



การศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศ
Study of Heat Transfer Characteristics of Impinging Bubbly Jet

ฉัตรวัสส์ อรุณรุจิพันธ์
Chattawat Aroonrujiphan

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

2563

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศ
Study of Heat Transfer Characteristics of Impinging Bubbly Jet

ฉัตว์สส์ อรุณรุจิพันธ์
Chattawat Aroonrujiphan

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

2563

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศ
 ผู้เขียน นายฉัตรวัศ อรุณรุจิพันธ์
 สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทคุสิต)

(รองศาสตราจารย์ ดร.ประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์)

.....กรรมการ

(ดร.กิตตินันท์ มลิวรรณ)

.....กรรมการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทคุสิต)

.....

.....กรรมการ

(ดร.มัทตาร์ แวหะยี)

(ดร.มัทตาร์ แวหะยี)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
 ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
 วิศวกรรมเครื่องกล

.....
 (ศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟ้ารุ่งแสง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดุสิต)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายฉัตรวิมล อรุณรุจิพันธ์)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายฉัตรวัสส์ อรุณรุจิพันธ์)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสม ฟองอากาศ
ผู้เขียน	นายฉัตรวิทย์ อรุณรุจิพันธ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2562

บทคัดย่อ

การจัดการพลังงานความร้อนถือว่าเป็นสิ่งสำคัญสำหรับชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่มีการมีผลผลิตความร้อนส่วนเกินออกมาขณะใช้งาน ซึ่งการประยุกต์ใช้เจ็ทของเหลวพุ่งชนพื้นผิวเป็นเทคนิคที่นิยมกันอย่างมากในปัจจุบัน ซึ่งจะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ค่อนข้างสูงในบริเวณที่เจ็ทของเหลวพุ่งชนและสามารถกำจัดความร้อนบนพื้นผิวได้อย่างรวดเร็ว ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะใช้ของไหลสองสถานะที่เป็นเจ็ทน้ำผสมฟองอากาศในการเพิ่มความสามารถในการระบายความร้อน

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยของไหลเจ็ทที่เป็นการไหลแบบสองสถานะระหว่างน้ำและอากาศ ซึ่งสามารถแบ่งงานวิจัยออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งเป็นการศึกษาพฤติกรรมการไหลภายในท่อเจ็ทและพฤติกรรมการไหลของเจ็ทที่มีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชน ในการทดลองใช้หัวฉีดแบบท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D=9.5$ mm และกำหนดค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของน้ำที่ $Re_w=24,000$ และศึกษาผลของตัวแปรสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ $\beta=0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$ และ 0.7 และระยะพุ่งชนที่ $L=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ และส่วนที่สองเป็นการศึกษาผลของขนาดของฟองอากาศที่มีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศระดับไมครอน ในการทดลองฟองอากาศระดับไมครอนสร้างโดยใช้ถังความดันในการอัดอากาศให้ละลายในน้ำแล้วลดความดันทันที ในการทดลองได้กำหนดค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของน้ำที่ $Re_w=16,000$ และทดสอบเงื่อนไขที่ความดันภายในถังที่ 3, 4, 5 และ 6 bar และระยะพุ่งชน $L=1D, 2D, 4D$ และ $8D$

สำหรับการศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำผสมฟองอากาศได้ใช้กล้องถ่ายภาพความเร็วสูงในการบันทึกภาพการไหลภายในท่อเจ็ทและการไหลของเจ็ทก่อนพุ่งชนพื้นผิว ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิวได้ใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนอินฟราเรดในการบันทึกการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน และคำนวณหาค่าการกระจายตัวเลขนัสเซิลท์บนพื้นผิว และฟองอากาศขนาดไมครอนวัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลอลบันทึกภาพและใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพในการหาขนาดของฟองอากาศ

สำหรับพฤติกรรมการไหลแบบสองสถานะภายในท่อเจ็ท ในกรณีที่เปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศ พบว่า อัตราการไหลน้ำที่เงื่อนไข $Re_w=8,400$ ถึง $21,400$ มีการไหล 2 รูปแบบได้แก่ การไหลที่รูปร่างฟองอากาศเป็นแบบหัวกระสุน (Slug flow) และการไหลที่กลุ่มฟองอากาศมีลักษณะปั่นป่วน (Churn flow) และกรณีที่ $Re_w=24,000$ ถึง $26,700$ มีการไหล 3 รูปแบบ ได้แก่ การไหลที่

มีฟองอากาศมีขนาดเล็กผสมอยู่ (Bubbly flow) การไหลที่รูปร่างฟองอากาศเป็นแบบหัวกระสุน (Slug flow) และการไหลที่กลุ่มฟองอากาศมีลักษณะปั่นป่วน (Churn flow) ซึ่งผลลัพธ์นี้จะนำไปสู่การเลือกกรณีศึกษาเจ็ทฟุ้งชนเฉพาะที่อัตราการไหลน้ำมี $Re_w=24,000$ ซึ่งครอบคลุมช่วงพฤติกรรมการไหลภายในท่อทั้ง 3 รูปแบบ

สำหรับพฤติกรรมการไหลของเจ็ทฟุ้งชนที่เงื่อนไข $\beta=0.1$ พบว่า กลุ่มฟองอากาศที่ปะทะกับพื้นผิวจะมีลักษณะเหมือนกับภายในท่อเจ็ท สำหรับที่เงื่อนไข $\beta=0.2$ และ 0.3 พบว่า พฤติกรรมของฟองอากาศที่ใกล้ปากทางออกของท่อเจ็ทจะมีลักษณะเป็นหัวกระสุน แต่จะเกิดการเชื่อมกันกับน้ำบริเวณโดยรอบและแตกตัวเป็นฟองอากาศขนาดเล็กเข้าฟุ้งชนกับพื้นผิว สำหรับที่เงื่อนไข $\beta=0.4$ และ 0.5 พบว่าพฤติกรรมของฟองอากาศที่ใกล้ปากทางออกของท่อเจ็ทจะเกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนฟองอากาศ ต่อมาจะเกิดการเชื่อมกันกับน้ำบริเวณโดยรอบและจะแตกตัวเป็นกลุ่มก้อนฟองอากาศจำนวนมาก และที่เงื่อนไข $\beta=0.6$ และ 0.7 พบว่าพฤติกรรมของฟองอากาศที่ออกปากทางออกของท่อเจ็ทถึงพื้นผิวฟุ้งชน จะมีลักษณะเป็นลำฟองอากาศที่ขนาดยาวและค่อนข้างต่อเนื่อง โดยบริเวณพื้นผิวที่ปะทะจะถูกปกคลุมด้วยฟิล์มอากาศโดยส่วนใหญ่ แต่จะไม่พบในกรณีที่ระยะฟุ้งชนสูงที่ $L=10D$

สำหรับการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทฟุ้งชนที่ระยะฟุ้งชนต่าง ๆ พบว่า ฟองอากาศมีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว เมื่อเทียบกับกรณีที่ใช้เจ็ทของไหลที่เป็นน้ำ เนื่องจากฟองอากาศมีส่วนช่วยในการเพิ่มระดับความปั่นป่วนในการไหลของเจ็ท และฟองอากาศเมื่อไหลบนพื้นผิวฟุ้งชนเกิดรบกวนชั้นขอบเขตความร้อนทั่วพื้นผิว โดยในกรณีที่ระยะฟุ้งชน $L=4D$ และค่า $\beta=0.3$ จะให้ค่าประสิทธิภาพถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงที่สุด ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนได้ถึง 47% เมื่อเทียบกับการใช้เจ็ทน้ำ แต่การเพิ่มสัดส่วน β ที่สูง อาจส่งผลให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทฟุ้งชนลดลงได้ เมื่อเทียบกับการใช้เจ็ทน้ำ เนื่องจากปริมาณฟองอากาศที่เพิ่มสูงขึ้น ก่อให้เกิดการรวมตัวของฟองอากาศเป็นฟิล์มอากาศปกคลุมพื้นผิว

สำหรับการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทน้ำผสมฟองอากาศระดับไมครอน พบว่าการเพิ่มความดันที่ถังความที่ 3, 4, 5 และ 6 bar มีผลทำให้ขนาดของฟองอากาศมีขนาดเล็กลง โดยมีค่าเฉลี่ยขนาดของฟองอากาศที่ 117, 105, 98 และ 97 ไมครอน ตามลำดับ แต่พบว่าการใช้น้ำผสมฟองอากาศระดับไมครอน ไม่สามารถเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้ เนื่องจากฟองระดับไมครอนไม่สามารถที่จะเพิ่มระดับความปั่นป่วนและรบกวนชั้นขอบเขตความร้อนได้สำหรับในงานวิจัยครั้งนี้

Thesis Title Study of Heat Transfer Characteristics of Impinging Bubbly Jet
Author Chattawat Aroonrujiphan
Major Program Mechanical Engineering
Academic Year 2019

ABSTRACT

Thermal energy management has importance for electronic devices. These have continuously produced overheated while it is operated. In the present, the application of liquid jet impingement is widely utilized. This technique has a high cooling rate in the impingement region and can eliminate heat rapidly. Therefore, this research has an idea using two-phase flow which is air mixed with water jet for heat transfer enhancement for cooling the surface.

This objective of the research is to study the flow and heat transfer characteristics of impinging two-phase jet flow which has mixed between water and air. This research can be divided into two parts; the first part focused on flow characteristics in the pipe nozzle and jet flow, which affected to the heat transfer on the impingement surface. This study used the pipe nozzle which has an inner diameter (D) of about 9.5 mm. Reynolds number of water (Re_w) was fixed at 24,000. The effect of volumetric fraction was investigated at $\beta = 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6,$ and 0.7 , respectively. Furthermore, the nozzle to impingement plate distances was studied at $L = 2D, 4D, 6D, 8D,$ and $10D$. The second part focused on the effect of bubble size on heat transfer characteristics of impinging jet for water jet mixing with air microbubble. The air microbubble was generated by compressing air and dissolving in the water pressure tank and then decompressed suddenly. The Reynolds number of water (Re_w) was fixed at 16,000, and the gage pressure in the pressure tank was varied at 3, 4, 5, and 6 bars. The nozzle to impingement surface distance was investigated at $L = 1D, 2D, 4D,$ and $8D$.

For the study of flow characteristics of the air-water jet, the high-speed camera was applied to record the flow in the pipe nozzle and the jet flow before impingement. For the study the heat transfer characteristics on the impingement surface, the thermal infrared camera was used to record the temperature distribution, and the Nusselt number on the impingement surface was then calculated. The microbubble was recorded with a digital microscope camera, and image processing method was then used to evaluate the bubble size.

For two-phase flow characteristics in the pipe nozzle with increase the flow rate of air, it was found that the water flow rate at Reynolds number of water between $Re_w = 8,400$ to $21,400$ showed two types of flow patterns: the air bubble like a bullet shape or slug flow, and the group of air bubbles characterized with turbulence or churn flow. Moreover, the case of water flow rate between $Re_w = 24,000$ and $26,700$ showed three types of flow patterns: water flows with small bubbles or bubbly flow, slug flow and churn flow when increasing air flow rate. These results led to selection for one case of water flow rate at $Re_w = 24,000$, which covering all types of flow patterns for studying the effect of air flow rate on heat transfer characteristics of an impinging jet.

For the flow characteristic of the impinging jet at volumetric fraction $\beta = 0.1$, it found that the air bubbles that were impinging on the surface were similar to bubbly flow in the pipe nozzle. For volumetric fraction at $\beta = 0.2$ and 0.3 , it found that the behavior of the bubble that near the exit nozzle was slug flow, and when this bubble was interacted by shearing with the surrounding water and break down to some small bubbles. For volumetric fraction at $\beta = 0.4$ and 0.5 , it found that the behavior of the bubbles that were near the exit nozzle was a cloud of the bubble or churn flow, and then it was sheared by the surrounding water and broken down to some small bubbles. For volumetric fraction at $\beta = 0.6$ and 0.7 , it found that the small bubbles appeared near the exit nozzle and extended to the impingement surface. This resulted in the impingement surface mostly covered by the gas phase. However, the behavior does not observe for the case of $L=10D$.

For the study of heat transfer of impinging jet at all jet impingement distance, the air bubbles in impinging jet had affected significantly on heat transfer enhancement when compared to the case of a water jet. This is due to the bubbles increasing the turbulent intensity in water jet and disturbing the thermal boundary layer overall the impingement surface. Particularly, the case of volumetric fraction $\beta = 0.3$ and impingement distance $L=4D$ gives the highest average Nusselt number on the surface. It can enhance heat transfer about 47% when compared case of impinging water jet. However, when volumetric fraction increased, it may also decrease the heat transfer of the impinging jet when compared with impinging water jet. Because the quantity of air increased in the jet flow will generate the air film on the impingement surface.

For heat transfer characteristics of the impinging jet of water with microbubble, it was found that when increasing the pressure to 3, 4, 5, and 6 bars, the average diameter of microbubble was decreased to 117, 105, 98, and 97 microns, respectively. However, the water mixed with microbubbles cannot contribute to enhancing heat transfer on the surface. This may due to the microbubble cannot increase the turbulence intensity and disturb to the thermal boundary layer on the surface for this research.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดุสิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่คอยเสนอแนะแนวทางและเสียสละเวลาในการดำเนินการทำวิจัยอย่างใกล้ชิด รวมถึงการช่วยตรวจสอบ แก้ไขวิทยานิพนธ์จนถูกต้องสมบูรณ์ ขอขอบคุณ ดร.กิตตินันท์ มลิวรรณ ดร.มักตาร์ แวหะยี และรองศาสตราจารย์ ดร. ประสาน สติชัยเรืองศักดิ์ ที่ให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ตลอดจนขอขอบพระคุณอาจารย์ บุคลากรภายในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวในที่นี้ ที่มีส่วนช่วยให้การทำวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วย

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้สนับสนุนทุนการทำวิจัย และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ได้เอื้อเฟื้อทุนการศึกษาและสถานที่ในการทำวิจัยครั้งนี้

ฉัตรวัสส์ อรุณรุจิพันธ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(10)
สารบัญ	(11)
รายการตาราง	(14)
รายการภาพประกอบ	(15)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(22)
บทที่1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 โครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระ	4
2.2 โครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชน	5
2.3 การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิว	6
2.4 ชนิดของเจ็ทพุ่งชน	7
2.5 ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิว	11
2.6 การไหลแบบสองสถานะระหว่างของเหลวและแก๊ส (Two-phase flow)	13
2.7 ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลแบบสองสถานะระหว่างของเหลวและแก๊ส	15
2.8. การตรวจสอบเอกสาร	17
2.8.1 สิทธิบัตรที่เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้งานเจ็ทของไหลพุ่งชน	17
2.8.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของฟองอากาศขณะปะทะแผ่นพื้นผิว	20
2.8.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศ	24
บทที่3 ชุดทดลองและขั้นตอนการวิจัย	31
3.1 โมเดลของเจ็ทของไหลพุ่งชน	31
3.2 รายละเอียดของชุดทดลอง	32
3.2.1 ชุดทดสอบที่ใช้ในการทดลอง (Test section)	32

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.2 ชุดทดลองสำหรับการไหลแบบสองสถานะที่เป็นน้ำผสมร่วมกับอากาศ	33
3.2.3 ชุดทดลองสำหรับการไหลแบบสองสถานะที่เป็นน้ำผสมฟองอากาศ ระดับไมครอน (Microbubble)	34
3.3 การศึกษาพฤติกรรมการไหลของเจ็ทฟุ้งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศภายใน ท่อเจ็ทและขณะออกจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่ฟุ้งชน	36
3.3.1 รายละเอียดชุดทดลอง	36
3.3.2 วิธีการทดลอง	36
3.4 การศึกษาการวัดขนาดของฟองอากาศที่ใช้ในเจ็ทฟุ้งชนด้วยน้ำผสม ฟองอากาศระดับไมครอน	38
3.4.1 รายละเอียดชุดทดลอง	38
3.4.2 วิธีการทดลอง	39
3.5 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทฟุ้งชน	40
3.5.1 รายละเอียดชุดทดลอง	40
3.5.2 วิธีการทดลอง	41
3.5.3 เงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทฟุ้งชนด้วยน้ำ ผสมร่วมกับอากาศ	44
3.5.4 เงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทฟุ้งชนด้วยน้ำ ผสมฟองอากาศระดับไมครอน	45
บทที่ 4 ผลการศึกษา	46
4.1 การไหลแบบสองสถานะที่เป็นน้ำผสมร่วมกับอากาศ	46
4.1.1 ผลการศึกษาพฤติกรรมการไหลของเจ็ทฟุ้งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับ อากาศภายในท่อเจ็ท	46
4.1.2 ผลการศึกษาพฤติกรรมการไหลของเจ็ทฟุ้งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับ อากาศขณะออกจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่ฟุ้งชน	52
4.1.3 ผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทฟุ้งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับ อากาศ	66
4.2 การไหลแบบสองสถานะที่เป็นน้ำผสมร่วมกับฟองอากาศระดับไมครอน	89
4.2.1 ผลการศึกษาการวัดขนาดของฟองอากาศที่ใช้ในเจ็ทฟุ้งชนด้วยน้ำผสม ฟองอากาศระดับไมครอน	89
4.2.2 ผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทฟุ้งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับ ฟองอากาศระดับไมครอน	91

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	98
5.1 สรุปผลการทดลอง	98
5.1.1 สรุปผลการทดลองสำหรับการไหลแบบสองสถานะที่เป็นน้ำผสม ร่วมกับอากาศ	98
5.1.2 สรุปผลการทดลองสำหรับการไหลแบบสองสถานะที่เป็นน้ำผสม ร่วมกับฟองอากาศระดับไมครอน	99
5.2 ข้อเสนอแนะ	100
บรรณานุกรม	101
ภาคผนวก ก ตัวอย่างวิธีการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์หนัมน้ำเฉพาะจุดบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่ง ชน	104
ภาคผนวก ข การคำนวณหาความไม่แน่นอนของผลลัพธ์จากการวัดการถ่ายเทความร้อน ของเจ็ทพุ่งชนโดยการใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน	119
ภาคผนวก ค บทความสำหรับเผยแพร่ 1	115
ภาคผนวก ง บทความสำหรับเผยแพร่ 2	123
ภาคผนวก จ บทความสำหรับเผยแพร่ 3	135
ประวัติผู้เขียน	149

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 3.1	ค่าการละลายของอากาศในน้ำที่ความดันต่าง ๆ	35
ตารางที่ 3.2	เงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมในการไหลภายในท่อเจ็ท	37
ตารางที่ 3.3	เงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศ	38
ตารางที่ 3.4	เงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาการวัดขนาดของฟองอากาศที่ใช้ในเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศระดับไมครอน	40
ตารางที่ 3.5	ค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำและค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรอากาศที่ใช้ในการผสมบริเวณท่อเวนทูรี	44
ตารางที่ 3.6	เงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศ	44
ตารางที่ 3.7	เงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับฟองอากาศระดับไมครอน	45

รายการภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
รูปที่ 1.1	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสำหรับการระบายความร้อนด้วยวิธีต่าง ๆ	1
รูปที่ 2.1	โครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระ	4
รูปที่ 2.2	โครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชน	5
รูปที่ 2.3	กลไกการพาความร้อน	6
รูปที่ 2.4	กลไกการพาความร้อนโดยวิธีการใช้เจ็ทของไหลพุ่งชนพื้นผิว	7
รูปที่ 2.5	เจ็ทพุ่งชนแบบ Free-surface	8
รูปที่ 2.6	เจ็ทพุ่งชนแบบ Submerged	9
รูปที่ 2.7	เปรียบเทียบลักษณะการไหลของเจ็ทของไหลพุ่งชนแบบ Free-surface และ Submerged	9
รูปที่ 2.8	โปรไฟล์ความเร็วของเจ็ทของไหลพุ่งชน ที่เรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าเท่ากับ 540	10
รูปที่ 2.9	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะจุดตามแนวรัศมีของพื้นผิวพุ่งชนตามระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชนที่ค่าต่าง ๆ	11
รูปที่ 2.10	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของนัสเซิลท์นัมเบอร์และอัตราการไหลของของไหล	12
รูปที่ 2.11	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยนัสเซิลท์นัมเบอร์กับเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยเปรียบเทียบค่าเข้มข้นของสารละลายอนุภาคนาโนที่ค่าต่าง ๆ	13
รูปที่ 2.12	แผ่นพุ่งชนที่ใช้เจ็ทของไหลนาโน	13
รูปที่ 2.13	ลักษณะการไหลแบบสองสถานะของท่อตรงในแนวตั้ง	14
รูปที่ 2.14	ลักษณะการไหลแบบสองสถานะของท่อตรงในแนวนอน	15
รูปที่ 2.15	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วผิวของของเหลวและความเร็วผิวของแก๊สที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลแบบสองสถานะภายในท่อ	16
รูปที่ 2.16	ระบบระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยใช้เจ็ทของเหลวพุ่งชน	17
รูปที่ 2.17	ระบบระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยใช้หัวเจ็ทระดับไมครอน	17
รูปที่ 2.18	ระบบระบายความร้อนในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในระบบคอมพิวเตอร์โดยใช้เจ็ทของเหลวพุ่งชน	18
รูปที่ 2.19	การเดือดบนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในระบบคอมพิวเตอร์โดยการใช้เจ็ทของเหลวพุ่งชน	18
รูปที่ 2.20	ระบบระบายความร้อนในแผงระบายความร้อนโดยใช้เจ็ทของเหลวพุ่งชน	19
รูปที่ 2.21	ช่องทางการไหลของของเหลวในระบบระบายความร้อนของเจ็ทพุ่งชน	19

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 2.22	แผนภาพชุดทดลอง	20
รูปที่ 2.23	พฤติกรรมการณ์เคลื่อนที่ของฟองอากาศที่เวลาใด	21
รูปที่ 2.24	พล็อตการพาความร้อนบนพื้นผิวที่เวลาใด	21
รูปที่ 2.25	อุณหภูมิบนพื้นผิวในการทดลองเทียบกับอุณหภูมิบนพื้นผิวก่อนการทดลองที่เวลาใด	21
รูปที่ 2.26	รูปร่างฟองอากาศและการเคลื่อนที่ของของไหลบริเวณรอบฟองอากาศ	22
รูปที่ 2.27	พล็อตการพาความร้อนที่เวลา 10 ms หลังจากฟองอากาศปะทะพื้นผิว	22
รูปที่ 2.28	พล็อตการพาความร้อนในช่วงเวลา 0-20 ms หลังจากฟองอากาศปะทะพื้นผิว	23
รูปที่ 2.29	พล็อตการพาความร้อนที่เวลา 30 ms หลังจากฟองอากาศปะทะพื้นผิว	23
รูปที่ 2.30	พล็อตการพาความร้อนในช่วงเวลา 20-40 ms หลังจากฟองอากาศปะทะพื้นผิว	23
รูปที่ 2.31	แสดงชุดทดลอง	24
รูปที่ 2.32	ลักษณะการไหลภายในท่อเมื่อสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมต่างกัน	25
รูปที่ 2.33	ลักษณะการไหลที่ปะทะพื้นผิวเมื่อสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมต่างกัน	25
รูปที่ 2.34	ความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซลท์นัมเบอร์ที่ Stagnation point กับสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม	26
รูปที่ 2.35	ชุดทดลอง	26
รูปที่ 2.36	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของนัสเซลท์นัมเบอร์ที่ $r/D=5$ กับค่า Weber number	27
รูปที่ 2.37	ความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซลท์นัมเบอร์ตามตำแหน่งต่าง ๆ ที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของอากาศมีค่าต่างกัน	27
รูปที่ 2.38	ความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซลท์นัมเบอร์ที่ Stagnation point กับสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม	28
รูปที่ 2.39	ชุดทดลองการวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวที่ปะทะ	29
รูปที่ 2.40	ชุดทดลองการวัดความดันบนพื้นผิวที่ปะทะ	29

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 2.41	ขนาดของ Hydraulic jump ที่ (ก) $H/d=0.02$ และ (ข) $H/d=0.51$	29
รูปที่ 2.42	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของ Hydraulic jump กับระยะห่างระหว่างเจ็ทกับพื้นผิวปะทะ ที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ค่าต่าง ๆ	30
รูปที่ 3.1	โมเดลเจ็ทของไหลพุ่งชน	31
รูปที่ 3.2	แผนผังส่วนทดสอบ	32
รูปที่ 3.3	แผนผังชุดทดลองสำหรับการไหลแบบสองสถานะที่เป็นน้ำผสมร่วมกับอากาศ	33
รูปที่ 3.4	ท่อเวนทูรี (Venturi tube)	34
รูปที่ 3.5	แผนผังชุดทดลองสำหรับการไหลแบบสองสถานะที่เป็นน้ำผสมพองอากาศระดับไมครอน	34
รูปที่ 3.6	ถังความดัน (Pressure tank)	35
รูปที่ 3.7	แผนภาพชุดทดสอบสำหรับการศึกษาพฤติกรรมการไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศภายในท่อเจ็ทและขณะออกจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชน	36
รูปที่ 3.8	แผนภาพชุดทดสอบสำหรับการศึกษารวดขนาดของพองอากาศที่ใช้ในเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมพองอากาศระดับไมครอน	39
รูปที่ 3.9	ตัวอย่างการคำนวณหาขนาดพองอากาศด้วยการวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม MATLAB	40
รูปที่ 3.10	แผนภาพชุดทดสอบสำหรับการศึกษารวดขนาดของเจ็ทพุ่งชน	41
รูปที่ 4.1	พฤติกรรมการไหลภายในท่อเจ็ทกรณีที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์ของน้ำมีค่าเท่ากับ 8,400 (หรืออัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเท่ากับ 3 L/min)	47
รูปที่ 4.2	พฤติกรรมการไหลภายในท่อเจ็ทกรณีที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์ของน้ำมีค่าเท่ากับ 10,700 (หรืออัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเท่ากับ 4 L/min)	47
รูปที่ 4.3	พฤติกรรมการไหลภายในท่อเจ็ทกรณีที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์ของน้ำมีค่าเท่ากับ 13,400 (หรืออัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเท่ากับ 5 L/min)	48
รูปที่ 4.4	พฤติกรรมการไหลภายในท่อเจ็ทกรณีที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์ของน้ำมีค่าเท่ากับ 16,000 (หรืออัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเท่ากับ 6 L/min)	48
รูปที่ 4.5	พฤติกรรมการไหลภายในท่อเจ็ทกรณีที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์ของน้ำมีค่าเท่ากับ 18,700 (หรืออัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเท่ากับ 7 L/min)	49
รูปที่ 4.6	พฤติกรรมการไหลภายในท่อเจ็ทกรณีที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์ของน้ำมีค่าเท่ากับ 21,400 (หรืออัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเท่ากับ 8 L/min)	49

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 4.7	พฤติกรรมกลไกไหลภายในท่อเจ็ทกรณีที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่าเท่ากับ 24,000 (หรืออัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเท่ากับ 9 L/min)	50
รูปที่ 4.8	พฤติกรรมกลไกไหลภายในท่อเจ็ทกรณีที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่าเท่ากับ 26,700 (หรืออัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเท่ากับ 10 L/min)	50
รูปที่ 4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วผิวของน้ำและความเร็วผิวของอากาศที่มีผลต่อพฤติกรรมกลไกไหลแบบสองสถานะภายในท่อต่อเจ็ท	51
รูปที่ 4.10	พฤติกรรมกลไกไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศในกรณีที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะพุ่งชนมีค่าเท่ากับ $L=2D$	53
รูปที่ 4.11	พฤติกรรมกลไกไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศในกรณีที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะพุ่งชนมีค่าเท่ากับ $L=4D$	54
รูปที่ 4.12	พฤติกรรมกลไกไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศในกรณีที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะพุ่งชนมีค่าเท่ากับ $L=6D$	55
รูปที่ 4.13	พฤติกรรมกลไกไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศในกรณีที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะพุ่งชนมีค่าเท่ากับ $L=8D$	57
รูปที่ 4.14	พฤติกรรมกลไกไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศในกรณีที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะพุ่งชนมีค่าเท่ากับ $L=10D$	60
รูปที่ 4.15	พฤติกรรมกลไกไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศในกรณีที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ $\beta = 0.1$	63
รูปที่ 4.16	พฤติกรรมกลไกไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศในกรณีที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ $\beta = 0.4$	64
รูปที่ 4.17	พฤติกรรมกลไกไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศในกรณีที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ $\beta = 0.7$	65
รูปที่ 4.18	การกระจายนัสเซลล์ท์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะพุ่งชน $L=2D$	67
รูปที่ 4.19	การกระจายนัสเซลล์ท์นัมเบอร์เฉพาะจุดในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในตำแหน่ง $Y/D=0$ สำหรับเรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะพุ่งชน $L=2D$	68

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.32	80
รูปที่ 4.33	81
รูปที่ 4.34	83
รูปที่ 4.35	83
รูปที่ 4.36	84
รูปที่ 4.37	84
รูปที่ 4.38	88
รูปที่ 4.39	88
รูปที่ 4.40	89
รูปที่ 4.41	90
รูปที่ 4.42	90
รูปที่ 4.43	92
รูปที่ 4.44	92
รูปที่ 4.45	93

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.46 การกระจายสเกลที่นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=16,000$ ที่ระยะพุ่งชน $L=8D$	93
รูปที่ 4.47 การกระจายสเกลที่นัมเบอร์เฉพาะจุดในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในตำแหน่ง $Y/D=0$ สำหรับเรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=16,000$ ที่ระยะพุ่งชน $L=1D$	94
รูปที่ 4.48 การกระจายสเกลที่นัมเบอร์เฉพาะจุดในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในตำแหน่ง $Y/D=0$ สำหรับเรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=16,000$ ที่ระยะพุ่งชน $L=2D$	94
รูปที่ 4.49 การกระจายสเกลที่นัมเบอร์เฉพาะจุดในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในตำแหน่ง $Y/D=0$ สำหรับเรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=16,000$ ที่ระยะพุ่งชน $L=4D$	95
รูปที่ 4.50 การกระจายสเกลที่นัมเบอร์เฉพาะจุดในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในตำแหน่ง $Y/D=0$ สำหรับเรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=16,000$ ที่ระยะพุ่งชน $L=8D$	95
รูปที่ 4.51 ค่านัสเชิลที่นัมเบอร์เฉลี่ยในช่วง $r/D \leq 1$, $r/D \leq 2$ และ $r/D \leq 3$ ตามลำดับที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=16,000$ ที่ระยะพุ่งชน $L=1D$	96
รูปที่ 4.52 ค่านัสเชิลที่นัมเบอร์เฉลี่ยในช่วง $r/D \leq 1$, $r/D \leq 2$ และ $r/D \leq 3$ ตามลำดับที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=16,000$ ที่ระยะพุ่งชน $L=2D$	96
รูปที่ 4.53 ค่านัสเชิลที่นัมเบอร์เฉลี่ยในช่วง $r/D \leq 1$, $r/D \leq 2$ และ $r/D \leq 3$ ตามลำดับที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=16,000$ ที่ระยะพุ่งชน $L=4D$	97
รูปที่ 4.54 ค่านัสเชิลที่นัมเบอร์เฉลี่ยในช่วง $r/D \leq 1$, $r/D \leq 2$ และ $r/D \leq 3$ ตามลำดับที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=16,000$ ที่ระยะพุ่งชน $L=8D$	97

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

Re_w	คือ	เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของน้ำ
D	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเจ็ท (m)
β	คือ	สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม
\dot{Q}_a	คือ	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ (L/min)
\dot{Q}_w	คือ	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำ (L/min)
\dot{q}_{input}	คือ	ค่าฟลักซ์ความร้อน (W/m^2)
\dot{q}_{conv}	คือ	ค่าการสูญเสียฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยด้วยวิธีการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (W/m^2)
\dot{q}_{rad}	คือ	ค่าการสูญเสียฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยด้วยวิธีการแผ่รังสีความร้อน (W/m^2)
\dot{q}_{net}	คือ	ค่าฟลักซ์ความร้อนสุทธิเฉลี่ย (W/m^2)
A	คือ	พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนบริเวณที่เจ็ทของไหลพุ่งชนพื้นผิว (m^2)
h_c	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ ($W/m^2.K$)
ε	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัตถุผิวดำ มีค่า 0.95
σ	คือ	ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann มีค่า $5.670373 \times 10^{-8} W/m^2.K^4$
\bar{T}_w	คือ	อุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนขณะมีการจ่ายฟลักซ์ความร้อน ($^{\circ}C$)
\bar{T}_{aw}	คือ	อุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนขณะไม่มีการจ่ายฟลักซ์ความร้อน ($^{\circ}C$)
\bar{T}_{surr}	คือ	อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศโดยรอบ ($^{\circ}C$)
\bar{h}	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ($W/m^2.K$)
\bar{Nu}	คือ	ค่าตัวเลขไรต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิว
j_w	คือ	ความเร็วผิวของน้ำภายในท่อเจ็ท (m/s)
j_a	คือ	ความเร็วผิวของอากาศภายในท่อเจ็ท (m/s)
A_{jet}	คือ	พื้นที่หน้าตัดของท่อเจ็ท (m^2)

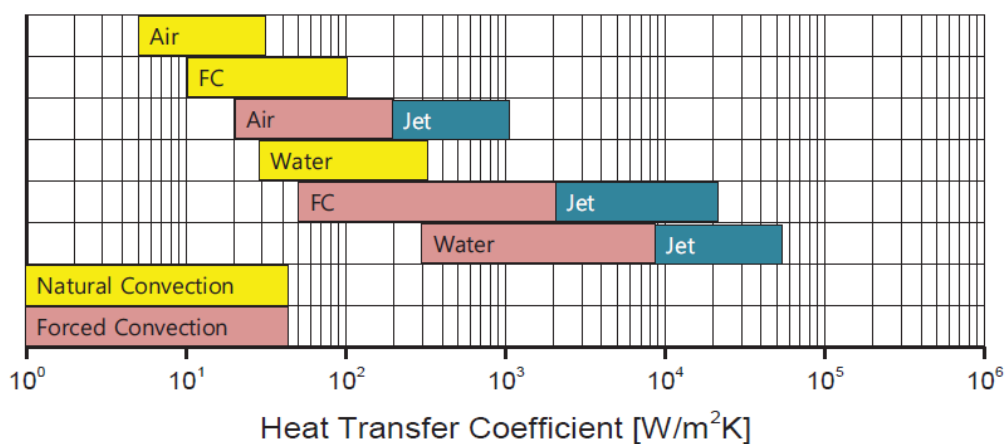
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

โพรเซสเซอร์หรือหน่วยประมวลผลกลางที่ถูกใช้ในคอมพิวเตอร์ มีหน้าที่เป็นศูนย์กลางการทำงานในการประมวลผลข้อมูล โดยในปัจจุบันได้มีการพัฒนาอุปกรณ์นี้กันอย่างต่อเนื่องในด้านการลดขนาดของชิ้นส่วนเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการผลิต แต่ยังคงมีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพในการประมวลผลที่สูงขึ้น เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของมนุษย์ในการทำงาน ถึงแม้ว่าโพรเซสเซอร์จะถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นและมีขนาดเล็กลง แต่ก็ยังพบปัญหาที่เกิดขึ้นในเรื่องของการผลิตความร้อนส่วนเกินบนชิ้นส่วนในขณะใช้งาน ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิของโพรเซสเซอร์สูงขึ้นหรืออาจสูงเกินกว่าสภาวะการทำงาน อาจก่อให้เกิดการลดอายุการใช้งานหรือสร้างความเสียหายแก่ชิ้นส่วนนี้ได้ ดังนั้นการจัดการพลังงานความร้อนส่วนเกินนี้ ถือเป็นสิ่งสำคัญที่จะยืดอายุการใช้งานและหยุดยั้งการสร้าง ความเสียหายแก่ชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์นี้ได้

เจ็ทฟุ้งชนเป็นระบบระบายความร้อนรูปแบบหนึ่งที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมโลหะในกระบวนการชุบโลหะ, อุตสาหกรรมเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบในบริเวณใบพัดกังหันแก๊สที่มีสภาวะการทำงานที่อุณหภูมิสูง และอุตสาหกรรมชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่มีการปลดปล่อยพลังงานความร้อนอย่างต่อเนื่อง เป็นต้น โดยหลักการทำงานของเจ็ทของไหลฟุ้งชนจะมีการบังคับให้ของไหลฟุ้งออกจากหัวฉีดและเข้าปะทะกับพื้นผิวร้อน ซึ่งจะมีการถ่ายโอนพลังงานความร้อนออกจากพื้นผิวให้แก่ของไหลเจ็ท ระบบการระบายความร้อนลักษณะนี้มีจุดเด่นตรงที่มีการถ่ายเทความร้อนได้สูงสุดบริเวณพื้นผิวที่เจ็ทฟุ้งชนและเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการระบายความร้อนแบบรวดเร็วบนพื้นผิว ซึ่งทำให้ระบบเจ็ทของไหลฟุ้งชนเป็นระบบระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงเมื่อเทียบกับระบบระบายความร้อนด้วยวิธีอื่น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสำหรับการระบายความร้อนด้วยวิธีต่าง ๆ [1]

ในปัจจุบันได้มีงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ศึกษาการใช้เจ็ทพุงชนโดยใช้น้ำเป็นตัวกลางในการระบายความร้อน เนื่องจากน้ำมีค่าการนำความร้อนที่สูงเมื่อเทียบกับการใช้อากาศเป็นของไหล จึงทำให้เจ็ทพุงชนที่มีน้ำเป็นของไหลมีประสิทธิภาพในการระบายความร้อนสูง ซึ่งต่อมานักวิจัยหลายคนได้พัฒนาการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของการใช้เจ็ทพุงชนที่มีน้ำเป็นของไหล โดยการเติมสารอนุภาคนาโนลงภายในน้ำ เพื่อเพิ่มค่าการนำความร้อนของของไหลให้สูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าการใช้น้ำเป็นของไหล แต่การใช้เจ็ทพุงชนโดยการเติมสารอนุภาคนาโนภายในน้ำ จะก่อให้เกิดการสะสมตะกอนรวมตัวกันบริเวณผิวที่เจ็ทพุงชนเป็นผลให้ลดความสามารถในการถ่ายเทความร้อน อีกทั้งระบบการทำงานจำเป็นต้องใช้พลังงานที่สูง

ในงานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะใช้ของไหลเจ็ทที่เป็นน้ำผสมร่วมกับอากาศ โดยเมื่อของไหลที่เป็นอากาศไหลร่วมกับเจ็ทพุงชนที่เป็นน้ำ จะก่อให้เกิดพองอากาศในกระแสการไหลของลำเจ็ทน้ำ และเข้าปะทะกับพื้นผิว ซึ่งช่วยในการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนเมื่อเทียบการใช้เจ็ทพุงชนที่เป็นน้ำ เนื่องจากพองอากาศจะเพิ่มระดับความปั่นป่วนในการไหลของลำเจ็ท อีกทั้งพองอากาศหลังจากไหลปะทะพื้นผิวจะไหลเรียบไปบนพื้นผิวและรบกวนชั้นขอบเขตการไหลของน้ำ แต่อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องมีการศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมในการไหลของเจ็ทพุงชน เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นและสามารถนำข้อมูลพื้นฐานไปประยุกต์ใช้ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- (1) ศึกษาพฤติกรรมการไหลของเจ็ทพุงชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศและน้ำผสมพองอากาศระดับไมครอน
- (2) ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุงชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศและน้ำผสมพองอากาศระดับไมครอน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- (1) ศึกษาและออกแบบระบบเจ็ทที่มีลักษณะเป็นเจ็ทจมอยู่ใต้ผิวน้ำ (Submerged impinging jet) และหัวฉีดมีรูปแบบเป็นท่อเจ็ท (Pipe nozzle) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในท่อเจ็ทเท่ากับ 9.5 mm โดยระดับความลึกของน้ำจากปลายทางออกของท่อเจ็ทถึงพื้นผิวน้ำกำหนดให้คงที่ที่ 190 mm
- (2) ศึกษาพฤติกรรมการไหลของเจ็ทพุงชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศด้วยกล้องความเร็วสูง (High-speed camera)
- (3) ศึกษาการวัดขนาดของพองอากาศในการไหลของเจ็ทพุงชนด้วยน้ำผสมพองอากาศระดับไมครอนด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล (Microscope digital camera)
- (4) ศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมการไหลของเจ็ทน้ำผสมร่วมกับอากาศ สำหรับเรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำที่ 24,000 หรืออัตราการไหลของน้ำที่ 9 ลิตรต่อนาที และสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม (β) ในช่วง 0.0 ถึง 0.7 และระยะพุงชนของเจ็ทที่ $L=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ตามลำดับ

(5) ศึกษาผลของความดันที่ใช้ในการสร้างฟองอากาศที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของ เจ็ทน้ำผสมฟองอากาศระดับไมครอน สำหรับเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของน้ำที่ 16,000 หรืออัตราการไหล ของน้ำที่ 6 ลิตรต่อวินาที สำหรับความดันที่ใช้ในการสร้างฟองอากาศที่ 3, 4, 5 และ 6 bar ตามลำดับ และระยะฟุ้งชนของเจ็ทที่ $L=1D, 2D, 4D$ และ $8D$ ตามลำดับ

(6) ศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทฟุ้งชนบนพื้นผิวที่เรียบ ในกรณีนี้ของของ ไหลเจ็ทเป็นน้ำผสมร่วมกับอากาศและของไหลเจ็ทเป็นน้ำผสมฟองอากาศระดับไมครอนด้วยกล้อง ถ่ายภาพความร้อน (Infrared thermal imaging camera)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

(1) ได้ทราบถึงผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อลักษณะพฤติกรรมการไหลและการ ถ่ายเทความร้อนของเจ็ทฟุ้งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศ

(2) ได้ทราบถึงผลของการเพิ่มสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับ อัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม (β) ที่เหมาะสมต่อการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนบน พื้นผิวที่เจ็ทฟุ้งชน

(3) ได้ทราบถึงผลของการเพิ่มความดันในการสร้างของไหลเจ็ทที่เป็นน้ำผสมฟองอากาศ ระดับไมครอนที่มีผลกระทบต่อถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทฟุ้งชน

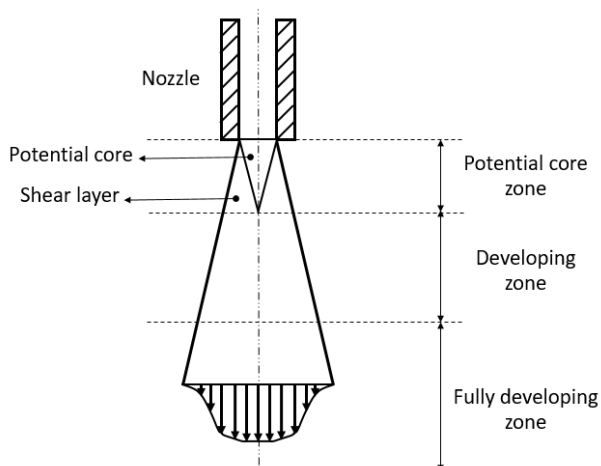
(4) สามารถนำข้อมูลที่ได้ประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการ ระบายความร้อนที่สูง

