รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประยุกต์ใช้แผ่นเทอร์โมลิกควิดคริสตัลสำหรับวัดอุณหภูมิและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิว

ดร. ชยุต นันทดุสิต

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย จากเงินรายได้
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ประจำปีงบประมาณ 2548

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการวัดค่าอุณหภูมิและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวโดยอาศัยคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงสีตามอุณหภูมิของสารเทอร์โมลิกควิดคริสตอล ในส่วนแรกของงานวิจัยได้ทำการทดลองสอบเทียบแผ่นเทอร์โมลิกควิดคริสตอนที่อุณหภูมิต่างๆ โดยติดแผ่นเทอร์โมลิกควิดคริสตอนบนผิวของถังน้ำสำหรับสอบเทียบ อุณหภูมิบนผิวของถังน้ำนี้สามารถปรับโดยการควบคุมอุณหภูมิของน้ำในถังซึ่งจะควบคุมโดยฮีทเตอร์และตัวควบคุมอุณหภูมิ สีของแผ่นเทอร์โมลิกควิดคริสตอลที่อุณหภูมิต่างๆจะถูกบันทึกโดยใช้กล้องดิจิตอล หลังจากนั้นภาพที่บันทึกทั้งหมดจะถูกนำมาวิเคราะห์ภาพโดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อหาค่าสีเฉลี่ยในระบบสี RGB และระบบสี HSV แล้วนำไปสร้างสมการสำหรับทำนายอุณหภูมิจากค่าสีต่อไป ในส่วนที่สองของการวิจัยได้ทำการพัฒนาวิธีการวัดค่าการกระจายของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรม MATLAB และได้ไปประยุกต์ใช้วัดการกระจายของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทอากาศพุ่งชนเพื่อระบายความร้อนบนพื้นผิว พบว่าเทอร์โมลิกควิดคริสตอลเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพ สามารถใช้ศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้ดี ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสามารถสังเกตดูได้ด้วยตาเปล่า และหากใช้ร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์ภาพแล้วจะสามารถหาการกระจายของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้

Abstract

The objective of this study was to develop method for temperature and convective heat transfer coefficient measurement using thermo-liquid crystal sheet which changes color with temperature. In the first part, thermo-liquid crystal sheet was calibrated at different temperatures. The thermo-liquid crystal sheet was attached on surface of water tank. The temperature on the water tank surface was adjusted by water temperature in water tank which controlled by heater with temperature controller. The color on thermo-liquid crystal sheet was recorded by digital camera at different wall temperature. The collected images were then analyzed by MATLAB program for averaged data in RGB and HSV color system. As a result, the correlation equation for prediction temperature can be derived. In the second part, the heat transfer coefficient measurement method was developed by using image processing techniques with MATLAB program. This method was applied to determine distribution of heat transfer coefficient on a wall which was cooled by an impinging jet. It was ascertained that thermo-liquid crystal sheet is effective tool for studying heat transfer phenomena. The pattern of heat transfer distribution can be visualized by human eye. In an addition, the distribution of heat transfer coefficient can be obtained when using with image processing technique.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 เทอร์โมลิควิดคริสตัล	3
2.2 วิธีการวัดอุณหภูมิ	3
2.2.1 การเลือกสารเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัล	4
2.2.2 การสอบเทียบอุณหภูมิ	4
2.2.3 การวัดอุณหภูมิบนพื้นผิว	5
2.3 การวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อน	6
2.4 การประมวลผลภาพดิจิตอล	9
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	10
3.1 การสอบเทียบอุณหภูมิของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล	10
3.2 ตัวอย่างการนำไปใช้วัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิว	11
บทที่ 4 ผลการทดลอง	14
4.1 ผลการสอบเทียบอุณหภูมิของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล	14
4.2 ผลการวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิว	18
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	25
บรรณานุกรม	26

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

การวัดอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนมีความสำคัญในการศึกษาวิจัยทางด้านการไหลและการถ่ายเทความร้อน โดยเฉพาะการวัดค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน ซึ่งมีความสำคัญมากในการคำนวณและออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน แต่การวัดนั้นมีความยุ่งยาก เทคนิคการวัดแบบเดิมที่ใช้กันแพร่หลาย ได้แก่ การวัดอุณหภูมิแบบสัมผัสโดยตรงโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล เทอร์มิสเตอร์ หรือเทอร์โมมิเตอร์แบบรีซิสแตนท์ติดบนผิววัสดุ หรือใช้เกจวัดฟลักซ์ความร้อน (Heat Flux Gauge) ติดบนผิววัสดุโดยตรงเพื่อวัดการถ่ายเทความร้อน แต่ในกรณีที่ต้องการวัดค่าแบบเฉพาะตำแหน่งโดยละเอียดนั้น จำเป็นต้องติดหัววัด (Probe) เป็นจำนวนมากบนพื้นผิวและทำการวัดอุณหภูมิหรือการถ่ายเทความร้อนพร้อมๆ กัน ซึ่งในบริเวณแคบๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วนั้น ไม่สามารถทำการวัดได้โดยละเอียด อีกทั้งมีการสูญเสียความร้อนโดยการนำความร้อนผ่านสายสัญญาณจากหัววัด ทำให้การค่าวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวคลาดเคลื่อนไป และมีผลทำให้การวัดค่าสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนคลาดเคลื่อนไปด้วย

ในปัจจุบันการวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวนั้น นิยมใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบรังสีอินฟราเรด (Infrared Thermometry) แทนการวัดแบบสัมผัสโดยตรงแบบเดิม เนื่องจากเป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัสโดยตรง ทำให้สามารถวัดการกระจายของอุณหภูมิบนพื้นผิวได้สะดวก แต่เนื่องจากการวัดอุณหภูมินั้นอาศัยการวัดการแผ่รังสีจากผิววัตถุ จำเป็นต้องทราบสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของพื้นผิวที่จะทำการวัดอุณหภูมิเพื่อให้ได้ค่าอุณหภูมิที่แม่นยำและเชื่อถือได้ และในกรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีบนพื้นผิวมีค่าต่ำๆ จะทำให้การวัดคลาดเคลื่อนได้สูง ซึ่งการวัดโดยวิธีนี้จะขึ้นกับสิ่งแวดล้อมในการวัดมาก ยกตัวอย่างเช่น การวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวที่จมในของเหลว เนื่องจากรังสีอินฟราเรดจากพื้นผิวไม่สามารถผ่านของเหลวได้หมด เหตุผลอีกอย่างที่จำกัดการใช้งานวิธีนี้ คือ อุปกรณ์วัดมีราคาค่อนข้างสูง

เทคนิคการวัดอุณหภูมิโดยใช้สารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัล (Thermochromic Liquid Crystal, TLC) เป็นวิธีการวัดแบบไม่สัมผัสโดยตรงอีกวิธีหนึ่ง โดยเทคนิคนี้อาศัยคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงสีของลิกควิดคริสตอลซึ่งเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป เมื่ออุณหภูมิเริ่มสูงขึ้น วัสดุนี้จะเริ่มเปลี่ยนจากใสไม่มีสีเป็นสีเทา สีแดง สีเหลือง สีเขียว และสีน้ำเงิน ตามลำดับหลังจากนั้นจะเริ่มเปลี่ยนเป็นใสไม่มีสีอีกครั้ง โดยทั่วไปวัสดุเทอร์โมลิกควิดคริสตอลนี้มีการผลิตขายอยู่ในรูปของเม็ดผง สีทา และแผ่นฟิลม์พร้อมติด โดยมีคุณสมบัติเริ่มเปลี่ยนสีตั้งแต่อุณหภูมิ 30°C ถึง 120°C และมีความกว้างของช่วงอุณหภูมิที่เปลี่ยนสีตั้งแต่ 0.5°C ถึง 30°C (บริษัท Hallcrest, Inc.) ขึ้นกับวัสดุที่ใช้ผลิต เนื่องจากวัสดุประเภทนี้มีราคาถูก ใช้ได้นาน โดยที่คุณสมบัติการเปลี่ยนสีไม่เปลี่ยนแปลง และในการวัดอุณหภูมินั้นไม่ต้องการอุปกรณ์หรือเครื่องวัดที่ซับซ้อน เพียงแต่เคลือบหรือติดวัสดุเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัลบนพื้นผิวที่จะทำการวัดเท่านั้น สามารถวัดอุณหภูมิเป็นจุดหรือวัดการกระจายของอุณหภูมิบนพื้นที่หนึ่งๆ ได้จากการสังเกตลักษณะของการเปลี่ยนแปลงสีที่ปรากฏบนเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัลได้ด้วยตาเปล่า นอกจากนั้นสามารถใช้วัดอุณหภูมิบนพื้นผิวที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ เช่น พื้นผิวโค้งหรือพื้นผิวไม่เรียบได้ตามต้องการ

เทคนิคการใช้สารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัลในการวัดอุณหภูมิได้ถูกพัฒนาและนำมาใช้ในงานวิจัยมากกว่า 30 ปีแล้ว เนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีต้นทุนประหยัดและสะดวก เมื่อเทียบกับวิธีการวัดอื่นๆ เนื่องจากสามารถวัดและดูการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวจากสีที่ปรากฏบนพื้นผิวด้วยตาเปล่าได้ ได้ถูกนำมาใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆในงานวิจัยทางด้านการถ่ายเทความร้อน และใช้วัดอุณหภูมิในงาน เช่น การระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเลคโทรนิก การให้ความร้อนบนพื้นผิวต่างๆในอุตสาหกรรม และในปัจจุบันเนื่องจากการพัฒนาของคอมพิวเตอร์ อุปกรณ์บันทึกภาพ เช่น กล้องดิจิตอลที่สามารถบันทึกภาพที่มีความละเอียดสูง และโปรแกรมเกี่ยวกับการวิเคราะห์ภาพ ทำให้สามารถวัดอุณหภูมิหรือการถ่ายเทความร้อนได้สะดวกและแม่นยำมากขึ้น จึงมีการใช้วิธีการนี้ในงานวิจัยรวมถึงงานอุตสาหกรรมมากขึ้น

อย่างไรก็ตาม ในการวัดอุณหภูมินั้น จำเป็นต้องเลือกชนิดของเทอร์โมลิกควิดคริสตอลให้เหมาะสมกับช่วงอุณหภูมิที่ต้องการวัด และเนื่องจากเป็นการวัดอุณหภูมินั้นเป็นลักษณะเชิงทัศน์ ใช้สายตาผู้สังเกตในการแยกแยะสีและประมาณค่าอุณหภูมิบนพื้นผิวที่ทำการวัด เนื่องจากอุณหภูมิที่วัดขึ้นกับสายตาผู้สังเกต ทำให้ความน่าเชื่อถือในการวัดน้อยลง และไม่สามารถวัดอุณหภูมิอย่างละเอียด ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จะทำการพัฒนาวิธีการวัดอุณหภูมิจากแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัล โดยจะใช้กล้องดิจิตอลบันทึกภาพและใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพเพื่อเปลี่ยนข้อมูลสีที่ปรากฏเป็นข้อมูลอุณหภูมิแทนการใช้สายตาผู้สังเกตในการแยกแยะสีและประมาณค่าอุณหภูมิและประยุกต์ใช้ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนบนพื้นผิว

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. สร้างชุดอุปกรณ์การทดลองเพื่อหาคุณสมบัติทางอุณหภูมิของแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัล
2. พัฒนาวิธีการวัดอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนที่มีทั้งความละเอียดและแม่นยำ โดยอาศัยคุณสมบัติทางอุณหภูมิของแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัล
3. นำวิธีการวัดอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนที่พัฒนาขึ้นมานี้ มาใช้ในงานวิจัยทางด้านการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะใช้แผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัลที่มีช่วงอุณหภูมิที่เปลี่ยนสีระหว่าง 30°C ถึง 36°C โดยจะหาคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงสี และใช้คุณสมบัตินี้ในการวัดอุณหภูมิและค่าสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนบนพื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เครื่องมือสำหรับการวัดอุณหภูมิและสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนที่สะดวกและต้นทุนต่ำ
2. ได้เทคโนโลยีที่สามารถรองรับการพัฒนางานวิจัยทางด้านการศึกษาปรากฏการณ์ทางด้านการพาความร้อนภายในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
3. สามารถใช้เทคนิคนี้ในการพัฒนาหรือออกแบบอุปกรณ์หรือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทอร์โมลิควิดคริสตัล

