

ผลของสภาวะการหมุนที่มีต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนของกลุ่มเจ็ท พุ่งชนในช่องการไหล

EFFECT OF ROTATING CONDITION ON HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF IMPINGING JET ARRAY IN FLOW CHANNEL

ชานนท์ สติวรกุล และ ชยุต นันทกุล

สถานวิจัยเทคโนโลยีพลังงาน สาขาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคาทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110
Email: chayut.n@psu.ac.th

Manuscript Received November 18, 2023

Revised November 30, 2023

Accepted December 11, 2023

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทไหลปะทะในช่องการไหลภายใต้สภาวะหยุดนิ่งและหมุน ในการศึกษากลุ่มอากาศเจ็ทไหลถูกส่งออกจากรูออริฟิสนาเส้นผ่านศูนย์กลาง $D_j = 5$ mm จำนวน 3×11 รู มีรูปแบบการจัดเรียงกลุ่มเจ็ทเป็นแบบเรียงแถว (inline) โดยที่ระยะห่างระหว่างรูเจ็ท $S/D_j = 4$ และระยะพุ่งชนที่ $L/D_j = 2, 4$ และ 6 ในการทดลองกำหนดให้การไหลของเจ็ทมีเลขเรย์โนลด์สคงที่เท่ากับ 10,000 และความเร็วการหมุนของช่องการไหลที่ตัวเลขการหมุน $Ro = 0.0 - 0.0066$ (หรือความเร็วรอบเท่ากับ 400 รอบต่อนาที) ในการวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนได้ใช้แผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล (TLC) วัดการกระจายอุณหภูมิและคำนวณสัมประสิทธิ์การพาความร้อน จากผลการทดลองพบว่าภายใต้สภาวะการหมุนจะส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน เนื่องจากผลกระทบของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและคอริโอลิสต่อลำเจ็ทและกระแสไหลตัด ทำให้ค่าเลขนัสเซลต์บนพื้นผิวเพิ่มขึ้น 6.43 % สำหรับกรณีช่องการไหลหมุนด้าน leading เมื่อเทียบกรณีช่องการไหลหมุนด้าน trailing

คำสำคัญ: กลุ่มเจ็ทพุ่งชน เลขการหมุน การถ่ายเทความร้อน แผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล

ABSTRACT

In this paper, heat transfer characteristics in the flow channel under stationary and rotating conditions were studied. The array of jets from 3×11 of orifice holes with diameter $D_j = 5$ mm with the inline arrangement was studied at pitch distance $S/D_j = 4$ and the impingement distance $L/D_j = 2, 4$ and 6 . The jet flow was fixed with a Reynolds number of 10,000 and the rotation speed of the flow channel was varied between $Ro = 0.0 - 0.0066$ (or the speed of 400 rpm). The heat transfer was measured on the impingement surface using a Thermochromic Liquid Crystal (TLC) sheet to measure the temperature and calculate the convective heat transfer coefficient. Results showed that the rotational condition affected the heat transfer characteristics due to the effects of Centrifugal and Coriolis forces on the jet flow and cross flow. This caused the Nusselt number on the surface to be increase by 6.43 % for the case of leading side compared to that of the case of trailing side.

Keywords: Array impinging jet, Rotation number, Heat transfer, Thermochromic Liquid Crystal sheet

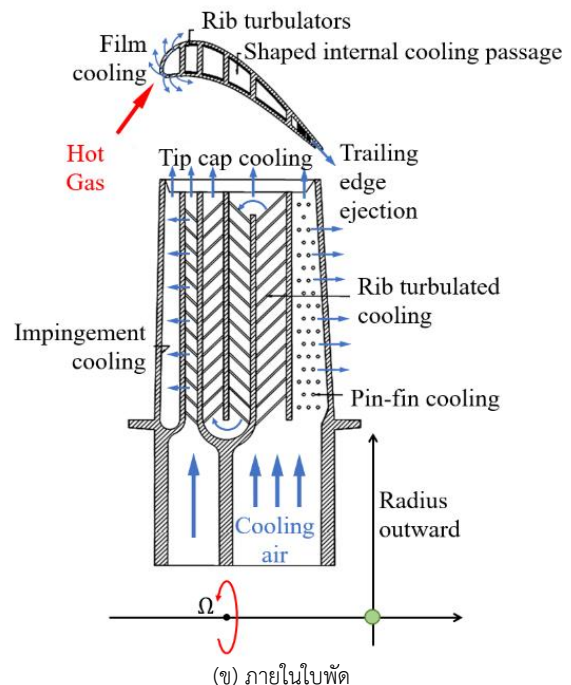
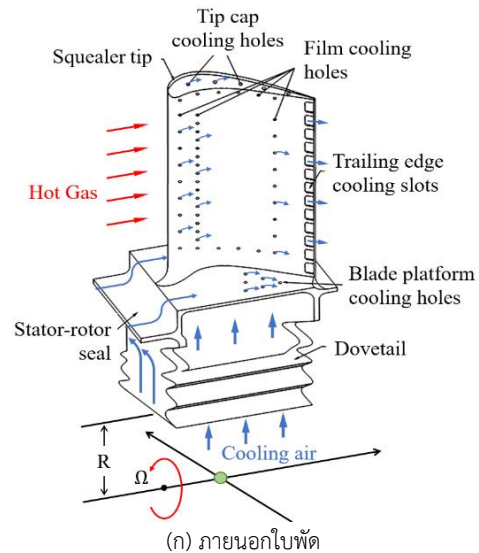
1. บทนำ

เครื่องยนต์กังหันแก๊สเป็นเครื่องยนต์ต้นกำลังที่มีสมรรถนะสูงเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์ประเภทลูกสูบ ปัจจุบันเครื่องยนต์กังหันแก๊สมีบทบาทสำคัญในโรงไฟฟ้าแบบ Combined Cycle อีกทั้งยังถูกนำไปใช้เป็นเครื่องยนต์ของอากาศยานอย่างแพร่หลายอันเนื่องมาจากการผลิตกำลังต่อน้ำหนักที่สูง ปัจจุบันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครื่องยนต์กังหันแก๊สจำเป็นต้องเพิ่มอุณหภูมิทางเข้ากังหันให้สูงขึ้น แต่จะถูกจำกัดด้วยอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของโลหะในส่วนของใบพัดกังหัน ระบบระบายความร้อนจึงมีความสำคัญสำหรับป้องกันใบพัดกังหันแก๊สจากความร้อน โดยระบบระบายความร้อนที่ใช้ทั่วไปแบ่งเป็นการระบายความร้อนภายนอกใบพัดที่ใช้ Film cooling และการระบายความร้อนภายในที่ใช้เจ็ทพุงชนผนังด้านในของใบพัด การดัดริบสร้างความเป็นป่วนในช่องการไหลวนกลับ และติดฟินบริเวณส่วนท้ายของใบพัด ดังแสดงเป็นตัวอย่างในรูปที่ 1 เพื่อลดผลกระทบจากอุณหภูมิที่สูงต่อใบพัดกังหัน และยืดอายุการใช้งานได้นานยิ่งขึ้น [1] – [5]