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

โดยทั่วไปการถ่ายเทความร้อนด้วยการระบายความร้อนแบบเจ็ทพุ่งชน มีปัจจัยหรือตัวแปรที่เกี่ยวข้องที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการพาความร้อนบนพื้นผิว จึงจำเป็นต้องมีการศึกษารูปแบบโครงสร้างพื้นฐานและหลักการในการระบายความร้อนของเจ็ทพุ่งชน ในบทนี้จะอธิบายถึงโครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระ โครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชน หลักการในการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชน ชนิดของเจ็ทพุ่งชน ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชน การไหลแบบสองสถานะระหว่างของเหลวกับแก๊ส และตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลแบบสองสถานะระหว่างของเหลวและแก๊ส รวมถึงได้มีการตรวจสอบเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการระบายความร้อนโดยใช้เจ็ทของไหลพุ่งชน งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของฟองอากาศขณะปะทะแผ่นพื้นผิวและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศ

2.1 โครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระ

เจ็ทอิสระ (Free jet) คือ การที่ของไหลเคลื่อนที่ด้วยความเร็วพุ่งออกจากหัวฉีดสู่ของไหลที่หยุดนิ่งบริเวณโดยรอบ ซึ่งของไหลจะมีความเร็วสูงสุดในบริเวณแกนกลางของเจ็ท โดยทั่วไปโครงสร้างของเจ็ทอิสระมี 3 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระ

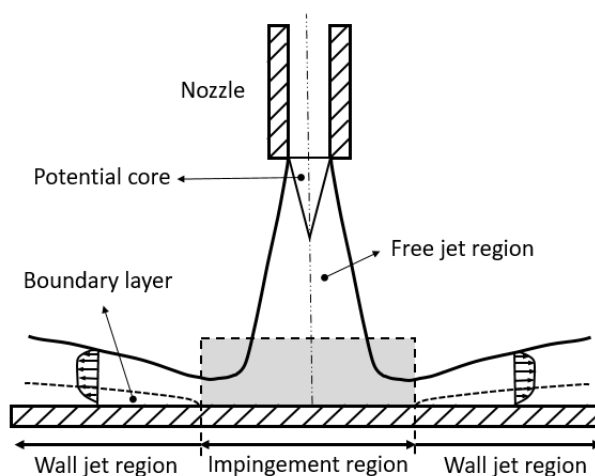
(1) Potential core zone เป็นบริเวณที่ของไหลเจ็ทเริ่มออกจากหัวฉีด ซึ่งของไหลที่พุ่งออกจากหัวฉีดจะมีผลของแรงหนืดที่เกิดจากผลต่างของความเร็วระหว่างเจ็ทกับของไหลที่หยุดนิ่งอยู่รอบ ทำให้บริเวณส่วนของ Potential core ของเจ็ทมีขนาดเล็กลงและของไหลบริเวณรอบเจ็ทถูกดูดให้มีความเร็วเพิ่มขึ้น หน้าตัดของเจ็ทจึงขยายตัวกว้างขึ้นตามระยะที่ห่างจากปากทางออก

(2) Developing zone เป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงของความเร็วภายในเจ็ท โดยความเร็วภายในเจ็ทจะค่อยๆลดลงและมีการขยายตัวของหน้าตัดเจ็ทในแนวแกนรัศมี ค่าความแปรปรวน (Turbulent intensity) ที่แกนของเจ็ทจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นในช่วงนี้ เนื่องจากผลของการเปลี่ยนแปลงความเร็วภายในชั้นการเฉือนรอบลำเจ็ท

(3) Fully developing zone เป็นบริเวณต่อจาก Developing zone ซึ่งบริเวณภายในลำเจ็ทมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วภายในเจ็ทอย่างสมบูรณ์แล้ว โดยรูปแบบการกระจายความเร็วมีความเหมือน (Similarity)

2.2 โครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชน

เจ็ทพุ่งชน (Impinging jet) คือ การที่ของไหลเคลื่อนที่ด้วยความเร็วพุ่งออกจากหัวฉีด โดยการไหลมีลักษณะเหมือนกับเจ็ทอิสระ ซึ่งเมื่อของไหลไหลผ่านช่วงเจ็ทอิสระจะเข้าปะทะกับพื้นผิว จากนั้นจะไหลราบเรียบบนพื้นผิว โดยทั่วไปโครงสร้างของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวมี 3 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2.2



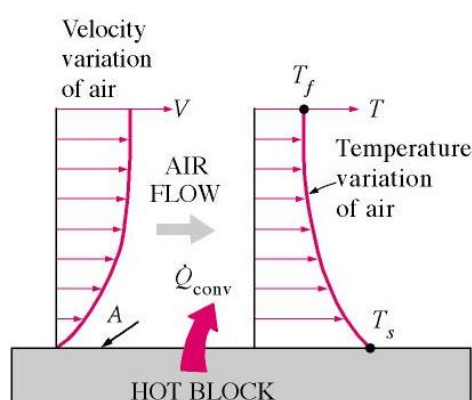
รูปที่ 2.2 โครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชน

(1) Free jet region เป็นบริเวณที่มีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับโครงสร้างของเจ็ทอิสระ ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิว ซึ่งประกอบไปด้วย Potential core zone, Developing zone และ Fully developing zone ตามลำดับ

(2) Impingement region เป็นบริเวณที่เจ็ทของไหลเข้าพุ่งชนพื้นผิว โดยเมื่อของไหลเจ็ทเคลื่อนที่พุ่งชนเข้ากับพื้นผิว ความเร็วของเจ็ทจะเริ่มลดลงและมีความเร็วเป็นศูนย์ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของเจ็ทพุ่งชนหรือ Stagnation point บนพื้นผิว หลังจากนั้นของไหลจะเคลื่อนที่กระจายออกรอบจุดศูนย์กลางของเจ็ทพุ่งชนตามแนวรัศมีบนพื้นผิวที่ปะทะ ในบริเวณนี้ความเร่งของการไหลรอบจุดศูนย์กลางจะเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนทิศทางการไหลกะทันหัน จากการเคลื่อนที่ในแนวแกนเป็นแนวรัศมีของเจ็ท

(3) Wall jet region เป็นบริเวณที่เจ็ทของไหลไหลกระจายรอบจุดศูนย์กลางของเจ็ท ซึ่งอยู่ถัดจากช่วง Impingement region โดยของไหลจะมีทิศทางการไหลไหลขนานกับพื้นผิว ซึ่งก่อให้เกิดชั้นขอบเขตการไหล (Boundary layer)

2.3 การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิว



รูปที่ 2.3 กลไกการพาความร้อน [2]

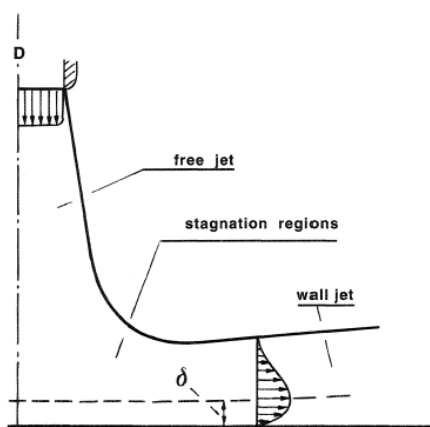
การพาความร้อน คือ วิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่ระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยของไหลจะเป็นตัวพาความร้อนมาให้หรือพาความร้อนออกจากผิวของของแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยกลไกที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนด้วยการพาความร้อน เกิดจากผลรวมของการนำความร้อน การสะสมพลังงานและการเคลื่อนที่ของการไหล โดยทั่วไปการพาความร้อนแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การพาความร้อนแบบธรรมชาติหรือแบบอิสระ (Natural or Free Convection) เป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยไม่มีกลไกที่ทำให้ของไหลเคลื่อนที่ แต่เกิดจากแรงลอยตัวของของไหล ซึ่งแรงลอยตัวเกิดจากผลการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นที่มีอุณหภูมิของของไหลแตกต่างกันใน 2 บริเวณ และการพาความร้อนแบบบังคับ (Forced Convection) เป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยของไหลจะถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของของแข็งโดยกลไกภายนอก เช่น พัดลม เครื่องสูบลม ซึ่งอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนของการใช้เจ็ทของไหลพุ่งชนพื้นผิวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.1)

$$\dot{Q} = \bar{h}A\Delta T \quad (2.1)$$

โดยที่ \bar{h} คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวเฉลี่ย ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)

A คือ พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนบนพื้นผิว (m^2)

ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวกับอุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่สัมผัสกับพื้นผิว ($^\circ\text{C}$)



รูปที่ 2.4 กลไกการพาความร้อนโดยวิธีการใช้เจ็ทของไหลพุ่งชนพื้นผิว [3]

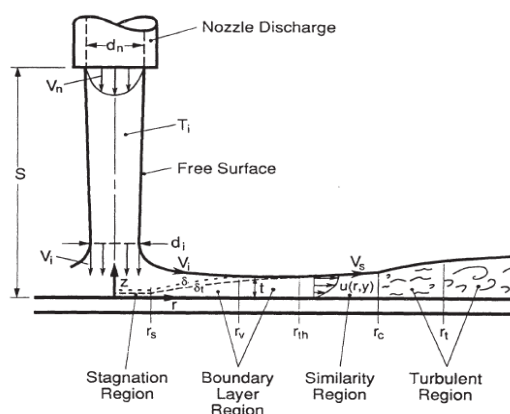
การใช้เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวจะอาศัยหลักการการพาความร้อนแบบบังคับ โดยการให้ของไหลพุ่งออกจากหัวฉีดด้วยความเร็วและเข้าปะทะกับพื้นผิว ซึ่งของไหลจะไหลเรียบตามพื้นผิวในแนวรัศมีของหัวฉีดทำให้เกิดการพาความร้อนทั่วทั้งพื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน เนื่องจากของไหลที่พุ่งออกจากเจ็ท เมื่อพุ่งชนบริเวณ Stagnation region จะมีการถ่ายเทโมเมนตัมกับพื้นผิวที่พุ่งชน ซึ่งที่จุดนี้ความเร็วของของไหลจะมีค่าเป็นศูนย์ ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดในบริเวณนี้ และอัตราการถ่ายเทความร้อนจะลดต่ำลงตามแนวรัศมีของเจ็ท เนื่องจากเกิดการสูญเสียพลังงานจลน์

2.4 ชนิดของเจ็ทพุ่งชน

จากหัวข้อที่แล้วโครงสร้างการไหลของเจ็ทของไหลพุ่งชนทั่วไปสามารถแบ่งออกได้ 3 ส่วน (1) Free jet region (2) Impingement region และ (3) Wall jet region ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานสำหรับเจ็ทของไหลพุ่งชน ทั้งนี้เจ็ทของไหลพุ่งชนสามารถแบ่งออกได้หลายรูป โดยแต่ละรูปแบบจะมีโครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชนที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลทำให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ของไหลเจ็ทพุ่งชนมีความแตกต่างกันด้วย โดยทั่วไปลักษณะโครงสร้างการไหลของเจ็ทขึ้นอยู่กับชนิดของไหลเจ็ทที่พุ่งออกจากหัวฉีดกับชนิดของไหลบริเวณโดยรอบของหัวฉีด ซึ่งสามารถแบ่งชนิดหลักของเจ็ทพุ่งชนได้ 2 ชนิด ได้แก่ เจ็ทพุ่งชนแบบ Free-surface และ Submerged

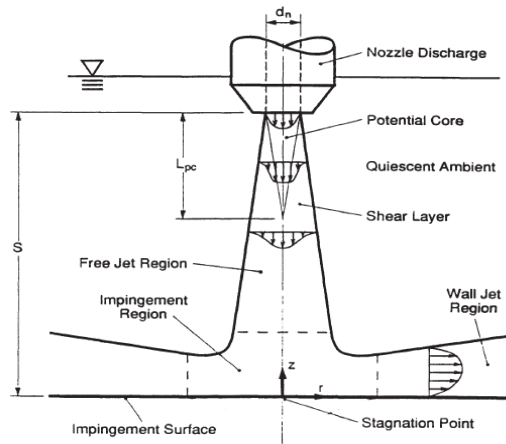
(1) เจ็ทพุ่งชนแบบ Free-surface คือ ระบบเจ็ทที่มีชนิดของไหลเจ็ทที่พุ่งออกจากหัวฉีดกับชนิดของไหลบริเวณโดยรอบมีสถานะที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปแล้วมักพบของเหลวถูกใช้เป็นของไหลเจ็ทและแก๊สเป็นบริเวณโดยรอบของเจ็ท โดยโครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชนแบบ Free-surface ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งโปรไฟล์ความเร็วของของไหลที่ใกล้กับปากทางออกของหัวฉีดในช่วงแรกมีความเร็วสูงสุดที่จุดศูนย์กลางของหัวฉีดเจ็ทและค่อยๆลดลงตามแนวรัศมี เนื่องจากอิทธิพลแรงเฉือนระหว่างของไหลกับผิวด้านในของหัวฉีด ต่อมาเมื่อของไหลพุ่งออกจากหัวฉีดสู่สภาพแวดล้อมที่อยู่ในสถานะแก๊ส เมื่อโปรไฟล์ความเร็วของเจ็ทของไหลมีการพัฒนาการไหลสมบูรณ์

แล้ว จะมีลักษณะความเร็วที่เท่ากันตามแนวรัศมีเนื่องจากอนุภาคของเหลวเจ็ทไม่มีปฏิกริยากับอนุภาคแก๊สที่เป็นสภาพแวดล้อม มีผลทำให้โปรไฟล์ความเร็วของของเหลวเจ็ทขึ้นอยู่กับอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงและความเร็วเฉื่อยของของไหลเจ็ทที่พุ่งออกจากหัวฉีด [4] และเมื่อของไหลพุ่งเข้าปะทะกับพื้นผิว (Stagnation region) มีผลทำให้โปรไฟล์ความเร็วของของไหลเจ็ทถูกบังคับให้เคลื่อนที่ขนานกับพื้นผิว ซึ่งก่อให้เกิดชั้นขอบเขตการไหล (Boundary layer region) และเมื่อของไหลเจ็ทเคลื่อนที่บนพื้นผิวจะก่อให้เกิดการพัฒนาการไหลแบบสมบูรณ โดยโปรไฟล์ความเร็วไม่เปลี่ยนแปลง (Similarity region) เมื่อถึงจุดหนึ่งความเร็วของไหลเจ็ทจะมีค่าลดลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความเสียดทานระหว่างของไหลเจ็ทกับพื้นผิว ซึ่งของไหลในช่วงนี้จะเป็นอิสระกับของไหลที่เพิ่งปะทะกับพื้นผิว ทำให้อนุภาคของไหลที่เป็นอิสระถูกผลักดันโดยอนุภาคของไหลเจ็ทที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สูงกว่า ก่อให้เกิดความปั่นป่วนในการไหลในช่วงนี้ (Turbulent region)



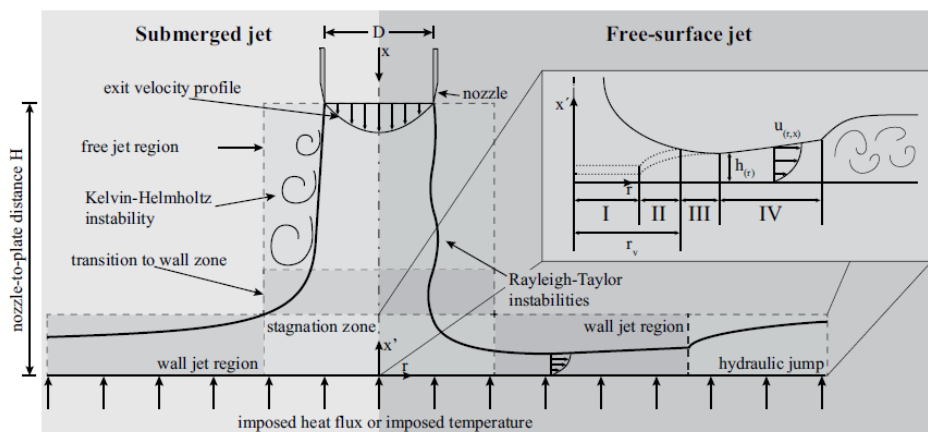
รูปที่ 2.5 เจ็ทพุ่งชนแบบ Free-surface [4]

(2) เจ็ทพุ่งชนแบบ Submerged คือ ระบบเจ็ทที่มีชนิดของไหลเจ็ทที่พุ่งออกจากหัวฉีดกับชนิดของไหลบริเวณโดยรอบมีสถานะเดียวกัน เช่น ของเหลวหรือแก๊สเป็นของไหลเจ็ทและของไหลบริเวณโดยรอบเจ็ททั้งคู่ โดยโครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชนแบบ Submerged ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งโปรไฟล์ความเร็วของของไหลที่ใกล้กับปากทางออกของหัวฉีดในช่วงแรกมีความเร็วสูงสุดที่จุดศูนย์กลางของหัวฉีดเจ็ทและค่อยๆลดลงตามแนวรัศมี เนื่องจากอิทธิพลแรงเฉือนระหว่างของไหลกับผิวด้านในของหัวฉีดเช่นเดียวกันกับเจ็ทพุ่งชนแบบ Free-surface ต่อมาเมื่อของไหลพุ่งออกจากหัวฉีดสู่สภาพแวดล้อมที่อยู่ในสถานะเดียวกัน มีผลทำให้เกิดการเฉือนกันระหว่างอนุภาคของไหลเจ็ทและอนุภาคของไหลบริเวณโดยรอบที่หยุดนิ่ง เกิดชั้นที่เรียกว่า Shear layer ซึ่งทำให้อนุภาคของไหลที่หยุดนิ่งถูกผลักดันให้เคลื่อนที่ตามกระแสการไหลของเจ็ท ส่งผลให้ลักษณะการไหลของลำเจ็ทมีขนาดกว้างขึ้นตามระยะห่างจากปากทางออกของหัวฉีด และเมื่อการไหลมีการพัฒนาอย่างสมบูรณแล้ว โปรไฟล์ความเร็วของของไหลจะมีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ กล่าวคือมีความเร็วสูงสุดที่จุดศูนย์กลางและค่อย ๆ ลดลงตามแนวแกนรัศมีเจ็ท จนมีค่าต่ำสุดที่ชั้นขอบเขต Shear layer ต่อมาเมื่อของไหลเจ็ทพุ่งเข้าปะทะกับพื้นผิว มีผลทำให้โปรไฟล์ความเร็วของของไหลเจ็ทถูกบังคับให้เคลื่อนที่ขนานกับพื้นผิว ซึ่งก่อให้เกิดชั้นขอบเขตการไหล



รูปที่ 2.6 เจ็ทพุ่งชนแบบ Submerged [4]

เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชนทั้ง 2 ชนิด คือ แบบ Free-surface และแบบ Submerged ค่อนข้างมีความแตกต่างกันตั้งแต่การไหลของเจ็ทของไหลที่พุ่งออกจากหัวฉีดไปจนถึงการไหลของเจ็ทของไหลที่ไหลเรียบไปบนพื้นผิว ทั้งนี้ Kneer และคณะ [5] ได้แสดงการเปรียบเทียบพฤติกรรมของการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทของไหลพุ่งชนทั้ง 2 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.7 สำหรับกรณีของเจ็ทพุ่งชนแบบ Submerged ซึ่งของไหลเจ็ทที่พุ่งออกจากหัวฉีดก่อให้เกิดการเฉือนกันระหว่างอนุภาคของไหลเจ็ทและอนุภาคของไหลที่หุ้ดนิ่งบริเวณโดยรอบ ทำให้เกิดชั้นของการเฉือนกัน (shear layer) ซึ่งภายในชั้นนี้ก่อให้เกิดความปั่นป่วนในการไหลของลำเจ็ท ซึ่งสร้างการไหลที่ไม่แน่นอนตามทฤษฎีความไม่แน่นอนของ Kelvin-Helmholtz แต่ในกรณีของเจ็ทพุ่งชนแบบ Free-surface ซึ่งของไหลเจ็ทที่พุ่งออกจากหัวฉีดจะไม่ทำปฏิกิริยากับของไหลที่อยู่บริเวณโดยรอบ โดยลักษณะของลำเจ็ทจะมีขาดกันหรือแตกตัวออกจากกันตามทฤษฎีความไม่แน่นอนของ Rayleigh-Taylor ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะทางที่ห่างจากหัวฉีด ขนาดของเจ็ท และเรย์โนลด์นัมเบอร์ [5]

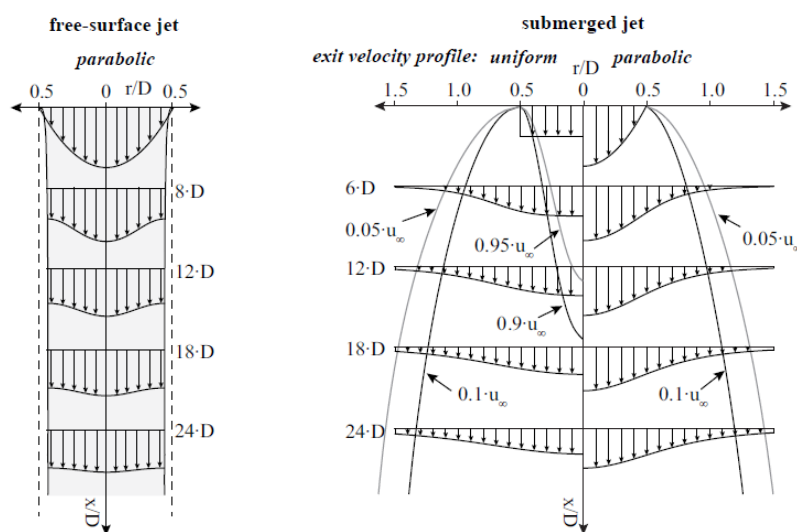


รูปที่ 2.7 เปรียบเทียบลักษณะการไหลของเจ็ทของไหลพุ่งชนแบบ Free-surface และ Submerged

[5]

ทั้งนี้เจ็ทพุ่งชนแบบ Free-surface ยังเกิดปรากฏการณ์ของการไหลบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนซึ่งเรียกว่า Hydraulic jump กล่าวคือเมื่อความเร็วของของไหลในช่วงวิกฤต (Critical speed) มีความเร็วต่ำกว่าความเร็วของของไหลในช่วงต้นหรือก่อนเข้าช่วงวิกฤต (Initial speed) ซึ่งจุดนี้จะก่อให้เกิดปรากฏการณ์ Hydraulic jump [6] ซึ่งจะแตกต่างกับเจ็ทพุ่งชนแบบ Submerged ที่ไม่เกิดปรากฏการณ์นี้

เมื่อเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วของเจ็ทของไหลทั้ง 2 ชนิด โดยงานวิจัยของ Rohlf's และคณะ [7] ได้เสนอโปรไฟล์ความเร็วของการไหลของเจ็ทพุ่งชน ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยในกรณีของเจ็ทพุ่งชนแบบ Free-surface ซึ่งสามารถแบ่งการไหลออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงการไหลกำลังพัฒนาและการไหลพัฒนาสมบูรณ์แล้ว จะเห็นได้ว่าบริเวณแกนกลางของเจ็ทจะค่อย ๆ ลดลงตามระยะทางที่เพิ่มมากขึ้น แต่บริเวณรอบแกนกลางของเจ็ทจะถูกเร่งให้มีความเร็วสูงขึ้น เนื่องจากไม่ได้รับอิทธิพลของอนุภาคของไหลที่อยู่บริเวณโดยรอบ ซึ่งในกรณีของเจ็ทพุ่งชนแบบ Submerged ทั้งการไหลที่มีความสม่ำเสมอหรือการไหลแบบราบเรียบ (รูป ข ด้านซ้าย) และแบบพาราโบลา (รูป ข ด้านขวา) สามารถแบ่งการไหลออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงการไหลแบบ Potential core, ช่วงการไหลกำลังพัฒนาและการไหลพัฒนาสมบูรณ์แล้ว โดยในช่วงการไหลแบบ Potential core จะปรากฏรูปแบบ Potential core ได้อย่างเด่นชัด ซึ่งในบริเวณนี้ความเร็วของเจ็ทของไหลจะมีค่าเท่ากับความเร็วของเจ็ทที่ปากทางออก อีกทั้งยังมีการถ่ายโมเมนตัมและมวลของเจ็ทระหว่างของไหลโดยรอบ ทำให้ลักษณะของลำเจ็ทค่อย ๆ บานออกเมื่อระยะทางที่เพิ่มมากขึ้น และเมื่อการไหลพัฒนาอย่างสมบูรณ์แล้ว จะเห็นได้ว่าความเร็วของเจ็ทของไหลจะมีค่าน้อยกว่าในช่วงที่เพิ่งออกจากหัวฉีดในตำแหน่งเดียวกันตามแนวรัศมีเจ็ท เนื่องจากผลของความหนืดของของไหลบริเวณโดยรอบ



(ก) แบบ Free-surface

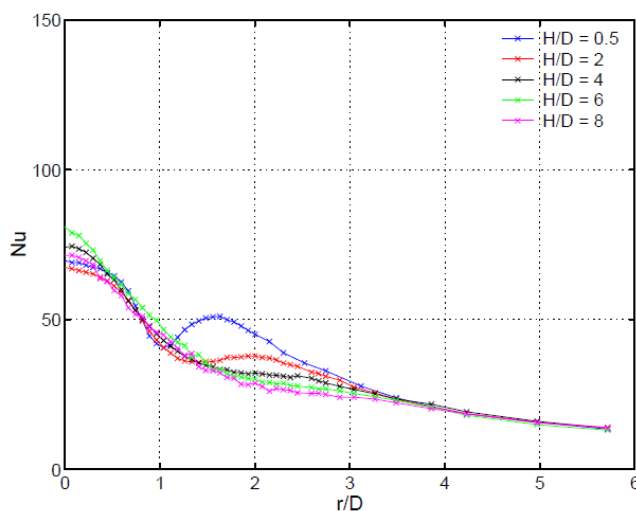
(ข) แบบ Submerged

รูปที่ 2.8 โปรไฟล์ความเร็วของเจ็ทของไหลพุ่งชน ที่เรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าเท่ากับ 540 [7]

2.5 ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิว

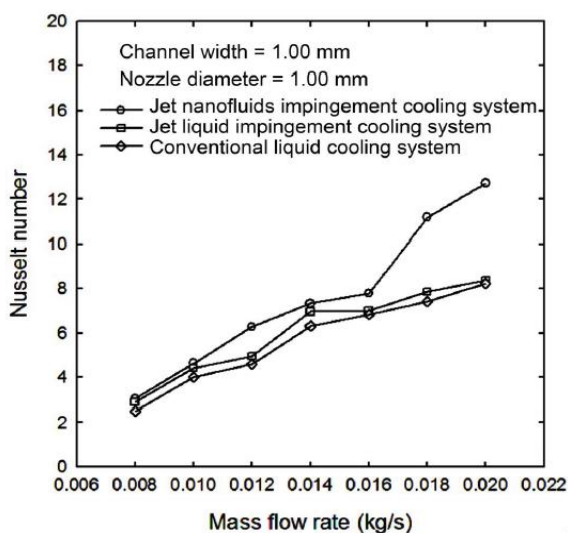
ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทพุ่งชน ได้แก่ ระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชน อัตราการไหลของเจ็ท ชนิดของของไหล ซึ่งมีผลต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทพุ่งชน

(1) ระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชน (Nozzle to impingement plate distance) ถือเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชน ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดย H คือระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชน และ D คือ ขนาดของเจ็ท ซึ่งโดยทั่วไปในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเจ็ทพุ่งชนโดยส่วนใหญ่ มักจะอธิบายเป็นค่าระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชนเทียบกับขนาดของเจ็ท (H/D) จากรูปจะเห็นได้ว่าที่ H/D เท่ากับ 6 จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงสุด เนื่องจากมีโมเมนตัมบนพื้นผิวและความปั่นป่วนที่สูง แต่สำหรับกรณีที่ระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชนมีระยะห่างที่มากคือ H/D เท่ากับ 8 จะมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนลดลง เนื่องจากระยะทางที่มากเป็นผลให้เกิดการสูญเสียโมเมนตัมบนพื้นผิว และกรณีที่ระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชนมีระยะห่างที่น้อยคือ H/D เท่ากับ 0.5 และ 2 จะมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนลดลงเช่นกัน เนื่องจากของไหลที่พุ่งออกจากเจ็ทเป็นการไหลที่ไม่สมบูรณ์และมีความปั่นป่วนน้อย ซึ่งในกรณีนี้จะพบค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนอันดับสอง (Secondary peak) เนื่องจากในช่วงที่ของไหลพุ่งชนพื้นผิวแล้วไหลเรียบกับพื้นผิวเป็นการไหลแบบราบเรียบ ซึ่งต่อมาจะพัฒนาตัวเป็นการไหลแบบปั่นป่วนทำให้เกิดค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนอันดับสองขึ้น



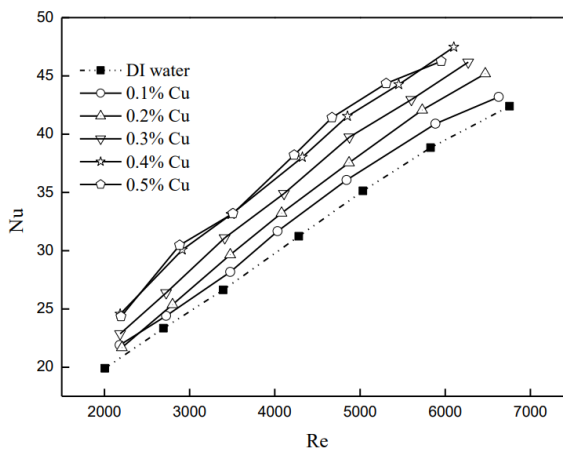
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะจุดตามแนวรัศมีของพื้นผิวพุ่งชนตามระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชนที่ค่าต่าง ๆ [8]

(2) อัตราการไหลของเจ็ท โดย Naphon และ Wongwises [9] ได้กล่าวว่าการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำในการใช้เจ็ทพุ่งชนเพื่อระบายความร้อนแผงวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์ มีผลทำให้ลดอุณหภูมิเฉลี่ยของแผงวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์ลงตาม ดังแสดงในรูปที่ 2.10

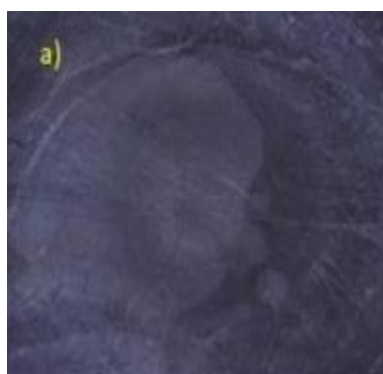


รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของนัสเซลท์นัมเบอร์และอัตราการไหลของของไหล [9]

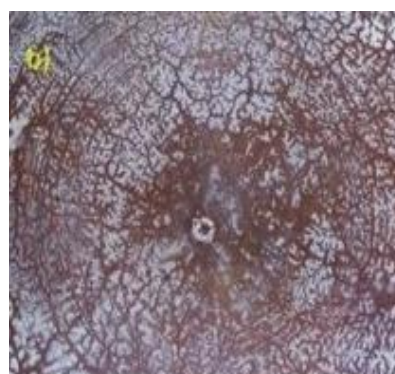
(3) ชนิดของของไหล โดยของไหลต่างชนิดกันที่ใช้ในการศึกษาด้านการถ่ายเทความร้อน จะให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกัน เนื่องจากค่าการนำความร้อนของตัวกลางที่ใช้ในการระบายความร้อนมีค่าต่างกัน โดยในปัจจุบันได้มีงานวิจัยในการเพิ่มค่าการนำความร้อนของของไหล โดยการเติมอนุภาคนาโนภายในน้ำ ส่งผลให้เพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้สูงขึ้นเมื่อเทียบกับตัวกลางที่เป็นน้ำ [9-15] ดังแสดงในรูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยนัสเซลท์นัมเบอร์กับเรย์โนลด์นัมเบอร์ จะเห็นได้ว่ากรณีที่ใช้เจ็ทของไหลนาโนในการระบายความร้อนสำหรับมีแวนนัมค่าเฉลี่ยสูงกว่การใช้เจ็ทของไหลที่เป็นน้ำในทุก ๆ ค่าเข้มข้นของสารละลายอนุภาคนาโนในน้ำ แต่การเติมอนุภาคนาโนภายในน้ำที่ใช้ในการระบายความร้อนแบบเจ็ทพุ่งชนพบว่า อนุภาคนาโนจะเกิดการตกตะกอนบริเวณผิวที่เจ็ทพุ่งชน เป็นผลให้ลดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนลง [15] ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยเลขคณิตของตัวเลขกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยเปรียบเทียบค่าเข้มข้นของสารละลายอนุภาคนาโนที่ค่าต่าง ๆ [13]



(ก) แผ่นฟุ้งชนก่อนใช้ของไหลนาโน



(ข) หลังใช้ของไหลนาโน

รูปที่ 2.12 แผ่นฟุ้งชนที่ใช้เจ็ทของไหลนาโน [15]

2.6 การไหลแบบสองสถานะระหว่างของเหลวและแก๊ส (Two-phase flow)

โดยทั่วไปการไหลแบบสองสถานะระหว่างของเหลวกับแก๊ส มีความซับซ้อนในการพิจารณา เนื่องจากความไม่คงตัวของสถานะในระหว่างการไหล อีกทั้งลักษณะของช่องทางการไหลที่แตกต่าง มีผลทำให้ปรากฏการณ์ในการไหลระหว่างของไหลทั้งสองสถานะนี้แตกต่างกัน ในงานวิจัยส่วนใหญ่จึงพิจารณาท่อตรงและกำหนดรูปแบบลักษณะการไหลตามการจัดวางท่อตรงในแนวตั้งและแนวนอน ซึ่งลักษณะการวางท่อที่แตกต่างกัน เป็นผลทำให้รูปแบบลักษณะการไหลมีความแตกต่างกัน เนื่องจากอิทธิพลของแรงโน้มถ่วง

(1) การไหลแบบสองสถานะของท่อตรงในแนวตั้ง จะมีรูปแบบการไหลที่มีความสมมาตรตามแนวรัศมีท่อ เนื่องจากอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงที่กระทำตามระดับความสูงที่เท่ากัน โดย Thome [16] ได้กล่าวว่าการไหลแบบสองสถานะที่ของไหลมีทิศทางไหลขึ้นสำหรับท่อตรงในแนวตั้ง สามารถแบ่งได้เป็น 5 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.13

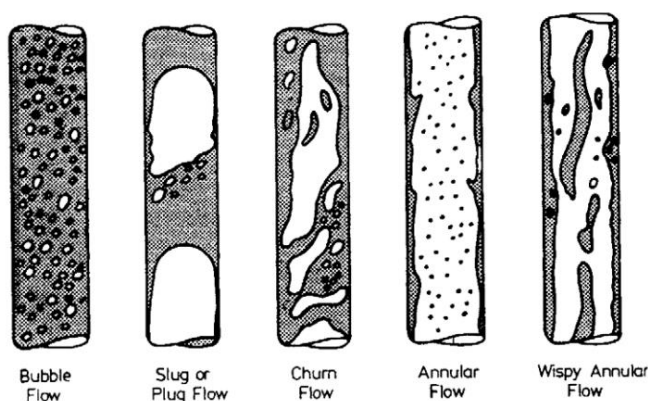
(1.1) Bubbly flow มีลักษณะการไหลเป็นฟองอากาศขนาดเล็กกระจายสม่ำเสมอภายในท่อ ในช่วงนี้สามารถปรับขนาดของฟองอากาศได้ แต่ขนาดของฟองอากาศต้องน้อยกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

(1.2) Slug or Plug flow เกิดจากการรวมตัวกันของฟองอากาศขนาดเล็ก ทำให้ได้ฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่อยู่บริเวณกลางท่อและมีลักษณะคล้ายหัวกระสุน

(1.3) Churn flow เกิดจาก Slug bubble ที่ขนาดใหญ่ เริ่มแตกตัวออกจากกัน อันเนื่องมาจากแรงเฉือนระหว่างฟองอากาศกระทำกับของเหลวภายในท่อ ซึ่งเป็นผลให้เกิดการไหลแบบสุ่มหรือไม่คงตัว

(1.4) Annular flow เป็นลักษณะของเหลวไหลเป็นชั้นฟิล์มวงแหวนรอบผนังท่อ บริเวณแกนกลางท่อจะอยู่ในสถานะแก๊สเป็นส่วนใหญ่และจะมีหยดน้ำขนาดเล็กกระจายสม่ำเสมอทั่วสถานะแก๊ส

(1.5) Wispy annular flow มีลักษณะของเหลวไหลเป็นชั้นฟิล์มวงแหวนรอบผนังท่อ บริเวณแกนกลางท่อจะอยู่ในสถานะแก๊สเป็นส่วนใหญ่ เช่นเดียวกับ Annular flow แต่จะมีหยดน้ำขนาดขนาดเล็กรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน



(▨ liquid □ vapor)

รูปที่ 2.13 ลักษณะการไหลแบบสองสถานะของท่อตรงในแนวตั้ง [16]

(2) การไหลแบบสองสถานะของท่อตรงในแนวนอน จะมีรูปแบบการไหลที่ไม่สมมาตรตามแนวรัศมีท่อ อันเนื่องมาจากอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงกระทำในทิศทางตั้งฉากกับการไหล โดย Thome [17] ได้กล่าวว่าการไหลแบบสองสถานะสำหรับท่อตรงในแนวนอน สามารถแบ่งได้เป็น 6 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.14

(2.1) Bubbly flow มีลักษณะการไหลเป็นฟองอากาศขนาดเล็กไหลอยู่ค่อนไปทางส่วนบนของ ท่อเนื่องจากฟองอากาศมีความหนาแน่นน้อยกว่าของเหลวจึงลอยตัวขึ้น

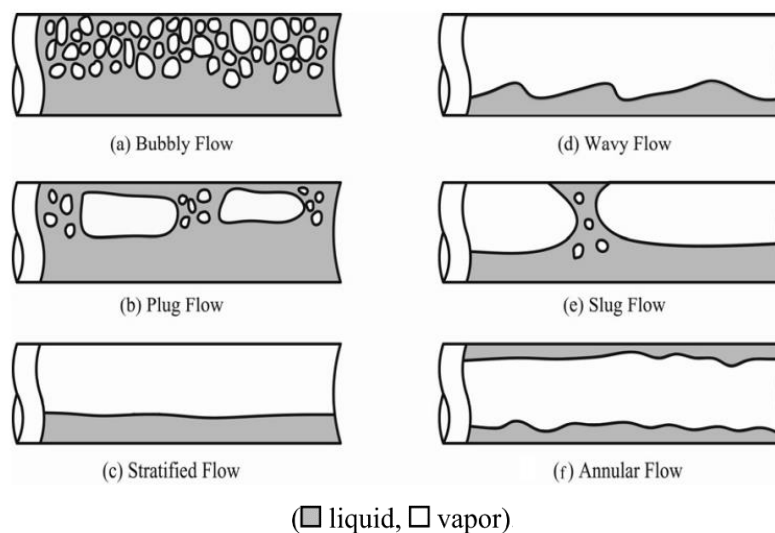
(2.2) Plug flow เกิดจากการรวมตัวกันของฟองอากาศขนาดเล็ก ทำให้เกิดเป็นฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่และยาวขึ้น

(2.3) Stratified Flow มีลักษณะของเหลวและแก๊สแยกชั้นกัน โดยก๊าซจะอยู่บนและของเหลวอยู่ด้านล่าง ซึ่งผิวสัมผัสของของไหลทั้งสองจะราบเรียบ

(2.4) Wavy flow มีลักษณะของเหลวและแก๊สแยกชั้นกัน โดยแก๊สจะอยู่บนและของเหลวจะอยู่ด้านล่าง ซึ่งผิวสัมผัสของของไหลทั้งสองจะเป็นคลื่น

(2.5) Slug flow เกิดเมื่อคลื่นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างชั้นของแก๊สและของเหลวใน Wavy flow เกิดสูงขึ้นจนยอดคลื่นถึงผนังด้านบนของท่อ

(2.6) Annular flow เป็นลักษณะของเหลวไหลเป็นชั้นฟิล์มวงแหวนรอบผนังท่อ โดยความหนาของชั้นฟิล์ม ของของเหลวด้านล่างจะหนากว่าชั้นบน และอาจมีละอองของของเหลวเคลื่อนที่กระจายอยู่ในแก๊สซึ่งเคลื่อนที่อยู่บริเวณแกนกลางของท่อ



รูปที่ 2.14 ลักษณะการไหลแบบสองสถานะของท่อตรงในแนวนอน [17]

2.7 ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลแบบสองสถานะระหว่างของเหลวและแก๊ส

จากหัวข้อที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่าอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงมีผลต่อพฤติกรรมการไหลแบบสองสถานะภายในท่อ ต่อมาปัจจัยที่มีส่วนเกี่ยวข้องเช่นกันที่ทำให้เกิดพฤติกรรมการไหลในรูปแบบต่าง ๆ เนื่องจากการไหลแบบสองสถานะเกิดขึ้นจากการผสมระหว่างของไหลที่เป็นของเหลวและแก๊ส จึงต้องมีการควบคุมตัวแปรของทั้งสองสถานะ เพื่อให้ได้รูปแบบการไหลที่ต้องการในการศึกษา โดยมีตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

(1) สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของแก๊สกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม (Volumetric flow fraction) คือ สัดส่วนของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของแก๊สต่อผลรวมของอัตราการไหลเชิงปริมาตรแก๊สและของเหลว ดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$\beta = \frac{\dot{Q}_v}{\dot{Q}_v + \dot{Q}_l} \quad (2.1)$$

โดยที่ \dot{Q}_v คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของแก๊ส (L/min)

\dot{Q}_l คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของเหลว (L/min)

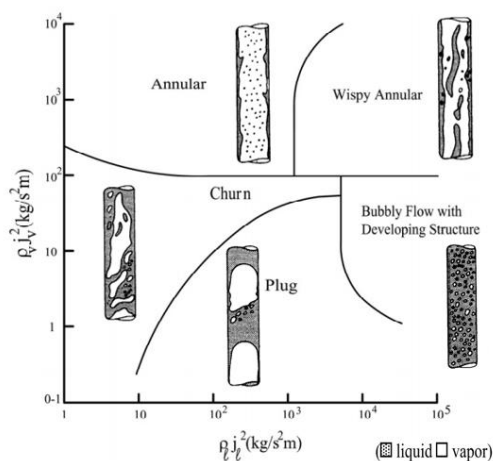
(2) อัตราการไหลเชิงมวลแก๊สและของเหลว คือ อัตราการไหลเชิงมวลของแก๊สต่ออัตราการไหลเชิงมวลรวมระหว่างแก๊สและของเหลว ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกความแห้งหรือความเปียกขึ้นในการไหลแบบสองสถานะ ดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$x = \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_v + \dot{m}_l} \quad (2.2)$$