โดยทั่วไปแล้ว สารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัล (Thermochromic liquid crystals, TLCs) จะเป็นสารประกอบจำพวกออแกนิคภายใต้สภาวะหนึ่งที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะระหว่างของเหลวและของแข็งตามอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิหนึ่งในขณะที่สารลิกควิดคริสตัลมีสถานะเป็นของแข็ง เมื่อส่องสารนี้ด้วยแสงสีขาวจะพบว่าสารนี้จะมีลักษณะใสไม่มีสี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นถึงจุดหนึ่ง สารนี้จะสะท้อนแสงออกมาด้วยความยาวคลื่นที่สามารถมองเห็นเป็นสีต่างๆ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนเลยช่วงที่สามารถเห็นแสงสะท้อนเป็นสีแล้ว สารนี้จะเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวและจะใสไม่มีสีอีกครั้ง ปรากฏการณ์การสะท้อนแสงนี้จะเกิดซ้ำในช่วงอุณหภูมิหนึ่งเมื่อมีการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิของสารนี้ ปรากฏการณ์นี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงโครงสร้างโมเลกุลภายในสาร ทำให้แสงที่สะท้อนจากสารนี้จะเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นอย่างต่อเนื่องจากช่วงความยาวคลื่นยาว (แสงสีแดง) จนถึงช่วงความยาวคลื่นสั้น (แสงสีน้ำเงิน) ในช่วงการเพิ่มอุณหภูมิจากค่าหนึ่งไปยังอีกค่าหนึ่งซึ่งเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนสี

สำหรับการเปลี่ยนสีตามอุณหภูมิของสารเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัล เมื่อสารนี้มีอุณหภูมิสูงถึงจุดหนึ่งคือ T_{rs} (rs: red start) จะเริ่มเปลี่ยนจากสารที่ใสไม่มีสีเป็นสีเทา หลังจากนั้นจะเปลี่ยนสีเป็นสีแดง เหลือง และเขียวตามลำดับ และจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน เมื่ออุณหภูมิถึงอีกจุดหนึ่งคือ T_{bs} (bs: blue start) และหากเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นอีกสีของสารจะเปลี่ยนเป็นสีใสไม่มีสีอีกครั้ง ตัวอย่างเช่น R35C5W เป็นสูตรของสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัลที่จะเริ่มเปลี่ยนเป็นสีแดงที่อุณหภูมิ 35°C และจะเริ่มเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนเป็นสีแดง 5°C นั่นคือ 40°C โดยทั่วไปสารเทอร์โมลิควิดคริสตัลจะหลายสูตรมีอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิ T_{rs} ตั้งแต่ 30°C ถึง 120°C และช่วงความกว้างอุณหภูมิ (T_{bs}-T_{rs}) ตั้งแต่ 0.5°C ถึง 30°C ขึ้นกับส่วนผสมที่ใช้ผลิต นอกจากนี้สามารถแบ่งประเภทสารตามช่วงความกว้างอุณหภูมิที่เปลี่ยนสีได้ 2 ประเภท คือ สูตรสารเทอร์โมลิควิดคริสตัลแบบช่วงแคบ (Narrow-band TLC) จะมีการเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิ 1 °C -2°C และสูตรสารเทอร์โมลิควิดคริสตัลแบบช่วงกว้าง (Wide-band TLC) จะมีการเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 5 °C -20°C

เนื่องจากสารนี้จะอยู่ในรูปของน้ำมันและคุณสมบัติทางอุณหภูมิของสารจะสูญเสียได้ง่ายถ้าถูกปนเปื้อนจากสารเคมีอื่นหรือเมื่อโดนแสงอุลตร้าไวโอเล็ต ดังนั้นในการผลิตสารนี้จะถูกบรรจุในแคปซูล ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 0.005 mm ถึง 0.01 mm อยู่ในรูปของผงบรรจุในแคปซูลขนาดเล็ก หรือของเหลวสำหรับทาบนผิวหรือโพลิเมอร์แบบแผ่นแบนอยู่ในรูปของแผ่นฟิลม์พร้อมติด สามารถใช้วัดอุณหภูมิบนพื้นผิวที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ เช่น พื้นผิวโค้งหรือพื้นผิวไม่เรียบได้ตามต้องการ

2.2 วิธีการวัดอุณหภูมิ

ในการนำเทคนิคนี้ไปใช้ในการวัดอุณหภูมิ มีขั้นตอนหลักในการใช้ดังต่อไปนี้

(1) เลือกสารเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัล ให้ครอบคลุมช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน

(2) เคลือบสารเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัลหรือติดแผ่นเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัลบนพื้นผิวที่ทำการวัดอุณหภูมิ

(3) สอบเทียบอุณหภูมิของสารเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัล

(4) การแปลงข้อมูลสีที่ปรากฏบนสารเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัลเป็นข้อมูลการกระจายอุณหภูมิ

2.2.1 การเลือกสารเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัล

เนื่องจากสารเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัลที่มีใช้อยู่ทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิแคบ และประเภทเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิกว้าง การเลือกใช้ประเภทของสารเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัลจะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการใช้งานและช่วงอุณหภูมิที่ต้องการวัด ในการวัดอุณหภูมิที่ต้องการความละเอียด ส่วนใหญ่จะใช้สารเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัลแบบช่วงแคบ สามารถใช้ในการตรวจสอบการกระจายบนพื้นผิวว่ามีอุณหภูมิสม่ำเสมอหรือไม่ และมีความแม่นยำเพียงพอต่อการใช้วัดอุณหภูมิ แต่อย่างไรก็ตาม ในกรณีต้องการหาการกระจายของเส้นอุณหภูมิคงที่ (Isotherm line) บนพื้นผิวที่วัดอุณหภูมินั้นสามารถทำได้โดยใช้เส้นสีจากสารเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัลแบบช่วงแคบหลายชนิดผสมกัน (Multi-event narrow-band TLC) หรือใช้สารเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัลแบบช่วงกว้างแทน ซึ่งสามารถแสดงการกระจายของเส้นอุณหภูมิคงที่หรือเส้นของสีต่างๆ บนพื้นผิวทั้งหมดจากรูปภาพเพียงรูปเดียว สามารถใช้วัดอุณหภูมิบนพื้นผิวมีช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่กว้าง หรือเมื่อการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวมีความแตกต่างที่ชัดเจน อย่างไรก็ตาม ความถูกต้องและความละเอียดในการวัดอุณหภูมิของสารเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัลแบบช่วงกว้างจะขึ้นอยู่กับการสอบเทียบระหว่างสีกับอุณหภูมิ

สำหรับข้อดีข้อเสียของสารเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัลประเภทเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิแคบและช่วงอุณหภูมิกว้าง สามารถสรุปได้ดังนี้ ในกรณีแบบเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิแคบ มีข้อดีคือความถูกต้องและความละเอียดในการวัดอุณหภูมิสูง และสะดวกในการแปลงสีเป็นอุณหภูมิ ใช้ระบบประมวลภาพที่ไม่ซับซ้อน แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถใช้ในการวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวทั้งหมดได้ และไม่สามารถดูรูปแบบการกระจายของเส้นอุณหภูมิคงที่บนพื้นผิวได้ ในขณะที่กรณีแบบเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิกว้าง สามารถดูเส้นอุณหภูมิคงที่บนพื้นผิวทั้งหมดจากรูปภาพเพียงรูปเดียว และสามารถใช้วัดอุณหภูมิบนพื้นผิวที่มีช่องการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่กว้าง ซึ่งต้องการรายละเอียดสูง แต่ต้องใช้ระบบประมวลภาพที่ซับซ้อนเพื่อวัดการกระจายอุณหภูมิแบบละเอียด

2.2.2 การสอบเทียบอุณหภูมิ

การสอบเทียบสีกับอุณหภูมิสามารถทำได้ 2 วิธี คือวิธีสอบเทียบสีของสารเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัลบนผนังที่มีอุณหภูมิคงที่ (Isotherm) และวิธีสอบเทียบบนผนังที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบนผนัง (Temperature gradient) ที่ทราบอุณหภูมิ

สำหรับวิธีสอบเทียบอุณหภูมิบนผนังที่มีอุณหภูมิคงที่ วิธีนี้จะควบคุมอุณหภูมิบนผิวที่เคลือบสารหรือติดแผ่นเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัลให้คงที่เท่ากันตลอดทั้งแผ่นและใช้กล้องดิจิตอลในการบันทึกสี เพื่อสร้างข้อมูลสอบเทียบระหว่างสีกับอุณหภูมิ การสอบเทียบทำโดยการเพิ่มอุณหภูมิบนผนังจนสารเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัลเริ่มเปลี่ยนสี หลังจากนั้นจะทำการบันทึกอุณหภูมิบนผนังในขณะนั้นและบันทึกภาพของเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัล เพื่อทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของสีบนแผ่นเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัล ต่อไป กระบวนการนี้จะทำซ้ำที่อุณหภูมิผนังสูงขึ้นไปจนถึงอุณหภูมิที่เทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัล เปลี่ยนเป็นสีใสหรือไม่เปลี่ยนสี ถึงแม้ขั้นตอน

ของการสอบเทียบและอุปกรณ์ที่ใช้ไม่ซับซ้อน แต่ต้องใช้เวลาในการสอบเทียบมาก เนื่องจากต้องทำการสอบเทียบข้อมูลเป็นจำนวนมาก เพื่อให้ได้ข้อมูลความละเอียดของสีสำหรับใช้วัดอุณหภูมิเพียงพอ

สำหรับวิธีสอบเทียบบนผนังที่ทราบความกระจายอุณหภูมิ(Gradient method) วิธีที่นี้จะทำการติดแผ่นหรือเคลือบสารเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัล บนผนังที่มีการกระจายบนอุณหภูมิ เช่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบเชิงเส้นและทราบอุณหภูมิแต่ละจุด วิธีนี้สามารถสอบเทียบอุณหภูมิและสีบนเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัล ได้อย่างต่อเนื่องเพราะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและสีบนผนังและของสารเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัล เป็นแบบต่อเนื่อง ทำให้ได้ข้อมูลของการสอบเทียบมากกว่าวิธีแรก และเวลาในการสอบเทียบน้อยกว่า สามารถได้ข้อมูลระหว่างสีกับอุณหภูมิจากการบันทึกภาพเพียงครั้งเดียว

อย่างไรก็ตาม ไม่ว่าการสอบเทียบโดยใช้วิธีใดก็ตาม ระบบบันทึกภาพ เงื่อนไขการให้แสงสว่างและการถ่ายภาพ เช่น มุมการให้แสงและมุมบันทึกภาพ ที่ใช้ในการสอบเทียบสีกับอุณหภูมิ ควรจะใช้เหมือนกับที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิ

2.2.3 การวัดอุณหภูมิบนพื้นผิว

ในการวัดอุณหภูมิบางครั้งต้องการเพียงแค่อุณหภูมิโดยประมาณเท่านั้น การวัดอุณหภูมิจากสีของแผ่นเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัล สามารถทำได้ด้วยการใช้สายตาเปล่าของมนุษย์ โดยไม่ต้องการอุปกรณ์การวัดอื่นๆ สามารถดูการกระจายและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิบนพื้นผิวจากสีของแผ่นเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัลได้ แต่การใช้สายตาผู้สังเกตในการแยกแยะสีและประมาณค่าอุณหภูมิบนพื้นผิวที่ทำการวัดจะขึ้นกับผู้สังเกต ทำให้ความน่าเชื่อถือในการวัดน้อยลง

สำหรับการวัดอุณหภูมิเชิงปริมาณสามารถทำได้โดยการใช้ระบบกล้องบันทึกภาพแบบดิจิตอลแทนการมองภาพของสายตามนุษย์ ซึ่งการแปลงข้อมูลสีเป็นข้อมูลอุณหภูมินั้นเป็นหัวใจสำคัญที่สุดของการวัดอุณหภูมิโดยใช้สารเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัล แต่เนื่องจากสีเป็นสิ่งที่ยากต่อการวัดเป็นปริมาณ ดังนั้นระบบการวัดสีจึงได้เรียนแบบระบบการมองเห็นของมนุษย์ โดยใช้ 3 สีหลัก คือ แดง (R) เขียว (G) และน้ำเงิน (B) ภาพที่บันทึกจากกล้องดิจิตอลจะประกอบไปด้วยจุดภาพ (Pixels) หลายจุด ซึ่งสีในแต่ละจุดภาพจะระบุโดยส่วนประกอบของสี 3 สีหลัก คือ R, G, B แสดงในรูปของเวคเตอร์สีเพื่อใช้นิยามสีต่างๆ ในที่นี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการแปลงสีของสาร TLC เป็นอุณหภูมิ แต่ละงานวิจัยใช้เทคนิคต่างกันในการวัดอุณหภูมิ

Hoogendoorn (1977) ใช้วิธีวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวโดยเทียบสเกลของสีที่ทราบอุณหภูมิกับสีเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัลที่ปรากฏบนพื้นผิวที่วัดอุณหภูมิ ต่อมาได้มีการบันทึกภาพด้วยกล้องและใช้ฟิวเตอร์ในการเลือกสีแทนสายตามนุษย์ ต่อมา Goldstein และ Timmers (1982) ทำการบันทึกภาพของเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัล โดยใช้กล้องขาวดำ หลังจากนั้นหาเส้นที่สว่างที่สุดจากภาพที่บันทึกได้ ซึ่งสามารถระบุเส้นอุณหภูมิคงที่ (Isotherm line) จากภาพที่ได้ Baughn และ Shimizu (1989) ใช้ฟิวเตอร์เลือกความยาวคลื่นแสงในการหาเส้นที่สว่างที่สุด (ให้เฉพาะความยาวคลื่นแสงผ่าน) แต่อย่างไรก็ตาม วิธีที่กล่าวมานี้ สามารถใช้ในการหาเส้นอุณหภูมิคงที่เท่านั้น แต่ยังไม่สามารถวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวทุกจุดได้ ต่อมาได้มีการใช้กล้องบันทึกสีแบบดิจิตอลและเทคนิคการวิเคราะห์ภาพโดยใช้คอมพิวเตอร์ มาช่วยในการเปลี่ยนข้อมูลสีที่ปรากฏเป็นข้อมูลอุณหภูมิ แทนการใช้สายตาผู้สังเกตในการแยกแยะเป็น 3 สีหลัก คือ R, G, B อย่างไรก็ตามวิธีการนิยามนี้ ไม่เหมาะที่จะใช้ในการวัด

