

การศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชน
แบบไหลในแนวรัศมี

Study of Flow and Heat Transfer Characteristics for
Radial Impinging Jet

วัชระ มุสิกะ

Watchara Musika

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of

Master of Engineering in Mechanical Engineering

Prince of Songkla University

2558

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนแบบไหลในแนว
รัศมี

ผู้เขียน นายวัชระ มุสิกะ
สาขา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดุสิต)

.....ประธานกรรมการ
(ดร.ฐานันดรศักดิ์ เทพญา)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดุสิต)

.....
(ดร.ภาสกร เวสสะโกศล)

.....กรรมการ
(ดร.ภาสกร เวสสะโกศล)

.....กรรมการ
(ดร.กิตตินันท์ มลิวรรณ)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร เจริญสุข)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับ
นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณ
บุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือ

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดุสิต)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ.....

(ดร.ภาสกร เวสสะโกศล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ.....

(วัชระ มุสิกะ)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(วัชระ มุสิกะ)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ การศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชน
แบบไหลในแนวรัศมี
ผู้เขียน นายวัชร มุสิกะ
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2557

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนจากท่อวงแหวนและท่อที่กำหนดให้เจ็ทไหลในแนวรัศมี ในการทดลองกำหนดให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อเจ็ทมีค่า $D=28.6$ mm และติดตั้งเพลลาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $d=12.7$ mm ตามแนวศูนย์กลางท่อเจ็ท ในการสร้างเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมี ได้ทำการติดตั้งแท่งทรงกรวยที่มีมุมบาน $\theta=30^\circ$, 60° และ 90° ที่ศูนย์กลางปากทางออกท่อเจ็ท นอกจากนี้ได้ศึกษากรณีเจ็ทจากท่อปกติ (ท่อที่ไม่ติดตั้งเพลลา) เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผลการศึกษา สำหรับระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงผนังที่เจ็ทพุ่งชนได้ปรับให้อยู่ในช่วง $H=2D_h$, $4D_h$, $6D_h$ และ $8D_h$ โดยที่ D_h คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก ($D_h=D-d$) ในการเปรียบเทียบผลการทดลองกำหนดให้อัตราการไหลของเจ็ทเท่ากันทุกกรณี โดยเทียบจากเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของเจ็ทจากท่อปกติ $Re=20,000$ ในการวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้ใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนและวัดความดันที่กระจายบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนโดยใช้เซนเซอร์วัดความดัน สำหรับการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทโดยใช้วิธีคำนวณพลศาสตร์ของไหล (ANSYS ver.13, Fluent) ศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทอากาศ และใช้วิธี Laser Induced Fluorescence ศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำ จากการศึกษพบว่าที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงผนังที่เจ็ทพุ่งชน $H=2D_h$ บริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงของเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีที่เงื่อนไข $\theta=90^\circ$ มีขนาดกว้างกว่ากรณีอื่นๆ และให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด นอกจากนี้ยังพบว่ากรณีของเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีที่มุม $\theta=60^\circ$ และระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงผนังที่เจ็ทพุ่งชน $H=4D_h$ เกิดปรากฏการณ์อากาศที่อยู่ภายใต้แท่งทรงกรวยไหลออกจากบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน ส่งผลทำให้บริเวณดังกล่าวมีค่านัสเซลต์นัมเบอร์ต่ำ

Thesis Title Study of Flow and Heat Transfer Characteristics for
Radial Impinging Jet
Author Mr. Watchara Musika
Major Program Mechanical Engineering
Academic Year 2014

ABSTRACT

The aim of this research is to study flow and heat transfer characteristics of impinging jet from an annular pipe and a radial pipe. In the experiment, the inner diameter of nozzle pipe was $D=28.6$ mm, and a rod having diameter of $d=12.7$ mm was inserted into the center of nozzle pipe. For generating a radial jet, a solid cone with divergent angle of $\theta=30^\circ$, 60° and 90° was mounted at center of jet outlet. In addition, a conventional pipe (A pipe without inserting rod) was studied for comparing the results. A jet-to-plate distance was varied in the range of $H=2D_h$, $4D_h$, $6D_h$ and $8D_h$ where D_h is hydraulic diameter ($D_h=D-d$). For the comparison of results, the flow rate of jet for every cases was the same by respecting Reynolds number of conventional jet at $Re=20,000$. The heat transfer patterns on the impingement surface was measured by using used infrared camera to capture temperature distributions on the surface, and the pressure distributions on the impingement surface was measured by using pressure sensor. For the study of flow characteristics of the impinging jet, an air jet were investigated by using Computational Fluid Dynamics (ANSYS ver.13, Fluent), and a water jet was visualized by using Lacer Induced Fluorescence. The results showed that at the jet-to-plate distance of $H=2D_h$, the area of high heat transfer of radial jet with $\theta=90^\circ$ was larger than the other cases, and its heat transfer rate was the highest. In addition, for the case of radial jet with $\theta=60^\circ$ and the jet-to-plate distance of $H=4D_h$, it was found that the air which was under the solid cone leaked from impingement region. It cases to decrease heat transfer at that area.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดุสิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยเสนอแนะแนวทาง และเสียสละเวลาในการดำเนินการทำวิจัยอย่างใกล้ชิด รวมถึงการช่วยตรวจสอบจัดแก้ไขวิทยานิพนธ์จนถูกต้องสมบูรณ์ ขอขอบคุณ ดร.ภาสกร เวสสะโกศล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ดร.ฐานันดรศักดิ์ เทพญา ดร.กิตตินันท์ มลิวรรณ ดร.มักตาร์ แวหะยี และ รองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร เจริญสุข ที่ให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะ ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และขอขอบคุณอาจารย์ บุคลากรภายในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ตลอดจนทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวในที่นี้ ที่มีส่วนช่วยให้การทำวิจัยจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้สนับสนุนทุนการทำวิจัย และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ได้เอื้อเฟื้อทุนการศึกษา และสถานที่ในการทำวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

วัชระ มุสิกะ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
ABSTRACT	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการภาพประกอบ	(10)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(11)
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
2. วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย	2
2.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
2.2 ขอบเขตของงานวิจัย	2
3. ขั้นตอนการวิจัย	3
3.1 โมเดลที่ใช้ในการศึกษา	3
3.2 รายละเอียดชุดทดลอง	4
3.3 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว	4
3.4 การศึกษาการกระจายความดันบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน	6
3.5 การจำลองการไหลด้วยวิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล	7
3.6 การศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำด้วยวิธีเชิงทัศน	8
4. ผลการทดลองและอภิปรายผล	10

สารบัญ(ต่อ)

4.1 การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน	10
4.2 การศึกษาการกระจายความดันบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน	14
4.3 การศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวโดยวิธีการจำลองทางพลศาสตร์ ของไหล	17
4.4 การศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำด้วยวิธีเชิงทัศน	20
5. สรุปผลการทดลอง	22
5.1 สรุปผลการวิจัย	22
5.2 ข้อเสนอแนะ	23
บรรณานุกรม	24
ภาคผนวก ก. บทความสำหรับเผยแพร่ 1	26
ภาคผนวก ข. บทความสำหรับเผยแพร่ 2	30
ภาคผนวก ค. บทความสำหรับเผยแพร่ 3	37
ภาคผนวก ง. การคำนวณค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty Analysis)	42
ประวัติผู้เขียน	46

รายการภาพประกอบ

หน้า

- รูปที่ 1 รูปแบบโมเดลที่ใช้ในการศึกษา **ผิดพลาด! ไม่ได้กำหนดที่คั่นหน้า**
- รูปที่ 2 ไดอะแกรมของชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษา **ผิดพลาด! ไม่ได้กำหนดที่คั่นหน้า**
- รูปที่ 3 รายละเอียดผนังสำหรับการวัดค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิว **ผิดพลาด! ไม่ได้กำหนดที่คั่นหน้า**
- รูปที่ 4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการกระจายของความดันที่ติดตั้งบนผนังที่เจ็ทพุ่งชน **ผิดพลาด! ไม่ได้กำหนดที่คั่นหน้า**
- รูปที่ 5 โมเดลที่ใช้ในการจำลองการไหล **ผิดพลาด! ไม่ได้กำหนดที่คั่นหน้า**
- รูปที่ 6 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการไหล **ผิดพลาด! ไม่ได้กำหนดที่คั่นหน้า**
- รูปที่ 7 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลด้วยวิธีเชิงทัศน (LIF) **ผิดพลาด! ไม่ได้กำหนดที่คั่นหน้า**
- รูปที่ 8 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลด้วยวิธีเชิงทัศน (LIF) **ผิดพลาด! ไม่ได้กำหนดที่คั่นหน้า**
- รูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายนํสเซลล์นํมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนตามแนวศูนย์กลางท่อเจ็ทกับงานวิจัยอื่นๆ (ที่เงื่อนไข $H/d=6$, เจ็ทอากาศ, $Re=23,000$) **ผิดพลาด! ไม่ได้กำหนดที่คั่นหน้า**
- รูปที่ 10 การกระจายของนํสเซลล์นํมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ($Re=20,000, T_j=27^\circ C$) **ผิดพลาด! ไม่ได้กำหนดที่คั่นหน้า**
- รูปที่ 11 การกระจายของนํสเซลล์นํมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนกรณีเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีที่มุม $\theta=60^\circ$ และระยะ $H=4D_h$ โดยเปลี่ยนแปลงตามเวลา **ผิดพลาด! ไม่ได้กำหนดที่คั่นหน้า**
- รูปที่ 12 การกระจายของนํสเซลล์นํมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ($Y/D_h=0, Re=20,000, T_j=27^\circ C$) **ผิดพลาด! ไม่ได้กำหนดที่คั่นหน้า**
- รูปที่ 13 นํสเซลล์นํมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ($Re=20,000, T_j=27^\circ C$) **ผิดพลาด! ไม่ได้กำหนดที่คั่นหน้า**
- รูปที่ 14 การกระจายความดันบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่ตำแหน่งศูนย์กลางท่อเจ็ท (ผลจากการทดลอง, $Y/D_h=0, Re=20,000, T_j=27^\circ C$) **ผิดพลาด! ไม่ได้กำหนดที่คั่นหน้า**
- รูปที่ 15 การกระจายความดันบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่ตำแหน่งศูนย์กลางท่อเจ็ท (ผลจากการจำลองลักษณะการไหล, $Y/D_h=0, Re=20,000, T_j=27^\circ C$) **ผิดพลาด! ไม่ได้กำหนดที่คั่นหน้า**
- รูปที่ 16 การกระจายของความดันบนผนังพุ่งชนจากการทดลองเทียบกับผลจากการจำลองลักษณะการไหล (กรณีของเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมี $\theta=60^\circ$ ที่ระยะ $H=4D_h$) **ผิดพลาด! ไม่ได้กำหนดที่คั่นหน้า**
- รูปที่ 17 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนจากผลการจำลองลักษณะการไหล ($Re=20,000, T_j=27^\circ C$) **ผิดพลาด! ไม่ได้กำหนดที่คั่นหน้า**

- รูปที่ 18 แสดงพลังงานเชิงจลน์แบบปั่นป่วน (Turbulence kinetic energy) ($Re=20,000$, $T_j=27^\circ C$) **ผิดพลาด! ไม่ได้กำหนดที่คั่นหน้า**
- รูปที่ 19 การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนจากผลการทดลอง และลักษณะการไหลของเจ็ทจากการจำลองลักษณะการไหล ($Re=20,000$, $T_j=27^\circ C$) **ผิดพลาด! ไม่ได้กำหนดที่คั่นหน้า**
- รูปที่ 20 ลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำด้วยวิธีเชิงทัศน ($Re=4,000$) **ผิดพลาด! ไม่ได้กำหนดที่คั่นหน้า**
- รูปที่ 21 ลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำบนผนังที่เจ็ทพุ่งชนด้วยวิธีเชิงทัศน ($Re=4,000$) **ผิดพลาด! ไม่ได้กำหนดที่คั่นหน้า**

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์คำย่อ		หน่วย
A	คือ พื้นที่ของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน	m^2
d	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลสแตนเลส	m
D_h	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อเจ็ท	m
D	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเจ็ท	m
H	คือ ระยะจากปากทางออกท่อเจ็ทถึงพื้นผิวพุ่งชน	m
h_c	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
h	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
I	คือ กระแสไฟฟ้าแบบกระแสตรงที่จ่ายให้กับแผ่นสแตนเลส	A
k	คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ	$W/m \cdot ^\circ C$
TKE	คือ พลังงานจลน์ปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy)	J/kg
Nu	คือ นัสเซลท์นัมเบอร์ (Nusselt number)	-
Nu_L	คือ นัสเซลท์นัมเบอร์ที่สูญเสียจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติ	-
\overline{Nu}	คือ นัสเซลท์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน	-
P	คือ ความดันสถิต (Static pressure)	Pa
Pr	คือ แพลนดต์นัมเบอร์ (Prandtl number)	-
\dot{q}_{lossed}	คือ อัตราการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนและการแผ่รังสี	W/m^2
$\dot{q}_{\text{convection}}$	คือ อัตราการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติ	W/m^2
$\dot{q}_{\text{radiation}}$	คือ อัตราการสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อน	W/m^2
r	คือ ระยะตามแนวรัศมีของท่อเจ็ท (Radius)	m
Re	คือ เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number)	-
T_j	คือ อุณหภูมิที่ปากทางออกเจ็ท	$^\circ C$
T_s	คือ อุณหภูมิภายในห้องทดลอง	$^\circ C$
T_w	คือ อุณหภูมิของแผ่นสแตนเลสที่มีการจ่ายฟลักซ์ความร้อน	$^\circ C$
T_{aw}	คือ อุณหภูมิของแผ่นสแตนเลสเมื่อเจ็ทพุ่งชนในขณะที่ไม่มีการจ่ายฟลักซ์ความร้อน	$^\circ C$
\overline{T}_w	คือ อุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวที่มีการจ่ายฟลักซ์ความร้อน	$^\circ C$
V	คือ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นสแตนเลส	Volt
\overline{V}	คือ ความเร็วเฉลี่ย ณ ตำแหน่งใดๆ	m/s
V_{rms}	คือ ความเร็วของรากล้ำสองเฉลี่ย	m/s
W_{st}	คือ ความกว้างของแผ่นสแตนเลส	m
X, Y, Z	คือ พิกัดของแกนอ้างอิงในการทดลอง (Coordinates)	m

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

		หน่วย
สัญลักษณ์ตัวย่อ		
ϵ	คือ ค่าการแผ่รังสีความร้อน (Emissivity)	-
ν	คือ ค่าความหนืดคิเนมาติก (Kinematic viscosity)	m^2/s
ρ	คือ ความหนาแน่นของอากาศ (Density)	kg/m^3
σ	คือ ค่าคงที่ของสตีเฟนและโบลซ์แมน (Stefan and boltzmann)	$W/m^2 \cdot K^4$
สัญลักษณ์ตัวห้อย		
max	คือ สูงสุดหรือมากที่สุด (Maximum)	-
lossed	คือ การสูญเสียบนแผ่นสแตนเลส (Heat loss)	-
rms	คือ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (Root mean squared)	-
P	คือ ความดัน (Pressure)	-
s	คือ ภาวะอากาศโดยรอบ (Surrounding)	-
st	คือ แผ่นสแตนเลส (Stainless foil)	-
w	คือ ผนังมีการจ่ายฟลักซ์ความร้อน (Wall heat flux)	-
aw	คือ ผนังไม่มีการจ่ายฟลักซ์ความร้อน (Wall no heat flux)	-
สัญลักษณ์ตัวยก		
-	คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูล	-
.	คือ อัตราการเปลี่ยนแปลง (Rate)	-

1. บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เจ็ทไหลปะทะหรือเจ็ทพุ่งชนเป็นเทคนิคการแลกเปลี่ยนความร้อนหรือมวลสารระหว่างของไหลกับพื้นผิวที่ใช้เจ็ทของไหลที่มีความเร็วสูงจากปากทางออกไหลปะทะกับพื้นผิวโดยตรง เนื่องจากการใช้เจ็ทไหลปะทะพื้นผิวสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนหรือมวลสารได้สูง โดยเฉพาะบริเวณที่เจ็ทไหลปะทะโดยตรง มีผลทำให้การให้ความร้อนหรือระบายความร้อนบนพื้นผิวเกิดรวดเร็วขึ้น ปัจจุบันมีงานทางวิศวกรรมจำนวนมากที่ใช้ประยุกต์ใช้เจ็ทไหลปะทะพื้นผิว ตัวอย่างเช่น การระบายความร้อนภายในกังหันแก๊สเทอร์โบใบที่มีการใช้กลุ่มของเจ็ทพุ่งชนผนังด้านในของกังหันเพื่อป้องกันการเสียหายจากความร้อนของแก๊สร้อนที่อยู่รอบใบกังหัน เช่นเดียวกับการระบายความร้อนผนังของห้องเผาไหม้ หรือการระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ปัจจุบันใช้เจ็ทไหลปะทะจุดร้อนที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์แทนการใช้อากาศจากพัดลมไหลผ่านจุดร้อน เนื่องจากอัตราการเกิดความร้อนต่อพื้นที่เพิ่มสูงขึ้น หรือในกระบวนการให้ความร้อน กระบวนการอบแห้ง หรือกระบวนการแช่แข็งผลิตภัณฑ์อาหารที่ต้องการลดเวลาในกระบวนการผลิต เป็นต้น

อย่างไรก็ตามการใช้เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวมีข้อด้วย คือ ต้องใช้พลังงานปั๊มหรือพัดลมในการสร้างเจ็ทที่มีความเร็วสูงเพื่อไหลปะทะพื้นผิวให้ได้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้นตามที่ต้องการ นอกจากนี้ อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงมากเฉพาะบริเวณศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation point) เท่านั้น และจะลดลงอย่างรวดเร็วตามแนวรัศมีเมื่อห่างจากจุดที่เจ็ทพุ่งชน ทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว [1] จนถึงปัจจุบันมีงานวิจัยที่นำเสนอวิธีการเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนหรือมวลสารของเจ็ทพุ่งชน สามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนหรือมวลสารบนพื้นผิวให้สูงขึ้น โดยใช้ความเร็วเจ็ทเท่าเดิม ทำให้สามารถประหยัดพลังงานที่ใช้ในปั๊มหรือพัดลมได้ เช่น การปรับเปลี่ยนปากทางออกของเจ็ทเพื่อให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงขึ้น

ลักษณะของปากทางออกเจ็ทมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวอย่างมาก เช่น ปากทางออกเจ็ทที่ขอบมนมีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะสม่ำเสมอขึ้น แต่ที่ระยะพุ่งชนน้อยกว่า 1D เท่านั้น [2] สำหรับเจ็ทจากปากทางออกแบบช่องสี่เหลี่ยม (Slot nozzle) การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวก็ยังคงมีลักษณะสูงสุดที่จุดพุ่งชน (Stagnation point) และลดลงอย่างรวดเร็วตามแนวแกนที่ห่างจากจุดที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรงคล้ายกับเจ็ทท่อปกติ (Pipe nozzle) [3] ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวไม่สม่ำเสมอ แต่สำหรับเจ็ทจากท่อหน้าตัดแบบวงแหวน (Annular nozzle) นั้นสามารถเพิ่มความสม่ำเสมอในการถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิว แต่เมื่อระยะพุ่งชนมากขึ้นความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจะลดลงอย่างรวดเร็ว [4] แต่สามารถปรับปรุงได้โดยการสอดใส่แผ่นปิด [5] และแผ่นบังคับการไหลที่ปากทางออก [6] ซึ่งทำให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้นที่ระยะพุ่งชนต่ำ แต่การถ่ายเทความร้อนลดลงเช่นกันเมื่อระยะพุ่งชนสูงขึ้น

นอกจากความสม่ำเสมอในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว การเพิ่มพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนให้กว้างขึ้นจากแนวของท่อเจ็ทนั้นเป็นสิ่งสำคัญเช่นเดียวกัน การติดตั้งตัวบังคับให้เกิดการไหลในแนวรัศมี (Radial jet nozzle) ซึ่งเรียกว่าเจ็ทในแนวรัศมี โดยของไหลที่ไหลออกจากปากเจ็ทจะบานออกในแนวรัศมี ส่งผลให้พื้นที่ถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น Neil Zuckerman และ Noam Lior [7] ได้แสดงความเร็วในแนวรัศมีสูงสุดที่ระยะพุ่งชนน้อยที่สุด ส่งผลให้ในกรณีดังกล่าวนี้ความ

เข้มข้นของความปั่นป่วนสูงสุดด้วยเช่นกัน Potdar [8] เจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีแบบเจาะรูบนแผ่นกั้นจะเกิดการไหลแบบหมุนวนบนพื้นผิวบริเวณในตำแหน่งบริเวณที่เจาะรู ซึ่งจะไม่ปรากฏในกรณีของเจ็ทท่อปกติ Peper และคณะ [9] ได้แสดงให้เห็นว่าเจ็ทในแนวรัศมีสามารถเพิ่มความสม่ำเสมอของพื้นผิวถ่ายเทความร้อน ทำให้มีการศึกษาเพื่อประยุกต์ใช้ในด้านถ่ายเทความร้อน [10] รวมถึงสิทธิบัตรที่แสดงการถือสิทธิเกี่ยวกับอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนที่ประยุกต์เจ็ทที่ไหลในแนวรัศมี แต่อย่างไรก็ตาม จากเอกสารที่ได้ทบทวนนั้น ยังขาดผลการศึกษาที่ชี้ชัดถึงมุมของไหลที่ปากทางกับระยะของผนังพุ่งชนที่สามารถถ่ายเทความร้อนได้สูงสุด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาผลของมุมกรวยบังคับการไหลที่ติดตั้งบนปากทางออกเจ็ทแบบวงแหวนที่มีต่อลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน และเปรียบเทียบผลการศึกษากับกรณีท่อเจ็ทแบบปกติและท่อเจ็ทแบบวงแหวน (ไม่ติดตั้งกรวยบังคับการไหล) ที่มีพื้นที่การไหลออกของเจ็ทเท่ากัน โดยกำหนดค่าตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลคงที่เท่ากับ $Re=20,000$

2. วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย

2.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1.1 ศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนจากปากทางออกเจ็ทแบบวงแหวนที่ติดตั้งแท่งกรวยบังคับการไหล และเปรียบเทียบกับกรณีของหัวฉีดแบบท่อธรรมดา

2.1.2 ศึกษาผลของตัวแปรมุมของแท่งกรวยบังคับการไหลและระยะห่างจากปากทางออกท่อเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ที่มีลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนจากปากทางออกเจ็ทแบบวงแหวนที่ติดตั้งแท่งกรวยบังคับการไหล

2.2 ขอบเขตของงานวิจัย

2.2.1 ศึกษาการไหลของเจ็ทจากท่อวงแหวนที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งแท่งกรวยบังคับการไหล และเจ็ทจากท่อธรรมดาที่ไหลพุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิว

2.2.2 ในการศึกษา กำหนดให้อัตราการไหลของเจ็ทจากท่อแต่ละแบบคงที่ โดยที่ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ $Re=20,000$ เพื่อเปรียบเทียบผลการไหลและการถ่ายเทความร้อน

2.2.3 ศึกษาผลของระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=2D_h, 4D_h, 6D_h$ และ $8D_h$ ตามลำดับ โดยที่ D_h คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อเจ็ทวงแหวน

2.2.4 ศึกษาผลของมุมของแท่งกรวยบังคับการไหลที่มุม $30^\circ, 60^\circ$ และ 90°

2.2.5 ศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนโดยใช้กล้องอินฟราเรด (Infrared camera) วัดการกระจายอุณหภูมิ

2.2.6 ศึกษาลักษณะการไหล โดยใช้โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของของไหล ANSYS version 13.0 (Fluent)

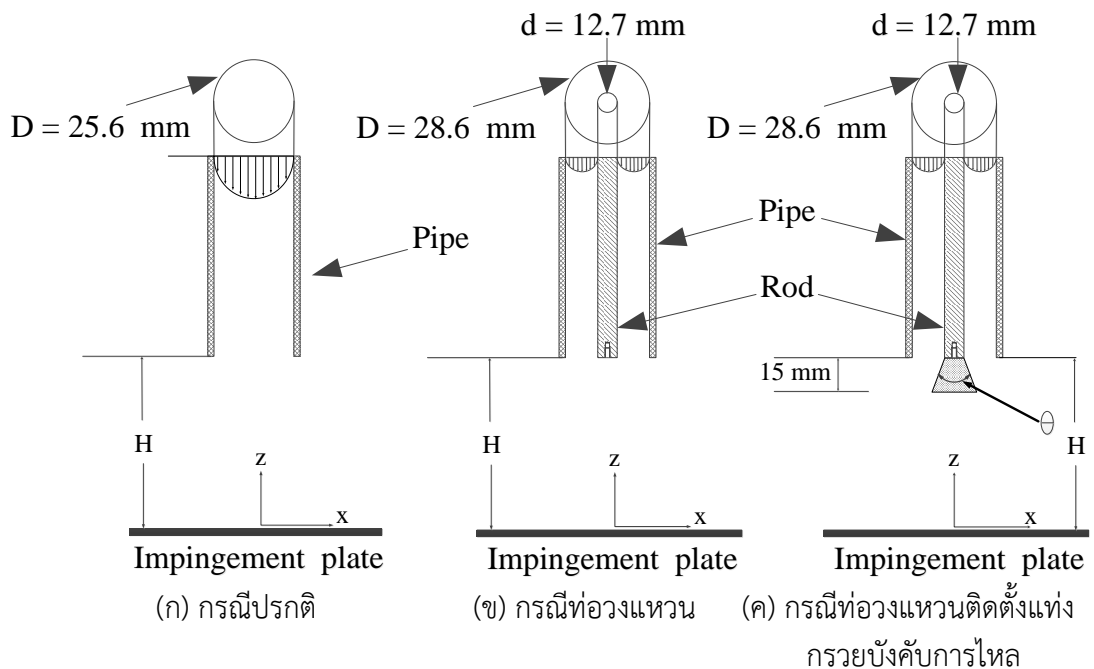
2.2.7 ศึกษาการไหลของเจ็ทพุ่งชนโดยการวัดการกระจายความดันบนผนังที่เจ็ทพุ่งชน ด้วย Pressure transducer