โดยที่ \dot{m}_v คือ อัตราการไหลเชิงมวลของแก๊ส (kg/s)

\dot{m}_l คือ อัตราการไหลเชิงมวลของของเหลว (kg/s)

(3) ความเร็วของของเหลวและความเร็วของแก๊ส การควบคุมความเร็วของแก๊สหรือความเร็วของแก๊สที่ไหลมารวมกันมีผลต่อพฤติกรรมในการไหลแบบสองสถานะ เนื่องจากปริมาณแก๊สหรือปริมาณของของเหลวที่เข้ามาผสมกันจะมีผลต่อรูปแบบการไหล ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วผิวของของเหลวและความเร็วผิวของแก๊สที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลแบบสองสถานะภายในท่อ [18]

โดยที่ ρ_v คือ ความหนาแน่นของแก๊ส (kg/m^3)

ρ_l คือ ความหนาแน่นของของเหลว (kg/m^3)

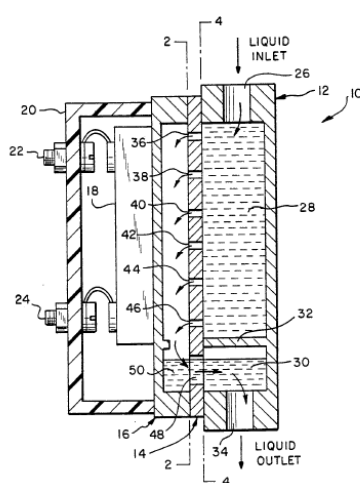
j_v คือ ความเร็วผิวของแก๊สภายในท่อ (m/s)

j_l คือ ความเร็วผิวของของเหลวภายในท่อ (m/s)

2.8. การตรวจสอบเอกสาร

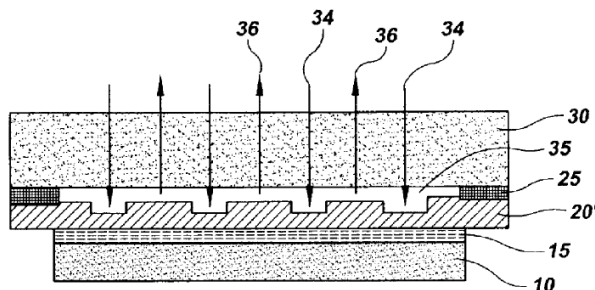
2.8.1 สิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้งานเจ็ทของไหลพุ่งชน

Quon และ Tanzer [19] เสนอสิทธิบัตรเกี่ยวกับการออกแบบระบบเจ็ทของเหลวพุ่งชนที่ใช้ในการระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 โดยระบบถูกออกแบบให้มีหลายหัวเจ็ทเพื่อบังคับให้ของเหลวเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวโดยตรง ทำให้เกิดการกำจัดความร้อนจำนวนมากบนแผงระบายความร้อนและกำหนดให้ของเหลวเจ็ทที่ออกแต่ละหัวเจ็ทมีความเร็วที่สูง เพื่อลดชั้นขอบเขตการไหลบนพื้นผิว ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อน



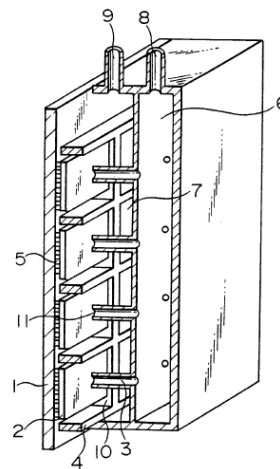
รูปที่ 2.16 ระบบระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยใช้เจ็ทของเหลวพุ่งชน [19]

Bezama และ Natarajan [20] เสนอสิทธิบัตรเกี่ยวกับการออกแบบระบบเจ็ทของเหลวพุ่งชนที่ใช้ในการระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ซึ่งหัวเจ็ทที่ใช้มีขนาดระดับไมครอน (Microjet) โดยหัวเจ็ทถูกออกแบบให้มีหลายหัวและถูกจัดเรียงเป็นแถว (Jet array) เพื่อกำจัดความร้อนส่วนเกินบนแผงระบายความร้อน

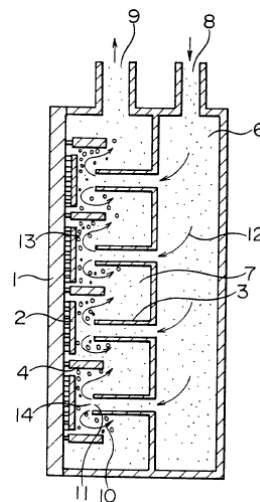


รูปที่ 2.17 ระบบระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยใช้หัวเจ็ทระดับไมครอน [20]

Nakajima และคณะ [21] เสนอสิทธิบัตรเกี่ยวกับการออกแบบระบบเจ็ทของเหลวพุ่งชน สำหรับการระบายความร้อนในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำของระบบคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.18 โดยระบบถูกออกแบบให้มีหลายหัวเจ็ทในการระบายความร้อน ซึ่งหัวเจ็ทหนึ่งหัวจะบังคับให้ของไหลพุ่งชนพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำต่อหนึ่งหน่วย เมื่อของเหลวพุ่งชนบนสารกึ่งตัวนำก่อให้เกิดการเดือดบนพื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 2.19 เนื่องจากความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาจากอุปกรณ์ ซึ่งฟองอากาศจะช่วยในการพาความร้อนบนพื้นผิว

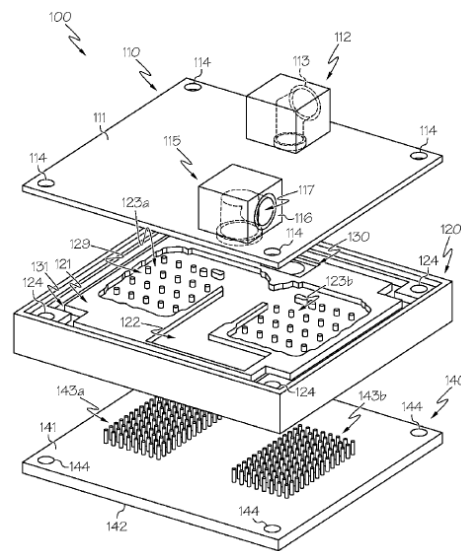


รูปที่ 2.18 ระบบระบายความร้อนในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในระบบคอมพิวเตอร์โดยใช้เจ็ทของเหลวพุ่งชน [21]

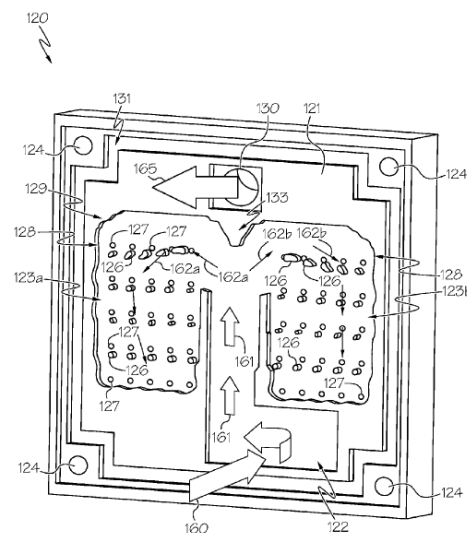


รูปที่ 2.19 การเดือดบนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในระบบคอมพิวเตอร์โดยการใช้เจ็ทของเหลวพุ่งชน [21]

Joshi และ Dede [22] เสนอสิทธิบัตรเกี่ยวกับการออกแบบระบบเจ็ทของเหลวพุ่งชนบนแผงระบายความร้อนอิเล็กทรอนิกส์ ดังแสดงในรูปที่ 2.20 ซึ่งมีการบังคับให้ของไหลไหลเข้าช่องทางหนึ่งซึ่งภายหลังจะกระจายออกตามรูเจ็ทแต่ละรูเพื่อลดอุณหภูมิบนแผง จากนั้นของไหลจะถูกบังคับให้ไหลออกช่องทางหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.21 ซึ่งของเหลวเจ็ทที่พุ่งชนกับแผงระบายความร้อน จะเกิดการเดือดทำให้ของไหลที่เคลื่อนที่บนแผงเกิดการไหลแบบสองสถานะ โดยฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะช่วยในการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อน



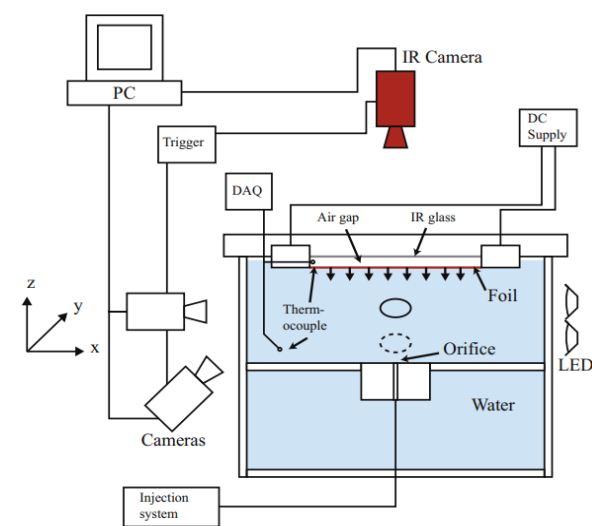
รูปที่ 2.20 ระบบระบายความร้อนในแผงระบายความร้อนโดยใช้เจ็ทของเหลวพุ่งชน [22]



รูปที่ 2.21 ช่องทางการไหลของของเหลวในแผงระบายความร้อนของเจ็ทพุ่งชน [22]

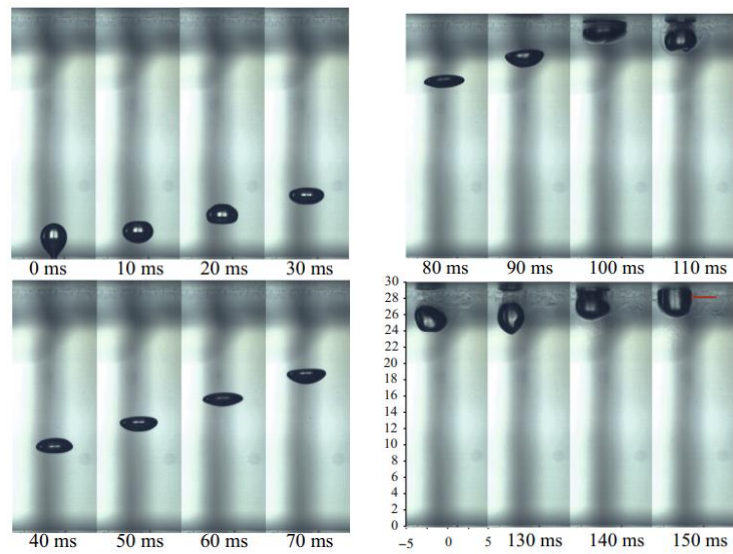
2.8.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของฟองอากาศขณะปะทะแผ่นพื้นผิว

Donoghue และคณะ [23] ได้ศึกษากลไกการถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของฟองอากาศขณะปะทะกับพื้นผิวแผ่นร้อน ในงานวิจัยได้ทำการทดลองโดยใช้กล้องอินฟราเรดในการวัดฟลักซ์ความร้อนของฟองอากาศขณะปะทะพื้นผิวและใช้กล้องความเร็วสูงในการศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ โดยฟองอากาศเดี่ยวจะไหลออกจากแผ่นออริฟิสที่มีขนาด 1 mm เข้าปะทะกับพื้นผิวร้อนที่มีระยะห่างระหว่างแผ่นออริฟิสที่ 30 mm ดังแสดงในรูปที่ 2.22

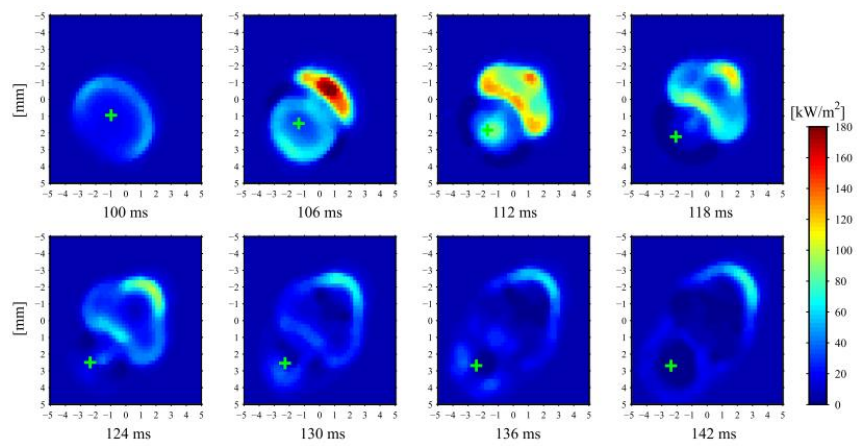


รูปที่ 2.22 แผนภาพชุดทดลอง [23]

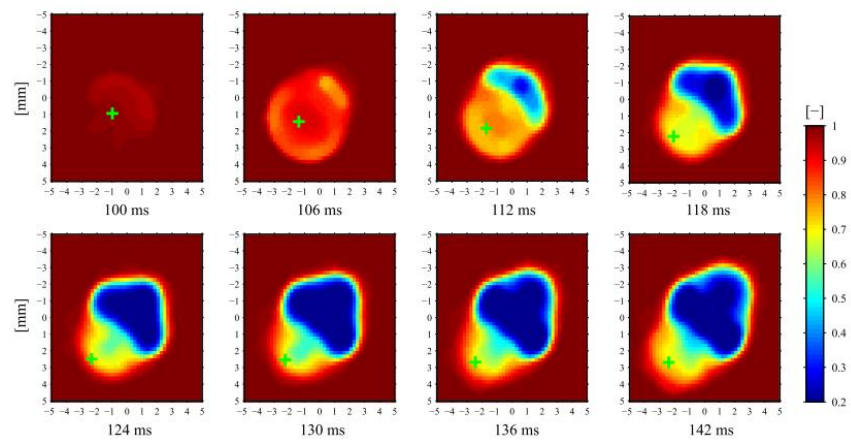
ในการทดลองพบว่าพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของฟองอากาศขณะปะทะพื้นผิวแบ่งได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วงฟองอากาศปะทะกับพื้นผิว ช่วงฟองอากาศกระดอนออกจากพื้นผิวและเข้าปะทะกับพื้นผิวอีกครั้ง และช่วงฟองอากาศเคลื่อนที่เรียบกับพื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 2.23 ซึ่งช่วงแรกที่เวลา 100-110 ms ในช่วงนี้ฟองอากาศขณะปะทะกับพื้นผิวจะมีรูปร่างแบน โดยจะมีการกักเก็บพลังงานในรูปของแรงตึงผิว เมื่อปะทะกับพื้นผิวพลังงานจะถูกปลดปล่อยและเข้าสู่ช่วงที่สองที่เวลา 110-140 ms ในช่วงนี้ฟองอากาศจะกระดอนออกจากพื้นผิวและเข้าปะทะกับพื้นผิวอีกครั้ง ขณะนี้ฟองอากาศจะมีรูปร่างกลมและพลังงานที่ถูกกักเก็บในรูปของแรงตึงผิวในตอนแรกจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานศักย์และพลังงานจลน์ จากนั้นฟองอากาศจะเคลื่อนที่ปะทะกับพื้นผิวอีกครั้งและเข้าสู่ช่วงที่สาม ในช่วงนี้ฟองอากาศจะเคลื่อนที่เรียบกับพื้นผิว ต่อมาผลของการศึกษาการถ่ายเทความร้อนพบว่า ในช่วงแรกที่ฟองอากาศปะทะกับพื้นผิวและในช่วงที่สองฟองอากาศกระดอนออกจากพื้นผิวและเข้าปะทะกับพื้นผิวอีกครั้งจะมีค่าฟลักซ์การพาความร้อนเพิ่มขึ้นและจะมีค่ามากที่สุดในช่วงแรก ดังแสดงในรูปที่ 2.24 เนื่องจากพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของฟองอากาศทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างพื้นผิวทำให้อุณหภูมิบนพื้นผิวแผ่นร้อนมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.23 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของฟองอากาศที่เวลาใด [23]

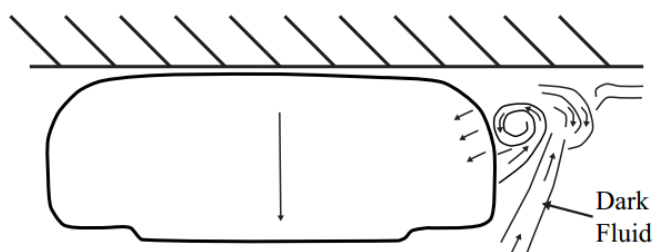


รูปที่ 2.24 พลิกซ์การพาความร้อนบนพื้นผิวที่เวลาใด [23]



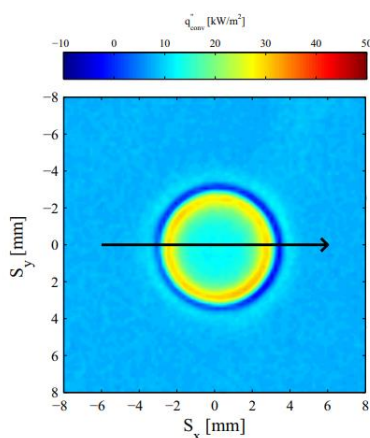
รูปที่ 2.25 อุดมhumidityบนพื้นผิวในการทดลองเทียบกับอุดมhumidityบนพื้นผิวก่อนการทดลองที่เวลาใด [23]

ต่อมา Donoghue และคณะ [24] ได้ศึกษาเพิ่มเติมถึงกลไกการถ่ายเทความร้อนสำหรับ ฟองอากาศที่มีลักษณะสมมาตรขณะปะทะพื้นผิว ซึ่งลักษณะของชุดทดลองจะแสดงดังรูปที่ 12 โดยการสร้างฟองให้มีลักษณะสมมาตรก่อนการปะทะกับพื้นผิวทำได้โดยการลดระยะห่างระหว่างแผ่นออริฟิสกับพื้นผิวร้อน ซึ่งในการทดลองใช้ที่ระยะห่าง 20 mm จากการศึกษพบว่าฟองอากาศขณะปะทะพื้นผิวจะดึงของไหลที่อยู่บริเวณรอบฟองอากาศเข้ามาและก่อให้เกิดการหมุนวนรอบเส้นรอบวงของฟองอากาศ ซึ่งของไหลที่ถูกดึงและก่อให้เกิดการหมุนวน เรียกว่า Dark fluid ดังแสดงในรูปที่ 2.26

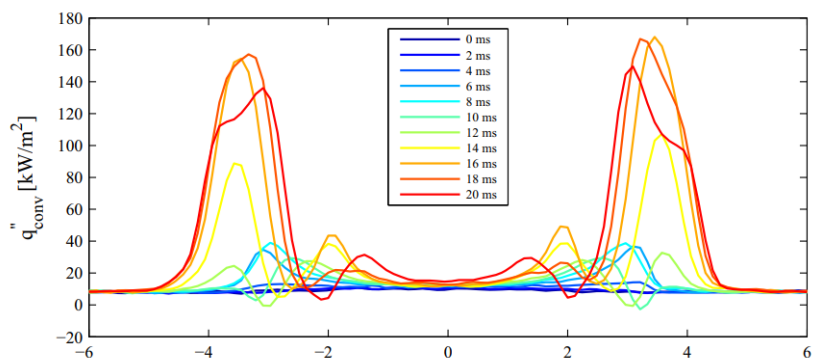


รูปที่ 2.26 รูปร่างฟองอากาศและการเคลื่อนที่ของของไหลบริเวณรอบฟองอากาศ [24]

ในช่วงเวลา 0-20 ms หลังจากที่ฟองอากาศปะทะพื้นผิว พบว่า ของไหลที่ถูกดึงรอบฟองอากาศและก่อให้เกิดการหมุนวนจะไม่มีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากของไหลที่ถูกดึงเข้ามาก่อให้เกิดชั้นขอบเขตความร้อนที่หนาขึ้น ทำให้ค่าฟลักซ์การพาความร้อนน้อยมากที่บริเวณรอบฟองอากาศ และจุดที่ค่าฟลักซ์การพาความร้อนสูงที่สุดคือบริเวณที่ฟองอากาศปะทะกับพื้นผิวโดยตรงซึ่งจะเกิดขึ้นเป็นเส้นรอบวงขนาดเล็กรอบจุดศูนย์กลางของฟองอากาศ โดยบริเวณศูนย์กลางของฟองอากาศขณะปะทะพื้นผิวจะเกิด dimple ดังแสดงในรูปที่ 2.27 และ 2.28

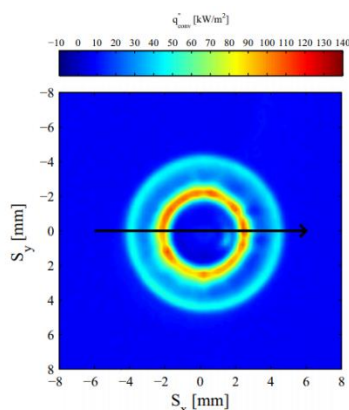


รูปที่ 2.27 ฟลักซ์การพาความร้อนที่เวลา 10 ms หลังจากที่ฟองอากาศปะทะพื้นผิว [24]

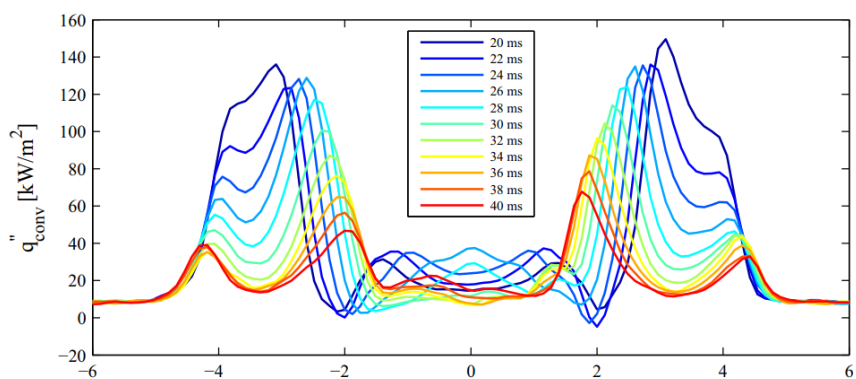


รูปที่ 2.28 พลั๊กซ์การพาความร้อนในช่วงเวลา 0-20 ms หลักจากที่ฟองอากาศปะทะพื้นผิว [24]

ในช่วงเวลา 20-40 ms หลักจากที่ฟองอากาศปะทะพื้นผิว พบว่าฟองอากาศที่เวลา 23 ms จะเกิดการกระดอนออกจากพื้นผิว ของไหลบริเวณรอบที่ถูกดึงและก่อให้เกิดการหมุนวนมีส่วนช่วยในการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อน โดยจะปรากฏเป็นรูปร่างวงแหวนรอบจุดศูนย์กลางของฟองอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.29 และ 2.30



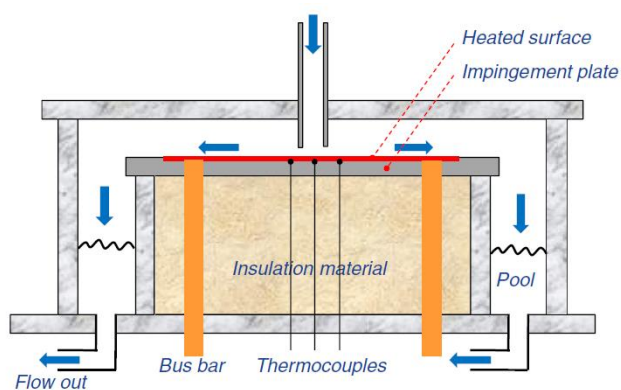
รูปที่ 2.29 พลั๊กซ์การพาความร้อนที่เวลา 30 ms หลักจากที่ฟองอากาศปะทะพื้นผิว [24]



รูปที่ 2.30 พลั๊กซ์การพาความร้อนในช่วงเวลา 20-40 ms หลักจากที่ฟองอากาศปะทะพื้นผิว [24]

2.8.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศ

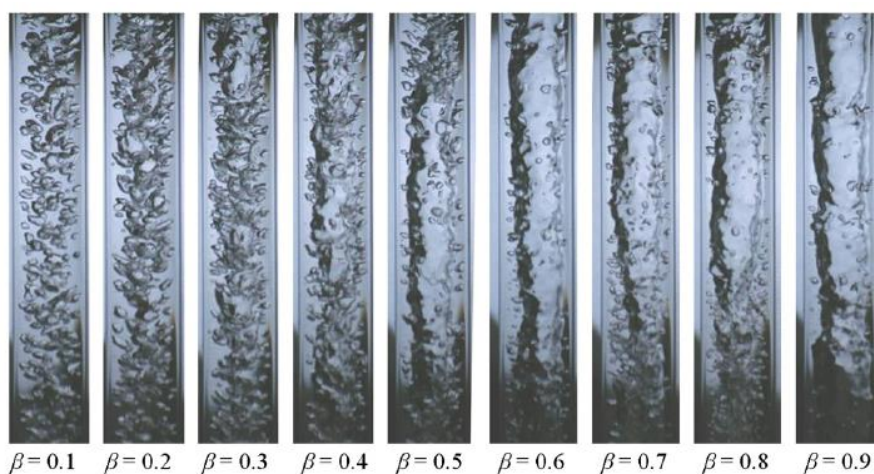
Choo K. และ Kim S.J. [25] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและคุณลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศแบบ Free-surface โดยมีเงื่อนไขที่กำลั้งปั้มน้ำคงที่ (fixed pumping power condition) ซึ่งแสดงเป็นค่ากำลั้งปั้มน้ำไร้มิติมีค่าอยู่ในช่วง (P^*_{pump}) 1.4×10^{11} ถึง 2.8×10^{12} โดยมีสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม (β) อยู่ในช่วง 0 ถึง 0.9 ในส่วนของขนาดท่อเจ็ททางออกมีขนาด 4 mm แผ่นที่ปะทะเป็นแผ่นโลหะผสมนิกเกิล 600 (NICONEL alloy 600) ขนาดความหนา 0.04 mm ความกว้าง 8 mm และความยาว 120 mm ซึ่งจะถูกจ่ายไฟกระแสตรงจากแหล่งจ่ายไฟ เพื่อให้แผ่นปะทะร้อน โดยจะมีการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ชนิด E จำนวน 14 ตัว ตามแนวยาวของแผ่นปะทะ เพื่อวัดอุณหภูมิแต่ละจุดของแผ่นปะทะ และอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างเจ็ทกับแผ่นที่ปะทะต่อขนาดเจ็ท (H/D) มีค่าเท่ากับ 7 ซึ่งชุดทดลองแสดงดังรูปที่ 2.31



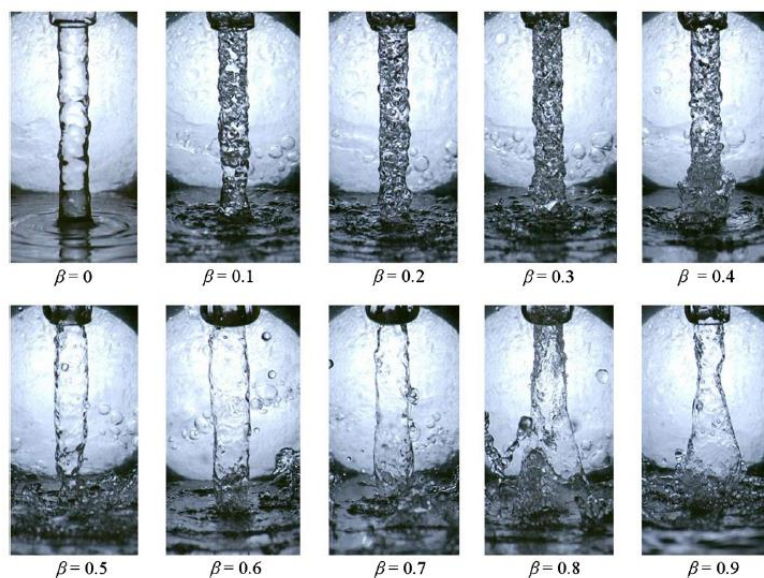
รูปที่ 2.31 แสดงชุดทดลอง [25]

จากผลการศึกษาพบว่าลักษณะรูปแบบการไหลในท่อ โดยมีสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.3 ซึ่งจะมีลักษณะเป็นฟองอากาศบิดเบี้ยวและไม่ต่อเนื่องเคลื่อนที่ตลอดของเหลวในท่อ ต่อมาในช่วง 0.4 ถึง 0.5 มีลักษณะการไหลแบบหัวกระสุน ซึ่งภายในท่อฟองอากาศจะมีรูปร่างแบบหัวกระสุน และในช่วง 0.5 ถึง 0.9 จะมีลักษณะการไหลแบบวงแหวนกระสุน ซึ่งของเหลวจะไหลเป็นชั้นฟิล์มวงแหวนรอบผนังท่อ ซึ่งบริเวณกลางท่อจะอยู่ในสถานะของแก๊สเป็นส่วนใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 2.32 และรูปแบบการไหลที่ปะทะพื้นผิวเมื่อสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.33 ในส่วนของการถ่ายเทความร้อนพบว่า ค่าของนัสเซลท์ที่นัมเบอร์ที่ Stagnation point มีค่าสูงสุด เมื่อสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมมีค่า 0.2 ถึง 0.3 ดังแสดงในรูปที่ 2.34 ต่อมาเมื่อแบ่งช่วงของสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนจะแบ่งได้ 3 ช่วง คือ ช่วงแรกที่ $\beta = 0.1$ พบว่ามีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนสูงกว่า 30% เทียบ

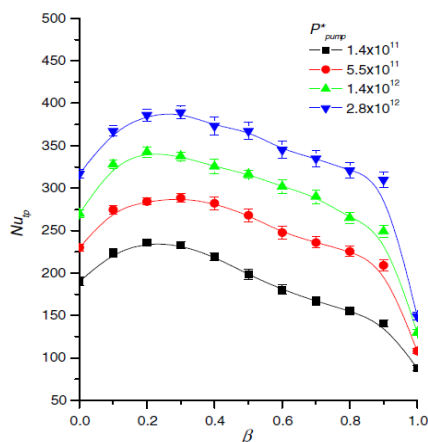
กับการใช้สารทำงานที่เป็นของเหลวเพียงอย่างเดียว ช่วงที่สอง β อยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.3 พบว่าค่าของนัสเซิลท์นัมเบอร์ที่ Stagnation point เพิ่มขึ้นสูงสุดในช่วงนี้ เนื่องจากมีฟองอากาศมารบกวนบริเวณผิวที่ปะทะ ซึ่งช่วยในการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อน และช่วงที่สาม β อยู่ในช่วง 0.4 ถึง 0.9 พบว่าประสิทธิภาพในการระบายความร้อนลดลง เนื่องจากปริมาณของเหลวในการไหลมีค่าน้อยลง



รูปที่ 2.32 ลักษณะการไหลภายในท่อเมื่อสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมต่างกัน [25]

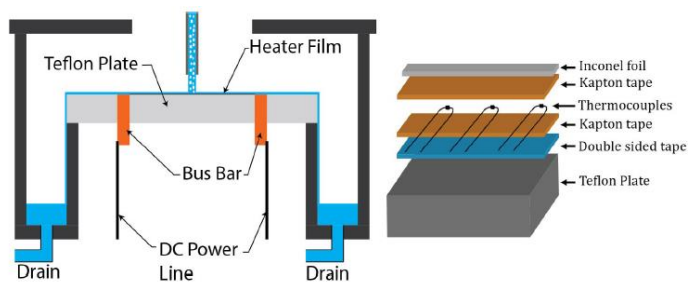


รูปที่ 2.33 ลักษณะการไหลที่ปะทะพื้นผิวเมื่อสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมต่างกัน [25]



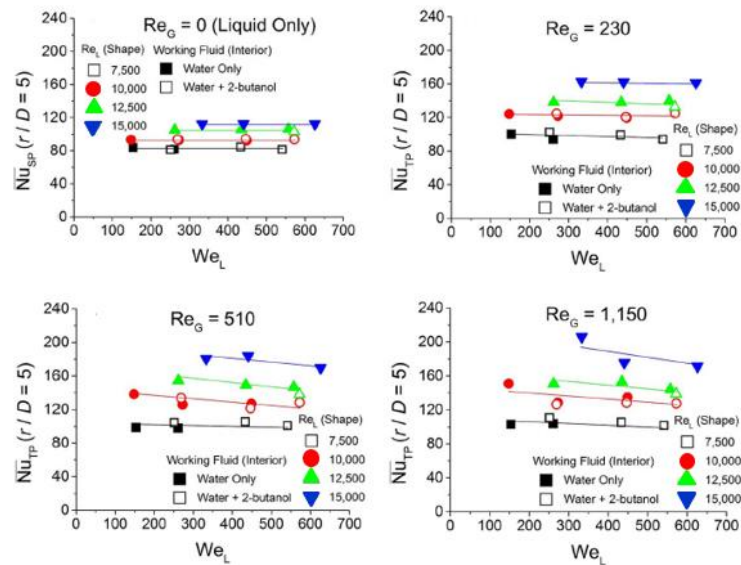
รูปที่ 2.34 ความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซลท์ที่ Stagnation point กับสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม [25]

Trainer และคณะ [26] ได้ศึกษาผลกระทบของแรงตึงผิวของการไหลแบบสองสถานะในท่อที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศแบบ Free-surface โดยการเติม 2-butanol ที่ความเข้มข้น 0, 1.5, 2.67 และ 4.52 โดยปริมาตร เพื่อลดแรงตึงผิวของของไหลแบบสองสถานะ เป็นผลให้ค่าเลขเวเบอร์สูงขึ้น เนื่องจากตัวเลขเวเบอร์เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเฉื่อยและแรงตึงผิวของของไหล มีอิทธิพลต่อการไหลแบบสองสถานะ โดยระยะห่างระหว่างเจ็ทกับแผ่นพุ่งชน (H/d) เท่ากับ 7 ซึ่งเรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำอยู่ในช่วง 7,500 ถึง 15,000 และเรย์โนลด์นัมเบอร์ของอากาศอยู่ในช่วง 0 ถึง 5,900 โดยจะมีจะมีการติดตั้งเทอโมคัปเปิล ชนิด K ตามแนวยาวของแผ่นปะทะที่ถูกทำให้ร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.35

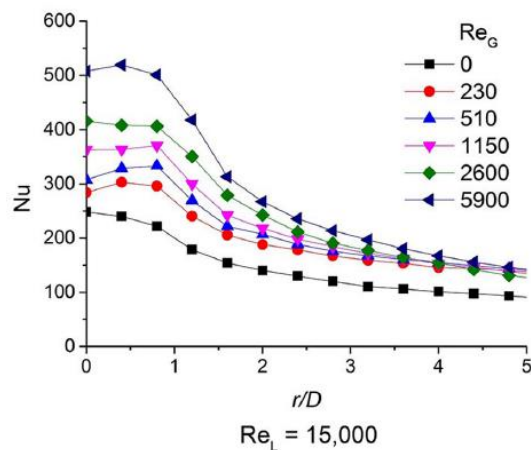


รูปที่ 2.35 ชุดทดลอง [26]

จากการศึกษาผลกระทบของแรงตึงผิวของการไหลแบบสองสถานะในท่อที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนผสมพองอากาศ พบว่าการลดแรงตึงผิวของของไหล ทำให้ค่า Weber number สูงขึ้น ซึ่งไม่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทที่พุ่งชน ดังแสดงในรูปที่ 2.36 และในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนผสมพองอากาศ พบว่า ค่าสูงสุดของนัสเซลท์ที่จุด Stagnation (r/D เท่ากับ 0) และที่จุด r/D เท่ากับ 5 มีค่าเพิ่มขึ้น 2.6 และ 1.8 เท่าตามลำดับ เทียบกับการใช้เจ็ทพุ่งชนแบบของไหลสถานะเดียว ดังแสดงในรูปที่ 2.37



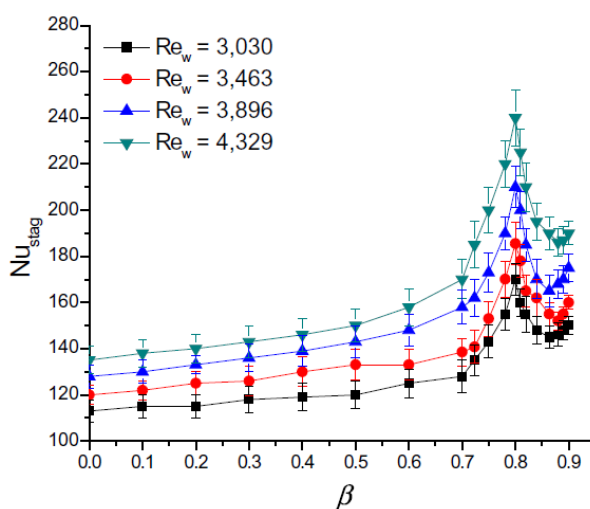
รูปที่ 2.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของนัสเซลท์ที่มุมเบอร์ที่ $r/D=5$ กับค่า Weber number [26]



รูปที่ 2.37 ความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซลท์ที่มุมเบอร์ตามตำแหน่งต่าง ๆ ที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของอากาศมีค่าต่างกัน [26]

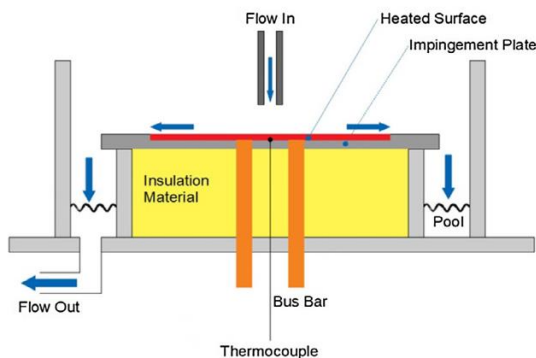
Friedrich และคณะ [27] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าของนัสเซลท์ที่มุมเบอร์ที่ Stagnation point และขนาดของ Hydraulic jump สำหรับเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศแบบ Free-surface โดยมีเงื่อนไขที่อัตราการไหลของน้ำคงที่ (fixed water flow rate condition) ซึ่งมีเรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำเท่ากับ 3,030 3,463 3,896 และ 4,329 โดยระยะห่างระหว่างเจ็ทกับแผ่นพุ่งชน (H/d) เท่ากับ 1 และมีสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม (β) อยู่ในช่วง 0 ถึง 0.9 ในส่วนของขนาดท่อเจ็ททางออกมีขนาด 5.86 mm แผ่นที่ปะทะเป็นแผ่นสแตนเลส มีขนาดความหนา 0.0508 mm ความกว้าง 12.5 mm และความยาว 192.8 mm ซึ่งจะถูกจ่ายไฟกระแสตรงจากแหล่งจ่ายไฟ เพื่อให้แผ่นปะทะร้อน โดยจะมีการ

ติดตั้งเทอโมคัปเปิล ชนิด K จำนวน 5 ตัว ตามแนวยาวของแผ่นปะทะเพื่อวัดค่าของนัสเซิลท์นัมเบอร์ที่ Stagnation point และค่าของนัสเซิลท์นัมเบอร์เฉพาะจุดตามแนวรัศมี จากการศึกษาพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าของนัสเซิลท์นัมเบอร์ที่ Stagnation point กับสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงแรกที่ β อยู่ในช่วง 0 ถึง 0.5 พบว่าค่าของนัสเซิลท์นัมเบอร์ที่ Stagnation point มีค่าเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นตรง เนื่องจากลักษณะการไหลในช่วงนี้จะมีลักษณะการไหลแบบฟองอากาศ เมื่อเพิ่มค่าสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเป็นผลทำให้จำนวนฟองอากาศเพิ่มขึ้นตาม ช่วงที่สองที่ β อยู่ในช่วง 0.5 ถึง 0.8 พบว่าค่าของนัสเซิลท์นัมเบอร์ที่ Stagnation point มีค่าเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งในช่วงนี้จะเป็นช่วงที่นัสเซิลท์นัมเบอร์ที่ Stagnation point มีค่าสูงสุดและช่วงที่สามที่ β อยู่ในช่วง 0.8 ถึง 0.9 พบว่าค่าของนัสเซิลท์นัมเบอร์ที่ Stagnation point มีค่าลดลง เนื่องจากการไหลมีปริมาตรของอากาศมากเกินไป จึงส่งผลให้ลดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนลง ดังแสดงในรูปที่ 2.38

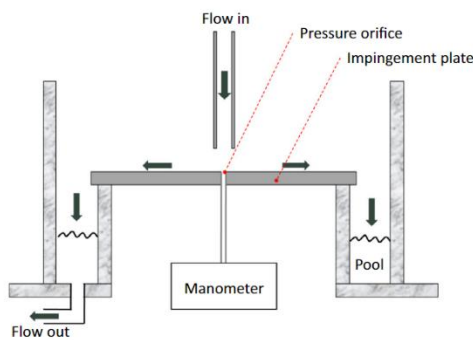


รูปที่ 2.38 ความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซิลท์นัมเบอร์ที่ Stagnation point กับสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม [27]

Glaspell A.W. และคณะ [28] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและผลของอุทกพลศาสตร์ของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศแบบ Free-surface ที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทกับแผ่นพุ่งชน (H/d) ที่ 0.02 ถึง 0.51 และมีสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม (β) อยู่ในช่วง 0.3 ถึง 0.8 ในส่วนของขนาดท่อเจ็ททางออกมีขนาด 5.86 mm แผ่นที่ปะทะเป็นแผ่นอะลูมิเนียม มีขนาดความหนา 0.0508 mm ความกว้าง 25 mm และความยาว 110 mm ซึ่งจะถูกจ่ายไฟกระแสตรงจากแหล่งจ่ายไฟ เพื่อทำให้แผ่นปะทะร้อน โดยจะมีการติดตั้งเทอโมคัปเปิล ชนิด K จำนวน 1 ตัว บริเวณกึ่งกลางของแผ่นปะทะเพื่อวัดค่าของนัสเซิลท์นัมเบอร์ที่ Stagnation point และมีการวัดความดันที่ปะทะพื้นผิวด้วยมานอมิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.39 และ 2.40 ตามลำดับ

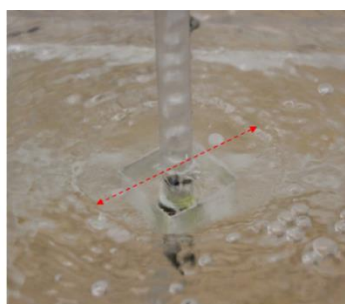


รูปที่ 2.39 ชุดทดลองการวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวที่ปะทะ [28]



รูปที่ 2.40 ชุดทดลองการวัดความดันบนพื้นผิวที่ปะทะ [28]

