

ผลของการสั่นของการไหลเจ็ทที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

Effect of Pulsating Jet Flow on the Heat Transfer of Jet Impingement

เอกพจน์ วิเชียรโชติ¹, มัฏฐาร์ แวหะยี่¹ และ ชยุต นันทดลิต^{1*}¹ สถานวิจัยเทคโนโลยีพลังงานและภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา

90112

*ติดต่อ: E-mail: chayut@me.psu.ac.th โทรศัพท์: 074 287 036, โทรสาร: 074 558 830

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลของการไหลของเจ็ทแบบสั่นที่มีต่อการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทไหลพุ่งชน ในการทดลองได้สร้างอุปกรณ์สร้างการไหลแบบสั่นของเจ็ทอากาศโดยใช้วาล์วควบคุมที่ต่อกับมอเตอร์จ่ายอากาศเข้าสู่ห้องพักอากาศทั้ง 2 ห้อง ก่อนที่เจ็ทอากาศไหลออกจากรูเจ็ทแบบออร์ริฟิสที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D=16$ mm ไปพุ่งชนตั้งฉากพื้นผิว สำหรับตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วยความถี่ของการสั่นที่ 0 Hz, 4.5 Hz, 9.25 Hz, 19 Hz, 28.5 Hz และระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L = 2D, 4D, 6D$ และ $8D$ โดยในแต่ละการทดลองกำหนดให้ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของเจ็ทคงที่ $Re=12,000$ ในการศึกษาได้ใช้ Hot wire anemometer ในการวัดความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทอิสระ ใช้แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสทอลในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว และใช้โปรแกรม ANSYS ver.13 (Fluent) วิเคราะห์การไหลแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา จากผลการศึกษา พบว่า เจ็ทไหลแบบสั่นสามารถให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงใกล้เคียงกับกรณีเจ็ทไหลแบบต่อเนื่อง และพบการไหลหมุนวนรอบลำเจ็ทที่ไหลรบกวนชั้นขอบเขตบนพื้นผิว

คำหลัก: เจ็ทไหลพุ่งชน, เจ็ทแบบสั่น, การเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อน

Abstract

This paper presents the effect of pulsating jet on flow and heat transfer characteristics on jet impingement wall. In this study, pulse generating device was constructed by using a controlled valve connected with motor to provide air flow through two of jet chambers. Then the jet flow through the orifice nozzle with $D=16$ mm of diameter and impinge normal to a surface. The study parameter consists of jet pulsating frequency at 0 Hz, 4.5 Hz, 9.25 Hz, 19 Hz, 28.5 Hz and distance from orifice to impinged surface $L = 2D, 4D, 6D$ and $8D$. For all experiments, the jet Reynolds number was constant at $Re=12,000$. Hot wire anemometer was used for velocity and turbulence intensity measurement of free jet. The heat transfer on jet impingement surface was measured by Thermochromic Liquid Crystal sheet. And ANSYS ver.13 (Fluent) was used for analyzing the transient flow field. It is found that the pulsating jet can give high heat transfer rate as continuous jet and there appears the vortex flow structure around jet which move and disturb the boundary layer flow on the wall jet.

Keywords: Impinging jet, Pulsating jet, Heat transfer enhancement

TSF-2016

1. บทนำ

เจ็ทฟุ้งชนเป็นการบังคับให้ลำของไหลที่มีความเร็วหรือเจ็ทไหลฟุ้งชนกับพื้นผิวโดยตรง วิธีนี้นิยมใช้ในระบบระบายความร้อนของใบพัดแก๊สเทอร์ไบน์ ผนังห้องเผาไหม้ หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงโดยเฉพาะพื้นผิวบริเวณที่เจ็ทฟุ้งชนโดยตรงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการให้ความร้อนหรือระบายความร้อนบนพื้นผิวอย่างรวดเร็ว รวมถึงใช้ในการเพิ่มอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนในอุปกรณ์ทางความร้อน เช่น อุปกรณ์ระบายความร้อนขนาดเล็กที่มีประสิทธิภาพสูง (Compact High Intensity Cooler, CHIC) เป็นต้น

ปัจจุบันได้มีการพยายามที่จะเพิ่มความสามารถการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทฟุ้งชนโดยใช้วิธีการควบคุมการไหลแบบต่างๆ การสร้างเจ็ทที่ไหลเป็นจังหวะก็เป็นอีกวิธีที่สามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว [1, 2 และ 3] เนื่องจากการไหลบนพื้นผิวเป็นจังหวะจะทำให้กระแสการไหลหมุนวนเพิ่มขึ้น ซึ่งกระแสหมุนวนจะเป็นตัวทำลายชั้นขอบเขตการไหลระหว่างของไหลกับพื้นผิว ส่งผลทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้น

Mladin และ Zumbrunnen [1] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทฟุ้งชนแบบจังหวะโดยใช้บอลวาล์วเป็นตัวปิดและเปิดการไหลของอากาศจากการทดลองพบว่า ที่ระยะ $L = 3D-6D$ เจ็ทฟุ้งชนแบบจังหวะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงกว่าเจ็ทฟุ้งชนแบบต่อเนื่อง

Hofmann และคณะ [4] ได้ศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทฟุ้งชนแบบจังหวะ ในการศึกษาได้พิจารณาค่านัสเซลต์นัมเบอร์เฉพาะจุด (Local Nusselt number) ที่กระจายบนพื้นผิวที่เจ็ทฟุ้งชน ในกรณีที่ระยะ $L = 2D$ ค่านัสเซลต์นัมเบอร์ของเจ็ทฟุ้งชนแบบจังหวะมีค่าสูงกว่าเจ็ทฟุ้งชนแบบต่อเนื่องเฉพาะแนวรัศมีที่เจ็ทฟุ้งชนที่อยู่ในช่วง $r < 2D$ สำหรับที่รัศมีที่เจ็ทฟุ้งชนอยู่ในช่วง $r > 2D$ ค่านัสเซลต์นัมเบอร์ของเจ็ทฟุ้งชนแบบต่อเนื่อง

