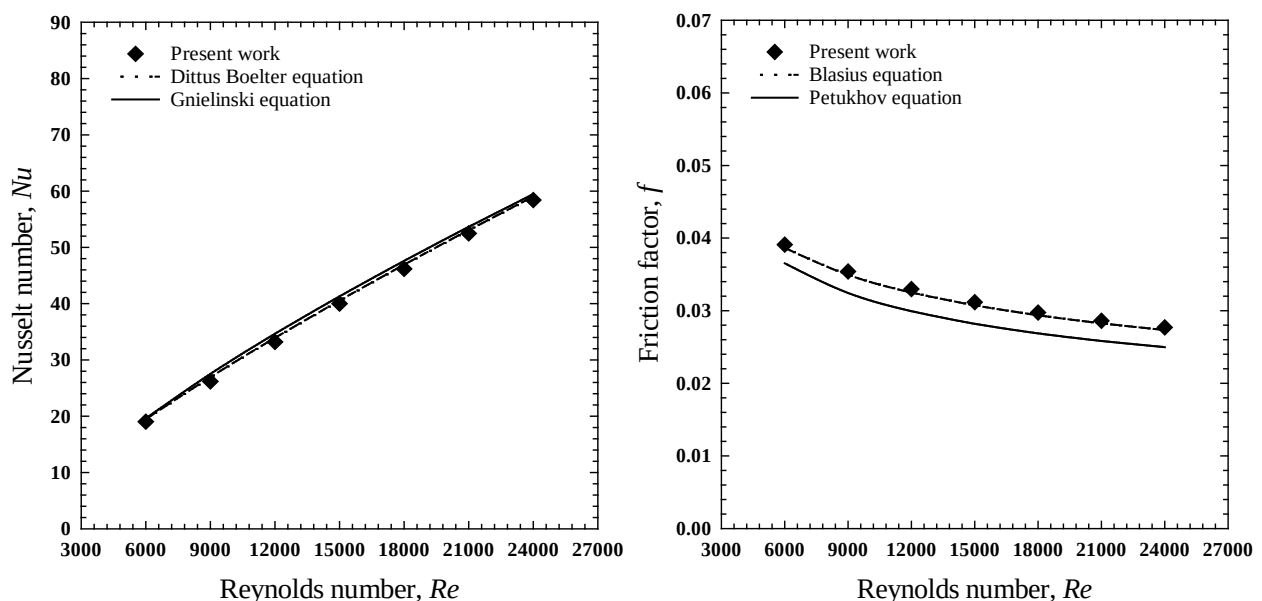
- 3) สมการสหสัมพันธ์ของ Gnielinski

$$Nu_s = \frac{(f/8)(Re-1000)Pr}{1+12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{(2/3)}-1)} \quad (22)$$