จากผลการศึกษาพบว่าค่าของนัสเซลล์ท์นัมเบอร์ที่ Stagnation point จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อลดระยะห่างระหว่างเจ็ทกับพื้นผิวที่ปะทะและขนาดของ Hydraulic jump จะมีความสัมพันธ์กับค่าความดันสถิตเนชัน โดยเมื่อลดระยะห่างระหว่างเจ็ทกับพื้นผิวที่ปะทะ จะพบว่าขนาดของ Hydraulic jump จะมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นและค่าของความดันที่ Stagnation point จะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.41 อีกทั้งสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ขนาดของ Hydraulic jump ใหญ่ขึ้นเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.42

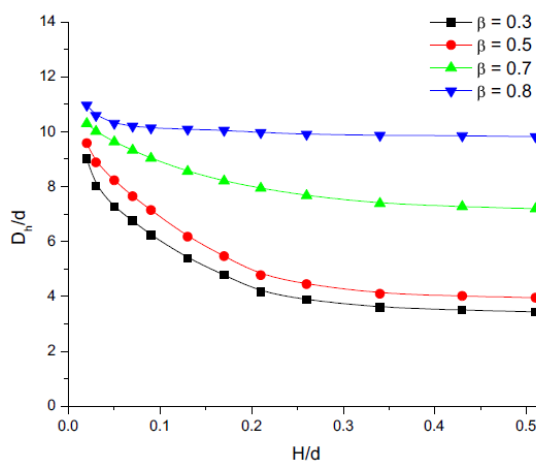


(ก) $H/d=0.02$



(ข) $H/d=0.51$

รูปที่ 2.41 ขนาดของ Hydraulic jump ที่ (ก) $H/d=0.02$ และ (ข) $H/d=0.51$ [28]



รูปที่ 2.42 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของ Hydraulic jump กับระยะห่างระหว่างเจ็ทกับพื้นผิวปะทะ ที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ค่าต่าง ๆ [28]

จากผลการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ว่างานวิจัยโดยส่วนใหญ่จะเป็นเจ็ทของไหลพุ่งชนที่เป็นน้ำผสมร่วมกับอากาศแบบ Free-surface แต่ยังไม่มีการศึกษาเจ็ทของไหลพุ่งชนที่เป็นน้ำผสมร่วมกับอากาศแบบ Submerged โดยทั่วไปแล้วเจ็ทของไหลพุ่งชนต่างชนิดกัน มีผลทำให้โครงสร้างการไหลและการถ่ายเทความร้อนต่างกัน อีกทั้งทิศทางการไหลแบบสองสถานะระหว่างน้ำกับอากาศในท่อเจ็ทโดยส่วนใหญ่จะมีลักษณะเคลื่อนที่ตามแนวตั้งลงหรือเคลื่อนที่ตามแรงโน้มถ่วงของโลก แต่ยังไม่มีการศึกษาลักษณะการไหลตามแนวตั้งขึ้นหรือเคลื่อนที่ต้านแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งมีผลทำให้ลักษณะของการไหลของน้ำผสมร่วมกับอากาศในท่อเจ็ทแตกต่างกัน ในการศึกษาโดยส่วนใหญ่การไหลของเจ็ทเป็นการไหลแบบน้ำผสมร่วมกับอากาศ ซึ่งผลของพฤติกรรมในการไหลก่อให้เกิดฟองอากาศในระดับที่แบ่งแยกสถานะอย่างชัดเจนในกระแสลำเจ็ท แต่ยังไม่มีการศึกษาการไหลของเจ็ทที่เป็นการไหลแบบน้ำผสมร่วมกับฟองอากาศระดับไมโครอน และการศึกษาโดยการวัดการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทของไหลพุ่งชนโดยส่วนใหญ่ ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลตามตำแหน่งต่าง ๆ บนพื้นผิวพุ่งชน ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นค่าตำแหน่งเฉพาะจุดในแนวรัศมี โดยในความเป็นจริงแล้วฟองอากาศจะมีการเคลื่อนที่ทั่วทั้งพื้นผิว จึงต้องมีวิธีการวัดการถ่ายเทความร้อนโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน ซึ่งนำไปสู่ผลลัพธ์ของค่าตำแหน่งเฉพาะจุดที่ละเอียดทั่วทั้งพื้นผิว

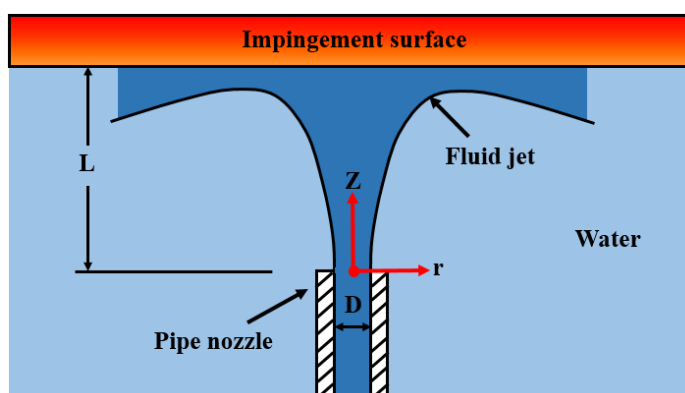
บทที่ 3

ชุดทดลองและขั้นตอนการวิจัย

ในบทที่ 3 จะกล่าวถึงรายละเอียดโมเดลที่ใช้ในการทดลอง รวมไปถึงจะมีการอธิบายรายละเอียดชุดทดลองและขั้นตอนต่าง ๆ ในการวิจัย ซึ่งในการทดลองของการไหลแบบสองสถานะที่ใช้ในระบบเจ็ทของไหลฟุ้งจะแบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่หนึ่งจะเป็นการไหลของน้ำผสมร่วมกับอากาศ ซึ่งในการทดลองจะศึกษาลักษณะการไหลแบบสองสถานะอันเนื่องมาจากอิทธิพลของความเร็วของอากาศและความเร็วของน้ำที่ไหลมาผสมกันในส่วนของท่อเจ็ทและขณะออกจากปากทางออกท่อเจ็ทถึงพื้นผิวที่ฟุ้ง ซึ่งนำไปสู่การเลือกกรณีที่ครอบคลุมพฤติกรรมในการไหลแบบสองสถานะ เพื่อใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะการไหลของเจ็ทฟุ้งในท่อเจ็ทและขณะออกจากปากทางออกท่อเจ็ทถึงพื้นผิวที่ฟุ้งด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (High-speed camera) ที่มีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทฟุ้งโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน (Infrared thermal imaging camera) และส่วนที่สองจะเป็นการไหลของน้ำผสมร่วมกับฟองอากาศระดับไมครอน (Microbubble) ซึ่งในการทดลองจะศึกษาอิทธิพลของขนาดของฟองอากาศที่ใช้ในระบบเจ็ทของไหลด้วยกล้องถ่ายภาพจุลทรรศน์แบบดิจิทัล (Microscope digital camera) ที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทฟุ้งโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนเช่นกัน

3.1 โมเดลของเจ็ทของไหลฟุ้ง

ในรูปที่ 3.1 แสดงโมเดลเจ็ทของไหลฟุ้ง โดยท่อเจ็ท (Pipe nozzle) เป็นวัสดุอะคริลิกใสโดย D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของท่อเจ็ทมีค่าเท่ากับ 9.5 mm ซึ่งของไหลเจ็ท (Fluid jet) จะถูกบังคับให้พุ่งออกจากปากทางออกของท่อเจ็ทสู่ของไหลบริเวณโดยรอบที่เป็นน้ำ ซึ่งเป็นระบบเจ็ทฟุ้งแบบ submerged หลังจากนั้นของไหลเจ็ทจะไหลปะทะกับพื้นผิว (Impingement surface) โดย L คือ ระยะห่างระหว่างปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่ฟุ้ง

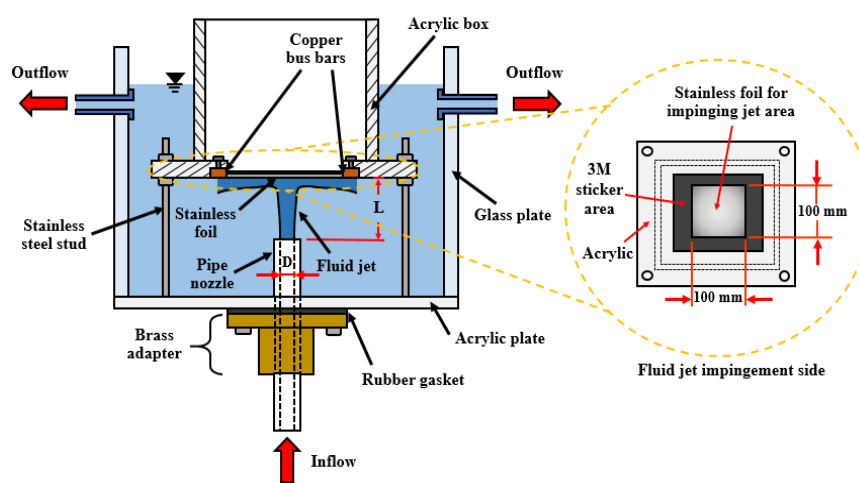


รูปที่ 3.1 โมเดลเจ็ทของไหลฟุ้ง

3.2 รายละเอียดของชุดทดลอง

สำหรับรายละเอียดของชุดทดลองจะอธิบายถึงส่วนทดสอบที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชน ซึ่งต่อมาระบบชุดทดลองจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ตามรูปแบบการสร้างการไหลแบบสองสถานะระหว่างน้ำและอากาศ ได้แก่ ชุดทดลองสำหรับการไหลแบบสองสถานะที่เป็นน้ำผสมร่วมกับอากาศ และชุดทดลองสำหรับการไหลแบบสองสถานะที่เป็นน้ำผสมพองอากาศระดับไมครอน

3.2.1 ชุดทดสอบที่ใช้ในการทดลอง (Test section)

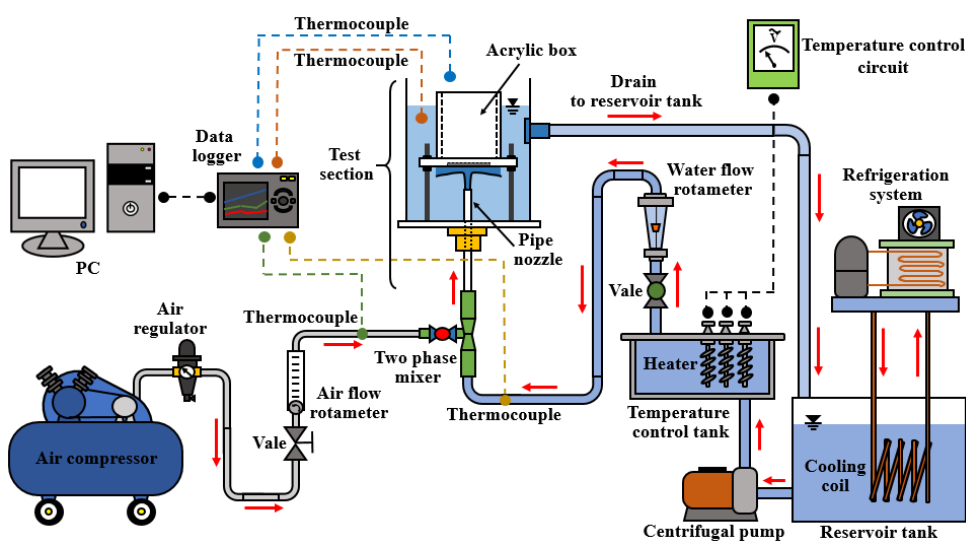


รูปที่ 3.2 แผนผังส่วนทดสอบ

ในรูปที่ 3.2 แสดงชุดทดสอบเป็นบริเวณที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการไหลภายในท่อเจ็ทและขณะออกจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวพุ่งชนในกรณีของการไหลแบบสองสถานะที่เป็นน้ำผสมร่วมกับอากาศ การศึกษาการวัดขนาดของพองอากาศในกรณีของการไหลแบบสองสถานะที่เป็นน้ำผสมพองอากาศระดับไมครอน รวมไปถึงการศึกษากการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งของไหลเจ็ทจะไหลเข้าสู่ชุดทดสอบผ่านท่อเจ็ท (Pipe nozzle) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของท่อเจ็ทมีค่าเท่ากับ $D=9.5$ mm และขนาดความยาวของท่อเจ็ทมีค่าเท่ากับ 1000 mm เพื่อให้ของไหลเจ็ทมีการพัฒนาการไหลอย่างสมบูรณ์ (Fully developed flow) โดยของไหลจะพุ่งออกจากท่อเจ็ทสู่บริเวณถึงบรรจุน้ำที่ถูกออกแบบเป็นตุ้กระจกใสมีขนาดความกว้าง, ความยาวและความสูงมีค่าเท่ากับ 300 mm, 300 mm และ 300 mm ตามลำดับ ซึ่งอุปกรณ์ตัวต่อทองเหลือง (Brass adapter) ทำหน้าที่ยึดท่อเจ็ทให้สวมเข้ากับถึงบรรจุน้ำ ต่อมาของไหลเจ็ทจะพุ่งปะทะเข้ากับพื้นผิวที่เป็นแผ่นสแตนเลส (SUS304) ที่ถูกซิงด้วยแท่งทองแดง (Copper bus bar) ทั้งสองข้าง มีขนาดความหนา 0.03 mm และพื้นที่ที่ของไหลเจ็ทพุ่งชนมีขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 100 mm และ 100 mm ตามลำดับ บริเวณด้านบนบนของแผ่นสแตนเลสจะสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่เป็นอากาศ โดยแผ่นสแตนเลสด้านนี้จะถูกเคลือบด้วยสีดำด้าน และจะมีกล่อง (Acrylic box) ล้อมรอบแผ่นสแตนเลส เพื่อไว้ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทของไหลพุ่ง

ชนโดยการถ่ายภาพความร้อนบนพื้นผิวแอสแตนเลสต่อไป จากนั้นเมื่อระดับน้ำในตู้กระจกใสเพิ่มสูงขึ้น จนอยู่ในระดับเดียวกับท่อทางออกที่ได้ติดตั้งไว้ทั้ง 4 ด้านของตู้กระจก ซึ่งบังคับให้น้ำไหลออกบริเวณนี้เพื่อใช้ในการหมุนเวียนเป็นระบบต่อไป โดยทั่วไประดับความลึกของน้ำจากปลายทางออกของท่อ เจ็ทถึงพื้นผิวน้ำมีผลต่อพฤติกรรมไหลของเจ็ทที่เป็นน้ำผสมร่วมกับอากาศ จึงมีการกำหนดระดับความลึกให้คงที่ที่ 190 mm เพื่อพิจารณาผลของพฤติกรรมไหลที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชน สำหรับความดันที่จุดบริเวณทางออกของเจ็ทที่ค่าเดียวกัน

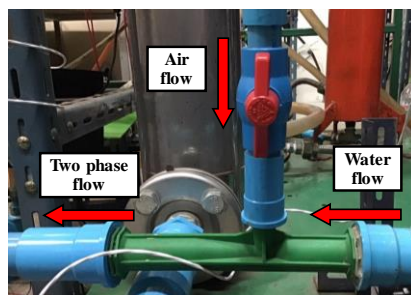
3.2.2 ชุดทดลองสำหรับการไหลแบบสองสถานะที่เป็นน้ำผสมร่วมกับอากาศ



รูปที่ 3.3 แผนผังชุดทดลองสำหรับการไหลแบบสองสถานะที่เป็นน้ำผสมร่วมกับอากาศ

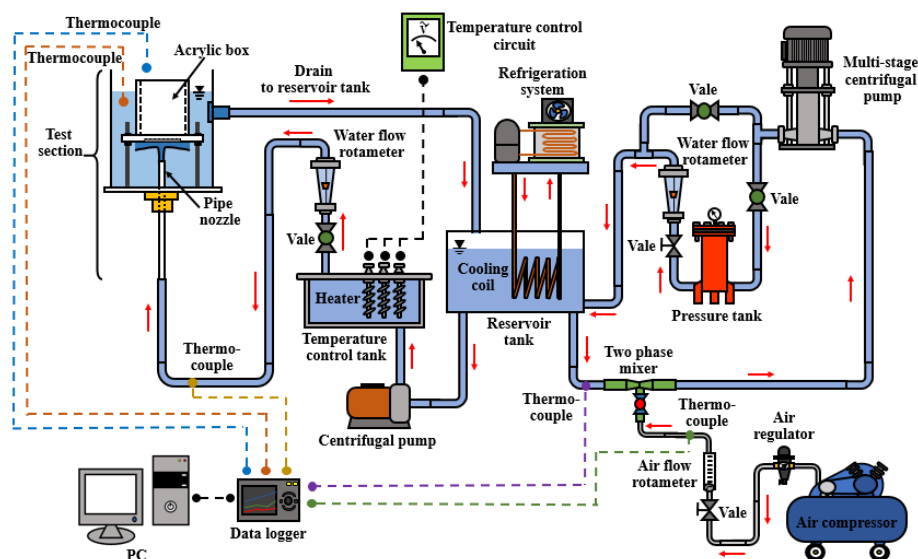
ในรูปที่ 3.3 แสดงแผนผังชุดทดลองสำหรับการไหลแบบสองสถานะที่เป็นน้ำผสมร่วมกับอากาศ โดยเริ่มต้นจากน้ำที่อยู่ในถังน้ำ (Reservoir tank) ซึ่งจะถูกรักษาอุณหภูมิโดยการใช้ตู้ควบคุมอุณหภูมิในถัง จากนั้นจะถูกปั๊ม (Centrifugal pump) สูบเข้าสู่ถังควบคุมอุณหภูมิ (Temperature control tank) ซึ่งจะมีควบคุมอุณหภูมิของน้ำให้คงที่ ต่อมาน้ำจะไหลผ่านโรตاميเตอร์น้ำ ซึ่งทำหน้าที่ในการวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำ ในขณะที่เดียวกันอากาศจะถูกปั๊มด้วยปั๊มลมเข้าสู่ชุดดักความชื้นและวาล์วปรับความดัน จากนั้นอากาศจะไหลเข้าสู่โรตاميเตอร์อากาศเพื่อทำหน้าที่ในการวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ ต่อมาน้ำและอากาศจะไหลเข้าสู่ท่อเวนทิวรี (Venturi tube) เพื่อสร้างของไหลแบบสองสถานะระหว่างน้ำและอากาศ โดยรูปแบบลักษณะการไหลแบบสองสถานะจะขึ้นอยู่กับความเร็วของอากาศและความเร็วของน้ำที่ไหลมาผสมกัน ซึ่งขนาดของท่อเวนทิวรีที่ใช้มีขนาดทางเข้าของน้ำ 1 inch และทางเข้าของอากาศ 0.5 inch ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยในการทดลองจะมีการวัดอุณหภูมิของน้ำและอากาศก่อนการผสมที่ท่อเวนทิวรีด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด PT-100 (± 0.05 °C) มีการกำหนดอุณหภูมิทางเข้าของน้ำก่อนการผสมที่ 28.0 ± 0.1 °C อุณหภูมิทางเข้าของอากาศก่อนการผสมที่ 25.0 ± 0.2 °C และอุณหภูมิอากาศภายในห้องมีค่าเท่ากับ 25.0 ± 1.0 °C จากนั้น

ของไหลที่เป็นน้ำผสมอากาศจะไหลเข้าสู่ชุดทดสอบต่อไป สำหรับชุดทดลองในหัวข้อนี้ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการไหลของเจ็ทฟุ้งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศภายในท่อเจ็ทและขณะออกจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่ฟุ้งชน และการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทฟุ้งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศ



รูปที่ 3.4 ท่อเวนจูรี (Venturi tube)

3.2.3 ชุดทดลองสำหรับการไหลแบบสองสถานะที่เป็นน้ำผสมฟองอากาศระดับไมครอน (Microbubble)



รูปที่ 3.5 แผนผังชุดทดลองสำหรับการไหลแบบสองสถานะที่เป็นน้ำผสมฟองอากาศระดับไมครอน

ในรูปที่ 3.5 แสดงแผนผังชุดทดลองสำหรับการไหลแบบสองสถานะที่เป็นน้ำผสมฟองอากาศระดับไมครอน ซึ่งในชุดทดลองสามารถแบ่งโครงสร้างได้เป็น 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนแรกเป็นส่วนที่สร้างของไหลที่เป็นน้ำผสมฟองอากาศระดับไมครอนและส่วนที่สองเป็นส่วนที่นำของไหลที่เป็นน้ำผสมฟองอากาศระดับไมครอนไปใช้ในส่วนทดสอบ โดยในส่วนแรกเริ่มต้นจากน้ำที่อยู่ในถังน้ำ (Reservoir tank) ถูกปั๊มขึ้น (Multi-stage centrifugal pump) สูบผ่านท่อเวนจูรีที่ทำหน้าที่สร้างการไหลแบบสองสถานะ ในขณะเดียวกันอากาศจะถูกปั๊มด้วยปั๊มลมเข้าสู่ชุดวัดความชื้นและวาล์ว

ปรับความดัน จากนั้นอากาศจะไหลเข้าสู่โรตารีมิเตอร์อากาศเพื่อทำหน้าที่ในการวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ และเข้าสู่ท่อเวนทูรีเช่นเดียวกัน ทำให้เกิดการไหลแบบสองสถานะระหว่างน้ำและอากาศ ต่อมาของไหลจะไหลเข้าสู่ถังความดัน (Pressure tank) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งหน้าที่ในการสร้างฟองอากาศระดับไมครอน โดยใช้หลักการเพิ่มความดันให้กับระบบในถังความดันที่บรรจุน้ำที่ผสมร่วมกับอากาศจากท่อเวนทูรี ส่งผลให้ค่าการละลายของอากาศในน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดฟองอากาศที่มีขนาดเล็กกระจายตัวทั่วภายในถังความดัน ในการทดลองจะกำหนดความดันอยู่ในช่วง 3-6 bar [29-32] ซึ่งค่าการละลายของอากาศในน้ำที่ความดันต่าง ๆ เมื่ออุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 25 °C [33] จะแสดงในตารางที่ 3.1 จากนั้นน้ำที่ผสมกับฟองอากาศระดับไมครอนจะไหลออกจากถังความดันเข้าสู่โรตารีมิเตอร์น้ำเพื่อวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำ ต่อมาจะเข้าสู่ถังน้ำเพื่อให้ในถังเต็มไปด้วยฟองอากาศระดับไมครอน และส่วนที่สองเริ่มต้นจากน้ำที่ผสมไปด้วยฟองอากาศระดับไมครอนที่อยู่ในถังน้ำ (Reservoir tank) จะถูกควบคุมโดยการลดอุณหภูมิในถัง จากนั้นจะถูกปั๊มน้ำ (Centrifugal pump) สูบเข้าสู่ถังควบคุมอุณหภูมิ (Temperature control tank) ซึ่งจะมีควบคุมอุณหภูมิของน้ำให้คงที่ ต่อมาน้ำจะไหลผ่านโรตารีมิเตอร์น้ำ ซึ่งทำหน้าที่ในการวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำ จากนั้นของไหลจะไหลเข้าสู่ชุดทดสอบต่อไป สำหรับชุดทดลองในหัวข้อนี้ใช้ในการศึกษาการวัดขนาดของฟองอากาศที่ใช้ในเจ็ทพุงชนด้วยน้ำผสมร่วมกับฟองอากาศระดับไมครอน และการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทพุงชนด้วยน้ำผสมร่วมกับฟองอากาศระดับไมครอน



รูปที่ 3.6 ถังความดัน (Pressure tank)

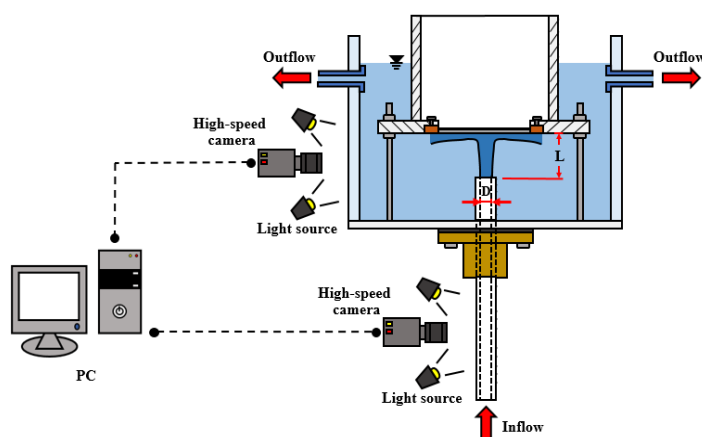
ตารางที่ 3.1 ค่าการละลายของอากาศในน้ำที่ความดันต่าง ๆ

ความดัน (atm)	อากาศละลายน้ำ (g/kg)
1	0.023
2	0.045
3	0.068
4	0.091
5	0.114
6	0.136

3.3 การศึกษาพฤติกรรมการไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศภายในท่อเจ็ทและขณะออกจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชน

3.3.1 รายละเอียดชุดทดลอง

ในรูปที่ 3.7 แสดงแผนภาพชุดทดสอบสำหรับการศึกษาพฤติกรรมการไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศภายในท่อเจ็ทและขณะออกจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชน โดยในการศึกษาพฤติกรรมในการไหลจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรกเป็นการไหลภายในท่อเจ็ทเป็นบริเวณก่อนที่ของไหลเจ็ทจะพุ่งออกจากหัวฉีด ซึ่งจะมีการถ่ายภาพด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (High-speed camera: Photron FASTCAM Mini UX100) เพื่อศึกษารูปแบบการไหลและนำไปสู่ผลลัพธ์ของการแบ่งช่วงพฤติกรรมการไหลแบบสองสถานะ และส่วนที่สองเป็นการไหลขณะออกจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชน ด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลแบบสองสถานะระหว่างน้ำผสมร่วมกับอากาศที่ออกจากท่อเจ็ทและเข้าพุ่งชนพื้นผิว ซึ่งนำไปสู่ผลลัพธ์การอธิบายพฤติกรรมในการไหลที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชน



รูปที่ 3.7 แผนภาพชุดทดสอบสำหรับการศึกษาพฤติกรรมการไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศภายในท่อเจ็ทและขณะออกจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชน

3.3.2 วิธีการทดลอง

ในการศึกษาพฤติกรรมการไหลภายในท่อเจ็ท จะมีการควบคุมโรตاميเตอร์น้ำและโรตاميเตอร์อากาศเพื่อปรับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำและอากาศที่ค่าต่าง ๆ ก่อนที่จะไหลเข้ามาผสมกันที่ท่อเวนทูลี ซึ่งอิทธิพลของความเร็วน้ำและความเร็วอากาศที่ไหลมาผสมกันมีผลต่อพฤติกรรมการไหลแบบสองสถานะภายในท่อเจ็ท โดยเริ่มต้นกำหนดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำที่ค่า 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 L/min ท่อเจ็ทมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 9.5 mm และกำหนดให้อุณหภูมิทางเข้าของน้ำก่อนการผสมที่ท่อเวนทูลีมีค่าเท่ากับ 28 ± 0.1 °C สามารถคำนวณค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำต่าง ๆ ได้ ต่อมากำหนดค่าสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของแก๊สกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเท่ากับ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 และ 0.7 ซึ่งสามารถคำนวณค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศได้ที่ค่าต่าง ๆ ในกรณีที่

อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำที่ค่าหนึ่ง โดยตารางที่ 3.2 แสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมในการไหลภายในท่อเจ็ท

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมในการไหลภายในท่อเจ็ท

ชื่อตัวแปร	กำหนดค่าตัวแปร
เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของน้ำ (Re_w)	8,000 ถึง 26,700
สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม (β)	0.1 ถึง 0.7
ขนาดของท่อเจ็ท (L)	9.5 mm
อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าท่อเวนทูรี	28 ± 0.1 °C
อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าท่อเวนทูรี	25 ± 0.2 °C

สำหรับการไหลแบบสองสถานะระหว่างน้ำและอากาศภายในท่อเจ็ท จะพิจารณาตัวแปรของความเร็วผิวของน้ำภายในท่อเจ็ท (Superfacial water velocity) และความเร็วผิวของอากาศภายในท่อเจ็ท (Superfacial air velocity) เป็นตัวแปรที่ใช้พิจารณาในการแบ่งช่วงพฤติกรรมในการไหลของน้ำผสมอากาศภายในท่อเจ็ท

ความเร็วผิวของน้ำภายในท่อเจ็ท (Superfacial water velocity) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.1)

$$j_w = \frac{\dot{Q}_w}{A_{jet}} \quad (3.1)$$

โดยที่ \dot{Q}_w คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำ (L/min)

A_{jet} คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อเจ็ท (m^2)

ความเร็วผิวของอากาศภายในท่อเจ็ท (Superfacial air velocity) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.2)

$$j_a = \frac{\dot{Q}_a}{A_{jet}} \quad (3.2)$$

โดยที่ \dot{Q}_a คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ (L/min)

A_{jet} คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อเจ็ท (m^2)

ในการศึกษาพฤติกรรมการไหลของเจ็ทฟุ้งชน จะเลือกศึกษาจากกรณีที่ครอบคลุมพฤติกรรมการไหลแบบสองสถานะภายในท่อเจ็ทมากที่สุด ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ได้นำกรณีที่กำลังเรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่าเท่ากับ 24,000 ที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของแก๊สกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเท่ากับ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 และ 0.7 ตามลำดับ และระยะห่างจากปากทางออกของท่อเจ็ทถึงพื้นผิวที่ฟุ้งชนมีค่าเท่ากับ 2D, 4D, 6D, 8D และ 10D ตามลำดับ ซึ่งตารางที่ 3.3 แสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการไหลของเจ็ทฟุ้งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศ

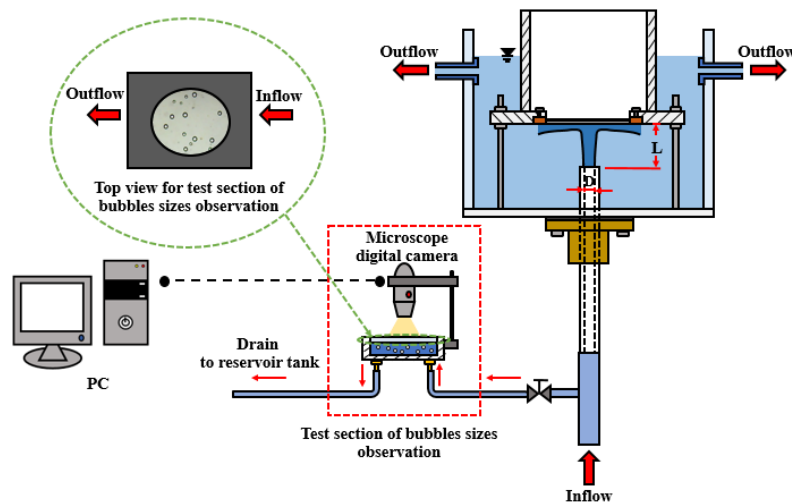
ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการไหลของเจ็ทฟุ้งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศ

ชื่อตัวแปร	กำหนดค่าตัวแปร
เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำ (Re_w)	24,000
สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม (β)	0.0 ถึง 0.7
ขนาดของท่อเจ็ท (D)	9.5 mm
ระยะห่างจากปากทางออกของท่อเจ็ทถึงพื้นผิวที่ฟุ้งชน (L)	2D, 4D, 6D, 8D และ 10D
อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าท่อเวนทูรี	28 ± 0.1 °C
อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าท่อเวนทูรี	25 ± 0.2 °C

3.4 การศึกษาการวัดขนาดของฟองอากาศที่ใช้ในเจ็ทฟุ้งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศระดับไมครอน

3.4.1 รายละเอียดชุดทดลอง

ในรูปที่ 3.8 แสดงแผนภาพชุดทดสอบสำหรับการศึกษาการวัดขนาดของฟองอากาศที่ใช้ในเจ็ทฟุ้งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศระดับไมครอน ก่อนที่เจ็ทของไหลที่เป็นน้ำผสมฟองอากาศจะไหลเข้าท่อเจ็ท จะมีท่อดักจับฟองอากาศติดตั้งอยู่ก่อน ซึ่งของไหลเจ็ทที่ใช้จะไหลเข้าท่อนี้ จากนั้นไหลไปยังชุดดักจับฟองอากาศสำหรับการวัดขนาดฟองอากาศ (Test section of bubbles sizes observation) ซึ่งจะมีการถ่ายภาพฟองอากาศในบริเวณนี้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล (Microscope digital camera: H1000X 5.0 Mega Pixel) ซึ่งมีกำลังขยาย 1,000 เท่า โดยติดตั้งอยู่บริเวณด้านบนของชุดดักจับฟองอากาศ ต่อมาของไหลเจ็ทจะไหลออกจากชุดดักจับฟองอากาศเข้าสู่ถังน้ำเพื่อหมุนเวียนใช้ในระบบต่อไป



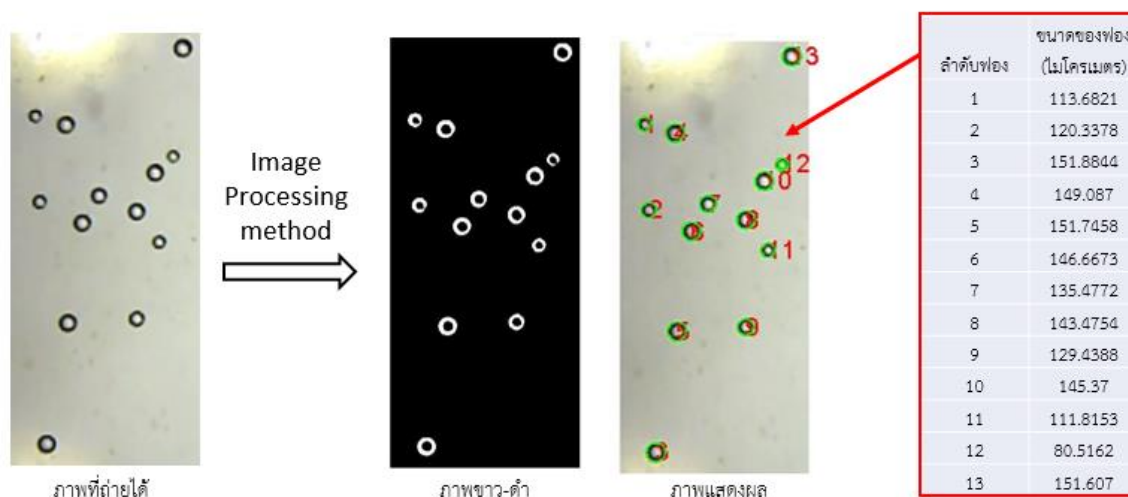
รูปที่ 3.8 แผนภาพชุดทดสอบสำหรับการศึกษารวัดขนาดของฟองอากาศที่ใช้ในเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศระดับไมครอน

3.4.2 วิธีการทดลอง

ในการวัดขนาดของฟองอากาศที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศระดับไมครอน จะมีการควบคุมโรตاميเตอร์น้ำและโรตاميเตอร์อากาศก่อนเข้าท่อเวนทูรีเพื่อสร้างการไหลแบบสองสถานะ โดยกำหนดค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำที่ 20 L/min และกำหนดให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศที่ 1 L/min ต่อมาเมื่อของไหลแบบสองสถานะไหลเข้าสู่ถึงความดันจะมีการควบคุมความดันภายในถึงที่ค่า 3, 4, 5 และ 6 bar เพื่อสร้างการไหลที่เป็นน้ำผสมฟองอากาศระดับไมครอน โดยจะมีการควบคุมโรตاميเตอร์น้ำสำหรับวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำผสมฟองอากาศระดับไมครอนในการไหลภายในท่อเจ็ทที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของน้ำเท่ากับ 16,000 ซึ่งก่อนที่ของไหลจะไหลเข้าท่อเจ็ท จะมีของไหลส่วนหนึ่งไหลเข้าชุดดักจับฟองอากาศ โดยเริ่มต้นถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลในบริเวณชุดดักจับฟองอากาศในแต่ละกรณีที่ค่าความดันที่ใช้ในถึงความดันแตกต่างกัน เพื่อศึกษาผลของขนาดฟองอากาศที่มีอิทธิพลจากค่าความดันที่ใช้ภายในถึงสำหรับสร้างฟองอากาศระดับไมครอน โดยจะมีการถ่ายภาพจำนวน 100 รูป สำหรับความดันที่ใช้ภายในถึงที่ 3, 4, 5 และ 6 bar ตามลำดับ ซึ่งแต่ละรูปจะแสดงฟองอากาศจำนวน 20-50 ฟอง จากนั้นนำภาพที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ (Image Processing Method) ดังแสดงในรูปที่ 3.9 เพื่อหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศแต่ละฟองจากภาพถ่าย สำหรับเงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษารวัดขนาดของฟองอากาศที่ใช้ในเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศระดับไมครอน แสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 เงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาการวัดขนาดของฟองอากาศที่ใช้ในเจ็ทฟุ้งชนด้วยน้ำผสม ฟองอากาศระดับไมครอน

ชื่อตัวแปร	กำหนดค่าตัวแปร
อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำที่ใช้ในการผสมที่ท่อเวนทูรี	20 L/min
อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศที่ใช้ในการผสมที่ท่อเวนทูรี	1 L/min
ความดันที่ใช้ในถังความดัน	3, 4, 5 และ 6 bar
เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำ (Re_w)	16,000
อุณหภูมิของน้ำก่อนที่ฟุ้งออกจากท่อเจ็ท	28 ± 0.1 °C



รูปที่ 3.9 ตัวอย่างการคำนวณหาขนาดฟองอากาศด้วยการวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม MATLAB

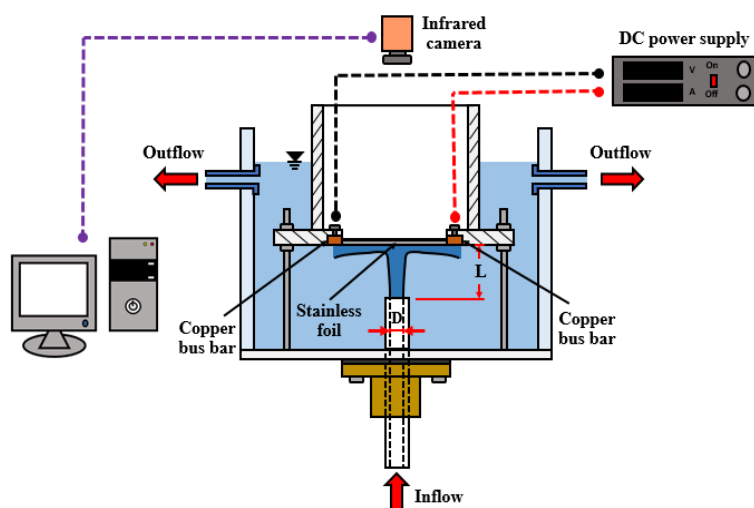
3.5 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทฟุ้งชน

ในหัวข้อนี้ได้แบ่งการวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทของไหลฟุ้งชน ตามรูปแบบการสร้างการไหลแบบสองสถานะระหว่างน้ำและอากาศเป็น 2 กรณี ได้แก่ การไหลแบบสองสถานะที่เป็นน้ำผสมร่วมกับอากาศ และการไหลแบบสองสถานะที่เป็นน้ำผสมฟองอากาศระดับไมครอน ซึ่งชุดทดสอบที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและวิธีการทดลองมีลักษณะเหมือนกัน จึงขอกล่าวอธิบายรายละเอียดในหัวข้อนี้

3.5.1 รายละเอียดชุดทดลอง

ในรูปที่ 3.10 แสดงแผนภาพชุดทดสอบสำหรับการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทฟุ้งชน โดยของไหลเจ็ทเมื่อฟุ้งออกจากหัวฉีดจะเข้าปะทะกับแผ่นสแตนเลส (SUS304) ที่ถูกขึงด้วยแท่งทองแดง (Copper bus bar) ทั้งสองข้าง มีขนาดความหนา 0.03 mm และพื้นที่ที่ของไหลเจ็ทฟุ้งชน

มีขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 100 mm และ 100 mm ตามลำดับ โดยจะมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านแท่งทองแดงด้วยเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply) เพื่อให้พื้นผิวแผ่นสแตนเลสร้อนขึ้น บริเวณอีกด้านของพื้นผิวสแตนเลสเปิดสู่สภาพแวดล้อมที่เป็นอากาศและถูกเคลือบด้วยสีดำด้าน เพื่อใช้ในการถ่ายภาพการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวที่เจ็ทของไหลพุ่งชนด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน (Infrared camera: Optris PI Series PI640)



รูปที่ 3.10 แผนภาพชุดทดสอบสำหรับการศึกษากล้องถ่ายภาพความร้อนของเจ็ทพุ่งชน

3.5.2 วิธีการทดลอง

การทดลองการวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทของไหลพุ่งชน ในส่วนของการควบคุมอัตราการไหลของเจ็ท สามารถควบคุมได้จากการปรับโรตารีมิเตอร์น้ำและโรตารีมิเตอร์อากาศ โดยจะมีการวัดอุณหภูมิของน้ำและอากาศก่อนเข้าท่อเวนทูรีที่ทำหน้าที่ในการสร้างการไหลแบบสองสถานะ ซึ่งจะมีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ก่อนการผสม การควบคุมอัตราการไหลของเจ็ทมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องดังนี้

เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำ (Re_w) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.3)

$$Re_w = \frac{\rho_w v_w D}{\mu_w} \quad (3.3)$$

โดยที่ ρ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)

v_w คือ ความเร็วเฉลี่ยของน้ำที่ปากทางออกของเจ็ท (m/s)

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเจ็ท (m)

μ_w คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดของน้ำ ($kg/m.s$)

สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม (β) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.4)

$$\beta = \frac{\dot{Q}_a}{\dot{Q}_a + \dot{Q}_w} \quad (3.4)$$

โดยที่ \dot{Q}_a คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ (L/min)

\dot{Q}_w คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำ (L/min)

ต่อมาในส่วน of แผ่นสแตนเลสจะมีจ่ายกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ให้แก่แผ่นสแตนเลส ทำให้เกิดฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิว ซึ่งปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.5)

$$\dot{q}_{\text{input}} = \frac{IV}{A} \quad (3.5)$$

โดยที่ I คือ กระแสไฟฟ้า (A)

V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)

A คือ พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนบริเวณที่เจ็ทของไหลพุ่งชนพื้นผิว (m^2)

โดยแผ่นสแตนเลสด้านที่สัมผัสกับเจ็ทของไหลพุ่งชนจะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนกันระหว่างของไหลกับพื้นผิวร้อน ในขณะที่เดียวกันบริเวณอีกด้านจะสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่เป็นอากาศ โดยทั่วไปแผ่นสแตนเลสที่ร้อนจะมีการสูญเสียฟลักซ์ความร้อนอันเนื่องมาจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติและการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.6) และ (3.7) ตามลำดับ

$$\dot{q}_{\text{conv}} = h_c(\bar{T}_w - \bar{T}_{\text{surr}}) \quad (3.6)$$

$$\dot{q}_{\text{rad}} = \varepsilon\sigma(\bar{T}_w^4 - \bar{T}_{\text{surr}}^4) \quad (3.7)$$