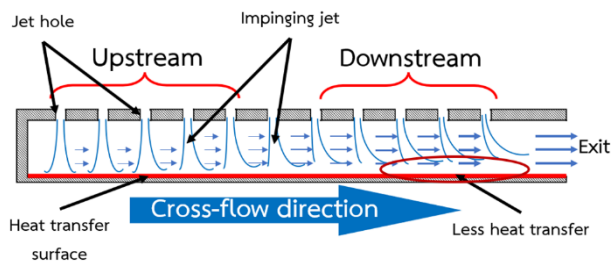
เจ็ทพุงชนเป็นการระบายความร้อนที่นิยมนำไปใช้ระบายความร้อนภายในใบพัดกังหัน โดยการใช้กลุ่มเจ็ทจากห้องไหลปะทะพื้นผิวของผนังด้านในของใบพัดกังหันเครื่องยนต์กังหันแก๊ส เนื่องจากเจ็ทพุงชนมีอัตราการระบายความร้อนเฉพาะจุดบนพื้นผิวที่สูง โดยที่ผ่านมามีหลายงานวิจัยได้ศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุงชน เช่น ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุงชน [6] การจัดเรียงของลำเจ็ทและกระแสไหลตัด [7] เป็นต้น อีกทั้งยังมีการศึกษาเจ็ทพุงชนในช่องการไหลที่หมุนเพราะในสภาวะการทำงานจริงของใบพัดกังหันเครื่องยนต์กังหันแก๊ส มีผลกระทบจากแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) และ แรงโคริโอลิส (Coriolis force) ซึ่งทำให้การถ่ายเทความร้อนและการไหลของเจ็ทพุงชนแตกต่างจากกรณีช่องการไหลหยุดนิ่ง [6,8]

ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของกลุ่มเจ็ทพุงชนในพื้นที่จำกัดหรือในช่องการไหลคือกระแสไหลตัด (Cross-flow) กระแสไหลตัดเป็นการไหลของของไหลที่ถูกกำหนดให้ไหลในทิศทางตั้งฉากกับการไหลของลำเจ็ทพุงชน ซึ่งเกิดจากการสะสมกระแสของของไหลหลังจากลำเจ็ทปะทะกับพื้นผิว ในกรณีลำเจ็ทพุงชนหลายลำในช่องการไหลที่มีทางออกเดียวดังแสดงในรูปที่ 2 ของไหลหลังจากการปะทะของเจ็ทพุงชนจะถูกสะสมจากบริเวณต้นทางกระแสไหลของช่องการไหล (Upstream) ไปยังบริเวณ

ปลายทางกระแสไหลของช่องการไหล (Downstream) จากนั้นจะไหลไปสู่ทางออก อัตราการไหลหรือความเร็วของกระแสไหลตัดจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนสูงที่สุดที่บริเวณปลายทางกระแสไหลของช่องการไหล ดังนั้น การไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุงชนจะได้รับอิทธิพลอย่างมากจากกระแสไหลตัดที่บริเวณปลายทางกระแสไหล



รูปที่ 1 รูปแบบการระบายความร้อนใบกังหันแก๊ส [4]



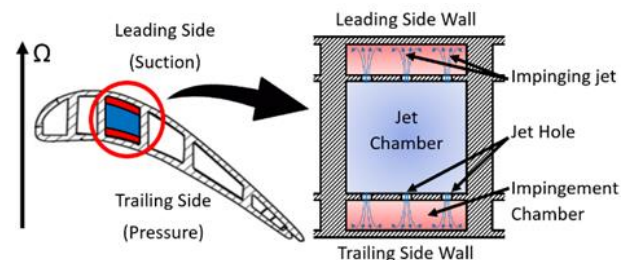
รูปที่ 2 อิทธิพลของกระแสไหลตัดต่อลำเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหล

ผลงานการวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงผลกระทบของกระแสไหลตัดต่อลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของกลุ่มเจ็ทพุ่งชน Florschuetz และคณะ [9] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของหมายเลขเซลล์ระหว่างการจัดเรียงแบบเรียงแถวและแบบสลับฟันปลาของกลุ่มเจ็ทในกรณีของระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงเจ็ทที่ $S/D_j > 4$ Katti และ Prabhu [10] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวปะทะของกลุ่มเจ็ทพุ่งชนที่มีรูปแบบการจัดเรียงแบบเรียงแถว ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงอัตราการถ่ายเทความร้อนของกลุ่มเจ็ทพุ่งชนที่มีระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงเจ็ทในแนวตั้งฉากกับกระแสไหลตัด (Spanwise Direction) สำหรับ $S/D_j=4$ นั้นสูงกว่า $S/D_j=2$ หรือ $S/D_j=6$ อย่างไรก็ตาม ระยะห่างระหว่างเจ็ทถึงเจ็ทในแนวนอนกับกระแสไหลตัดที่เหมาะสมที่สุดนั้นยังไม่มีข้อสรุป

ทั้งนี้ ยังมีงานวิจัยไม่มากนักเกี่ยวกับลักษณะการไหลของกลุ่มเจ็ทพุ่งชนที่มีผลกระทบจากกระแสไหลตัดและยากที่จะอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไหลตัดกับกระแสลำเจ็ทพุ่งชนในกรณีที่ม่กระแสลำเจ็ทพุ่งชนหลายลำเจ็ท เพื่อแสดงอัตราส่วนของความเร็วของลำเจ็ทต่อความเร็วกระแสไหลตัดที่มีอิทธิพลต่อการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชน จึงได้มีการทดลองเจ็ทพุ่งชนเดี่ยวโดยมีการจำลองกระแสไหลตัดขึ้น และในเวลาต่อมาได้มีการใช้การจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการศึกษาเจ็ทพุ่งชนเดี่ยวโดยมีการจำลองกระแสไหลตัด เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเจ็ทพุ่งชนและกระแสไหลตัด กรณีเจ็ทพุ่งชนหลายลำเจ็ทในปัจจุบันการจำลองเชิงตัวเลขจึงถูกนำมาใช้ในการศึกษา

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ายังมีการใช้เจ็ทพุ่งชนระบายความร้อนในบริเวณกลางใบพัดค่อนข้างน้อย และปัจจุบันด้วยโหลดทางความร้อนที่สูงขึ้นจากการเพิ่มอุณหภูมิที่ทางเข้าส่วนใบพัด ซึ่งนอกจากส่วนหัวของใบพัดแล้วบริเวณกลางใบพัดต้องการใช้เจ็ทพุ่งชนเพื่อเพิ่มการระบายความร้อน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนด้วยกลุ่มเจ็ทพุ่งชนโดยใช้แผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล (TLC) โดยพิจารณาผลของระยะพุ่งชนที่ $L/D_j = 2, 4$ และ 6 โดย D_j คือเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเจ็ทที่มีค่าเท่ากับ 5 mm ระยะห่างระหว่างกลางเจ็ทที่ $S/D_j = 4$ กำหนดเลขเรย์โนลด์ส (Re) คงที่เท่ากับ $10,000$ ภายใต้สภาวะการหมุนของช่องการไหลที่ตัวเลขการหมุน $Ro = 0.0 - 0.0066$ โดยลักษณะของรูเจ็ทเป็นแบบออริฟิสเจ็ท (Orifice nozzle) เป็นเจ็ทแบบกลุ่มจำนวน 3×11 รู และกำหนดรูปแบบการจัดเรียงตำแหน่งของกลุ่มรูเจ็ทแบบเรียงแถว (In-line) โดยโมเดลที่ใช้ในการทดลองจะจำลองมาจากช่องการไหลที่บริเวณกลางใบพัดที่ใช้เจ็ทพุ่งชนระบายความร้อนที่ผนังด้านท้อง (Suction side) และด้านหลัง (Pressure side) ดังแสดงในรูปที่ 3 ทิศทางการหมุนของช่องการไหลที่ทำให้เกิดผนังด้าน Leading และ Trailing โดยถ้าหากทิศทางการหมุนมีทิศทางเดียวกับเจ็ทพุ่งชนจะทำให้เกิดผนังด้าน Leading และถ้าหากทิศทางการหมุนมีทิศตรงกันข้ามกับทิศทางของเจ็ทพุ่งชนจะทำให้เกิดผนังด้าน Trailing