และเจ็ทฟุ้งชนแบบจังหวะมีความแตกต่างกันไม่มากนัก

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทไหลเป็นจังหวะฟุ้งชน ในเบื้องต้นได้ทำการวัดการกระจายความเร็วและระดับความปั่นป่วนของเจ็ทอิสระด้วย Hot wire probe และวัดการถ่ายเทความร้อนเฉพาะจุดโดยใช้แผ่นเทอร์โมลิตวิตคริสตอลร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ นอกจากนี้ได้ศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทด้วยโดยใช้วิธีจำลองพลศาสตร์ของไหลด้วยโปรแกรม ANSYS Ver.13 (Fluent) ในการทดลองจะทำการปรับความถี่ของเจ็ทในช่วง $f = 0-28.5 \text{ Hz}$ สำหรับระยะจากปากทางออกท่อเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทฟุ้งชนในช่วง $L = 2D-8D$ สำหรับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของเจ็ทกำหนดให้คงที่ $Re = 12,000$

2. รายละเอียดชุดทดลอง

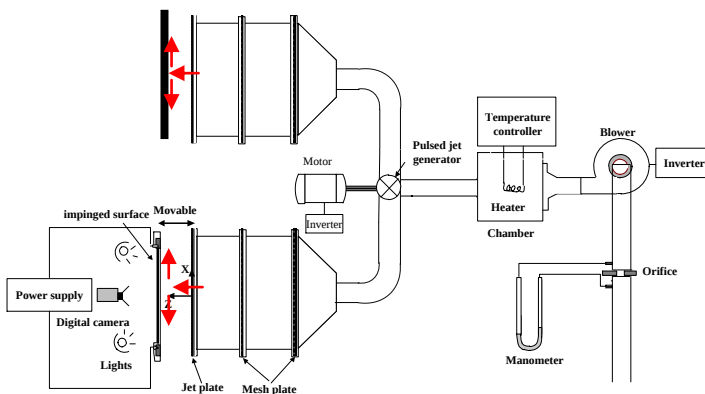
2.1 ชุดทดลอง

รูปที่ 1 แสดงรายละเอียดของชุดทดลองที่ใช้ในการทดลองนี้ อากาศภายในห้องทดลองจะถูกดูดผ่านโบรเวอร์โดยควบคุมอัตราการไหลด้วย inverter โดยที่ทางเข้าของโบรเวอร์ได้ติดตั้งออร์ริฟิซเพื่อวัดอัตราการไหล หลังจากนั้นอากาศจะถูกส่งผ่านไปยังห้องพักอากาศ (Chamber) ที่มีชุดฮีตเตอร์ติดตั้งอยู่ เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเจ็ทอากาศให้คงที่ แล้วจึงไหลเข้าสู่อุปกรณ์สร้างการไหลแบบเป็นจังหวะ ซึ่งจะทำหน้าที่จ่ายอากาศสลับกันส่งไปยังท่อด้านซ้ายและขวา ที่ต่อเข้าสู่ห้องพักอากาศแต่ละด้าน แล้วอากาศจะไหลผ่านรูออร์ริฟิซจากชุดด้านซ้ายและด้านขวาสลับกัน แล้วเจ็ทอากาศจึงไหลฟุ้งชนตั้งฉากกับผนังที่มีฟลักซ์ความร้อนที่ติดตั้งไว้ด้านหน้าของแผ่นเจ็ท ชุดทดลองนี้สามารถปรับระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทฟุ้งชน L ได้

สำหรับรายละเอียดของอุปกรณ์สร้างการไหลแบบเป็นจังหวะได้ออกแบบและสร้างระบบดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) ซึ่งระบบควบคุมการไหลทำงานโดยมอเตอร์จะไปขับทรงกระบอกภายในซึ่งประกบกันด้วยชุดต่อประกบ (Coupling) โดยลักษณะของทรงกระบอก

TSF-2016

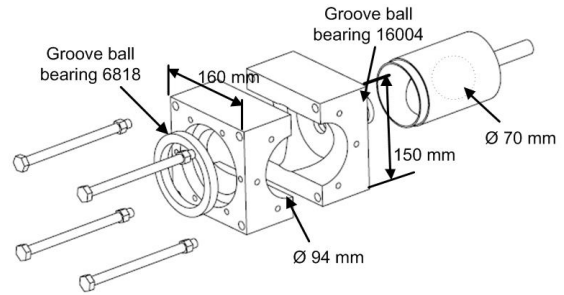
ภายในเจาะรูเป็นรูปตัว L ดังแสดงในรูปที่ 2 (ข) เมื่อมอเตอร์หมุนครึ่งรอบของรูปตัว L ของทรงกระบอกจากที่อยู่ตรงตำแหน่งที่ 1 ก็จะหมุนตามมอเตอร์ไปที่ตำแหน่งที่ 2 ทำให้การไหลของอากาศจะถูกบังคับให้ไหลไปยังทิศทางตรงข้าม คือ เข้าห้องพักอากาศด้านซ้ายเมื่อมอเตอร์หมุนครบรอบก็จะทำให้รูของทรงกระบอกกลับมาอยู่ตำแหน่งที่ 1 จะบังคับให้ไหลเข้าห้องพักอากาศด้านขวาและเมื่อมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้นก็จะทำให้การไหลของอากาศสลับช่องทางการไหลไปมาระหว่างตำแหน่งที่ 1 และ 2 ทำให้เกิดการไหลแบบสั่นเป็นจังหวะขึ้นในแต่ละห้องพักอากาศ เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้นก็จะทำให้การสลับตำแหน่งไปมาเกิดขึ้นบ่อยครั้ง จนกลายเป็นการไหลสั่นแบบจังหวะด้วยความถี่สูงขึ้น โดยในการทดลองศึกษานี้ได้ใช้อินเวอร์เตอร์ในการควบคุมการหมุนของมอเตอร์



