ME-NETT23
The 23rd Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand

TSF-028059

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23
4 – 7 พฤศจิกายน 2552 จังหวัดเชียงใหม่

เทคนิคการวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้แผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล

Wall Heat Transfer Measurement Technique Using Thermochromic Liquid Crystal Sheet

มักตาร์ แวหะยี[1] และ ชยุต นันทดุสิต[1*]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ตำบลคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

*ผู้ติดต่อ: E-mail: chayut@me.psu.ac.th, โทร 0-7428-7035, โทรสาร 0-7421-2893

บทคัดย่อ

บทความนี้จะกล่าวถึงวิธีการวัดอุณหภูมิและการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างพื้นผิวและของไหลโดยอาศัยสมบัติการเปลี่ยนสีตามอุณหภูมิของแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล ในบทความจะอธิบายถึงคุณสมบัติของสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล วิธีการใช้สารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลในการวัดอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนโดยวิธีเชิงทัศน์และเชิงปริมาณ วิธีการหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวและจะกล่าวถึงการประยุกต์ใช้เทคนิคนี้ในการศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนในงานวิจัย เช่น การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่พุ่งชนบนพื้นผิว

คำหลัก: เทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล, วิธีเชิงทัศน์, สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

Abstract

The objective of this article is to introduce measurement method of temperature and convective heat transfer coefficient using temperature dependent characteristic of Thermochromic Liquid Crystal (TLC) Sheet. This article describes the property of Thermochromic Liquid Crystal, temperature calibration method, qualitative and quantitative temperature measurement method and convective heat transfer coefficient measurement on a surface. This article also describes example in applying this method to study heat transfer phenomena such as jet impingement on flat surface.

Keywords: Thermochromic Liquid Crystal, Visualization technique, Heat transfer coefficient

1. บทนำ

การวัดอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนมีความสำคัญในการศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อน โดยเฉพาะการวัดค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวหนึ่งๆ เทคนิคการวัดแบบเดิมที่ใช้กันทั่วไปจะเป็นการวัดอุณหภูมิแบบสัมผัสโดยตรงโดยใช้เทอร์โมคัปเปิ้ล หรือใช้เซนเซอร์ฟลักซ์ความร้อน (Heat Flux Gauge) ติดบนผิววัสดุโดยตรงเพื่อวัดอุณหภูมิหรืออัตราการถ่ายเทความร้อน แต่ในกรณีที่ต้องการวัดการกระจายอุณหภูมิหรือการถ่ายเทความร้อนแบบเฉพาะตำแหน่งโดยละเอียดนั้น จำเป็นต้องติดหัววัด (Probe) เป็นจำนวนมากบนพื้นผิวและทำการวัดค่าพร้อมๆ กัน ในกรณีที่บนพื้นผิวมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในบริเวณแคบๆจะไม่สามารถทำการวัดได้โดยละเอียด อีกทั้งวิธีนี้มีการสูญเสียความร้อนโดยการนำความร้อนผ่านสายสัญญาณจากหัววัด ทำให้การวัดค่าอุณหภูมิบนพื้นผิวคลาดเคลื่อนไป และมีผลทำให้การวัดค่าสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนคลาดเคลื่อนไปด้วย

การวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวโดยใช้กล้องอินฟราเรด (Infrared Thermometry) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สะดวก เนื่องจากเป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัสโดยตรง อาศัยการวัดการแผ่รังสีจากผิววัตถุ แต่การใช้งานจำเป็นต้องทราบสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของพื้นผิวที่จะทำการวัดอุณหภูมิเพื่อให้ได้ค่าอุณหภูมิที่แม่นยำและเชื่อถือได้ และในกรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีบนพื้นผิวมีค่าต่ำๆ จะทำให้การวัดคลาดเคลื่อนได้สูง ซึ่งการวัดโดยวิธีนี้จะขึ้นกับสิ่งแวดล้อมในการวัดมาก และในบางกรณีไม่สามารถใช้วิธีนี้ได้ เช่น การวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวที่จมในของเหลว เนื่องจากรังสีอินฟราเรดจากพื้นผิวไม่สามารถผ่านของเหลวได้หมด เหตุผลอีกอย่างคืออุปกรณ์วัดมีราคาค่อนข้างสูง