รูปที่ 3 การจำลองโมเดลจากช่องการไหลบริเวณกลางใบพัด

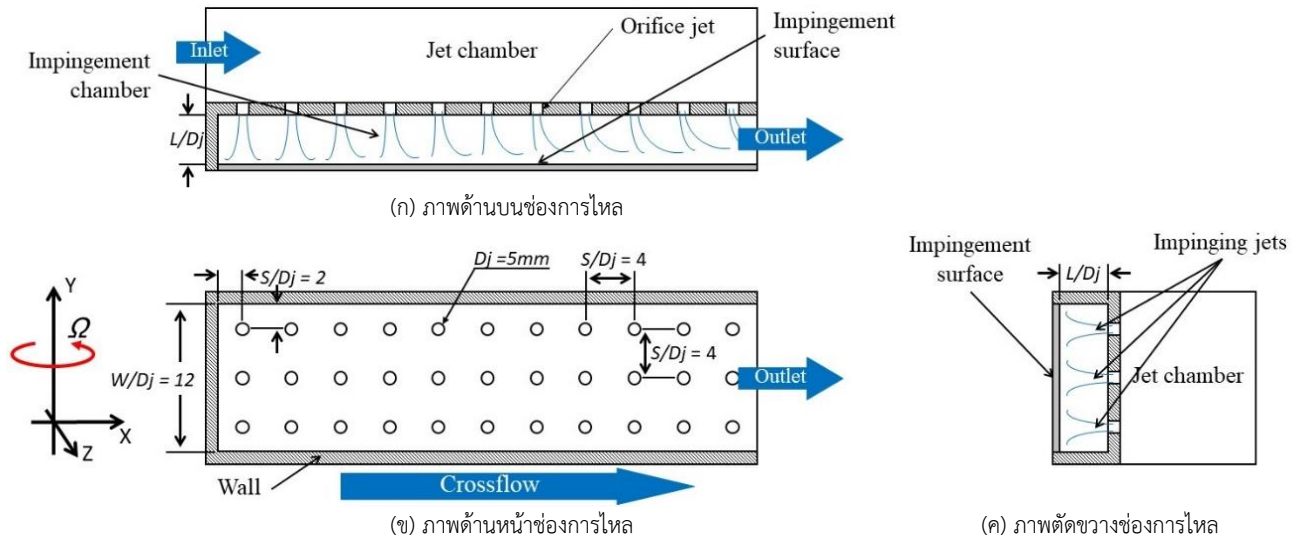
2. ขุดทดลองและวิธีการทดลอง

2.1 โมเดลและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 4 แสดงโมเดลของช่องการไหลที่ใช้ในการศึกษาที่จำลองมาจากช่องการไหลในบริเวณกลางใบพัดโดยใช้กลุ่มเจ็ทพุ่งชนระบายความร้อนที่ผนังในช่องการไหลที่หมุน โดยช่องการไหลที่หมุนรอบแกน Y มีลักษณะของกลุ่มเจ็ทเป็นแบบออริฟิสเจ็ท (Orifice nozzle) ที่มีรูปแบบการจัดเรียงตำแหน่งของกลุ่มรูเจ็ทเป็นแบบเรียงแถว โดยอากาศที่ไหลเข้าสู่ส่วนทดสอบจะไหลเข้าห้องพักอากาศ (Jet chamber) หลังจากนั้นอากาศจะไหลผ่านแผ่นอลูมิเนียมหนา 3 mm ที่เจาะรูเจ็ทที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจ็ท $D_j = 5 \text{ mm}$

จำนวน 3×11 รู ระยะห่างระหว่างกลางรูที่ $S/D_j = 4$ และพุ่งออกจากรูเจ็ทจากนั้นปะทะกับพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่มีลักษณะ

ความร้อนคงที่ที่ประมาณ 1050 W/m^2 โดยช่องการไหลมีความกว้าง $W/D_j = 12$



รูปที่ 4 รายละเอียดโมเดลของช่องการไหลที่ใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองที่ระยะพุ่งชน $L/D_j = 2, 4$ และ 6 กำหนดค่า Re เท่ากับ $10,000$ โดยอากาศที่ปะทะกับพื้นผิวถ่ายเทความร้อนแล้วจะถูกบังคับให้ออกที่ทางออก ในการทดลองควบคุมอุณหภูมิอากาศทางเข้าส่วนทดสอบที่ $27.0 \pm 0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และควบคุมอุณหภูมิห้องทดลองที่ $26.0 \pm 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

ตารางที่ 1 รายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง

ตัวแปร	กำหนดค่า
เส้นผ่านศูนย์กลางรูเจ็ท (D_j)	5 mm
ฟลักซ์ความร้อน ($\dot{q}$)	1050 W/m^2
อุณหภูมิอากาศเข้า (T_i)	$27.0 \pm 0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$
ระยะห่างระหว่างเจ็ท (S/D_j)	4
ระยะพุ่งชน (L/D_j)	2, 4 และ 6
ตัวเลขเรย์โนลด์ (Re)	10,000
ตัวเลขการหมุน (Ro)	0.0 – 0.0066