รูปที่ 1 แสดงไดอะแกรมของชุดทดลอง



(ก) ภาพถ่ายของอุปกรณ์ควบคุมการไหลแบบสั่นเป็นจังหวะ



(ข) ลักษณะภายในของชุดควบคุม

รูปที่ 2 แสดงกลไกการควบคุมการไหลแบบสั่นเป็นจังหวะ

2.2 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวและลักษณะการไหลที่เจ็บบนผิวเพื่อเนื่องและเจ็บบนผิวสั่นเป็นจังหวะ โดยจะศึกษากรณีนี้ที่เจ็บบนผิวเดียวที่ไหลจากรูออร์ริฟิสนาตเส้นผ่านศูนย์กลาง $D=16$ mm บนแผ่นเจ็บบนผิว แล้วไหลพุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิว ในการทดลองจะกำหนดให้พื้นผิวที่เจ็บบนผิวมีฟลักซ์ความร้อนคงที่ และใช้เจ็บบนผิวประมาณอุณหภูมิห้องพุ่งชนพื้นผิวเพื่อทำการระบายความร้อน สำหรับระบบปิดกำหนดให้ที่ตำแหน่งศูนย์กลางของปากทางออกเจ็บบนผิวเป็นจุดกำเนิดของระบบพิกัดแกน X อยู่ในแนวนอน แกน Y อยู่ในแนวตั้ง และแกน Z อยู่ในแนวระยะห่างระหว่างปากทางออกถึงพื้นผิวที่เจ็บบนผิว

สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยระยะจากปากทางออกของเจ็บบนผิวถึงพื้นผิวที่เจ็บบนผิว $L=2D, 4D, 6D, 8D$ และความถี่ของเจ็บบนผิวคือ 0Hz, 4.5Hz, 9.25Hz, 19Hz, 28.5Hz โดยคำนวณเป็นค่าสโตวฮาวสันัมเบอร์ $St=0.00, 0.0074, 0.0152, 0.0312, 0.0472$ ตามลำดับ ซึ่งคำนวณจากสมการ

$$St = \frac{fD}{W_0} \quad (1)$$

โดยที่ f คือ ความถี่หลักการสั่นของเจ็บบนผิว (Hz) และ W_0 คือ ความเร็วเฉลี่ยของเจ็บบนผิวที่ปากทางออก ($= 12.1$ m/s) สำหรับเจ็บบนผิวที่ไหลแบบต่อเนื่องกำหนดให้ค่าเรย์โนลด์สันัมเบอร์ $Re = 12,000$

TSF-2016

(คำนวณจากความเร็วที่จุดศูนย์กลางทางออกเจ็ท) และกำหนดให้เจ็ทที่ไหลเป็นจังหวะมีความเร็วเฉลี่ย เท่ากับความเร็วของเจ็ทที่ไหลแบบต่อเนื่อง

3. วิธีการทดลอง

3.1 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล

รูปที่ 3 แสดงรายละเอียดของชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิวโดยแผ่นที่เจ็ทพุ่งชน (Impinged plate) ในการทดลองใช้แผ่นสแตนเลสแบบบาง และมีแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล (Thermocromic liquid crystal, TLC) ติดด้านหลัง (ด้านตรงข้ามกับพื้นผิวที่พุ่งชน) แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบแผ่นฟิล์มพร้อมติด (บริษัท OMEGA, รุ่น LCS104) คุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงสี จากสีดำเปลี่ยนเป็นสีแดง เหลือง เขียว และน้ำเงิน ในช่วงอุณหภูมิ 29°C – 46°C ในการทดลองใช้แผ่นสแตนเลสมีความหนา 0.03 mm เป็นพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน โดยแผ่นสแตนเลสจะถูกขึงให้เรียบตึงกับแผ่นพลาสติกหนา 15 mm ที่เจาะหน้าต่างขนาด $240\text{ mm} \times 240\text{ mm}$ ไว้กลางแผ่น โดยใช้แท่งทองแดงยึดแผ่นสแตนเลสไว้ทั้งสองข้าง และแท่งทองแดงทั้งสองจะต่อเข้ากับขั้วของอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านแท่งทองแดงไปยังแผ่นสแตนเลส จะเกิดความร้อนขึ้นทั่วทั้งแผ่นสแตนเลส

ในการใช้แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลเพื่อวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิว จำเป็นต้องสอบเทียบอุณหภูมิกับสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลก่อนใช้งาน ในการสอบเทียบสีนั้นได้กำหนดเงื่อนไขให้เหมือนกับสถานะในการทดลองจริง ได้แก่ การให้แสงสว่างบนแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลและระยะห่างของกล้องบันทึกภาพ ในการสอบเทียบสีแต่ละครั้งจะกำหนดช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 29°C – 46°C ซึ่งเป็นช่วงที่แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลเริ่มแสดงสีจนถึงสีน้ำเงินเข้ม โดยใช้สายเทอร์โมคัปเปิลจำนวน 6 เส้นในการสอบเทียบ

ในการทดลองจะควบคุมอุณหภูมิของเจ็ทอากาศที่ 27°C พุ่งชนพื้นผิวที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ โดย

จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับแผ่นสแตนเลสทำให้เกิดฟลักซ์ความร้อนบนแผ่นสแตนเลสเมื่อเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวเกิด การระบายความร้อนขึ้นบนแผ่นสแตนเลส ทำให้แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลที่ติดด้านหลังแผ่นสแตนเลสเกิด การเปลี่ยนสี หลังจากรอให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว แล้วจึงบันทึกภาพสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลลงด้วยกล้องดิจิทัล เพื่อทำการประมวลผลหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ต่อไป

โดยสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$h = \frac{\dot{q}_{net}}{T_w - T_j} = \frac{\dot{q}_{input} - \dot{q}_{rad} - \dot{q}_{conv}}{T_w - T_j} \quad (2)$$