อุณหภูมิเนื่องจากต้องใช้ค่าสีหลักทั้ง 3 ค่า ในการแปลงเป็นอุณหภูมิที่แต่ละจุดบนภาพของเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัลทำให้ยากต่อการประยุกต์ใช้งานจริง ต่อมา Camci (1994)ได้พัฒนาวิธีการวัดโดยใช้ค่าของสีเพียงค่าเดียวในการวัดอุณหภูมิ โดยสีที่บันทึกในระบบ RGB จะถูกแปลงให้อยู่ในระบบ HSV และใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสเกลล่าร์ค่าสีหลัก (Hue, H) ในระบบ HSV และอุณหภูมิ (H = H(T)) และใช้ความสัมพันธ์นี้ในการหาสนามอุณหภูมิบนพื้นผิว ข้อควรระวังในการวัดด้วยวิธีนี้คือ คุณภาพของแสงที่ส่องสว่างบนเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัลหรือแสงที่ส่องสว่างควรจะเหมือนกันระหว่างที่ใช้ในช่วงสอบเทียบสีและในการทดลองจริง มิฉะนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างสีกับอุณหภูมิจะเปลี่ยนได้และทำให้อุณหภูมิที่วัดได้คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง อย่างไรก็ตามในการวัดจริงๆ นั้น เงื่อนไขของแสงสว่างจะควบคุมให้เหมือนกันได้ยาก ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการส่องสว่างจำเป็นต้องนำไปพิจารณาด้วยในการวัดด้วยวิธีนี้ ซึ่ง Farina และคณะ (1994) ได้เสนอวิธีการใช้ภาพสีอ้างอิงก่อนการสอบเทียบสีกับอุณหภูมิ และก่อนการนำไปใช้วัดจริง เพื่อที่จะแก้ไขปัญหานี้ โดยการเทียบระหว่างสองภาพอ้างอิง

อย่างไรก็ตาม วิธีการวัดที่พัฒนาโดย Camci (1994) และ Farina และคณะ(1994) มีข้อเสีย คือ อุณหภูมิในช่วงที่มากกว่า T_{bs} ค่าของ Hue (H) จะเปลี่ยนแปลงช้ามาก เป็นผลให้ความละเอียดในการวัดอุณหภูมิน้อยลง แม้ว่าสารเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัลเองยังมีการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างชัดเจนอยู่ และอุณหภูมิอยู่ในช่วงต่ำกว่า T_{bs} ความผิดพลาดของการวัดค่า R, G, B เพียงเล็กน้อยจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า Hue และค่า Hue ไม่แน่นอนในช่วงอุณหภูมิต่ำ และความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและ Hue (H = H(T)) เปลี่ยนแปลงไม่ต่อเนื่องในบางครั้งเนื่องจากค่า Hue คือ ค่าของมุมในการระบุสี (Color Space) และความไม่ต่อเนื่องนี้จะเกิดเมื่อมุมของสีนี้เกิน 360°C

จากเหตุผลเหล่านี้ การใช้สีหลัก (Hue) จึงไม่เหมาะที่จะใช้เป็นปริมาณในการระบุปริมาณสี เพื่อแก้ไขปัญหานี้ Nakabe และคณะ (1998) ได้ใช้วิธีการแปลงสีเป็นอุณหภูมิ โดยใช้ 3 สีหลักทั้งหมด R, G, B ที่ได้จากการบันทึกภาพและใช้ Neural Network Algorithm ในการแปลงข้อมูลสีเป็นข้อมูลอุณหภูมิ วิธีนี้สามารถช่วยลดความผิดพลาดจากการวัดได้ โดยเฉพาะในช่วงสีน้ำเงิน แต่ค่อนข้างจะซับซ้อนเมื่อเทียบกับการใช้ Hue ตัวเดียวในการพิจารณา นอกจากนี้การใช้ Neural Network Algorithm ค่อนข้างยุ่งยากและไม่สามารถอธิบายเหตุผลทางกายภาพได้ในการแปลงสีเป็นอุณหภูมิ

2.3 การวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

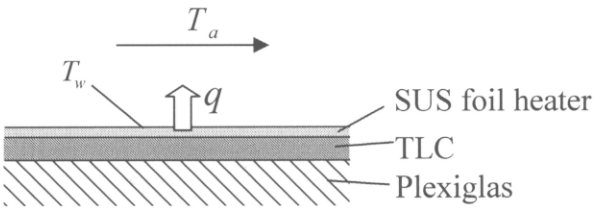
วิธีการวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิว สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีหลักตามเงื่อนไขของกระบวนการวัด คือ วิธีแบบสภาวะคงตัว (Steady state) และวิธีแบบสภาวะไม่คงตัว (Unsteady state หรือ Transient technique) แต่ละวิธีจะใช้สารเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัลในการวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวที่ แล้วจึงคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

วิธีแบบสภาวะคงตัวจะใช้แผ่นฮีตเตอร์เป็นตัวให้ความร้อน เพื่อให้ฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวคงที่ทั่วทั้งพื้นผิวอย่างสม่ำเสมอ และใช้สารเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัลเคลือบบนพื้นผิวสำหรับอุณหภูมิ เมื่อการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวอยู่ในสภาวะคงตัว รูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างพื้นผิวที่ใช้วิธีแบบสภาวะคงตัวในกรณีที่ของไหลอุณหภูมิ T_a ไหลผ่าน ในรูปจะใช้แผ่นสเตนเลสแบบบางเป็นพื้นผิวที่จะทำการวัดอุณหภูมิ และให้ความร้อนแก่พื้นผิวโดยการผ่านกระแสไฟฟ้า I ผ่านแผ่นสเตนเลสที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้า R สามารถคำนวณจากค่าฟลักซ์ความร้อน q ที่ให้แก่พื้นผิวที่วัดจากสมการ (2.1) และอุณหภูมิแต่ละจุดบนพื้นผิว T_w จะวัดโดยการเคลือบสารเทอร์

โมโครมิคลิควิดคริสตัลบนด้านหลังของแผ่นสเตนเลส สัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวแต่ละจุดสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.2)

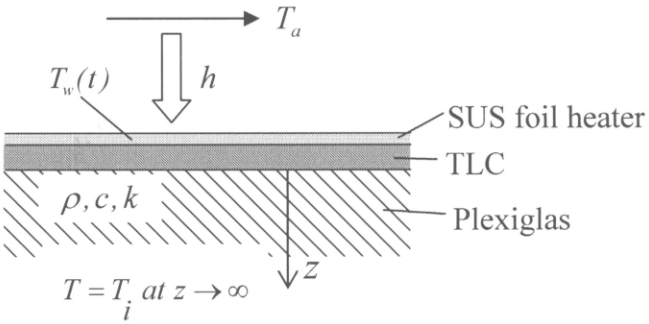
$$q = \frac{I^2 R}{A} \tag{2.1}$$

$$h = \frac{q}{T_w - T_a} \tag{2.2}$$



รูปที่ 2.1 วิธีแบบสภาวะคงตัว

สำหรับวิธีแบบสภาวะไม่คงตัว วิธีนี้จะวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบนพื้นของวัสดุหนาที่สมมุติเป็นแบบ Semi-infinite และมีการนำความร้อนภายในวัสดุแบบ 1 มิติ ในทิศทางตามความลึกจากผิววัสดุเท่านั้น (ในกรณีที่วัสดุมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำและมีค่าความหนามากเพียงพอ มีการนำความร้อนทางด้านข้างน้อยมาก) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบนพื้นผิวที่เวลาต่างๆ จากอุณหภูมิเริ่มต้นบนพื้นผิวที่ทราบค่า จะถูกบันทึกโดยการถ่ายภาพการเปลี่ยนสีของสารเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัลที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 2.2 วิธีแบบสภาวะไม่คงตัว

สัมประสิทธิ์การพาความร้อน h สำหรับในกรณี Semi-infinite สามารถหาได้จากการแก้สมการการนำความร้อนแบบ 1 มิติ ในทิศทางแกน Z

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \tag{2.3}$$

ที่มีเงื่อนไขขอบเขต คือ

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = h(T_w - T_a) \qquad \text{ที่ตำแหน่งผิว } z = 0,\ t > 0$$

$$T = T_i \qquad \text{ที่ตำแหน่ง } z \to \infty$$

และเงื่อนไขเริ่มต้น คือ

$$T = T_i \qquad \text{สำหรับ } t > 0 \text{ ในช่วง } 0 \le z \le \infty$$

ในที่นี้ ρ , c และ k คือ ความหนาแน่น, ความร้อนจำเพาะและการนำพาความร้อนของโมเดล, T_i และ T_a คือ อุณหภูมิผนังเริ่มต้นและอุณหภูมิก๊าซ และ t คือเวลาจากการเริ่มต้นการไหล

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิพื้นผิว T_w ที่เวลา t ใดๆ จะเป็นดังสมการ

$$\frac{T_w - T_i}{T_a - T_i} = 1 - e^{\beta^2}\operatorname{erfc}(\beta) \qquad (2.4)$$

โดยที่ $\beta = h(t/\rho ck)^{0.5}$

นอกจากนี้วิธีการวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะขึ้นอยู่กับการเลือกใช้ประเภทของสารเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัลเป็นแบบเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิแคบหรือกว้างอีกด้วย สำหรับวิธีการใช้วัดอุณหภูมิบนพื้นผิวที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ทั่วทั้งผิว ในกรณีใช้สารเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัลที่มีการเปลี่ยนสีในอุณหภูมิแคบ (ประมาณ 1 °C หรือน้อยกว่า) จะไม่สามารถวัดการกระจายอุณหภูมิหรือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนทั่วทั้งพื้นผิวได้ ดังนั้นในการวัดจะใช้วิธีการบันทึกเส้นสีใดสีหนึ่งโดยปกติจะเป็นเส้นสีเหลือง เพราะมีความสว่างค่อนข้างสูง และจะเปลี่ยนแปลงค่าฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวอย่างเป็นระบบและต่อเนื่อง มีผลทำให้ตำแหน่งเส้นสีเหลืองนี้เคลื่อนที่ตามลำดับ และสามารถสร้างเส้นแสดงการกระจายของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวได้ เนื่องจากเทคนิคนี้ต้องการเพียงหนึ่งสีหรือหนึ่งอุณหภูมิที่ได้จากการสอบเทียบเท่านั้น จึงจำเป็นที่จะต้องใช้ภาพเป็นจำนวนมากในการสร้างการกระจายสัมประสิทธิ์การพาความร้อนทั้งพื้นผิว ความละเอียดและความถูกต้องของวิธีการวัดนี้จะขึ้นกับช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนสีของสารเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัลที่ใช้ และความละเอียดของการปลี่ยนแปลงค่าฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิว และเทคนิคนี้สามารถใช้ในกรณีวัดการกระจายอุณหภูมิแบบเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่งๆ เท่านั้น การใช้สารเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัลที่เปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิกว้างแทนจะสามารถลดข้อจำกัดนี้ได้ สามารถวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวทั้งหมดจากรูปภาพเพียงรูปเดียวในกรณีที่ช่วงการเปลี่ยนสีของสารเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัลกว้างพอที่จะแสดงสีทั้งหมดบนพื้นผิววัดอุณหภูมิ แต่เพื่อความถูกต้องในการวัดอุณหภูมิ วิธีนี้ต้องการจำนวนจุดที่สอบเทียบระหว่างอุณหภูมิและค่าสีของสีหลัก (Hue) จำนวนมาก เพราะการเปลี่ยนแปลงของสีหลักจะเปลี่ยนแปลงแบบไม่เชิงเส้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตามไม่ว่าจะใช้สารเทอร์โมโครมิคลิกวิดคริสตัลประเภทใดก็ตาม เงื่อนไขการถ่ายภาพ เช่น มุมกล้อง มุมของการให้แสงจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีหลักที่วัดบนพื้นผิวด้วย อาจทำให้เกิดความผิดพลาดจากการวัดได้ง่าย