2.2 ชุดทดลอง

ชุดทดสอบสำหรับการถ่ายเทความร้อนของกลุ่มเจ็ทพุ่งชนใน

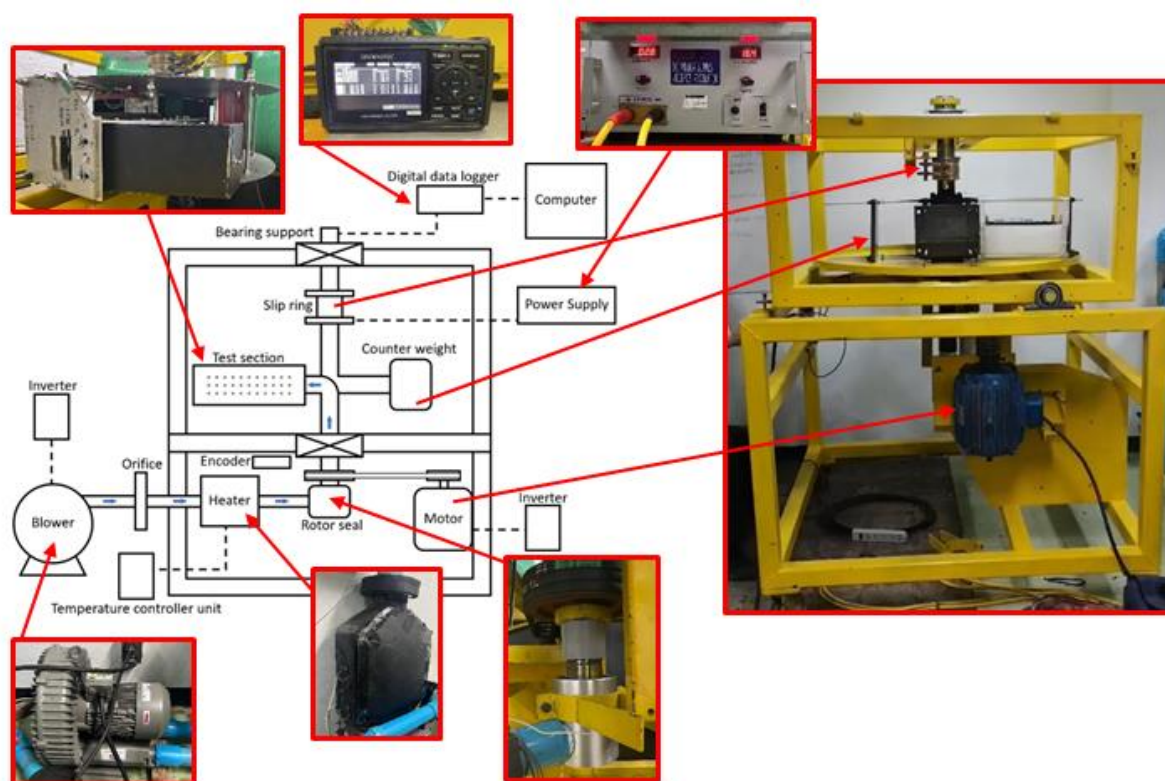
ช่องการไหลที่หมุนรองรับด้วยโครงเหล็กขนาด $1.5 \times 1.5 \times 1.65 \text{ m}^3$ ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนการหมุน ส่วนจ่ายฟลักซ์ความร้อน และส่วนจ่ายอากาศ

สำหรับส่วนการหมุน ส่วนทดสอบจะถูกติดตั้งไว้บนแกนหมุนด้านหนึ่งที่กำลังหมุนและปรับสมดุลด้วยน้ำหนักถ่วงที่แกนหมุนด้านตรงข้าม แกนหมุนจะถูกติดตั้งกับเพลาลูกกลางที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 80 mm และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 65 mm และถูกยึดไว้ด้วยแบร์ริง (Bearing) สองตัวและซีลหมุน (Rotor Seal) ที่มีขนาด 50 mm สำหรับจ่ายอากาศเข้าสู่ส่วนทดสอบผ่านเพลาลูกกลางขณะกำลังหมุน ในการหมุนจะใช้มอเตอร์ขนาด 7.46 kW ที่ควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ขับเคลื่อนเพลาลูกกลางผ่านสายพานวี สำหรับการวัดความเร็วในการหมุนของส่วนทดสอบใช้เอ็นโค้ดเดอร์ดิจิทัล (Digital-Encoder)

สำหรับส่วนจ่ายฟลักซ์ความร้อน สลิปริง (Slip Ring) ที่มีหน้าสัมผัสทองแดงที่สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ดีจะติดตั้งอยู่บนเพลาลูกกลาง เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC-Power Supply) จ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านตัวนำคาร์บอนสองตัวที่สัมผัสกับหน้าสัมผัสทองแดงของสลิปริงเข้าสู่ส่วนทดสอบเพื่อสร้างฟลักซ์ความร้อนคงที่

ไหลผ่านฮีตเตอร์ (Heater) เพื่อควบคุมอุณหภูมิอากาศ หลังจากนั้น
อากาศไหลจะเข้าสู่ซิลลุ่มนและเข้าสู่เพลากลวงหมุนก่อนเข้าสู่ส่วน
ทดสอบ

ไหลผ่านฮีตเตอร์ (Heater) เพื่อควบคุมอุณหภูมิอากาศ หลังจากนั้น
อากาศไหลจะเข้าสู่ซิลลุ่มนและเข้าสู่เพลากลวงหมุนก่อนเข้าสู่ส่วน
ทดสอบ



รูปที่ 5 แผนภาพชุดทดลอง

2.3 ส่วนทดสอบ

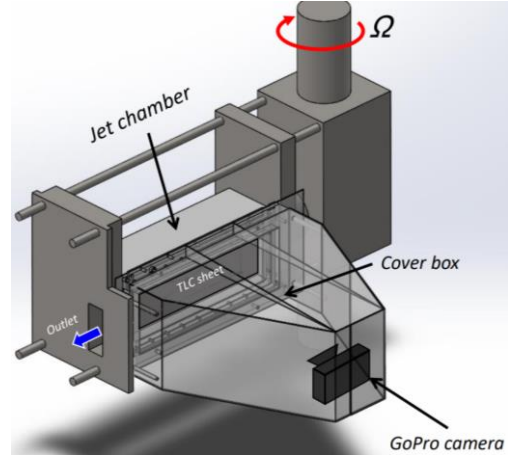
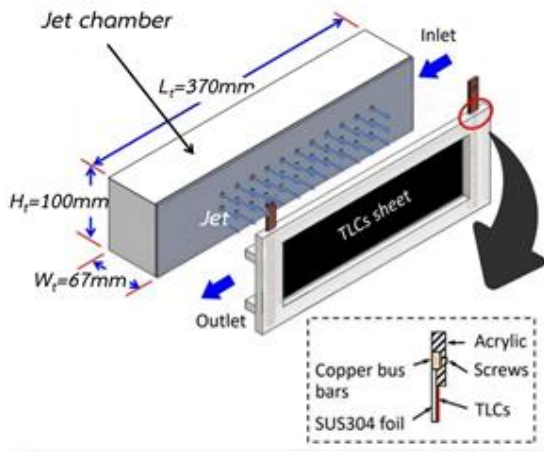
รูปที่ 6 แสดงรายละเอียดของส่วนทดสอบ โดยอากาศจากเพลากลวงที่ไหลเข้าส่วนทดสอบจะเข้ามาที่ห้องพักอากาศ (Jet chamber) หลังจากนั้นจะไหลผ่านรูเจ็ทขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D_j = 5 \text{ mm}$ จำนวน 3×11 รู ที่เจาะบนแผ่นอลูมิเนียมหนา 3 mm ดังแสดงในรูปที่ 3 เข้าปะทะกับผนังพื้นผิวถ่ายเทความร้อนแผ่นสแตนเลสบางที่ถูกซิงให้เรียบติดกับแผ่นอะคริลิกหนา 10 mm ที่เจาะหน้าต่างขนาด $60 \times 220 \text{ mm}^2$ ไว้กลางแผ่น โดยใช้แท่งทองแดงยึดแผ่นสแตนเลสบาง (Stainless foil) ไว้ทั้งสองข้าง แท่งทองแดงทั้งสองนี้จะต่อเข้ากับขั้วของตัวจ่ายกระแสไฟฟ้า (DC-Power supply) เพื่อสร้างฟลักซ์ความร้อนคงที่ 1050 W/m^2 และ