โดยที่ $\dot{q}_{net}$ คือ ฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทไหลพุ่งชน $\dot{q}_{input}$ คือ ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านแผ่นสแตนเลส $\dot{q}_{rad}$ และ $\dot{q}_{conv}$ คือ ฟลักซ์การสูญเสียความร้อนจากด้านหลังของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลเนื่องจากการแผ่รังสีและการพาความร้อนแบบธรรมชาติ T_w คือ อุณหภูมิแต่ละจุดบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (หาจากแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล) และ T_j คือ อุณหภูมิของเจ็ทอากาศวัดในห้องพักอากาศหน้าแผ่นเจ็ท

สำหรับฟลักซ์ความร้อนที่เกิดจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านแผ่นสแตนเลส คำนวณจากสมการ

$$\dot{q}_{input} = \frac{I^2 R}{A} \quad (3)$$

โดยที่ I คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่าย R คือ ความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสแตนเลส และ A คือ พื้นที่ของผิวแผ่นสแตนเลส โดยที่ค่านีเซลล์ต์นัมเบอร์เฉพาะจุดสามารถคำนวณจากสมการ

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (4)$$

และค่านีเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิว สามารถคำนวณจากสมการ

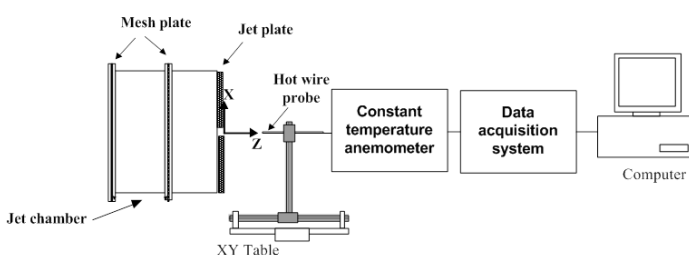
$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h}D}{k} = \frac{\dot{q}_{net}D}{(\bar{T}_w - T_j)} \quad (5)$$

โดยที่ $\bar{T}_w$ คืออุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวที่พิจารณา และ k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเจ็ทอากาศ

TSF-2016

3.2 การวัดการกระจายความเร็วของเจ็ทอิสระ

ในรูปที่ 3 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการวัดการกระจายความเร็วและความถี่ของเจ็ท โดยติดตั้งหัววัดความเร็วแบบลวดร้อนรูปตัว I (Hot-wire probe type I, ยี่ห้อ Dantec dynamics รุ่น 55P16) เส้นลวดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดร้อน $5\ \mu\text{m}$ และยาว $1.25\ \text{mm}$ หัววัดนี้ถูกติดตั้งกับชุดเลื่อนตำแหน่งแบบ 2 แกน (2D Transverse system, XY Table) โดยหัววัดความเร็วจะต่อกับเครื่องวัดความเร็วลมแบบอุณหภูมิคงที่ (Constant temperature anemometer, Dantec Dynamic รุ่น 54T30) เพื่อแปลงสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากหัววัดลวดร้อนเป็นความเร็วของลมและเก็บข้อมูลผ่านตัวเก็บข้อมูล (Data acquisition system, National Instrument Measurement รุ่น NI 9215) และใช้ความถี่ในการเก็บข้อมูล (Sample of frequency) $2\ \text{kHz}$ และจำนวนตัวอย่างในการเก็บข้อมูล (Number of samples) 10,000 ตัวอย่าง แล้วนำข้อมูลของความเร็วที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform, FFT) เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลของความเร็วให้อยู่ในรูปของความถี่ ซึ่งความถี่ที่ได้จากการวิเคราะห์ คือ ความถี่หลักของการสั่นของเจ็ท



รูปที่ 3 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการวัดความเร็วและความถี่ของเจ็ท

3.3 การจำลองการไหลของเจ็ทไหลพุ่งชนแบบสันเป็นจันทะ

ในการจำลองการไหลได้จำลองขนาดโมเดลในส่วนของถังพักและบริเวณที่เจ็ทไหลพุ่งชนพื้นผิวเท่ากับขนาดของจริงที่ใช้ในการทดลอง โดยใช้

โปรแกรม ANSYS ver.13 (Fluent) วิเคราะห์การไหลเป็นแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient flow) ไม่พิจารณาผลจากการถ่ายเทความร้อน สำหรับโมเดลของความปั่นป่วนใช้แบบจำลอง Realizable $k-\epsilon$ โดยบริเวณที่ใกล้พื้นผิวกำหนดให้ใช้แบบ Non-Equilibrium wall functions และกำหนดความเร็วทางเข้าของการไหลมีค่าแปรเปลี่ยนตามเวลาในรูปแบบของ User-defined function (UDF) สำหรับวิธีการคำนวณได้ใช้ SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) โดยรายละเอียดของ Spatial discretization ในแต่ละสมการที่ใช้ในการคำนวณกำหนด Second Order Upwind โดยกำหนดเงื่อนไขในการหยุดประมวลผลที่ค่าความผิดพลาด (Residuals) เท่ากับ 1×10^{-4}

4. ผลการทดลอง

4.1 การเปลี่ยนแปลงความเร็วที่ปากทางออกเจ็ท

รูปที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางปากทางออกเจ็ท ($Z \approx 0D$) ที่เงื่อนไขการสั่นที่ความถี่ต่างๆ ในรูปเส้นสีดำแสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วที่ได้จาก Hot wire probe และเส้นสีแดงแสดงเส้นของสมการที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการจำลองการไหลแบบสันที่ความถี่ต่างๆ จากรูปพบว่ากรณีของเจ็ทที่ไหลแบบต่อเนื่องตามที่ได้แสดงในรูปที่ 4(ก) ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความเร็วมีค่าน้อยมาก สำหรับในกรณีของเจ็ทไหลแบบสัน พบว่า การเปลี่ยนแปลงของความเร็วเจ็ทเป็นรูปคลื่น sine โดยความถี่จะเพิ่มขึ้น และขนาดของแอมพลิจูดของความเร็วจะลดลง เมื่อค่า St เพิ่มขึ้น