2.2.8 ศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำด้วยวิธีเชิงทัศน Laser Induced Fluorescence (LIF)

3. ขั้นตอนการวิจัย

3.1 โมเดลที่ใช้ในการศึกษา

รูปที่ 1 แสดงโมเดลท่อเจ็ทแบบท่อปรกติ, แบบวงแหวนและแบบไหลในแนวรัศมีที่ใช้ในการทดลอง จากรูปเจ็ทไหลออกจากท่อพุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิวกำหนดพิกัด X-Y อยู่บนพื้นผิวตรงจุดกึ่งกลางท่อและแกน Z อยู่ในแนวเดียวกับการไหลของเจ็ทตามที่ได้แสดงในรูปที่ 1 โดยท่อเจ็ทแบบท่อตรงทำจากท่ออะคลิลิกที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน $D=25.6$ mm ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 1 (ก) ท่อเจ็ทแบบวงแหวนสร้างโดยสอดเพลาสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก $d=12.7$ mm ไว้ตรงกลางท่อเหล็กที่มีขนาดภายใน $D=28.6$ mm ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 1 (ข) โดยท่อเจ็ทและเพลามีความยาวเพียงพอที่จะทำให้เกิดการไหลแบบพัฒนาตัวก่อนที่อากาศจะไหลออกจากปากทางออกท่อเจ็ท ในการสร้างเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมี ได้ทำการติดตั้งแท่งทรงกรวยที่มีมุมบานจากแนวแกนเจ็ท $\theta = 30^\circ, 60^\circ$ และ 90° ที่ศูนย์กลางปากทางออกท่อเจ็ท โดยยึดติดกับเพล่าที่อยู่ตรงกลางท่อเจ็ท และกำหนดให้ระยะจากปากทางออกท่อเจ็ทถึงฐานของทรงกรวยมีความสูงคงที่เท่ากับ 15 mm ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 1 (ค) สำหรับระยะจากปากทางออกท่อเจ็ทถึงผนังที่เจ็ทพุ่งชนได้ปรับให้อยู่ในช่วง $H=2D_h, 4D_h, 6D_h$ และ $8D_h$ โดยที่ D_h คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก ($D_h=D-d$) ในทุกการทดลองกำหนดให้อัตราการไหลของเจ็ทคงที่ โดยเทียบจากค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของเจ็ทจากท่อตรงที่ $Re=VD_H/\nu = 20,000$ โดยที่ V คือ ความเร็วเฉลี่ยและใช้ pitot tube วัดความเร็วลมที่ปากทางออก

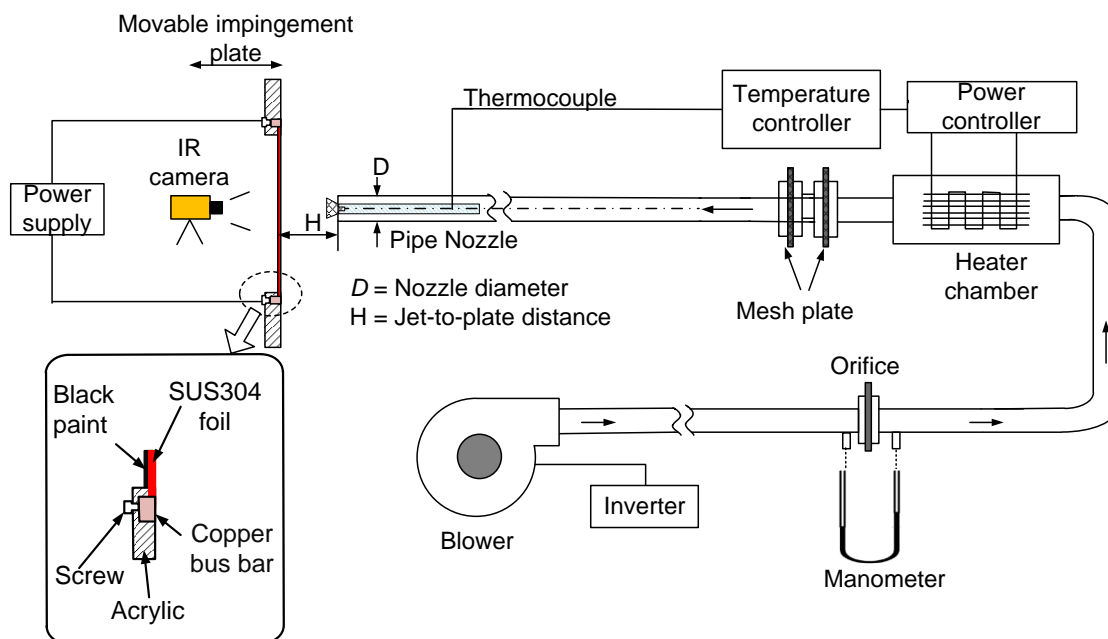


รูปที่ 1 รูปแบบโมเดลที่ใช้ในการศึกษา

3.2 รายละเอียดชุดทดลอง

รูปที่ 2 แสดงรายละเอียดของชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษา เจ็ทอากาศถูกสร้างจากการดูดอากาศภายในห้องทดลองโดยใช้โบรเวอร์ แล้วอากาศไหลผ่านออร์ริฟิสเพื่อวัดอัตราการ

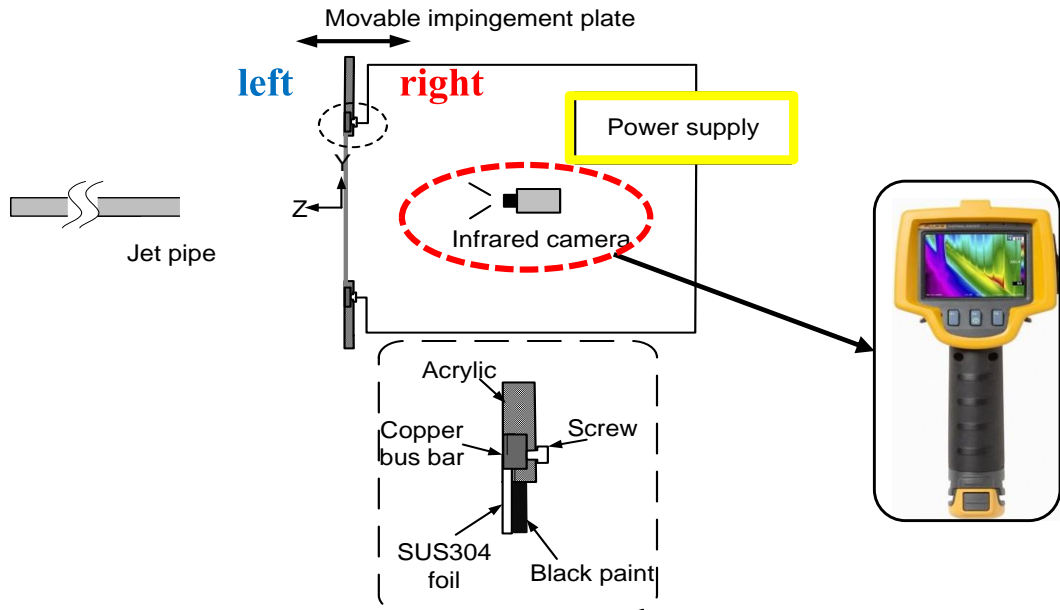
ไหลและควบคุมอัตราการไหลของอากาศโดยการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ใบพัดด้วยอินเวอร์เตอร์ หลังจากนั้นอากาศจะไหลผ่านห้องฮีตเตอร์เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเจ็ทอากาศให้คงที่ที่ $27 \pm 0.2^\circ\text{C}$ และไหลผ่านแผ่นตะแกรง 2 ชั้น เพื่อให้กระจายอุณหภูมิตลอดหน้าตัดต่อเจ็ทสม่ำเสมอ ก่อนที่ไหลผ่านไปยังท่อเจ็ทที่มีความยาว 575 mm และไหลพุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิวโดยชุดทดลองนี้ถูกออกแบบให้สามารถปรับระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนได้ โดยการเลื่อนผนังที่เจ็ทพุ่งชนเข้าออก



รูปที่ 2 ไดอะแกรมของชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษา

3.3 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

รูปที่ 3 แสดงรายละเอียดผนังสำหรับการวัดค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน สำหรับการวัดค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวได้ใช้แผ่นสแตนเลสบางที่มีความหนา 0.03 mm โดยแผ่นสแตนเลสนี้ถูกขึงให้เรียบตึงกับแผ่นพลาสติกหนา 15 mm ที่เจาะหน้าต่างขนาด 240 mm x 240 mm ไว้กึ่งกลางแผ่น โดยใช้แท่งทองแดงยึดแผ่นสแตนเลสไว้ทั้งสองข้าง และแท่งทองแดงทั้งสองนี้จะต่อกับขั้วของตัวจ่ายกระแสไฟฟ้า เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านแท่งทองแดงไปยังแผ่นสแตนเลส จะเกิดความร้อนกระจายทั่วพื้นผิวแผ่นสแตนเลส จากนั้นใช้เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวทำการระบายความร้อน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว จึงทำการบันทึกค่าการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวแผ่นสแตนเลสด้านตรงข้ามที่เจ็ทพุ่งชนโดยใช้กล้องอินฟราเรดตรวจจับความร้อน (Thermal infrared camera)



รูปที่ 3 รายละเอียดผนังสำหรับการวัดค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิว

สำหรับอัตราการเกิดความร้อนในแผ่นสแตนเลส สามารถคำนวณได้จากความสัมพัทธ์ดังนี้

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

ในที่นี้ I คือกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นสแตนเลส V คือแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมแผ่นสแตนเลส และ A คือ พื้นที่ของพื้นผิวถ่ายเทความร้อน (แผ่นสแตนเลส)

จากนั้นสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะจุดบนพื้นผิว (h) ได้จากสมการ

$$h = \frac{\dot{q}_{input} - \dot{q}_{rad} - \dot{q}_{nat}}{T_w - T_{aw}} \quad (2)$$

ในที่นี้ $\dot{q}_{rad} = \epsilon(\bar{T}_w^4 - T_s^4)$ และ $\dot{q}_{nat} = h_c(\bar{T}_w - T_s)$ คือ พลังค์การสูญเสียความร้อนที่เกิดจากการแผ่รังสีและการพาความร้อนแบบธรรมชาติบนผนังด้านหลังของแผ่นสแตนเลส T_{aw} คืออุณหภูมิของแผ่นสแตนเลสเมื่อเจ็ทพุ่งชนในขณะที่ไม่มีพลังค์ความร้อน, T_w คืออุณหภูมิของแผ่นสแตนเลสที่มีพลังค์ความร้อน และ T_s คืออุณหภูมิบรรยากาศโดยรอบ

ค่าสัมประสิทธิ์นัมเบอร์บนพื้นผิวนำมาคำนวณได้จากความสัมพัทธ์

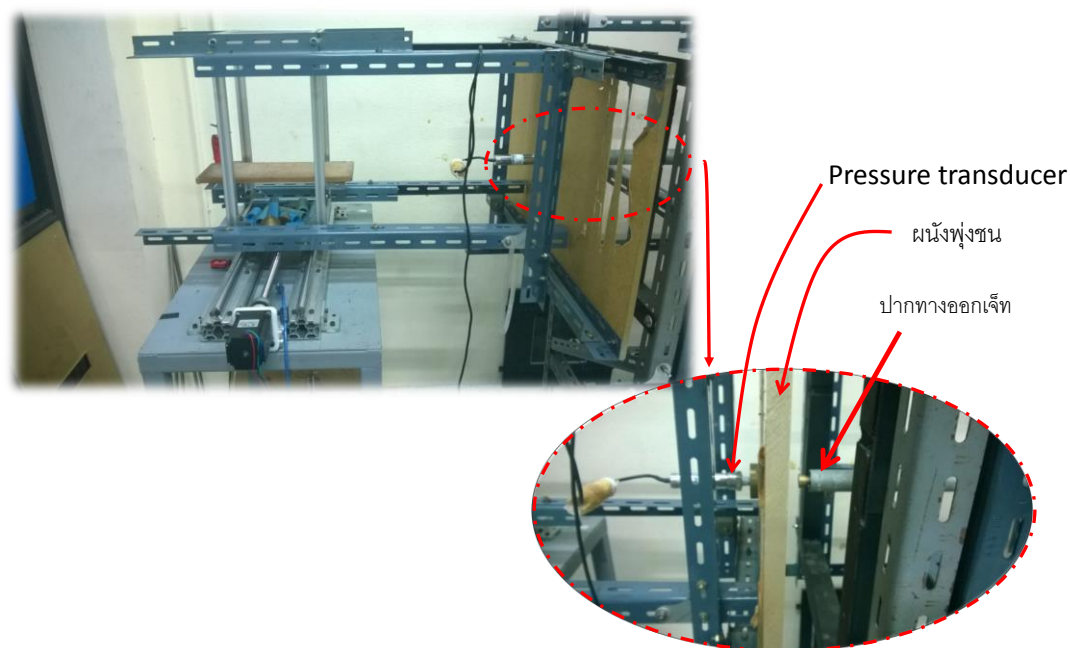
$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (3)$$

โดยที่ h คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ k คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ และ D_h คือไฮดรอลิกไดมิเตอร์เนื่องจากท่อทุกแบบมีพื้นที่หน้าตัดและอัตราการไหลที่เท่ากัน จึงใช้ $D_h=15.9$ mm (ท่อเจ็ทแบบวงแหวน) ในการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

3.4 การศึกษาการกระจายความดันบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

รูปที่ 4 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการวัดการกระจายความดันบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน เพื่อศึกษาลักษณะการไหลปะทะพื้นผิวของเจ็ทจากท่อแบบต่างๆ โดยผนังที่เจ็ทพุ่งชนทำจากแผ่นอะคริลิกหนา 15 mm ตรงกลางแผ่นเจาะรูสำหรับติดตั้ง adaptor ที่ทำจากทองเหลืองที่มีผิวเสมอกับผิวของผนังที่เจ็ทพุ่งชน และเจาะรู tap วัดความดันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm บนแท่งทองเหลือง เพื่อติดกับเซนเซอร์วัดความดัน (pressure transducer) จากรูปผนังที่เจ็ทพุ่งชนประกอบเข้ากับโต๊ะควบคุมการเลื่อนตำแหน่งแบบ 1 แกน (1D Transverse table) ดังรูป โดยเครื่องวัดความดันจะต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อแปลงสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องวัดความดัน (pressure transducer) เป็นค่าความดัน และข้อมูลความดันในแต่ละจุดจะถูกบันทึกลงคอมพิวเตอร์

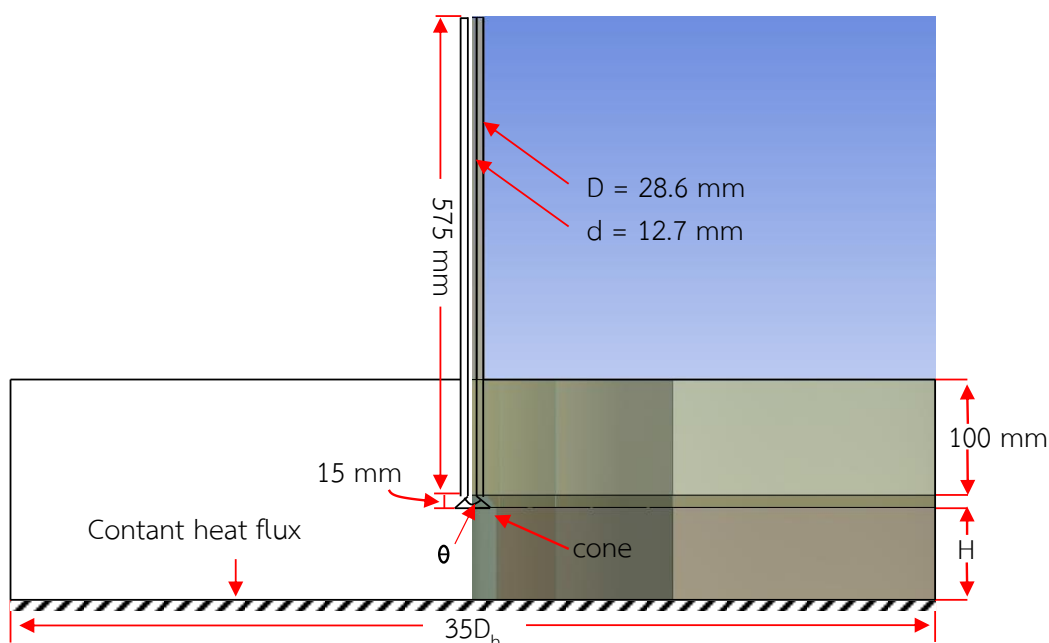
สำหรับวิธีการวัดการกระจายของความดันของเจ็ทพุ่งชน โดยกำหนดตำแหน่งการวัดการกระจายความดัน ที่ระยะห่างจากปากทางออก $H=2D_h, 4D_h, 6D_h$ และ $8D_h$ ในการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการจะวัดใช้ชุดควบคุมอัตโนมัติปรับตำแหน่งการเคลื่อนที่ ในส่วนของการปรับระยะพุ่งชน จะปรับโดยการเลื่อนเข้า-ออกแล้วทำการยึดให้แน่น ในการเก็บข้อมูลด้วยคอมพิวเตอร์นั้นจะใช้ความถี่ในการเก็บข้อมูล (sample of frequency) 20 Hz และตัวอย่างในการเก็บข้อมูล (Number of samples) เท่ากับ 400 และจะนำข้อมูลของการกระจายความดันที่ได้มาวิเคราะห์เพื่ออธิบายโครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชน



รูปที่ 4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการกระจายของความดันที่ติดตั้งบนผนังที่เจ็ทพุ่งชน

3.5 การจำลองการไหลด้วยวิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

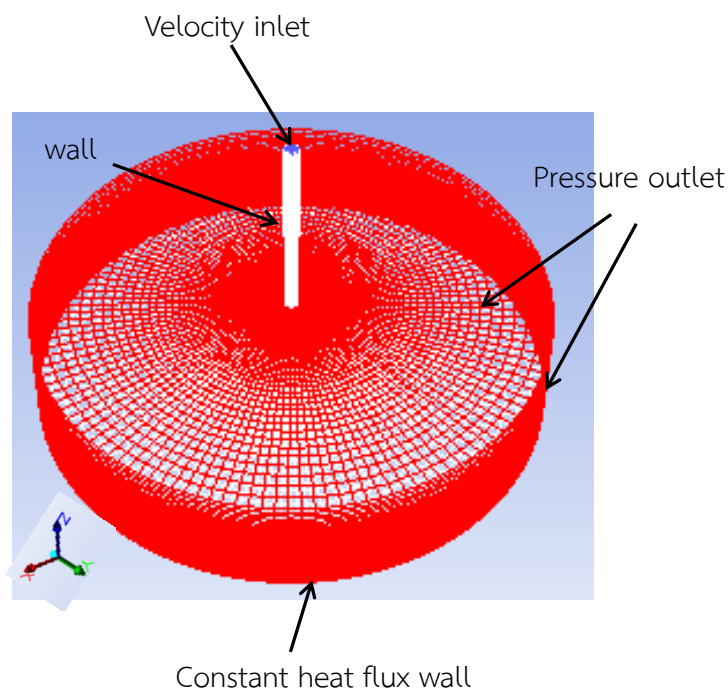
ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม ANSYS Ver.13 (Fluent) ในการจำลองการไหลของเจ็ทพุ่งชน โดยแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นจำลอง 3 มิติ (3D) ดังรูปที่ 5 แสดงโมเดลที่ใช้ในการจำลองการไหล โดยจำลองโมเดลให้เหมือนกับการทดลองจริงทุกประการ จากรูปโมเดลประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นส่วนที่เป็นท่อเจ็ท (Nozzle pipe) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่เท่ากับ $D_h = 15.9$ mm สำหรับเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีจะติดแท่งทรงกรวยทำมุม $\theta = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ สูง 15 mm ส่วนที่สองเป็นส่วนของบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิว (Impingement surface) มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ $35D_h$ และระยะจากปากทางออกท่อเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H = 2D_h, 4D_h, 6D_h$ และ $8D_h$



รูปที่ 5 โมเดลที่ใช้ในการจำลองการไหล

กริดที่ใช้ในแบบจำลองจะมีลักษณะเป็นลูกบาศก์สี่เหลี่ยมผืนผ้า บริเวณตรงกลางจากปากทางออกท่อถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนและพื้นที่ผิวพุ่งชนมีความละเอียดสูง ซึ่งบริเวณดังกล่าวต้องการความละเอียดในการคำนวณสูง และบริเวณปากทางออกของเจ็ทและพื้นที่ผิวพุ่งชนมีลักษณะกริดเป็นขั้นๆ ซึ่งมีความละเอียดสูงจากปลายทั้งสองข้าง และความละเอียดจะลดลงเมื่อห่างจากบริเวณปากทางออกของเจ็ทและพื้นที่ผิวที่เจ็ทพุ่งชน ในขั้นตอนการสร้างกริดนี้ จะกำหนดพื้นผิวของแบบจำลอง เพื่อสร้างเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 6

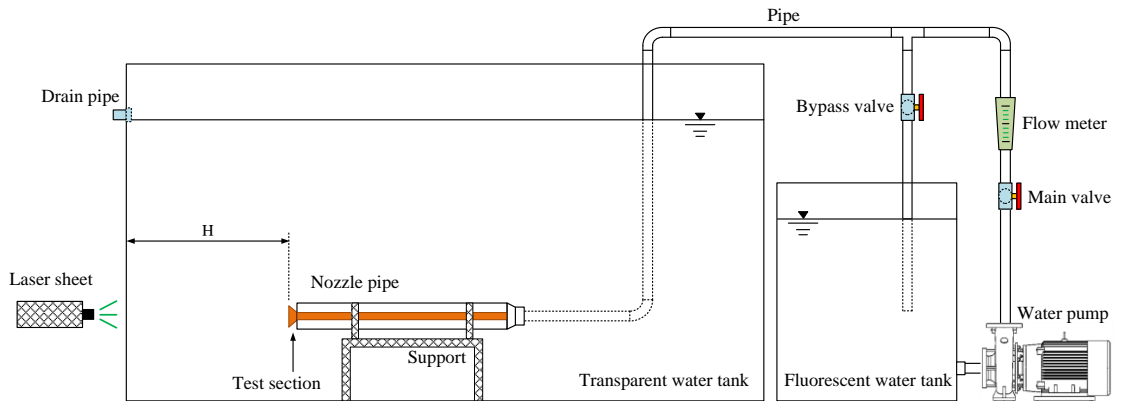
สำหรับวิธีการคำนวณ ได้กำหนดอัลกอริทึมเป็นแบบ SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) โดย รายละเอียดของ Spatial discretization ในแต่ละสมการที่ใช้ในการคำนวณกำหนดเป็นแบบ Second order upwind โดยกำหนดเงื่อนไขในการหยุดประมวลผลที่ค่าความผิดพลาด (Residuals) เท่ากับ 1×10^{-5}