ด้านหลังของแผ่นสแตนเลสจะถูกติดด้วยแผ่น ThermoChromic Liquid Crystal (TLC) สำหรับแสดงการกระจายของอุณหภูมิซึ่งมีช่วงของการวัดอุณหภูมิที่ 30 ถึง 35 °C สำหรับการบันทึกการเปลี่ยนแปลงสีของ TLC จะใช้กล้องดิจิตอลบันทึก และภาพที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์แปลงข้อมูลสีเป็นอุณหภูมิ ก่อนที่จะคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนหรือค่าตัวเลขนัสเซลต์บนพื้นผิว

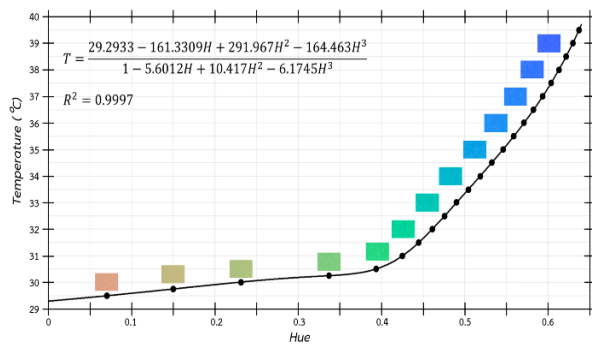
ในการทดลอง ได้มีการทดสอบเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเฉดสี (Hue) และอุณหภูมิของแผ่น TLC บนพื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 7 ข้อมูลทั้งหมดจะถูกบันทึกด้วย Datalogger ผ่านเทอร์โมคัปเปิลชนิด T เมื่อสีหรืออุณหภูมิ TLC ที่ด้านหลังของพื้นผิวการปะทะถึงสภาวะคงที่ ลักษณะของเฉดสี TLC จะถูกบันทึกภาพด้วยกล้องดิจิทัล จากนั้นข้อมูลภาพบนแผ่น TLC จะถูกแปลงจากระบบสี

RGB (แดง เขียว และน้ำเงิน) ไปเป็นค่า Hue และแปลงข้อมูลสีเป็นอุณหภูมิ ก่อนที่จะคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนหรือค่า

ตัวเลขนัสเซลต์บนพื้นผิว



รูปที่ 6 รายละเอียดของส่วนทดสอบ



รูปที่ 7 การทดสอบเปรียบเทียบความสัมพันธ์และสมการระหว่างเฉดสี (Hue) และอุณหภูมิ ของแผ่น TLC

3. สมการที่ใช้ในการคำนวณ

เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านแท่งทองแดงไปยังแผ่นสแตนเลสบาง จะเกิดความร้อนขึ้นทั่วทั้งบริเวณแผ่นสแตนเลสบาง ซึ่งฟลักซ์การเกิดความร้อนนี้สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\dot{q}_{input} = \frac{IV}{A} \quad (1)$$

เมื่อ I คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่าย V คือ แรงดันไฟฟ้า และ A คือ พื้นที่ของพื้นผิวถ่ายเทความร้อน

สำหรับการทดลองนี้จะใช้อากาศที่ประมาณอุณหภูมิห้องไหลผ่านพื้นผิวที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่เพื่อระบายความร้อน ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$h = \frac{\dot{q}_{input} - \dot{q}_{loss, convection} - \dot{q}_{loss, radiation}}{T_w - T_m} \quad (2)$$

$$\dot{q}_{loss, convection} = h_c (\bar{T}_w - \bar{T}_{surr}) \quad (3)$$

$$\dot{q}_{loss, radiation} = \sigma \epsilon_{TLC} (\bar{T}_w^4 - \bar{T}_{surr}^4) \quad (4)$$

เมื่อ $\dot{q}_{loss, convection}$ และ $\dot{q}_{loss, radiation}$ คือ ฟลักซ์การสูญเสียความร้อนที่เกิดจากการพาความร้อนและการแผ่รังสีจากแผ่น TLC ไปสู่บรรยากาศ ตามลำดับ σ คือค่าคงที่ Stefan-Boltzmann และ ϵ_{TLC} คือสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีสำหรับแผ่น TLC ซึ่งเท่ากับ 0.9

สำหรับ T_w คือ อุณหภูมิบนพื้นผิวของแผ่น TLC และ T_m คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศที่ไหลผ่านชุดทดสอบสามารถคำนวณได้จาก

$$T_m = \frac{T_i + T_o}{2} \quad (5)$$

เมื่อ T_i คือ อุณหภูมิก่อนเข้าสู่ชุดทดสอบและ T_o คือ อุณหภูมิหลังเข้าสู่ชุดทดสอบ

จากสมการ (2) สามารถคำนวณหาค่าตัวเลขนัสเซิลต์ (Nusselt number, Nu) ได้จากสมการ

$$Nu = \frac{hD_j}{k} \quad (6)$$

ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ส (Reynolds number, Re) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ ดังนี้

$$Re = \frac{V_j D_j}{\nu} \quad (7)$$

เมื่อ D_j คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจ็ทที่มีขนาดเท่ากับ 5 mm, ν คือ ความหนืดเชิงจลน์ของอากาศและ V_j คือ ความเร็วของอากาศที่กึ่งกลางปากทางออกเจ็ท

สำหรับค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty) อันเนื่องมาจากการวัดของการทดลองนั้นน้อยกว่า 4.2% สำหรับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ และ น้อยกว่า 3.8% สำหรับค่าตัวเลขนัสเซิลต์และ น้อยกว่า 2.9% สำหรับค่าตัวเลขการหมุน

4. ผลการทดลอง

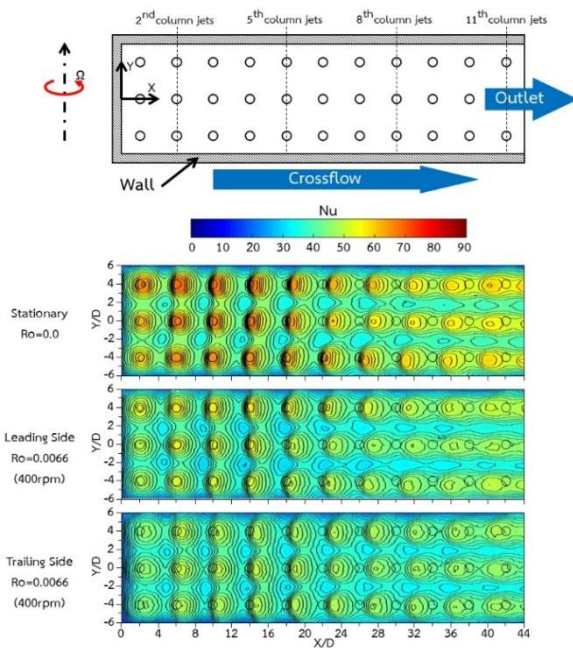
4.1 การกระจายค่าเลขนัสเซิลต์

จากการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนด้วยกลุ่มเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลที่หมุน โดยจะเปรียบเทียบกันระหว่างผลการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวในช่องการไหลที่หมุน และหยุดนิ่ง ในกรณีระยะพุ่งชน (L/D_j) ที่ 2, 4 และ 6