โดยที่ h_c คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$)

ε คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

σ คือ ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}^4$)

\bar{T}_w คือ อุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนขณะมีการจ่ายฟลักซ์ความร้อน ($^{\circ}\text{C}$)

\bar{T}_{surr} คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศโดยรอบ ($^{\circ}\text{C}$)

ดังนั้นพื้นผิวสแตนเลสที่มีการปลดปล่อยฟลักซ์ความร้อนสุทธิ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.8)

$$\dot{q}_{\text{net}} = \dot{q}_{\text{input}} - \dot{q}_{\text{conv}} - \dot{q}_{\text{rad}} \quad (3.8)$$

โดยที่ \dot{q}_{input} คือ ฟลักซ์ความร้อนที่ให้แก่แผ่นสแตนเลส (W/m^2)

\dot{q}_{conv} คือ การสูญเสียฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยด้วยการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (W/m^2)

\dot{q}_{rad} คือ การสูญเสียฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยด้วยการแผ่รังสีความร้อน (W/m^2)

ในการถ่ายภาพการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวที่เจ็ทของไหลพุ่งชนในแต่ละกรณี โดยจะมีการถ่ายภาพจำนวน 500 ภาพ สำหรับภาพพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนขณะมีการจ่ายฟลักซ์ความร้อน (\bar{T}_w) ซึ่งเป็นการสมมติให้พื้นผิวมีการให้ฟลักซ์ความร้อนและภาพพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนขณะไม่มีการจ่ายฟลักซ์ความร้อน (\bar{T}_{aw}) ซึ่งเป็นการสมมติให้พื้นผิวเป็น Adiabatic wall โดยในแต่ละภาพจะแสดงค่าอุณหภูมิแต่ละจุดบนพื้นผิว ซึ่งพื้นที่ที่นำมาวิเคราะห์มีขนาด $57.5 \text{ mm} \times 57.5 \text{ mm}$ (1 pixel = 0.5 mm) ทำให้ผลลัพธ์ของการกระจายอุณหภูมิตั้งหมด 115×115 จุด ต่อมาภาพผลลัพธ์แต่ละภาพจะนำมาผ่านการคำนวณโดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อทำการเฉลี่ยอุณหภูมิในแต่ละจุด จากรูปจำนวน 500 รูป ซึ่งผลลัพธ์สุดท้ายที่ได้จะแสดงเป็นค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนและนัสเซิลท์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (3.9) และ (3.10) ตามลำดับ

$$\bar{h} = \frac{\dot{q}_{\text{net}}}{(\bar{T}_w - \bar{T}_{aw})} \quad (3.9)$$

โดยที่ \dot{q}_{net} คือ ฟลักซ์ความร้อนสุทธิ (W/m^2)

\bar{T}_w คือ อุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนขณะมีการจ่ายฟลักซ์ความร้อน ($^{\circ}\text{C}$)

\bar{T}_{aw} คือ อุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนขณะไม่มีการจ่ายฟลักซ์ความร้อน ($^{\circ}\text{C}$)

$$\bar{Nu} = \frac{\bar{h}D}{k_w} \quad (3.10)$$

โดยที่ \bar{h} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ($\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$)

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเจ็ท (m)

k_w คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของน้ำ ($\text{W}/\text{m}.\text{K}$)

3.5.3 เงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศ

ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศ จะมีการควบคุมโรตاميเตอร์น้ำและโรตاميเตอร์อากาศก่อนเข้าท่อเวนทูรีเพื่อสร้างการไหลแบบสองสถานะ โดยกำหนดให้เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำที่ 24,000 หรืออัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำที่ 9 L/min ที่อุณหภูมิทางเข้าท่อเวนทูรีที่ 28 ± 0.1 °C ซึ่งมีสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ 0.0 ถึง 0.7 ทำได้โดยการปรับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ ที่อุณหภูมิทางเข้าท่อเวนทูรีที่ 25 ± 0.2 °C ตามแสดงในตารางที่ 3.5 และระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชน ทำได้โดยการเลื่อนแผ่นพุ่งชนให้ห่างจากทางออกของท่อเจ็ทที่ระยะ 2D, 4D, 6D, 8D และ 10D ตามลำดับ ซึ่งในตารางที่ 3.6 แสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศ

ตารางที่ 3.5 ค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำและค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรอากาศที่ใช้ในการผสมบริเวณท่อเวนทูรี

สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม, β	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำ, \dot{Q}_w (L/min)	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ, \dot{Q}_a (L/min)
0.0	9	0
0.1	9	1
0.2	9	2.25
0.3	9	3.86
0.4	9	6
0.5	9	9
0.6	9	13.5
0.7	9	21

ตารางที่ 3.6 เงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศ

ชื่อตัวแปร	กำหนดค่าตัวแปร
เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำ (Re_w)	24,000
สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม (β)	0.0 ถึง 0.7
ขนาดของท่อเจ็ท (D)	9.5 mm
ระยะห่างจากปากทางออกของท่อเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชน (L)	2D, 4D, 6D, 8D และ 10D
อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าท่อเวนทูรี	28 ± 0.1 °C
อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าท่อเวนทูรี	25 ± 0.2 °C
อุณหภูมิห้องขณะทดลอง	25 ± 0.5 °C

3.5.4 เงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศระดับไมครอน

ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศระดับไมครอน จะมีการควบคุมโรตاميเตอร์น้ำและโรตاميเตอร์อากาศก่อนเข้าท่อเวนทูรีเพื่อสร้างการไหลแบบสองสถานะ โดยกำหนดให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำที่ 20 L/min และกำหนดให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศที่ 1 L/min ต่อมาเมื่อของไหลแบบสองสถานะไหลเข้าสู่ถึงความดันจะมีการควบคุมความดันภายในถึงที่ค่า 3, 4, 5 และ 6 bar เพื่อสร้างการไหลที่เป็นน้ำผสมฟองอากาศระดับไมครอน ต่อมาจะมีการควบคุมโรตاميเตอร์น้ำสำหรับวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำผสมฟองอากาศระดับไมครอนในการไหลภายในท่อเจ็ทที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำเท่ากับ 16,000 โดยอุณหภูมิของน้ำก่อนที่จะไหลออกจากท่อเจ็ทมีค่า 28 ± 0.1 °C และระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชน ทำได้โดยการเลื่อนแผ่นพุ่งชนให้ห่างจากทางออกของท่อเจ็ทที่ระยะ 1D, 2D, 4D และ 8D ตามลำดับ ซึ่งในตารางที่ 3.7 แสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับฟองอากาศระดับไมครอน

ตารางที่ 3.7 เงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับฟองอากาศระดับไมครอน

ชื่อตัวแปร	กำหนดค่าตัวแปร
อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำที่ใช้ในการผสมที่ท่อเวนทูรี	20 L/min
อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศที่ใช้ในการผสมที่ท่อเวนทูรี	1 L/min
ความดันที่ใช้ในถังความดัน	3, 4, 5 และ 6 bar
เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำ (Re_w)	16,000
ขนาดของท่อเจ็ท (D)	9.5 mm
ระยะห่างจากปากทางออกของท่อเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชน (L)	1D, 2D, 4D และ 8D
อุณหภูมิของน้ำก่อนออกจากท่อเจ็ท	28 ± 0.1 °C
อุณหภูมิห้องขณะทดลอง	25 ± 0.5 °C

บทที่ 4 ผลการศึกษา

ในบทนี้จะแบ่งเนื้อหาออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนที่หนึ่งจะเป็นการไหลแบบสองสถานะที่เป็นน้ำผสมร่วมกับอากาศซึ่งประกอบไปด้วยผลการศึกษาพฤติกรรมการไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศภายในท่อเจ็ทและขณะออกจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชน และผลการศึกษากการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศ ต่อมาในส่วนที่สองจะเป็นการไหลแบบสองสถานะที่เป็นน้ำผสมร่วมกับฟองอากาศระดับไมครอน ซึ่งประกอบไปด้วยผลการศึกษากการวัดขนาดของฟองอากาศที่ใช้ในเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศระดับไมครอน และผลการศึกษากการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศระดับไมครอน

4.1 การไหลแบบสองสถานะที่เป็นน้ำผสมร่วมกับอากาศ







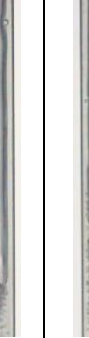
4.1.1 ผลการศึกษาพฤติกรรมการไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศภายในท่อเจ็ท

ในส่วนนี้ได้อธิบายถึงผลการศึกษาพฤติกรรมการไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศภายในท่อเจ็ท ซึ่งใช้กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (High-speed camera) ในการบันทึกภาพบริเวณภายในท่อเจ็ทก่อนที่จะพุ่งออกจากท่อ ซึ่งมีการกำหนดค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของน้ำในช่วง 8,400 ถึง 26,700 สำหรับสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ 0.1 ถึง 0.7 ในแต่ละค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของน้ำ และมีการกำหนดอุณหภูมิของน้ำและอากาศก่อนไหลเข้าท่อเวทิวที่ 28 ± 0.1 °C และ 25 ± 0.2 °C ตามลำดับ




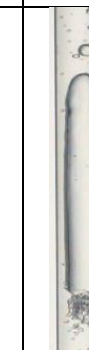



ในรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.8 พฤติกรรมการไหลภายในท่อเจ็ทในกรณีที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์ของน้ำในช่วง 8,400 ถึง 26,700 (หรืออัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำในช่วง 3 ถึง 10 L/min) ที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ 0.1 ถึง 0.7 ในแต่ละค่าของเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของน้ำ จะเห็นได้ว่าทุกกรณีที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์ของน้ำ เมื่อสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเพิ่มขึ้น มีผลทำให้เพิ่มปริมาณอากาศในการไหลภายในท่อเจ็ท

เมื่อพิจารณาเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของน้ำในช่วง 8,400 ถึง 21,400 และสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.4 พบว่ามีรูปแบบการไหลแบบ Slug flow โดยรูปร่างของฟองอากาศมีขนาดเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเจ็ท ปลายด้านบนของฟองอากาศมีลักษณะมนคล้ายรูปร่างหัวกระสุน และที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 0.7 พบว่ามีรูปแบบการไหลแบบ Churn flow โดยรูปร่างของฟองอากาศมีลักษณะเป็นลำฟองอากาศที่ยาวและมีขนาดเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเจ็ท ซึ่งบริเวณปลายของฟองอากาศจะมีลักษณะแตกออกจากลำฟองอากาศที่ยาว ทำให้เกิดฟองที่มีขนาดเล็กมากที่เคลื่อนที่ตามลำฟองอากาศที่ยาว ต่อมาเมื่อพิจารณาเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของน้ำในช่วง 24,000 ถึง 26,700 ที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิง






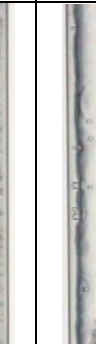
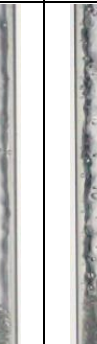
ปริมาณของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมอยู่ในช่วง 0.1 พบว่ามีรูปแบบการไหลแบบ Bubbly flow โดยรูปร่างของฟองอากาศมีลักษณะเป็นรูปแบบก้นกลม รูปแบบก้นแบนหรือรูปแบบก้นไร่รูปร่าง ที่มีขนาดน้อยกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเจ็ทกระจายตัวทั่วภายในท่อเจ็ท สำหรับที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมอยู่ในช่วง 0.2 และ 0.3 พบว่ามีรูปแบบการไหลแบบ Slug flow และที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมอยู่ในช่วง 0.4 และ 0.7 พบว่ามีรูปแบบการไหลแบบ Churn flow

β	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
j_l (m/s)	0.705	0.705	0.705	0.705	0.705	0.705	0.705
j_a (m/s)	0.079	0.177	0.303	0.472	0.707	1.061	1.650
ภาพถ่ายภายในท่อเจ็ทที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=8,400$							








รูปที่ 4.1 พฤติกรรมการไหลภายในท่อเจ็ทกรณีที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่าเท่ากับ 8,400 (หรืออัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเท่ากับ 3 L/min)

β	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
j_l (m/s)	0.941	0.941	0.941	0.941	0.941	0.941	0.941
j_a (m/s)	0.105	0.236	0.404	0.629	0.943	1.415	2.20
ภาพถ่ายภายในท่อเจ็ทที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=10,700$							








รูปที่ 4.2 พฤติกรรมการไหลภายในท่อเจ็ทกรณีที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่าเท่ากับ 10,700 (หรืออัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเท่ากับ 4 L/min)

β	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
j_w (m/s)	1.176	1.176	1.176	1.176	1.176	1.176	1.176
j_a (m/s)	0.131	0.295	0.505	0.786	1.179	1.768	2.750
ภาพถ่ายภายในท่อเจ็ทที่เรย์- โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=13,400$							








รูปที่ 4.3 พฤติกรรมการไหลภายในท่อเจ็ทกรณีที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่าเท่ากับ 13,400 (หรือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเท่ากับ 5 L/min)

β	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
j_w (m/s)	1.411	1.411	1.411	1.411	1.411	1.411	1.411
j_a (m/s)	0.157	0.354	0.606	0.943	1.415	2.122	3.300
ภาพถ่ายภายในท่อเจ็ทที่เรย์- โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=16,000$							




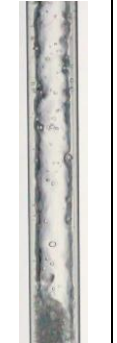



รูปที่ 4.4 พฤติกรรมการไหลภายในท่อเจ็ทกรณีที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่าเท่ากับ 16,000 (หรือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเท่ากับ 6 L/min)

β	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
j_w (m/s)	1.646	1.646	1.646	1.646	1.646	1.646	1.646
j_a (m/s)	0.183	0.413	0.707	1.100	1.650	2.475	3.851
ภาพถ่ายภายใต้กล้องจุลทรรศน์ที่เรย์โนลด์สจำนวนของน้ำมีค่า $Re_w=18,700$							








รูปที่ 4.5 พฤติกรรมการไหลภายในท่อเจ็ทกรณีที่เราเรย์โนลด์สจำนวนของน้ำมีค่าเท่ากับ 18,700 (หรืออัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเท่ากับ 7 L/min)

β	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
j_w (m/s)	1.881	1.881	1.881	1.881	1.881	1.881	1.881
j_a (m/s)	0.210	0.472	0.808	1.257	1.886	2.829	4.401
ภาพถ่ายภายใต้กล้องจุลทรรศน์ที่เรย์โนลด์สจำนวนของน้ำมีค่า $Re_w=21,400$							

รูปที่ 4.6 พฤติกรรมการไหลภายในท่อเจ็ทกรณีที่เราเรย์โนลด์สจำนวนของน้ำมีค่าเท่ากับ 21,400 (หรืออัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเท่ากับ 8 L/min)

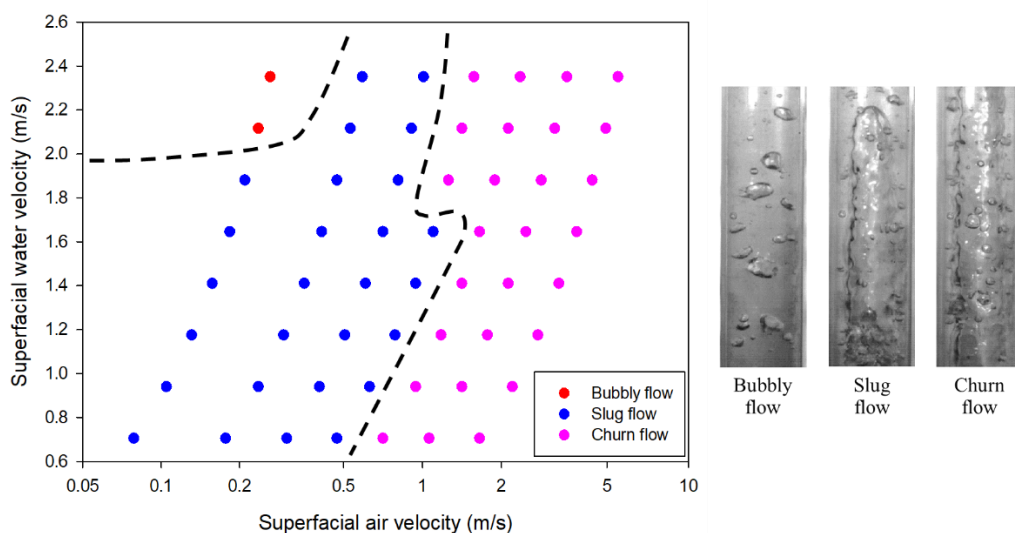
β	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
j_w (m/s)	2.116	2.116	2.116	2.116	2.116	2.116	2.116
j_a (m/s)	0.236	0.530	0.909	1.415	2.122	3.183	4.951
ภาพถ่ายภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$							

รูปที่ 4.7 พฤติกรรมการไหลภายในท่อเจ็ทกรณีที่เราใช้โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่าเท่ากับ 24,000 (หรืออัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเท่ากับ 9 L/min)

β	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
j_w (m/s)	2.351	2.351	2.351	2.351	2.351	2.351	2.351
j_a (m/s)	0.262	0.589	1.010	1.572	2.358	3.536	5.501
ภาพถ่ายภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของน้ำมีค่า $Re_w=26,700$							

รูปที่ 4.8 พฤติกรรมการไหลภายในท่อเจ็ทกรณีที่เราใช้โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่าเท่ากับ 26,700 (หรืออัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเท่ากับ 10 L/min)

ในรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วผิวของน้ำและความเร็วผิวของอากาศที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลแบบสองสถานะภายในท่อท่อเจ็ท ซึ่งมีรูปแบบการไหลแบบ Bubbly flow, Slug flow และ Churn flow ตามที่ได้กล่าวไป โดยจากผลการวิเคราะห์รูปแบบการไหลจะเห็นได้ว่า กรณีที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำมีค่ามากหรือการทำให้ความเร็วผิวของน้ำมีค่าสูงขึ้น การเพิ่มอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศเพียงเล็กน้อยในการสร้างการไหลแบบสองสถานะจะก่อให้เกิดรูปแบบการไหลแบบ Bubbly flow และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศสูงขึ้นจะพบรูปแบบการไหล Slug flow และ Churn flow ตามลำดับ ซึ่งจะแตกต่างกับกรณีที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำที่ค่าน้อยหรือการทำให้ความเร็วผิวของน้ำมีค่าต่ำ การเพิ่มอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศเข้าไปในการสร้างการไหลแบบสองสถานะ มักจะไม่พบรูปแบบการไหลแบบ Bubbly flow แต่โดยส่วนใหญ่จะพบรูปแบบการไหลแบบ Slug flow และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศสูงขึ้นจะพบการไหลในรูปแบบ Churn flow



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วผิวของน้ำและความเร็วผิวของอากาศที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลแบบสองสถานะภายในท่อท่อเจ็ท

จากผลการศึกษาพฤติกรรมการไหลภายในท่อเจ็ทพบว่า กรณีที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่าเท่ากับ 24,000 ที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมอยู่ในช่วง $\beta = 0.1$ ถึง 0.7 พบรูปแบบการไหลแบบ Bubbly flow, Slug flow และ Churn flow ซึ่งเป็นกรณีที่ครอบคลุมพฤติกรรมการไหลทั้งหมด จึงเลือกศึกษาพฤติกรรมในการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทฟุ้งชนในกรณีนี้

4.1.2 ผลการศึกษาพฤติกรรมการไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศขณะออกจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชน

ในส่วนนี้ได้อธิบายถึงผลการศึกษาพฤติกรรมการไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศขณะออกจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชน ซึ่งใช้กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (High-speed camera) ในการบันทึกภาพบริเวณภายในปากทางออกของท่อเจ็ทจนถึงพื้นผิวที่พุ่งชน โดยอัตราการถ่ายภาพของกล้องอยู่ที่ 6400 ภาพต่อวินาที ซึ่งมีการกำหนดค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำที่ 24,000 สำหรับสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ $\beta = 0.1$ ถึง 0.7 มีการกำหนดอุณหภูมิของน้ำและอากาศก่อนไหลเข้าท่อเวทรีที่ 28 ± 0.1 °C และ 25 ± 0.2 °C ตามลำดับ และระยะพุ่งชนมีค่าเท่ากับ $L=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ตามลำดับ

(1) เปรียบเทียบผลของการเพิ่มสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ระยะพุ่งชนเดียวกัน

ในรูปที่ 4.10 ถึงรูปที่ 4.13 แสดงพฤติกรรมการไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศในกรณีที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะพุ่งชนมีค่าเท่ากับ $L=2D, 4D, 6D$ และ $8D$ ตามลำดับ โดยมีสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ 0.1 ถึง 0.7 ที่เวลา $t=0, 75,$ และ 150 ms ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าลักษณะของฟองอากาศที่ไหลออกจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชน สามารถแบ่งได้ 4 รูปแบบ ได้แก่

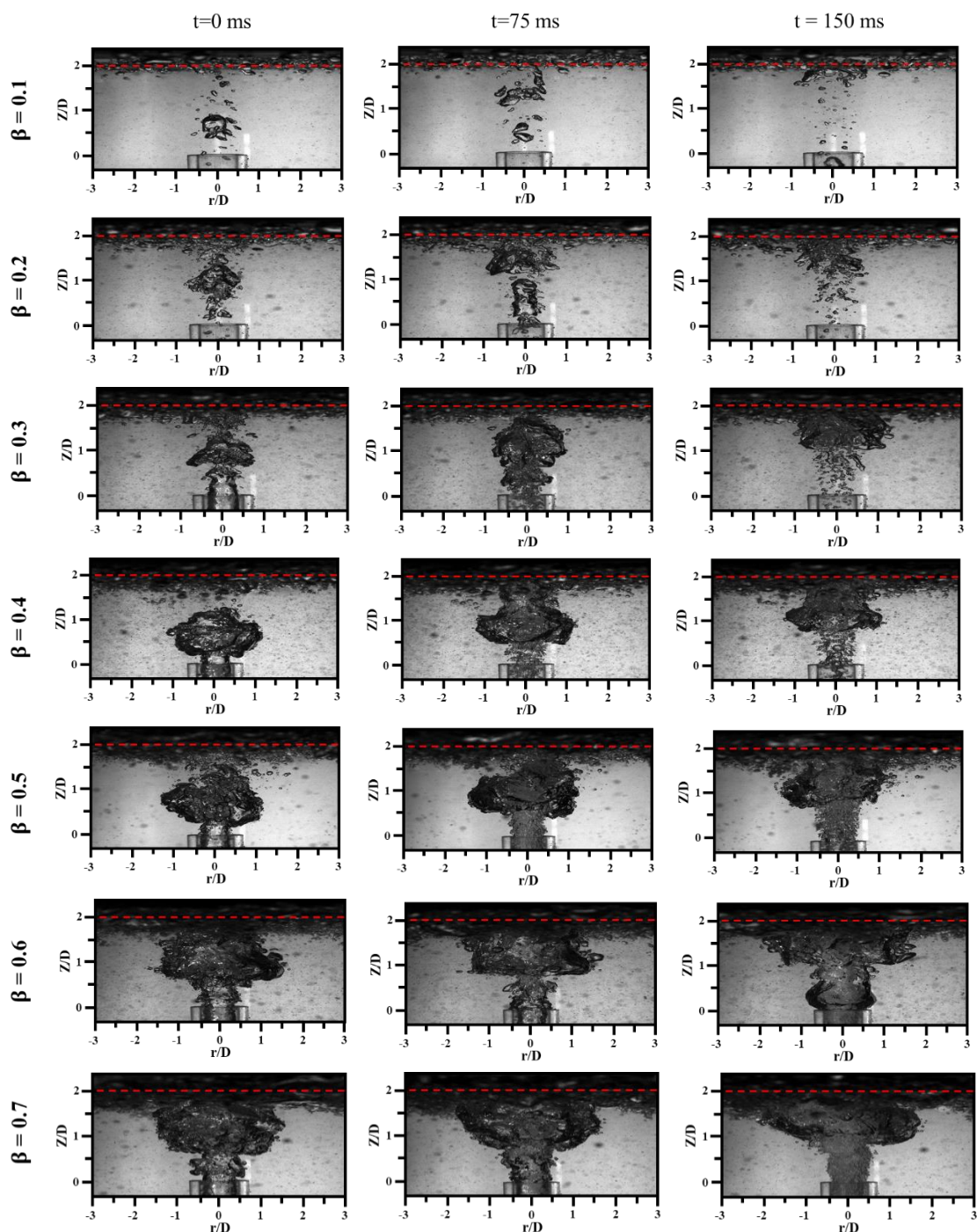
รูปแบบที่หนึ่ง $\beta = 0.1$ พบว่าลักษณะของฟองอากาศมีขนาดน้อยกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเจ็ท สามารถพบรูปแบบของฟองอากาศในแบบก้อนกลม ก้อนแบน และก้อนรูปร่างซับซ้อน จากนั้นฟองอากาศจะเคลื่อนที่เข้าพุ่งชนกับพื้นผิวและเคลื่อนที่ราบเรียบกับพื้นผิวต่อไป

รูปแบบที่สอง $\beta = 0.2$ และ 0.3 พบว่าลักษณะของฟองอากาศขณะเคลื่อนที่ใกล้ปากทางออกของท่อเจ็ทมีลักษณะคล้ายหัวกระสุน และเมื่อเคลื่อนที่ออกจากท่อเจ็ทสู่สภาพแวดล้อมที่เป็นน้ำโดยรอบ จะเกิดการเชื่อมกันระหว่างฟองอากาศที่เคลื่อนที่ออกจากท่อเจ็ทและน้ำบริเวณโดยรอบ ทำให้ฟองอากาศเกิดการแตกตัวขึ้น ซึ่งต่อมาจะเคลื่อนที่เข้าพุ่งชนเข้ากับพื้นผิวและเคลื่อนที่ราบเรียบกับพื้นผิวต่อไป

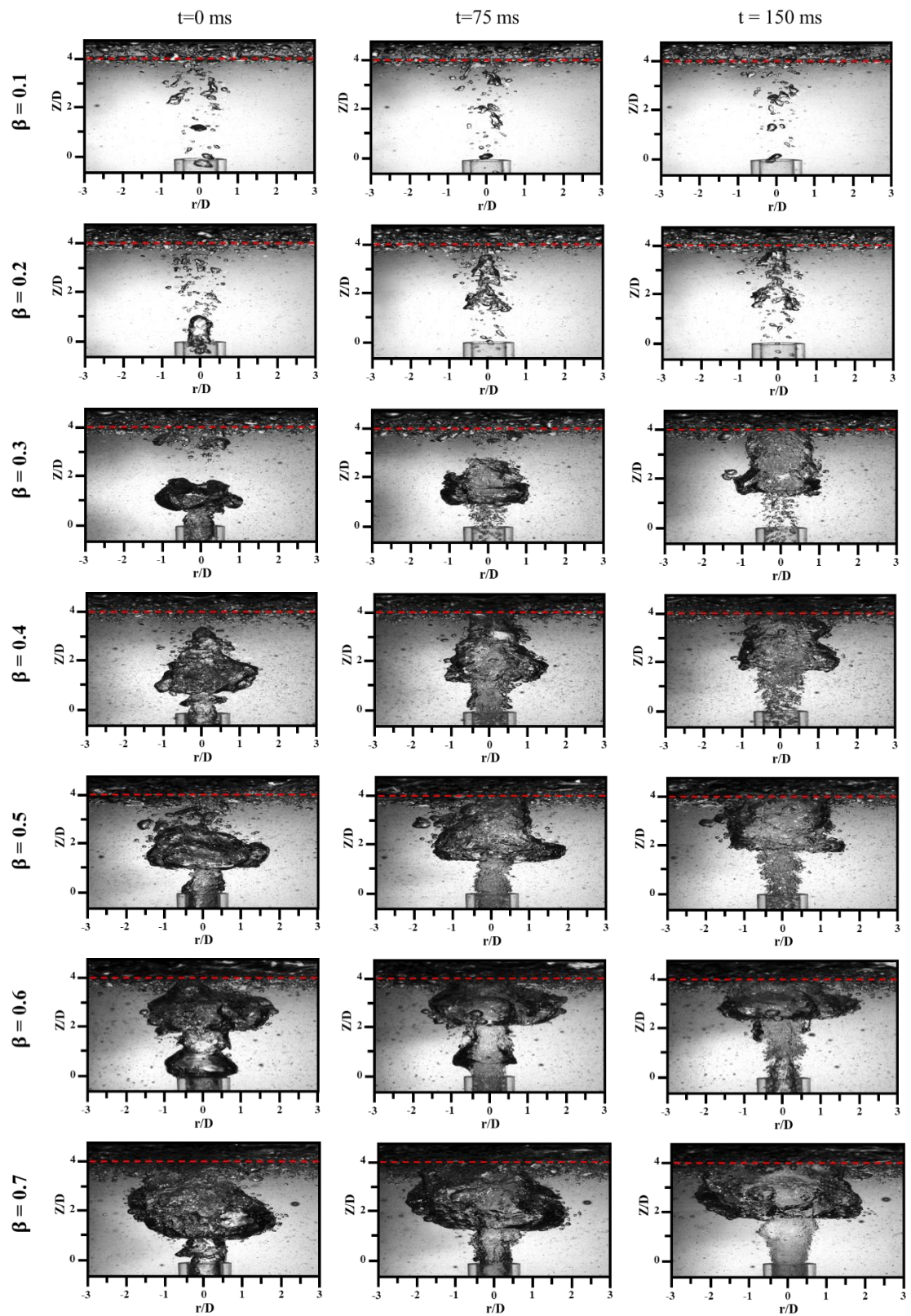
รูปแบบที่สาม $\beta = 0.4$ และ 0.5 พบว่าลักษณะของฟองอากาศเมื่อเคลื่อนที่ออกจากท่อเจ็ทจะเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนคล้ายรูปหัวเห็ด จากนั้นจะเคลื่อนที่เข้าพุ่งชนกับพื้นผิวและเกิดการแตกตัวเป็นฟองอากาศขนาดเล็ก ซึ่งจะกระจายทั่วพื้นผิวและเคลื่อนที่ราบเรียบกับพื้นผิวต่อไป

และรูปแบบที่ $\beta = 0.6$ และ 0.7 พบว่าลักษณะของฟองอากาศที่ไหลออกจากท่อเจ็ท จะเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนคล้ายรูปหัวเห็ดและเคลื่อนที่เข้าพุ่งชนกับพื้นผิว สำหรับในกรณีที่ระยะพุ่งชน $L=2D$ และ $4D$ แต่ที่ระยะพุ่งชน $L=6D$ และ $8D$ จะพบกลุ่มก้อนฟองอากาศคล้ายรูปหัวเห็ดจำนวนมากว่าหนึ่งก้อน เนื่องจากการเพิ่มระยะพุ่งชนพื้นผิว ทำให้เกิดการเพิ่มระยะการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ จึงปรากฏให้เห็นลักษณะของกลุ่มก้อนของฟองอากาศมากกว่าหนึ่งก้อนในกระแสน้ำของเจ็ท โดยรวมแล้วเมื่อกลุ่มก้อนนี้เมื่อปะทะกับพื้นผิวจะกระจายตัวเป็นกลุ่มก้อนวง

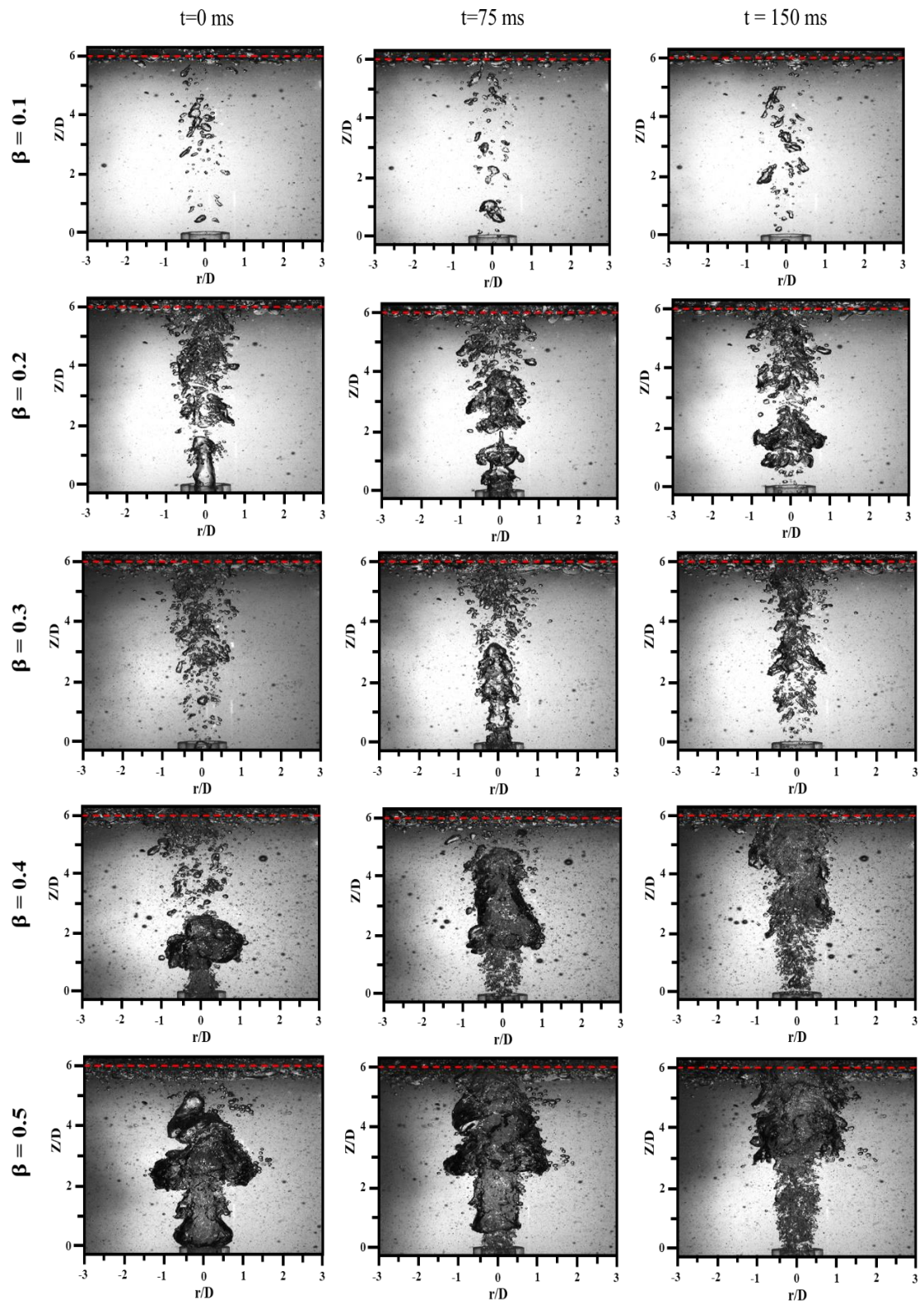
แหวนที่เคลื่อนที่ราบเรียบกับพื้นผิวจากจุดศูนย์กลางของท่อเจ็ท อีกทั้งการไหลจากปากทางออกของท่อเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชนในกรณีนี้ ลักษณะของฟองอากาศจะค่อนข้างต่อเนื่องตลอดการไหล



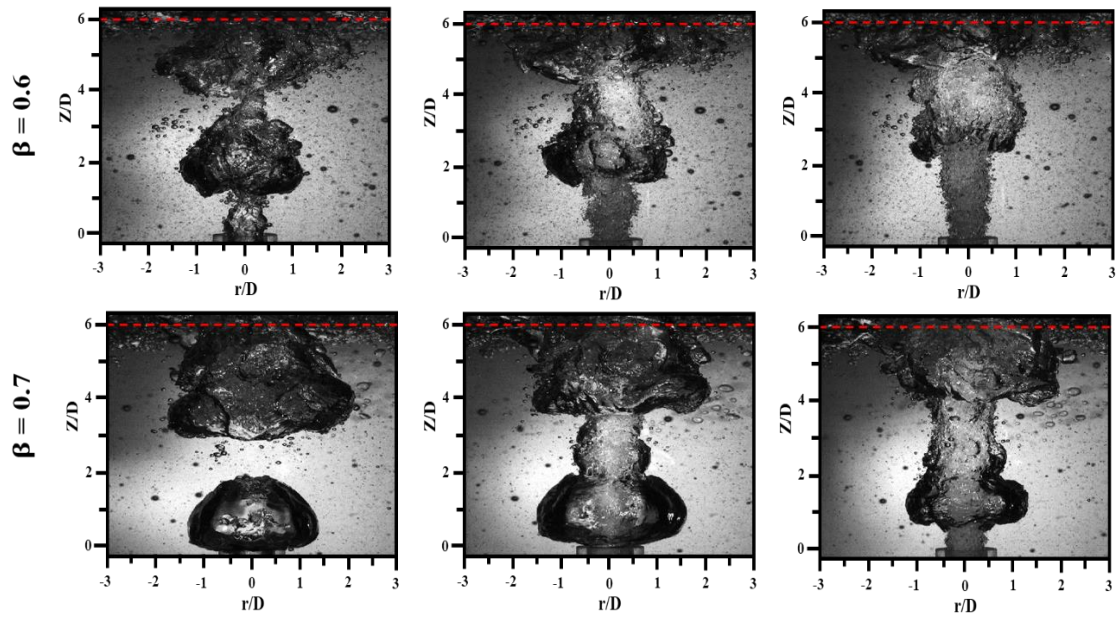
รูปที่ 4.10 พฤติกรรมการไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศในกรณีที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะพุ่งชนมีค่าเท่ากับ $L=2D$



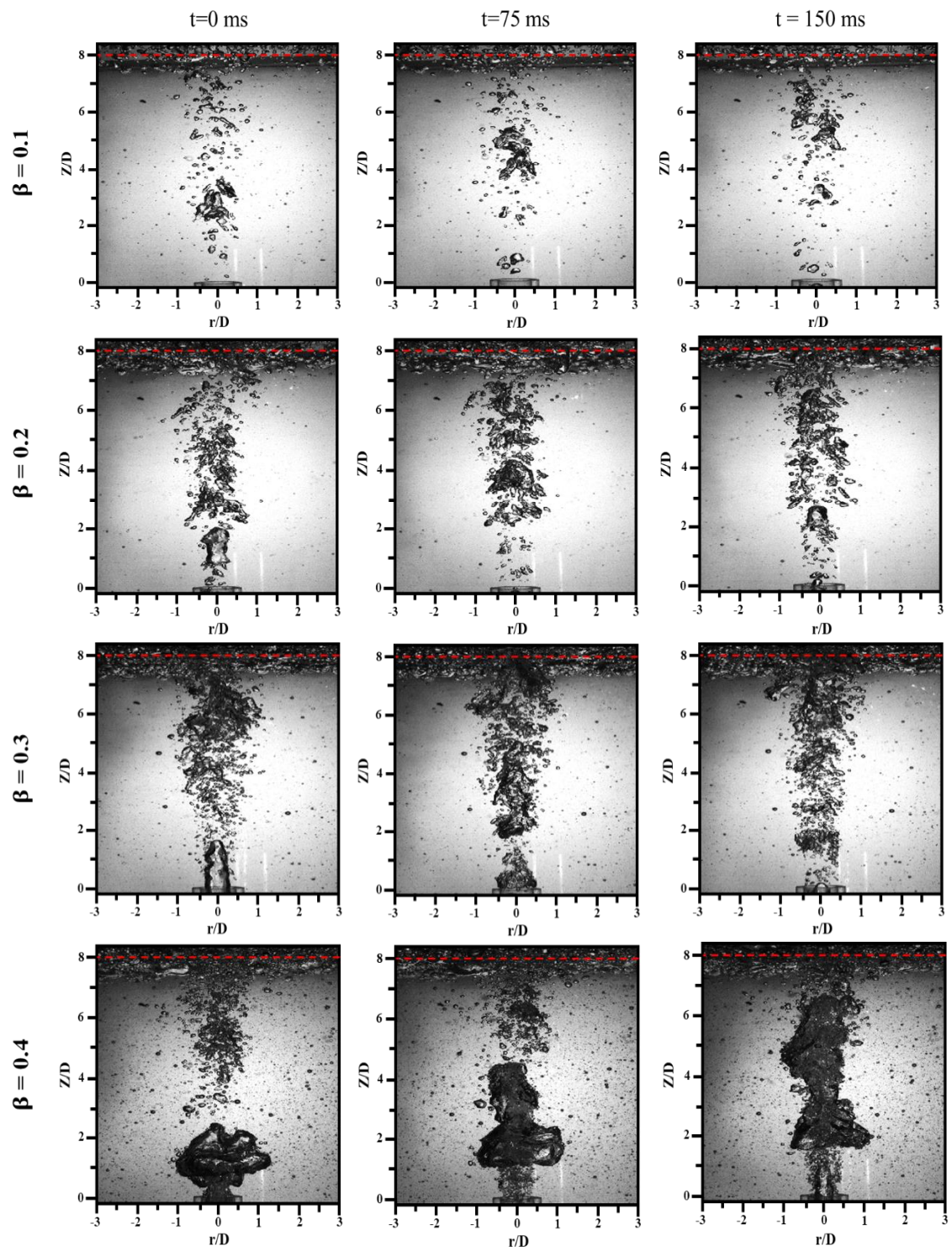
รูปที่ 4.11 พฤติกรรมการไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศในกรณีที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะพุ่งชนมีค่าเท่ากับ $L=4D$