2.4 การประมวลผลภาพดิจิตอล

แสงเป็นพลังงานรังสีที่ตารับรู้และมีปฏิกิริยาตอบสนองด้วยกระบวนการวิเคราะห์แยกแยะของสมอง ตาสามารถวิเคราะห์พลังงานแสงโดยการรับรู้วัตถุ สัมพันธ์กับตำแหน่ง ทิศทาง ระยะทาง ความเข้มแสง และความยาวคลื่นที่มองเห็นได้ ส่วนสีคือลักษณะของความเข้มแสงที่ปรากฏแก่สายตาให้เห็นเป็นสี โดยผ่านกระบวนการรับรู้ด้วยตา ซึ่งข้อมูลแสงจะถูกส่งผ่านเส้นประสาทสัมผัสการมองเห็นไปสู่ศูนย์การมองเห็นภาพ การมองเห็นของมนุษย์นั้นได้จากข้อมูลที่ผ่านการวิเคราะห์แยกแยะให้รับรู้ถึงสิ่งที่มีอยู่รอบตัว

การประมวลภาพแบบดิจิตอลจะเกี่ยวข้องกับการแปลงข้อมูลภาพให้อยู่ในรูปแบบของข้อมูลดิจิตอล ซึ่งสามารถนำข้อมูลนี้ผ่านกระบวนการต่างๆด้วยคอมพิวเตอร์ได้ ซึ่งคล้ายกับการทำงานของสมองมนุษย์ที่รับข้อมูลภาพผ่านทางการมองเห็นของตา ส่วนมากภาพดิจิตอลจะได้มาจากกล้องบันทึกภาพที่มี CCD ทำหน้าที่เสมือนดวงตาคอยรับสัญญาณแสง จากนั้นระบบประมวลผลในกล้องจะแปลงสัญญาณแสงให้อยู่ในรูปของข้อมูลดิจิตอล ในการเก็บข้อมูลภาพแบบดิจิตอลจะบันทึกในรูปแบบของอะเรย์ (Array) โดยค่าในแต่ละช่องของอะเรย์แสดงถึงคุณสมบัติของจุดภาพ (Pixel) และตำแหน่งของช่องอะเรย์เป็นตัวกำหนดตำแหน่งของจุดภาพ หรืออยู่ในรูปของอะเรย์ขนาด m x n x g โดยที่ ค่า m x n จะเป็นตัวบอกถึงความละเอียดของภาพ (m คือจำนวนจุดของภาพในแนวนอน และ n คือจำนวนจุดของภาพในแนวตั้ง) และ g เป็นจำนวนเต็มที่แทนจำนวนบิตของข้อมูลในแต่ละจุดภาพ เช่น ถ้ามีค่าเท่ากับ 8 บิต จะสามารถเก็บความแตกต่างของระดับสีถึง 256 ระดับ (0-255) สำหรับข้อมูลภาพที่เป็นสีจะประกอบไปด้วยอะเรย์ของข้อมูลภาพ 3 ภาพย่อย ซึ่งขึ้นกับระบบชนิดของสีที่ใช้ เช่น ในระบบ RGB ที่เป็นระบบสีที่เกิดจากการรวมกันของแสงสีแดง เขียว และน้ำเงินจะใช้ข้อมูลความเข้มเป็น สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน หรือในระบบ HSV ที่พิจารณาสีโดยใช้ ค่าสีหลักหรือองศาของสี (Hue) ค่าความบริสุทธิ์ของสี (Saturation) และความสว่างของสี (Value)

บทที่ 3 วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ จะสร้างชุดเครื่องมือสอบเทียบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสีและอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปของแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัล และใช้ความสัมพันธ์นี้ในการวัดอุณหภูมิ โดยสีต่างๆที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัลจะถูกบันทึกโดยกล้องดิจิตอล และใช้เทคนิคการประมวลภาพในการแปลงข้อมูลสีของภาพดิจิตอลให้เป็นข้อมูลอุณหภูมิ นอกจากนั้นจะวัดค่าการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อนโดยอาศัยข้อมูลของอุณหภูมิและเงื่อนไขค่าฟลักซ์ความร้อนที่คงที่บนพื้นผิวที่ทำการวัดในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

3.1 การสอบเทียบอุณหภูมิของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล

รูปที่ 3.1 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการสอบเทียบ ซึ่งประกอบไปด้วย ถังน้ำสำหรับสอบเทียบอุณหภูมิและชุดควบคุมอุณหภูมิ ถังน้ำนี้ทำจากแผ่นเหล็กหนา 6 mm มีขนาดกว้าง 20 cm ยาว 20 cm และสูง 30 cm ที่ผนังด้านหนึ่งของถังจะถูกเจาะเป็นหน้าต่างสำหรับติดตั้งแผ่นสเตนเลสแบบบาง ขนาดกว้าง 7 cm ยาว 15 cm หนา 0.030 mm สำหรับใช้เป็นผนังในการสอบเทียบอุณหภูมิ ซึ่งด้านหลังของแผ่นสเตนเลสนี้สัมผัสกับน้ำในถังโดยตรง และอีกด้านหนึ่งจะติดแผ่นเทอร์ดมลิกควิดคริสตอลที่ต้องการจะสอบเทียบอุณหภูมิ อุณหภูมิของแผ่นสเตนเลสสามารถควบคุมได้โดยการควบคุมอุณหภูมิของน้ำในถัง ซึ่งอุณหภูมิของน้ำจะถูกควบคุมโดยระบบควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิตอลที่ต่อกับสายเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K สำหรับวัดอุณหภูมิน้ำในถัง SCR และแท่งฮีทเตอร์ขนาด 1500 วัตต์ สำหรับอุ่นน้ำในถัง นอกจากนี้ภายในถังน้ำจะติดตั้งปั๊มน้ำขนาดเล็กสำหรับหมุนเวียนน้ำเพื่อให้อุณหภูมิน้ำภายในถังสม่ำเสมอทั่วทั้งถัง

รูปที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์สำหรับสอบเทียบแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล

ในการทดลองสอบเทียบอุณหภูมิจะติดแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัลบนผนังสอบเทียบ (ส่วนของแผ่นสเตนเลสบนถังน้ำ) แล้วทำการอุ่นน้ำในถังจนถึงอุณหภูมิที่แผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัลเริ่มแสดงสี สีที่ปรากฏจะถูกบันทึกโดยกล้องเว็บแคม ยี่ห้อ Creative สามารถบันทึกความละเอียดของจุดภาพขนาด 640 x 480 จุด ระดับความละเอียดของสี 8 บิตและอุณหภูมิของน้ำในถังจะถูกวัดใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบปรอทที่มีความละเอียด

0.1°C ซึ่งในการทดลองนี้อุณหภูมิของน้ำในถังจะเท่ากับอุณหภูมิของผนังสอบเทียบ เนื่องจากผนังนี้ทำจากแผ่นสเตนเลสที่บางมาก หลังจากนั้นจะเพิ่มอุณหภูมิของน้ำในถังอีก รอจนอุณหภูมิของน้ำอยู่ในสภาวะคงตัวแล้วจึงทำการวัดอุณหภูมิน้ำโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์และบันทึกภาพของสีแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัลอีกครั้ง ทำการทดลองสอบเทียบซ้ำจนสีของแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัลเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเข้มจึงหยุดการทดลอง

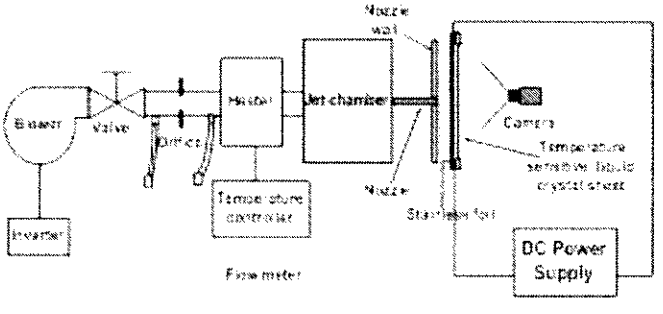
ผลของภาพดิจิตอลสีของแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัลที่ถูกบันทึกที่อุณหภูมิต่างๆทั้งหมดจะถูกนำมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยของโครงสร้างของสี R-, G-, B- ที่อุณหภูมิต่างๆโดยใช้เทคนิคการประมวลภาพ เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวัดอุณหภูมิจากสีของแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัลต่อไป ในการวิเคราะห์จะใช้โปรแกรม MATLAB เนื่องจากมีฟังก์ชั่นที่เตรียมไว้สำหรับการวิเคราะห์ภาพอยู่แล้ว รายละเอียดของขั้นตอนการวิเคราะห์ภาพมีดังนี้

1. อ่านรูปของแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัลที่ถูกบันทึกในรูปของไฟล์ JPEG
2. ตัดรูปให้เหลือเฉพาะส่วนของแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัล
3. แยกภาพตามโครงสร้างสี RGB และแปลงภาพสู่ระดับสีเทาในช่วง 0-255
4. ทำการหาค่าเฉลี่ยของค่า R-, G-, B- จากทุกจุดในภาพที่แยกตามโครงสร้างสี
5. แปลงโครงสร้างสีให้อยู่ในระบบ HSV และหาค่าเฉลี่ยของค่า H-, S-, V- จากทุกจุดในภาพ

3.2 ตัวอย่างการนำไปใช้วัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิว

คุณสมบัติการเปลี่ยนสีของแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัลที่ผ่านการสอบเทียบแล้วจะถูกนำไปใช้ในการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทอากาศที่พุ่งชนระบายความร้อนบนพื้นผิว โดยจะวัดค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวในกรณีที่ค่าฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวคงที่ ในการทดลองจะใช้เจ็ทอากาศจากหัวฉีดที่เป็นแบบท่อ (Pipe nozzle) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16.5 mm ยาว 300 mm พุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิวเรียบ โดยกำหนดระยะพุ่งชนหรือระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงผนังที่เจ็ทพุ่งชน L/D = 2, 4, 6, 8 และ10 และค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทคงที่ที่ Re=46,400

รูปที่ 3.2 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง เจ็ทอากาศที่ใช้ในการทดลองจะถูกส่งจากโบรเวอร์ที่สามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ใบพัดด้วยอินเวอเตอร์ หลังจากนั้นอากาศจะผ่านชุดของออร์ริฟิสเพื่อวัดอัตราการไหล และชุดฮีตเตอร์เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเจ็ทอากาศให้คงที่ก่อนที่จะเข้าถังกักอากาศ และผ่านไปยังท่อเจ็ท ในการทดลองนี้ที่ปลายทางออกของท่อเจ็ทจะติดตั้งผนังของท่อเจ็ทไว้ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ดังนั้นหลังจากที่เจ็ทพุ่งชนผนังแล้ว เจ็ทจะไหลออกทางด้านข้างในช่องระหว่างผนังของท่อเจ็ทและผนังที่เจ็ทพุ่งชน



รูปที่ 3.2 ชุดทดลองสำหรับวัดการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนผนัง

ในการทดลองนี้จะใช้แผ่นสเตนเลสแบบบางที่มีความหนา 0.030 mm เป็นผนังที่เจ็ทพุ่งชน แผ่นสเตนเลสนี้จะถูกขึงให้เรียบตึงกับแผ่นพลาสติกหนา 15 mm ที่เจาะหน้าต่างขนาด 220 cm x 220 cm ไว้กลางแผ่น โดยใช้แท่งทองแดงยึดแผ่นสเตนเลสไว้ทั้งสองข้าง และแท่งทองแดงทั้งสองนี้จะต่อเข้ากับขั้วของตัวจ่ายกระแสไฟฟ้า เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านแท่งทองแดงไปยังแผ่นสเตนเลสจะเกิดความร้อนขึ้นทั่วทั้งแผ่นสเตนเลส ซึ่งอัตราการเกิดความร้อนนี้สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$q_{input} = \frac{I^2 R}{A} \tag{3.1}$$

เมื่อ I คือกระแสไฟฟ้าแบบกระแสตรงที่จ่ายให้กับแผ่นสเตนเลส R คือค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสเตนเลส และ A คือพื้นที่ของพื้นผิวของแผ่นสเตนเลส

สำหรับการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนนั้นจะวัดโดยใช้แผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัลติดบนด้านหลังของแผ่นสเตนเลส (ด้านตรงข้ามกับที่เจ็ทพุ่งชน) แผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัลที่จะเลือกใช้ในการทดลองนี้จะมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงสีจากสีแดงส้ม สีเหลือง สีเขียว สีน้ำเงิน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วง 35°C ถึง 40°C ลักษณะสีที่ปรากฏจะบันทึกโดยใช้กล้องเว็บแคม ยี่ห้อ Creative สามารถบันทึกความละเอียดของจุดภาพขนาด 640 x 480 จุด ระดับความละเอียดของสี 8 บิต ซึ่งข้อดีของกล้องที่ใช้คือสามารถต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ได้โดยตรงผ่าน port USB ไม่ต้องใช้บอร์ดบันทึกภาพเพิ่มเติม ในระหว่างการทดลองจะใช้หลอดฟลูออเรซเซนต์แบบยาวส่องสว่างบนแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัลอย่างสม่ำเสมอ โดยจะวางหลอดไฟในตำแหน่งที่ไม่ให้เกิดการสะท้อนแสงจากแผ่นฟิล์มเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัลในระหว่างการบันทึกภาพ