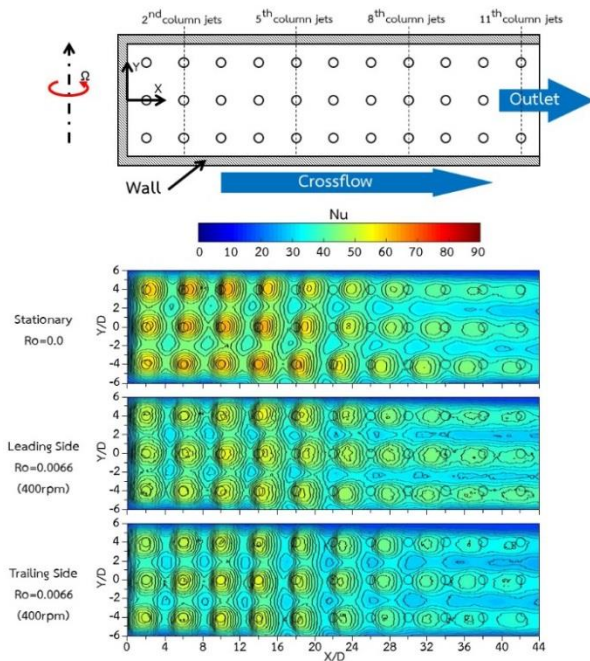
รูปที่ 8 แสดงการกระจายตัวของค่าเลขนัสเซิลต์บนพื้นผิว แลกเปลี่ยนความร้อน เปรียบเทียบระหว่างพื้นผิวด้าน Leading และ Trailing ($Ro = 0.0066$) กับกรณีหยุดนิ่ง ($Ro = 0.0$) ภายใต้ตัวเลขเรย์โนลด์ที่ 10,000 พิจารณาที่ระยะพุ่งชน $L/D_j = 2$ พบว่าค่าเลขนัสเซิลต์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่บริเวณต้นทางกระแสไหลของช่องการไหล ($0 \leq X/D_j \leq 20$) จะให้ค่าสูงที่ตำแหน่งเจ็ทและจะค่อยๆ ลดลงตามแนวรัศมี เมื่อพิจารณาพื้นผิวบริเวณปลายทางกระแสไหลของช่องการไหล ($24 \leq X/D_j \leq 44$) ค่าเลขนัสเซิลต์ค่อย ๆ ลดลงจากบริเวณต้นทางกระแสไหลเนื่องจากอิทธิพลของกระแสไหลตัดต่อลำเจ็ท ทำให้ลำเจ็ทถูกเบี่ยงเบนไปตามทิศทางของกระแสไหลตัด และโมเมนต์การพุ่งชนบนพื้นผิวของลำเจ็ทลดลง นอกจากนี้ผลของการหมุนส่งผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสำหรับกรณีพื้นผิวด้าน Leading เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีพื้นผิวด้าน Trailing เนื่องจากผลกระทบของความเร่งโคริโอลิส และความเร่งหนีศูนย์กลาง

รูปที่ 9 แสดงการกระจายตัวของค่าเลขนัสเซิลต์บนพื้นผิว แลกเปลี่ยนความร้อน เปรียบเทียบระหว่างพื้นผิวด้าน Leading และ Trailing ($Ro = 0.0066$) กับกรณีหยุดนิ่ง ($Ro = 0.0$) ภายใต้ตัวเลขเรย์โนลด์ที่ 10,000 พิจารณาที่ระยะพุ่งชน $L/D_j = 4$ พบว่าค่าเลขนัสเซิลต์บนพื้นผิวมีลักษณะถ่ายเทความร้อนเช่นเดียวกันกับกรณีระยะพุ่งชน $L/D_j = 2$ แต่ให้ค่าเลขนัสเซิลต์ต่ำกว่าเนื่องจากระยะพุ่งชนที่เพิ่มขึ้นทำให้โมเมนต์การพุ่งชนของกลุ่มเจ็ทพุ่งชนต่ำลง

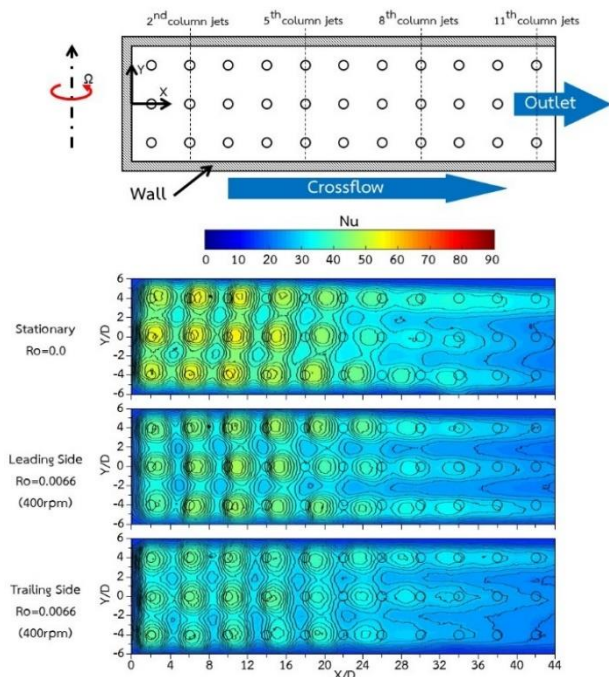
รูปที่ 10 แสดงการกระจายตัวของค่าเลขนัสเซิลต์บนพื้นผิว แลกเปลี่ยนความร้อน เปรียบเทียบระหว่างพื้นผิวด้าน Leading และ Trailing ($Ro = 0.0066$) กับกรณีหยุดนิ่ง ($Ro = 0.0$) ภายใต้ตัวเลขเรย์โนลด์ที่ 10,000 พิจารณาที่ระยะพุ่งชน $L/D_j = 6$ พบว่าค่าเลขนัสเซิลต์บนพื้นผิวมีลักษณะถ่ายเทความร้อนเช่นเดียวกันกับกรณีระยะพุ่งชน $L/D_j = 2$ และ 4 และให้ค่าเลขนัสเซิลต์ลดลงเนื่องจากโมเมนต์การพุ่งชนของกลุ่มเจ็ทพุ่งชนต่ำลงตามระยะพุ่งชนที่เพิ่มขึ้น



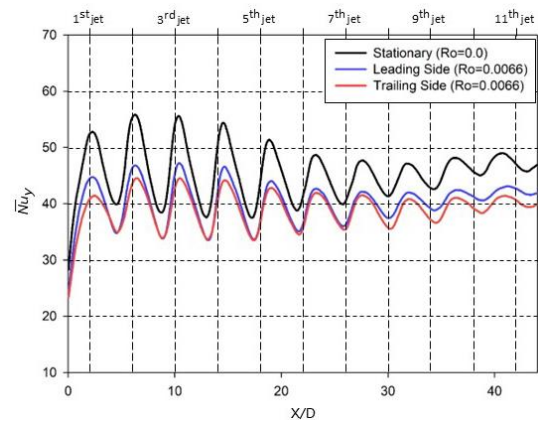
รูปที่ 8 การกระจายตัวของค่าเลขนัสเซิลต์บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเปรียบเทียบกรณีพื้นผิวด้าน Leading และ Trailing ($Ro = 0.0066$) กับกรณีหยุดนิ่ง ($Ro = 0.0$) ที่ระยะพ่วงชน $L/D_j = 2$