- 4) สมการสหสัมพันธ์ของ Petukhov

$$f_s = (0.79 \ln Re - 1.64)^{-2} \quad (23)$$

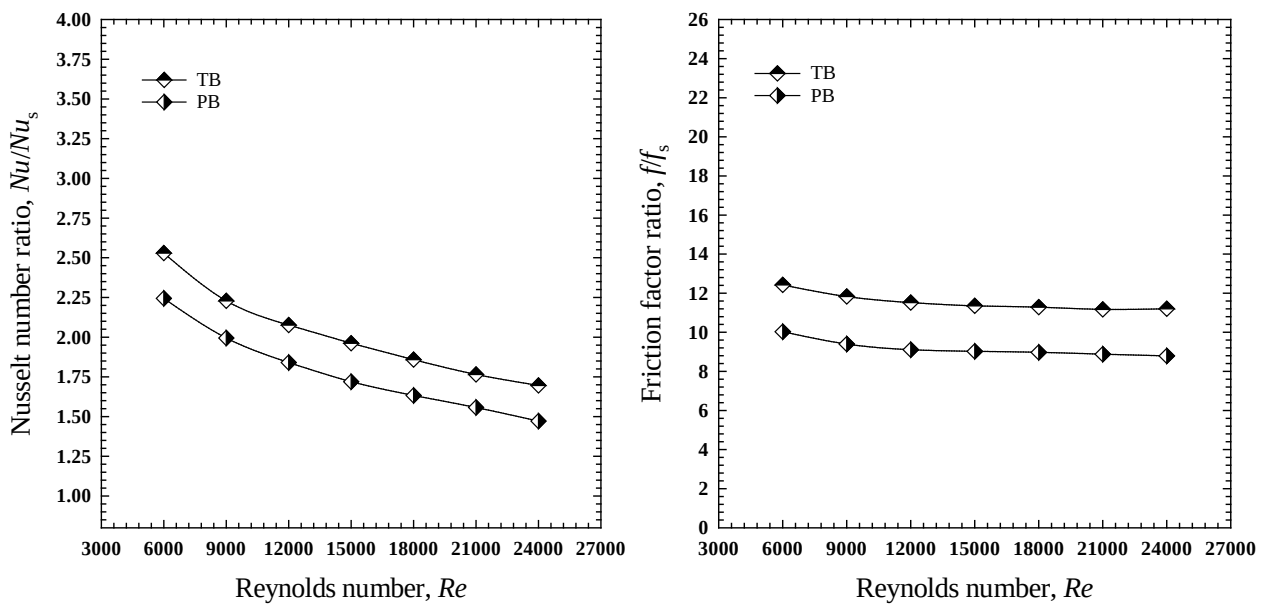
รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขนัสเซลต์ (Nu) และค่าตัวประกอบเสียดทาน (f) กับค่าเลขเรย์โนลด์ส (Re) ที่มีการเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์พื้นฐานในสมการที่ (20)–(23) พบว่า ค่าเลขนัสเซลต์ (Nu) มีความผิดพลาดเฉลี่ย เท่ากับ $\pm 5.09\%$ และในส่วน of ค่าตัวประกอบความเสียดทาน (f) มีความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ $\pm 9.83\%$ ซึ่งถือว่ามีความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ของชุดทดสอบท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ได้สร้างขึ้น



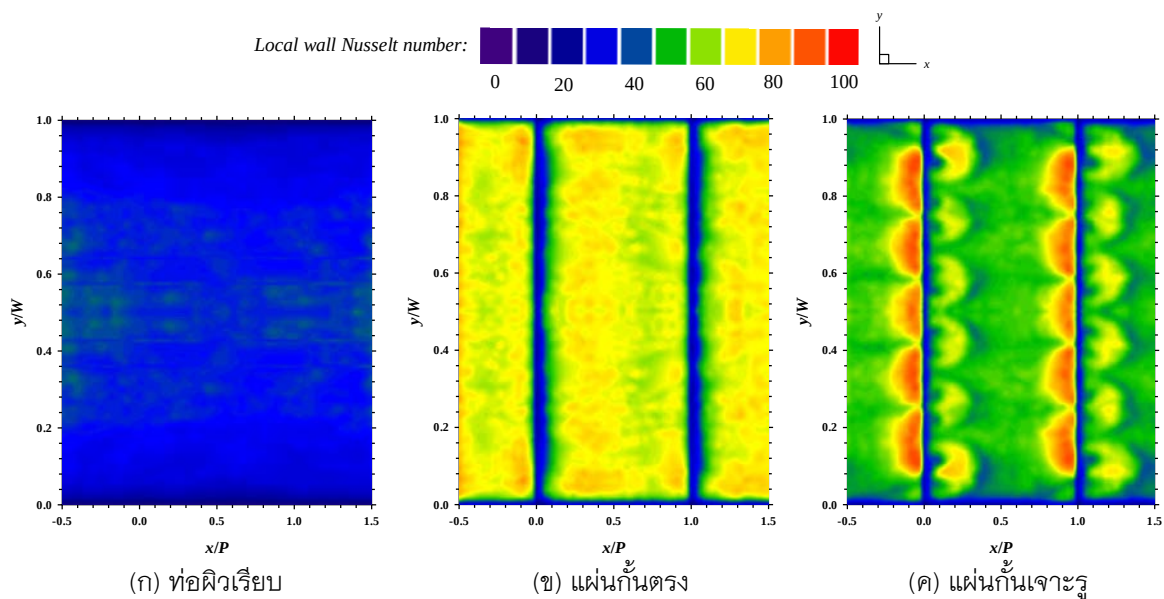
รูปที่ 10 การตรวจสอบผลจากท่อที่มีผนังเรียบ