ก่อนการทดลองจะทำการสอบเทียบอุณหภูมิกับสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัล โดยใช้อุปกรณ์และวิธีการสอบเทียบที่ได้อธิบายในหัวข้อ 3.1 สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$h = \frac{q_{input}}{T_{LC} - T_J} \tag{3.2}$$

โดยที่ T_{LC} คืออุณหภูมิของพื้นผิวพุ่งชนที่วัดโดยแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัล, T_J คืออุณหภูมิของเจ็ทในห้องกักอากาศ และค่า Nusselt Number บนพื้นผิวคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} \tag{3.3}$$

ในที่นี้ D คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อเจ็ท และ k คือค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ

ในการทดลองนี้ เส้นแถบแต่ละสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัลจะหมายถึงเส้นแถบของแต่ละอุณหภูมิที่คงที่ และเนื่องจากค่าฟลักซ์ความร้อนบนผนังมีค่าคงที่ตลอดทั้งแผ่น ดังนั้นจากสมการ (3.2) เส้นแถบแต่ละสีจะเป็นเส้นที่มีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่เท่ากันด้วย แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงสีของแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัลที่ใช้ในการทดลองค่อนข้างที่จะแคบ เพื่อให้สามารถศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนทั้งพื้นผิว ในการทดลองจะควบคุมสภาวะการไหลให้คงเดิม แต่จะทำการเปลี่ยนค่าฟลักซ์ความร้อนหรือกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่พื้นผิว เมื่อตำแหน่งของเส้นแถบสีแต่ละเส้นเปลี่ยนตำแหน่งและหลังจากการกระจายอุณหภูมิบนผนังเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วจึงบันทึกภาพแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัลโดยกล้องดิจิตอล และจะทำการเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าซ้ำอีกจนกระทั่งเส้นแถบสีเคลื่อนที่ทั่วทั้งแผ่น ซึ่งเส้นแถบสีแต่ละเส้นสามารถนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้และหากนำรูปภาพที่บันทึกทั้งหมดมาประมวลผลโดย

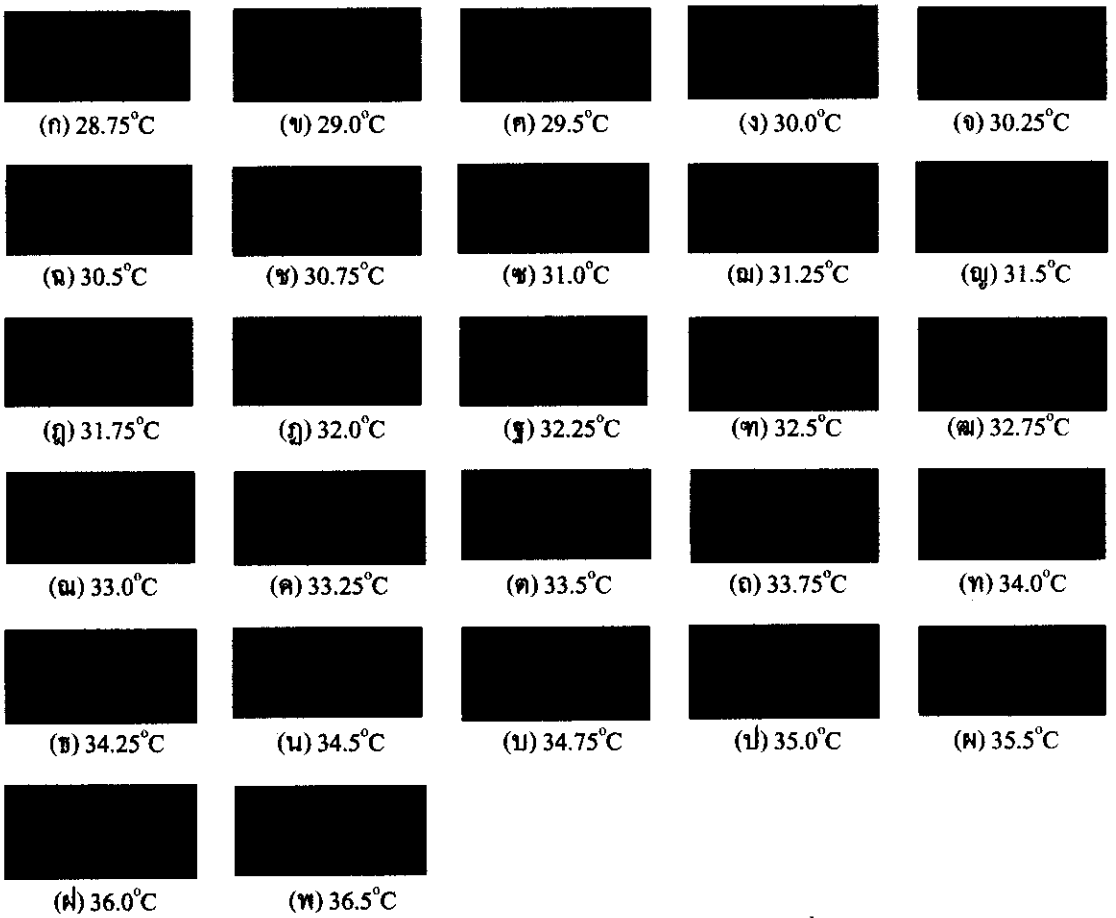
ใช้วิธีการประมวลผลภาพในคอมพิวเตอร์แล้วจะได้ข้อมูลการกระจายของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว ในการประมวลผลภาพจะใช้ Image Processing Tool ที่มีอยู่ในโปรแกรม MATLAB โดยมีขั้นตอนหลักในการวิเคราะห์ดังนี้

1. อ่านรูปของแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัลที่ถูกบันทึกในรูปของไฟล์ JPEG
2. ตัดรูปให้เหลือเฉพาะส่วนของแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัล
3. แยกภาพตามโครงสร้างสี RGB และแปลงภาพสู่ระดับสีเทาในช่วง 0-255
4. เลือกเส้นสีเหลืองในแต่ละภาพที่บันทึก โดยใช้เงื่อนไขของส่วนประกอบสี R-, G-, B-
5. คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและค่า Nusselt Number ของเส้นสีเหลืองที่เลือก พร้อมทั้งระบุตำแหน่งของเส้น
6. นำเส้นสีเหลืองในแต่ละภาพที่บันทึกมาซ้อนกัน

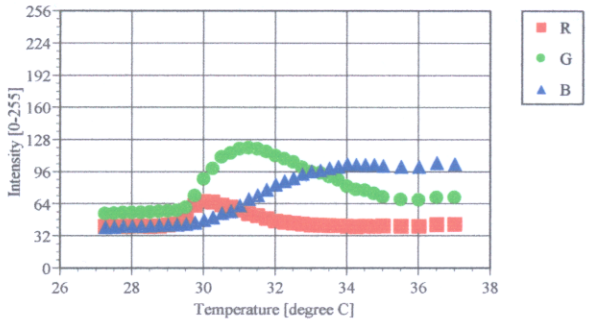
บทที่ 4 ผลการทดลอง

4.1 ผลการสอบเทียบอุณหภูมิของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล

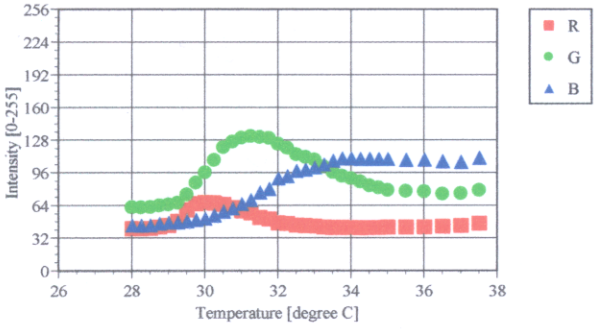
รูปที่ 4.1 แสดงภาพการเปลี่ยนแปลงสีของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลบนผนังสอบเทียบอุณหภูมิที่เงื่อนไขอุณหภูมิต่างๆ จากผลการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิของผนังสอบเทียบหรืออุณหภูมิของน้ำในถังสูงขึ้น สีของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้น เนื่องจากสารเทอร์โมลิควิดคริสตัลเกิดการจัดเรียงโครงสร้างโมเลกุลใหม่ ในการทดลองนี้แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล จะใช้สีดำเป็นสีรองพื้น ดังนั้นก่อนเปลี่ยนแปลงสีสารเทอร์โมลิควิดคริสตัลจะมีสีขาวขุ่นทำให้สามารถมองทะลุลงไปเห็นชั้นรองพื้นเป็นสีดำได้ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นสารเทอร์โมลิควิดคริสตัลจะเริ่มเปลี่ยนเป็นสีแดง สีเหลือง สีเขียว และสีน้ำเงิน และจะเปลี่ยนสีย้อนกลับไปเป็นสีดำอีกครั้งเมื่ออุณหภูมิลดลง ช่วงการเปลี่ยนสีของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลที่ใช้ในการทดลองสอบเทียบคือ 30°C ถึง 35°C (Omega Engineering Inc.) ดังแสดงในรูปที่ 4.1



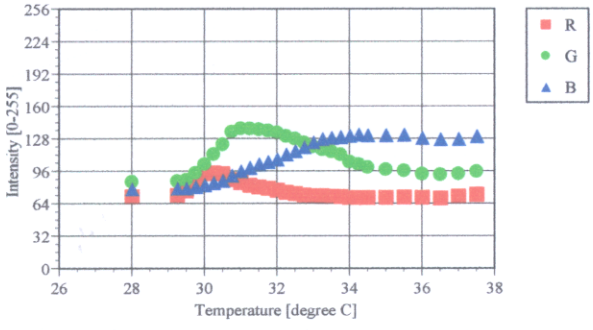
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างของการเปลี่ยนแปลงสีของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล ที่ใช้ในการสอบเทียบ



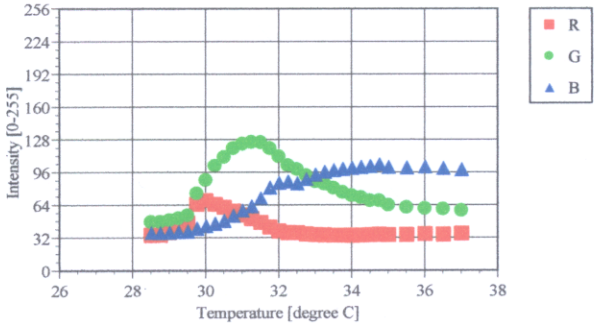
รูปที่ 4.2 ผลการสอบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยสี R-, G-, B- ที่อุณหภูมิต่างๆ ครั้งที่ 1



รูปที่ 4.3 ผลการสอบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยสี R-, G-, B- ที่อุณหภูมิต่างๆ ครั้งที่ 2



รูปที่ 4.4 ผลการสอบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยสี R-, G-, B- ที่อุณหภูมิต่างๆ ครั้งที่ 3



รูปที่ 4.5 ผลการสอบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยสี R-, G-, B- ที่อุณหภูมิต่างๆ ครั้งที่ 4

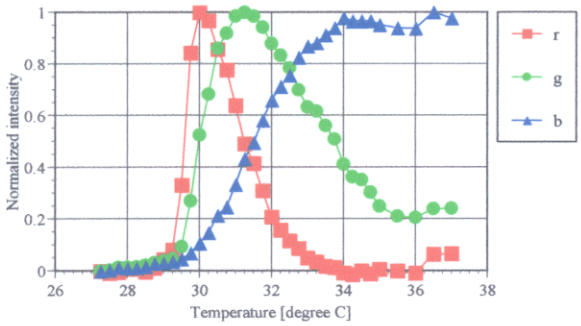
รูปที่ 4.1 เป็นตัวอย่างของภาพที่บันทึกที่ถูกตัดให้เหลือขนาด 170 x 50 จุดภาพ โดยแต่ละภาพจะถูกนำมาแยกเป็น 3 ภาพย่อย ที่แสดงค่าของโครงสร้างสีในแต่ละส่วน (R-, G-, B-) และหาค่าเฉลี่ยโดยใช้จุดสีทั้งหมดในแต่ละภาพย่อย แล้วนำมาสรุปความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของส่วนประกอบสี R-, G-, B- ที่อุณหภูมิต่างๆ ดังรูปที่ 4.2-4.5 ในแต่ละรูปจะแสดงผลการสอบเทียบของแต่ละครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการให้แสงสว่างบนแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล โดยเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างหลอดไฟและแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล จากการทดลองพบว่าเงื่อนไขในการถ่ายภาพ เช่น การให้แสงสว่าง จะมีผลต่อค่าส่วนประกอบสี R-, G-, B- ของภาพ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้ค่าตัวแปรไร้มิติในการคำนวณส่วนประกอบสี R-, G-, B- ดังนี้

$$r = \frac{R}{R+G+B} \tag{4.1}$$

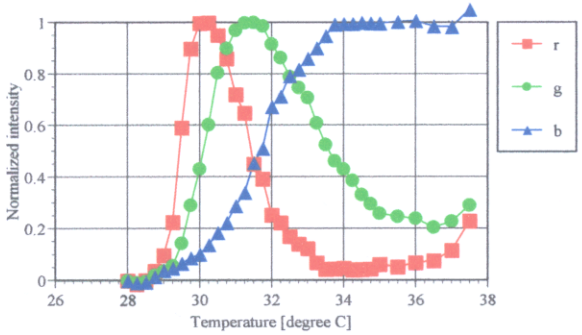
$$g = \frac{G}{R+G+B} \tag{4.2}$$

$$b = \frac{B}{R+G+B} \tag{4.3}$$

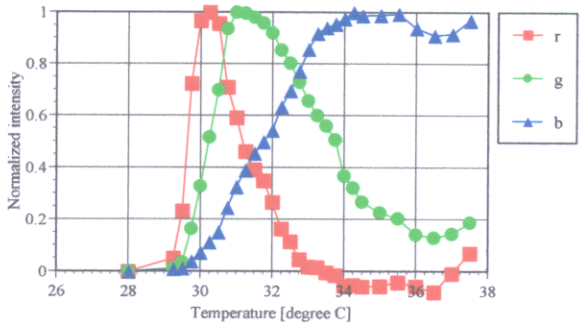
รูปที่ 4.6-4.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า r-, g-, b- ที่อุณหภูมิต่างๆ หลังจากที่ใช้สมการ 4.1-4.3 คำนวณ