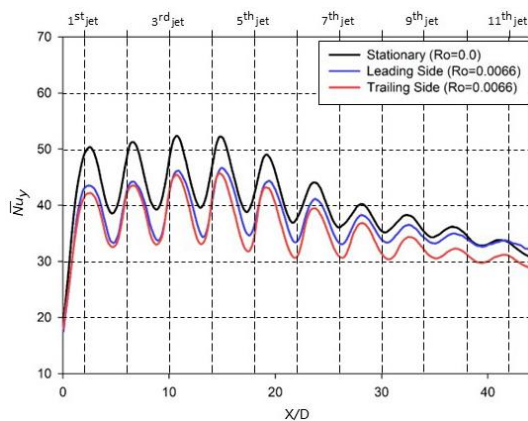
รูปที่ 9 การกระจายตัวของค่าเลขนัสเซิลต์บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเปรียบเทียบกรณีพื้นผิวด้าน Leading และ Trailing ($Ro = 0.0066$) กับกรณีหยุดนิ่ง ($Ro = 0.0$) ที่ระยะพ่วงชน $L/D_j = 4$



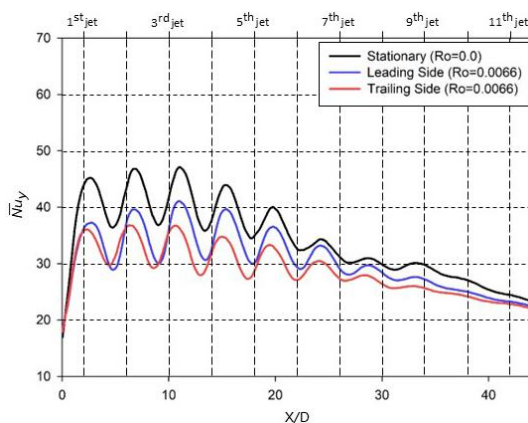
รูปที่ 10 แสดงการกระจายตัวของค่าเลขนัสเซิลต์บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเปรียบเทียบกรณีพื้นผิวด้าน Leading และ Trailing ($Ro = 0.0066$) กับกรณีหยุดนิ่ง ($Ro = 0.0$) ที่ระยะพ่วงชน $L/D_j = 6$



รูปที่ 11 แสดงตัวเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยตามแนวแกน Y (Spanwise average Nusselt number) ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D_j ที่เพิ่มขึ้นบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่ $Re=10,000$ ที่ระยะพ่วงชน $L/D_j = 2$



รูปที่ 12 แสดงตัวเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยตามแนวแกน Y (Spanwise average Nusselt number) ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D_j ที่เพิ่มขึ้นบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่ $Re=10,000$ ที่ระยะพุงชน $L/D_j = 4$



รูปที่ 13 แสดงตัวเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยตามแนวแกน Y (Spanwise average Nusselt number) ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D_j ที่เพิ่มขึ้นบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่ $Re=10,000$ ที่ระยะพุงชน $L/D_j = 6$

ในรูปที่ 11, 12 และ 13 แสดงการกระจายของตัวเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยตามแนวแกน Y (Spanwise average Nusselt number) ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D_j ที่เพิ่มขึ้นบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ระยะพุงชน $L=2D, 4D, 6D$ โดยหาจากการเฉลี่ยตัวเลขนัสเซิลต์ตามแนวแกน Y ที่ตำแหน่ง X/D_j ต่าง ๆ ในรูปที่ 8, 9 และ 10 ตามลำดับ

พิจารณากรณีที่ระยะพุงชน $L/D_j = 2$ พบว่าค่าตัวเลขนัสเซิลต์สูงสุดที่บริเวณต้นทางกระแสไหลของช่องการไหล ($0 \leq X/D_j \leq 20$) และจะค่อย ๆ ลดลงที่บริเวณปลายทางกระแสไหลของช่องการไหล ($20 \leq X/D_j \leq 44$) เนื่องจากผลของกระแสไหลตัด สำหรับกรณีพื้นผิวด้าน Leading ($Ro=0.0066$) ค่าตัวเลขนัสเซิลต์จะสูงกว่าที่บริเวณต้นทางและปลายทางกระแสไหลของช่องการไหล ($0 \leq X/D_j \leq 44$) เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีพื้นผิวด้าน Trailing ($Ro=0.0066$) แต่จะต่ำกว่าทั้งในบริเวณต้นทางและปลายทางกระแสไหลของช่องการไหลเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีหยุดนิ่ง ($Ro=0.0$) เนื่องจากผลของความเร่งโคริโอลิสและความเร่งหนีศูนย์กลางรบกวนโมเมนต์การหมุนของลำเจ็ทลดลงที่บริเวณต้นทางกระแสไหลของช่องการไหล ส่วนบริเวณปลายทางกระแสไหลของช่องการไหล ผลจากความเร่งหนีศูนย์กลางจะเพิ่มขึ้นรวมถึงผลจากกระแสไหลที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าตัวเลขนัสเซิลต์ลดลง

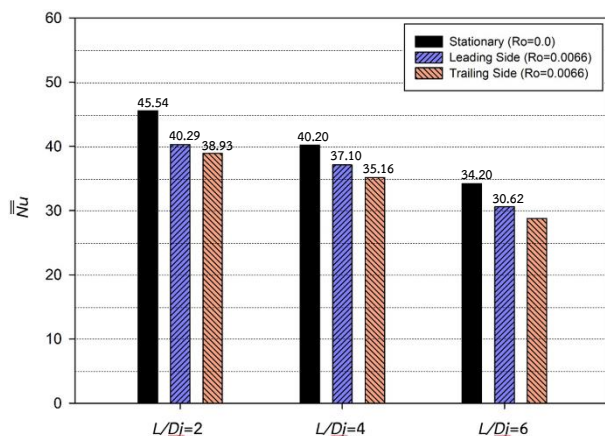
พิจารณากรณีที่ระยะพุงชน $L/D_j = 4$ พบว่าค่าตัวเลขนัสเซิลต์สูงสุดที่บริเวณต้นทางกระแสไหลของช่องการไหล ($0 \leq X/D_j \leq 20$) และจะค่อย ๆ ลดลงที่บริเวณปลายทางกระแสไหลของช่องการไหล ($20 \leq X/D_j \leq 44$) เนื่องจากผลของกระแสไหลตัด สำหรับกรณีพื้นผิวด้าน Leading ($Ro=0.0066$) ค่าตัวเลขนัสเซิลต์จะสูงกว่าที่บริเวณต้นทางและปลายทางกระแสไหลของช่องการไหล ($0 \leq X/D_j \leq 44$) เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีพื้นผิวด้าน Trailing ($Ro=0.0066$) และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีหยุดนิ่ง ค่าตัวเลขนัสเซิลต์จะต่ำกว่าที่บริเวณต้นทางกระแสไหลของช่องการไหล ($0 \leq X/D_j \leq 28$) แต่จะให้ค่าตัวเลขนัสเซิลต์ใกล้เคียงกันที่บริเวณปลายทางกระแสไหลของช่องการไหลสำหรับกรณีพื้นผิวด้าน Leading และ Trailing เนื่องจากผลของความเร่งโคริโอลิสต่อลำเจ็ทและกระแสไหลตัดลดลงเมื่อเทียบกับกรณีระยะพุงชน $L/D_j = 2$