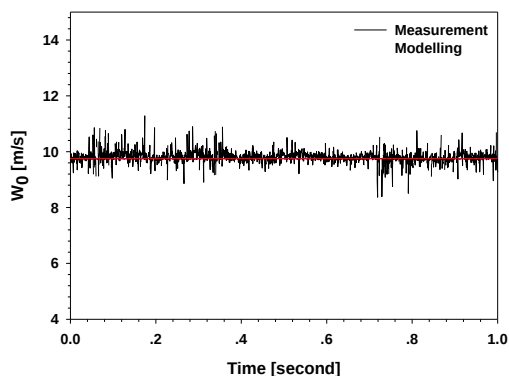
4.2 การเปลี่ยนแปลงความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทอิสระ

รูปที่ 5 แสดงการกระจายความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทอิสระตามแนวแกน Z สำหรับความเร็วเฉลี่ยพบว่าที่ทุกเงื่อนไขความถี่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วบริเวณใกล้ปากทางออกเจ็ทที่เหมือนกัน คือ เกิดการเพิ่มของความเร็วซึ่งเป็นปรากฏการณ์การไหลของเจ็ทที่ออกจากปากทางออกแบบออร์ริฟิส และเกิดบริเวณที่ความเร็วเจ็ทคงที่ ซึ่งเป็นบริเวณของโพเทน

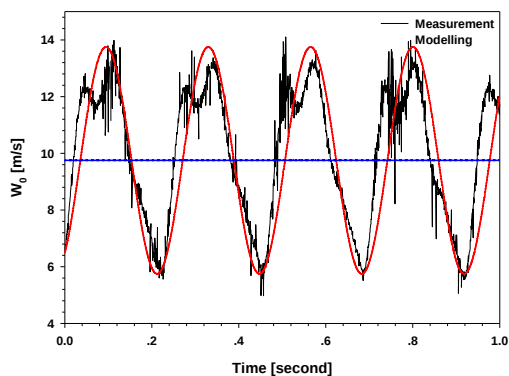
TSF-2016

เช็ลลคอร์ หลังจากนั้นความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทจะลดลงตามลำดับ โดยที่เจ็ทที่สั้นจะเริ่มเกิดการลดลงของความเร็วที่ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทน้อยกว่าเจ็ทแบบต่อเนื่องโดยเฉพาะเจ็ทที่เงื่อนไข $St=0.0472$

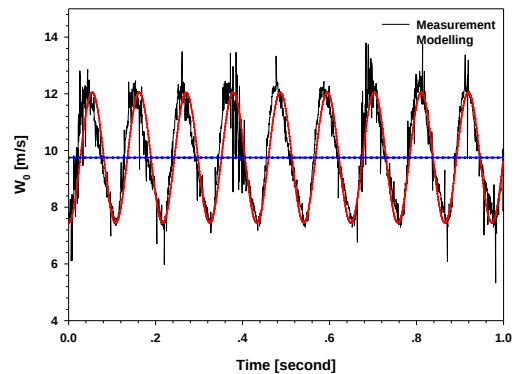
สำหรับระดับความปั่นป่วนภายในเจ็ท พบว่าในช่วงโพเทนเชี่ยลคอร์ของเจ็ทมีระดับความปั่นป่วนที่ต่ำ แต่หลังจากนั้นระดับความปั่นป่วนของเจ็ทจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงที่ความเร็วเฉลี่ยเริ่มลดลง โดยที่เจ็ทไหลแบบต่อเนื่องมีระดับความปั่นป่วนที่ต่ำเมื่อเทียบกับเจ็ทไหลแบบสั้น ทั้งนี้เจ็ทที่เงื่อนไข $St=0.0074$ มีระดับความปั่นป่วนภายในเจ็ทที่สูงที่สุด ซึ่งอาจเกิดจากที่ปากทางออกเจ็ทมีแอมพลิจูดของการเปลี่ยนแปลงความเร็วสูงที่สุด ขณะที่ในการณียของ $St=0.0312$ และ 0.0472 มีแอมพลิจูดของการเปลี่ยนแปลงความเร็วที่ต่ำใกล้เคียงกัน



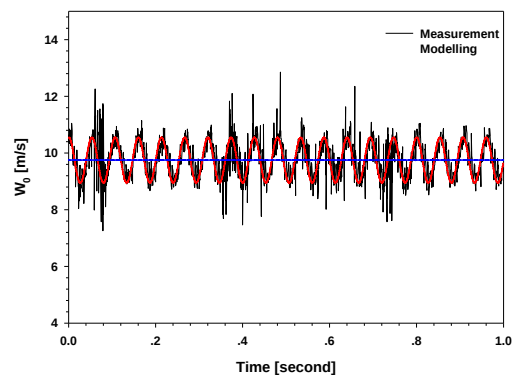
(ก) $St=0$ ($f=0$ Hz)



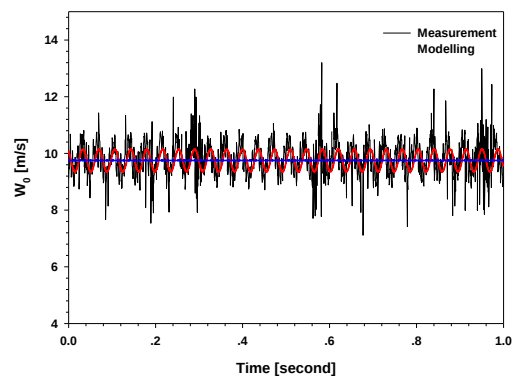
(ข) $St=0.0074$ ($f=4.5$ Hz)



(ค) $St=0.0152$ ($f=9.25$ Hz)



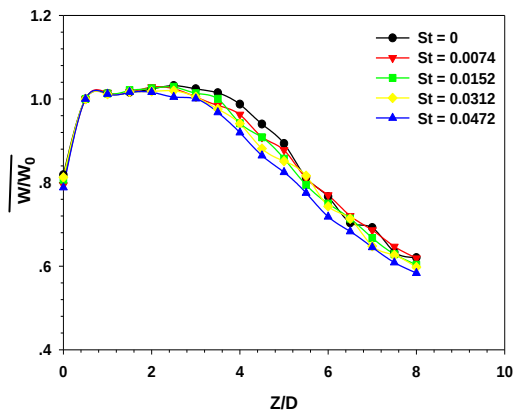
(ง) $St=0.0312$ ($f=19$ Hz)