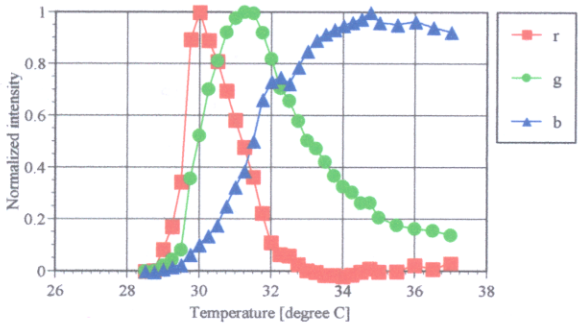
รูปที่ 4.6 ผลการสอบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยสี r-, g-, b- ที่อุณหภูมิต่างๆ ครั้งที่ 1



รูปที่ 4.7 ผลการสอบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยสี r-, g-, b- ที่อุณหภูมิต่างๆ ครั้งที่ 2



รูปที่ 4.8 ผลการสอบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยสี r-, g-, b- ที่อุณหภูมิต่างๆ ครั้งที่ 3



รูปที่ 4.9 ผลการสอบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยสี r-, g-, b- ที่อุณหภูมิต่างๆ ครั้งที่ 4

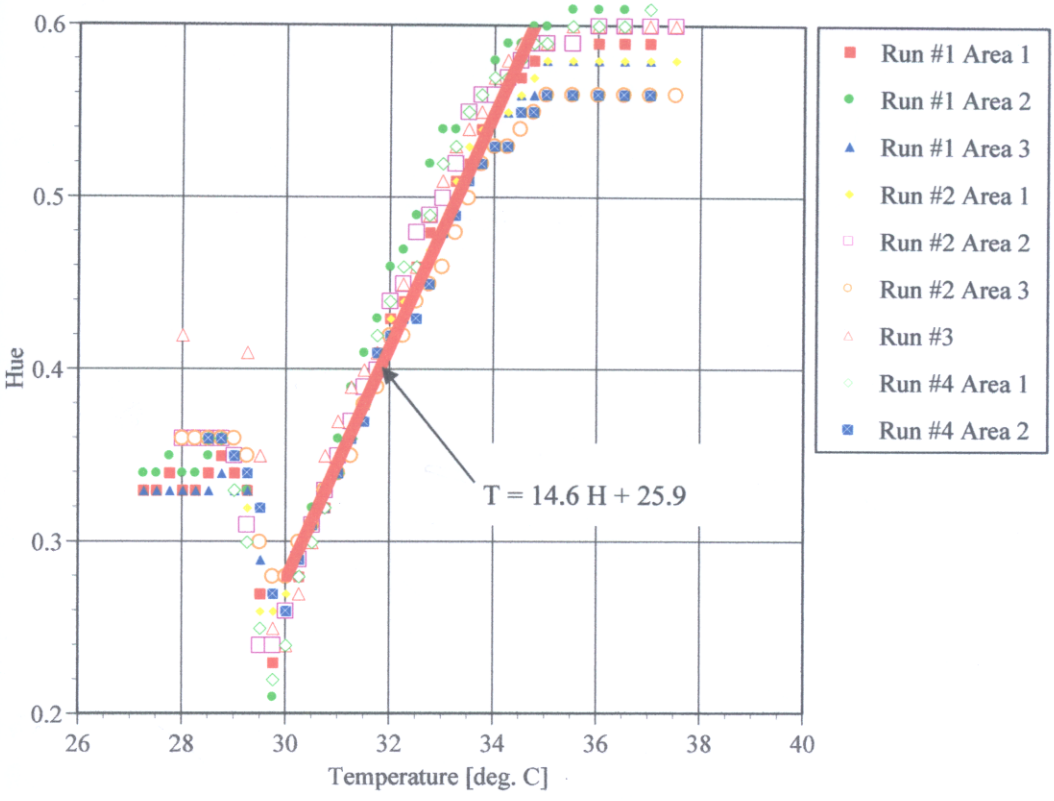
จากรูปพบว่าแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลที่ใช้นี้มีคุณสมบัติที่เหมือนกัน ถึงแม้จะมีเงื่อนไขในการให้แสงสว่างที่แตกต่างกัน คือ ค่า r จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 30.0 (+0.25)°C แล้วจะเริ่มลดลงอีกครั้ง ส่วนค่า g จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 31.0 (+0.25) °C แล้วจะเริ่มลดลงอีกครั้ง สำหรับ b จะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิประมาณ 34.0 °C แล้วจะมีค่าเกือบคงที่ และพบว่าจุดที่ค่า r และ g มีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 0.85 จะมีค่าอุณหภูมิระหว่าง 30.5 ถึง 30.75°C

อย่างไรก็ตาม หากต้องการนำผลการสอบเทียบนี้ไปใช้ในการวัดอุณหภูมิทั้งพื้นผิว จำเป็นต้องสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและส่วนประกอบสีทั้ง 3 คือ r, g, b ที่ค่อนข้างซับซ้อน และเนื่องจากแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลที่ใช้นี้มีช่วงการเปลี่ยนค่าในช่วง 29 °C ถึง 36 °C เท่านั้น ทำให้มีข้อจำกัดในการใช้วัดอุณหภูมิในช่วงนี้เท่านั้น

นอกจากนี้ได้ทดลองนำผลการสอบเทียบของแต่ละกรณี มาแปลงสีจากระบบ RGB ให้อยู่ในระบบ HSV และแสดงผลการเปลี่ยนแปลงของค่าสีหลัก H ที่อุณหภูมิต่างๆ ในรูปที่ 4.10 ซึ่งค่าสีหลัก (Hue) จะเป็นตัวแสดงสเปคตรัมของสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล จากรูปพบว่าค่าเฉลี่ยของสีหลักมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทุกกรณีของเงื่อนไขการให้แสง ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าสีหลัก T=T(H) ได้ ดังสมการที่ (4.4)

$$T = 14.6\,H + 25.9 \qquad (30^{\circ}C \le T \le 35^{\circ}C) \qquad (4.4)$$

แต่มีข้อควรระวังคือเงื่อนไขของการให้แสงและการถ่ายภาพจะมีผลต่อค่าสีหลัก จึงจำเป็นต้องควบคุมเงื่อนไขการถ่ายภาพในขณะการสอบเทียบและการทดลองวัดให้เหมือนกันตลอด

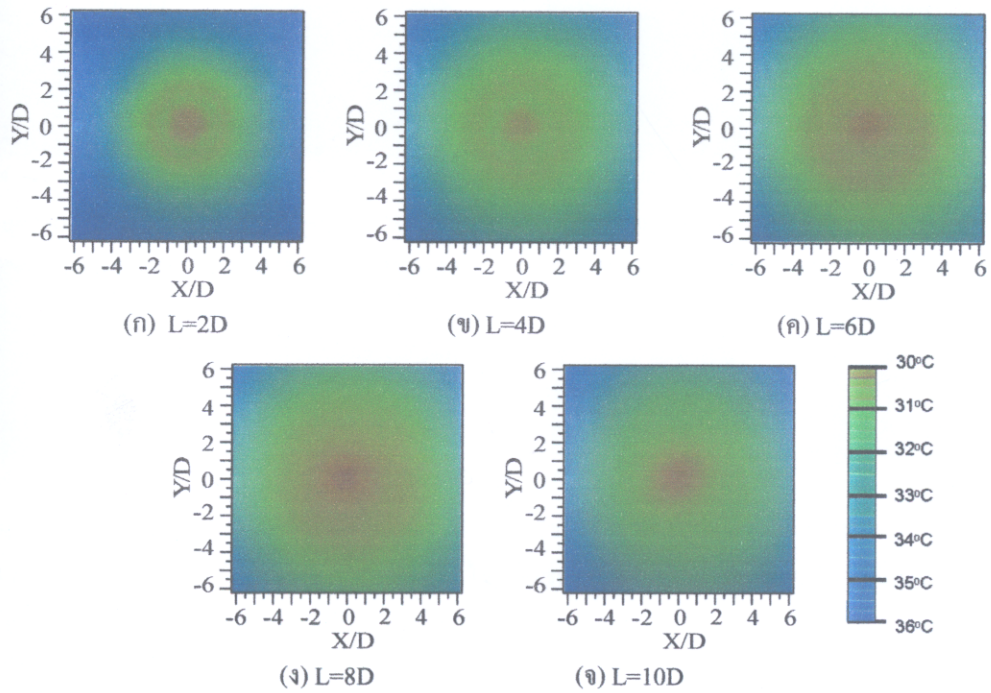


รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยของสีหลัก H ที่อุณหภูมิต่างๆ

4.2 ผลการวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิว

รูปที่ 4.11 แสดงภาพถ่ายของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล ในกรณีที่ใช้เจ็ทอากาศที่อุณหภูมิ T_{jet}=28.5°C พุ่งชนบนพื้นผิวแผ่นสเตนเลสที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ทั่วทั้งผิว q=500W/m^2 ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิว L=2D (D คือเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อเจ็ท) แถบสีข้างภาพแสดงอุณหภูมิที่วัดโดยแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล ได้จากการสอบเทียบ จากรูปพบว่าพื้นผิวบริเวณที่เจ็ทอากาศพุ่งชนโดยตรงจะมีอุณหภูมิค่อนข้างต่ำและบริเวณรอบๆจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นตามลำดับ นอกจากนี้เนื่องจากเงื่อนไขฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวมีค่าคงที่ ดังนั้นสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลจะแสดงการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวอีกด้วย

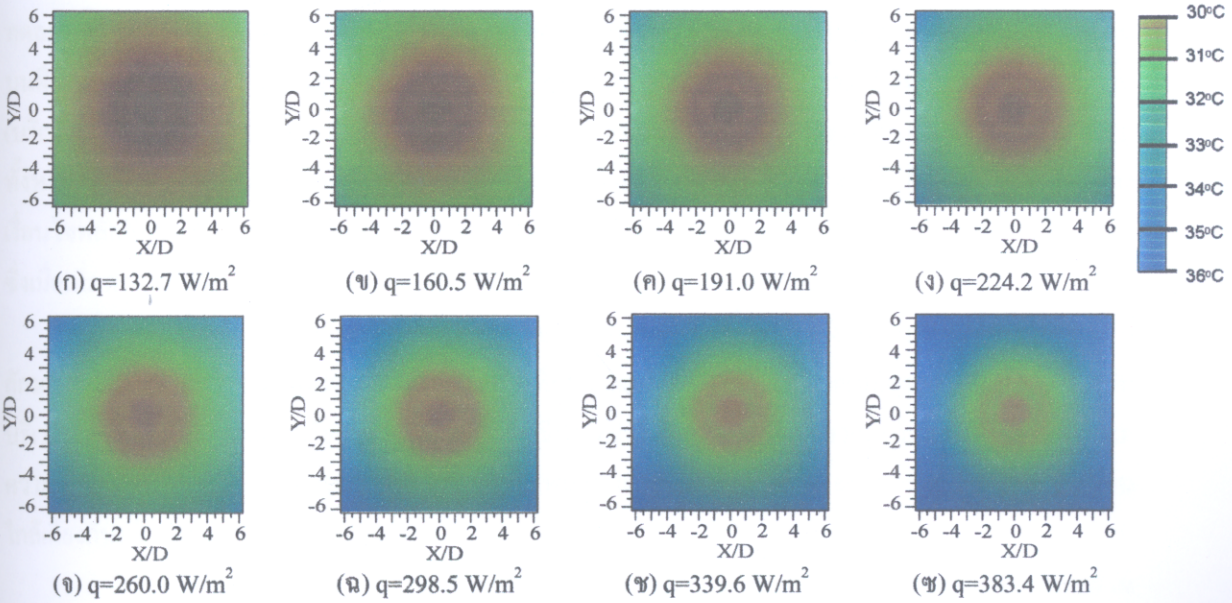
แต่เนื่องจากแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลที่ใช้ในการทดลองนี้มีช่วงอุณหภูมิในการเปลี่ยนสีที่ค่อนข้างแคบประมาณ 5°C จึงทำให้ไม่สามารถดูลักษณะการกระจายของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนได้ทั่วทั้งผิว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการเปลี่ยนค่าฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิว เพื่อให้สามารถเห็นการกระจายของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนทั่วทั้งผิว รูปที่ 4.12 แสดงภาพถ่ายของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลที่เงื่อนไขฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวต่างๆ ในกรณีที่อุณหภูมิเจ็ทอากาศ T_{jet}=28.5°C และ L=2D จากรูปพบว่าในกรณีที่ฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวต่ำจะสามารถสังเกตการกระจายของบริเวณที่สัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าต่ำได้ และเมื่อเพิ่มฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวแล้วจะสังเกตการกระจายของบริเวณที่สัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าสูงขึ้นได้