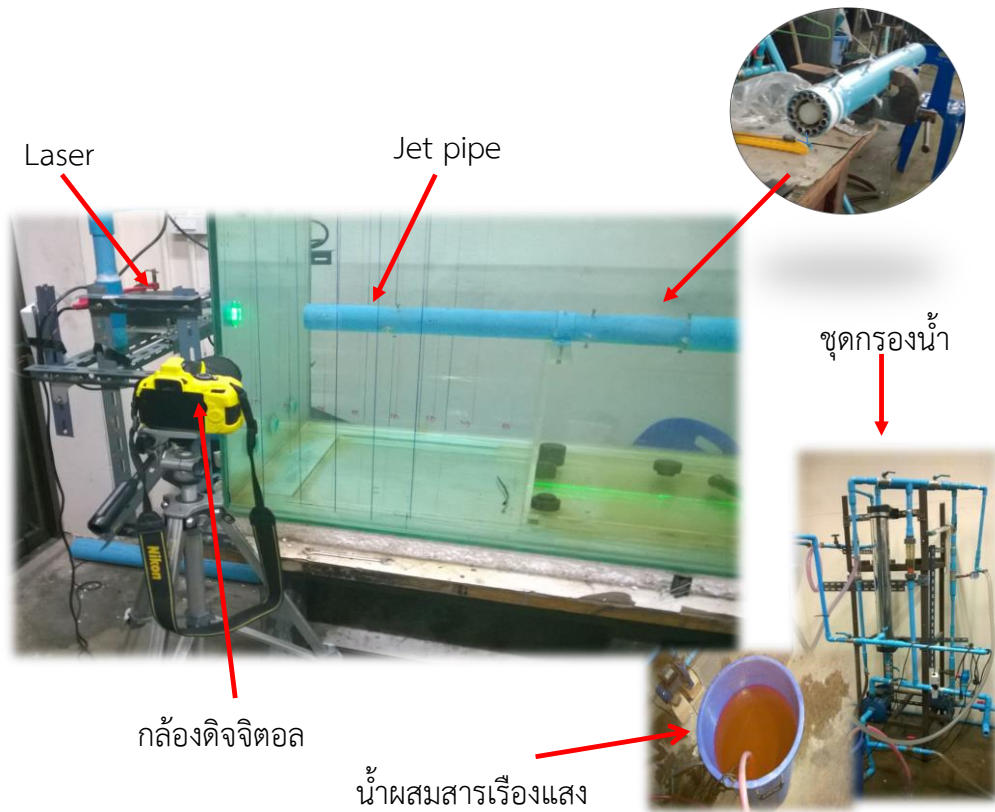
รูปที่ 6 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการไหล

3.6 การศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำด้วยวิธีเชิงทัศน

สำหรับการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบโครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชนจากท่อเจ็ทแบบต่างๆ โดยในการศึกษาเลือกเรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re=4,000$ ซึ่งเป็นช่วงความเร็วของเจ็ทน้ำที่สามารถสังเกตลักษณะโครงสร้างการไหลของเจ็ทได้ชัดเจน โดยตู้น้ำ (Water tank) ที่ใช้ในการศึกษาทำจากกระจกแก้วใสเพื่อให้สามารถสังเกตการไหลของเจ็ทน้ำได้ ตู้น้ำมีขนาดความกว้าง 80 cm ยาว 200 cm และสูง 80 cm ในการทดลองน้ำจะถูกดูดส่งจากถังเก็บน้ำ (Jet water tank) ขนาด 120 ลิตร โดยใช้ปั้มน้ำ (Water pump) แบบหอยโข่ง หลังจากนั้นน้ำจะไหลผ่านวาล์วปรับอัตราการไหล (Main valve) และอุปกรณ์วัดอัตราการไหลขนาด 0.37-3.78 ลิตรต่อนาที ไปยังท่อพักน้ำ (Jet chamber) เพื่อกระจายน้ำที่เข้ามาให้มีความเร็วสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดก่อนที่จะไหลออกจากหัวฉีด (Nozzle pipe) โดยท่อเจ็ท (D) ที่ใช้มีขนาดใหญ่กว่ากรณีที่ใช้ศึกษาเจ็ทอากาศ 2 เท่า เพื่อให้สามารถสังเกตลักษณะการไหลได้ชัดเจน โดยท่อเจ็ทที่ใช้ทำจากท่อพีวีซี ดังรูปที่ 7 บันทึกภาพโดยใช้กล้องดิจิทัลวีดีโอที่ 30 เฟรมต่อวินาที



รูปที่ 7 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลด้วยวิธีเชิงทัศน (LIF)



รูปที่ 8 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลด้วยวิธีเชิงทัศน (LIF)

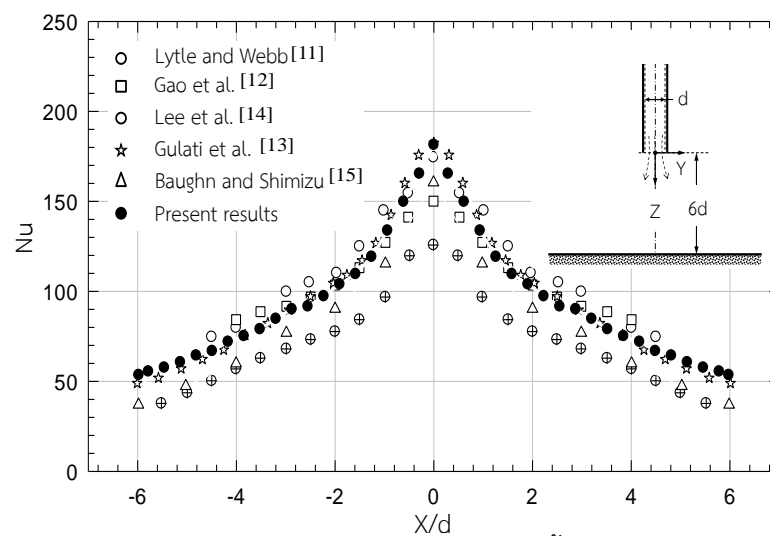
สำหรับการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำอิสระด้วยวิธีเชิงทัศนแสดงดัง รูปที่ 8 โดยใช้วิธีผสมสาร Rhodamine B ($C_{28}H_{31}ClN_2O_3$) ลงในถังน้ำ (Fluorescent water tank) ซึ่งสาร Rhodamine B มีคุณสมบัติเรืองแสง หลังจากนั้นฉีดเจ็ทน้ำที่มีสารเรืองแสงลงในน้ำใสที่อยู่ในตู้น้ำ (Transparent water tank) และใช้แสงเลเซอร์ส่องตัดผ่านตรงกลางของลำเจ็ทเพื่อดูโครงสร้างการไหลของเจ็ท ซึ่งชุดอาร์กอนเลเซอร์ (Argon laser) ที่ใช้ในการทดลองขนาด 500 mW ลำเจ็ทเมื่อ

กระทบกับแสงเลเซอร์จะเกิดการเรืองแสงขึ้นจึงสามารถมองเห็นลำเจ็ทได้อย่างชัดเจน และใช้กล้องดิจิตอลวีดีโอบันทึกภาพลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำ ซึ่งจะสามารถมองเห็นโครงสร้างการไหลของเจ็ทได้อย่างชัดเจน

4. ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

ในเบื้องต้น ได้ทำการทดลองเพื่อเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนกับงานวิจัยในอดีต รูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายนัสเซลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนกับงานวิจัยอื่นๆ ที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวพุ่งชน $H/d=6$ เรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re=23,000$ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเจ็ท $d=17.2$ mm ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่นๆ โดยภาพรวมพบว่า ลักษณะการกระจายนัสเซลต์นัมเบอร์ใกล้เคียงกับงานวิจัยในอดีต โดยเฉพาะผลจากการทดลองของ Lytle และ Webb [11], Gao และคณะ [12] และงานวิจัยของ Gulati [13]

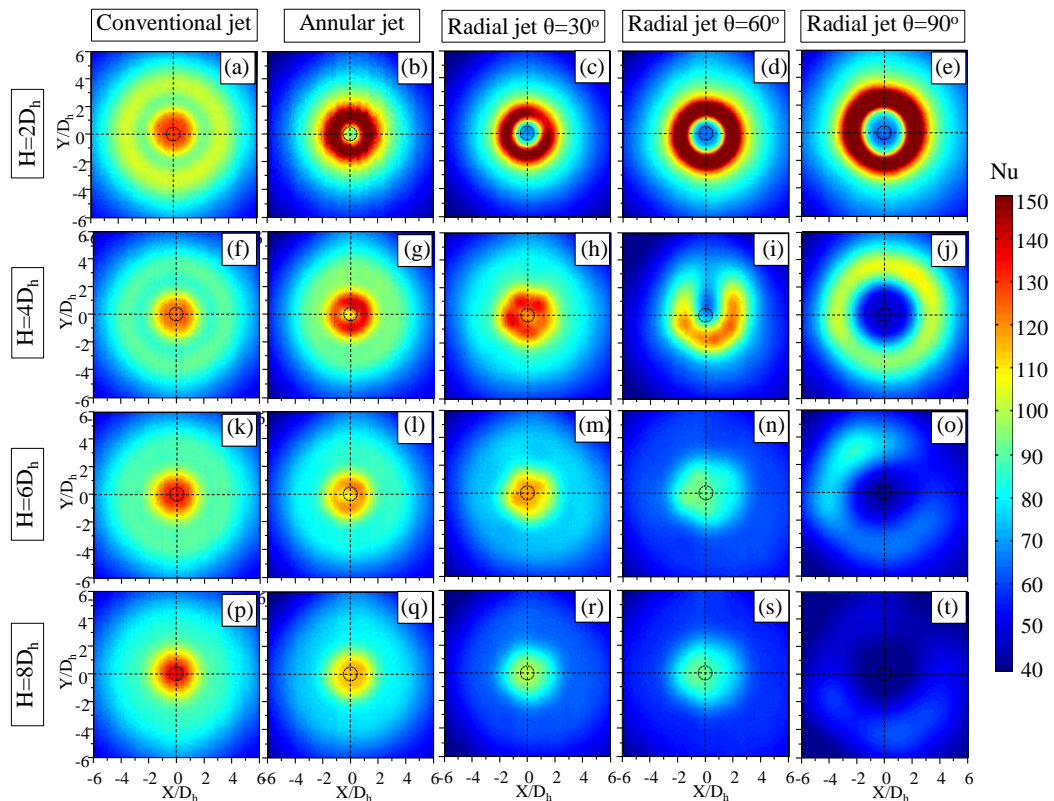


รูปที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายนัสเซลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนตามแนวศูนย์กลางท่อเจ็ทกับงานวิจัยอื่นๆ (ที่เงื่อนไข $H/d=6$, เจ็ทอากาศ, $Re=23,000$)

รูปที่ 10 ได้แสดงการกระจายของนัสเซลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนใน 5 กรณีคือ เจ็ทจากท่อปกติ เจ็ทจากท่อวงแหวน เจ็ทจากท่อที่ไหลในแนวรัศมีทำมุม θ เท่ากับ 30, 60 และ 90 องศา ในกรณีของเจ็ทท่อปกติ นัสเซลต์นัมเบอร์ที่ระยะพุ่งชน $H=2D_h$ (รูปที่ 10(a)) จะมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางการชน ซึ่งอยู่ในแนวศูนย์กลางท่อเจ็ท และค่อยๆ ลดลงตามระยะที่ห่างออกจากแนวกึ่งกลางท่อเจ็ท หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นสูงอีกครั้ง (Secondary peak) เป็นรูปวงแหวนที่ตำแหน่ง $X/D_h=3$ เช่นเดียวกับกับระยะพุ่งชน $H=4D_h$ (รูปที่ 10(f)) ลักษณะการกระจายของนัสเซลต์นัมเบอร์จะมีรูปแบบที่เหมือนกันแต่จะมีค่านัสเซลต์นัมเบอร์ ต่ำกว่าที่ระยะพุ่งชน $H=2D_h$ (รูปที่ 10(a)) และเริ่มลดลงอีกที่ระยะพุ่งชน $H=6D_h$ และ $8D_h$ (รูปที่ 10(k) และ (p)) จะไม่ปรากฏค่านัสเซลต์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นสูงอีกครั้ง (Secondary peak) นอกจากนี้ยังพบว่าบริเวณที่มีค่านัสเซลต์นัมเบอร์สูงจะมีบริเวณที่แคบลง

ในกรณีของเจ็ทวงแหวน ที่ระยะพุ่งชนต่ำสุด $H=2D_h$ (รูปที่ 10(b)) การกระจายของนัสเซลต์นัมเบอร์มีค่าต่ำที่ตำแหน่งกึ่งกลางท่อเจ็ท ซึ่งเป็นผลมาจากการสอดเพลลาภายในท่อเจ็ทเจ็ทยังไม่เกิดการรวมตัวก่อนไหลพุ่งชนพื้นผิว บริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงเป็นรูปวงแหวนตาม

ลักษณะของหน้าตัดต่อเจ็ท เมื่อระยะพุ่งชนเพิ่มขึ้นเป็น $H=4D_h$ (รูปที่ 10(g)) บริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำที่ตำแหน่งกึ่งกลางต่อเจ็ทมีขนาดเล็กกลวง เนื่องจากเจ็ทเกิดการรวมตัวมากขึ้นก่อนพุ่งชนพื้นผิวและเมื่อระยะพุ่งชนเพิ่มเป็น $H=6D_h$ และ $8D_h$ ค่านี้สเกลิต์นัมเบอร์สูงสุดจะลดลงตามลำดับ แต่ค่าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่จุดศูนย์กลางแนวต่อเจ็ท

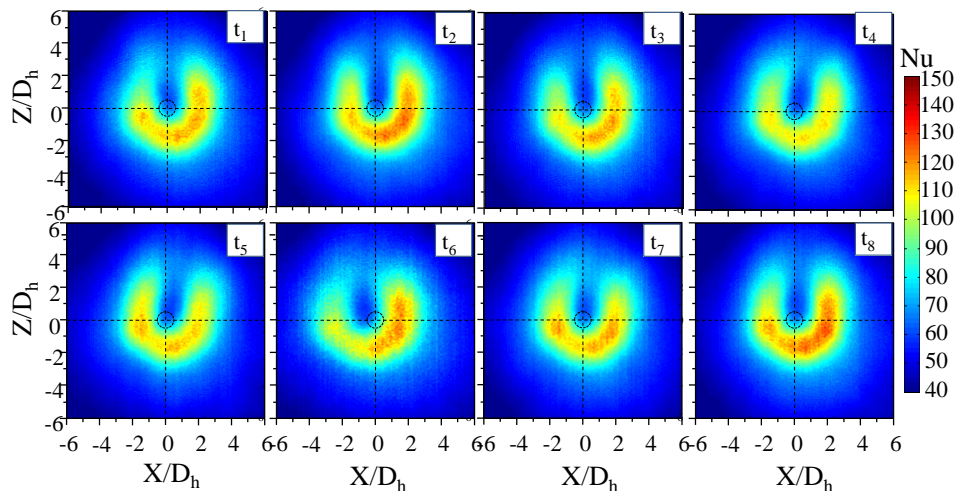


รูปที่ 2 การกระจายของนัสเซลิต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ($Re=20,000, T_j=27^\circ C$)

สำหรับเจ็ทไหลในแนวรัศมี ที่ระยะพุ่งชน $H=2D_h$ ค่านี้สเกลิต์นัมเบอร์สูงสุดมีลักษณะเป็นวงแหวนและที่จุดศูนย์กลางแนวต่อเจ็ทไม่ใช่ตำแหน่งค่านี้สเกลิต์นัมเบอร์สูงสุด โดยพื้นที่ของวงแหวนจะเพิ่มขึ้นตามมุม θ ที่เพิ่มขึ้น แต่พื้นที่ศูนย์กลางวงแหวนที่มีค่านี้สเกลิต์นัมเบอร์ต่ำกว่ามีขนาดเพิ่มขึ้นเช่นกัน ทำให้ในกรณีของมุม $\theta=90$ องศา พื้นที่วงแหวนและค่านี้สเกลิต์นัมเบอร์จะมีค่ามากที่สุด และลดลงตามแนวรัศมีที่เพิ่มขึ้น เมื่อระยะพุ่งชนเพิ่มเป็น $H=4D_h$ ที่มุม $\theta=30$ องศา ค่านี้สเกลิต์นัมเบอร์สูงสุดจะลดลง แต่ยังคงปรากฏลักษณะวงแหวน แต่จะมีค่าใกล้เคียงกับจุดศูนย์กลางและเมื่อระยะพุ่งชนเพิ่มเป็น $H=6D_h$ และ $8D_h$ จุดศูนย์กลางจะมีค่านี้สเกลิต์นัมเบอร์สูงสุด แต่จะลดลงตามระยะห่างที่เพิ่มขึ้น สำหรับกรณีมุม $\theta=60^\circ$ ที่ระยะพุ่งชน $H=4D_h$ การกระจายตัวของค่านี้สเกลิต์นัมเบอร์จะไม่สมมาตร โดยมีลักษณะเป็นวงแหวนที่หายไปบางส่วน และเมื่อระยะพุ่งชนเพิ่มเป็น $H=6D_h$ และ $8D_h$ จุดศูนย์กลางจะมีค่านี้สเกลิต์นัมเบอร์สูงสุด แต่จะลดลงตามระยะห่างที่เพิ่มขึ้น ในกรณี มุม $\theta=90^\circ$ เมื่อระยะพุ่งชนเพิ่มเป็น $H=4D_h$ ค่านี้สเกลิต์นัมเบอร์สูงสุดมีลักษณะเป็น

วงแหวนยังปรากฏอยู่ แต่มีค่าลดลง และเมื่อระยะพุ่งชนเพิ่มเป็น $H=6D_h$ และ $8D_h$ ค่านี้สเซลล์ันด์นัมเบอร์จะลดลงตามระยะห่างที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก

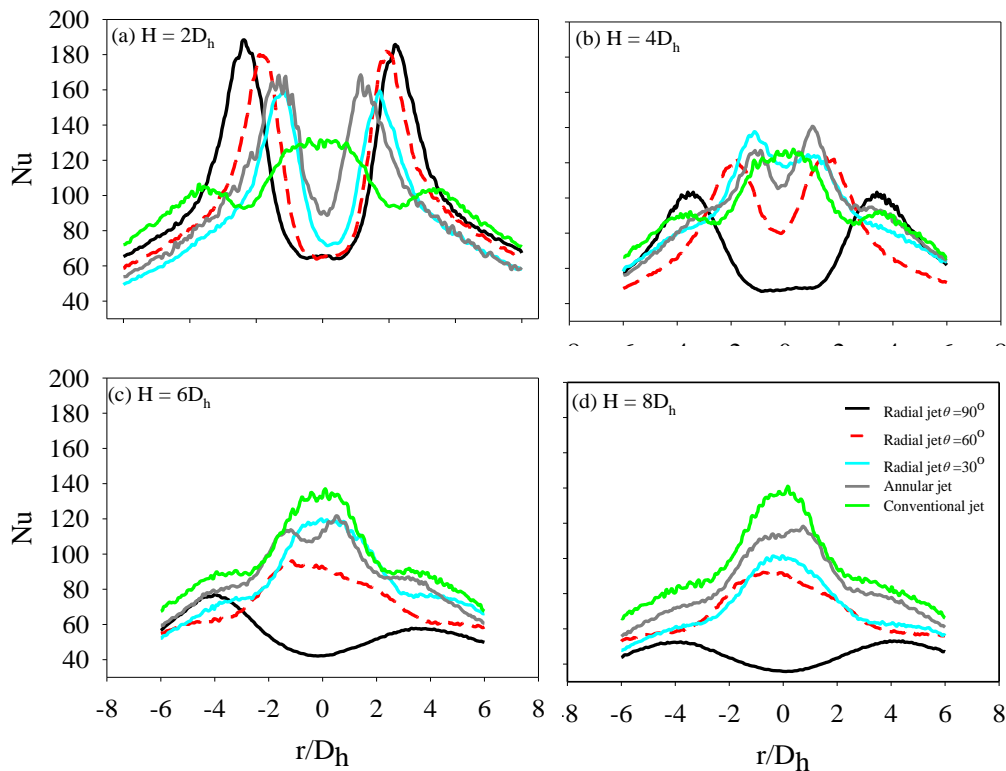
สำหรับเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีกรณีมุม $\theta=60^\circ$ และ $H=4D_h$ ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 10(i) นั้นพบว่าลักษณะบริเวณที่นัสเซลล์ันด์นัมเบอร์มีค่าสูง ($Nu \geq 90$) ไม่เป็นวงแหวน จากการวัดค่านี้สเซลล์ันด์นัมเบอร์ที่เปลี่ยนแปลงจาก t_1 ถึง t_8 เมื่อ t คือเวลาที่ห่างกันวินาที พบว่าลักษณะการกระจายของค่านี้สเซลล์ันด์นัมเบอร์ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาตามที่ได้แสดงในรูปที่ 11 ซึ่งจะได้อธิบายปรากฏการณ์นี้ในส่วนลักษณะการไหลต่อไป



รูปที่ 3 การกระจายของนัสเซลล์ันด์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนกรณีเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีที่มุม $\theta=60^\circ$ และระยะ $H=4D_h$ โดยเปลี่ยนแปลงตามเวลา

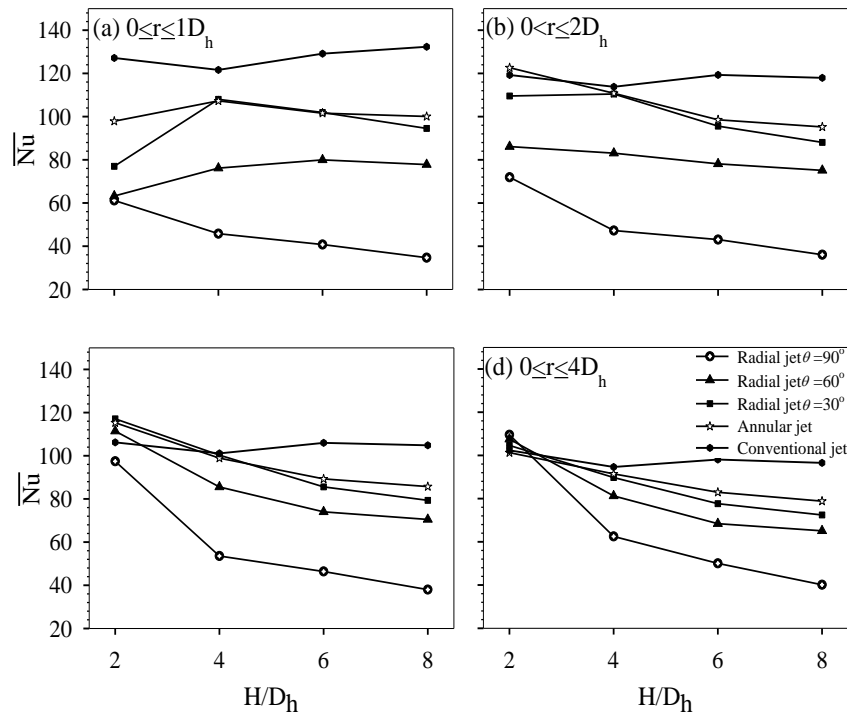
รูปที่ 12 แสดงการกระจายของนัสเซลล์ันด์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ที่ตำแหน่งพุ่งชน $H=2D_h$ กรณีของเจ็ทจากท่อปรกติจะมีค่าสูงสุดที่จุดศูนย์กลางแนวท่อเจ็ทประมาณ 130 และเริ่มลดลงตามแนวรัศมีที่เพิ่มขึ้น โดยที่ระยะ $r/D_h=3$ ค่านี้สเซลล์ันด์นัมเบอร์จะมีค่าสูงสุดอีกครั้ง (Secondary peak) และเริ่มลดลงอีกครั้งเมื่อระยะห่างตามแนวรัศมีเพิ่มขึ้น ในขณะที่กรณีของเจ็ทจากท่อวงแหวน และเจ็ทจากท่อไหลในแนวรัศมี จะมีค่าสูงสุด 2 ตำแหน่งทั้งข้างของจุดศูนย์กลาง โดยกรณีของเจ็ทวงแหวนจุดสูงสุดของนัสเซลล์ันด์นัมเบอร์เกิดขึ้นใกล้กับจุดศูนย์กลางที่สุด ถัดไปเป็นเจ็ทไหลในแนวรัศมีทำมุม $\theta=30, 60$ และ 90 องศา ตามลำดับ โดยที่เจ็ทไหลในแนวรัศมีทำมุม $\theta=90$ องศา จะมีค่านี้สเซลล์ันด์นัมเบอร์สูงกว่าทุกกรณี ซึ่งนัสเซลล์ันด์นัมเบอร์มีค่าสูงสุดสูงกว่าเจ็ทท่อปรกติประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะพุ่งชน $H=4D_h$ เจ็ทท่อปรกติยังคงมีค่านี้สเซลล์ันด์นัมเบอร์สูงสุดที่จุดศูนย์กลาง ในขณะที่กรณีอื่นๆ มีค่าสูงสุด 2 ตำแหน่งทั้งข้างของจุดศูนย์กลางเช่นเดิม แต่กรณีของเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีมุม $\theta=90$ องศา มีค่านี้สเซลล์ันด์นัมเบอร์ต่ำที่สุด โดยเจ็ทจากท่อวงแหวนจะมีค่าสูงสุดรองลงมาเป็นเจ็ทจากท่อไหลในแนวรัศมีมุม $\theta=30$ องศา เจ็ทจากท่อวงแหวน และเจ็ทจากท่อไหลในแนวรัศมีมุม $\theta=60$ องศา ตามลำดับ เมื่อระยะพุ่งชนเพิ่มขึ้นเป็น $H=6D_h$ และ $8D_h$ กรณีของเจ็ทจากท่อปรกติจะมีค่านี้สเซลล์ันด์นัมเบอร์สูงสุด รองลงมาเป็นเจ็ทจากท่อวงแหวน และเจ็ทจากท่อไหลในแนวรัศมีมุม $\theta=30, 60$ และ 90