เทคนิคการวัดอุณหภูมิโดยใช้สารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล (Thermochromic liquid crystals, TLCs) เป็นวิธีการวัดแบบไม่สัมผัสโดยตรง อาศัยคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงสีของสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลซึ่งเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป เทคนิคนี้ได้ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยมากกว่า 30 ปี เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ประหยัด และสะดวกไม่ต้องการอุปกรณ์การวัดที่ซับซ้อน สามารถดูการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวจากสีที่ปรากฏบนพื้นผิวด้วยตาเปล่าได้ และในปัจจุบันมีการพัฒนาของอุปกรณ์บันทึกภาพ เช่น กล้องดิจิตอลที่สามารถบันทึกภาพที่มีความละเอียดสูง และมีโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปเกี่ยวกับการวิเคราะห์ภาพ ทำให้สามารถวัดการกระจายอุณหภูมิและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้สะดวกและแม่นยำมากขึ้น สามารถใช้เทคนิคนี้ในการศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆในงานวิจัยทางด้านการถ่ายเทความร้อน เช่น การระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเลคทรอนิก กังหันแก๊สเทอร์ไบน์ หรือการวัดการให้ความร้อนบนพื้นผิวต่างๆในอุตสาหกรรม เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การใช้วัสดุเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลในการวัดอุณหภูมินั้น จำเป็นต้องเลือกชนิดของเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลให้เหมาะสมกับช่วงอุณหภูมิที่ต้องการวัด และต้องทำการสอบเทียบการเปลี่ยนแปลงสีของเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลที่อุณหภูมิต่างๆ ในบทความนี้จะแนะนำเกี่ยวกับวิธีการใช้เทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลสำหรับการวัดอุณหภูมิและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิว และตัวอย่างการนำไปใช้ในงานวิจัยทางด้านการถ่ายเทความร้อน

2. เทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล

สารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลเป็นสารประกอบจำพวกออแกนิคที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะระหว่างของเหลวและของแข็งตามอุณหภูมิ ในขณะที่สารลิกควิดคริสตอลมีสถานะเป็นของแข็งเมื่อส่องสารนี้ด้วยแสงสีขาวจะพบว่าสารนี้จะมีลักษณะใสไม่มีสี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นถึงจุดหนึ่ง จะเกิดการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงโครงสร้างโมเลกุลภายในสาร ทำให้แสงที่สะท้อนจากสารนี้จะเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นอย่างต่อเนื่อง ปรากฏการณ์การสะท้อนแสงนี้จะเกิดซ้ำในช่วงอุณหภูมิหนึ่งเมื่อมีการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิของสารนี้

สำหรับการเปลี่ยนสีตามอุณหภูมิของสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล เมื่อสารนี้มีอุณหภูมิสูงถึงจุดหนึ่งคือ T_{rs} (rs: red start) จะเริ่มเปลี่ยนจากสารที่ใสไม่มีสีเป็นสีเทา หลังจากนั้นจะเปลี่ยนสีเป็นสีแดง เหลือง และเขียว ตามลำดับ และจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน เมื่ออุณหภูมิถึงอีกจุดหนึ่งคือ T_{bs} (bs: blue start) และหากเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นอีกสีของสารจะเปลี่ยนเป็นสีใสไม่มีสีอีกครั้ง โดยทั่วไปสารเทอร์โมลิควิดคริสตอลจะมีหลายสูตร มีอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิ T_{rs} ตั้งแต่ 30°C ถึง 120°C และช่วงความกว้างอุณหภูมิ (T_{bs}-T_{rs}) ตั้งแต่ 0.5°C ถึง 30°C ขึ้นกับส่วนผสมที่ใช้ผลิต เนื่องจากสารนี้จะอยู่ในรูปของน้ำมันและคุณสมบัติทางอุณหภูมิของสารจะสูญเสียได้ง่ายถ้าถูกปนเปื้อนจากสารเคมีอื่นหรือเมื่อถูกแสงอุลตร้าไวโอเล็ต ดังนั้นในการผลิตสารนี้จะถูกบรรจุในแคปซูล ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 0.005 mm ถึง 0.01 mm อยู่ในรูปของผงบรรจุในแคปซูลขนาดเล็ก หรือของเหลวสำหรับทาบนผิวหรือโพลิเมอร์แบบแผ่นแบนอยู่ในรูปของแผ่นฟิล์มพร้อมติด สามารถใช้วัดอุณหภูมิบนพื้นผิวที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ เช่น พื้นผิวโค้งหรือพื้นผิวไม่เรียบได้ตามต้องการ

3. วิธีการวัดอุณหภูมิ

ในการนำไปประยุกต์ใช้วัดอุณหภูมิ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 การเลือกสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล

สารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามช่วงความกว้างอุณหภูมิที่เปลี่ยนสี คือ ประเภทเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิแคบ(Narrow-band TLC) จะมีการเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิ 1°C -2°C และประเภทเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิกว้าง (Wide-band TLC) จะมีการเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 5°C-20°C การเลือกใช้ประเภทของสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลจะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการใช้งานและช่วงอุณหภูมิที่ต้องการวัด ในการวัดอุณหภูมิที่ต้องการความละเอียดจะใช้สารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลแบบช่วงแคบในกรณีต้องการวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวสามารถใช้สารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลแบบช่วงแคบหลายชนิดผสมกัน (Multi-event narrow-band TLC) หรือใช้สารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลแบบช่วงกว้างแทน ซึ่งสามารถแสดงการกระจายของเส้นอุณหภูมิคงที่หรือเส้นของสีต่างๆ บนพื้นผิวทั้งหมดจากรูปภาพเพียงรูปเดียว

สำหรับสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลประเภทเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิแคบมีข้อดีคือ มีความถูกต้องและความละเอียดในการวัดอุณหภูมิสูงและสะดวกในการแปลงสีเป็นอุณหภูมิ ใช้ระบบประมวลภาพที่ไม่ซับซ้อน แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถใช้ในการวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวที่มีช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่กว้างได้ ในขณะที่สารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลประเภทเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิกว้าง สามารถดูการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวทั้งหมด แต่ต้องใช้ระบบประมวลภาพที่ซับซ้อนเพื่อวัดการกระจายอุณหภูมิแบบเชิงปริมาณที่แม่นยำ

3.2 การสอบเทียบอุณหภูมิ

การสอบเทียบสีกับอุณหภูมิเป็นกระบวนการที่สำคัญที่สุดมีผลต่อความแม่นยำในการวัดอุณหภูมิโดยใช้สารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล สามารถทำได้ 2 วิธี คือวิธีสอบเทียบสีของสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลบนผนังที่มีอุณหภูมิคงที่ (Isotherm) และวิธีสอบเทียบบนผนังที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบนผนัง (Temperature gradient) ที่ทราบอุณหภูมิ

สำหรับวิธีสอบเทียบอุณหภูมิบนผนังที่มีอุณหภูมิคงที่ วิธีนี้จะควบคุมอุณหภูมิบนผิวที่เคลือบสารหรือติดแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลให้คงที่เท่ากันตลอดทั้งแผ่นและใช้กล้องดิจิตอลในการบันทึกสี เพื่อสร้างข้อมูลสอบเทียบระหว่างสีกับอุณหภูมิ การสอบเทียบทำโดยการเพิ่มอุณหภูมิบนผนังจนสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลเริ่มเปลี่ยนสี หลังจากนั้นจะทำการบันทึกอุณหภูมิบนผนังในขณะนั้นและบันทึกภาพของเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล กระบวนการนี้จะทำซ้ำที่อุณหภูมิผนังสูงขึ้นไปจนถึงอุณหภูมิที่เทอร์โม

โครมิคลิควิดคริสตอลเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเข้ม ถึงแม้ขั้นตอนของการสอบเทียบและอุปกรณ์ที่ใช้ไม่ซับซ้อน แต่ต้องใช้เวลาในการสอบเทียบมาก เนื่องจากต้องทำการสอบเทียบข้อมูลเป็นจำนวนมาก เพื่อให้ได้ข้อมูลของสีสำหรับใช้วัดอุณหภูมิเพียงพอ

สำหรับวิธีสอบเทียบบนผนังที่มีการกระจายอุณหภูมิ(Gradient method) วิธีที่นี้จะทำการติดแผ่นหรือเคลือบสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล บนผนังที่มีการกระจายบนอุณหภูมิ เช่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบเชิงเส้นและทราบอุณหภูมิแต่ละจุด วิธีนี้สามารถสอบเทียบอุณหภูมิและสีบนเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลได้อย่างต่อเนื่อง เพราะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและสีบนผนังและของสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลเป็นแบบต่อเนื่อง ทำให้ได้ข้อมูลของการสอบเทียบมากกว่าวิธีแรก และเวลาในการสอบเทียบน้อยกว่า สามารถได้ข้อมูลระหว่างสีกับอุณหภูมิจากการบันทึกภาพเพียงครั้งเดียว

อย่างไรก็ตาม ไม่ว่าใช้การสอบเทียบโดยวิธีใดก็ตาม ระบบบันทึกภาพ เงื่อนไขการให้แสงสว่างและการถ่ายภาพ เช่น มุมการให้แสงและมุมบันทึกภาพ ที่ใช้ในการสอบเทียบสีกับอุณหภูมิ ควรจะใช้เหมือนกับเงื่อนไขที่ใช้งานจริง