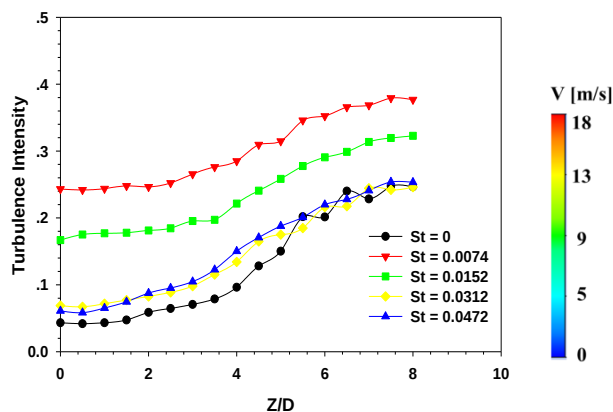
(จ) $St=0.0472$ ($f=28.5$ Hz)

รูปที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วของเจ็ทลำเดียวที่ปากทางออกเจ็ท ($Z \approx 0D$) ($\bar{w}_0=9.8$ m/s)

TSF-2016



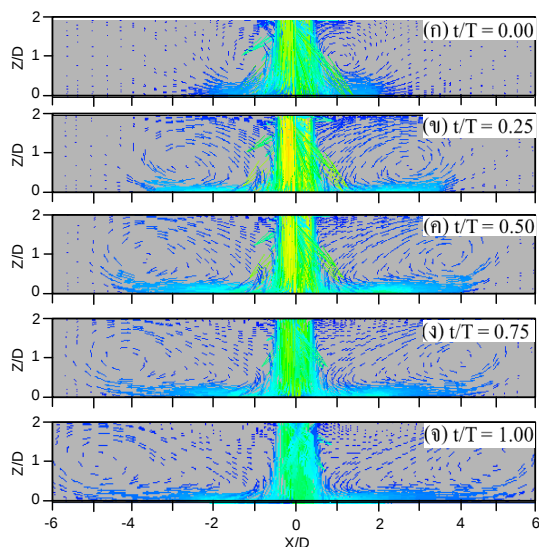
(ก) ความเร็วเฉลี่ย



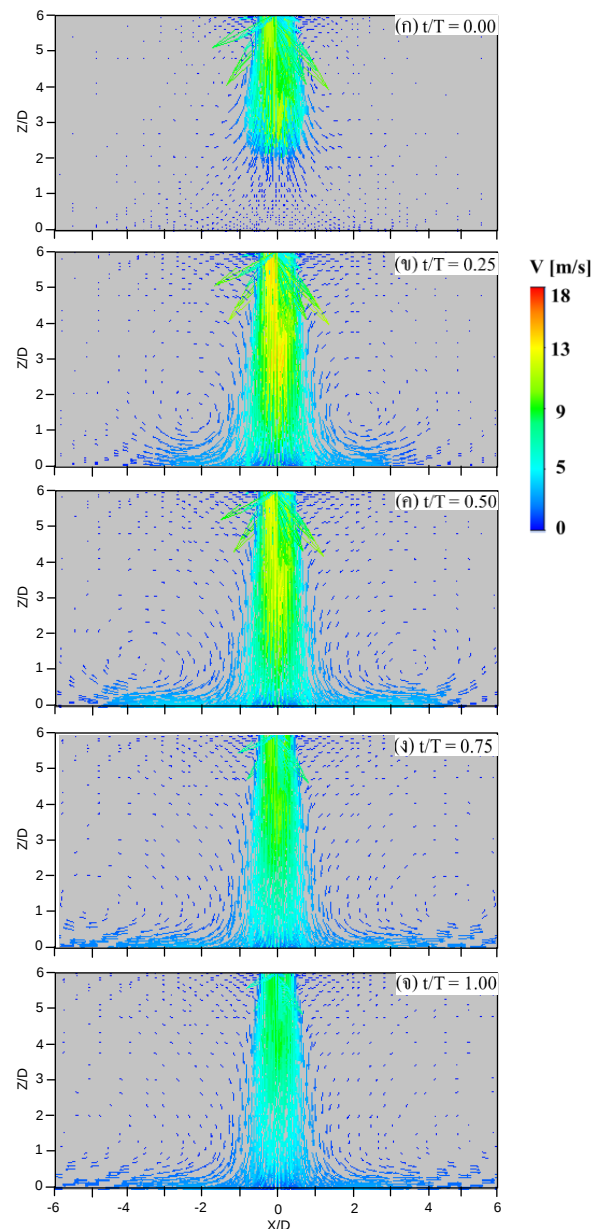
(ข) ระดับความปั่นป่วน

รูปที่ 5 แสดงการกระจายความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทตามแนวแกน Z ($\overline{W_0}$ = 9.8 m/s)

4.3 ลักษณะการไหลพุ่งชนพื้นผิวของเจ็ท



รูปที่ 6 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทไหลพุ่งชนพื้นผิวที่เวลาต่าง ๆ วนรอบรอบ ZX กรณี $St=0.0074$ ที่ระยะ $L=2D$



รูปที่ 7 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทไหลพุ่งชนพื้นผิวที่เวลาต่าง ๆ วนรอบรอบ ZX กรณี $St=0.0074$ ระยะ $L=6D$