6.2 ผลกระทบของการติดตั้งแผ่นกั้นที่ส่งผลต่อค่าการถ่ายเทความร้อน

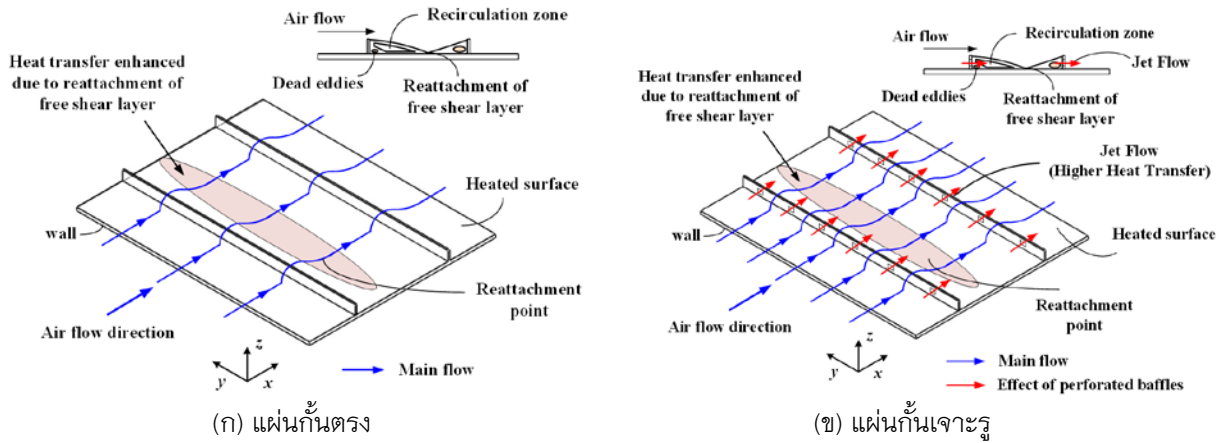
รูปที่ 11 แสดงให้เห็นว่าค่าเลขนัสเซิลต์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์สมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มระดับความปั่นป่วนของการไหลและการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องทั่วทั้งบริเวณของท่อทดสอบ จึงทำให้มีการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น และค่าเลขนัสเซิลต์ (Nu) ของแผ่นดูดซับความร้อนที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นและแผ่นกั้นวางขวางเจาะรูให้ค่าสูงกว่าท่อที่มีผนังเรียบ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1.69–2.52, 1.47–2.24 เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับท่อที่มีผนังเรียบ และค่าสัดส่วนของตัวประกอบความเสียดทาน (f/f_s) พบว่าการติดตั้งแผ่นกั้นในท่อทดสอบจะส่งผลให้ค่าตัวประกอบแรงเสียดทานสูงกว่ากรณีของท่อผนังเรียบ เนื่องจากการไหลเพิ่มพื้นที่ในการขวางทางการไหลของอากาศ ซึ่งเป็นปัจจัยให้เกิดการสูญเสียความดันในระบบให้มีความเพิ่มขึ้นและจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าเรย์โนลด์สเพิ่มสูงขึ้น โดยแผ่นกั้นตรงและแผ่นกั้นเจาะรูมีค่าตัวประกอบเสียดทานอยู่ในช่วง 11.21–12.42, 8.79–10.02 เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับท่อที่มีผนังเรียบ



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของค่าเลขนัสเซิลต์และค่าตัวประกอบความเสียดทานกับค่าเลขเรย์โนลด์ส



รูปที่ 12 การกระจายตัวของค่าเลขนัสเซิลต์ที่คำนวณมาจากผลของอุณหภูมิที่ได้มาจากแผ่นผลึกเหลว