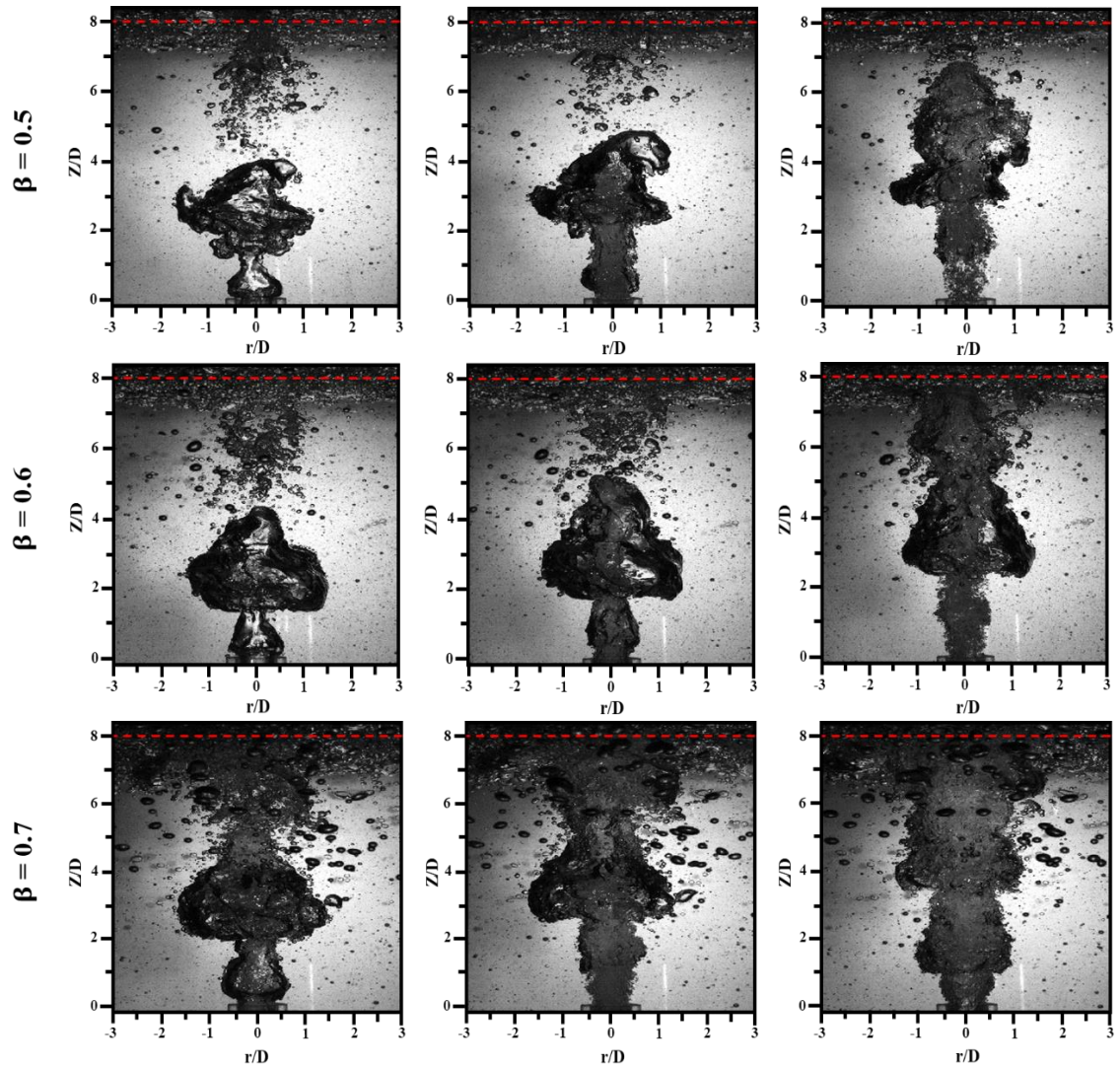
รูปที่ 4.12 พฤติกรรมการไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศในกรณีที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะพุ่งชนมีค่าเท่ากับ $L=6D$



รูปที่ 4.12 พฤติกรรมการไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศในกรณีที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะพุ่งชนมีค่าเท่ากับ $L=6D$ (ต่อ)



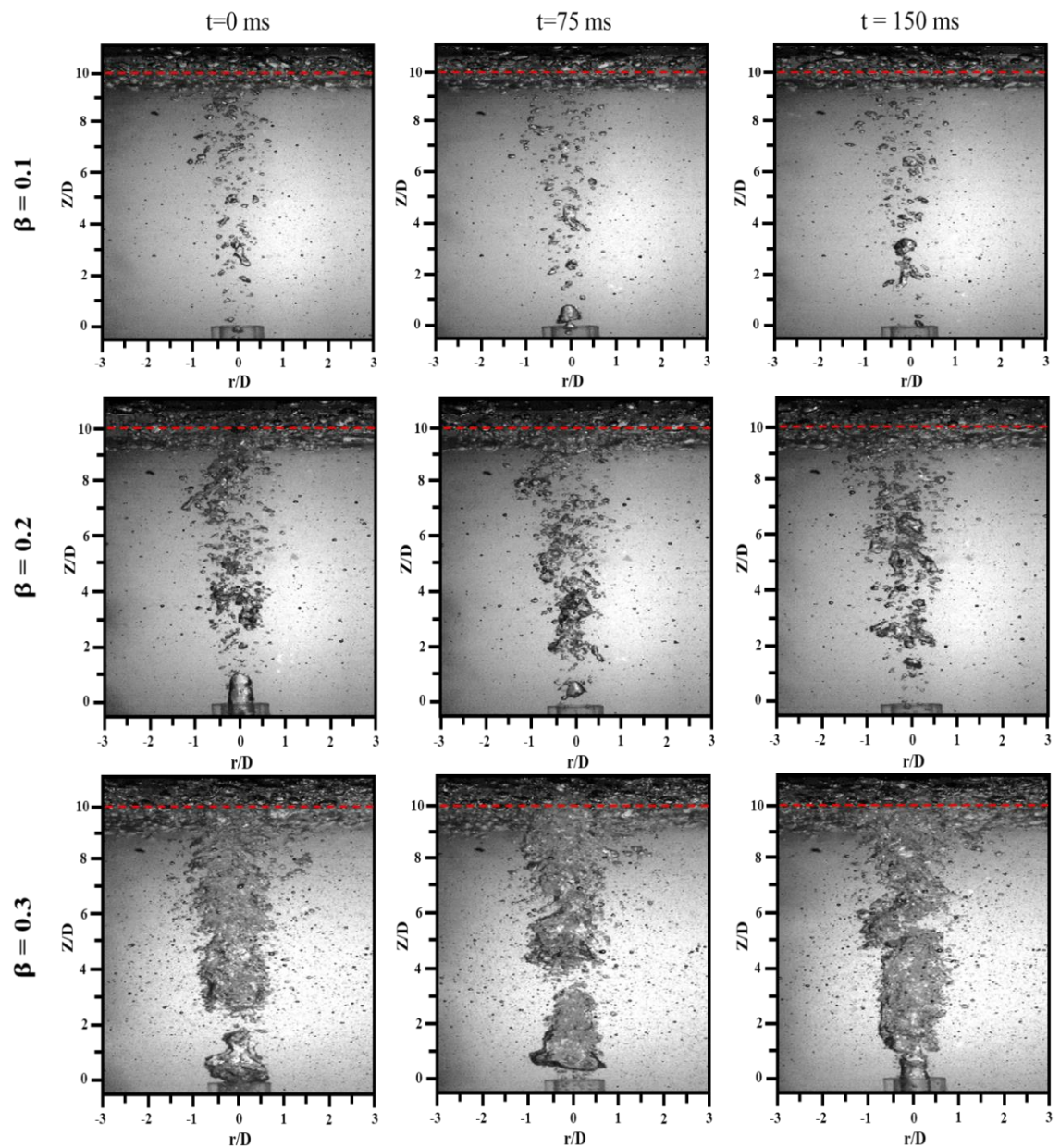
รูปที่ 4.13 พฤติกรรมการไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศในกรณีที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะพุ่งชนมีค่าเท่ากับ $L=8D$



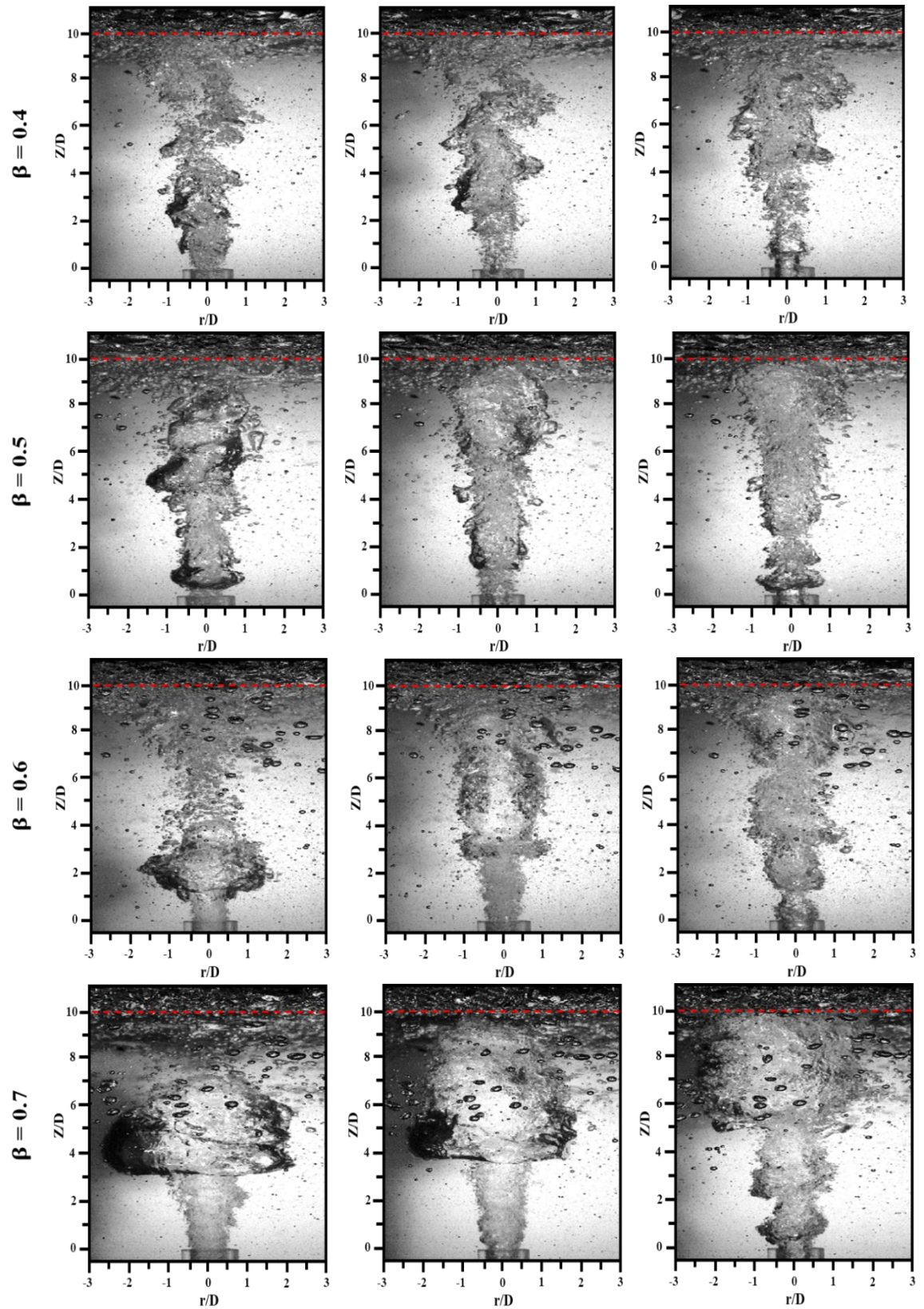
รูปที่ 4.13 พฤติกรรมการไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศในกรณีที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะพุ่งชนมีค่าเท่ากับ $L=8D$ (ต่อ)

ในรูปที่ 4.14 แสดงพฤติกรรมการไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศในกรณี ที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะพุ่งชนมีค่าเท่ากับ $L=10D$ โดยมีสัดส่วนระหว่าง อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ $\beta = 0.1$ ถึง 0.7 ในช่วงเวลา $0, 75,$ และ 150 ms ตามลำดับ

จากการศึกษาพบว่าลักษณะของฟองอากาศที่ไหลออกจากปากทางออกท่อเจ็ทถึง พื้นผิวที่พุ่งชน สามารถแบ่งได้ 3 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบที่หนึ่ง $\beta = 0.1$ พบว่าลักษณะของฟองอากาศ มีขนาดน้อยกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเจ็ท สามารถพบรูปแบบของฟองอากาศในแบบก้อนกลม ก้อนแบน และก้อนไร้รูปร่าง จากนั้นฟองอากาศจะเคลื่อนที่เข้าพุ่งชนกับพื้นผิวและเคลื่อนที่ราบเรียบ กับพื้นผิวต่อไป รูปแบบที่สอง $\beta = 0.2$ และ 0.3 พบว่าลักษณะของฟองอากาศขณะเคลื่อนที่ใกล้ปาก ทางออกของท่อเจ็ทมีลักษณะคล้ายหัวกระสุน และเมื่อเคลื่อนที่ออกจากท่อเจ็ทสู่สภาพแวดล้อมที่เป็นน้ำโดยรอบ จะเกิดการเชื่อมกันระหว่างฟองอากาศที่เคลื่อนที่ออกจากท่อเจ็ทและน้ำบริเวณ โดยรอบ ทำให้ฟองอากาศเกิดการแตกตัวขึ้น ซึ่งต่อมาจะเคลื่อนที่เข้าพุ่งชนเข้ากับพื้นผิวและเคลื่อนที่ ราบเรียบกับพื้นผิวต่อไป และรูปแบบที่สาม $\beta = 0.4, 0.5, 0.6$ และ 0.7 พบว่าลักษณะของฟองอากาศ เมื่อเคลื่อนที่ออกจากท่อเจ็ทจะเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนคล้ายรูปหัวเห็ดจำนวนหลายก้อนจาก ระยะห่างจากปากทางออกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ซึ่งผลของการเพิ่มระยะพุ่งชนทำให้พฤติกรรมนี้ จากนั้น ของไหลที่เพิ่งเคลื่อนที่ออกจากท่อเจ็ทจะพุ่งเข้าชนกับกลุ่มก้อนฟองอากาศเหล่านี้ ทำให้เกิดการแตก ตัวหัวกระสุนการไหลของลำเจ็ท จากนั้นจะเข้าพุ่งชนกับพื้นผิวและไหลราบบนพื้นผิวต่อไป



รูปที่ 4.14 พฤติกรรมการไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศในกรณีที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะพุ่งชนมีค่าเท่ากับ $L=10D$



รูปที่ 4.14 พฤติกรรมการไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศในกรณีที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะพุ่งชนมีค่าเท่ากับ $L=10D$ (ต่อ)

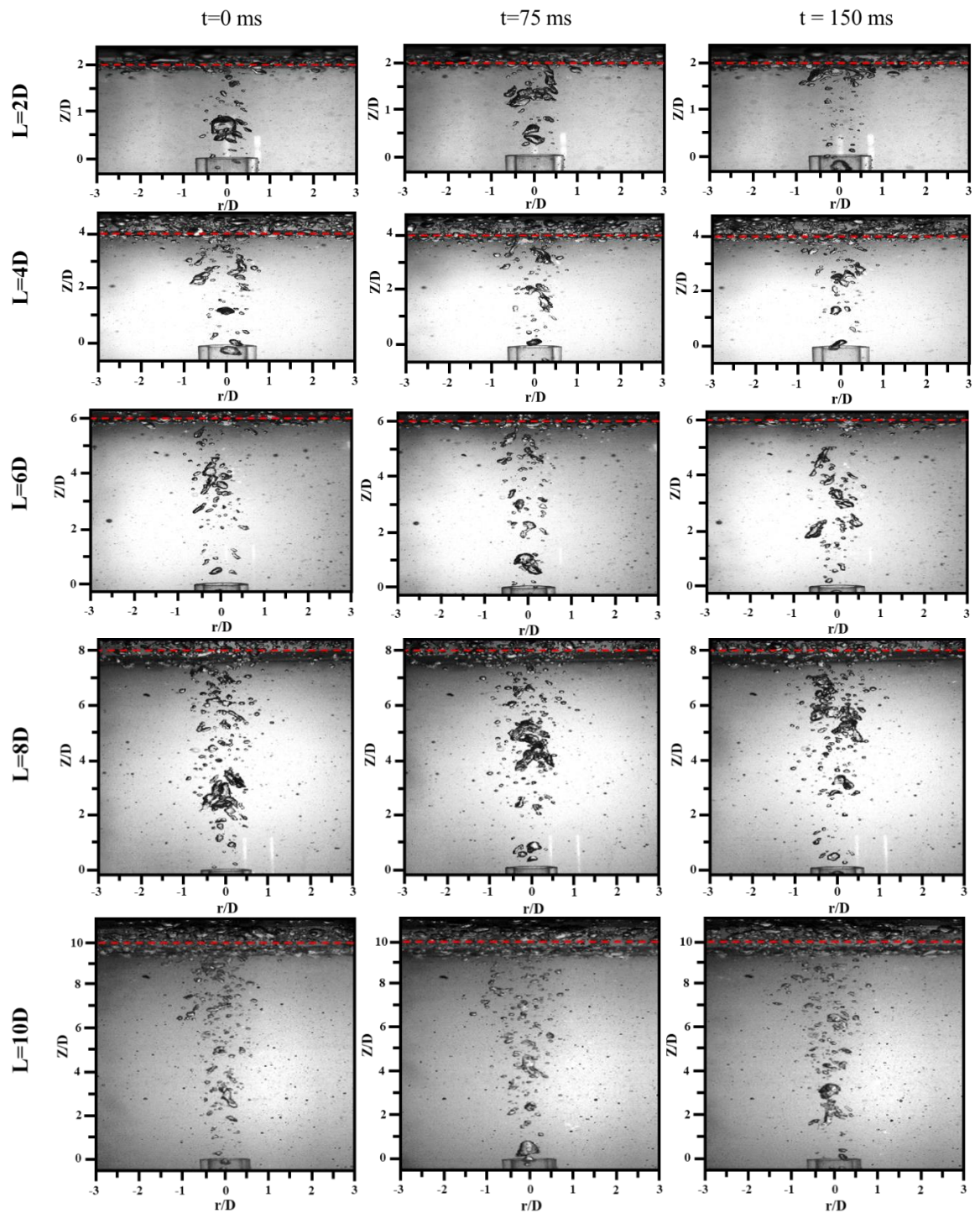
(2) เปรียบเทียบผลของการเพิ่มระยะฟุ้งชนที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเดียวกัน

ในการอธิบายผลของการเพิ่มระยะฟุ้งชนที่ค่าสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเดียวกัน จะยกตัวอย่างในกรณีที่ค่าสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ $\beta = 0.1, 0.4$ และ 0.7 ตามลำดับ เพื่อให้ข้อมูลถึงความแตกต่างของการเพิ่มระยะฟุ้งชนที่มีต่อพฤติกรรมในการไหลของเจ็ทฟุ้งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศ

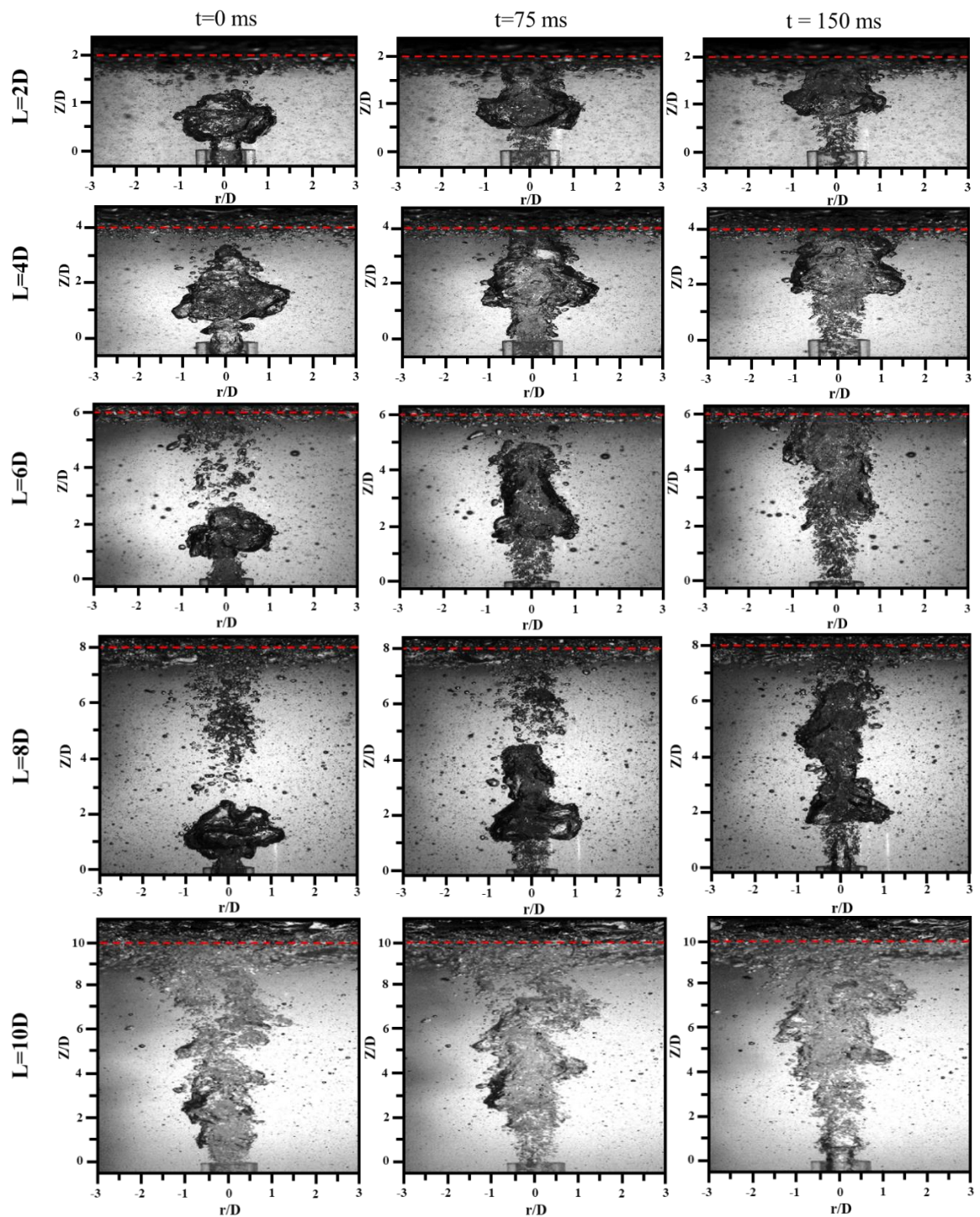
ในรูปที่ 4.15 แสดงผลการเปรียบเทียบพฤติกรรมการไหลของเจ็ทฟุ้งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศในกรณีที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w = 24,000$ ที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ $\beta = 0.1$ ในระยะฟุ้งชนที่ $L = 2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ตามลำดับ พบว่าลักษณะของฟองอากาศในแต่ละระยะฟุ้งชนมีรูปร่างที่ไม่แตกต่างกัน โดยลักษณะของฟองอากาศจะมีลักษณะเป็นก้อนที่มีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเจ็ท ดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น

ในรูปที่ 4.16 แสดงผลการเปรียบเทียบพฤติกรรมการไหลของเจ็ทฟุ้งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศในกรณีที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w = 24,000$ ที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ $\beta = 0.4$ ในระยะฟุ้งชนที่ $L = 2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ตามลำดับ พบว่าฟองอากาศที่เคลื่อนที่ออกจากท่อเจ็ทจะเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนคล้ายหัวเห็ดใกล้กับปากทางออก ซึ่งฟองอากาศกลุ่มก้อนนี้จะเข้าฟุ้งชนพื้นผิวต่อไป ซึ่งจะพบในระยะฟุ้งชนที่ $L = 2D$ และ $4D$ แต่เมื่อระยะฟุ้งชนเพิ่มสูงขึ้น ในกรณีที่ $L = 6D, 8D$ และ $10D$ พบว่าฟองอากาศที่เคลื่อนที่ออกจากท่อเจ็ทจะเกิดการรวมตัวคล้ายหัวเห็ดเช่นกัน เมื่อเคลื่อนที่ไปสักระยะกลุ่มฟองอากาศก้อนนี้จะเริ่มแตกตัวเป็นฟองขนาดเล็ก เนื่องจากเกิดการเฉือนกันระหว่างฟองอากาศและน้ำบริเวณโดยรอบ ซึ่งจะเคลื่อนที่เข้าปะทะกับพื้นผิวที่เจ็ทฟุ้งชน

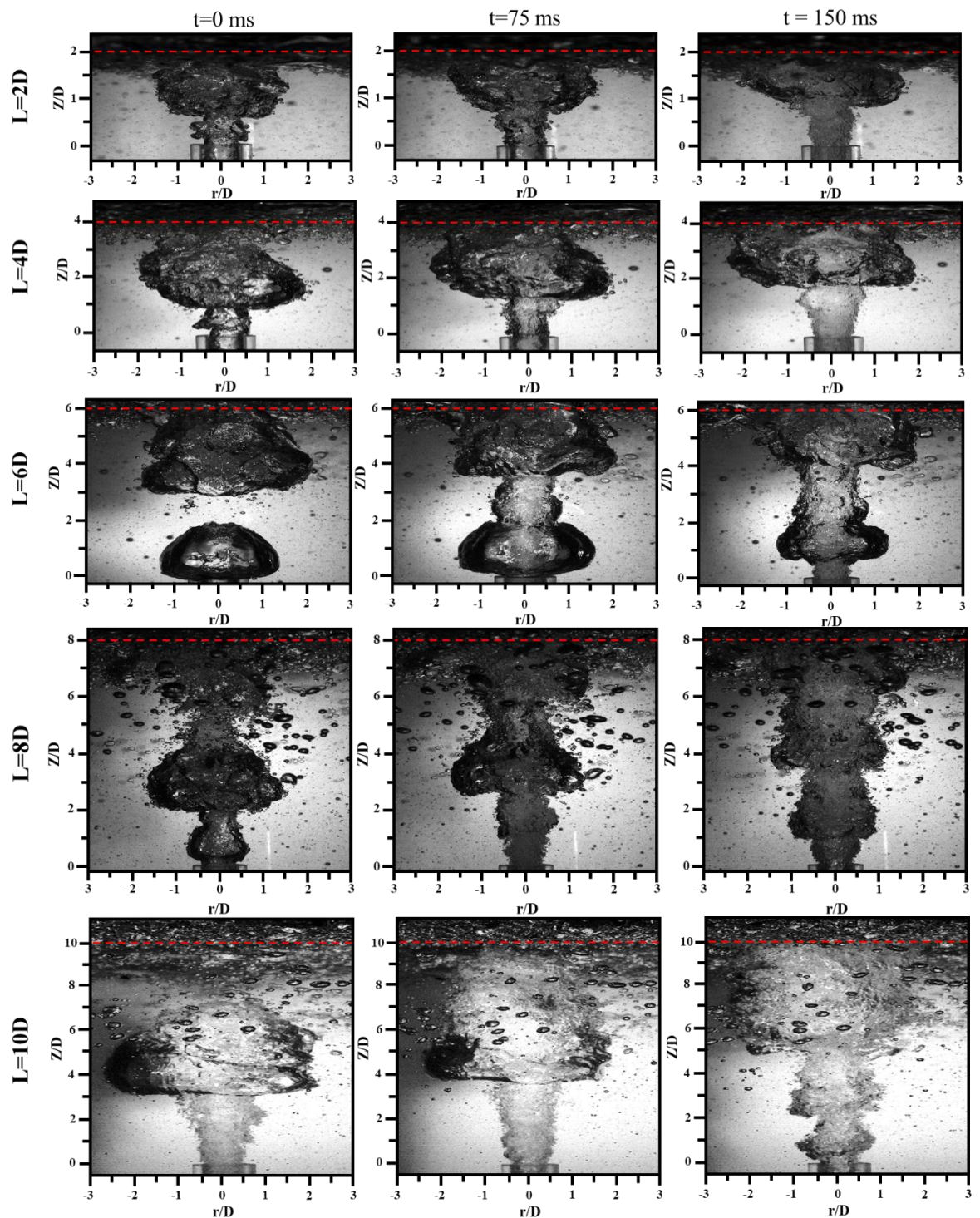
ในรูปที่ 4.17 แสดงผลการเปรียบเทียบพฤติกรรมการไหลของเจ็ทฟุ้งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศในกรณีที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w = 24,000$ ที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ $\beta = 0.7$ ในระยะฟุ้งชนที่ $L = 2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ตามลำดับ พบว่าฟองอากาศที่เคลื่อนที่ออกจากท่อเจ็ทจะเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนคล้ายหัวเห็ดใกล้กับปากทางออก ซึ่งฟองอากาศกลุ่มก้อนนี้จะเข้าฟุ้งชนพื้นผิวต่อไป โดยลักษณะของฟองอากาศจะค่อนข้างต่อเนื่องมาก ซึ่งจะพบในระยะฟุ้งชนที่ $L = 2D, 4D, 6D$ และ $8D$ แต่เมื่อระยะฟุ้งชนเพิ่มสูงขึ้น ในกรณีที่ $L = 10D$ พบว่าฟองอากาศที่อยู่ใกล้กับพื้นผิวจะแตกตัวเป็นฟองอากาศขนาดเล็ก เนื่องจากระยะฟุ้งชนที่สูง กลุ่มก้อนฟองอากาศจะใช้เวลาที่เคลื่อนที่ได้มากกว่าที่ระยะฟุ้งชนที่ต่ำ เวลาในการเฉือนกันระหว่างกลุ่มก้อนฟองอากาศและน้ำบริเวณโดยรอบจะมากกว่า ซึ่งทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมาก



รูปที่ 4.15 พฤติกรรมการไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศในกรณีที่มีเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ $\beta=0.1$



รูปที่ 4.16 พฤติกรรมการไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศในกรณีที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ $\beta=0.4$



รูปที่ 4.17 พฤติกรรมการไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศในกรณีที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ $\beta = 0.7$

4.1.3 ผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศ

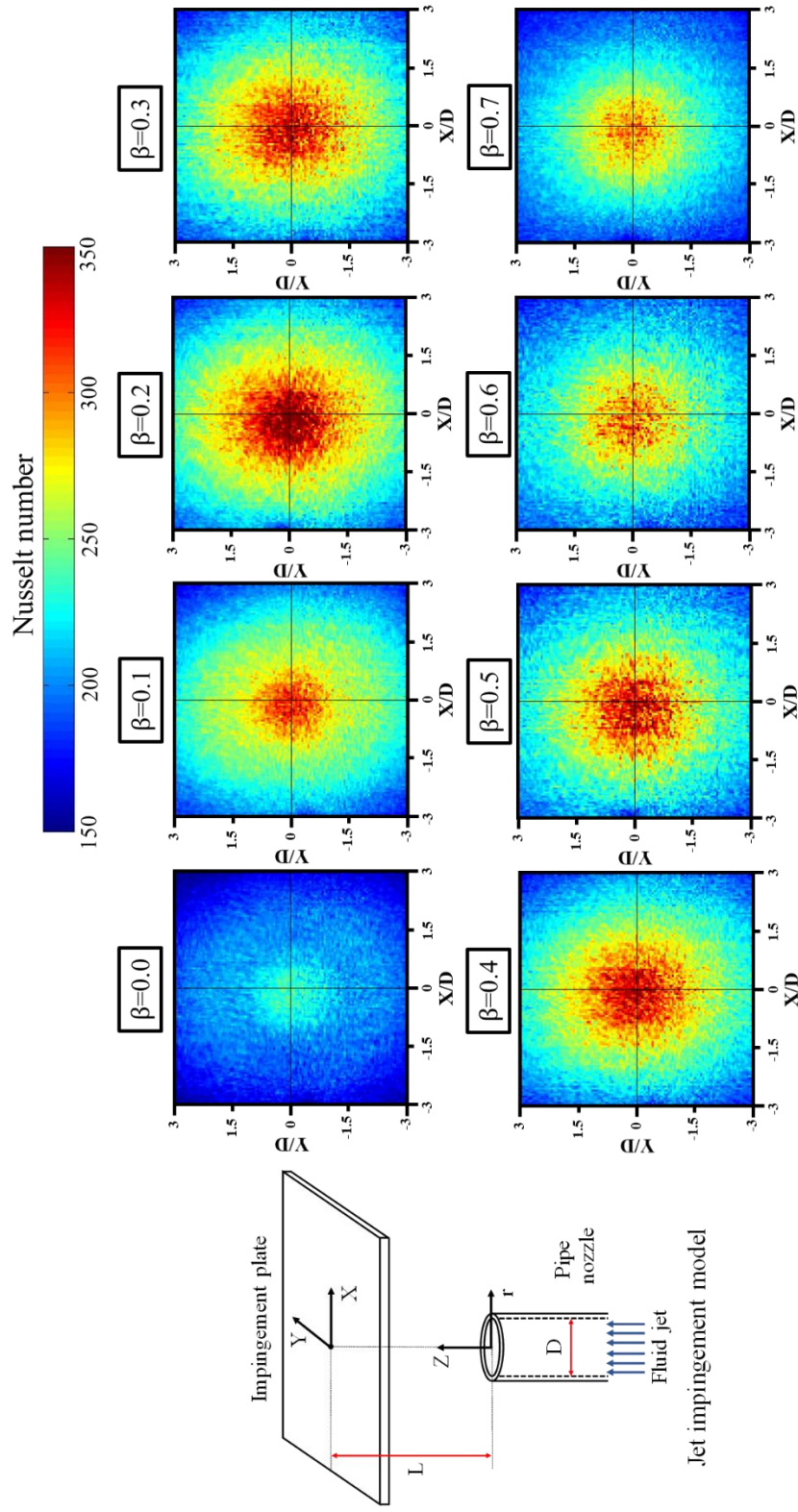
ในส่วนนี้ได้อธิบายถึงผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศ ซึ่งใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน (Infrared thermal imaging camera) ในการบันทึกภาพพื้นผิวที่เจ็ทของไหลพุ่งชน ซึ่งมีการกำหนดค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของน้ำที่ 24,000 สำหรับสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ $\beta = 0.0$ ถึง 0.7 มีการกำหนดอุณหภูมิของน้ำและอากาศก่อนไหลเข้าท่อเวนทูรีที่ 28 ± 0.1 °C และ 25 ± 0.2 °C ตามลำดับ และระยะพุ่งชนมีค่าเท่ากับ $L=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ตามลำดับ โดยจะอธิบายในกรณีที่ระยะพุ่งชนที่ค่าต่าง ๆ

(1) กรณีที่ระยะพุ่งชน $L=2D$

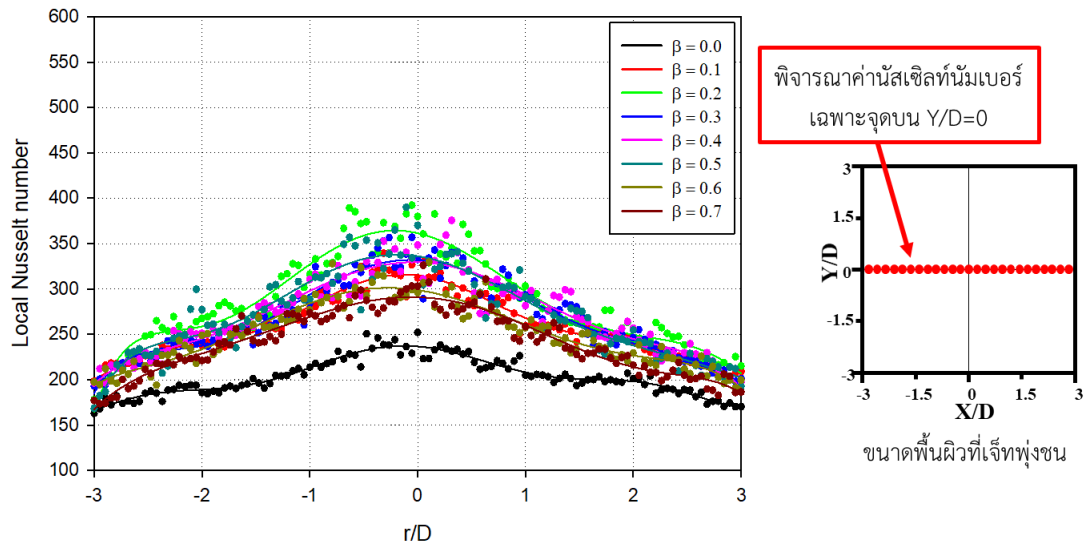
ในรูปที่ 4.18 แสดงการกระจายนัสเซิลท์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์มีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะพุ่งชน $L=2D$ โดยมีสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ $\beta = 0.0$ ถึง 0.7 พบว่าเมื่อพิจารณาผลของการเพิ่มสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม กรณีที่ค่า β มีค่าอยู่ในช่วง $\beta = 0.1$ ถึง 0.7 มีค่าการกระจายนัสเซิลท์นัมเบอร์บนพื้นผิวสูงกว่าเมื่อเทียบกับกรณี $\beta = 0.0$ โดยในกรณีที่ $\beta = 0.2$ มีค่าการกระจายนัสเซิลท์นัมเบอร์สูงสุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น สำหรับที่ระยะพุ่งชน $L=2D$ ซึ่งเมื่อพิจารณาการกระจายนัสเซิลท์นัมเบอร์เฉพาะจุดบนพื้นผิวในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในตำแหน่ง $Y/D=0$ ในรูปที่ 4.19 และการกระจายนัสเซิลท์นัมเบอร์เฉลี่ยตามตำแหน่ง r/D ต่าง ๆ ในช่วง $0 \leq r/D \leq 3$ สำหรับในรูปที่ 4.20 จะให้ค่าแนวโน้มเช่นเดียวกัน

โดยผลของการเพิ่มสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมตั้งแต่ $\beta = 0.0$ ถึง 0.2 ซึ่งพฤติกรรมรูปร่างของฟองอากาศจะมีลักษณะเป็นก้อนฟองอากาศขนาดเล็กในกระแสลำเจ็ทในกรณีที่ค่า $\beta = 0.1$ แม้ว่าในกรณีที่ค่า $\beta = 0.2$ ฟองอากาศจะมีลักษณะคล้ายหัวกระสุนในขณะที่ยังออกจากท่อเจ็ท แต่เมื่อเคลื่อนที่สู่สภาพแวดล้อมที่เป็นน้ำโดยรอบ จะก่อให้เกิดการเชื่อมกันระหว่างฟองอากาศกับของไหลที่เป็นน้ำ ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นฟองอากาศที่เล็กลงโดยผลที่ตามมาคือเป็นการเพิ่มปริมาณของจำนวนฟองอากาศในกระแสลำเจ็ท โดยเมื่อปะทะกับพื้นผิวจะก่อให้เกิดการรบกวนชั้นขอบเขตความร้อนทั่วทั้งพื้นผิว ส่งผลให้ค่าการกระจายนัสเซิลท์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงนี้

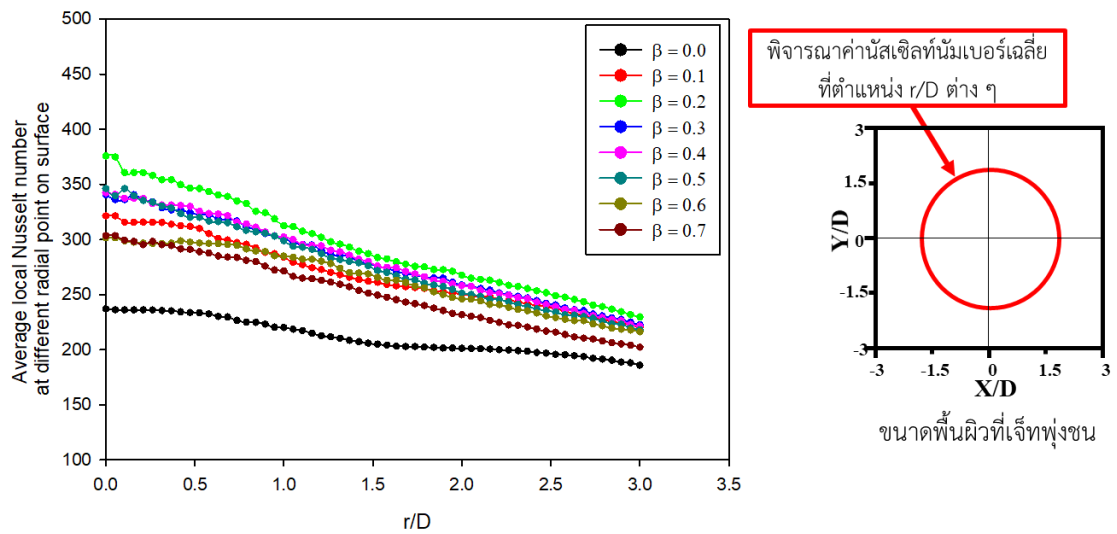
และเมื่อพิจารณาผลของการเพิ่มสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมตั้งแต่ $\beta = 0.2$ ถึง 0.7 ซึ่งพฤติกรรมของฟองอากาศจะเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนคล้ายรูปหัวเห็ดในบริเวณใกล้กับปากทางออกของท่อเจ็ท ต่อมาจะเคลื่อนที่เข้าพุ่งชนกับพื้นผิวและไหลกระจายทั่วทั้งพื้นผิวสำหรับในกรณีที่ค่า $\beta = 0.3, 0.4,$ และ 0.5 ซึ่งในกรณีที่ค่า $\beta = 0.6$ และ 0.7 พฤติกรรมของฟองอากาศจะมีลักษณะการไหลที่ค่อนข้างต่อเนื่อง โดยเมื่อฟองอากาศไหลปะทะกับพื้นผิวจะมีลักษณะกระจายเป็นรูปวงแหวนของฟองอากาศ ซึ่งในกรณีของช่วงนี้จะเห็นได้ว่าปริมาณของอากาศที่ปะทะกับพื้นผิวโดยส่วนใหญ่จะมีรูปร่างลักษณะเป็นก้อนฟองอากาศที่ใหญ่หรือเป็นก้อนที่ค่อนข้างต่อเนื่อง ซึ่งจะส่งผลให้ค่าการกระจายนัสเซิลท์นัมเบอร์บนพื้นผิวลดลงอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 4.18 การกระจายสเกลที่แผ่นเบอร์ดบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่เรย์โนลด์ส์เบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะพุ่งชน $L=2D$



รูปที่ 4.19 การกระจายนัสเซลท์ที่มุมเบอร์เฉพาะจุดในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในตำแหน่ง $Y/D=0$ สำหรับเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะพุงชน $L=2D$