3.3 การวัดอุณหภูมิบนพื้นผิว

ในการวัดอุณหภูมิบางครั้งต้องการเพียงแค่อุณหภูมิโดยประมาณเท่านั้น การวัดอุณหภูมิจากสีของแผ่น เทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล สามารถทำได้ด้วยการใช้สายตาเปล่าของมนุษย์ โดยไม่ต้องการอุปกรณ์การวัดอื่นๆ สามารถดูการกระจายและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิบนพื้นผิวจากสีของแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลได้ แต่การใช้สายตาผู้สังเกตในการแยกแยะสีและประมาณค่าอุณหภูมิบนพื้นผิวจะขึ้นกับผู้สังเกตแต่ละคน ทำให้ความน่าเชื่อถือในการวัดน้อยลง

Hoogendoorn [1] ใช้วิธีวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวโดยเทียบสเกลของสีที่ทราบอุณหภูมิกับสี เทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลที่ปรากฏบนพื้นผิวที่วัดอุณหภูมิ ต่อมาได้มีการบันทึกภาพด้วยกล้องและใช้ฟิวเตอร์ในการเลือกสีแทนสายตามนุษย์ ต่อมา Goldstein และ Timmers [2] ทำการบันทึกภาพของเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล โดยใช้กล้องขาวดำและฟิวเตอร์ หลังจากนั้นหาเส้นที่สว่างที่สุดจากภาพที่บันทึกได้ ซึ่งสามารถระบุเส้นอุณหภูมิคงที่ (Isotherm line) จากภาพที่ได้ แต่วิธีที่กล่าวมานี้สามารถใช้ในการหาเส้นอุณหภูมิคงที่ เท่านั้น ยังไม่สามารถวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวทุกจุดได้ ต่อมาได้มีการใช้กล้องบันทึกสีแบบดิจิตอลและเทคนิคการวิเคราะห์ภาพโดยใช้คอมพิวเตอร์ มาช่วยในการเปลี่ยนข้อมูลสีที่ปรากฏเป็นข้อมูลอุณหภูมิแทนการใช้สายตาผู้สังเกต Akino และคณะ [3] ได้ใช้ข้อมูลอุณหภูมิและข้อมูลค่าสีหลักทั้ง 3 ค่าที่ได้จาการสอบเทียบในการสร้างสมการโพลิโนเมียมอันดับที่ 2 เพื่อใช้ในการทำนายการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิว อย่างไรก็ตามวิธีการนิยามนี้ ไม่เหมาะที่จะใช้ในการวัดอุณหภูมิเนื่องจากต้องใช้ค่าสีหลักทั้ง 3 ค่าคือ R-, G-, B- ในการแปลงเป็นอุณหภูมิที่แต่ละจุด (Pixel) บนภาพของเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล ทำให้ยากต่อการประยุกต์ใช้งานจริง ต่อมา Camci [4] ได้พัฒนาวิธีการวัดโดยใช้ค่าของสีเพียงค่าเดียวในการวัดอุณหภูมิ โดยสีที่บันทึกในระบบ RGB จะถูกแปลงให้อยู่ในระบบ HSV และใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสเกลล่าร์ค่าสีหลัก (Hue, H) ในระบบ HSV และอุณหภูมิ (H = H(T)) และใช้ความสัมพันธ์นี้ในการทำนายอุณหภูมิบนพื้นผิว แต่ก็มีข้อควรระวังในการวัดด้วยวิธีนี้คือ คุณภาพของแสงที่ส่องสว่างบนเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล หรือแสงที่ส่องสว่างควรจะเหมือนกันระหว่างที่ใช้ในช่วงสอบเทียบสีและในการทดลองจริง มิฉะนั้นความสัมพันธ์ระหว่างสีกับอุณหภูมิจะเปลี่ยนได้และทำให้อุณหภูมิที่วัดได้คลาดเคลื่อน แต่ในการใช้งานวัดจริงนั้น เงื่อนไขของแสงสว่างจะควบคุมให้เหมือนกันได้ยาก ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการส่องสว่างจำเป็นต้องนำไปพิจารณาด้วย ซึ่ง Farina และคณะ [5] ได้เสนอวิธีการใช้ภาพสีอ้างอิงก่อนการสอบเทียบสีกับอุณหภูมิ