รูปที่ 13 ท่ออุ้มน้ำอากาศพลังงานแสงอาทิตย์แบบช่องทางที่มีผนังเรียบ

รูปที่ 12 แสดงการกระจายตัวของค่าเลขนัสเซลต์ที่คำนวณมาจากผลของอุณหภูมิที่วัดได้มาจากแผ่นผลึกเหลว และสามารถคำนวณหาเลขนัสเซลต์ได้ทั่วทั้งพื้นผิวที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน สำหรับท่อทดสอบที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นตรงจะสังเกตได้ว่าจะส่งผลให้เกิดการไหลเวียนขนาดใหญ่ที่บริเวณด้านหลังของแผ่นกั้นตรง และจะเกิดการไหลปะทะ (Reattachment Point) ที่บริเวณระหว่างแผ่นกั้น ซึ่งจะส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนที่บริเวณระหว่างแผ่นกั้นบางมีการถ่ายเทความร้อนที่สูง ดังรูปที่ 13 (ก) และจะปรับสภาพของการไหลไปเป็นแบบพัฒนาแบบเต็มตัวอีกครั้ง และท่อทดสอบที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นเจาะรูจะสังเกตได้ว่ามีเจ็ทของกระแสการไหลไหลผ่านช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนที่บริเวณนี้มีค่าเพิ่มสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ที่บริเวณด้านหลังของแผ่นกั้นจะมีความรุนแรงของการไหลปะทะมีค่าลดลง จึงส่งผลให้ที่บริเวณด้านหลังแผ่นกั้นมีค่าเลขนัสเซลต์ที่ต่ำลง

6.3 ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อน

สิ่งที่มีความสำคัญสำหรับการออกแบบชิ้นงานสร้างความปั่นป่วนภายในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความเหมาะสมที่สุด ซึ่งมีเป้าหมายที่จะเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและยังคงต้องรักษาระดับของความดันภายในระบบให้มีค่าต่ำที่สุด เพราะฉะนั้น ในการกำหนดค่าที่เหมาะสมที่สุดจะเป็นการดีที่สุดที่จะพิจารณาการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันภายในระบบไปพร้อมๆ กัน จากรายงานการศึกษารายงานที่ผ่านมา [14] ได้ทำการแนะนำตัวแปรขึ้นมา ที่เรียกว่า ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในกรณีที่ท่อมีการติดตั้งแผ่นกั้นตรงและแผ่นกั้นเจาะรูแล้วทำการเปรียบเทียบกับท่อที่มีผนังเรียบ ที่สภาวะกำลังขับเดียวกัน (Constant Pumping Power) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

ที่สภาวะกำลังขับเดียวกัน (Constant Pumping Power)

$$(\dot{V}\Delta P) = (\dot{V}\Delta P)_s \quad (24)$$

เมื่ออัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศและเขียนอยู่ในรูปของตัวประกอบความเสียดทานและค่าเลขเรย์โนลด์ส จะได้ว่า