องศา ตามลำดับ สำหรับในกรณีเจ็ทจากท่อไหลในแนวรัศมีมุม $\theta=90$ องศา ค่านี้สเกลนัมเบอร์ที่ระยะพุ่งชนตำแหน่งดังกล่าวนี้จะลดลงตามระยะห่างที่เพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก



รูปที่ 4 การกระจายของนัสเซลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ($Y/D_h=0$, $Re=20,000$, $T_j=27^\circ\text{C}$)

รูปที่ 13 แสดงนัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่คิดค่าเฉลี่ยในช่วงบริเวณ $0 \leq r/D_h \leq 1$, $0 \leq r/D_h \leq 2$, $0 \leq r/D_h \leq 3$ และ $0 \leq r/D_h \leq 4$ โดยนัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยหาโดยนำอุณหภูมิเฉลี่ยในบริเวณที่คำนวณไปแทนในสมการที่ (2) จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย (\bar{h}) จากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย (\bar{h}) ไปแทนในสมการที่ (1) จะได้ค่านัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ย จากรูปแนวโน้มของนัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (H) เมื่อพิจารณาบริเวณ $0 \leq r/D_h \leq 1$ และ $0 \leq r/D_h \leq 2$ ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=2D_h$ (รูปที่ 13 (a) และ (b)) นัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยของเจ็ทจากท่อวงแหวนมีค่าสูงกว่าเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีเนื่องจากนัสเซลต์นัมเบอร์บริเวณศูนย์กลางท่อเจ็ทกรณีเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีมีค่าต่ำ ซึ่งเกิดจากผลของการติดทรงกรวยที่ปากทางออกเจ็ท เมื่อพิจารณาบริเวณ $0 \leq r/D_h \leq 4$ ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=2D_h$ (รูปที่ 13 (d)) พบว่านัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยของเจ็ทจากท่อที่ไหลในแนวรัศมีทุกกรณีมีค่าสูงกว่าเจ็ทจากจากท่อวงแหวน

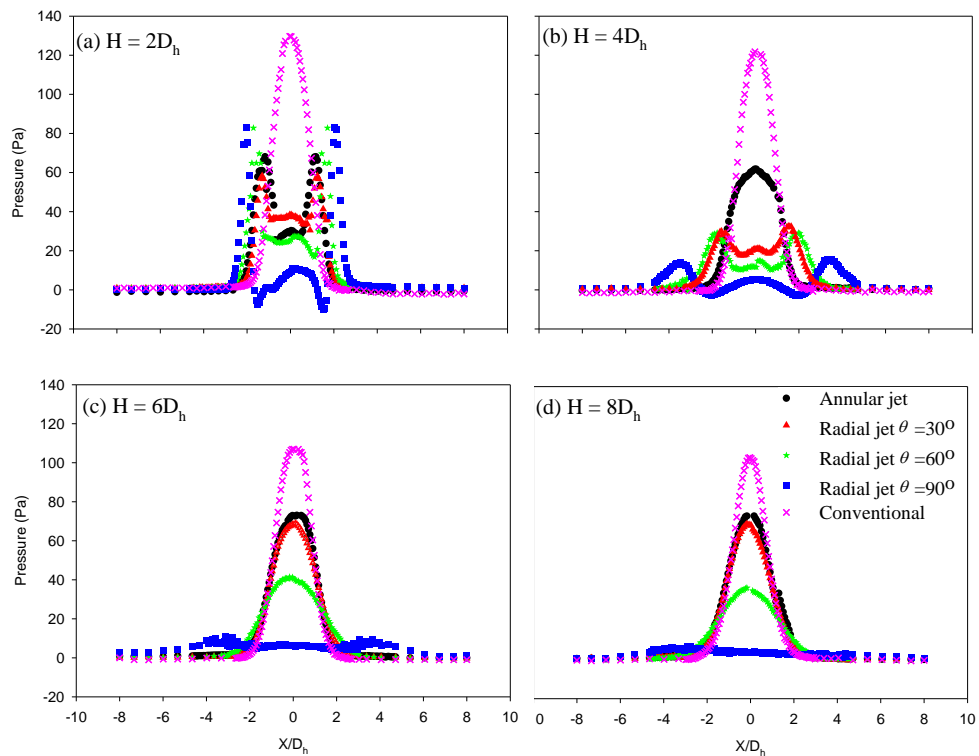


รูปที่ 5 นัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ($Re=20,000$, $T_j=27^\circ\text{C}$)

4.2 การศึกษาการกระจายความดันบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

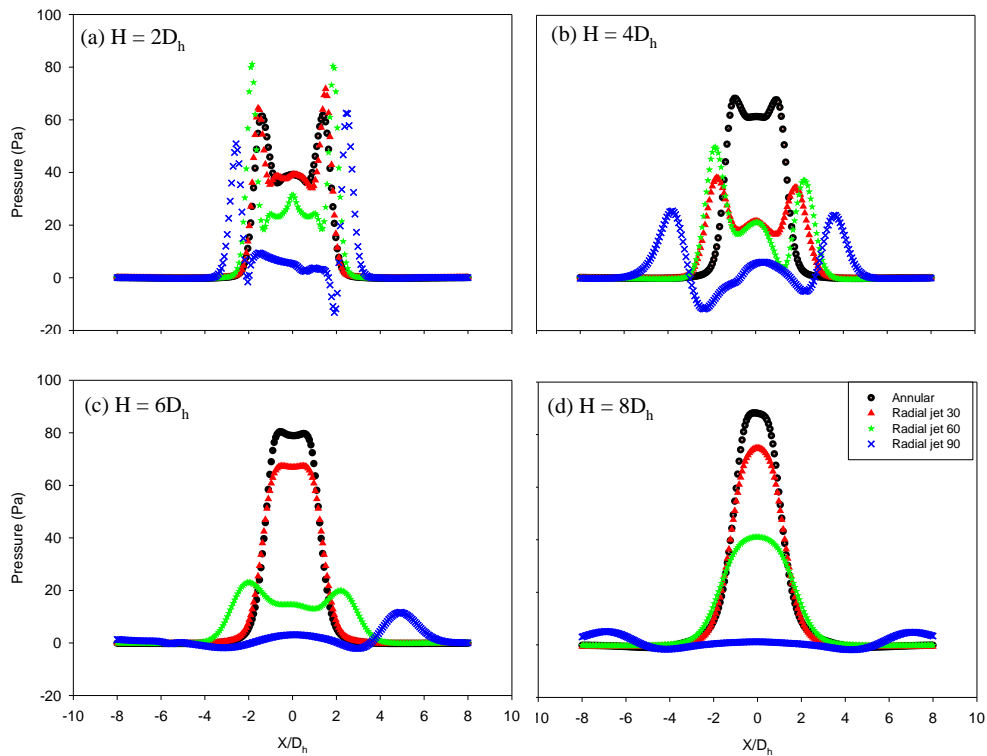
รูปที่ 14 แสดงผลการกระจายความดันที่ได้จากการทดลองบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่ตำแหน่ง X/D_h ต่างๆ ที่เรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ 20,000 พบว่ากรณีระยะพุ่งชนพื้นผิว $H=2D_h$ ผลของความดันสูงสุดของเจ็ทจากท่อปรกติเกิดขึ้นที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของท่อเจ็ทซึ่งเกิดขึ้นเพียงจุดเดียว ส่วนความดันของเจ็ทจากท่อวงแหวนและจากท่อในแนวรัศมีเกิดความดันสูงสุดขึ้น 2 ตำแหน่งซึ่งเกิดห่างจากจุดศูนย์กลางท่อเจ็ทออกไปในตำแหน่ง X/D_h โดยที่ตำแหน่งระยะห่างจากศูนย์กลางที่เกิดความดันสูงสุดเกิดขึ้นในกรณีเจ็ทจากท่อไหลในแนวรัศมีทำมุม $\theta=90^\circ$, 60° , 30° และเจ็ทจากท่อวงแหวนตามลำดับ

กรณีที่ระยะพุ่งชนพื้นผิว $H=4D_h$ (รูปที่ 14(b)) พบว่าลักษณะการกระจายความดันคล้ายกับกรณีที่เงื่อนไข $H=2D_h$ (รูปที่ 14(a)) แต่ค่าความดันสูงสุดมีค่าลดลง และค่าความดันสูงสุดลดลงเมื่อระยะพุ่งชนเพิ่มขึ้นเป็น $H=6D_h$ และ $8D_h$



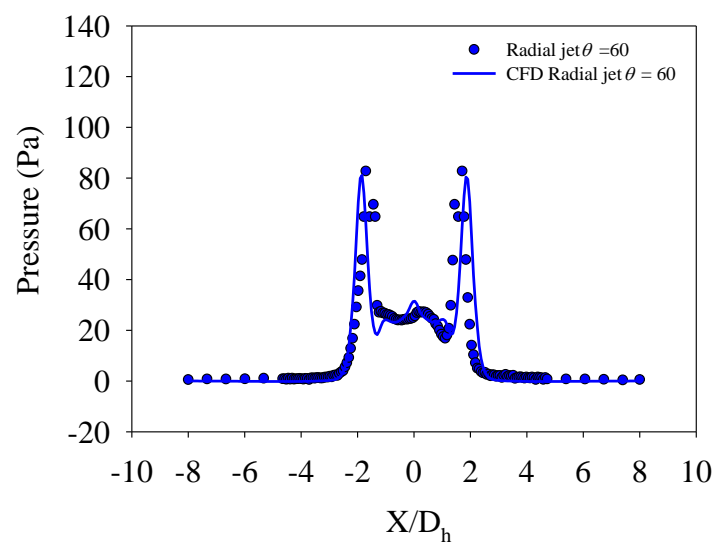
รูปที่ 6 การกระจายความดันบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่ตำแหน่งศูนย์กลางท่อเจ็ท (ผลจากการทดลอง, $Y/D_h=0, Re=20,000, T_j=27^\circ C$)

รูปที่ 15 แสดงผลการกระจายความดันบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่ได้จากจำลอง ลักษณะการไหลที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์เท่ากับ 20,000 จากรูปพบว่าลักษณะการกระจายความดัน คล้ายกับกรณีที่ได้จากการวัดตามที่ได้แสดงในรูปที่ 14 นอกจากนี้ยังพบว่า ผลลักษณะการกระจาย ความดันทั้งสองกรณีสอดคล้องกับการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวตามแนวศูนย์กลางท่อเจ็ท ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 7 การกระจายความดันบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่ตำแหน่งศูนย์กลางท่อเจ็ท (ผลจากการจำลองลักษณะการไหล, $Y/D_h=0$, $Re=20,000$, $T_j=27^\circ\text{C}$)

รูปที่ 16 แสดงการกระจายของความดันบนผนังพุ่งชนจากการทดลองเทียบกับผลจากการจำลองลักษณะการไหลในกรณีของเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมี $\theta=60$ ที่ระยะ $H=4D_h$ ซึ่งพบว่ามีความใกล้เคียงกันแสดงว่าผลจากการจำลองการไหลมีความน่าเชื่อถือ



รูปที่ 8 การกระจายของความดันบนผนังพุ่งชนจากการทดลองเทียบกับผลจากการจำลองลักษณะการไหล(กรณีของเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมี $\theta=60$ ที่ระยะ $H=4D_h$)

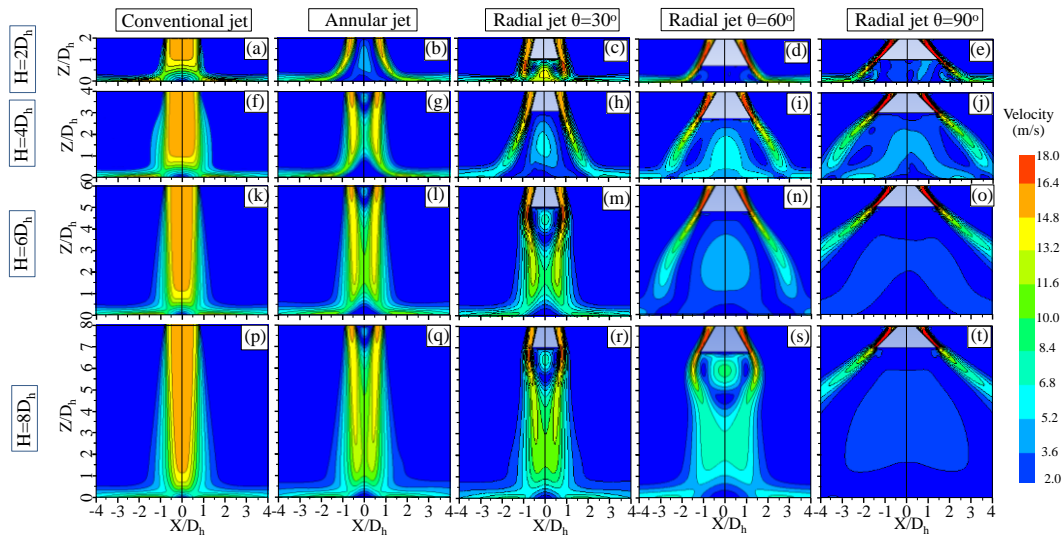
4.3 การศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวโดยวิธีการจำลองทางพลศาสตร์ของไหล

รูปที่ 17 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทที่ได้จากผลการจำลองลักษณะการไหลกรณีเจ็ทไหลจากท่อปรกติที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่ำ $H=2D_h$ (รูปที่ 17(a)) เจ็ทที่ไหลออกจากท่อเจ็ทจะพุ่งชนพื้นผิวทันทีทำให้เกิดบริเวณที่นัสเชิลต์นัมเบอร์สูงหลังจากพุ่งชนผนังจะเกิดการเปลี่ยนแปลงการไหลจากแบบราบเรียบเป็นแบบปั่นป่วนทำให้ค่านัสเชิลต์นัมเบอร์สูงขึ้นอีกครั้ง (Secondary peak) บริเวณ $H/D_h = 3$ ความเร็วของเจ็ทลดลงตามระยะห่างที่เพิ่มขึ้นจากแนวกึ่งกลางท่อเจ็ท เมื่อระยะพุ่งชนสูงขึ้น $H \geq 4D$ (รูปที่ 17(f), (k) และ (k)) เจ็ทที่ออกจากหัวฉีดจะถูกเหนี่ยวด้วยอากาศรอบลำเจ็ททำให้เจ็ทมีความเร็วสูงเฉพาะบริเวณกึ่งกลางท่อเจ็ทซึ่งสอดคล้องค่านัสเชิลต์นัมเบอร์เฉพาะตรงจุดกึ่งกลางท่อเจ็ท

กรณีเจ็ทจากท่อวงแหวนที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่ำ $H=2D_h$ (รูปที่ 17(b)) เจ็ทไหลออกจากท่อวงแหวนพุ่งชนพื้นผิวทันที จุดที่เจ็ทไหลตกกระทบที่ $X/D_h \approx \pm 1.5$ ซึ่งสอดคล้องกับตำแหน่งที่นัสเชิลต์นัมเบอร์มีค่าสูงสุดตามที่ได้แสดงในรูปที่ 10(b) เมื่อระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนสูงขึ้น $H \geq 4D$ (รูปที่ 17(g), (l) และ (q)) พบว่าเจ็ทไหลรวมตัวก่อนที่จะพุ่งชนพื้นผิว ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้มีนัสเชิลต์นัมเบอร์บริเวณที่ตำแหน่งศูนย์กลางท่อมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับที่ระยะ $H=2D_h$

กรณีเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่ำ $H=2D_h$ (รูปที่ 17(c), (d) และ (e)) เจ็ทเกิดการแยกตัวและไหลตกกระทบพื้นผิวห่างออกจากจุดศูนย์กลางท่อเจ็ทมากขึ้นเมื่อมุม θ เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับตำแหน่งที่นัสเชิลต์นัมเบอร์มีค่าสูงสุดตามที่ได้แสดงในรูปที่ 10(c), (d) และ (e) เมื่อระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนสูงขึ้น $H \geq 4D$ เจ็ทไหลแยกตัวออกจากกันและมีส่วนที่ไหลกระทบพื้นผิวน้อย ทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลงและสังเกตเห็นบริเวณที่มีความเร็วต่ำได้แก่ท่งกรวยที่ติดตั้งที่ปากทางออกของท่อเจ็ทเพื่อสร้างเจ็ทวงแหวนเมื่อมุม θ เพิ่มขึ้นบริเวณความเร็วต่ำได้แก่ท่งกรวยเพิ่มขึ้นตาม ซึ่งเป็นผลของการติดตั้งกรวยทำให้ลำเจ็ทเลี้ยวเบนตามมุมต่างๆในแนวรัศมี

กรณีเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีที่เงื่อนไข $\theta=30^\circ$ พบว่า ลักษณะการไหลคล้ายกับกรณีเจ็ทจากท่อวงแหวน ซึ่งสอดคล้องกับการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีเจ็ทที่ไหลออกจากท่อวงแหวน (รูปที่ 10(a), (e), (i) และ (m)) มีลักษณะคล้ายกับกรณีเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีที่เงื่อนไข $\theta=30^\circ$ เช่นกัน (รูปที่ 10(b), (f), (j) และ (n)) เจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีที่เงื่อนไข $\theta=30^\circ$ จะเริ่มเกิดการรวมตัวของลำเจ็ทที่ระยะพุ่งชนพื้นผิว $H=6D_h$ แต่เจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีที่เงื่อนไข $\theta=60^\circ$ จะเริ่มเกิดการรวมตัวของลำเจ็ทที่ระยะพุ่งชนพื้นผิว $H=8D_h$ ในส่วนของเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีที่เงื่อนไขมุม $\theta=60^\circ$ ระยะพุ่งชนพื้นผิว $H=4D_h$ ความเร็วได้แก่ท่งกรวยจะแตกต่างจากกรณีอื่นๆเนื่องด้วยบริเวณกึ่งกลางท่อจะมีความเร็วค่อนข้างสูง

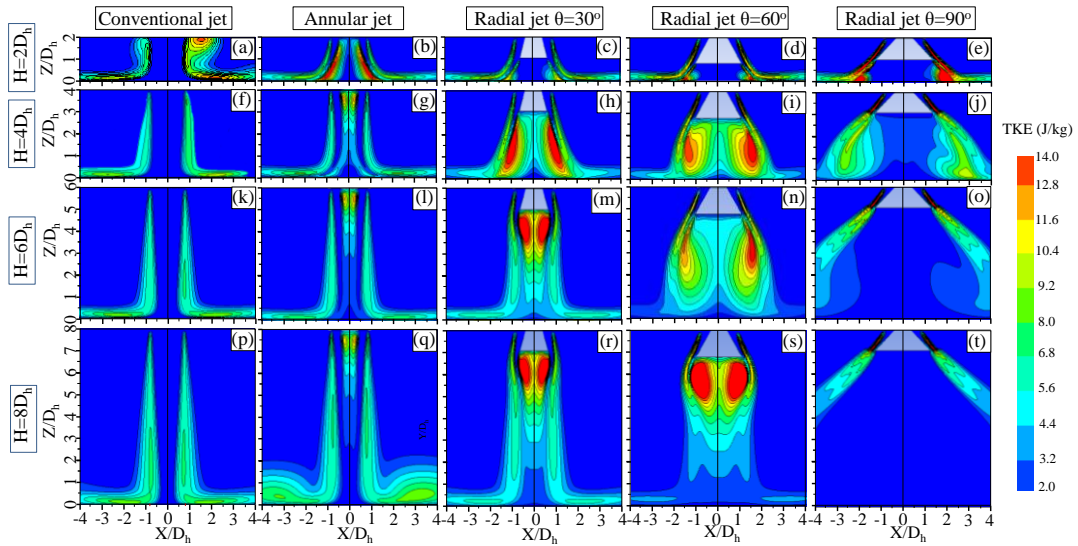


รูปที่ 9 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนจากผลการจำลองลักษณะการไหล ($Re=20,000$, $T_j=27^\circ C$)

รูปที่ 18 แสดงพลังงานจลน์แบบปั่นป่วน (Turbulence kinetic energy) พบว่ากรณีจากเจ็ทท่อปกติ (รูปที่ 18(a), (f), (k) และ (p)) เจ็ทที่ออกจากหัวฉีดเกิดการเชื่อมกันกับอากาศนิ่งที่อยู่รอบลำเจ็ททำให้รอยต่อที่มีการเชื่อมนั้นเกิดพลังงานจลน์แบบปั่นป่วนสูงกว่าบริเวณอื่นๆ

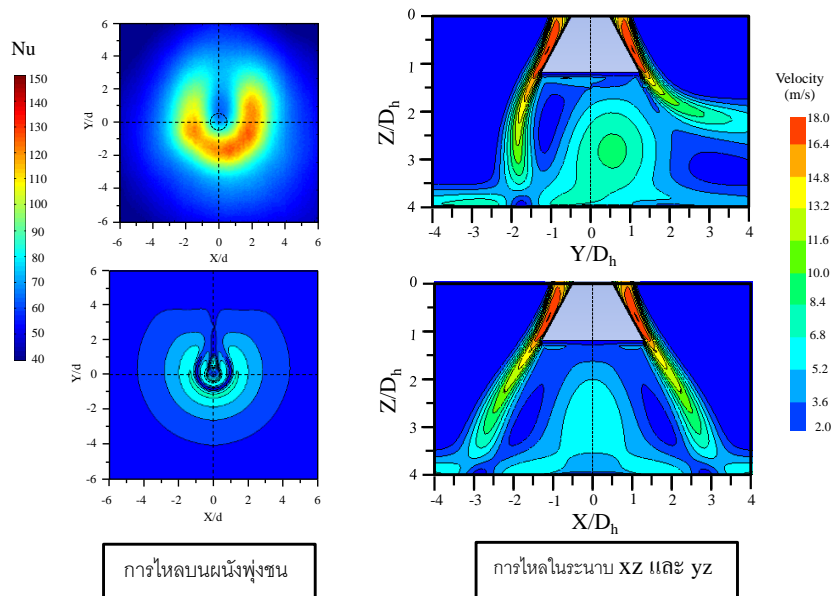
กรณีเจ็ทจากท่อวงแหวนที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่ำ $H=2D_h$ (รูปที่ 18(b)) เจ็ทที่ออกจากหัวฉีดจะพุ่งชนพื้นผิวโดยตรงทำให้เกิดพลังงานจลน์แบบปั่นป่วนสูงในบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน เมื่อระยะพุ่งชนสูงขึ้น $H \geq 4D_h$ (รูปที่ 18(g), (l) และ (q)) เจ็ทที่ออกจากหัวฉีดจะเกิดการเชื่อมกับอากาศนิ่งที่อยู่รอบลำเจ็ทด้านนอกและอากาศที่อยู่กึ่งกลางท่อเจ็ททำให้เกิดพลังงานจลน์แบบปั่นป่วนสูง 2 บริเวณ คือบริเวณรอบลำเจ็ทด้านนอกและบริเวณกึ่งกลางแนวกึ่งกลางท่อเจ็ท

กรณีเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่ำ $H=2D_h$ (รูปที่ 18(c), (d) และ (e)) เจ็ทเกิดการไหลตกกระทบพื้นผิวห่างจากจุดศูนย์กลางท่อเจ็ทมากขึ้นเมื่อมุม θ เพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นของมุมทำให้เจ็ทเกิดการเชื่อมกับอากาศได้มากขึ้นส่งผลให้เกิดพลังงานจลน์แบบปั่นป่วนสูง โดยค่าสูงสุดเกิดที่กรณีเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีที่เงื่อนไข $\theta=90^\circ$ (รูปที่ 18(e)) ซึ่งบริเวณดังกล่าวสอดคล้องกับตำแหน่งที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงดันนิ่งเบร์สูงที่สุด (รูปที่ 10(e)) เมื่อระยะพุ่งชนสูงขึ้น $H \geq 4D_h$ เจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีที่เงื่อนไข $\theta=30^\circ$ และ 60° (รูปที่ 17(h), (i), (m), (n), (r) และ (s)) จะพบบริเวณที่มีพลังงานจลน์แบบปั่นป่วนสูงได้แก่ทั้งกรวย ซึ่งบริเวณดังกล่าวเป็นที่พบโครงสร้างการไหลแบบหมุนวนก่อนที่เจ็ทจะรวมตัวกันแล้วพุ่งชนพื้นผิว ส่วนเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีที่เงื่อนไข $\theta=90^\circ$ (รูปที่ 18(j), (o) และ (t)) เจ็ทจะไหลออกจากหัวฉีดจะเกิดการผสมกับอากาศที่อยู่รอบๆจนทำให้พลังงานจลน์แบบปั่นป่วน มีค่าน้อยกว่าเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีเงื่อนไขอื่นๆ



รูปที่ 10 แสดงพลังงานเชิงจลน์แบบปั่นป่วน (Turbulence kinetic energy) ($Re=20,000$, $T_j=27^\circ C$)