และก่อนการนำไปใช้วัดจริง เพื่อที่จะแก้ไขปัญหานี้ โดยการเทียบระหว่างสองภาพอ้างอิง

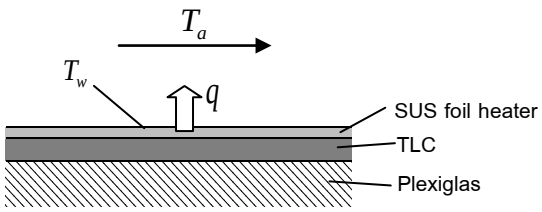
อย่างไรก็ตาม วิธีการวัดที่พัฒนาโดย Camci [4] และ Farina และคณะ [5] ยังคงมีข้อจำกัด คือ อุณหภูมิในช่วงที่มากกว่า T_{bs} ค่าของสีหลัก (H) จะเปลี่ยนแปลงช้ามาก เป็นผลให้ความละเอียดในการวัดอุณหภูมิน้อยลง แม้ว่าสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลเองยังมีการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างชัดเจนอยู่ นอกจากนี้ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า T_{rs} ความผิดพลาดของการวัดค่า R, G, B เพียงเล็กน้อยจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสีหลัก จากเหตุผลเหล่านี้ การใช้สีหลัก (Hue) จึงไม่เหมาะที่จะใช้เป็นปริมาณในการระบุปริมาณสี เพื่อแก้ไขปัญหานี้ Nakabe และคณะ [6] ได้ใช้วิธีการแปลงสีเป็นอุณหภูมิ โดยใช้ 3 สีหลักทั้งหมด R-, G-, B- ที่ได้จากการบันทึกภาพและใช้ Neural Network Algorithm ในการแปลงข้อมูลสีเป็นข้อมูลอุณหภูมิ วิธีนี้สามารถช่วยลดความผิดพลาดจากการวัดได้ โดยเฉพาะในช่วงสีน้ำเงิน แต่ค่อนข้างจะซับซ้อนเมื่อเทียบกับการใช้สีหลักเพียงตัวเดียวในการพิจารณา

4. การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างการใช้วิธีแบบสภาวะคงตัวในกรณีที่ของไหลอุณหภูมิ T_a ไหลผ่าน ในรูปจะใช้แผ่นสเตนเลสแบบบางเป็นพื้นผิวที่จะทำการวัดอุณหภูมิ และให้ความร้อนแก่พื้นผิวโดยผ่านกระแสไฟฟ้า I ผ่านแผ่นสเตนเลสที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้า R ค่าฟลักซ์ความร้อน $\dot{q}$ ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวสามารถคำนวณจากสมการ (1) และอุณหภูมิแต่ละจุดบนพื้นผิว T_w จะวัดจากสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลที่เคลือบบนด้านหลังของแผ่นสเตนเลส สัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวแต่ละจุดสามารถคำนวณได้จากสมการ (2)

$$\dot{q} = \frac{I^2 R}{A} \qquad (1)$$

$$h = \frac{\dot{q}}{T_w - T_a} \qquad (2)$$



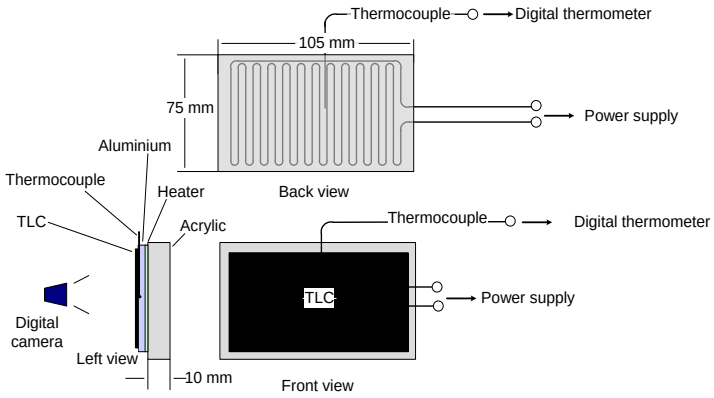
รูปที่ 1 ตัวอย่างการใช้วิธีแบบสภาวะคงตัว

นอกจากนี้วิธีการวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะขึ้นอยู่กับการเลือกใช้ประเภทของสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลเป็นแบบเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิแคบหรือกว้างอีกด้วย สำหรับวิธีการใช้วัดอุณหภูมิบนพื้นผิวที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ทั่วทั้งผิว ในกรณีใช้สารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลที่มีการเปลี่ยนสีในอุณหภูมิแคบจะไม่สามารถวัดการกระจายอุณหภูมิหรือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนทั่วทั้งพื้นผิวได้ ดังนั้นในการวัดจำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงค่าฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวอย่างเป็นระบบและต่อเนื่อง เนื่องจากเทคนิคนี้ต้องการเพียงหนึ่งสีหรือหนึ่งอุณหภูมิที่ได้จากการสอบเทียบเท่านั้น โดยปกติจะใช้เส้นสีเหลือง เพราะมีความสว่างค่อนข้างสูง ในการสร้างการกระจายสัมประสิทธิ์การพาความร้อนทั้งพื้นผิวจำเป็นที่จะต้องใช้ภาพเป็นจำนวนมาก ความละเอียดและความถูกต้องของวิธีการวัดนี้จะขึ้นกับช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนสีของสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลที่ใช้ และความละเอียดของการปลี่ยนแปลงค่าฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิว การใช้สารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลที่เปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิกว้างแทนจะสามารถลดข้อจำกัดนี้ได้ สามารถวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวทั้งหมดจากรูปภาพเพียงรูปเดียวในกรณีที่ช่วงการเปลี่ยนสีของสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลกว้างพอที่จะแสดงสีทั้งหมดบนพื้นผิววัดอุณหภูมิ แต่เพื่อความถูกต้องในการวัดอุณหภูมิ วิธีนี้ต้องการจำนวนจุดที่สอบเทียบจำนวนมาก