$$(fRe^3) = (fRe^3)_s \quad (25)$$

จัดรูปแบบสมการใหม่ จะได้ว่า

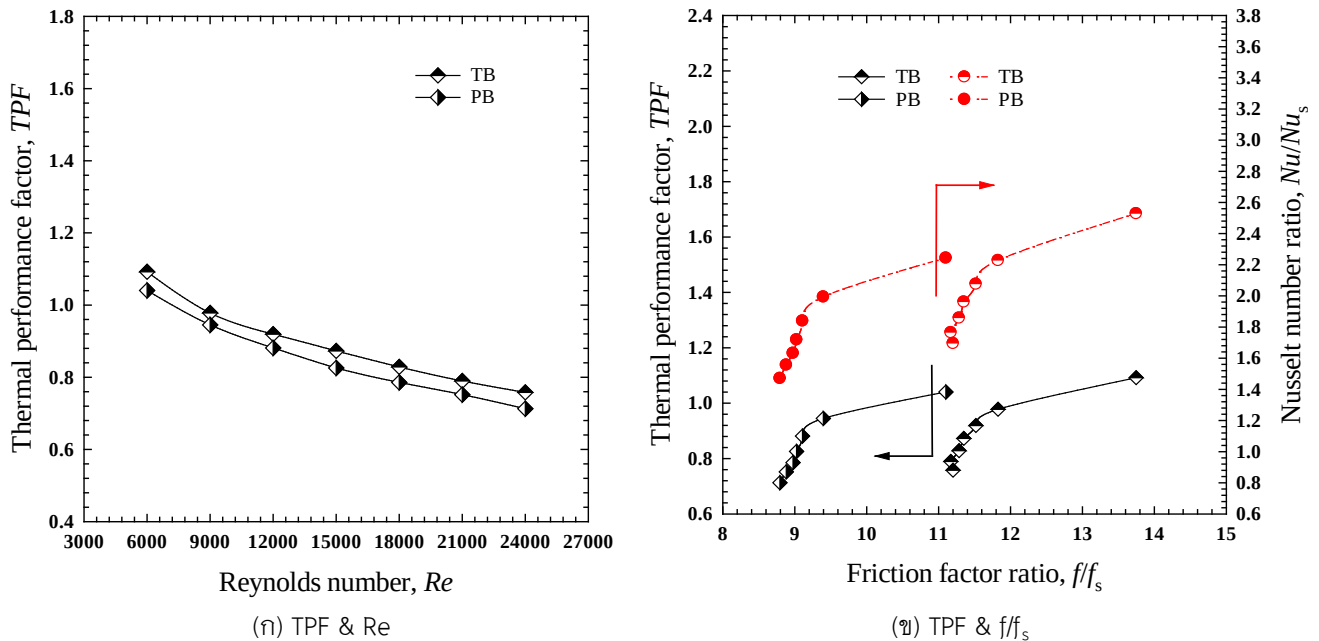
$$Re_s = Re(f/f_s)^{1/3} \quad (26)$$

ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อน (Thermal Performance Factor, TPF) คือ สัดส่วนของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของท่อทดสอบที่มีการติดตั้งชิ้นงานสร้างความปั่นป่วน (h) เทียบกับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของท่อที่มีผนังเรียบ (h_s) ที่กำลังขับของพัดลมที่มีค่าเท่ากัน (Constant Pumping Power)

$$TPF = \frac{h}{h_s} \bigg|_{pp} = \frac{Nu}{Nu_s} \bigg|_{pp} = \left(\frac{Nu}{Nu_s} \right) \left(\frac{f}{f_s} \right)^{-1/3} \quad (27)$$

เมื่อ Nu_0 คือ ค่าเลขนัสเซลต์ของท่อที่มีผนังเรียบ และ f_0 คือ ตัวประกอบความเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบ

ซึ่งจะเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการชี้วัดถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อน ในกรณีที่ค่ามากกว่า 1 จะแสดงให้เห็นถึงว่ามีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนมากกว่าท่อที่มีผนังเรียบ สำหรับกรณีที่ใช้กำลังขับของพัดลมมีค่าเท่ากัน ซึ่งจะเป็นผลให้เราสามารถที่จะลดขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อนำไปสู่การลดต้นทุนการผลิตและประสิทธิภาพสูงขึ้น รวมไปถึงจะเป็นการประหยัดต้นทุนของพลังงานที่ต้องป้อนให้กับระบบ



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนกับค่าเลขเรย์โนลด์ส

รูปที่ 14 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนกับค่าเรย์โนลด์สและค่าสัดส่วนของตัวประกอบความเสียดทาน พบว่า ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนมีแนวโน้มลดลงตามค่าเรย์โนลด์สที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของค่าสัดส่วนของเลขนัสเซิลต์ (Nu/Nu_s) มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่ในทางกลับกัน ผลของค่าสัดส่วนของค่าตัวประกอบแรงเสียดทาน (f/f_s) มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก เมื่อพิจารณาตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (27) สำหรับในกรณีพิจารณาที่กำลังขับของพัดลมเดียวกัน จึงทำให้แนวโน้มของค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีค่าลดลง โดยการติดตั้งแผ่นกันตรงและแผ่นกันเจาะรูให้ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนอยู่ในช่วง 0.75–1.09 และ 0.71–1.04 ตามลำดับ และมีค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนสูงสุดอยู่ที่ 1.09 สำหรับเงื่อนไขของการติดตั้งแผ่นกันตรงที่ค่าเลขเรย์โนลด์ส (Re) เท่ากับ 6,000