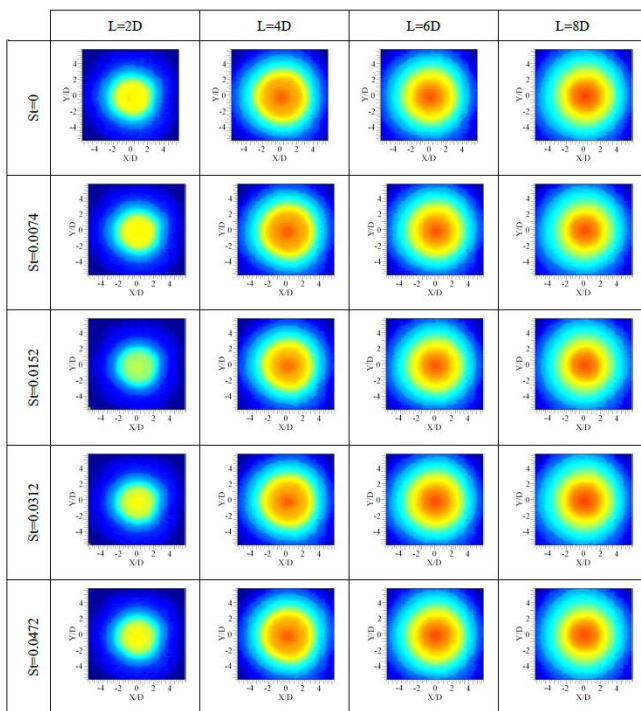
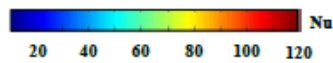
รูปที่ 6 และ 7 แสดงตัวอย่างผลจากการจำลองลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวบนระนาบ ZX กรณี $St=0.0074$ ที่ระยะ $L=2D$ และ $6D$ ตามลำดับ ในรูปแสดงการไหลที่เวลา t/T ต่าง ๆ โดยที่ t คือ เวลา, T คือ คาบของการสั่นของเจ็ท ($=1/f$)

จากรูปที่ 6 พบว่า ที่ระยะพุ่งชน $L=2D$ เจ็ทหลังจากที่ไหลพุ่งชนพื้นผิวทำให้เกิดกระแสวนวนรอบๆลำเจ็ทคล้ายกับที่เกิดขึ้นในการไหลของเจ็ท

TSF-2016

แบบต่อเนื่อง แต่จุดศูนย์กลางหมุนของกระแสม้วนวนจะเลื่อนตำแหน่งไปในทิศทางแนวรัศมีของเจ็ทตาม t/T ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์นี้พบในทุกความถี่ของการสั่น และในกรณีที่ระยะฟุ้งชนเพิ่มเป็น $L=6D$ จากรูปที่ 7 พบว่า ก่อนที่เจ็ทไหลฟุ้งชนพื้นผิวเกิดการหมุนวนขนาดใหญ่รอบลำเจ็ทก่อนที่จะไหลฟุ้งชนพื้นผิว โดยการไหลวนนี้จะมีขนาดใหญ่ขึ้นและเคลื่อนที่ไปฟุ้งชนกับพื้นผิว หลังจากฟุ้งชนพื้นผิวจึงไหลเคลื่อนที่ออกไปในแนวรัศมีต่อไป

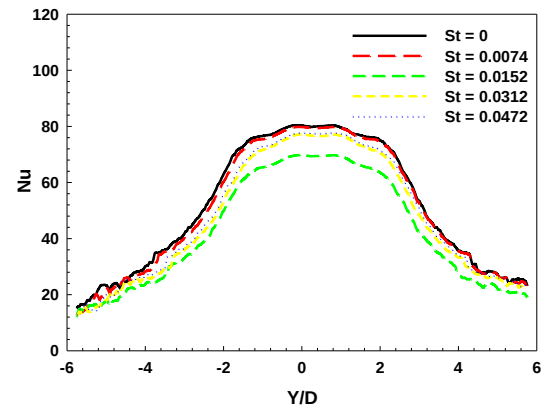
4.4 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทไหลฟุ้งชน



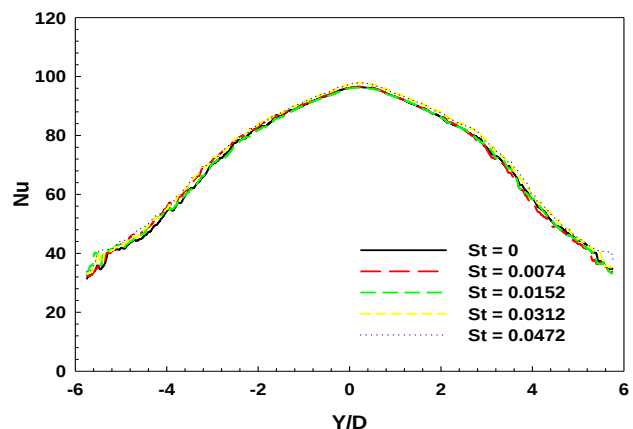
รูปที่ 8 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทไหลฟุ้งชนที่เงื่อนไขระยะฟุ้งชน L และสโตวฮาล์นัมเบอร์ St ต่างๆ

รูปที่ 8 แสดงตารางเปรียบเทียบลักษณะการกระจายนัสเซลล์ต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เงื่อนไขระยะฟุ้งชน L และสโตวฮาล์นัมเบอร์ St ต่างๆ จากรูปพบว่า สโตวฮาล์นัมเบอร์มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวอย่างเด่นชัดเฉพาะที่เงื่อนไขระยะฟุ้งชน $L=2D$

เท่านั้น แต่ที่ระยะฟุ้งชนอื่นๆ สโตวฮาล์นัมเบอร์มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวน้อยมาก โดยทุกการทดลองบริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทไหลฟุ้งชนมีค่าสเซลล์ต์นัมเบอร์ที่สูงและจะมีค่าลดลงตามแนวรัศมีที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 9 แสดงการกระจายนัสเซลล์ต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทฟุ้งชน ที่ระยะ $L=2D$

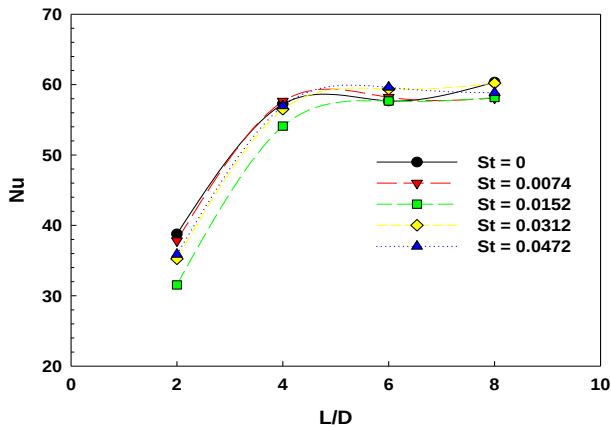


รูปที่ 10 แสดงการกระจายนัสเซลล์ต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทฟุ้งชน ที่ระยะ $L=6D$