5. ตัวอย่างการนำไปใช้งาน

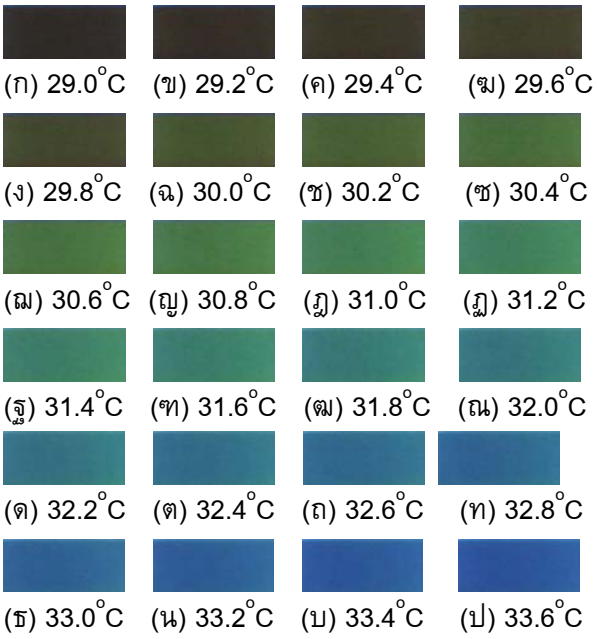
5.1 การสอบเทียบอุณหภูมิ

รูปที่ 2 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการสอบเทียบสี โดยมีแผ่นฮีดเตอร์ติดบนแผ่นพลาสติกใส ขั้วของฮีดเตอร์จะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่สามารถปรับแรงดันและกระแสไฟฟ้าได้ ส่วนด้านหน้าของฮีดเตอร์จะติดแผ่นอะลูมิเนียมบางซึ่งมีหน้าที่รับความร้อนจากฮีดเตอร์และกระจายความร้อนให้ทั่วทั้งแผ่นและด้านหน้าของแผ่นอะลูมิเนียมจะติดแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตอลเพื่อแสดงสีที่อุณหภูมิต่างๆ ส่วนด้านหน้าของชุดทดลองจะติดตั้งกล้องดิจิตอลเพื่อทำการบันทึกภาพการแสดงสีของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตอลด้านหน้าของแผ่นอลูมีเนียมได้เซาะร่องสำหรับติดสายเทอร์โมคับเปิ้ลเพื่อวัดอุณหภูมิ ในการสอบเทียบสีแต่ละครั้งจะกำหนดช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 28°C – 37°C ซึ่งเป็นช่วงที่แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตอลไม่แสดงสีจนถึงแสดงสีน้ำเงินเข้ม

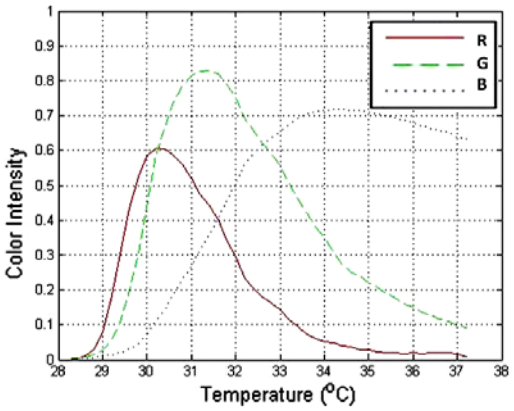


รูปที่ 2 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการสอบเทียบ

รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างผลการสอบเทียบสีของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตอลที่อุณหภูมิต่างๆ สามารถใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์แยกตัวประกอบสี RGB แล้วนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวประกอบสีที่อุณหภูมิต่างๆ ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 4 ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ของเส้นกราฟ R และ G ตัดกันที่อุณหภูมิ 30.2±0.2 °C และที่อุณหภูมิดังกล่าวพบว่าแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตอลมีสีเหลืองตามที่ได้แสดงในรูปที่ 3 (ช) จากนี้จะได้เงื่อนไขเส้นสีเหลืองที่มีส่วนประกอบของสี R ที่มีค่าเท่ากับสี G ที่อุณหภูมิเท่ากับ 30.2 °C เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวต่อไป