รูปที่ 19 แสดงลักษณะการกระจายของค่านัสเซลันัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน จากกรณีท่อวงแหวนที่เจ็ทพุ่งชน $\theta=60^\circ$ องศา ระยะพุ่งชน $H=4D_h$ จากรูป การกระจายของนัสเซลันัมเบอร์ไม่สมมาตรโดยขาดไปบางส่วน เมื่อเทียบกับลักษณะการไหลของเจ็ทจากผลการจำลองการไหลพบว่า ลักษณะการไหลของเจ็ทก่อนพุ่งชนพื้นผิวมีลักษณะไม่สมมาตรเช่นเดียวกันเมื่อเทียบกับลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ท ซึ่งเกิดจากที่เจ็ทพุ่งชนตั้งกล่าวนี้อากาศที่อยู่ด้านล่างกรวยไหลออกแทรกผ่านแนวการไหลของเจ็ทที่พุ่งออกมาจากปากทางออก ทำให้การไหลส่วนนี้ขวางการปะทะของเจ็ทกับพื้นผิว ส่งผลทำให้บริเวณดังกล่าวมีค่านัสเซลันัมเบอร์ต่ำกว่าแนววงแหวน



การไหลบนผนังพุ่งชน

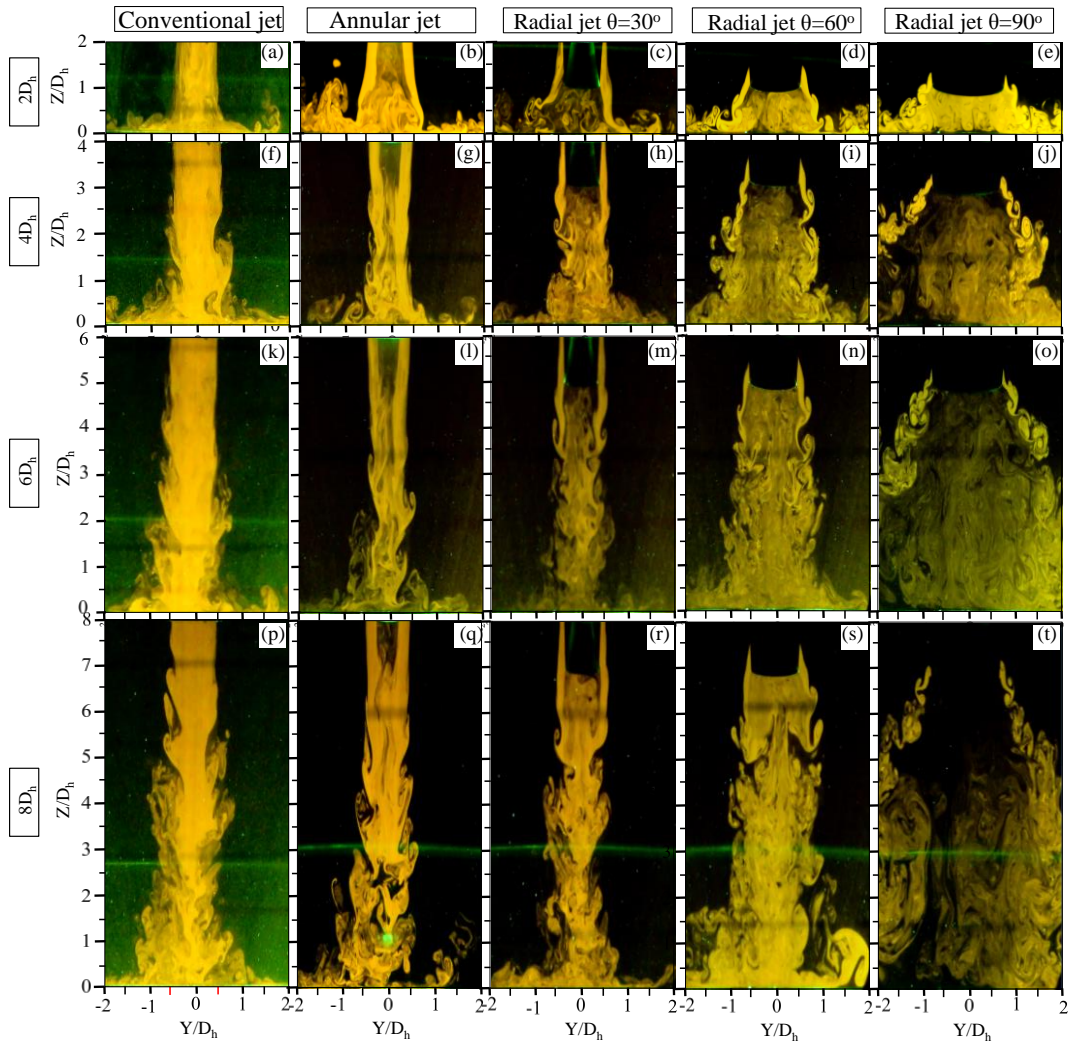
การไหลในระนาบ xz และ yz

รูปที่ 11 การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนจากผลการทดลอง และลักษณะการไหลของเจ็ทจากการจำลองลักษณะการไหล ($Re=20,000$, $T_j=27^\circ C$)

4.4 การศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำด้วยวิธีเชิงทัศน

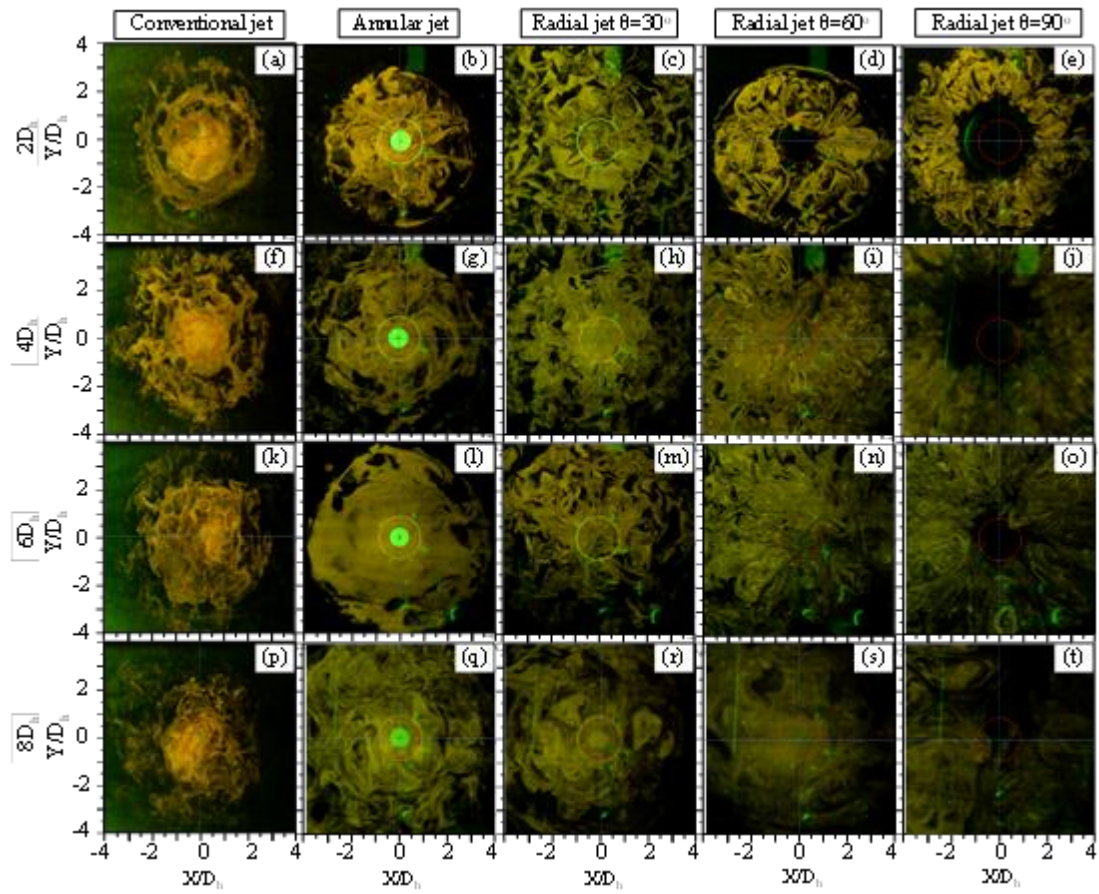
รูปที่ 20 และ 21 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำที่ได้จากการทดลองโดยใช้วิธี Lacer Induced Fluorescence ที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re=4,000$ กรณีของเจ็ทจากท่อเปล่าที่ระยะจากปากทางออกถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่ำ $H=2D_h$ (รูปที่ 20(a)) ลำเจ็ทที่ไหลออกจากท่อพุ่งชนพื้นผิวทันที เมื่อระยะจากปากทางออกถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนเพิ่มขึ้นเป็น $H \geq 4D_h$ (รูปที่ 20 (f), (k) และ (p)) เจ็ทเกิดการไหลแบบปั่นป่วนเพิ่มขึ้นตามระยะห่างก่อนพุ่งชนพื้นผิว สำหรับกรณีเจ็ทจากท่อวงแหวนและจากท่อที่บังคับให้เจ็ทไหลในแนวรัศมีที่ระยะจากปากทางออกถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่ำ $H=2D_h$ (รูปที่ 20 (b), (c), (d) และ (e)) พบว่าเจ็ทจากท่อวงแหวนและเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีมีบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวกว้างกว่าเมื่อเทียบกับเจ็ทจากท่อเปล่าที่ระยะพุ่งชนเดียวกัน

สำหรับที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนสูง $H \geq 4D_h$ พบว่า เจ็ทจากท่อวงแหวนและท่อที่บังคับให้ไหลในแนวรัศมี เกิดการรวมตัวก่อนพุ่งชนพื้นผิว ซึ่งแตกต่างจากกรณีเจ็ทจากท่อปกติที่ไม่มีการไหลแบบแยกตัว เจ็ทที่ไหลออกจากท่อที่บังคับให้ไหลในแนวรัศมีเกิดการไหลแบบเอียง ทำให้เกิดการผสมกันได้มากกว่า สำหรับกรณีเจ็ทจากท่อที่บังคับให้ไหลในแนวรัศมีที่เงื่อนไข $\theta = 90^\circ$ พบว่า ผลของมุมเอียงมากที่สุดทำให้ลำเจ็ทเอียงเฉียงเดียวกับของไหลเกิดความปั่นป่วนที่กว้างมากกว่าในทุกกรณีทำให้เมื่อระยะพุ่งชนเพิ่มขึ้น แทบไม่มีลำของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวซึ่งจะสังเกตได้จากรูปที่ 20 (o) และ (t)



รูปที่ 12 ลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำด้วยวิธีเชิงทัศน (Re=4,000)

จากรูปที่ 21 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน จากรูปพบว่าในกรณีของเจ็ทท่อปกติ การไหลของเจ็ทบนพื้นผิวมีลักษณะเป็นวงกลม โดยทุกๆระยะจากปากทางออกถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนมีความแตกต่างไม่มากนัก สำหรับกรณีของเจ็ทจากท่อวงแหวน และท่อที่บังคับให้ไหลในแนวรัศมีที่เงื่อนไข $\theta = 30^\circ$ ลักษณะบริเวณที่เจ็ทตกกระทบบนพื้นผิวกว้างกว่ากรณีเจ็ทจากท่อเปล่าทุกๆระยะจากปากทางออกถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน สำหรับกรณี เจ็ทจากท่อบังคับให้ไหลในแนวรัศมีที่เงื่อนไข $\theta = 60^\circ$ และ 90° พบว่าที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่ำ $H=2D_h$ (รูปที่ 21 (d) และ (e)) การไหลของเจ็ทบนพื้นผิวมีลักษณะเป็นวงแหวน แต่เมื่อระยะจากปากทางออกถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนสูง $H \geq 4D_h$ พบว่า ไม่สามารถระบุบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวได้ (รูปที่ 21 (i), (j), (n), (o), (s) และ (t))



รูปที่ 13 ลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำบนผนังที่เจ็ทพุ่งชนด้วยวิธีเชิงทศน์ ($Re=4,000$)

5. สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาลักษณะการไหลและถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนจากท่อวงแหวนและท่อที่กำหนดให้เจ็ทไหลในแนวรัศมี โดยเทียบผลการศึกษากับเจ็ทจากท่อปกติ จากผลการศึกษาสรุปได้ว่า

5.1.1 กรณีเจ็ทจากท่อวงแหวนและเจ็ทจากท่อที่บังคับให้เจ็ทไหลในแนวรัศมีที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่ำ $H=2D_h$ พบว่า บริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงมีลักษณะเป็นรูปวงแหวน เนื่องจากเจ็ทไหลพุ่งชนพื้นผิวทันที (ยังไม่มีมารวมตัว) อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิว ($0 \leq r/D_h \leq 4$) สูงกว่ากรณีเจ็ทจากท่อปกติ สำหรับเจ็ทจากท่อที่บังคับให้ไหลในแนวรัศมีที่เงื่อนไข $\theta = 90^\circ$ พบว่าบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงมีขนาดกว้างกว่าที่เงื่อนไขอื่นๆ

5.1.2 กรณีเจ็ทจากท่อวงแหวนและเจ็ทจากท่อที่บังคับให้เจ็ทไหลในแนวรัศมีที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H \geq 4D$ พบว่า บริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงเกิดขึ้นที่ตำแหน่งศูนย์กลางท่อเจ็ท เนื่องจากเจ็ทมีการรวมตัวก่อนพุ่งชนพื้นผิว ยกเว้นกรณีเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีที่เงื่อนไข $\theta = 90^\circ$ พบว่าเจ็ทไม่มีการไหลรวมตัวก่อนพุ่งชนพื้นผิว ทำให้การถ่ายเทความร้อนบริเวณศูนย์กลางท่อเจ็ทมีค่าต่ำสุด

5.1.3 ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H \geq 4D$ แนวโน้มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิว ($0 \leq r/D_h \leq 4$) ลดลงเมื่อเทียบกับกรณี $H=2D_h$ ในขณะที่การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิว ($0 \leq r/D_h \leq 4$) กรณีเจ็ทจากท่อปกติมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

5.1.4 สำหรับกรณีเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีที่เงื่อนไข $\theta = 90^\circ$ ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=2D_h$ พบว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิว ($0 \leq r/D_h \leq 4$) มีค่าสูงสุด

5.1.5 กรณีเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีที่เงื่อนไข $\theta = 60^\circ$ ที่ระยะจากปากทางออกถึงพื้นผิวพุ่งชน $H=4D_h$ เกิดปรากฏการณ์เจ็ทรั่วไหลออกจากกึ่งกลางเป็นแนวยาว ทำให้บริเวณดังกล่าวที่มีค่านัสเซลตันัมเบอร์ต่ำ

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนแบบไหลในแนวรัศมีโดยการติดตั้งแท่งทรงกรวยที่ทำมุมแบบต่างๆที่ปากทางออก ในการศึกษาขั้นต่อไปอาจจะทำได้ดังต่อไปนี้

5.2.1 ศึกษาวิธีลดบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนต่ำบริเวณกึ่งกลางท่อเจ็ทได้จะทำให้ได้บริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงกว้างขึ้น

5.2.2 เจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีสามารถนำไปประยุกต์ติดตั้งในตู้อบหรืออุปกรณ์ที่ต้องการการถ่ายเทความร้อนสูงเป็นบริเวณกว้างกว่าที่เจ็ทปกติ

บรรณานุกรม

- [1] C. Nuntadusit, M. Wae-hayee, A. Bunyajitradulya, S. Eiamsa-ard, “Visualization of flow and heat transfer characteristics for swirling impinging jet”, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 39 (2012) 640–648]
- [2] Colucci, D.W.; Viskanta, R. Effect of nozzle geometry on local convective heat transfer to a confined impinging air jet. *Exp. Thermal Fluid Sci.*1996,13, 71–81.
- [3] Ashforth-Frost, S.; Jambunathan, K.; Whitney, C.F. Velocity and turbulence characteristics of a semiconfined orthogonally impinging slot jet. *Exp. Thermal Fluid Sci.*1997,14, 60–67.
- [4] K Knowles and M. Myszko, Turbulence, 1998, Measurements in radial wall-Jets, Experiment Thermal and Fluid Science, Vol 17, pp71-78.
- [5] H.Q. Yang a, T. Kim a,b,* , T.J. Lu a, K. Ichimiya, 2010, Flow structure, wall pressure and heat transfer characteristics of impinging annular jet with/without steady swirling International Journal of Heat and Mass Transfer, vol.53, pp.4092–4100
- [6] H.Q. Yang, T. Kim, T. Tanjian , 2011, Characteristics of annular impinging jet with/without swirling flow by short guide vane, science china technological science, vol.54, p749-757
- [7] Neil Zuckerman and Noam Lior, 2007, Radial slot Jet Impingement Blow and Heat Transfer on a Cylindrical Target, Journal of thermophysics and heat Transfer, Vol 21, No.3
- [8] Potdar, A. A., 2005, Flow field characteristics of dynamic radial jet reattachment, Thesis of Master of Science in Mechanical Engineering, Texas Tech University.
- [9] Peper, F., Leiner, W. and Fiebig, M., 1997, Impinging radial and inline jets: a comparison with regard to heat transfer, wall pressure distribution, and pressure loss, J. Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 14, pp. 194-204.
- [10] Cosley, M. R., and Marongiu, M. J. Studies on the use of radial jet reattachment nozzles as active heat sinks for electronic component boards, 10th IEEE Semi-Therm, pp.64-72.
- [11] Lytle, D. and Webb, B.W., (1994), “Air jet impingement heat transfer at low nozzle-plate spacings”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, No. 12, pp. 1687-1697.
- [12] Gao, N., Sun, H. and Ewing, D., (2003), “Heat transfer to impinging round jets with triangular tabs”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, No. 14, pp. 2557-2569.

- [13] Gulati, P., Katti, V. and Prabhu, S.V., (2009), "Influence of the shape of the nozzle on local heat transfer distribution between smooth flat surface and impinging air jet", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 48, No. 3, pp. 602-617.
- [14] Lee, D.H., Song, J. and Myeong, C.J., (2004), "The effect of nozzle diameter on impinging jet heat transfer fluids flow", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 126, pp. 554-557.
- [15] Baughn, J.W. and Shimizu, S., (1989), "Heat transfer measurements from a surface with uniform heat flux and an impinging jet", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 111, pp. 1096-1098.

ภาคผนวก ก. บทความสำหรับเผยแพร่ 1

Investigation of Flow and Heat Transfer Characteristics of Annular Impinging Jet

Watchara Musika^{1,a}, Makatar Wae-hayee^{1,b},
Passakorn Vessakosol^{1,c}, Banyat Niyomwas^{1,d} and Chayut Nuntadusit^{1,e*}

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Prince of Songkla University, Hat yai, Songkhla, Thailand

^apop_ts@hotmail.com, ^bwaehahyee@gmail.com,

^cpassakornv@hotmail.com, ^dbanyat@engineer.com, ^echayut@me.psu.ac.th

Keywords: Impinging jet, Annular jet, Heat transfer enhancement, CFD

Abstract. Flow and heat transfer characteristics of impinging jet from annular pipe were experimentally and numerically investigated. To generate annular jet, the round rod with 12.7 mm in diameter was inserted at center of pipe nozzle which has equivalent inner diameter (D_E) of 28.6 mm. The jet-to-plate distance (H) in the range of $2D_E$, $4D_E$, $6D_E$ and $8D_E$ was examined. The jet Reynolds number of conventional pipe was fixed at $Re=20,000$ based on velocity at center of jet, and the mass flow rate of both conventional and annular jets was the same. Temperature distribution on the impinged surface was obtained by using an infrared camera. The numerical simulation was carried out to visualize the flow behavior. The results show that the heat transfer of annular jet is higher than that the conventional pipe at low jet-to-plate distance ($H=2D_E$); however, the ones of annular and conventional jet are comparable when jet-to-plate distance becomes higher than $H=6D_E$.

Introduction

Jet impingement is widely used in various industrial applications due to offering high heat transfer rate on impingement surface. The applications include tempering of glass, drying of paper, chemical vapour deposition, cooling turbine blade and electronic component. There are several methods for enhancing heat transfer rate on impingement surface such as the modification of orifice configuration [1], addition of mesh screens [2] and generation of pulsating jet [3]. Generally, an overall heat transfer rate on the impingement surface from applying these techniques as mentioned above is higher when compare to the case of conventional jet at some

particular conditions. When consider local heat transfer distribution on the surface, however, heat transfer peak was placed at stagnation point similarly to the case of conventional one. Occasionally, the uniformity of high heat transfer region on impingement surface for particular thermal applications is demanded; then, an annular impinging jet is applied.

Recently, an annular jet from a long straight pipe was applied on combustion flame jet [4]. It is rare for applying this technology on an impingement cooling jet. A few study of annular jet from long straight pipe is particularly concerned just for heat transfer characteristics under low jet-to-plate distance $H \leq 2D$ [5], but flow characteristics and effect of higher jet-to-plate distance, $H \geq 2D$, isn't reported. Then, flow characteristics of annular jet from pipe nozzle should be concerned.

The objective of this study is to investigate flow and heat transfer characteristics of an impinging jet from annular pipe. The jet-to-plate distance in the range of $H=2D$ to $8D$ was examined. The comparison of results between conventional and annular pipe was based on the same of nozzle diameter and mass flow rate. The temperature distribution on the impingement surface was measured using an IR camera, and flow characteristics of impinging jet were simulated by using Computational Fluid Dynamic software.

Experimental Setup and Method

Experimental Model and Parameters. The experimental model of impinging jet from conventional pipe and annular pipe is shown in Fig.1(a) and (b), respectively. Air with fully developed flow was discharged at nozzle outlet and perpendicularly impinged on a target surface. An origin of the Cartesian coordinates was located at center of nozzle on the impingement surface. The X- and Y-axes are normal to axial jet streamwise coordinate, and Z-axis is on the axial of jet. In order to compare both conventional jet and annular jet results, both nozzle diameters and mass flow rate were the same.

In order to generate an annular jet, the round rod of brass with 12.7 mm in diameter was inserted at center of pipe nozzle. The length of round rod is enough to maintain fully developed flow. Equivalent diameter of round pipe nozzle (D_E) was 28.6 mm. The jet-to-plate was varied in the range of $H=2D_E$, $4D_E$, $6D_E$ and $8D_E$. The jet Reynolds number of conventional pipe was fixed at $Re=20,000$ based on velocity at center of jet, and mass flow rate of both jet from conventional and annular pipe was the same.

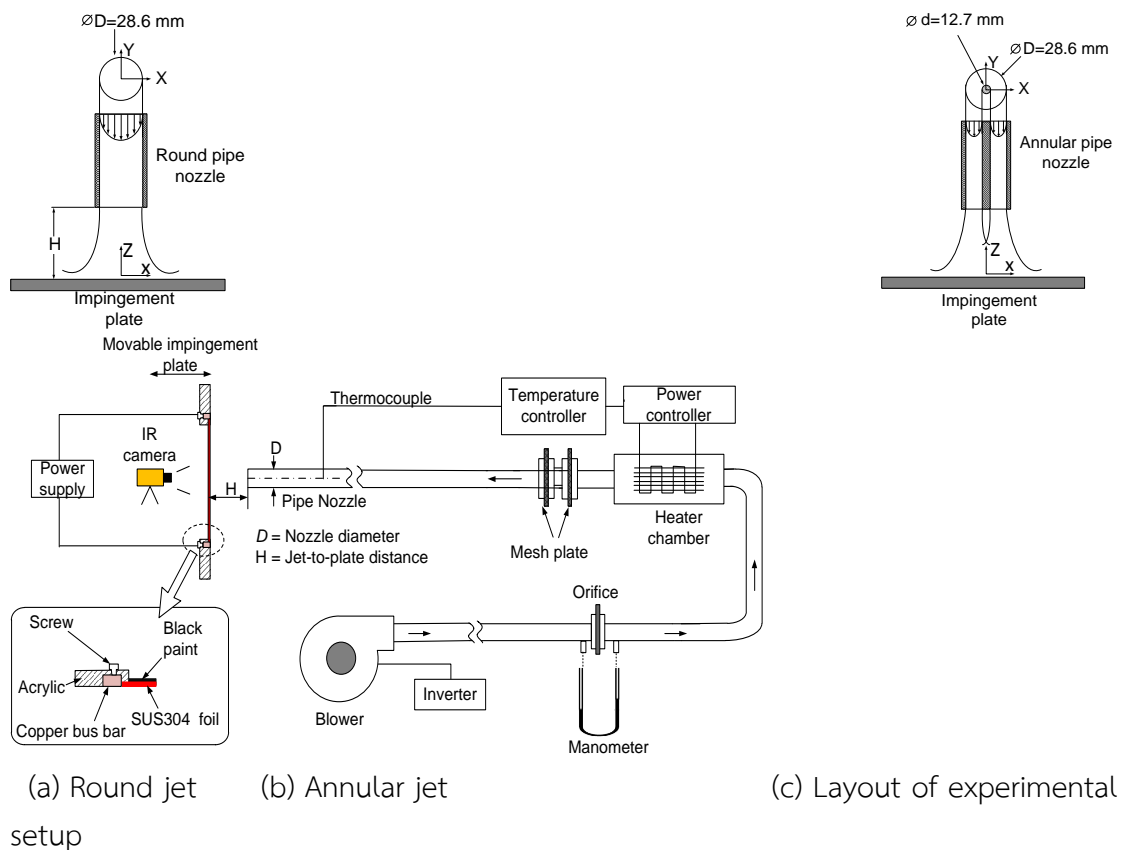


Fig.1 Model of impinging jet and schematic of experimental setup

Experimental Setup. The experimental setup layout is shown in Fig.1(c). Air is supplied by a blower through a calibrated orifice for measuring flow rate. The flow rate is controlled by adjusting rotating speed of blower with inverter. Jet air temperature is controlled by a temperature controller and a power controller at $27 \pm 0.2\%$ °C. The nozzle is a steel pipe with inner diameter of 17.2 mm and length to diameter ratio of 83. This pipe length ensures fully developed flow over the Reynolds number range investigated. The jet impingement surface was made of stainless steel foil with 240 mm × 240 mm and 0.03 mm in thickness. The stainless steel foil was tightly stretched between two copper bus bars on the plastic plate as shown in Fig.1(c). The rear side of jet impinging surface was painted with dark black color which having emissivity at 0.95.