พิจารณากรณีที่ระยะพุงชน $L/D_j = 6$ พบว่าให้ค่าตัวเลขนัสเซิลต์ ในทำนองเดียวกันกับกรณีที่ระยะพุงชน $L/D_j = 4$ สำหรับกรณีพื้นผิวด้าน Leading ($Ro=0.0066$) ค่าตัวเลขนัสเซิลต์จะสูงกว่าที่บริเวณต้นทาง และปลายทางกระแสไหลของช่องการไหล เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีพื้นผิวด้าน Trailing ($Ro=0.0066$) และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีหยุดนิ่ง ค่าตัวเลขนัสเซิลต์จะต่ำกว่าที่บริเวณต้นทางกระแสไหลของช่องการไหล แต่จะให้ค่าตัวเลขนัสเซิลต์ใกล้เคียงกันที่บริเวณปลายทางกระแสไหลของช่องการไหล สำหรับ

กรณีพื้นผิวด้าน Leading และ Trailing เนื่องจากผลของความเร่งโคริโอลิสต่อลำเจ็ทและกระแสไหลตัดลดลง

4.2 ค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยบนพื้นผิว

รูปที่ 14 การเปรียบเทียบค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนพิจารณา Leading และ Trailing กับกรณี Stationary ที่ระยะพุงชน $L/D_j = 2, 4$ และ 6 เมื่อพิจารณาค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยบนพื้นผิวด้าน Leading และ Trailing เปรียบเทียบกับกรณีหยุดนิ่ง พบว่ากรณีพื้นผิวด้าน Leading ตัวเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยสูงกว่ากรณีพื้นผิวด้าน Trailing อย่างไรก็ตามตัวเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยทั้งด้าน Leading และ Trailing มีค่าต่ำกว่ากรณีหยุดนิ่ง โดยที่ระยะพุงชน $L/D_j = 2$ ตัวเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยพื้นผิวด้าน Leading เทียบกับกรณีด้าน Trailing จะให้ค่าสูงกว่า 3.49 % และเมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่งจะให้ค่าลดลง 11.53 % ที่ระยะพุงชน $L/D_j = 4$ ตัวเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยพื้นผิวด้าน Leading เทียบกับกรณีด้าน Trailing จะให้ค่าสูงกว่า 5.52 % และเมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่งจะให้ค่าลดลง 7.71 % และที่ระยะพุงชน $L/D_j = 6$ ตัวเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยพื้นผิวด้าน Leading เทียบกับกรณีด้าน Trailing จะให้ค่าสูงกว่า 6.43 % และเมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่งจะให้ค่าลดลง 10.47 %



รูปที่ 14 การเปรียบเทียบค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนพิจารณา Leading และ Trailing กับกรณี Stationary ที่ระยะพุงชน $L/D_j = 2, 4$ และ 6

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ผลจากความเร่งหนีศูนย์กลางและโคริโอลิสทำให้การถ่ายเทความร้อนบนผนังแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยเจ็ทพุงชนที่บริเวณต้นทางกระแสไหลของช่องการไหล ($0 \leq X/D_j \leq 20$) ลดลงสำหรับกรณีช่องการไหลหมุนทั้งด้าน Leading และ Trailing ($Ro=0.0066$) เมื่อเทียบกับกรณีช่องการไหลหยุดนิ่ง แต่ที่บริเวณปลายทางของช่องการไหล ($24 \leq X/D_j \leq 44$) จะมีการถ่ายเทความร้อนที่ใกล้เคียงกันเมื่อระยะพุงชน (L/D_j) เพิ่มขึ้น เนื่องจากอิทธิพลของกระแสไหลตัดรบกวนกลุ่มลำเจ็ท ทำให้โมเมนตัมการชนของเจ็ทพุงชนต่อผนังที่ลดลง
2. การถ่ายเทความร้อนบนผนังแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยเจ็ทพุงชน การหมุนของช่องการไหลสำหรับกรณีพื้นผิวด้าน Leading ($Ro=0.0066$) สูงกว่ากรณีพื้นผิวด้าน Trailing ($Ro=0.0066$) เนื่องจากผลของความเร่งโคริโอลิส
3. การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยทั้งผนังแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยกลุ่มเจ็ทพุงชนจะให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 6.43 % สำหรับกรณีช่องการไหลหมุนด้าน Leading เมื่อเทียบกับกรณีช่องการไหลหมุนด้าน Trailing แต่จะให้ค่าลดลง 10.47 % สำหรับกรณีช่องการไหลหมุนด้าน Trailing เมื่อเทียบกับกรณีช่องการไหลหยุดนิ่ง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Siddique, W., Khan, N.A. and Haq, I., "Analysis of numerical results for two-pass trapezoidal channel with different cooling configurations of trailing edge: the effect of dimples," Applied Thermal Engineering, Vol. 89, pp.763 – 771, 2015.
- [2] Chen, Y., Chew, Y.T. and Khoo, B.C., "Heat transfer and flow structure in turbulent channel flow over protrusions," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 66, pp. 177 – 191, 2013.
- [3] Wang, C., Liu, Z.L., Zhang, G.M. and Zhang, M., "Experimental investigations of flat plate heat pipes with interlaced narrow grooves or channels as capillary structure," Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 48, pp. 222 – 229, 2013.
- [4] Han, J.C. and Chen, H.C., "Turbine blade internal cooling passages with rib turbulators," Journal of Propulsion and Power, Vol. 22, pp. 226 – 248, 2006.
- [5] Kaewchoothong, N., Maliwan, K., Takeishi, K. and Nuntadusit, C., "Effect of rotation number on flow and heat transfer characteristics in serpentine passage with ribbed walls," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 32, pp. 4461 – 4471, 2018.
- [6] Lamont, J.A., Ekkad, S.V. and Alvin, M.A., "Effects of rotation on heat transfer for a single row jet impingement array with crossflow," Journal of Heat Transfer, Vol. 134, pp. 082202, 2012.
- [7] Wae-hayee, M., Tekasakul, P. and Nuntadusit, C., "Influence of

- nozzle arrangement on flow and heat transfer characteristics of arrays of circular impinging jets,” Songklanakarin Journal of Science and Technology, Vol. 35(2), pp. 203 - 212, 2013.
- [8] Elston, C.M. and Wright, L.M., “Leading edge jet impingement under high rotation numbers”, Journal of Thermal Science and Engineering Applications, Vol. 120, pp. 368 - 375, 2015.
- [9] Florschuetz, L.W., Truman, C.R. and Metzger, D.E., “Streamwise flow and heat transfer distributions for jet array impingement with crossflow”, ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 103, pp. 337 - 342, 1981.
- [10] Katti, V. and Prabhu, S.V., “Influence of spanwise pitch on local heat transfer distribution for in-line arrays of circular jets with spent air flow in two opposite directions,” Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 33(1), pp. 84 - 95, 2008.



ชานนท์ สธิวรกุล สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกลและการออกแบบจากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา และกำลังศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคาทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ งานวิจัยที่สนใจคือ การไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชน



ชยุต นันทคุลิต สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาบัณฑิต มหาบัณฑิต และดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชา Mechanical Engineering จากสถาบัน Osaka University ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ งานวิจัยที่สนใจ ได้แก่ การถ่ายมวลและเทพลังงานความร้อนในอุปกรณ์และกระบวนการ