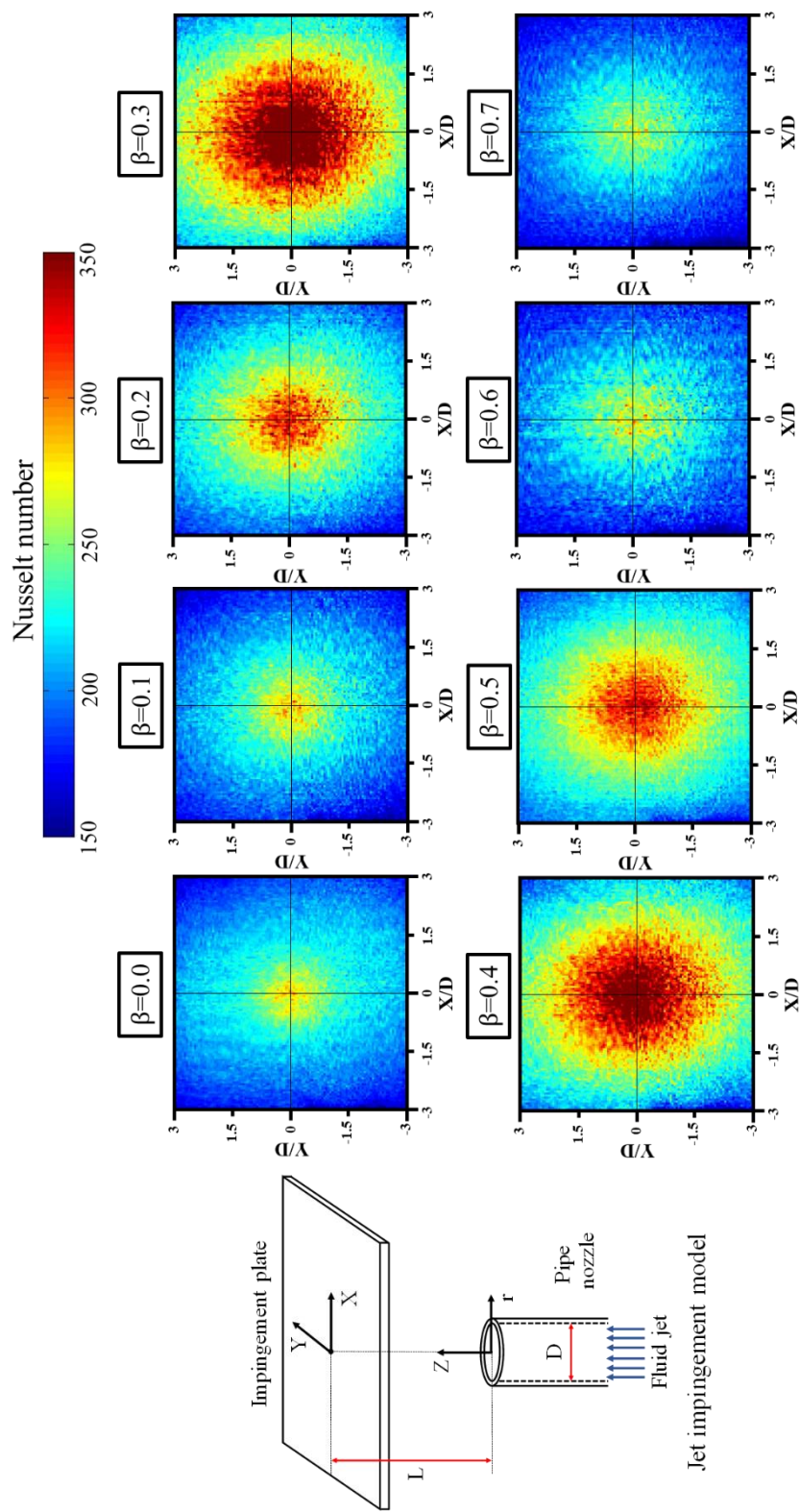
รูปที่ 4.20 การกระจายนัสเซลท์ที่มุมเบอร์เฉลี่ยตามตำแหน่ง r/D ต่าง ๆ ในช่วง $0 \leq r/D \leq 3$ สำหรับเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะพุงชน $L=2D$

(2) กรณีที่ระยะฟุ้งชน $L=4D$

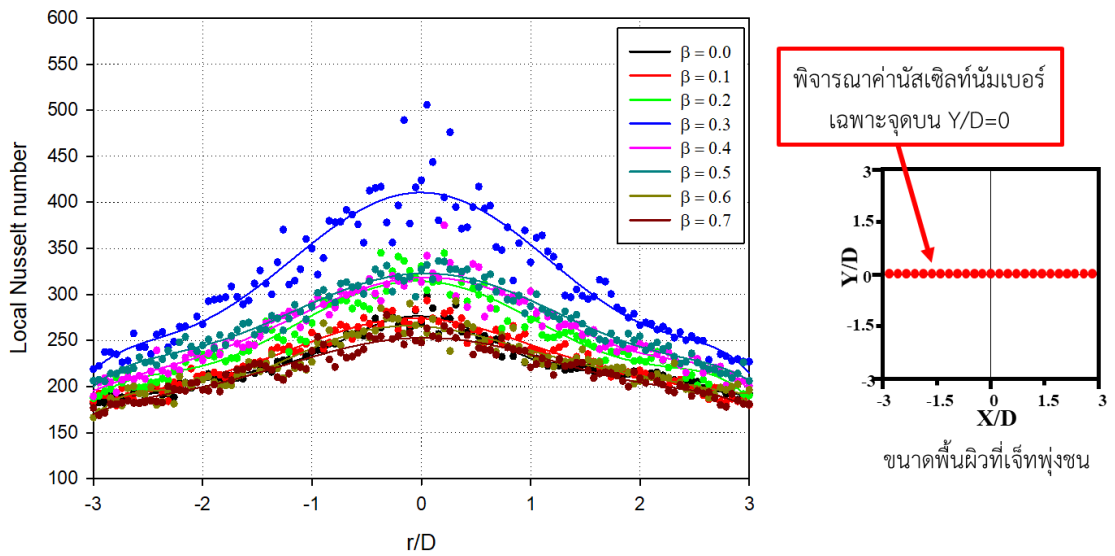
ในรูปที่ 4.21 แสดงการกระจายน้สเซลล์ท์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทฟุ้งชนที่เรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะฟุ้งชน $L=4D$ โดยมีสัดส่วนระหว่างอัตราการใช้พลังงานของอากาศกับอัตราการใช้พลังงานรวมที่ $\beta = 0.0$ ถึง 0.7 พบว่าเมื่อพิจารณาผลของการเพิ่มสัดส่วนระหว่างอัตราการใช้พลังงานของอากาศกับอัตราการใช้พลังงานรวม กรณีที่ค่า $\beta = 0.6$ และ 0.7 มีค่าการกระจายน้สเซลล์ท์นัมเบอร์บนพื้นผิวน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่มีค่า $\beta = 0.0$ และกรณีที่มีค่า $\beta = 0.1$ ถึง 0.5 มีค่าการกระจายน้สเซลล์ท์นัมเบอร์บนพื้นผิวสูงกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่มีค่า $\beta = 0.0$ โดยในกรณีที่ $\beta = 0.3$ มีค่าการกระจายน้สเซลล์ท์นัมเบอร์สูงสุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น สำหรับที่ระยะฟุ้งชน $L=4D$ ซึ่งเมื่อพิจารณาการกระจายน้สเซลล์ท์นัมเบอร์เฉพาะจุดบนพื้นผิวในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในตำแหน่ง $Y/D=0$ ในรูปที่ 4.22 และการกระจายน้สเซลล์ท์นัมเบอร์เฉลี่ยตามตำแหน่ง r/D ต่าง ๆ ในช่วง $0 \leq r/D \leq 3$ สำหรับในรูปที่ 4.23 จะให้ค่าแนวโน้มเช่นเดียวกัน

โดยผลของการเพิ่มสัดส่วนระหว่างอัตราการใช้พลังงานของอากาศกับอัตราการใช้พลังงานรวมตั้งแต่ $\beta = 0.0$ ถึง 0.3 ในช่วงนี้ปริมาณของฟองอากาศจะเป็นก้อนขนาดเล็กกระจายตัวสม่ำเสมอตลอดการไหลบนพื้นผิว ซึ่งฟองอากาศขนาดเล็กสามารถบวกรวมขึ้นขอบเขตความร้อนบนพื้นผิวได้ ทำให้เกิดการเพิ่มความสามารถในพาความร้อน แม้ว่าในกรณีที่ค่า $\beta = 0.3$ จะมีลักษณะเป็นฟองอากาศคล้ายรูปหัวเห็ดขณะปะทะกับพื้นผิว ส่งผลให้สถานะอากาศโดยส่วนใหญ่จะก่อให้เกิดการปกคลุมพื้นผิวในขณะฟุ้งชน หลังจากนั้นจะเกิดการแตกตัวเป็นฟองอากาศขนาดเล็กไหลเรียบบนพื้นผิว ซึ่งเป็นปริมาณอากาศที่เหมาะสมในการเพิ่มระดับความปั่นป่วนในการไหลของกระแสลำเจ็ท เป็นผลทำให้ในช่วงนี้ค่าการกระจายน้สเซลล์ท์นัมเบอร์บนพื้นผิวจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง

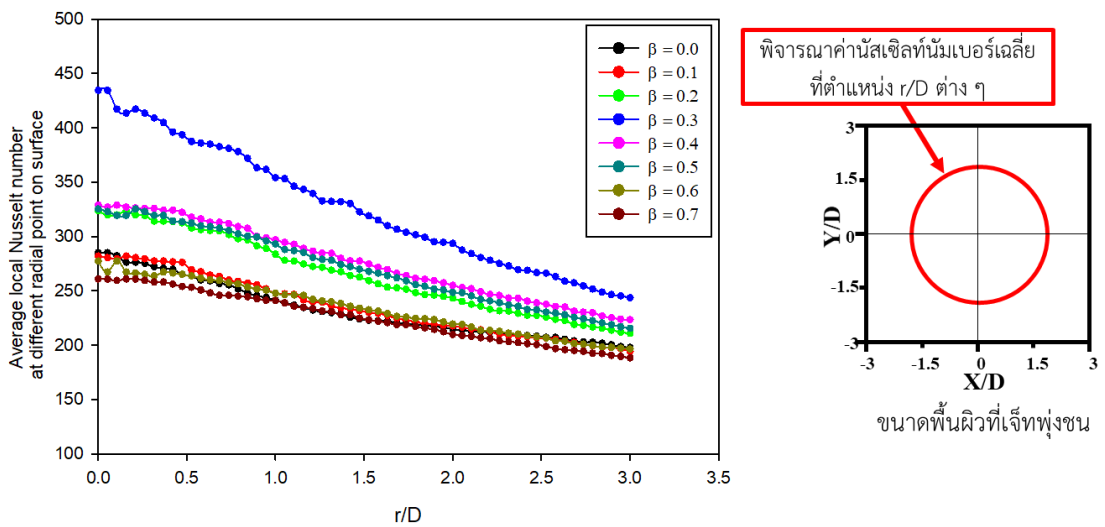
และเมื่อพิจารณาผลของการเพิ่มสัดส่วนระหว่างอัตราการใช้พลังงานของอากาศกับอัตราการใช้พลังงานรวมตั้งแต่ $\beta = 0.3$ ถึง 0.7 ในช่วงนี้ฟองอากาศที่ใกล้ปากทางออกของเจ็ทจะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนฟองอากาศคล้ายรูปหัวเห็ดและมีขนาดก้อนใหญ่ขึ้นตามค่า β ที่เพิ่มขึ้น สำหรับที่ $\beta = 0.4$ และ 0.5 ต่อมาในกรณีที่ $\beta = 0.6$ และ 0.7 ลักษณะการไหลของฟองอากาศจะเริ่มค่อนข้างต่อเนื่องตลอดการไหลจากปากทางออกถึงพื้นผิวที่ฟุ้งชน เนื่องจากจากปริมาณของอากาศที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้พื้นผิวที่เจ็ทฟุ้งชนถูกปกคลุมด้วยสถานะอากาศโดยส่วนใหญ่ ซึ่งในกรณีของช่วงนี้จะเห็นได้ว่าปริมาณของอากาศที่ปะทะกับพื้นผิวโดยส่วนใหญ่จะมีรูปร่างลักษณะเป็นก้อนฟองอากาศที่ใหญ่หรือเป็นก้อนที่ค่อนข้างต่อเนื่อง ซึ่งจะส่งผลให้ค่าการกระจายน้สเซลล์ท์นัมเบอร์บนพื้นผิวลดลงอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 4.21 การกระจายสเกลที่ผนังเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่เรย์โนลด์มีเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะพุ่งชน $L=4D$



รูปที่ 4.22 การกระจายนัสเซลท์นัมเบอร์เฉพาะจุดในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในตำแหน่ง $Y/D=0$ สำหรับเรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะฟุ้งชน $L=4D$

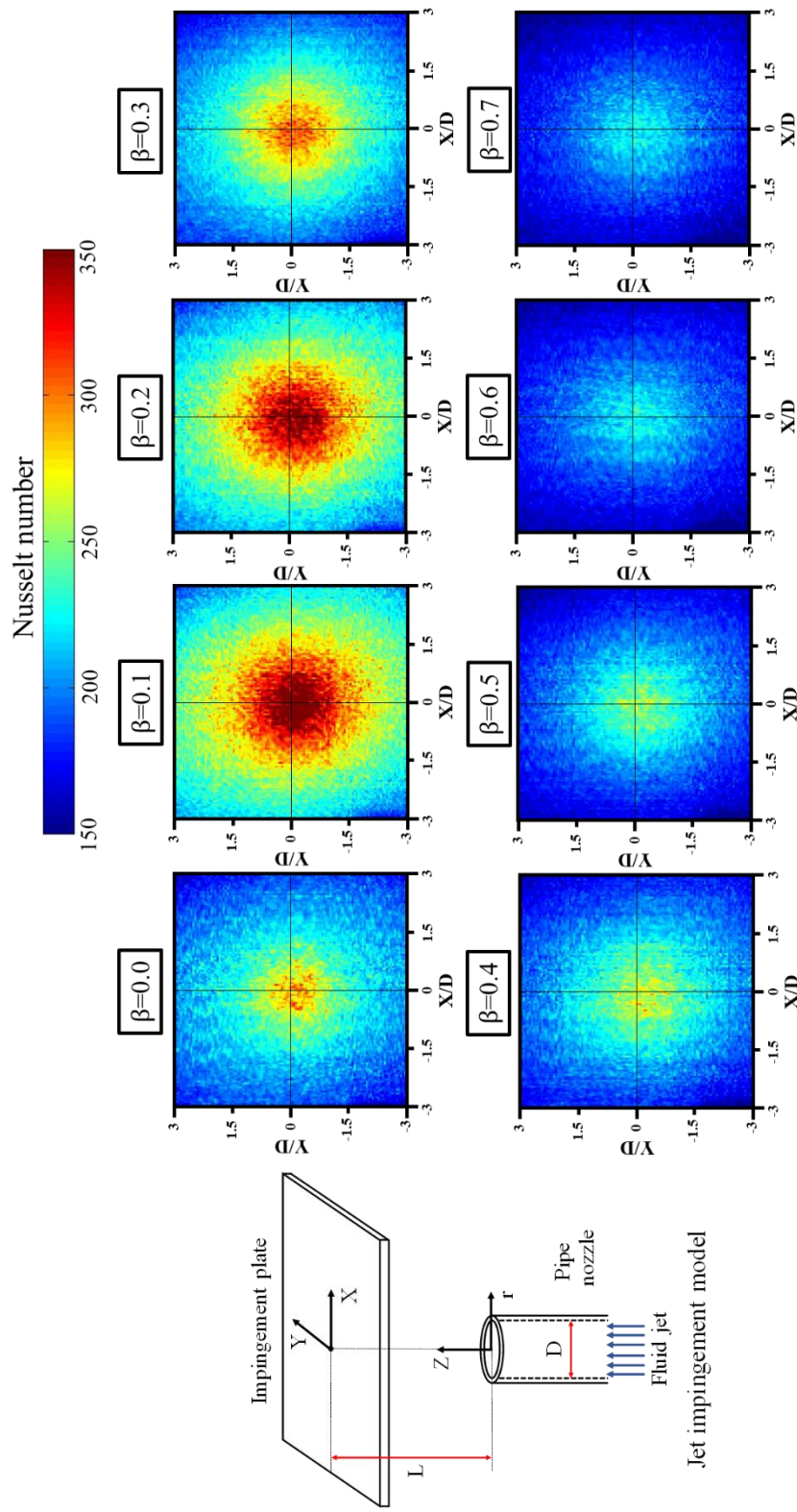


รูปที่ 4.23 การกระจายนัสเซลท์นัมเบอร์เฉลี่ยตามตำแหน่ง r/D ต่าง ๆ ในช่วง $0 \leq r/D \leq 3$ สำหรับเรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะฟุ้งชน $L=4D$

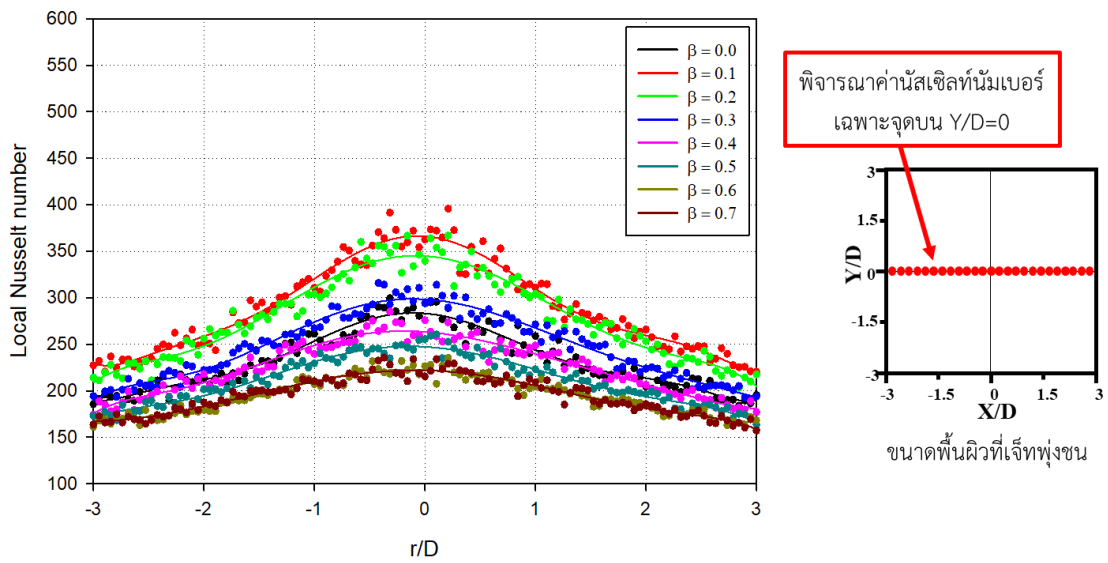
(3) กรณีที่ระยะฟุ้งชน $L=6D$

ในรูปที่ 4.24 แสดงการกระจายน้สเซลล์ท์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทฟุ้งชนที่เรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะห่างจากปากทางออกถึงพื้นผิวที่ฟุ้งชน $L=6D$ โดยมีสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ $\beta=0.0$ ถึง 0.7 พบว่าเมื่อพิจารณาผลของการเพิ่มสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม กรณีที่ค่า $\beta=0.4$ ถึง 0.7 มีค่าการกระจายน้สเซลล์ท์นัมเบอร์บนพื้นผิวน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่ $\beta=0.0$ และกรณีที่ค่า $\beta=0.1$ ถึง 0.3 มีค่าการกระจายน้สเซลล์ท์นัมเบอร์บนพื้นผิวสูงกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่ $\beta=0.0$ โดยในกรณีที่ $\beta=0.1$ มีค่าการกระจายน้สเซลล์ท์นัมเบอร์สูงสุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น สำหรับที่ระยะฟุ้งชน $L=6D$ ซึ่งเมื่อพิจารณาการกระจายน้สเซลล์ท์นัมเบอร์เฉพาะจุดบนพื้นผิวในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในตำแหน่ง $Y/D=0$ ในรูปที่ 4.25 และการกระจายน้สเซลล์ท์นัมเบอร์เฉลี่ยตามตำแหน่ง r/D ต่าง ๆ ในช่วง $0 \leq r/D \leq 3$ สำหรับในรูปที่ 4.26 จะให้ค่าแนวโน้มเช่นเดียวกัน

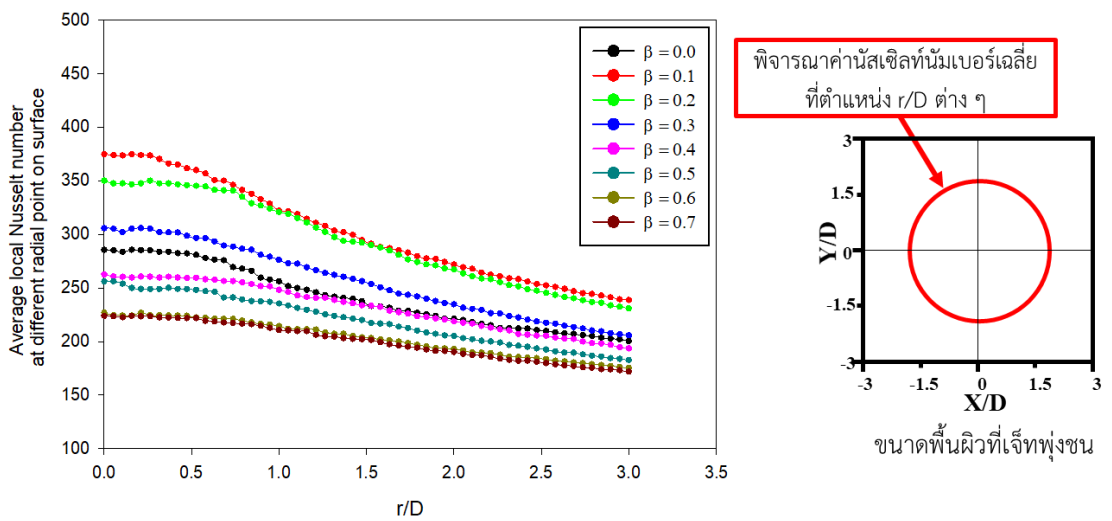
โดยผลของการเพิ่มสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมตั้งแต่ $\beta=0.0$ ถึง 0.1 ในช่วงนี้ปริมาณของฟองอากาศจะเป็นก้อนขนาดเล็กในกระแสการไหลของลำเจ็ทและไหลเข้าปะทะกับพื้นผิว ซึ่งฟองอากาศขนาดเล็กสามารถรบกวนชั้นขอบเขตความร้อนบนพื้นผิวได้ อีกทั้งสามารถเพิ่มระดับความปั่นป่วนในการไหลของกระแสลำเจ็ทได้ เป็นผลให้ค่าการกระจายน้สเซลล์ท์นัมเบอร์เพิ่มสูงขึ้นในช่วงนี้ และเมื่อพิจารณาผลของการเพิ่มสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมตั้งแต่ $\beta=0.1$ ถึง 0.7 โดยปริมาณอากาศจะเพิ่มสูงขึ้นในกระแสการไหลของลำเจ็ทเมื่อค่า β สูงขึ้น ทั้งนี้ในกรณีที่ค่า $\beta=0.2$ และ 0.3 ลักษณะของฟองอากาศที่ออกจากท่อเจ็ทจะมีลักษณะคล้ายรูปร่างหัวกระสุน เมื่อฟองอากาศก้อนนี้เคลื่อนที่สู่สภาพแวดล้อมที่เป็นน้ำ จะก่อให้เกิดการเฉือนกันระหว่างฟองอากาศและน้ำบริเวณโดยรอบ ทำให้รูปร่างของฟองอากาศที่เข้าปะทะกับพื้นผิวจะเป็นก้อนฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมาก ซึ่งค่าการกระจายน้สเซลล์ท์นัมเบอร์บนพื้นผิวจะยังค่อนข้างสูงสำหรับที่ค่า β นี้ แต่ในกรณีที่ค่า $\beta=0.4, 0.5, 0.6$ และ 0.7 ปริมาณอากาศที่ปกคลุมพื้นผิวจะมีปริมาณที่สูงขึ้นตามค่า β ที่เพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้ค่าการกระจายน้สเซลล์ท์นัมเบอร์บนพื้นผิวลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วงนี้



รูปที่ 4.24 การกระจายสเกลที่แผ่นเบอร์ดที่มีพื่นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่เรย์โนลด์มีเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะพุ่งชน $L=6D$



รูปที่ 4.25 การกระจายนัสเซลท์ที่นับเบอร์เฉพาะจุดในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในตำแหน่ง $Y/D=0$ สำหรับเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะพุงชน $L=6D$



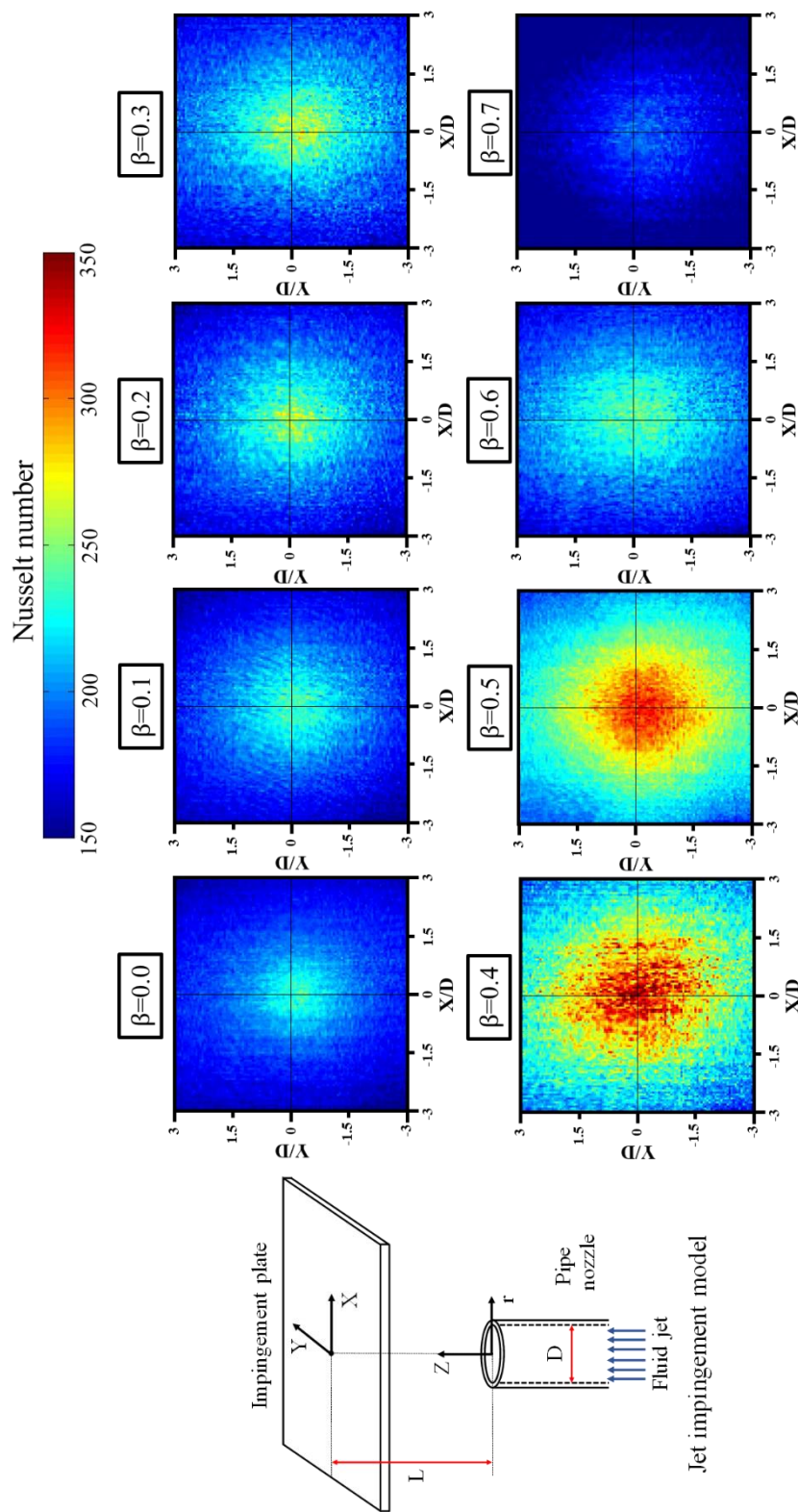
รูปที่ 4.26 การกระจายนัสเซลท์ที่นับเบอร์เฉลี่ยตามตำแหน่ง r/D ต่าง ๆ ในช่วง $0 \leq r/D \leq 3$ สำหรับเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะพุงชน $L=6D$

(4) กรณีที่ระยะฟุ้งชน $L=8D$

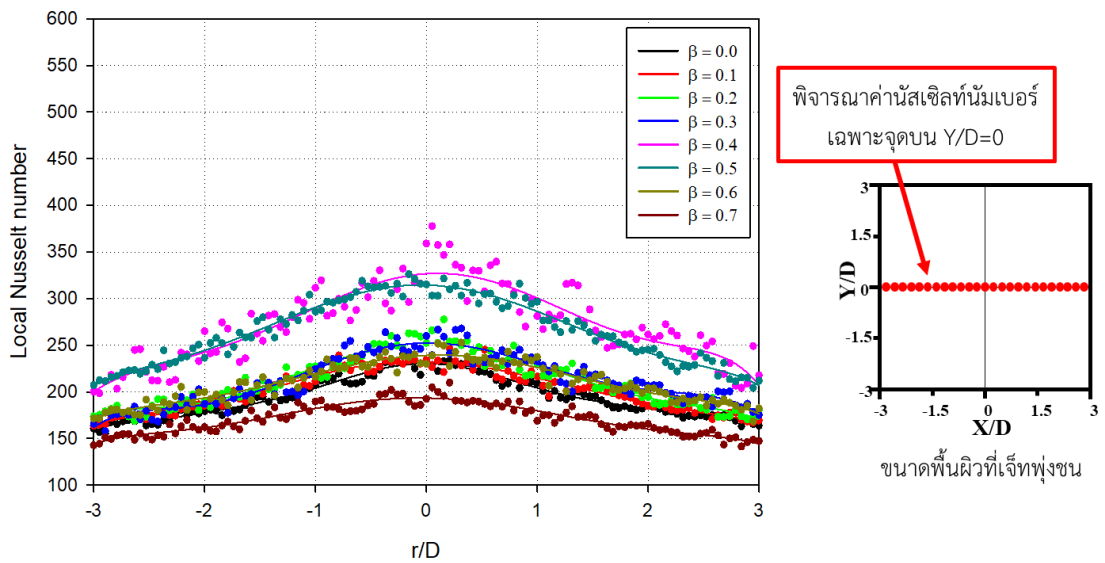
ในรูปที่ 4.27 แสดงการกระจายน้สเซลล์ท์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทฟุ้งชนที่เรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะฟุ้งชน $L=8D$ โดยมีสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ $\beta = 0.0$ ถึง 0.7 พบว่าเมื่อพิจารณาผลของการเพิ่มสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม กรณีที่ค่า $\beta = 0.7$ มีค่าการกระจายน้สเซลล์ท์นัมเบอร์บนพื้นผิวน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่ $\beta = 0.0$ และกรณีที่ค่า $\beta = 0.1$ ถึง 0.6 มีค่าการกระจายน้สเซลล์ท์นัมเบอร์บนพื้นผิวสูงกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่ $\beta = 0.0$ โดยในกรณีที่ $\beta = 0.4$ มีค่าการกระจายน้สเซลล์ท์นัมเบอร์สูงสุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น สำหรับที่ระยะฟุ้งชน $L=8D$ ซึ่งเมื่อพิจารณาการกระจายน้สเซลล์ท์นัมเบอร์เฉพาะจุดบนพื้นผิวในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในตำแหน่ง $Y/D=0$ ในรูปที่ 4.28 และการกระจายน้สเซลล์ท์นัมเบอร์เฉลี่ยตามตำแหน่ง r/D ต่าง ๆ ในช่วง $0 \leq r/D \leq 3$ สำหรับในรูปที่ 4.29 จะให้ค่าแนวโน้มเช่นเดียวกัน

โดยผลของการเพิ่มสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมตั้งแต่ $\beta = 0.0$ ถึง 0.4 พบว่าในช่วงนี้ค่าการกระจายน้สเซลล์ท์นัมเบอร์เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในช่วงนี้ฟองอากาศจะมีลักษณะเป็นก้อนฟองอากาศขนาดเล็กไหลปะทะเข้ากับพื้นผิว โดยเฉพาะในกรณีที่ค่า $\beta = 0.4$ แม้ว่าลักษณะการไหลในช่วงแรกที่อยู่บริเวณที่ออกจาท่อเจ็ท ฟองอากาศจะเกิดการรวมเป็นกลุ่มก้อนคล้ายรูปหัวเห็ด แต่ด้วยระยะฟุ้งชนที่เพิ่มขึ้นในกรณีนี้ที่ $L=8D$ มีผลทำให้กลุ่มก้อนฟองอากาศนี้จะใช้เวลาในการเคลื่อนที่นานขึ้น ซึ่งน้ำที่อยู่บริเวณโดยรอบจะทำปฏิกิริยากับฟองอากาศโดยการเฉือนในระยะเวลาที่นานกว่าในกรณีที่ระยะฟุ้งชนที่ค่าน้อย ทำให้ฟองอากาศแตกตัวเป็นก้อนขนาดเล็กจำนวนมากเข้าปะทะกับพื้นผิว โดยในกรณีที่ $\beta = 0.4$ จะให้ค่าการกระจายน้สเซลล์ท์นัมเบอร์สูงสุด

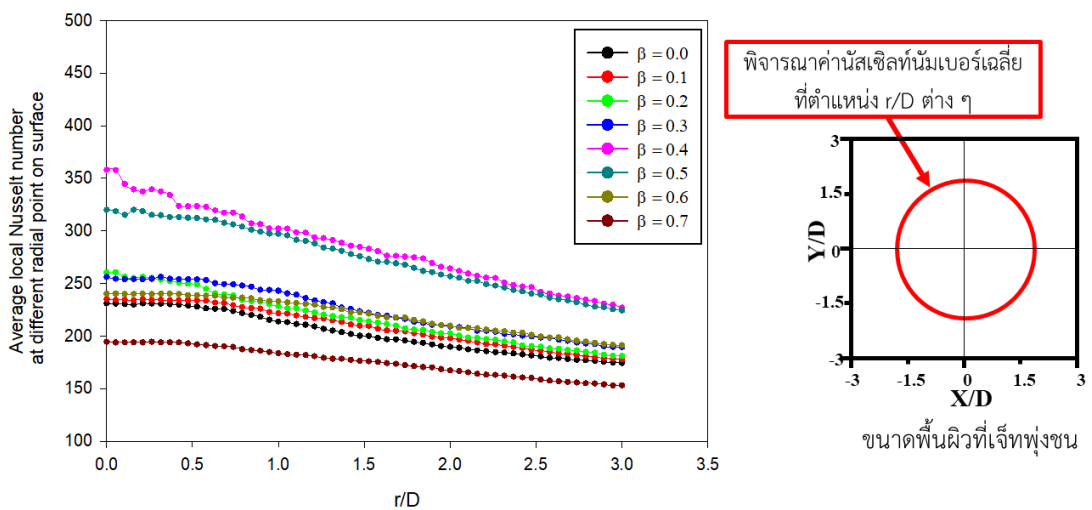
จากนั้นผลของการเพิ่มสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมตั้งแต่ $\beta = 0.4$ ถึง 0.7 พบว่าในช่วงนี้ค่าการกระจายน้สเซลล์ท์นัมเบอร์จะลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยผลของปริมาณอากาศที่สูง มีผลทำให้ของไหลเจ็ทที่ฟุ้งชนพื้นผิวจะเต็มไปด้วยฟองอากาศที่เป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่หรือเป็นกลุ่มก้อนที่ค่อนข้างเป็นเนื้อเดียวกัน จึงเป็นปัจจัยที่นำไปสู่การลดความสามารถในการถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 4.27 การกระจายสเกลที่แผ่นเบอร์ดที่มีผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่เรย์โนลด์ส์เบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะพุ่งชน $L=8D$



รูปที่ 4.28 การกระจายนัสเซลท์นัมเบอร์เฉพาะจุดในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในตำแหน่ง $Y/D=0$ สำหรับเรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะฟุ้งชน $L=8D$

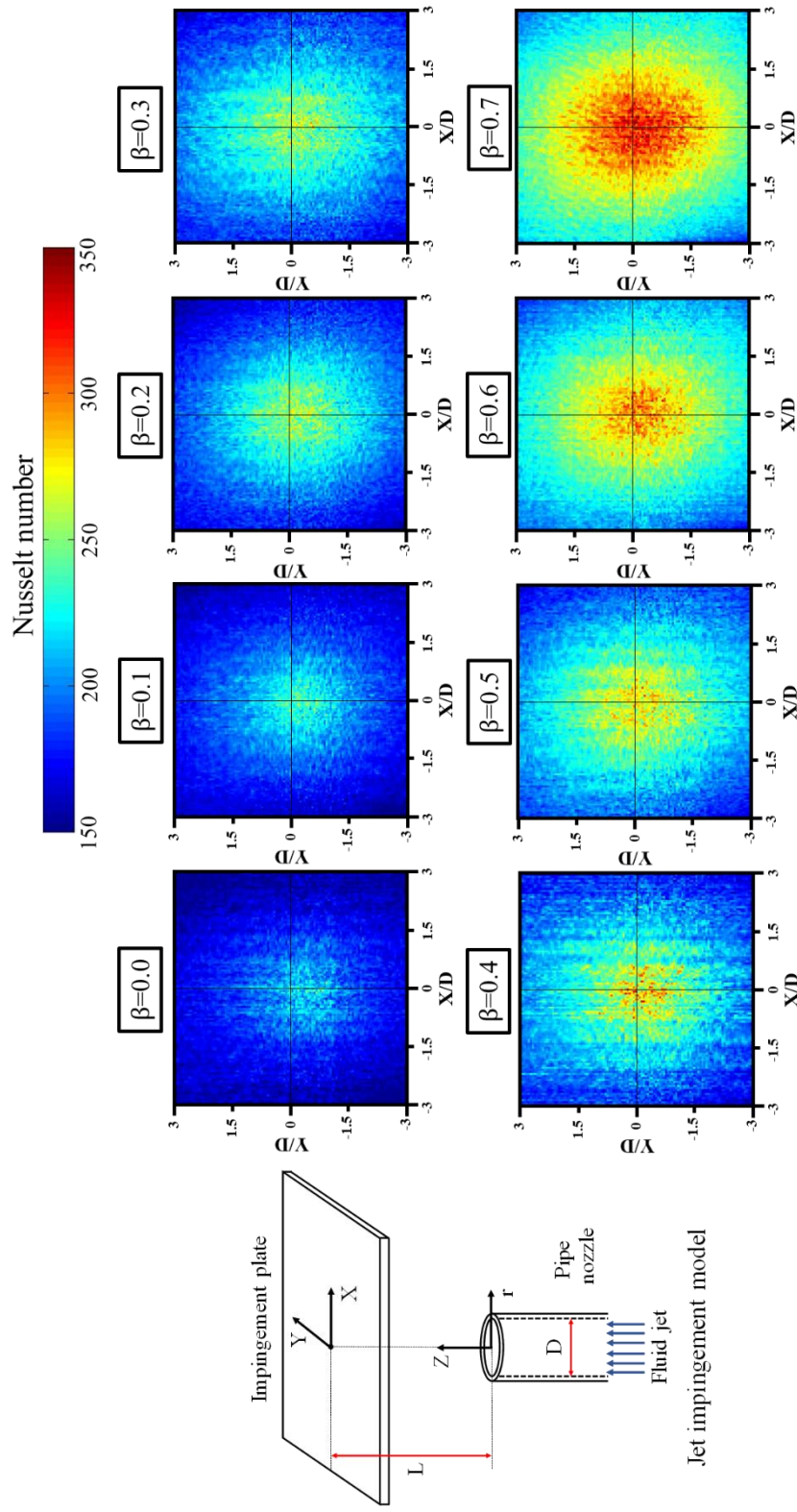


รูปที่ 4.29 การกระจายนัสเซลท์นัมเบอร์เฉลี่ยตามตำแหน่ง r/D ต่าง ๆ ในช่วง $0 \leq r/D \leq 3$ สำหรับเรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะฟุ้งชน $L=8D$

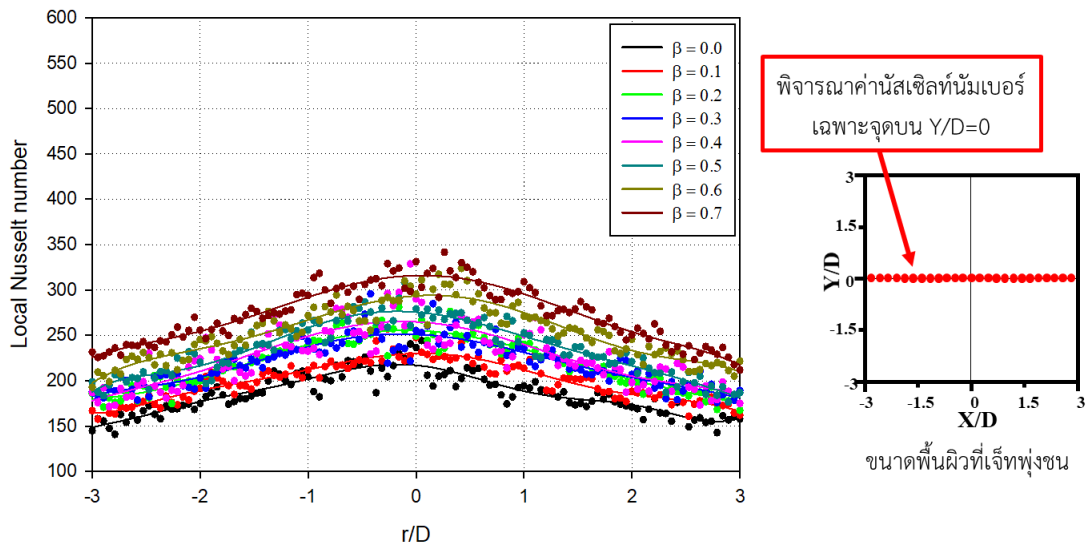
(5) กรณีที่ระยะฟุ้งชน $L=10D$

ในรูปที่ 4.30 แสดงการกระจายน้สเซลท์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทฟุ้งชนที่เรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะฟุ้งชน $L=10D$ โดยมีสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ $\beta = 0.0$ ถึง 0.7 พบว่าเมื่อพิจารณาผลของการเพิ่มสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม กรณีที่ค่า β มีค่าอยู่ในช่วง $\beta = 0.1$ ถึง 0.7 มีค่าการกระจายน้สเซลท์นัมเบอร์บนพื้นผิวสูงกว่าเมื่อเทียบกับกรณี $\beta = 0.0$ โดยในกรณีที่ $\beta = 0.7$ มีค่าการกระจายน้สเซลท์นัมเบอร์สูงสุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น สำหรับที่ระยะฟุ้งชน $L=10D$ ซึ่งเมื่อพิจารณาการกระจายน้สเซลท์นัมเบอร์เฉพาะจุดบนพื้นผิวในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในตำแหน่ง $Y/D=0$ ในรูปที่ 4.31 และการกระจายน้สเซลท์นัมเบอร์เฉลี่ยตามตำแหน่ง r/D ต่าง ๆ ในช่วง $0 \leq r/D \leq 3$ สำหรับในรูปที่ 4.32 จะให้ค่าแนวโน้มเช่นเดียวกัน