รูปที่ 9 และรูปที่ 10 แสดงการกระจายนัสเซลล์ต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทฟุ้งชนที่ระยะ $L=2D$ และ $6D$ ตามลำดับ ที่เงื่อนไข $L=2D$ การกระจายนัสเซลล์ต์นัมเบอร์กรณี $St=0$ และ 0.0074 มีค่าสูงสุดและมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่กรณี $St=0.0152$ ให้ค่าสเซลล์ต์นัมเบอร์ต่ำกว่ากรณีอื่นๆ ซึ่งอาจเป็นเพราะแอมพลิจูดการสั่นของความเร็วมีผลมากกว่าความถี่ในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว และที่เงื่อนไข $L=6D$ พบว่าสโตวฮาล์นัมเบอร์

TSF-2016

มีผลต่อนัสเซิลด์นัมเบอร์น้อยมาก ทุกเงื่อนไข
มีนัสเซิลด์นัมเบอร์ที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 11 นัสเซิลด์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทที่ไหล
พุ่งชนที่อยู่ในบริเวณรัศมี $-5D \leq r \leq 5D$ ที่ระยะพุ่งชน
ต่างๆ

รูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบนัสเซิลด์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทที่ไหลพุ่งชนที่อยู่ในบริเวณรัศมี $-5D \leq r \leq 5D$ ในการคำนวณค่านัสเซิลด์นัมเบอร์เฉลี่ยใช้ข้อมูลเฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทที่ไหลพุ่งชนในช่วงรัศมี $-5D \leq r \leq 5D$ คำนวณ โดยภาพรวมพบว่า ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=2D$ นัสเซิลด์นัมเบอร์เฉลี่ยมีค่าต่ำที่สุด โดยนัสเซิลด์นัมเบอร์เฉลี่ยจะสูงขึ้นเมื่อระยะพุ่งชนเพิ่มเป็น $L=4D$ และค่าเฉลี่ยดังกล่าวเกือบคงที่เมื่อระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนอยู่ในช่วง $L=4D-8D$ และพบว่าที่เงื่อนไข $St=0.0074$ ให้การถ่ายเทความร้อนใกล้เคียงกับเงื่อนไขเจ็ทแบบต่อเนื่อง

ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากอุปกรณ์ควบคุมการไหลแบบสั่นที่สร้างขึ้นสามารถสร้างความถี่ในการสั่นของเจ็ทที่ค่อนข้างต่ำ และมีค่า St ในช่วง 0.0074 ถึง 0.0472 เท่านั้น จึงอาจทำให้ไม่สามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้มากเช่นเดียวกับงานวิจัยอื่นๆ อย่างไรก็ตาม การใช้อุปกรณ์นี้สามารถช่วยเพิ่มพื้นที่ถ่ายเทความร้อนได้เป็น 2 เท่า คือแทนที่จะใช้เจ็ทแบบต่อเนื่องเพียง 1 ลำ จะสามารถสร้างเจ็ทแบบสั่นถึง 2 ลำ โดยที่แต่ละลำสามารถให้การถ่ายเทความร้อนใกล้เคียงกับเจ็ทแบบต่อเนื่อง

5. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวในกรณีของเจ็ทแบบต่อเนื่องและเจ็ทแบบสั่น พบว่า

1. เจ็ทแบบไหลต่อเนื่อง และเจ็ทแบบสั่นเป็นจังหวะมีลักษณะการกระจายความเร็วของเจ็ทใกล้เคียงกัน แต่ความปั่นป่วนความเร็วกรณีเจ็ทแบบไหลสั่นเป็นจังหวะมีค่าสูงกว่า ทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทแบบไหลสั่นเป็นจังหวะมีค่าสูงใกล้เคียงกับเจ็ทแบบไหลต่อเนื่อง

2. ที่ตำแหน่งจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวพุ่งชน $L=6D$, $St=0.0312$ (เพิ่มขึ้น 2.93%) และ $St=0.0472$ (เพิ่มขึ้น 3.37%) โดยลักษณะของเจ็ทแบบไหลเป็นจังหวะมีลักษณะการกระจายความเร็วเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เมื่อพุ่งชนพื้นผิวทำให้เกิดกระแสม้วนวนไหลบนผนัง สร้างความปั่นป่วนและรบกวนการไหลบนพื้นผิว และทำให้รับกวนชั้นขอบเขตของการไหลบนพื้นผิว ทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวพุ่งชนกรณีเจ็ทไหลแบบเป็นจังหวะสูงกว่าเจ็ทไหลแบบต่อเนื่อง ยกเว้นกรณีระยะห่างจากปากทางออกถึงพื้นผิวพุ่งชน $L=2D$ ความถี่การสั่นของเจ็ทมีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวน้อย ทำให้ที่ระยะ $L=2D$ การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีเจ็ทไหลแบบต่อเนื่องดีกว่าเจ็ทไหลแบบเป็นจังหวะ

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Mladin, E.C. and Zumbrennen, D.A., (1997), Local convective heat transfer to submerged pulsating jets, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 46, No.14, pp. 3305-3321.
- [2] Travnicek, Z. and Tesar, V., (2003), Annular synthetic jet used for impinging flow mass-

TSF-2016

transfer, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 3291-3297.

[3] Chaudhari, M., Puranik, B. and Agrawal, A., (2010), Effect of orifice shape in synthetic jet based impingement cooling, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 34, pp. 246-256.

[4] Hofmann, H. M., Movileanu, D. L. Kind, M. and Martin H., (2007), Influence of a pulsation on heat transfer and flow structure in submerged impinging jets, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol.50, pp. 3638-3.