Data Reduction. The air jet with constant temperature discharging from the pipe nozzle was impinged on the heated surface for cooling. The wall temperature on the impingement surface was measured by using the infrared camera and, the heat transfer coefficient and Nusselt number were subsequently calculated.

The local Nusselt number was calculated from:

$$Nu = \frac{hD_E}{k} \quad (1)$$

where, D_E is the equivalent outer diameter of the pipe nozzle and k is a thermal conductivity of the air jet. The heat transfer coefficient, h , can be calculated from

$$h = \frac{\dot{q}_{input} - \dot{q}_{lossed}}{T_w - T_{aw}} \quad (2)$$

where, \dot{q}_{lossed} is the heat transfer losses from free convection and radiation [6], T_w and T_{aw} are the wall temperature without heat flux and the wall temperature with heat flux, respectively. The heat flux can be evaluated from

$$\dot{q}_{input} = \frac{IV}{A} \quad (3)$$

where, I is the electric current, V and A are the voltage and the area of the stainless steel foil.

Numerical Simulation

Flow characteristics of the impinging jet were visualized by using computational fluid dynamics software (ANSYS, ver.13.0). The numerical model was identical to the experimental model in its geometries, dimensions, and boundary conditions. Computations were conducted by solving Reynolds Averaged continuity and Navier-stokes equations with SST turbulence model. The non-uniform grid system was finely generated for regions near the impingement surface and pipe nozzle. Solutions were considered to be convergent when the normalized residual of all algebraic equations is less than the prescribed value of 1×10^{-4} [6].

Results and Discussions

Local Nusselt number distributions on the impingement surface from experimental result are shown in Fig. 2. Marked black circle at center of each figure indicates the layout of nozzle outlet. When compare Nusselt number distributions between conventional and annular jet at the same jet-to-plate distance, it was found that the areas of high Nusselt number ($Nu > 200$) for the case of annular jet are larger than the

case of conventional one except for $H=8D_E$. Both Nusselt number distributions of conventional and annular jet for case of $H=8D_E$ are almost similar.

The distributions of local Nusselt number on impinged surface along centerline passing stagnation point for $H=2D_E$, $4D_E$ and $6D_E$ are shown in Fig.3. Almost all of Nusselt number distributions for the case of annular jet are higher than the case of conventional one throughout impingement region and wall jet region for all jet-to-plate distances except for $H=2D_E$. For case of $H=2D_E$ (Fig.3(a)), the Nusselt number at stagnation point and region $r>2D_E$ for the case of annular jet is lower than the case of conventional one. The lower Nusselt number at stagnation point for annular jet can be referred that the low velocity impinges at this point as shown in Fig.4(a), and the one at $r\approx>2D_E$ is attributed lower turbulence intensity at this region (referring from higher turbulent intensity at this region affecting secondary heat transfer peak for conventional jet at $H=2D$ [7]).

For the case of $H=2D_E$ as shown in Fig.3(a), Nusselt number peak of annular jet is significantly high at $r\approx 0.8D_E$. This peak of Nusselt number corresponds to the peaks of Y-component velocity as shown in Fig.4(a). When jet-to-plate distance becomes higher, $H=4D_E$ and $6D_E$, as shown in Fig.3(b) and (c), the peak value of annular jet become lower. Especially for the case of $H=6D_E$ (Fig.3(c)), the peak values of both conventional and annular jet are comparable.

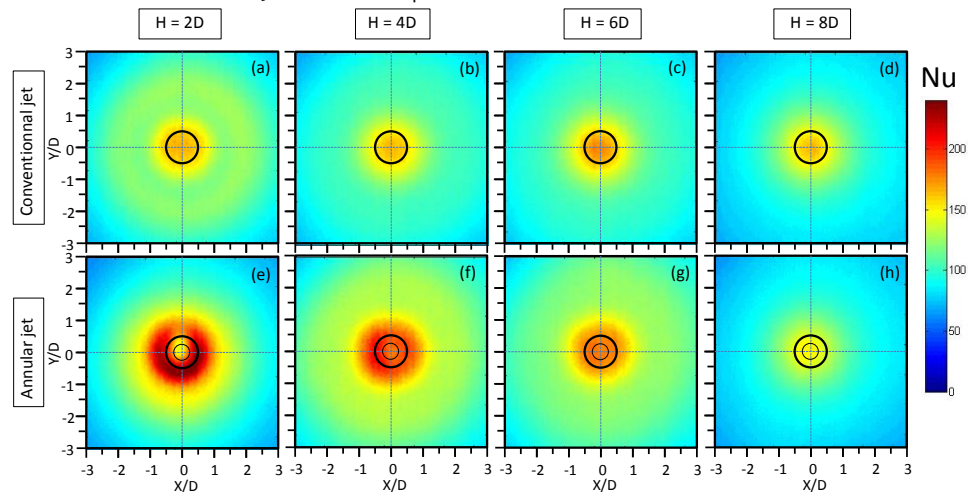


Fig. 2 Local Nusselt number distributions on impingement surface (Experimental results, $Re=20,000$, $T_j=27^\circ C$)

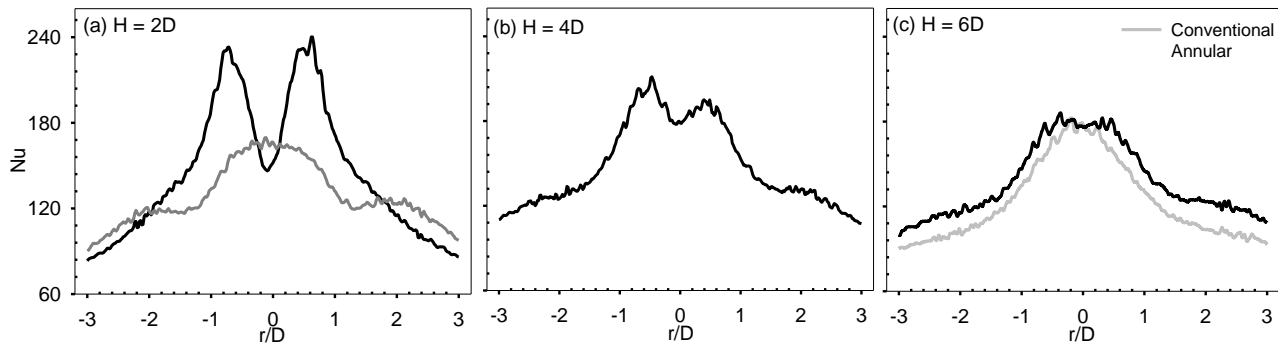


Fig. 3 Distributions of local Nusselt number on the impinged surface passing the centerline of impingement region (Experimental results, $Re=20,000$, $T_j=27^\circ\text{C}$)

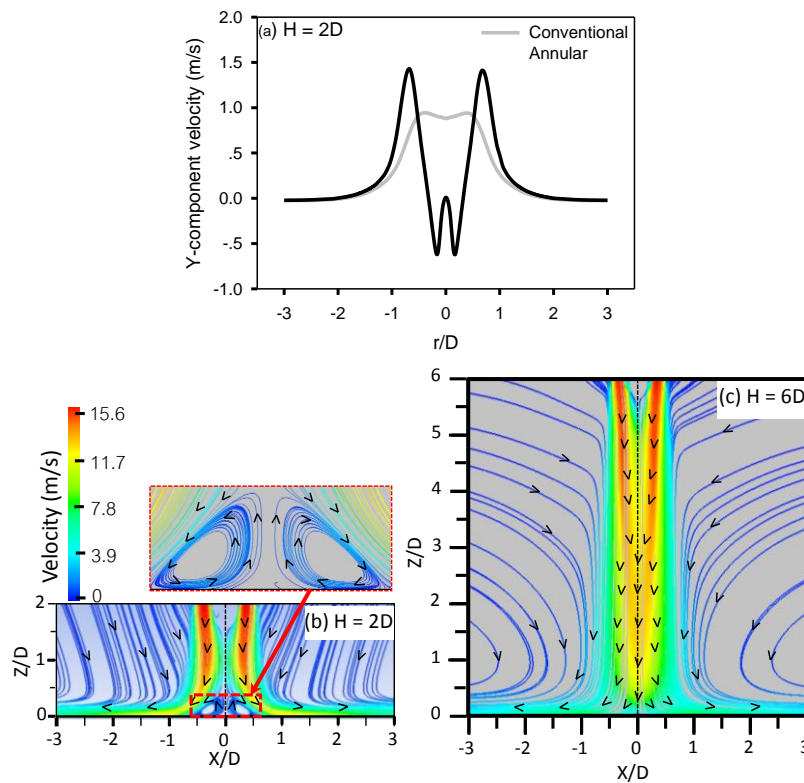


Fig. 4 (a): Distribution of Y-component velocity on centerline of impingement region above from the surface of 1 mm, and (b), (c): streamlines of jet on ZX plane passing center of nozzle (CFD results, $Re=20,000$).

The Y-component velocity as shown in Fig.4 (a) represents the velocity in the direction normal to the impinged surface. The positive velocity of the downstream jet indicates that the jet impinges on the wall. The negative velocity occurred near $r/D_E=0$ indicates that the jet flows away from the impingement wall. It can be illustrated that the circulation flows appear at nozzle center above the wall as shown particularly in Fig.2 (b).

Streamlines on ZX plane at center of nozzle at $H=2D_E$ and $6D_E$ are shown in Fig.4 (b) and (c). For the case of $H=2D_E$ (Fig.4 (b)) the jet was separated from effect of inserted cylindrical rod and impinged directly on the wall. It causes to appear Y-component velocity two places as shown in Fig.4 (a), consequently, affecting on the highest Nusselt number peaks as shown in Fig.3 (a). At $H=6D$ as shown in Fig.4(c), the annular jet was combined before impingement. From this effect, the Nusselt number characteristics are similar to the case of conventional one.

Average Nusselt Number was calculated from averaging local temperature in considered region $0 \leq r \leq 1D_E$, $0 \leq r \leq 2D_E$ and $0 \leq r \leq 3D_E$ as shown in Fig.5. Almost of all average values were decreased when the averaged areas become larger. The average values of annular jet are higher than the case of conventional jet throughout jet-to-plate distances except at $H=8D_E$. The average value for annular jet at $H=2D_E$ and $0 \leq r \leq 1D_E$ is the highest. This is from the Nusselt number peaks as shown in Fig.4 (a). For case of average Nusselt number in region $0 \leq r \leq 3D_E$ as shown in Fig.5(c), the average values are higher than conventional jet about 12.2%, 20%, 13.5% for case of $H=2D_E$, $4D_E$ and $6D_E$, respectively.

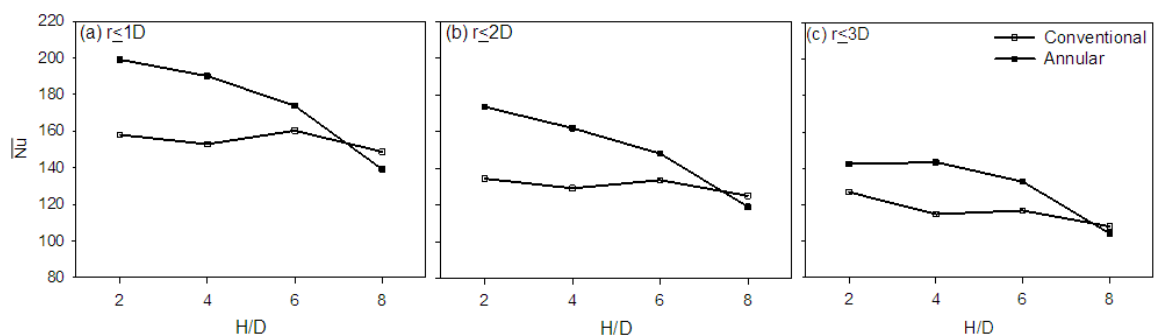


Fig. 5 Average Nusselt number (Experimental results, $Re=20,000$, $T_j=27^\circ\text{C}$)

Conclusions

The main finding of this investigation is that the heat transfer on the surface with annular impinging jet is higher than that of the conventional jet throughout jet-to-plate distances except at large jet-to-plate distance $H=8D_E$. Especially at $H=2D_E$, the Nusselt number peak is significantly high at $r \approx 0.8D$ because the high jet velocity impinges on the wall.

References

- [1] J. Lee, S.-J., Lee, The effect of nozzle aspect ratio on stagnation region heat transfer characteristics of elliptic impinging jet, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 43 (2000) 555-575.

- [2] D. W. Zhou, S.-J. Lee, Heat transfer enhancement of impinging jets using mesh screens, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 47 (2004) 2097-2108.
- [3] E.C. Mladin, D.A. Zumbrennen, Local convective heat transfer to submerged pulsating jets, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 46 (1997) 3305-3321.
- [4] H.S. Zhen, C.W. Leung, C.S. Cheung, Heat transfer characteristics of an impinging premixed annular flame jet, *Applied Thermal Engineering*, 36 (2012) 386-392.
- [5] K. Ichimiya, Heat Transfer characteristics of an annular turbulent impinging jet with a confined wall measured by thermosensitive liquid crystal, *Heat Mass Transfer*, 39 (2003) 545-511.
- [6] N. Zuckerman, N. Lior, Jet Impingement Heat Transfer: Physics, Correlations, Numerical Modeling, *Advances Heat Transfer*, 39 (2006) 565-631.
- [7] S. Ashforth-Frost, K. Jambunathan, C.F. Whitney, Velocity and Turbulence Characteristics of a Semiconfined Orthogonally Impinging Slot Jet. *Exp. Thermal Fluid Sci.*, 14 (1997) 60-67.

ภาคผนวก ข. บทความสำหรับเผยแพร่ 2

ลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนแบบไหลตกกระทบในแนวรัศมี

FLOW AND HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF RADIAL IMPINGING JET

(ก) วัชร มุสิกะ

มักตาร์ แวหะยี

ชยุต นันทคุสิต

ภาสกร เวสสะโกศล

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ต.คอหงส์ อ.หาดใหญ่

จ.สงขลา 90112

โทรศัพท์ 074-287-035

โทรสาร 074-212-893

E-mail: chayut@me.psu.ac.th

(ข) บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนจากท่อวงแหวนและท่อที่กำหนดให้เจ็ทไหลในแนวรัศมี ในการทดลองกำหนดให้ท่อเจ็ทที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน $D=28.6$ mm และติดตั้งเพลลาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $d=12.7$ mm ตามแนวศูนย์กลางท่อเจ็ท ในการสร้างเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมี ได้ทำการติดตั้งแท่งทรงกรวยที่มีมุมบาน $\theta=30^\circ$, 60° และ 90° ที่ศูนย์กลางปากทางออกท่อเจ็ท นอกจากนี้ได้ปรับระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงผนังที่เจ็ทพุ่งชนเท่ากับ $H=2D_h$, $4D_h$, $6D_h$ และ $8D_h$ โดยที่ D_h คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก ($D_h=D-d$) ในการเปรียบเทียบผลการทดลองกำหนดให้อัตราการไหลของเจ็ทเท่ากันทุกกรณีโดยเทียบจากเรย์โนลด์นัมเบอร์ของเจ็ทจากท่อวงแหวนที่ $Re=20,000$ ในการวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้ใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน และศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทโดยใช้วิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (ANSYS ver.13 ,Fluent) จากการศึกษาค้นคว้า ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงผนังที่เจ็ทพุ่งชน $H=2D_h$ บริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงของเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีที่เงื่อนไข $\theta=90^\circ$ มีขนาดกว้างกว่ากรณีอื่นๆ

คำสำคัญ : เจ็ทพุ่งชน, เจ็ทวงแหวน, เจ็ทที่ไหลในแนวรัศมี, การถ่ายเทความร้อน, การจำลองการไหล

(ค)

(ง) Abstract

The aim of this research is to study flow and heat transfer characteristics of impinging jet from annular pipe and radial pipe. In the experiment, the inner diameter of nozzle pipe was $D=28.6$ mm, and a rod having diameter of $d=12.7$ mm was inserted into the centre of nozzle pipe. For generating a radial jet, a solid cone with divergent angle of $\theta=30^\circ$, 60° and 90° was mounted at center of jet outlet. In addition, a jet-to-plate distance at $H=2D_h$, $4D_h$, $6D_h$ and $8D_h$ was varied where D_h is hydraulic diameter ($D_h=D-d$). For the comparison of results, the flow rate of jet for every cases was the same by respecting Reynolds number of annular jet at $Re=20,000$. The heat transfer pattern on the impingement surface was measured by using used infrared camera to capture temperature distributions on the surface, and the flow characteristics of jet were investigated by using Computational Fluid Dynamics (ANSYS ver.13, Fluent). The results showed that at the jet-to-plate distance $H=2D_h$, the area of high heat transfer of radial jet with $\theta=90^\circ$ was the largest.

Keywords : Impinging jet, Annular jet, Radial jet, Heat transfer, Flow simulation

1. บทนำ

เจ็ทพุ่งชน (Impinging jet) ถูกนำมาใช้ในอุปกรณ์ด้านการถ่ายเทความร้อนในภาคอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้าที่ใช้เครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์ การผลิตแก้วโลหะ สิ่งทอ เนื่องจากเจ็ทพุ่งชนเป็นวิธีที่ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่สูง โดยเฉพาะบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรง อีกทั้งยังให้อัตราส่วนระหว่างปริมาณการถ่ายเทความร้อนและปริมาณการไหลของของไหลที่สูง จึงสามารถใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ

ลักษณะและอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยวิธีการใช้เจ็ทพุ่งชนจะขึ้นอยู่กับลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิว เนื่องจากการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวมีความซับซ้อนมากกว่าการไหลของของไหลบนพื้นผิวทั่วไป จึงจำเป็นต้องศึกษาการไหลของเจ็ทหลายวิธี เพื่อให้เข้าใจถึงตัวแปรที่มีผลต่อลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิว โดยทั่วไปแล้วตัวแปรหลักที่มีผลต่อลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวมีอยู่สองประการคือ ระยะระหว่างปากทางออกของเจ็ทถึงระนาบที่เจ็ทพุ่งชน และรูปทรงของหัวฉีด เมื่อรู้ลักษณะการไหลของเจ็ทสามารถเป็นข้อมูลพื้นฐานในการอธิบายลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวก็จะนำไปสู่การออกแบบระบบการถ่ายเทความร้อนโดยใช้เจ็ทพุ่งชนเพื่อให้ได้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมที่สุด

ในอดีตได้มีการศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทอย่างกว้างขวาง เช่น งานวิจัยของ Poreh และคณะ [1] ได้ศึกษาเกี่ยวกับระดับของความปั่นป่วนและความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นบนผนัง จากการศึกษาพบว่าบริเวณของเจ็ทผนัง (Wall jet) ความเร็วของการไหลจะลดลงและความหนาของชั้นขอบเขตบนผนังจะเพิ่มขึ้น โดยจะแปรผันตรงตามระยะห่างจากจุดกึ่งกลางที่เจ็ทพุ่งชน โดยทั่วไปแล้วชั้นขอบเขตจำกัดจะเป็นตัวต้านทานการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับพื้นผิว ทำให้การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนผนังลดลง Popiel และ Boguslawski [2] ได้เปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนจากหัวฉีดแบบ Orifice และแบบ Bell-shape โดยกำหนดค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทที่เท่ากัน จากผลการศึกษาพบว่า หัวฉีดแบบ Orifice จะมีความเร็วในแนวศูนย์กลางสูงกว่าหัวฉีดแบบ Bell-shape ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทจาก Orifice มีค่าสูงกว่าแบบ Bell-shape นอกจากนี้ Baughn และ Shimizu [3] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว โดยใช้หัวฉีดที่เป็นลักษณะท่อยาว ได้ศึกษาผลของระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน จากการที่ได้ศึกษาพบว่า ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=6D$ (D คือเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเจ็ท) ให้นั้สเซลด์ันัมเบอร์บริเวณศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนสูงสุด นอกจากนี้ยังพบว่าที่ระยะ $H \leq 2D$ เกิดบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงสุดอันดับสอง (Secondary peak) เกิดขึ้น

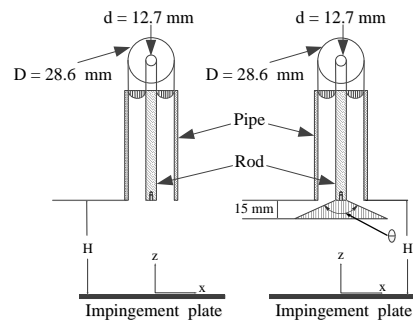
ปัญหาของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทพุ่งชนคืออัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงบริเวณศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนและลดลงตามแนวรัศมี ในอดีตนักวิจัยได้พยายามควบคุมการไหลของเจ็ทเพื่อให้บริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงขยายเพิ่มขึ้น Huang และ El-Genk [4] ได้ออกแบบอุปกรณ์สร้างกระแสเจ็ทหมุนควงสำหรับ

สอดในท่อเจ็ท ในการทดลองมุมบิดที่ใช้สร้างเจ็ทหมุนควงจะอยู่ในช่วง $15^\circ, 30^\circ$ และ 45° จากผลการทดลองพบว่า การใช้เจ็ทหมุนควงสามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนบนผนังได้ค่อนข้างมาก และช่วยเพิ่มความสม่ำเสมอของการถ่ายเทความร้อนได้เมื่อเทียบกับเจ็ทจากท่อ นอกจากนี้ Alekseenko และคณะ [5] ได้ทำศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนที่มีการติดตั้งตัวสร้างกระแสหมุนควงที่ปากทางออกเจ็ทที่มีลักษณะเป็นใบบังคับทิศทางที่สามารถปรับค่า Swirl number ได้ ผลการทดลองพบว่า อัตราการหมุนควงของเจ็ทที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการแพร่กระจายของเจ็ทเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามในการทดลองไม่ได้มุ่งเน้นไปที่อัตราการถ่ายเทความร้อนบนแผ่นระนาบที่เจ็ทพุ่งชน แต่จะศึกษาเฉพาะลักษณะการกระจายความเร็วของเจ็ท

ในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนจากท่อที่กำหนดให้เจ็ทไหลในแนวรัศมี โดยศึกษาผลของมุมที่เจ็ทไหลออกจากท่อและระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงผนังที่เจ็ทพุ่งชนที่มีผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

2 โมเดลและตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 1 แสดงโมเดลของเจ็ทพุ่งชนจากท่อแบบวงแหวนและท่อที่กำหนดให้เจ็ทไหลในแนวรัศมี จากรูปเจ็ทไหลออกจากท่อพุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิว ระบบพิกัดฉากเริ่มต้นบนผนังที่เจ็ทพุ่งชนและอยู่ตรงกึ่งกลางท่อเจ็ท โดยกำหนดให้แกน Z อยู่ในแนวเดียวกับการไหลของเจ็ท และแกน X, Y อยู่ในทิศทางตั้งฉากกับแกน Z ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 1



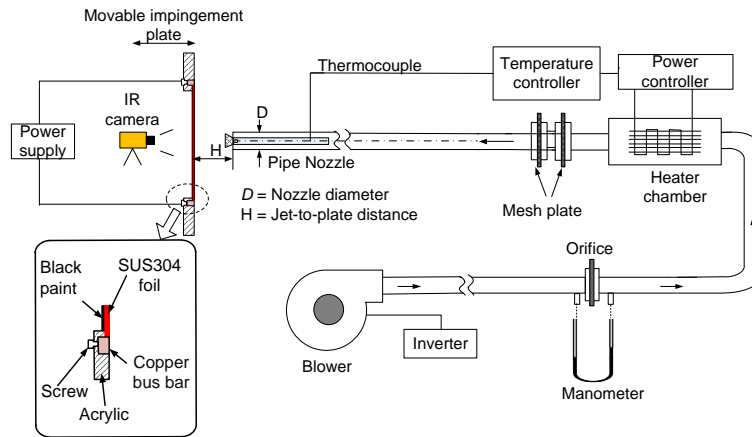
รูปที่ 1 โมเดลของเจ็ทพุ่งชนแบบท่อวงแหวน (ซ้าย) และแบบท่อที่กำหนดให้เจ็ทไหลในแนวรัศมี (ขวา)