รูปที่ 3 ตัวอย่างผลการสอบเทียบ

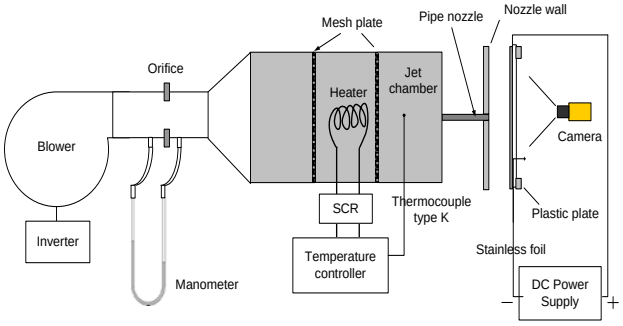


รูปที่ 4 แสดงกราฟการแยกตัวประกอบสีจากแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตอลที่อุณหภูมิต่างๆ

5.2 การหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิว

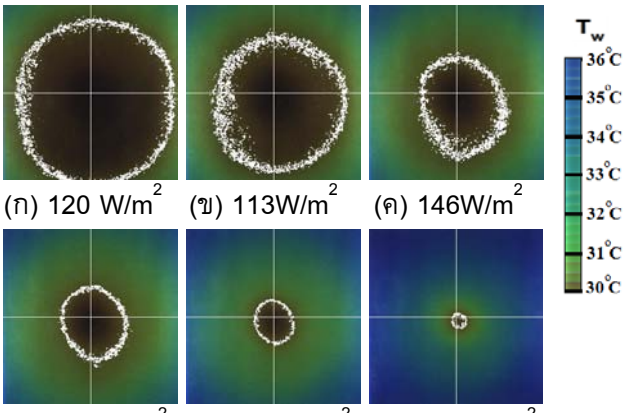
รูปที่ 5 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสำหรับวัดการถ่ายเทความร้อนบนผนังที่เจ็ทพุ่งชนโดยใช้แผ่นเทอร์โมลิควิดครัสตอล ในการทดลองจะใช้เจ็ทอากาศจากหัวฉีดที่เป็นแบบท่อ (Pipe nozzle) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D=16.5 mm พุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิวเรียบ โดยกำหนดระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงผนังที่เจ็ทพุ่งชน L=2D, 4D, 6D, 8D และ10D และค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทคงที่ที่ Re=20,000 เจ็ทอากาศจะถูกส่งจากโบรเวอร์ผ่านชุดของออร์ริฟิส ชุดฮีตเตอร์ ถังกักอากาศ และผ่านไปยังท่อเจ็ท สำหรับผนังที่เจ็ท

พุ่งชนจะใช้แผ่นสเตนเลสแบบบางที่มีความหนา 0.030 mm ขึงให้เรียบตึงกับแผ่นพลาสติก ที่เจาะหน้าต่างขนาด 220 cm x 220 cm ซึ่งที่ปลายของแผ่นสเตนเลสจะยึดด้วยแท่งทองแดงไว้ทั้งสองข้าง และแท่งทองแดงทั้งสองนี้จะต่อเข้ากับขั้วของตัวจ่ายกระแสไฟฟ้า เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านแท่งทองแดงไปยังแผ่นสเตนเลสจะเกิดความร้อนขึ้นทั่วทั้งแผ่นสเตนเลส จากนั้นเจ็ทอากาศที่อุณหภูมิห้องจะไหลชนแผนสเตนเลสเพื่อทำการระบายความร้อนบนพื้นผิว จากนี้สามารถวัดการกระจายของอุณหภูมิบนพื้นผิวจากแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตอลที่ติดด้านหลังของแผ่นสเตนเลส (ด้านตรงข้ามกับที่เจ็ทพุ่งชน) ลักษณะสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตอลจะบันทึกโดยใช้กล้องดิจิตอล

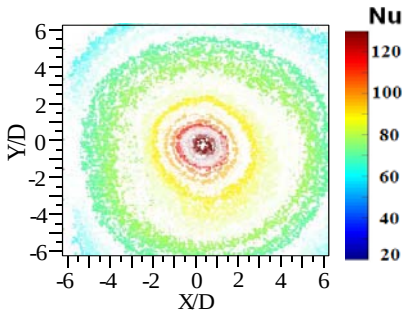


รูปที่ 5 ชุดทดลองสำหรับวัดการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนผนัง

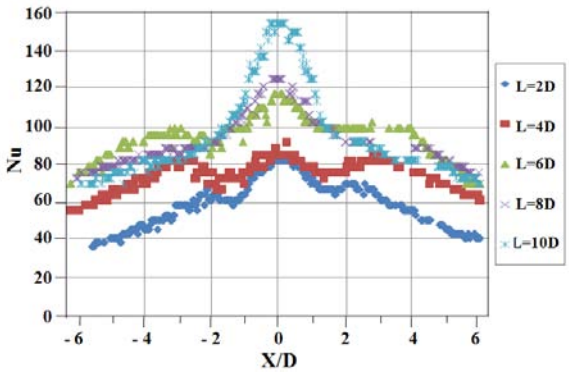
สำหรับการบันทึกภาพสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตอลนั้นเมื่ออุณหภูมิบนผนังเข้าสู่สภาวะคงตัว จากนั้นจะเพิ่มกระแสไฟฟ้าหรือฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิว เมื่อตำแหน่งของเส้นแถบสีเหลือง (เส้นสีที่มีอุณหภูมิเท่ากับ 30.2 °C) เปลี่ยนตำแหน่งจึงทำการบันทึกภาพแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลอีกครั้ง และจะทำการเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าซ้ำอีกจนกระทั่งเส้นแถบสีเหลืองเคลื่อนที่ทั่วทั้งพื้นผิว รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างการกระจายของอุณหภูมิบนพื้นผิวที่ทำการเปลี่ยนค่าฟลักซ์ความร้อนที่ค่าต่างๆ ซึ่งเส้นแถบสีเหลือง(จุดที่แทนด้วยสีขาว) สามารถนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ หากนำรูปภาพที่บันทึกทั้งหมดมาประมวลผลโดยใช้วิธีการประมวลผลภาพในคอมพิวเตอร์แล้วจะได้ข้อมูลการกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวตามที่ได้แสดงในรูปที่ 7 และในรูปที่ 8 แสดงการกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวตามแนวศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนที่ระยะจากปากออกของเจ็ทถึงผนังที่เจ็ทพุ่งชนต่างๆ



รูปที่ 6 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีที่ระยะ L=10D (สีขาวแสดงเส้นที่มีอุณหภูมิเท่ากับ 30.2 °C หรือเส้นสีเหลือง)



รูปที่ 7 แสดงการกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ระยะ L=10D



รูปที่ 8 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน

6. สรุปและข้อเสนอแนะ

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีใช้คุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงสีของแผ่นเทอร์โมลิกควิดคริสตอลในการวัดการกระจายอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว เป็นวิธีที่สะดวกและเหมาะสำหรับใช้ศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว นอกจากนี้หากทำการบันทึกภาพและใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แล้ว จะสามารถหาการกระจายของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวได้ด้วย แต่อย่างไรก็ตามวิธีที่ใช้นี้เป็นแบบวิธีสภาวะคงตัว อาศัยการเลื่อนตำแหน่งของแถบสีเมื่อเปลี่ยนฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวที่ทำการวัดอุณหภูมิ ต้องใช้เวลาในการทดลองและต้องถ่ายภาพเพื่อใช้ในการวิเคราะห์จำนวนมาก และมีข้อจำกัดคือไม่สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนทั่วทั้งพื้นผิวได้ จึงจำเป็นต้องพัฒนาวิธีวัดแบบสภาวะไม่คงตัวที่ต้องใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพที่มีความซับซ้อนมากในการวิเคราะห์ต่อไป

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์เป็นอย่างสูงที่ได้ให้เงินทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Hoogendoorn, C. J. (1977). The effect of turbulence on heat transfer at a stagnation point, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 20, pp. 1333 – 1338.

[2] Goldstein, R. J., Timmers, J. F. (1982). Visualization of heat transfer from arrays of impinging jets, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 25, pp. 1857 – 1868.

[3] Akino, N., Kunugi, T., Ueda, M. and Kurosawa, A. (1988). A study on thermo-camera using liquid crystal (method of multiple regression between color and temperature), *Transactions of JSME, Ser.(B)*, Vol. 54-506, pp.2661-2668.

[4] Camci, C. (1996). Color Recognition for Temperature Measurements on Liquid Crystal Coated Surfaces, *von Karman Institute Lecture series on Temperature Measurements*, VKI-LS-1996-09

[5] Farina, D. J., Hacker, J. M., Moffat, R. J., Eaton, J. K. (1994). Illuminant invariant calibration of thermochromic liquid crystals. *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 9, pp.1 – 12

[6] Nakabe, K., Higashio, A., Chen, W., Suzuki, K. (1998) An experimental study on the flow and heat transfer characteristics of longitudinal vortices induced by an inclined impinging jet into a crossflow (Measurement of heat transfer coefficient using thermochromic liquid crystals), paper presented in *11th* International Heat Transfer conference, Kyongju, Korea