(ก) L=2D (ข) L=4D (ค) L=6D

(ง) L=8D (จ) L=10D

รูปที่ 4.11 ตัวอย่างภาพถ่ายของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลในกรณีที่ใช้เจ็ทอากาศที่อุณหภูมิ T_{jet}=28.5°C พุ่งชนบนพื้นผิวแผ่นสเตนเลสที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ทั่วทั้งผิว q=383.4 W/m^2 ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิว L ต่างๆ เมื่อ Re_{jet}=14,600

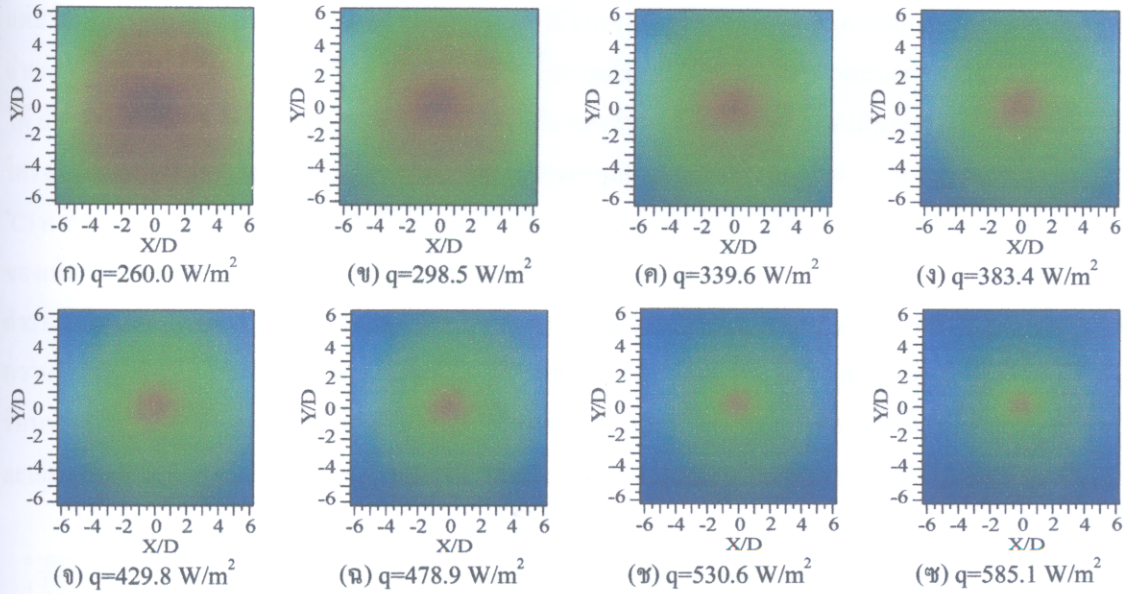


(ก) q=132.7 W/m^2 (ข) q=160.5 W/m^2 (ค) q=191.0 W/m^2 (ง) q=224.2 W/m^2

(จ) q=260.0 W/m^2 (ฉ) q=298.5 W/m^2 (ช) q=339.6 W/m^2 (ซ) q=383.4 W/m^2

รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลที่เงื่อนไขฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวต่างๆ ในกรณีที่อุณหภูมิเจ็ทอากาศ T_{jet}=28.5°C และ L=2D เมื่อ Re_{jet}=14,600

สำนักทรัพยากรการเรียนรู้คุณหญิงหลง อรรถกระวีสุนทร



(ก) q=260.0 W/m^2 (ข) q=298.5 W/m^2 (ค) q=339.6 W/m^2 (ง) q=383.4 W/m^2

(จ) q=429.8 W/m^2 (ฉ) q=478.9 W/m^2 (ช) q=530.6 W/m^2 (ซ) q=585.1 W/m^2

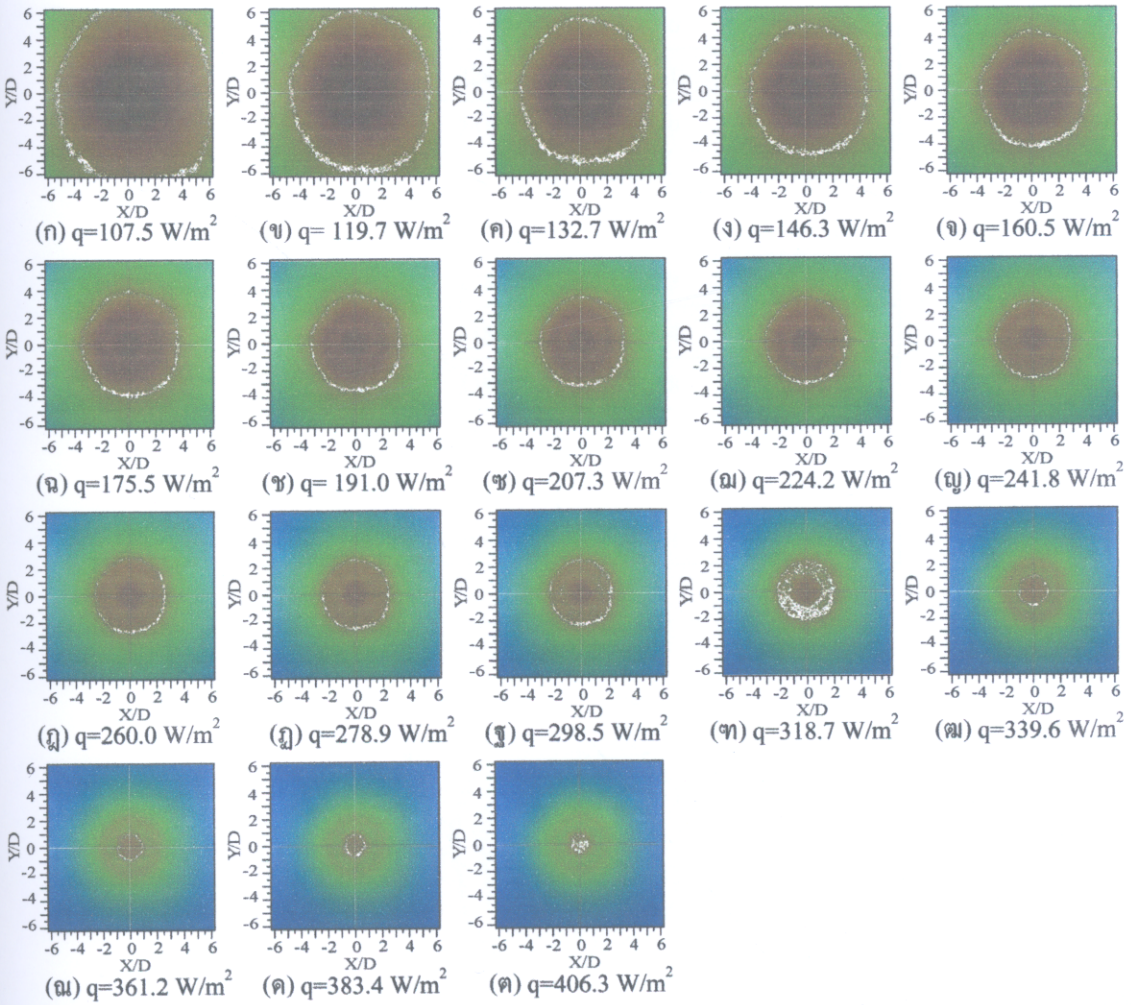
รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล ที่เงื่อนไขฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวต่างๆ ในกรณีที่อุณหภูมิเจ็ทอากาศ T_{jet}=28.5°C และ L=10D เมื่อ Re_{jet}=14,600

รูปที่ 4.11 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล ในกรณีที่ใช้เจ็ทอากาศที่อุณหภูมิ T_{jet}=28.5°C พุ่งชนบนพื้นผิวแผ่นสเตนเลสที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ทั่วทั้งผิว q=383.4 W/m^2 ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิว L ต่างๆ เมื่อ Re_{jet}=14,600 จากรูปนี้สามารถเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่ระยะ L ต่างๆได้ด้วยตาเปล่า ซึ่งเป็นข้อดีของการใช้แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล แต่เนื่องจากแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล ที่ใช้ในการทดลองนี้มีการเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิที่ค่อนข้างแคบทำให้ในบางกรณีไม่สามารถเห็นลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนผิวทั้งหมดได้ เช่น กรณีของรูปที่ 4.11(จ) ที่เงื่อนไข L=10D จะสามารถเห็นบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรงเท่านั้น (บริเวณสีแดง) บริเวณรอบๆไม่สามารถสังเกตลักษณะการถ่ายเทความร้อนได้ เนื่องจากเห็นเป็นสีเดียวกัน (สีเขียว) ทั้งหมด ดังนั้นในกรณีที่ต้องการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนผิวทั้งหมด จำเป็นต้องใช้วิธีเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.12 สำหรับกรณี L=2D และในรูปที่ 4.13 สำหรับกรณี L=10D ซึ่งเมื่อเพิ่มฟลักซ์ความร้อนจะสังเกตลักษณะการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอบๆจุดที่เจ็ทพุ่งชนได้

จากการทดลองสามารถสรุปลักษณะการถ่ายเทความร้อนได้ดังนี้คือ ที่ทุกเงื่อนไขระยะ L จะสามารถเห็นลักษณะการกระจายของอุณหภูมิในบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวโดยตรงได้ ซึ่งเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำที่สุดหรือเป็นบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด และในกรณีที่ระยะ L=2D, 4D, 6D จะปรากฏบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูง มีลักษณะวงแหวนล้อมรอบบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนเกิดขึ้น โดยบริเวณนี้จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนใกล้เคียงกับบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรง

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน สามารถทำได้ 2 วิธี คือ วิธีใช้ค่าการกระจายของสีเทอร์โมลิควิดคริสตัลจากภาพถ่ายหาการกระจายอุณหภูมิโดยตรง วิธีนี้จะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีหลัก (Hue) และอุณหภูมิที่ได้จากการสอบเทียบ แปลงค่าการกระจายของสีหลักให้เป็นอุณหภูมิแล้วคำนวณการกระจายของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ข้อดีของวิธีนี้คือใช้รูปถ่ายของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล เพียงรูปเดียวในการคำนวณ

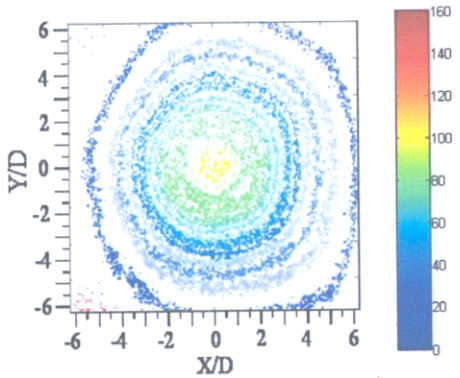
แต่มีข้อเสียคือ อุณหภูมิบนพื้นผิวจะต้องอยู่ในย่านการใช้งานของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลทั้งพื้นผิว และเงื่อนไขถ่ายภาพขณะวัดและสอบเทียบจะต้องเหมือนกัน มิฉะนั้นอาจเกิดความคลาดเคลื่อนจากสมการสอบเทียบที่สร้างขึ้นได้ อีกวิธีหนึ่งคือการใช้เงื่อนไข RGB ในการระบุเส้นของสีที่ทราบอุณหภูมิ เช่น เส้นของสีเหลืองที่มีเงื่อนไขโครงสร้างสี r- เท่ากับ g- และมีค่า b- น้อยกว่า 0.4 จะมีอุณหภูมิเท่ากับ 30.5°C (ระดับความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.25 °C) หากทราบเงื่อนไขของฟลักซ์ความร้อนบนผนัง จะสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ตำแหน่งของเส้นสีเหลืองนี้ได้ และหากทำการเปลี่ยนค่าฟลักซ์ความร้อนที่จ่ายให้ผนัง จะทำให้เส้นสีเหลืองนี้เคลื่อนไปยังตำแหน่งใหม่และสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ตำแหน่งใหม่ได้อีก หากทำการเปลี่ยนฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิว ให้เส้นสีเหลืองเคลื่อนที่ทั่วทั้งผิวแล้ว จะสามารถหาการกระจายของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนทั่วทั้งผิวได้ ข้อเสียของวิธีนี้คือจำเป็นต้องถ่ายภาพจำนวนมากที่เงื่อนไขฟลักซ์ความร้อนต่างๆ และความละเอียดของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวจะขึ้นอยู่กับจำนวนภาพที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วย