ท่อเจ็ทวงแหวนสร้างโดยสอดเพลสแตนเลสตันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $d=12.7$ mm ไว้ตรงกลางท่อเจ็ทที่มีขนาด $D=28.6$ mm ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 1 (ซ้าย) โดยท่อเจ็ทและเพลสแตนเลสตันยาวเพียงพอที่จะทำให้เกิดการไหลแบบพัฒนาตัวก่อนที่อากาศจะไหลออกจากปากทางออกท่อเจ็ท ในการสร้างเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมี ได้ทำการติดตั้งแท่งทรงกรวยที่มีมุมบาน $\theta=30^\circ, 60^\circ$ และ 90° ที่ศูนย์กลางปากทางออกท่อเจ็ท โดยยึดติดกับเพลสตันที่อยู่ตรงกลางท่อเจ็ท และกำหนดให้ระยะจากปากทางออกท่อเจ็ทถึงฐานของทรงกรวยมีความสูงคงที่เท่ากับ 15 mm ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 1 (ขวา) สำหรับระยะจาก

ปากทางออกเจ็ทถึงผนังที่เจ็ทพุ่งชนได้ปรับให้อยู่ในช่วง $H=2D_n, 4D_n, 6D_n$ และ $8D_n$ โดยที่ D_n คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก ($D_n=D-d$) ในทุกการทดลองกำหนดให้อัตราการไหลของเจ็ทคงที่ โดยเทียบจากค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของเจ็ทจากท่อวงแหวนที่ $Re=VD_H/\nu=20,000$ โดยที่ V คือ ความเร็วที่ตำแหน่งศูนย์กลางท่อเจ็ทวงแหวน

3. ชุดการทดลองและวิธีการทดลอง

3.1 ชุดทดลอง



รูปที่ 2 โดอะแกรมของชุดทดลอง

3.2 การวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

วิธีการวัดค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวได้ใช้แผ่นสแตนเลสบางที่มีความหนา 0.03 mm โดยแผ่นสแตนเลสนี้ถูกขึงให้เรียบตึงกับแผ่นพลาสติกหนา 15 mm ที่เจาะหน้าต่างขนาด 240 mm x 240 mm ไว้กลางแผ่น โดยใช้แท่งทองแดงยึดแผ่นสแตนเลสไว้ทั้งสองข้าง และแท่งทองแดงทั้งสองนี้จะต่อเข้ากับขั้วของตัวจ่ายกระแสไฟฟ้า เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านแท่งทองแดงไปยังแผ่นสแตนเลส จะเกิดความร้อนกระจายทั่วพื้นผิวแผ่นสแตนเลส จากนั้นใช้เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวทำการระบายความร้อน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว จึงทำการบันทึกค่าการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวแผ่นสแตนเลสด้านตรงข้ามที่เจ็ทพุ่งชนโดยใช้กล้องตรวจจับความร้อน (IR Camera)

สำหรับอัตราการเกิดความร้อนในแผ่นสแตนเลสสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$\dot{q}_{input} = \frac{IV}{A} \tag{1}$$

ในที่นี้ I คือกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นสแตนเลส V คือแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมแผ่นสแตนเลส และ A คือ พื้นที่ของพื้นผิวถ่ายเทความร้อน (แผ่นสแตนเลส)

จากนั้นสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะจุด (h) บนพื้นผิวได้จากสมการ

$$h = \frac{\dot{q}_{input} - \dot{q}_{rad} - \dot{q}_{nat}}{T_w - T_{aw}} \tag{2}$$

ในที่นี้ $\dot{q}_{rad} = \alpha(\bar{T}_w^4 - T_s^4)$ และ $\dot{q}_{nat} = h_c(\bar{T}_w - T_s)$ คือ พลังการสูญเสียความร้อนที่เกิดจากการแผ่รังสีและการพาความร้อนแบบธรรมชาติบนผนังด้านหลังของแผ่นสแตนเลส T_{aw} คืออุณหภูมิของแผ่นสแตนเลสเมื่อเจ็ทพุ่งชนในขณะที่ไม่มีฟลักซ์ความร้อน, T_w คืออุณหภูมิของแผ่นสแตนเลสที่มีฟลักซ์ความร้อน, T_s คืออุณหภูมิบรรยากาศโดยรอบ และ h_c การพาความร้อนแบบธรรมชาติด้านตรงข้ามที่เจ็ทพุ่งชน

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \tag{3}$$

โดยที่ h คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ และ k คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ

3.3 การจำลองการไหลด้วยวิธีทางพลศาสตร์ของไหล

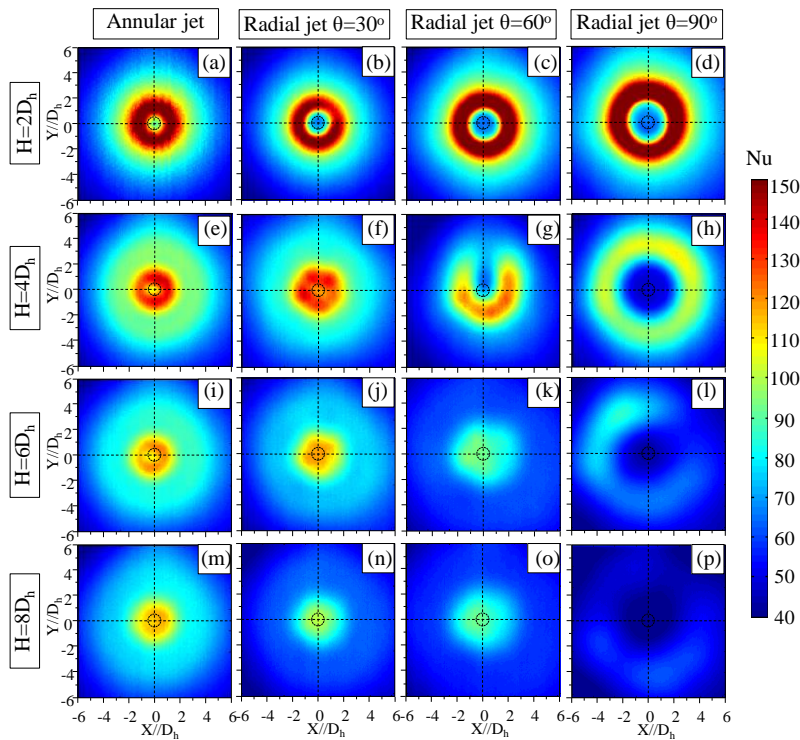
ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม ANSYS Ver. 13, Fluent ในการจำลองการไหล 3 มิติ แบบคงตัว โดยที่โมเดลที่ใช้ในการคำนวณรวมทั้งเงื่อนไขขอบเขตได้ถูกจำลองให้เหมือนกับการทดลอง กริดถูกสร้างให้ละเอียดบริเวณปากทางออกเจ็ทและผนังที่เจ็ทพุ่งชน ในการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเลือกใช้โมเดล Shear stress transport (SST) k-

omega และใช้ SIMPLE อัลกอริทึมในการแก้สมการความต่อเนื่องและสมการ Reynolds-Averaged Navier-Stoke เพื่อหาสนามความเร็วและความดัน และเลือกใช้ Spatial discretization แบบ Second order-upwind สำหรับค่าความผิดพลาดของคำตอบได้กำหนดไว้ที่ 1×10^{-5}

4. ผลการทดลอง

รูปที่ 3 แสดงการกระจายของนัสเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน กรณีของท่อวงแหวนที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่ำ $H=2D_h$ (รูปที่ 3(a)) พบว่า การกระจายของนัสเชิลต์นัมเบอร์มีค่าต่ำที่ตำแหน่งกึ่งกลางท่อเจ็ท ซึ่งเป็นผลมาจากการสอดเพลมาภายใน

ท่อเจ็ท เจ็ทยังไม่เกิดการรวมตัวก่อนไหลพุ่งชนพื้นผิว บริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงเป็นรูปวงแหวนตามลักษณะของหน้าตัดท่อเจ็ท เมื่อระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนสูงขึ้นเป็น $H=4D_h$ (รูปที่ 3(e)) บริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำที่ตำแหน่งกึ่งกลางท่อเจ็ทมีขนาดเล็กลง เนื่องจากเจ็ทเกิดการรวมตัวมากขึ้นก่อนพุ่งชนพื้นผิว สำหรับบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่อยู่ในช่วง $90 \leq Nu \leq 110$ ขยายบริเวณกว้างขึ้นแสดงถึงเจ็ทมีการขยายตัวก่อนพุ่งชนพื้นผิว สำหรับที่ระยะ $H \geq 6D_h$ (รูปที่ 3(i) และ (m)) บริเวณที่อัตราการถ่ายเทความร้อนสูง ($Nu \geq 80$) มีขนาดแคบลง



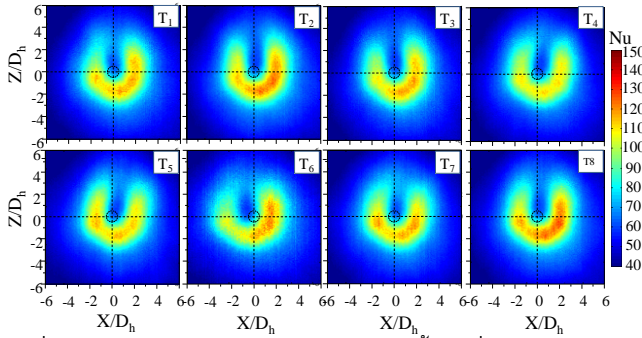
รูปที่ 3 การกระจายของนัสเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ($Re=20,000, T_j=27^\circ C$)

สำหรับเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่ำ $H=2D_h$ (รูปที่ 3(b), (c) และ (d)) ลักษณะการกระจายของนัสเชิลต์นัมเบอร์คล้ายกับกรณีเจ็ทจากท่อวงแหวน เมื่อมุม θ เพิ่มขึ้น บริเวณที่นัสเชิลต์นัมเบอร์มีค่าสูง ($Nu \geq 110$) ขยายบริเวณกว้างขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าบริเวณที่นัสเชิลต์นัมเบอร์มีค่าต่ำ ($Nu < 90$) ที่อยู่ตำแหน่งตรงกลางท่อเจ็ทขยายบริเวณกว้างขึ้น เมื่อมุม θ เพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการตกกระทบของเจ็ทห่างออกจากศูนย์กลางท่อเจ็ทมากขึ้นเมื่อมุม θ เพิ่มขึ้น (ตามที่ได้แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทในรูปที่ 7 (b), (c) และ (d)) เมื่อระยะ $H \geq 4D_h$ บริเวณที่อัตราการถ่ายเทความร้อนสูง ($Nu \geq 90$) มีขนาดแคบลงกว่ากรณีเจ็ทจากท่อวงแหวน

สำหรับเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีกรณีที่เงื่อนไข $\theta = 60^\circ$ และ $H=4D_h$ ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 3(g) พบว่า ลักษณะบริเวณที่นัสเชิลต์นัมเบอร์มีค่าสูง ($Nu \geq 90$) ไม่เป็นวงกลม เกิดบริเวณที่นัสเชิลต์นัมเบอร์มีค่าต่ำ

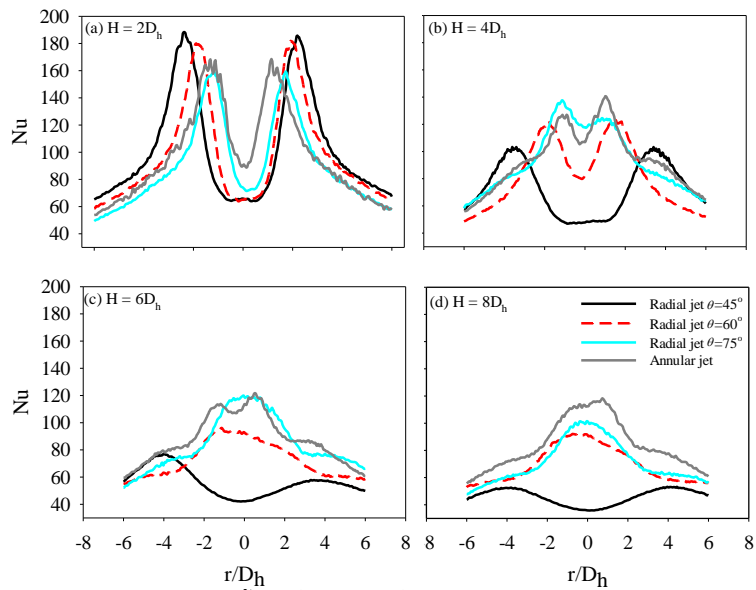
เป็นแนวยาวที่ตำแหน่ง $X/D_h=0$ ซึ่งเกิดจากอากาศที่อยู่ภายใต้ทรงกรวยไหลออกจากบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน นอกจากนี้ยังพบว่า ลักษณะการกระจายของนัสเชิลต์นัมเบอร์มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาตามที่ได้แสดงในรูปที่ 4

รูปที่ 5 แสดงการกระจายของนัสเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่ตำแหน่งศูนย์กลางท่อเจ็ท ($Y/D=0$) กรณีที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่ำ $H=2D_h$ (รูปที่ 5(a)) พบว่า นัสเชิลต์นัมเบอร์สูงสุด (Peak) สูงกว่ากรณีที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนอื่นๆ สำหรับเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีที่เงื่อนไข $\theta = 45^\circ$ และ 60° นัสเชิลต์นัมเบอร์สูงสุดมีค่าสูงกว่ากรณีเจ็ทจากท่อวงแหวน เมื่อระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนสูงขึ้น $H \geq 4D$ (รูปที่ 5(b)-(d)) พบว่านัสเชิลต์นัมเบอร์สูงสุดของเจ็ทวงแหวนมีค่าสูงกว่าเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมี

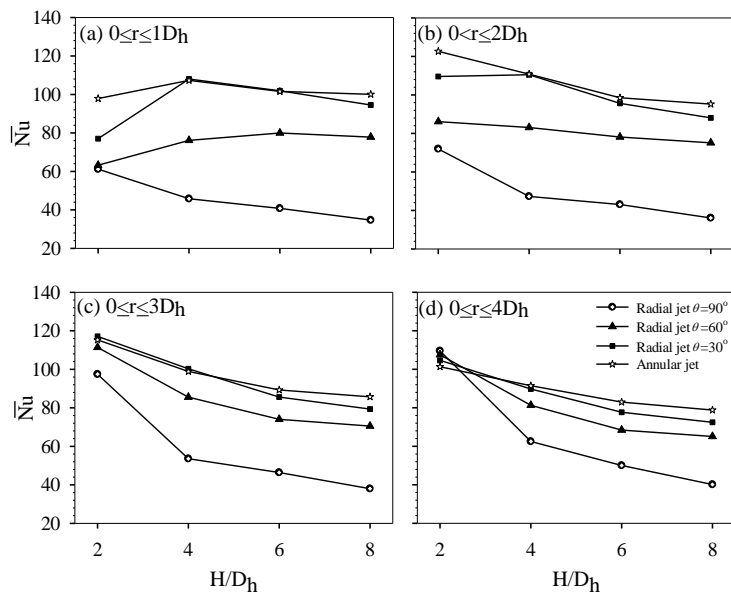


รูปที่ 4 การกระจายของนัสเซลต์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนกรณีเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีที่มุม $\theta = 60^\circ$ และระยะ $H=4D_h$

รูปที่ 6 แสดงนัสเซลต์บนเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่ติดค่าเฉลี่ยในช่วงบริเวณ $0 \leq r/D_h \leq 1$, $0 \leq r/D_h \leq 2$, $0 \leq r/D_h \leq 3$ และ $0 \leq r/D_h \leq 4$ จากรูปแนวโน้มของนัสเซลต์บนเบอร์เฉลี่ยลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (H) เมื่อพิจารณาบริเวณ $0 \leq r/D_h \leq 1$ และ $0 \leq r/D_h \leq 2$ ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=2D_h$ (รูปที่ 6(a) และ (b)) นัสเซลต์บนเบอร์เฉลี่ยของเจ็ทจากท่อวงแหวนมีค่าสูงกว่าเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมี เนื่องจากนัสเซลต์บนเบอร์บริเวณศูนย์กลางท่อเจ็ทกรณีเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีมีค่าต่ำ ซึ่งเกิดจากผลของการติดทรงรอยที่ปากทางออกเจ็ท เมื่อพิจารณาบริเวณ $0 \leq r/D_h \leq 4$ ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=2D_h$ (รูปที่ 6(d)) พบว่านัสเซลต์บนเบอร์เฉลี่ยของเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีทุกกรณีมีค่าสูงกว่าเจ็ทจากท่อวงแหวน



รูปที่ 5 การกระจายของนัสเซลต์บนเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่ตำแหน่งศูนย์กลางท่อเจ็ท ($Y/D_h=0$, $Re=20,000$, $T_j=27^\circ C$)



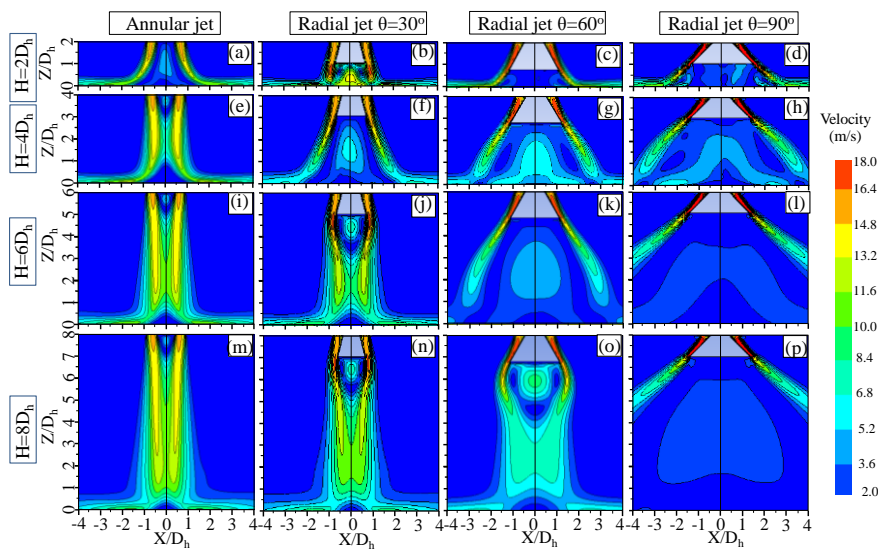
รูปที่ 6 นัสเซลต์บนเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ($Re=20,000$, $T_j=27^\circ C$)

รูปที่ 7 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทที่ได้จากผลการจำลองลักษณะการไหล กรณีเจ็ทจากท่อวงแหวนที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่ำ $H=2D_h$ (รูปที่ 7(a)) เจ็ทไหลออกจากท่อวงแหวนพุ่งชนพื้นผิวทันที จุดที่เจ็ทไหลตกกระทบที่ $X/D_h \approx \pm 1.5$ ซึ่งสอดคล้องกับตำแหน่งที่นัสเซลล์ต์นัมเบอร์มีค่าสูงสุดตามที่ได้แสดงในรูปที่ 5(a) เมื่อระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนสูงขึ้น $H \geq 4D$ (รูปที่ 7(e), (i) และ (m)) พบว่าเจ็ทไหลรวมตัวก่อนที่จะพุ่งชนพื้นผิว ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้นัสเซลล์ต์นัมเบอร์บริเวณที่ตำแหน่งศูนย์กลางท่อมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับที่ระยะ $H=2D_h$

กรณีเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่ำ $H=2D_h$ (รูปที่ 7(b), (c) และ (d)) เจ็ทเกิดการแยกตัว

และไหลตกกระทบพื้นผิวห่างจากจุดศูนย์กลางท่อเจ็ทมากขึ้นเมื่อมุม θ เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับตำแหน่งที่นัสเซลล์ต์นัมเบอร์มีค่าสูงสุดตามที่ได้แสดงในรูปที่ 5(a) เมื่อระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนสูงขึ้น $H \geq 4D$ เจ็ทไหลแยกตัวออกจากกันและมีส่วนที่ไหลกระทบพื้นผิวน้อย ทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลง

กรณีเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีที่เงื่อนไข $\theta=30^\circ$ พบว่ามีลักษณะการไหลคล้ายกับกรณีเจ็ทจากท่อวงแหวน ซึ่งสอดคล้องกับการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีเจ็ทที่ไหลออกจากท่อวงแหวน (รูปที่ 3(a), (e), (i) และ (m)) มีลักษณะคล้ายกับกรณีเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีที่เงื่อนไข $\theta=30^\circ$ (รูปที่ 3(b), (f), (j) และ (n))



รูปที่ 7 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนจากผลการจำลองลักษณะการไหล ($Re=20,000$, $T_j=27^\circ C$)

5. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาลักษณะการไหลและถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนจากท่อวงแหวนและท่อที่กำหนดให้เจ็ทไหลในแนวรัศมี จากผลการศึกษาสรุปได้ว่า

(1) ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่ำ $H=2D_n$ บริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงมีลักษณะเป็นรูปวงแหวน เนื่องจากเจ็ทไหลพุ่งชนพื้นผิวทันที (ยังไม่มีกรรวมตัว) สำหรับกรณีเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีที่เงื่อนไข $\theta=90^\circ$ พบว่าบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงมีขนาดกว้างกว่าที่เงื่อนไขอื่นๆ

(2) ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H \geq 4D$ แนวโน้มการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวลดลงเมื่อเทียบกับกรณี $H=2D_n$ บริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงเกิดขึ้นที่ตำแหน่งศูนย์กลางท่อเจ็ท เนื่องจากเจ็ทมีการรวมตัวก่อนพุ่งชนพื้นผิว ยกเว้นกรณีเจ็ทที่ไหลในแนวรัศมีที่เงื่อนไข $\theta=90^\circ$ พบว่าเจ็ทไม่มีการไหลรวมตัวก่อนพุ่งชนพื้นผิว ทำให้การถ่ายเทความร้อนบริเวณศูนย์กลางท่อเจ็ทมีค่าต่ำสุด

เอกสารอ้างอิง

- [1] Poreh, M., Tsuei, G. and Cermak, E. J., 1967, Investigation of a Turbulent Radial Wall Jet,. Journal of Applied Mechanics, Vol. 34, pp. 457-463.
- [2] Popipel, O. Cz. and Boguslawski, L., 1986 Mass or Heat transfer in impinging single, round jets emitted by a bell-shaped nozzle and sharp-ended orifice,. Proceeding: International Heat Transfer Conference 8.
- [3] Baughn, J.W. and Shimizu, S., 1989, Heat transfer measurements from a surface with uniform heat flux and an impinging jet, Journal of Heat Transfer, Vol. 111, pp. 1096-1098.
- [4] Huang, L. and El-Genk, M. S. 1998, Heat transfer and flow visualization experiments of swirling, multi-channel, and conventional impinging jets. International Journal of Heat and Mass Transfer, vol.41, pp. 583-600.
- [5] Alekseenko, V. S., Bilsky, V. A., Dulin, M. V. and Markovich, M. D. 2007, Experimental study of an impinging jet with different swirl rates. International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 28, pp. 1340-1359.

ภาคผนวก ค. บทความสำหรับเผยแพร่ 3

**INVESTIGATION OF FLOW AND HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF
RADIAL IMPINGING JET**

W. Musika¹, M. Wae-hayee¹, P. Vessakosol¹ and
C. Nuntadusit^{*1}

¹ Energy Technology Research Center and Department of Mechanical Engineering,
Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla 90112, Thailand

*chayut@me.psu.ac.th

(a) ABSTRACT

In this study, flow and heat transfer characteristics of radial impinging jet were investigated. The effect of jet outlet geometry and nozzle-to-impinging surface distance were studied. The experiment was conducted an annular and radial pipe nozzle with inner diameter and outer diameter at $d=12.7$ mm, $D=28.6$ mm. The jet-to-plate distance at $H = 2D_h$, $4 D_h$, $6 D_h$ and $8 D_h$ (D_h is hydraulic diameter of radial jet nozzle) and outlet angle of radial jet at $\Theta=45^\circ$, 60° and 75° were examined. To compare the results, jet mass flow rate was fixed at jet Reynolds number of 20,000. The heat transfer characteristics were measured by using infrared camera. The numerical simulation was employed to predict flow field using commercial software (ANSYS ver. 13.0, Fluent). It is found that the heat transfer rate on target surface of radial jet at low jet-to-plate distance is higher than the case of annular.

INTRODUCTION

Jet impingement is widely used in various industrial applications due to offering high heat transfer rate on impingement surface. The applications include tempering of glass, drying of paper, chemical vapour deposition, cooling turbine blade and electronic component. There are several methods for enhancing heat transfer rate on impingement surface such as the modification of orifice configuration [1], addition of mesh screens [2] and generation of pulsating jet [3]. Generally, an overall heat transfer rate on the impingement surface from applying these techniques as mentioned above is higher when compare to the case of conventional jet at some particular conditions. When consider local heat transfer distribution on the surface, however, heat transfer peak was placed at stagnation point similarly to the case of conventional one. Occasionally, the uniformity of high heat transfer region on impingement surface for particular thermal applications is demanded; then, an annular impinging jet is applied.

Recently, an annular jet from a long straight pipe was applied on combustion flame jet [4]. It is rare for applying this technology on an impingement cooling jet. A few study of annular jet from long straight pipe is particularly concerned just for heat transfer characteristics under low jet-to-plate distance $H \leq 2D$ [5], but flow characteristics and effect of higher jet-to-plate distance, $H \geq 2D$, isn't reported. Then, flow characteristics of annular jet from pipe nozzle should be concerned.