7. สรุปผลที่ได้จากการทดลอง

การประยุกต์ใช้ผลึกเหลวเป็นเซนเซอร์วัดอุณหภูมิในกระบวนการถ่ายเทความร้อนนั้นมีแนวโน้มที่จะนำไปพัฒนาต่อในอนาคต ซึ่งสามารถที่จะนำมาใช้ในการทำความเข้าใจและอธิบายกระบวนการถ่ายเทความร้อนที่มีนัยสำคัญทางอุตสาหกรรมได้เป็นอย่างดี เนื่องจากคุณสมบัติของผลึกเหลวนั้นสามารถที่จะนำไปแปรเป็นข้อมูลเชิงปริมาณและข้อมูลที่มีความต่อเนื่องที่จะนำไปสู่การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนสำหรับงานทางด้านการถ่ายเทความร้อนและทำนายพฤติกรรมของการไหลที่มีความหลากหลายและซับซ้อนได้ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนที่ได้รับจากการใช้เทคนิควิธีนี้พบว่ามีความสอดคล้องกับค่าที่ได้จากเทคนิคอื่นๆ และเมื่อนำผลึกเหลวที่นำไปใช้ในกระบวนการถ่ายเทความร้อนในเครื่องอุณหอากาศพลังงานแสงอาทิตย์สามารถใช้วัดการกระจายตัวของอุณหภูมิได้อย่างถูกต้อง โดยท่อทดสอบที่มีการติดตั้งแผ่นกันตรงและแผ่นกันเจาะรูให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อผิวเรียบ เท่ากับ 1.69–2.52 และ 1.47–2.24 เท่า ตามลำดับ โดยการติดตั้งแผ่นกันตรงและแผ่นกันเจาะรู

ให้ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนอยู่ในช่วง 0.75–1.09 และ 0.71–1.04 ตามลำดับ และมีค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนสูงสุดอยู่ที่ 1.09 สำหรับเงื่อนไขของการติดตั้งแผ่นกันตรงที่ค่าเลขเรย์โนลด์ส (Re) เท่ากับ 6,000

8. กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้เขียนขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร (MUT) และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (KMITL) ที่ให้การสนับสนุนในการค้นคว้าวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Baughn JW. Review of passive heat transfer augmentation techniques. J Power Energ. 2004;218(7):509–527.
- [2] Nuntadusit C, Waehahyee M, Bunyajitradulya A, Shakouchi T. Heat transfer enhancement for a swirling jet impingement. The 14th International Symposium on Flow Visualization; 2010 June 21–24; Daegu, Korea. ISFV14; 2010.
- [3] Stasiek JA, Kowalewski TA. Thermochromic liquid crystals applied for heat transfer research. Opto Electron. 2002;10(1):1–10.
- [4] Stasiek J, Stasiek A, Jewartowski M, Collins MW. Liquid crystal thermography and true-color digital image processing. Optics Laser Technol. 2006;38(4):243–256.
- [5] Kanjanaworawanit B. Ink changes color based on temperature. Material Technology; 2017.
- [6] Cukurel B, Selcan C, Arts T. Color theory perception of steady wide band liquid crystal thermometry. Exp Therm Fluid Sci. 2012;39:112–122.
- [7] Lee KC, Yianneskis M. A Liquid crystal thermography technique for the measurement of mixing characteristics in stirred vessels. Trans IChemE. 1997;75(8):746–754.
- [8] OMEGA Engineering. Thermochromic Liquid crystal. INC. One Omega Drive; 2014 [cited 2023 Jan 21]. Available from: <https://www.omega.com>.
- [9] Phattharajarrukul B. Fundamentals of Digital Image Processing. SE-ED Book Center; 2017.
- [10] Tangsrirat W. Sensors and Transducers. TPA Publishing; 2010.
- [11] Ower E, Pankhurst RC. Measurement of Air Flow, 5th edition Pergamon Press (in SI units ed.); 1977.
- [12] ASME MFC-3M. Measurement of Fluid Flow in Pipes Using Orifice, Nozzle, and Venturi. United Engineering Center. New York; 1984.
- [13] Incropera FP, Witt PD, Bergman TL, Lavine AS. Fundamentals of heat and mass transfer. John–Wiley & Sons; 2006.
- [14] Promvong P, Thianpong C. Thermal performance assessment of turbulent channel flows over different shaped ribs. Int. Comm. Heat Mass Transf. 2008;35(10):1327–1334.