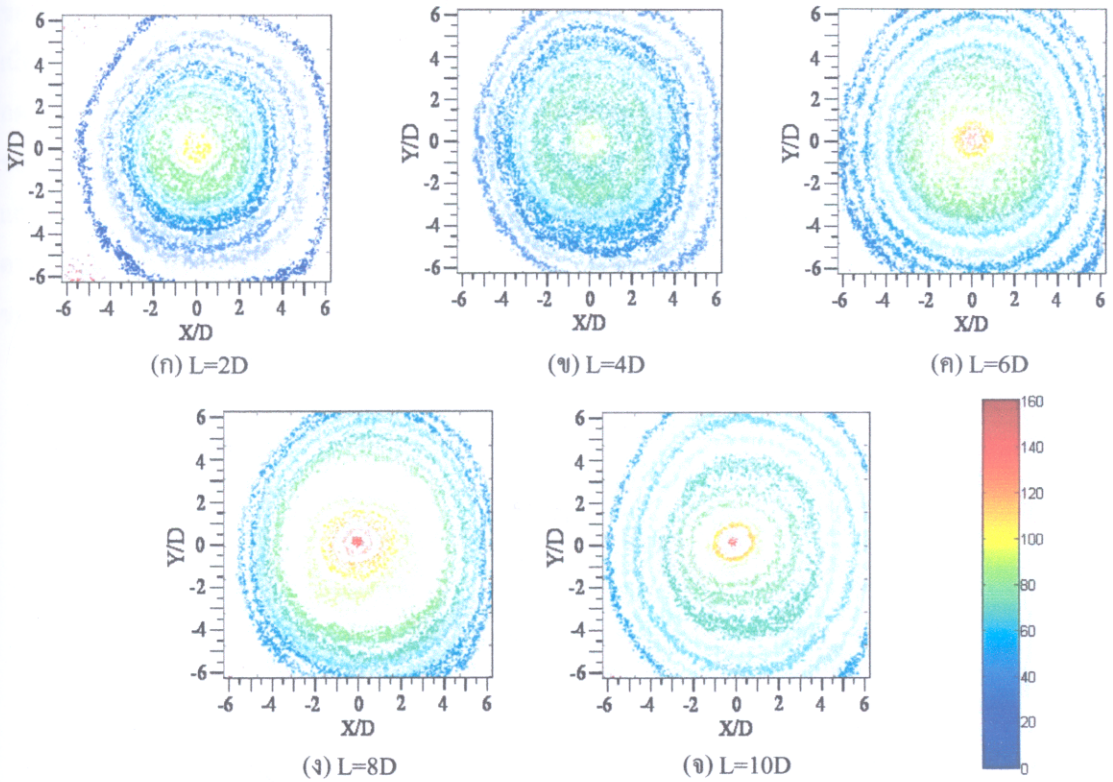
รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล ที่เงื่อนไขฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวต่างๆ ในกรณีที่อุณหภูมิเจ็ทอากาศ T_{jet}=28.5°C และ L=2D เมื่อ Re_{jet}=14,600 ในรูปเส้นสีขาวแสดงบริเวณเส้นเหลืองที่มีอุณหภูมิ 30.5 °C

ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและนัสเซลต์นัมเบอร์ของเส้นสีขาวในรูปที่ 4.14 กรณีที่อุณหภูมิเจ็ทอากาศ T_{jet}=28.5°C และกรณีเส้นสีขาวแสดงบริเวณเส้นเหลืองที่มีอุณหภูมิ 30.5 °C

รูปที่	q [W/m^2]	h [W/m^2°C]	Nu
รูปที่ 4.14 (ก)	107.5	53.7	33.8
รูปที่ 4.14 (ข)	119.7	59.9	37.7
รูปที่ 4.14 (ค)	132.7	66.3	41.7
รูปที่ 4.14 (ง)	146.3	73.1	46.0
รูปที่ 4.14(จ)	160.5	80.3	50.5
รูปที่ 4.14(ฉ)	175.5	87.7	55.2
รูปที่ 4.14(ช)	191.0	95.5	60.1
รูปที่ 4.14(ซ)	207.3	103.6	65.2
รูปที่ 4.14(ฌ)	224.2	112.1	70.5
รูปที่ 4.14(ญ)	241.8	120.9	76.1
รูปที่ 4.14(ฎ)	260.0	130.0	81.8
รูปที่ 4.14(ฏ)	278.9	139.5	87.8
รูปที่ 4.14(ฐ)	298.5	149.3	93.9
รูปที่ 4.14(ฑ)	318.7	159.4	100.3
รูปที่ 4.14(ฒ)	339.6	169.8	106.9
รูปที่ 4.14(ณ)	361.2	180.6	113.6
รูปที่ 4.14(ด)	383.4	191.7	120.6
รูปที่ 4.14(ต)	406.3	203.1	127.8



รูปที่ 4.15 ตัวอย่างการกระจายของนัสเซลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนในกรณีที่ L=2D



(ก) L=2D (ข) L=4D (ค) L=6D

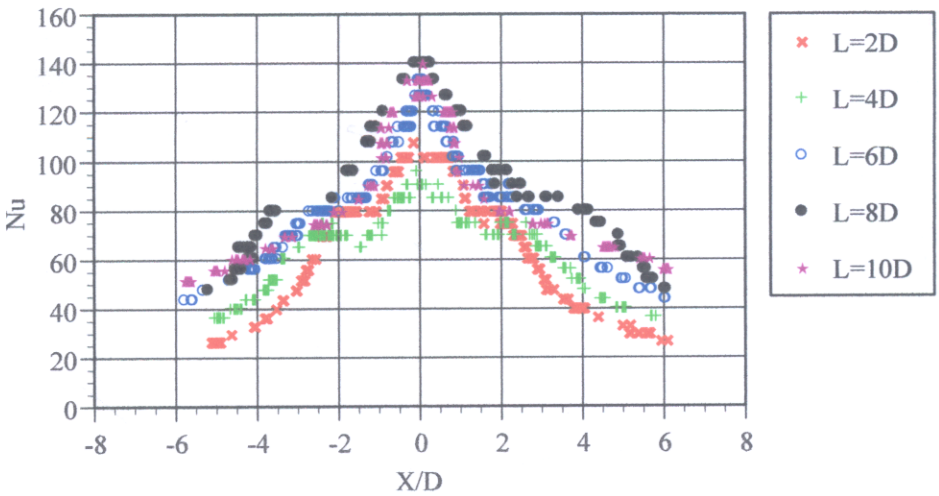
(ง) L=8D (จ) L=10D

รูปที่ 4.16 การกระจายของนัสเซลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนในกรณีที่อุณหภูมิเจ็ทอากาศ T_{jet}=28.5°C และ Re_{jet}=14,600

รูปที่ 4.15 แสดงการกระจายของนัสเซลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนในกรณีที่ L=2D ซึ่งได้จากการนำเส้นสีขาวในแต่ละเงื่อนไขฟลักซ์ความร้อนในรูปที่ 4.14 มาซ้อนกัน และค่านัสเซลต์นัมเบอร์ได้จากการคำนวณในตารางที่ 4.1 ในรูปแถบสีจะแสดงระดับของนัสเซลต์นัมเบอร์ของแต่ละเส้นในภาพ และบริเวณสีขาวระหว่างเส้นสีจะเป็นบริเวณที่ไม่ทราบค่านัสเซลต์นัมเบอร์ เนื่องจากเส้นสีที่ตำแหน่งต่างๆ ได้จากการติดตามตำแหน่งของเส้นสีเหลืองที่เงื่อนไขฟลักซ์ความร้อนต่างๆ หากต้องการเพิ่มจำนวนเส้นสีของนัสเซลต์นัมเบอร์สามารถทำได้โดยเพิ่มจำนวนภาพหรือเงื่อนไขฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวที่บันทึก

รูปที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายของนัสเซลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เงื่อนไขระยะพุ่งชน L ต่างๆ กรณีที่ระยะพุ่งชน L=2D, 4D, 6D พบว่ารอบๆจุดศูนย์กลางบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน (X/D,Y/D)=(0,0) จะมีการเปลี่ยนแปลงของค่านัสเซลต์นัมเบอร์อย่างรวดเร็ว สังเกตได้จากช่วงว่างระหว่างเส้นสีค่อนข้างจะแคบ แต่ที่บริเวณห่างออกไปค่านัสเซลต์นัมเบอร์จะค่อยๆลดลง สังเกตได้จากช่วงว่างระหว่างเส้นสีจะค่อยๆกว้างขึ้น สำหรับกรณีระยะพุ่งชน L=8D, 10D ค่านัสเซลต์นัมเบอร์จะค่อยๆลดลงจากจุดศูนย์กลางบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่านัสเซลต์นัมเบอร์ที่ระยะพุ่งชนต่างๆ ในรูปที่ 4.17 แสดงการเปลี่ยนแปลงของนัสเซลต์นัมเบอร์บนแกน X ที่ผ่านจุดศูนย์กลางบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน (X/D,Y/D)=(0,0) จากรูปพบว่า ค่านัสเซลต์นัมเบอร์จะมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งเจ็ทพุ่งชน X/D=0 และค่าจะลดลงอย่างต่อเนื่องที่ตำแหน่งห่างจากจุดที่เจ็ทพุ่งชนและจะมีค่าคงที่หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหลังจากนั้นจะค่อยๆลดลงอีกครั้งหนึ่ง และเมื่อเพิ่มระยะพุ่งชนจาก L=2D เป็น L=4D การกระจาย

ของนัสเซลต์นัมเบอร์มีแนวโน้มลดลงในช่วงแรก แต่ในช่วงหลังพบว่านัสเซลต์นัมเบอร์มีแนวโน้มที่สูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการไหลของเจ็ทใกล้กับปากทางออกท่อนั้นมีระดับความปั่นป่วนค่อนข้างต่ำ จึงทำให้ค่านัสเซลต์นัมเบอร์ลดลงในบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน แต่ในบริเวณโดยรอบค่านัสเซลต์นัมเบอร์อาจจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากระดับความปั่นป่วนของการไหลบนผนังสูงขึ้น และเมื่อเพิ่มระยะพุ่งชนเป็น L=6D พบว่าค่านัสเซลต์นัมเบอร์จะมีค่าสูงกว่ากรณี L=2D และ 4D เนื่องจากระดับความปั่นป่วนของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวมีค่าสูงขึ้น ถึงแม้ว่าความเร็วเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวจะลดลงก็ตาม และที่ระยะพุ่งชน L=8D พบว่านัสเซลต์นัมเบอร์จะมีค่าสูงที่สุดในช่วง $-5 \le X/D \le 5$ เมื่อเทียบกับระยะพุ่งชนอื่นๆ



รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงของนัสเซลต์นัมเบอร์บนแกน X ที่ผ่านจุดศูนย์กลางบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน (X/D,Y/D)=(0,0)

จากผลการทดลองใช้แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลในการศึกษาปรากฏการณ์ถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว พบว่าวิธีนี้สามารถดูการกระจายอุณหภูมิและลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้ด้วยตาเปล่า และหากใช้ร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์ภาพดิจิตอลแล้วสามารถวัดการกระจายของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

โครงการวิจัยได้ทำการทดลองใช้คุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงสีของแผ่นเทอร์โมลิกควิดคริสตอลในการวัดการกระจายอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว โดยได้ทำการสอบเทียบอุณหภูมิและสีที่แสดงบนแผ่นเทอร์โมลิกควิดคริสตอล และใช้ศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิว พบว่าวิธีนี้สามารถใช้สังเกตดูการกระจายอุณหภูมิและลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยตาเปล่า จึงเป็นวิธีที่สะดวกและเหมาะสำหรับการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว นอกจากนี้หากทำการบันทึกภาพและใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แล้ว จะสามารถคำนวณค่าการกระจายของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวได้ด้วย

แต่อย่างไรก็ตามวิธีที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้เป็นแบบวิธีสภาวะคงตัว อาศัยการเลื่อนตำแหน่งของแถบสีเมื่อเปลี่ยนฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวที่ทำการวัดอุณหภูมิ ต้องใช้เวลาในการทดลองและต้องถ่ายภาพเพื่อใช้ในการวิเคราะห์จำนวนมาก และมีข้อจำกัดคือไม่สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนทั่วทั้งพื้นผิวได้ จึงจำเป็นต้องพัฒนาวิธีวัดแบบสภาวะไม่คงตัวที่ต้องใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพที่มีความซับซ้อนมากในการวิเคราะห์ต่อไป

บรรณานุกรม

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. Baughn, J. W., Shimizu, S., 1989: Heat transfer measurements from a surface with uniform heat flux and an impinging jet. Journal of Heat Transfer, vol. 11, pp. 1096 – 1098
4. Camci, C., 1994: Liquid crystal thermography. Report of The Pennsylvania State University, Dept. of Aerospace Engineering, Center for Gas Turbines and Power
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). In: Heat Transfer 1998, Proc. of 11th IHTC, vol. 5, August 23-28, Kyongju, Korea