The objective of this study is to investigate flow and heat transfer characteristics of an impinging jet from radial jet. The jet-to-plate distance and angle of outlet of radial jet were examined. The comparison of results between radial jet and annular jet was based on the same of nozzle diameter and mass flow rate. The temperature distribution on the impingement surface was measured using an IR camera, and flow characteristics of impinging

jet were simulated by using Computational Fluid Dynamic software.

EXPERIMENTAL APPARATUS AND PROCEDURE

The experimental model displaying the jet from annular nozzle and radial nozzle is shown in Figure 1.(a) and (b), respectively. Air with fully developed flow was discharged at nozzle outlet and perpendicularly impinged on a target surface. An origin of the Cartesian coordinates was located at center of nozzle on the impingement surface. The X- and Y-axes are normal to axial jet streamwise coordinate, and Z-axis is on the axial of jet. For all nozzles have the same area of jet outlet and fixed the jet Reynolds number at 20,000 for comparison.

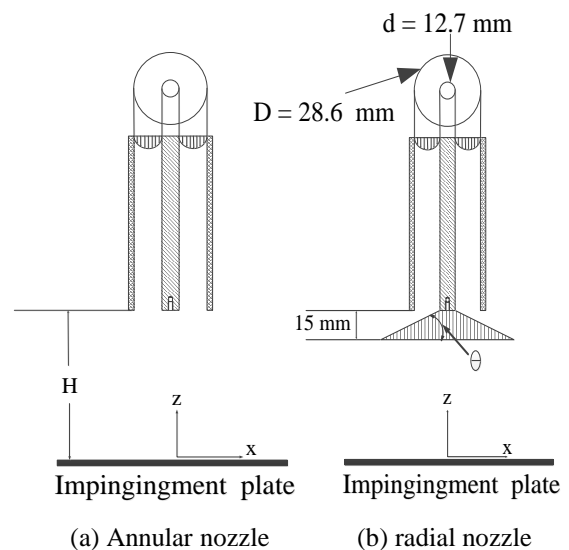


Figure 1. Experimental model of impinging jet

In order to generate an annular jet, the round rod of stainless steel with 12.7 mm in diameter was inserted at center of pipe nozzle. The length of round rod is enough to maintain fully developed flow. Hydraulic diameter of round pipe nozzle (D_h) was 28.6 mm. The jet-to-plate was varied in the range of $H=2D_h$, $4 D_h$, $6 D_h$ and $8 D_h$. The angle of radial nozzle outlet was varied $\Theta=45^\circ$, 60° and 75° . The mass flow rate of jet for all cases was fixed at jet Reynolds number of annular pipe of 20,000 based on velocity at center of jet.

Experimental Setup.

A schematic of the experimental apparatus is shown in Figure 2. Air is supplied by a blower through a calibrated orifice for measuring flow rate. The flow rate is controlled by adjusting rotating speed of blower with inverter. Jet air temperature is controlled by a temperature controller and a power controller at $27 \pm 0.2\%$ °C. The nozzle is a steel pipe with inner diameter of 28.6 mm and length to diameter ratio of 83. This pipe length ensures fully developed flow over the Reynolds number range investigated. The jet impingement surface was made of

stainless steel foil with 240 mm × 240 mm and 0.03 mm in thickness. The stainless steel foil was tightly stretched between two copper bus bars on the plastic plate as shown in Figure 2. The rear side of jet impinged surface was painted with dark black color which having emissivity at 0.95.

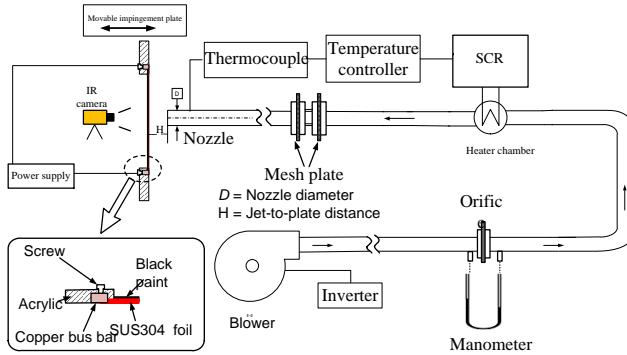


Figure 2. schematic of experimental set up

Heat transfer measurement

The air jet with constant temperature discharging from the pipe nozzle was impinged on the heated surface for cooling. The wall temperature on the impingement surface was measured by using the infrared camera and, the heat transfer coefficient and Nusselt number were subsequently calculated.

The local Nusselt number was calculated from:

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (1)$$

Where, D_h is the hydrolic diameter of the pipe nozzle and k is a thermal conductivity of the air jet. The heat transfer coefficient, h , can be calculated from

$$h = \frac{\dot{q}_{input} - \dot{q}_{rad} - \dot{q}_{nat}}{T_{wh} - T_{wj}} \quad (2)$$

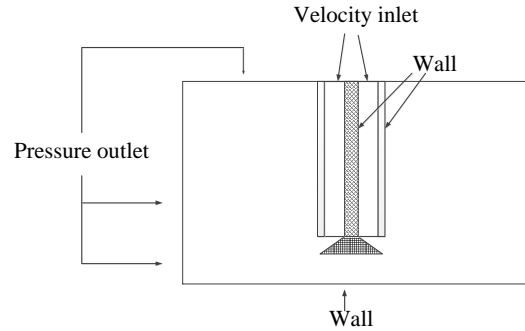
where $\dot{q}_{rad} = \sigma \epsilon (\bar{T}_{wh}^4 - T_s^4)$ and $\dot{q}_{nat} = h_c (\bar{T}_{wh} - T_s)$ are the heat loss transferred to the environment by radiation and convection, respectively. The T_{wh} and T_{wj} are Temperature of the stainless plate with have heat flux and not have heat flux, the σ is a Stefan-Boltzman constant, the ϵ is a emissive coefficient of coefficient of captured side; T_s is the surrounding temperature; and h_c is the natural heat transfer coefficient calculated from natural convective heat transfer from the heat transfer surface to the surrounding.

The heat flux can be evaluated from

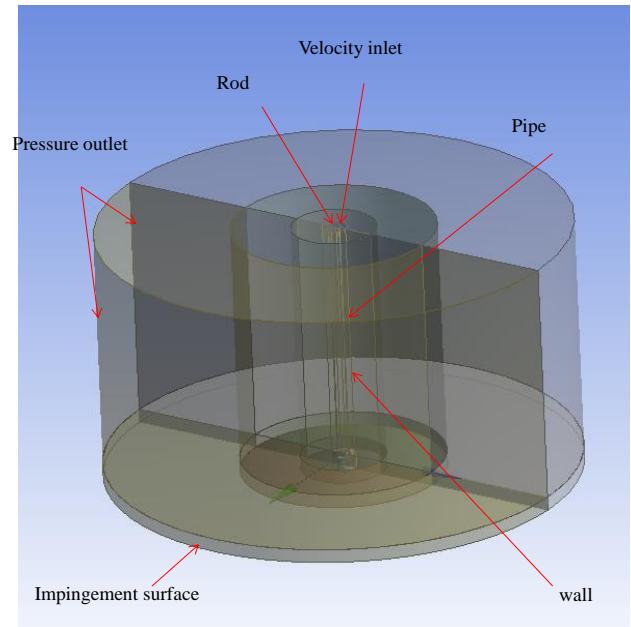
$$\dot{q}_{input} = \frac{IV}{A} \quad (3)$$

where, I is the electric current, V and A are the voltage and the area of the stainless steel foil.

Numerical simulation



(a) layout of Numerical model



(b) 3-D Numerical model

Figure 3. Numerical model

Flow characteristics of the impinging jet were visualized by using computational fluid dynamics software (ANSYS, ver.13.0). The numerical model was identical to the experimental model in its geometries, dimensions, and boundary conditions as shown in Figure 3. Computations were conducted by solving Reynolds Averaged continuity and Navier-stokes equations with SST turbulence model. The non-uniform grid system was finely generated for regions near the impingement surface and pipe nozzle as shown in Figure 4. Solutions were considered to be convergent when the normalized residual of all algebraic equations is less than the prescribed value of 1×10^{-5} [6].

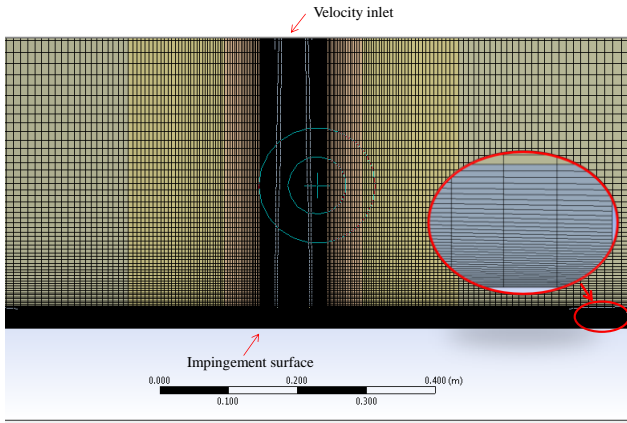


Figure 4. Generated grids

(b)

(c) RESULTS AND DISCUSSIONS

Flow characteristics

The velocity contours from numerical simulation are shown in Figure 5. The results between the case of annular pipe (left side) and radial pipe with $\Theta=45^\circ$ (right side) are compared.

For the case of annular pipe at low jet-to-plate distance, $H=2D_h$, as shown in Figure 5(e), the jet after discharging from pipe impinges immediately on target surface. The velocity contours are very low at the center of pipe due to effect of inserted rod. At higher jet-to-plate distance, $H=4D_h$ as shown in Figure 5(c), the annular jet combine at the jet core before impingement. Especially at $H=6D_h$ as shown in Figure 5(a), the jet flow completely combine at the jet core before impingement.

For the case of radial pipe at low jet-to-plate, $H=2D_h$, as shown in Figure 5(f), the radial jet impinges obliquely on target surface. The low area of velocity contours at the center of pipe is larger that the case of annular jet at the same jet-to-plate distance. When jet-to-plate distance becomes lager, $H=4D_h$ and $6D_h$, as shown in Fig.5(d) and (b), the impingement of jet on target surface becomes weaker.

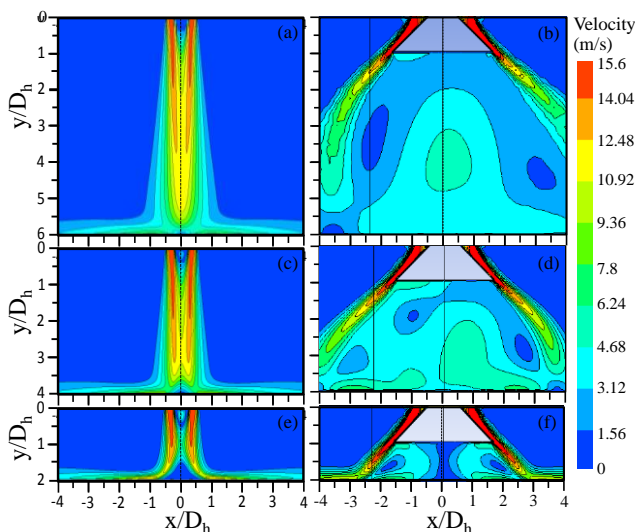


Figure 5. Velocity Contour of jet Plane at center of nozzle, $Y/D_h=0$ (CFD result, $Re=20,000$)

Nusselt number distributions

Local Nusselt number distributions on the impingement surface from experimental result are shown in Figure 4. Marked black circle at center of each figure indicates the layout of nozzle outlet. For the case of annular impinging jet at lower jet-to-plate distance, $H=2D_h$ and $4d$, as shown in Figure 4.(a) and (b), the Nusselt number distributions are low at the center of pipe due to effect of rod. However, at higher jet-to-plate distance, $H=6d$ and $8d$, the Nusselt number distributions at the center of pipe become higher because annular jet at the jet core combine before impingement as earlier discussion.

For the case of radial jet at $H=2D_h$, the areas of low Nusselt number distributions are larger than the case of annular one. The low area of Nusselt number distributions is smaller when angle outlet is larger. This can be explained that the stagnation region of jet with small outlet angle ($\Theta=45^\circ$) is more fare from center of pipe. However, it can be enhance heat transfer on target surface by getting larger area of high Nusselt number ($Nu>130$). The area of high Nusselt number of radial jet becomes smaller when outlet angle is lager.

At $H\geq 4D_h$, the Nusselt number distributions of radial jet seem to be lower comparing to the case of annular jet at the same jet-to-plate distance. This is due to radial jet impinge weakly on target surface at higher jet-to-plate distance, $H\geq 4D_h$ as previously discussed in flow characteristics.

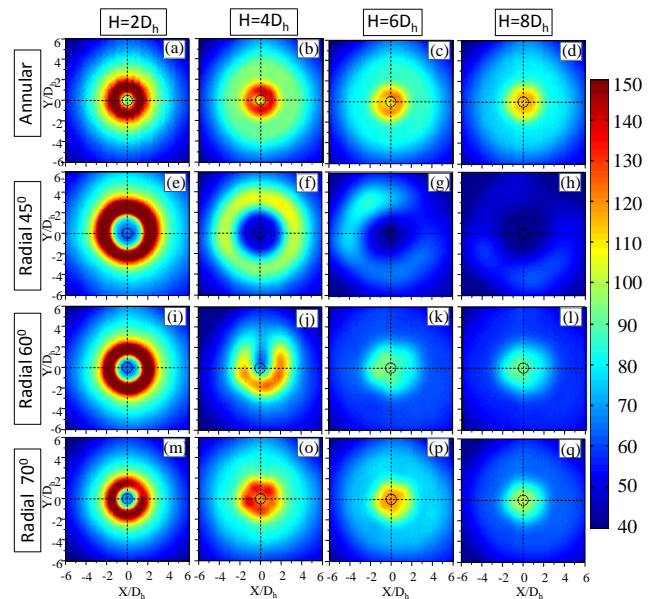


Figure 6. Local Nusselt number distributions on impingement surface (Experimental results, $Re=20,000$, $T_j=27^\circ C$)

The distributions of local Nusselt number on impinged surface along centerline passing stagnation point for $H=2D_h, 4D_h, 6D_h$ and $8D_h$ are shown in Fig.7. At low jet-to-plate distance, $H=2D_h$ as shown in Figure 7.(a), the peak of Nusselt number for the all cases of radial jet is

higher than the case of annular jet. When jet-to-plate distance become larger, $H \geq 4D_h$, the peak of Nusselt number for the case of annular jet seem to be higher than the case of radial jet at the same jet-to-plate distance.

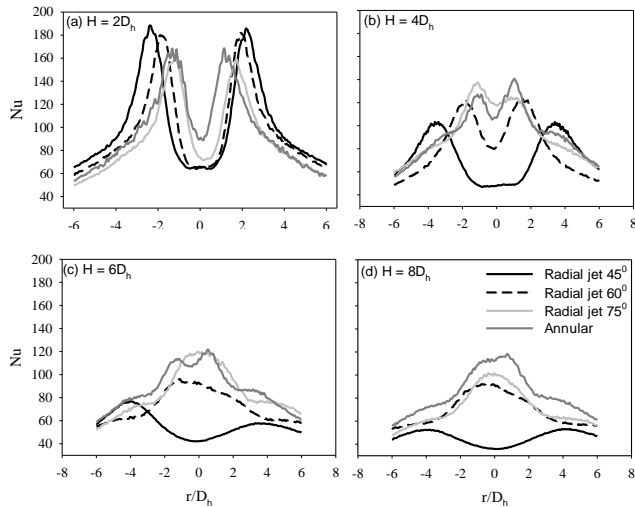


Figure 7. Local Nusselt number distributions of on the impinging surface passing the centerline of pipe nozzle (Experimental results, $Re=20,000$, $T_j=27^\circ\text{C}$)

CONCLUSIONS

In this study, the flow and heat transfer characteristics of radial jet are investigated comparing to the case of annular jet. The results show that, at low jet-to-plate distance, the impingement region of radial jet is larger than the case of annular one. In case on enhancement heat transfer rate of radial jet when compare to the case of annular one. However, at higher jet-to-plate distance, the radial jet impinges on target surface weakly. The heat transfer rate of radial jet for all case becomes lower than the case of annular jet. The effects of outlet angle show that the heat transfer of radial jet with $\Theta=45^\circ$ at $H=2D_h$ is the highest. However, at $H \geq 6D_h$, the heat transfer rate decreases rapidly.

NOMENCLATURE

A	area of heater surface	(m^2)
D_h	hydraulic diameter of the jet	(mm)
H	jet-to-plate distance	(mm)
h	local heat transfer coefficient	($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$)
I	current	(Ampere)
k	jet thermal conductivity	($\text{W}/\text{m K}$)
Nu	local Nusselt number	(-)
\dot{q}_c	conduction heat flux	(W/m^2)
\dot{q}_r	radiation heat flux	(W/m^2)
Re_E	jet Reynolds number	(-)
T_j	jet temperature	($^\circ\text{C}$)
T_w	wall temperature	($^\circ\text{C}$)

(d) REFERENCES

- [1] Lee, J. and Lee S.-J., (2000): "The effect of nozzle aspect ratio on stagnation region heat transfer characteristics of elliptic impinging jet". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, pp.555-575.
- [2] Zhou, D.W and Lee, S.-J. (2004): "Heat transfer enhancement of impinging jets using mesh screens". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, pp.2097-2108.
- [3] Mladin, E.C. and Zumbrennen, D.A. (1997): "Local convective heat transfer to submerged pulsating jets", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp.3305-3321.
- [4] Zhen, H.S., Leung, C.W., and Cheung, C.S. (2012): "Heat transfer characteristics of an impinging premixed annular flame jet". *Applied Thermal Engineering*, Vol 36, pp. 386-392.
- [5] Ichimiya, K. (2003): "Heat Transfer characteristics of an annular turbulent impinging jet with a confined wall measured by thermosensitive liquid crystal". *Heat Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 545-511.
- [6] Zuckerman, N. and Lior, N. (2006): "Jet Impingement Heat Transfer: Physics, Correlations, Numerical Modeling". *Advances Heat Transfer*, Vol. 39, pp. 565-631.
- [7] Ashforth-Frost, S., Jambunathan, K., and Whitney, C.F. (1997): "Velocity and Turbulence Characteristics of a Semiconfined Orthogonally Impinging Slot Jet". *Experimental Thermal Fluid Sci*, Vol.14, pp. 60-67

ภาคผนวก ง. การคำนวณค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty Analysis)

ภาคผนวก ง.

การคำนวณค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty Analysis)

การคำนวณนัสเซิลต์นัมเบอร์ (Nusselt Number) ใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (ง.1)$$

จากสมการนัสเซิลต์นัมเบอร์สามารถนำมาเขียนแยกเป็นสมการย่อยได้ดังนี้

$$Nu = \frac{(\dot{q}_{input} - \dot{q}_{rad} - \dot{q}_{nat})D_h}{(T_w - T_{aw})k} \quad (ง.2)$$

$$Nu = \frac{IVD_h}{Ak(T_w - T_{aw})} - \frac{\sigma \epsilon (T_w^4 - T_s^4)D_h}{k(T_w - T_{aw})} - \frac{h_c(T_w - T_s)D_h}{k(T_w - T_{aw})} \quad (ง.3)$$

$$Nu = IVD_h k^{-1} A^{-1} (T_w - T_{aw})^{-1} - \sigma \epsilon (T_w^4 - T_s^4) D_h k^{-1} (T_w - T_{aw})^{-1} - h_c (T_w - T_s) k^{-1} (T_w - T_{aw})^{-1} D_h \quad (ง.4)$$

เมื่อ	D_h	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อเจ็ท, m
	I	คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นสเตนเลส, A
	V	คือ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นสเตนเลส, V
	A	คือ พื้นที่ของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน, m^2
	T_w	คือ อุณหภูมิบนพื้นผิวที่มีการถ่ายพลักซ์ความร้อน, $^{\circ}C$
	T_{aw}	คือ อุณหภูมิบนพื้นผิวที่ไม่มีการถ่ายพลักซ์ความร้อน, $^{\circ}C$
	T_s	คือ อุณหภูมิภายในห้องทดลอง, $^{\circ}C$
	h_c	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ, $W/m^2 \cdot ^{\circ}C$
	k	คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเจ็ท, $W/m^2 \cdot ^{\circ}C$
	ϵ	คือ ค่าการแผ่รังสีความร้อน (Emissivity) , -
	σ	คือ ค่าคงที่ของสตีเฟนและโบลซ์แมน (Stefan and boltzmann) ,

$W/m^2 \cdot K^4$

ง.1. การคำนวณค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty Analysis)

ง.1.1. ค่าความไม่แน่นอนของกระแสไฟฟ้า

การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของกระแสไฟฟ้าใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ

$$\frac{d(Nu)}{dI} = \frac{V \cdot D_h}{kA(T_w - T_{aw})} \quad (ง.5)$$

ง.1.2. ค่าความไม่แน่นอนของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นสแตนเลส

การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสแตนเลสใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ

$$\frac{d(Nu)}{dV} = \frac{I \cdot D_h}{kA(T_w - T_{aw})} \quad (ง.6)$$

ง.1.3. ค่าความไม่แน่นอนของสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ

การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ

$$\frac{d(Nu)}{dk} = \frac{-I \cdot V \cdot D}{k^2 \cdot A \cdot (T_w - T_{aw})} + \frac{\alpha(T_w^4 - T_s^4)D_h}{k^2(T_w - T_{aw})} + \frac{h_c(T_w - T_s)D_h}{k^2(T_w - T_{aw})} \quad (ง.7)$$

ง.1.4. ค่าความไม่แน่นอนของอุณหภูมิบนพื้นผิวที่มีการถ่ายพลักซ์ความร้อน

การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของอุณหภูมิบนพื้นผิวที่วัดที่มีการถ่ายพลักซ์ความร้อนใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ

$$\frac{d(Nu)}{dT_w} = \frac{-IVD_h}{k \cdot A \cdot (T_w - T_{aw})^2} + \frac{\alpha(T_w^4 - T_s^4)D_h}{k(T_w - T_{aw})^2} + \frac{4T_w^3}{(T_w - T_{aw})} - \frac{h_c D_h}{k(T_w - T_{aw})} + \frac{h_c(T_w - T_s)D_h}{k(T_w - T_{aw})^2} \quad (ง.8)$$

ง.1.5. ค่าความไม่แน่นอนของอุณหภูมิบนพื้นผิวที่ไม่มีการถ่ายพลักซ์ความร้อน

การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของอุณหภูมิบนพื้นผิวที่ไม่มีการถ่ายพลักซ์ความร้อนใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ

$$\frac{d(Nu)}{dT_{aw}} = \frac{IVD}{k \cdot A \cdot (T_w - T_{aw})^2} - \frac{\alpha(T_w^4 - T_s^4)D_h}{k(T_w - T_{aw})^2} + \frac{h_c(T_w - T_s)D_h}{k(T_w - T_{aw})^2} \quad (ง.9)$$

ง.1.6. ค่าความไม่แน่นอนของอุณหภูมิภายในห้องทดลอง

การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของอุณหภูมิภายในห้องทดลองใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ

$$\frac{d(Nu)}{dT_s} = \frac{4\sigma T_s^3 D_h}{k(T_w - T_{aw})} + \frac{h_c D_h}{k(T_w - T_{aw})} \quad (\text{ง.10})$$

ง.2. การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของนัสเซลต์นัมเบอร์

การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของนัสเซลต์นัมเบอร์ (Nusselt Number) ทำได้โดยการรวมค่าความไม่แน่นอนของตัวแปรทุกตัวเข้าด้วยกัน สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Nu = \frac{d(Nu)}{dI} + \frac{d(Nu)}{dV} + \frac{d(Nu)}{dk} + \frac{d(Nu)}{dT_w} + \frac{d(Nu)}{dT_{aw}} + \frac{d(Nu)}{dT_s} \quad (\text{ง.11})$$

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นาย วัชระ มุสิกะ		
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5610120029		
วุฒิการศึกษา		ชื่อสถาบัน	ปีที่
วุฒิ		มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2555
ปริญญาตรี			

ทุนการศึกษา

ทุนเกียรติบัตรบัณฑิตศึกษา

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

(1) ผลงานการประชุมวิชาการ (Conference paper)

Musika, W., Wae-hayee, M., Vessakosol, P. and Nuntadusit, C., (2014), "Investigation of Flow and Heat Transfer Characteristics of Radial Impinging Jet", (The 25th International Symposium on Transport Phenomena 5-7 November 2014, Krabi, Thailand)

วัชระ มุสิกะ, มัทธาร์ แวหะยี่, ภาสกร เวสสะโกศล และชยุต นันทดุสิต, 2558 ลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนแบบไหลตกระทบในแนวรัศมี, การประชุมวิชาการเรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 14, 19-20 มีนาคม 2558, ม.เชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่

(2) บทความวิชาการ (Journal paper)

Musika, W., Wae-hayee, M., Vessakosol, P., Niyomwas, B. and Nuntadusit, C., (2014), "Investigation of Flow and Heat Transfer Characteristics of Annular Impinging Jet", Advanced Materials Research, Vol. 931-932, pp. 1223-1227. (The 5th KKU International Engineering Conference 2014 (KKU-IENC 2014), March 27-29, Khon Kaen, Thailand)