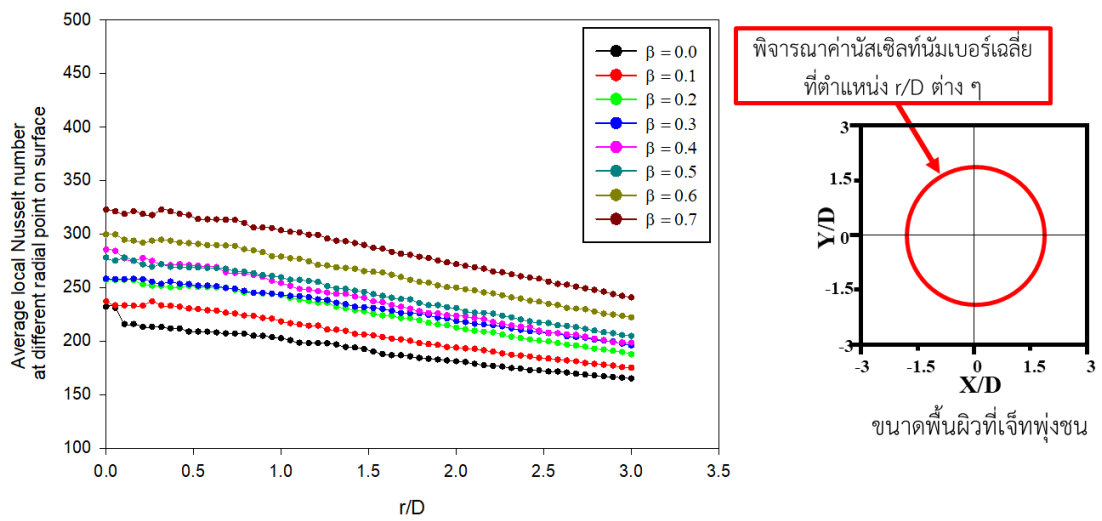
โดยผลของการเพิ่มสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมตั้งแต่ $\beta = 0.0$ ถึง 0.7 พบว่าในช่วงนี้ค่าการกระจายน้สเซลท์นัมเบอร์เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในกรณีที่ค่า $\beta = 0.7$ ลักษณะของฟองอากาศที่ไหลออกจากปากทางออกของท่อเจ็ท จะเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนคล้ายรูปหัวเห็ด ซึ่งด้วยระยะห่างจากท่อเจ็ทถึงพื้นผิวที่ฟุ้งชนที่มาก มีผลทำให้กลุ่มก้อนฟองอากาศนี้จะถูกเฉือนในระยะเวลาที่นานกว่าที่ระยะฟุ้งชนที่ค่าน้อย ซึ่งทำให้ฟองอากาศกลุ่มก้อนนี้เกิดการแตกตัวเป็นฟองขนาดเล็กจำนวนมาก ซึ่งจะช่วยในการเพิ่มระดับความปั่นป่วนในการไหลของลำเจ็ทและผลของฟองอากาศจำนวนมากจะก่อให้เกิดการรบกวนชั้นขอบเขตความร้อนทั่วทั้งพื้นผิว จึงทำให้ในกรณีที่ค่า $\beta = 0.7$ จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงที่สุด



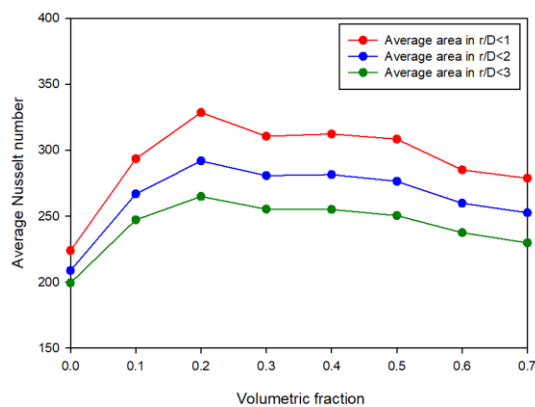
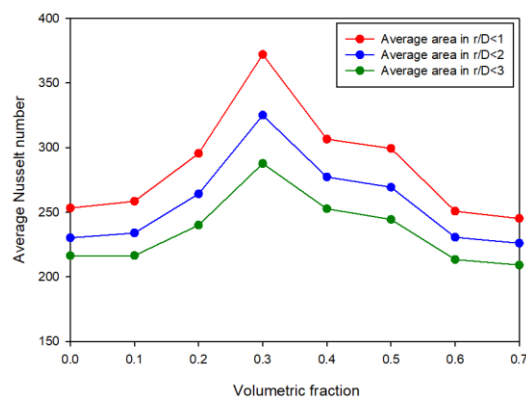
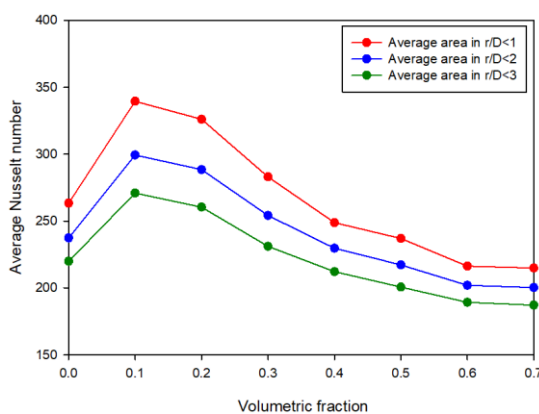
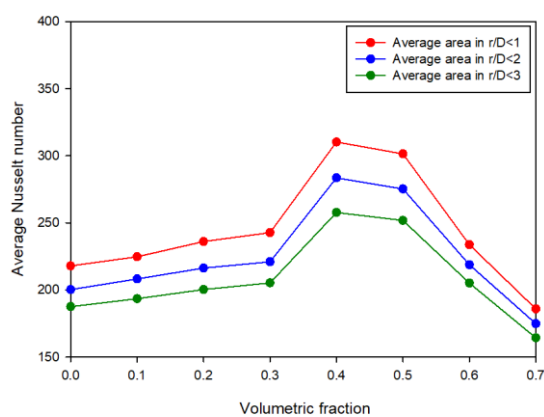
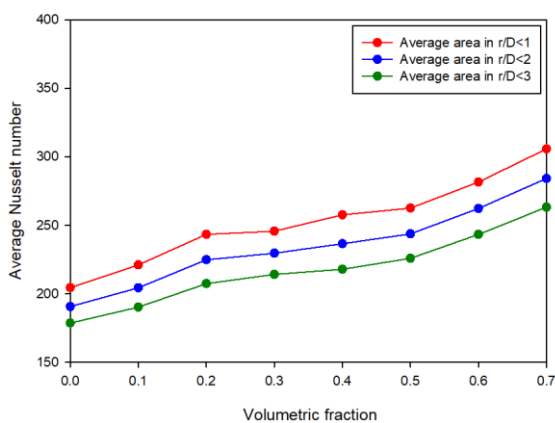
รูปที่ 4.30 การกระจายสเกลเทมเปอร์เจอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะพุ่งชน $L=10D$



รูปที่ 4.31 การกระจายนัสเซลท์นัมเบอร์เฉพาะจุดในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในตำแหน่ง $Y/D=0$ สำหรับเรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะพุงชน $L=10D$



รูปที่ 4.32 การกระจายนัสเซลท์นัมเบอร์เฉลี่ยตามตำแหน่ง r/D ต่าง ๆ ในช่วง $0 \leq r/D \leq 3$ สำหรับเรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ ที่ระยะพุงชน $L=10D$

(ก) ระยะฟุ้งชน $L=2D$ (ข) ระยะฟุ้งชน $L=4D$ (ค) ระยะฟุ้งชน $L=6D$ (ง) ระยะฟุ้งชน $L=8D$ (จ) ระยะฟุ้งชน $L=10D$

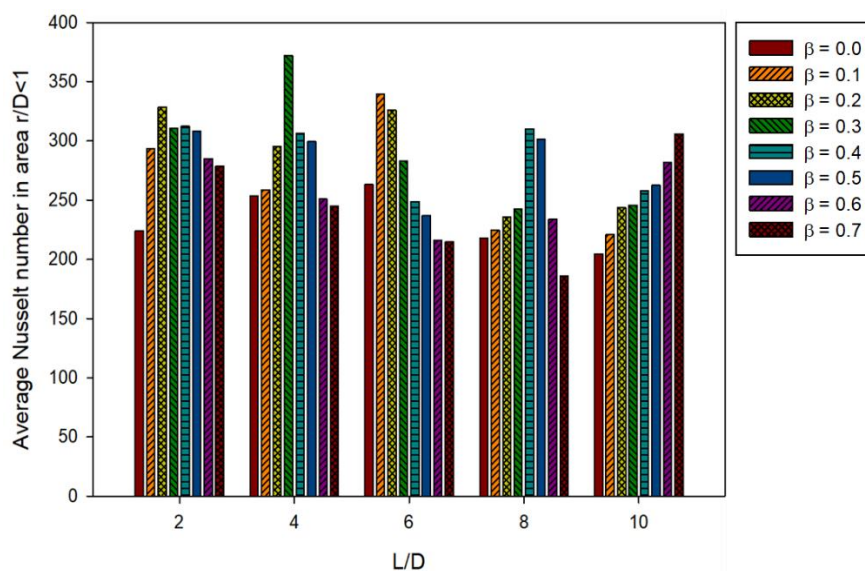
รูปที่ 4.33 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของสเกลที่หนาแน่นเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวในช่วงรัศมี $r/D \leq 1$, $r/D \leq 2$, และ $r/D \leq 3$ ที่เรย์โนลด์สหนาแน่นเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w = 24,000$ สำหรับ (ก) ระยะฟุ้งชน $L=2D$, (ข) ระยะฟุ้งชน $L=4D$, (ค) ระยะฟุ้งชน $L=6D$, (ง) ระยะฟุ้งชน $L=8D$ และ (จ) ระยะฟุ้งชน $L=10D$

ในรูปที่ 4.33 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขที่นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวในช่วงรัศมี $r/D \leq 1$, $r/D \leq 2$, และ $r/D \leq 3$ ที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w = 24,000$ สำหรับ (ก) ระยะพุ่งชน $L=2D$, (ข) ระยะพุ่งชน $L=4D$, (ค) ระยะพุ่งชน $L=6D$, (ง) ระยะพุ่งชน $L=8D$ และ (จ) ระยะพุ่งชน $L=10D$ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าตัวเลขที่นัมเบอร์เฉลี่ยในช่วง $r/D \leq 1$ เป็นช่วงที่เจ็ทของไหลพุ่งชนกับพื้นผิวโดยตรงหรือเป็นช่วง Impingement region จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดในทุกกรณี เมื่อเทียบกับค่าตัวเลขที่นัมเบอร์เฉลี่ยในช่วง $r/D \leq 2$ และต่ำสุดที่ $r/D \leq 3$ ตามลำดับ เนื่องจากเป็นช่วงที่เจ็ทของไหลพุ่งชนเปลี่ยนทิศทางเป็นการไหลแบบขนานกับพื้นผิวหรือ Wall jet region เมื่อพิจารณาผลของการเพิ่มสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมตั้งแต่ $\beta = 0.0$ ถึง 0.7 สำหรับระยะพุ่งชนที่ $L=2D, 4D, 6D$ และ $8D$ พบว่าลักษณะช่วงการถ่ายเทความร้อนจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่

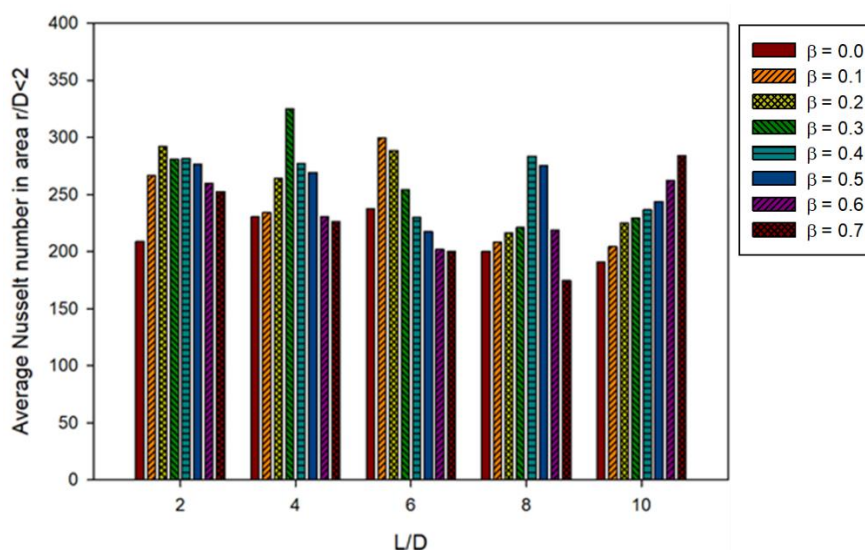
ช่วงที่ค่าตัวเลขที่นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวเพิ่มขึ้น เนื่องจากพฤติกรรมโดยส่วนใหญ่ที่ก่อให้เกิดการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อน คือ ฟองอากาศที่มีรูปร่างเป็นก้อนขนาดเล็กที่กระจายทั่วกระแสการไหลของลำเจ็ทและเข้าพุ่งชนกับพื้นผิว ซึ่งพบในกรณีที่มีค่า β ที่ค่าต่ำ และช่วงที่ค่าตัวเลขที่นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวลดลง เนื่องจากพฤติกรรมโดยส่วนใหญ่ที่ส่งผลให้เกิดการลดความสามารถในการถ่ายเทความร้อน คือ พื้นผิวโดยส่วนใหญ่ถูกปกคลุมด้วยกลุ่มก้อนฟองอากาศขนาดใหญ่ โดยปริมาณอากาศที่เพิ่มขึ้นในกระแสการไหลของลำเจ็ท ซึ่งพบในกรณีที่มีค่า β ที่ค่าสูง แต่ในกรณีที่มีระยะพุ่งชน $L=10D$ พบว่าค่าตัวเลขที่นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แม้ว่าผลของการเพิ่มสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมจะส่งผลให้พื้นผิวโดยส่วนใหญ่ถูกปกคลุมด้วยสถานะอากาศที่ระยะพุ่งชนน้อย ๆ แต่ในกรณีนี้เป็นระยะพุ่งชนที่มาก ส่งผลให้กลุ่มก้อนฟองอากาศจะเกิดการแตกตัวเป็นฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมาก เนื่องด้วยเวลาที่น้ำบริเวณโดยรอบทำปฏิกิริยาโดยการเชื่อมกันกับฟองอากาศจะนานกว่าที่ระยะพุ่งชนน้อย ๆ ทำให้ในกรณีที่มีค่า β สูง มีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้ที่ระยะพุ่งชน $L=10D$

ในรูปที่ 4.34 ถึงรูปที่ 4.36 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขที่เฉลี่ยบนพื้นผิวในพื้นที่ $r/D \leq 1$, $r/D \leq 2$, และ $r/D \leq 3$ ตามลำดับ สำหรับผลของสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมในช่วง $\beta = 0.0$ ถึง 0.7 ที่ระยะพุ่งชน $L=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ตามลำดับ พบว่าในกรณีที่มีระยะพุ่งชน $L=4D$ ที่ $\beta = 0.3$ จะให้ค่าตัวเลขที่นัมเบอร์เฉลี่ยสูงสุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น เนื่องจากในกรณีที่ใช้เจ็ทของไหลที่เป็นน้ำ จะให้ค่าตัวเลขที่นัมเบอร์เฉลี่ยค่อนข้างสูง ดังแสดงในรูปที่ 4.37 โดยการไหลมีการพัฒนาการไหลค่อนข้างที่จะสมบูรณ์ในระยะนี้ ซึ่งการใช้เจ็ทของไหลที่เป็นน้ำผสมอากาศ จึงช่วยเสริมการเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนโดยการเพิ่มระดับความปั่นป่วนในการไหลและฟองอากาศที่ไหลร่วมในกระแสลำเจ็ทเมื่อปะทะพื้นผิวส่งผลให้รับกวนชั้นขอบเขตความร้อนบนพื้นผิว แต่ในกรณีที่มีระยะพุ่งชน $L=8D$ ที่ $\beta = 0.7$ จะให้ค่าตัวเลขที่นัมเบอร์เฉลี่ยต่ำสุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น เนื่องจากในกรณีที่ใช้เจ็ทของไหลที่เป็นน้ำ จะให้ค่าตัวเลขที่นัมเบอร์เฉลี่ยค่อนข้างต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.36 เช่นกัน โดยการไหลที่ระยะนี้จะเริ่มมีการสูญเสียพลังงานจลน์ อันเนื่องมาจากระยะพุ่งชนที่มากขึ้น และในกรณีนี้มีค่า β ที่สูง ทำให้ปริมาณ

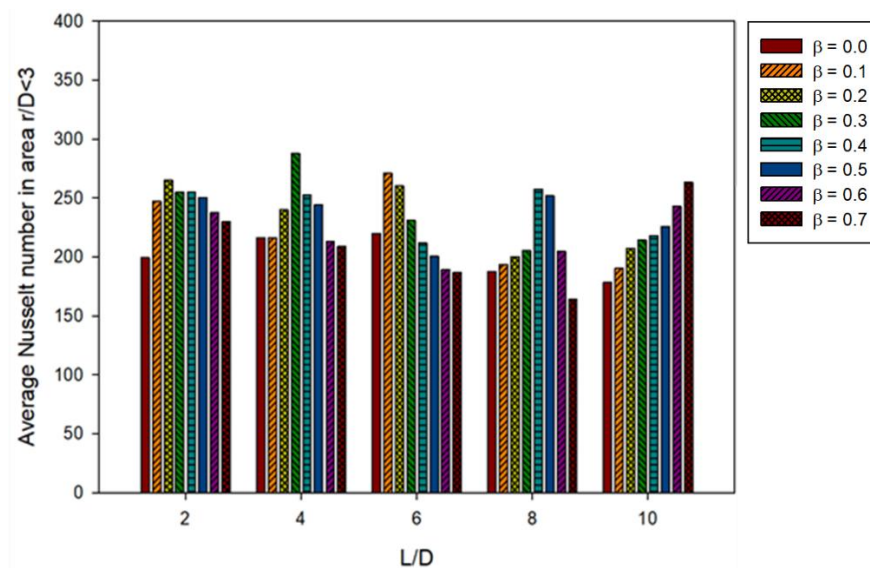
อากาศในกระแสลำเจ็ทมีปริมาณที่มากเช่นกัน ส่งผลให้พื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนโดยส่วนใหญ่ ถูกปกคลุมด้วยปริมาณอากาศจำนวนมาก เป็นผลทำให้ลดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนลง



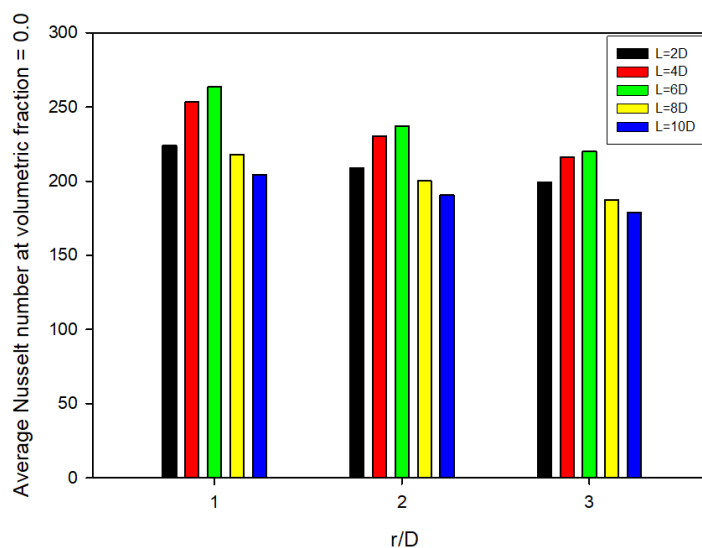
รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบค่านัสเซิลท์เฉลี่ยบนพื้นผิวใน $r/D \leq 1$ ที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w = 24,000$ ที่ระยะพุ่งชน $L = 2D, 4D, 6D, 8D,$ และ $10D$ ตามลำดับ



รูปที่ 4.35 เปรียบเทียบค่านัสเซิลท์เฉลี่ยบนพื้นผิวใน $r/D \leq 2$ ที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w = 24,000$ ที่ระยะพุ่งชน $L = 2D, 4D, 6D, 8D,$ และ $10D$ ตามลำดับ



รูปที่ 4.36 เปรียบเทียบค่านัสเซิลท์เฉลี่ยบนพื้นผิวใน $r/D \leq 3$ ที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w = 24,000$ ที่ระยะพุ่งชน $L = 2D, 4D, 6D, 8D,$ และ $10D$ ตามลำดับ



รูปที่ 4.37 เปรียบเทียบค่านัสเซิลท์เฉลี่ยบนพื้นผิวใน $r/D \leq 1, r/D \leq 2$ และ $r/D \leq 3$ ตามลำดับ ที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w = 24,000$ และสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ $\beta = 0.0$

ในรูปที่ 4.38 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w = 24,000$ และสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ $\beta = 0.1$ ถึง 0.7 ที่ระยะพุ่งชน $L = 2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ตามลำดับ ซึ่งจะอธิบายถึงการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศเทียบกรณีการใช้เจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำที่ระยะพุ่งชนเดียวกัน

โดยที่ระยะพุ่งชน $L=2D$ พบว่าสามารถแบ่งช่วงลักษณะการถ่ายเทความร้อนได้ 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่หนึ่ง คือ $0.0 < \beta \leq 0.2$ เป็นช่วงที่ค่านัสเซลท์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวเพิ่มสูงขึ้นและมีค่าสูงสุดที่ $\beta = 0.2$ ในช่วงนี้ปริมาณของฟองอากาศจะเป็นก้อนขนาดเล็กขณะปะทะกับพื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.39 (ข) ซึ่งฟองอากาศขนาดเล็กสามารถรบกวนชั้นขอบเขตความร้อนบนพื้นผิวได้ ทำให้เกิดการเพิ่มความสามารถในพาความร้อน สำหรับที่ค่า $\beta = 0.1$ และ 0.2 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนได้ 31.1% และ 46.7% เมื่อเทียบกับการใช้เจ็ทของไหลที่เป็นน้ำ ต่อมาช่วงที่สอง คือ $0.2 < \beta \leq 0.7$ เป็นช่วงที่ค่านัสเซลท์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยการเพิ่มค่า β มีผลต่อการเพิ่มปริมาณอากาศในกระแสรอบการไหลของลำเจ็ท และเมื่อเจ็ทของไหลเคลื่อนที่ปะทะกับพื้นผิว จะก่อให้เกิดการปกคลุมด้วยปริมาณอากาศจำนวนมากบนพื้นผิว ซึ่งก่อให้เกิดการลดความสามารถในการถ่ายเทความร้อน แต่ในกรณีนี้พบว่าค่านัสเซลท์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวยังสูงกว่าการใช้เจ็ทของไหลที่เป็นน้ำ อันเนื่องมาจากการใช้เจ็ทของไหลน้ำผสมร่วมกับอากาศก่อให้เกิดการเพิ่มระดับความปั่นป่วนในกระแสรอบการไหลของลำเจ็ท สำหรับที่ค่า $\beta = 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$ และ 0.7 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนได้ 39.5%, 38.7%, 37.8%, 27.4% และ 24.5% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับการใช้เจ็ทของไหลที่เป็นน้ำ

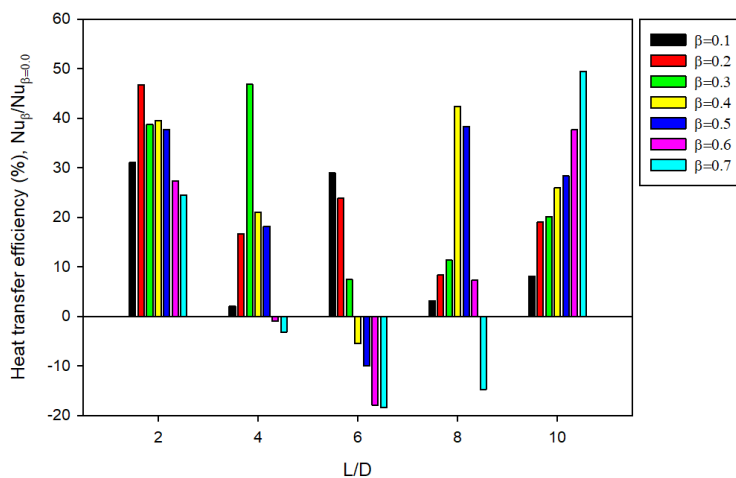
โดยที่ระยะพุ่งชน $L=4D$ พบว่าสามารถแบ่งช่วงลักษณะการถ่ายเทความร้อนได้ 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่หนึ่ง คือ $0.0 < \beta \leq 0.3$ เป็นช่วงที่ค่านัสเซลท์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวเพิ่มสูงขึ้นและมีค่าสูงสุดที่ $\beta = 0.3$ ในช่วงนี้ปริมาณของฟองอากาศจะเป็นก้อนขนาดเล็กขณะปะทะกับพื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.39 (ข) ซึ่งฟองอากาศขนาดเล็กสามารถรบกวนชั้นขอบเขตความร้อนบนพื้นผิวได้ ทำให้เกิดการเพิ่มความสามารถในพาความร้อน แม้ว่าในกรณีที่ค่า $\beta = 0.3$ จะมีลักษณะเป็นฟองอากาศคล้ายรูปหัวเห็ดขณะปะทะกับพื้นผิว ส่งผลให้สถานะอากาศโดยส่วนใหญ่จะก่อให้เกิดการปกคลุมพื้นผิวในขณะพุ่งชน หลังจากนั้นจะเกิดการแตกตัวเป็นฟองอากาศขนาดเล็กไหลเรียบบนพื้นผิว ซึ่งเป็นปริมาณอากาศที่เหมาะสมในการเพิ่มระดับความปั่นป่วนในการไหลของกระแสลำเจ็ท สำหรับที่ค่า $\beta = 0.1, 0.2$ และ 0.3 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนได้ 2.06%, 16.7% และ 46.9% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับการใช้เจ็ทของไหลที่เป็นน้ำ ต่อมาช่วงที่สอง คือ $0.3 < \beta \leq 0.7$ เป็นช่วงที่ค่านัสเซลท์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยการเพิ่มค่า β มีผลต่อการเพิ่มปริมาณอากาศในกระแสรอบการไหลของลำเจ็ท และเมื่อเจ็ทของไหลเคลื่อนที่ปะทะกับพื้นผิว จะก่อให้เกิดการปกคลุมด้วยปริมาณอากาศจำนวนมากบนพื้นผิว ซึ่งก่อให้เกิดการลดความสามารถในการถ่ายเทความร้อน ซึ่งในกรณีที่ค่า $\beta = 0.4$ และ 0.5 พบว่าค่านัสเซลท์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวยังสูงกว่าการใช้เจ็ทของไหลที่เป็นน้ำ โดยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนได้ 21.03% และ 18.2% ตามลำดับ อันเนื่องมาจากการใช้เจ็ทของไหลน้ำผสมร่วมกับอากาศก่อให้เกิดการเพิ่มระดับความปั่นป่วนในกระแสรอบการไหลของลำเจ็ท แต่ในกรณีที่ค่า $\beta = 0.6$ และ 0.7 พบว่าค่านัสเซลท์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวน้อยกว่าการใช้เจ็ทของไหลที่เป็นน้ำ โดยจะลดประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนลง 0.97% และ 3.2% ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณอากาศในกระแสลำเจ็ทมีปริมาณอากาศค่อนข้างสูง ซึ่งพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนจะถูกปกคลุมด้วยสถานะอากาศโดยส่วนใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 4.39 (ง) โดยส่งผลให้ลดประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนลง

โดยที่ระยะพุ่งชน $L=6D$ พบว่าสามารถแบ่งช่วงลักษณะการถ่ายเทความร้อนได้ 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่หนึ่ง คือ $0.0 < \beta \leq 0.1$ เป็นช่วงที่ค่านัสเซิลท์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวเพิ่มสูงขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ $\beta = 0.1$ ในช่วงนี้ปริมาณของฟองอากาศจะเป็นก้อนขนาดเล็กขณะปะทะกับพื้นผิวดังแสดงในรูปที่ 4.39 (ก) ซึ่งฟองอากาศขนาดเล็กสามารถรับกวนชั้นขอบเขตความร้อนบนพื้นผิวได้อีกทั้งสามารถเพิ่มระดับความปั่นป่วนในการไหลของกระแสลำเจ็ทได้ ทำให้เกิดการเพิ่มความสามารถในพาความร้อน สำหรับที่ค่า $\beta = 0.1$ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนได้ 28.92% เมื่อเทียบกับการใช้เจ็ทของไหลที่เป็นน้ำ ต่อมาช่วงที่สอง คือ $0.1 < \beta \leq 0.7$ เป็นช่วงที่ค่านัสเซิลท์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยการเพิ่มค่า β มีผลต่อการเพิ่มปริมาณอากาศในกระแสการไหลของลำเจ็ท และเมื่อเจ็ทของไหลเคลื่อนที่ปะทะกับพื้นผิว จะก่อให้เกิดการปกคลุมด้วยปริมาณอากาศจำนวนมากบนพื้นผิว ซึ่งก่อให้เกิดการลดความสามารถในการถ่ายเทความร้อน ซึ่งในกรณีนี้ค่า $\beta = 0.2$ และ 0.3 พบว่าค่านัสเซิลท์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวยังสูงกว่าการใช้เจ็ทของไหลที่เป็นน้ำ โดยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนได้ 23.82% และ 7.48% ตามลำดับ อันเนื่องมาจากลักษณะของฟองอากาศที่ค่านี้ จะมีลักษณะเป็นฟองอากาศรูปร่างแบบหัวกระสุนขณะออกจากปากทางออกของท่อเจ็ท ซึ่งน้ำบริเวณโดยรอบจะทำปฏิกิริยากับฟองอากาศก่อให้เกิดการไหลที่เหมือนกัน ทำให้ฟองอากาศแตกตัวเป็นก้อนฟองอากาศขนาดเล็กและพุ่งชนเข้ากับพื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.39 (ข) โดยจะทำให้เกิดการเพิ่มระดับความปั่นป่วนในกระแสการไหลของลำเจ็ท และยังสามารถรับกวนชั้นขอบเขตความร้อนบนพื้นผิวได้ แต่ในกรณีนี้ค่า $\beta = 0.4, 0.5, 0.6$ และ 0.7 พบว่าค่านัสเซิลท์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวน้อยกว่าการใช้เจ็ทของไหลที่เป็นน้ำ โดยจะลดประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนลง 5.5%, 10.03%, 17.88% และ 18.4% ตามลำดับ เนื่องจากมีการเพิ่มปริมาณอากาศในกระแสลำเจ็ท ซึ่งพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนจะถูกปกคลุมด้วยสถานะอากาศโดยส่วนใหญ่ โดยส่งผลให้ลดประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนลง

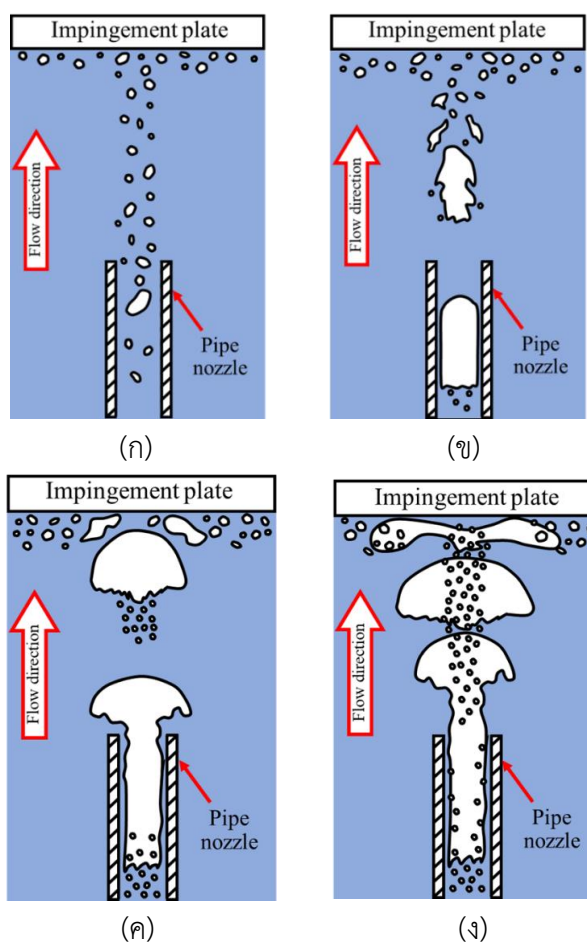
โดยที่ระยะพุ่งชน $L=8D$ พบว่าสามารถแบ่งช่วงลักษณะการถ่ายเทความร้อนได้ 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่หนึ่ง คือ $0.0 < \beta \leq 0.4$ เป็นช่วงที่ค่านัสเซิลท์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวเพิ่มสูงขึ้นและมีค่าสูงสุดที่ $\beta = 0.4$ ในช่วงนี้ปริมาณของฟองอากาศจะเป็นก้อนขนาดเล็กขณะปะทะกับพื้นผิว โดยเฉพาะในกรณีนี้ $\beta = 0.4$ พบว่าลักษณะของฟองอากาศใกล้ปากทางออกของท่อเจ็ท จะเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนฟองอากาศคล้ายรูปหัวเห็ด ซึ่งเมื่อเคลื่อนที่เข้าพุ่งชนกับพื้นผิวด้วยระยะทางที่มากขึ้น เวลาในการทำปฏิกิริยากับน้ำบริเวณโดยรอบจะมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งทำให้กลุ่มก้อนฟองอากาศเกิดการแตกตัวเป็นฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากก่อนที่จะพุ่งเข้าปะทะกับพื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.39 (ค) โดยฟองอากาศขนาดเล็กสามารถรับกวนชั้นขอบเขตความร้อนบนพื้นผิวได้ ทำให้เกิดการเพิ่มความสามารถในพาความร้อน สำหรับที่ค่า $\beta = 0.1, 0.2, 0.3$ และ 0.4 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนได้ 3.13%, 8.34%, 11.4%, 42.4% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับการใช้เจ็ทของไหลที่เป็นน้ำ ต่อมาช่วงที่สอง คือ $0.4 < \beta \leq 0.7$ เป็นช่วงที่ค่านัสเซิลท์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยการเพิ่มค่า β มีผลต่อการเพิ่มปริมาณอากาศในกระแสการไหลของลำเจ็ท และเมื่อเจ็ทของไหลเคลื่อนที่ปะทะกับพื้นผิว จะก่อให้เกิดการปกคลุมด้วยปริมาณอากาศจำนวนมากบนพื้นผิว ซึ่งก่อให้เกิดการลดความสามารถในการถ่ายเทความร้อน ซึ่งในกรณีนี้ค่า $\beta = 0.5$ พบว่า

ค่าดัชนีเซลท์นัมเบอร์เฉลี่ยยังสูงกว่าการใช้เจ็ทของไหลที่เป็นน้ำ โดยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนได้ 38.3% แม้ว่าของไหลเจ็ทที่พุ่งชนจะอยู่ในสถานะอากาศโดยส่วนใหญ่ แต่ระดับความปั่นป่วนในกระแสการไหลของลำเจ็ทค่อนข้างสูง จึงช่วยในการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อน แต่ในกรณีที่มีค่า $\beta = 0.6$ และ 0.7 พบว่าค่าดัชนีเซลท์นัมเบอร์เฉลี่ยน้อยกว่าการใช้เจ็ทของไหลที่เป็นน้ำ ซึ่งจะลดประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนลง 7.26% และ 14.7% ตามลำดับ เนื่องจากของไหลเจ็ทที่พุ่งชนจะอยู่ในสถานะอากาศโดยส่วนใหญ่ มีผลทำให้ของไหลเจ็ทที่เป็นสถานะอากาศจะปกคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่บนพื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.39 (ง) ก่อให้เกิดการลดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนลง

โดยที่ระยะพุ่งชน $L=10D$ พบว่าลักษณะการถ่ายเทความร้อนในกรณีที่มีค่า $0.0 < \beta \leq 0.7$ จะให้ค่าดัชนีเซลท์นัมเบอร์เฉลี่ยสูงกว่าการใช้เจ็ทของไหลที่เป็นน้ำ เนื่องจากที่ระยะพุ่งชน $L=10D$ การใช้เจ็ทของไหลที่เป็นน้ำโดยปกติ จะให้ค่าในการถ่ายเทความร้อนน้อยกว่า เมื่อเทียบกับที่ระยะพุ่งชน $L=2D, 4D, 6D$ และ $8D$ เนื่องจากระยะพุ่งชนที่สูง มีผลทำให้เจ็ทของไหลสูญเสียพลังงานจลน์ขณะเข้าปะทะกับพื้นผิว ซึ่งการใช้เจ็ทของไหลที่เป็นน้ำผสมร่วมกับอากาศ จะช่วยเพิ่มระดับความปั่นป่วนในการไหลของกระแสลำเจ็ท สำหรับในกรณีที่มีค่า $\beta = 0.1, 0.2$ และ 0.3 พบว่าลักษณะของฟองอากาศขณะเข้าใกล้ปะทะกับพื้นผิว จะมีรูปร่างเป็นก้อนฟองอากาศขนาดเล็ก ซึ่งมีส่วนช่วยในการรบกวนชั้นขอบเขตความร้อนบนพื้นผิว และสำหรับในกรณีที่มีค่า $\beta = 0.4, 0.5, 0.6$ และ 0.7 พบว่าลักษณะของฟองอากาศขณะใกล้ปากทางออกของเจ็ท จะมีรูปร่างเป็นก้อนฟองอากาศคล้ายรูปหัวเห็ด แต่ด้วยระยะพุ่งชนที่มาก ทำให้ฟองอากาศกลุ่มก้อนนี้ทำปฏิกิริยาโดยการเชื่อมกันระหว่างน้ำบริเวณโดยรอบ ทำให้กลุ่มก้อนฟองอากาศเกิดการแตกตัวเป็นฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมาก และเข้าปะทะกับพื้นผิว ซึ่งมีส่วนช่วยในการรบกวนชั้นขอบเขตความร้อนบนพื้นผิวเช่นกัน ปัจจัยนี้จะนำไปสู่การเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนในทุกกรณีที่ใช้ในการศึกษา สำหรับระยะพุ่งชน $L=10D$ สำหรับที่มีค่า $\beta = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$ และ 0.7 ตามลำดับ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนได้ 6.52%, 22%, 16.12%, 26.44% 19.88%, 36.2% และ 47.4% ตามลำดับ



รูปที่ 4.38 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=24,000$ และสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ $\beta = 0.1$ ถึง 0.7 ที่ระยะพุ่งชนต่าง ๆ



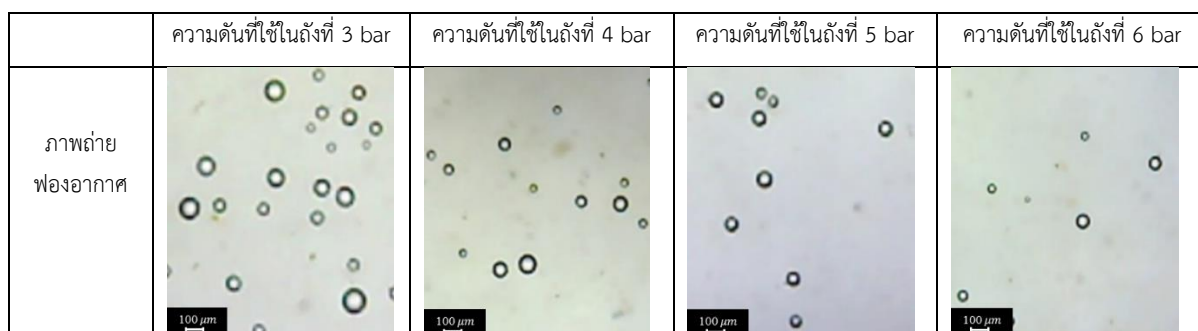
รูปที่ 4.39 แผนภาพพฤติกรรมการไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศ

4.2 การไหลแบบสองสถานะที่เป็นน้ำผสมร่วมกับฟองอากาศระดับไมครอน

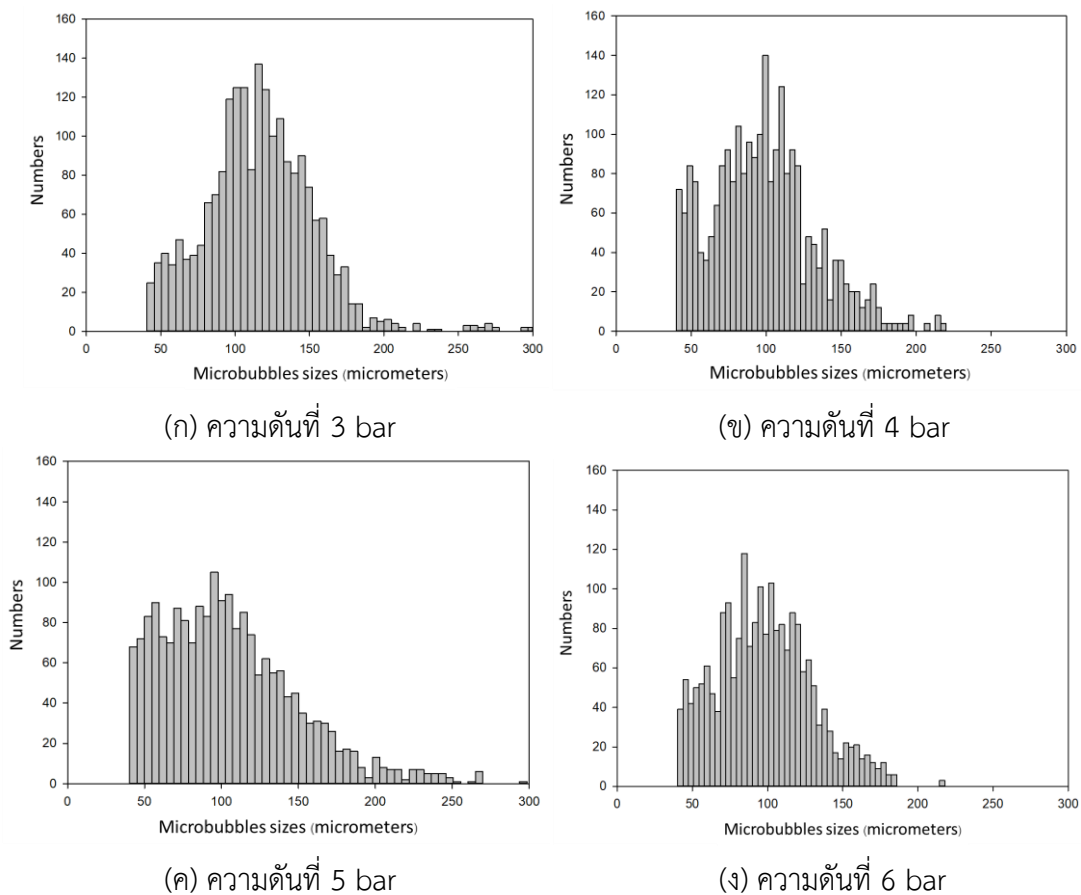
4.2.1 ผลการศึกษาการวัดขนาดของฟองอากาศที่ใช้ในเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศระดับไมครอน

ในส่วนนี้ได้อธิบายถึงผลการศึกษาการวัดขนาดของฟองอากาศที่ใช้ในเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศระดับไมครอน ซึ่งใช้กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล (Microscope digital camera) ในการบันทึกภาพบริเวณที่ชุดดักจับฟองอากาศ โดยกำหนดค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำที่ 20 L/min และกำหนดให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศที่ 1 L/min ที่ไหลเข้ามาผสมบริเวณท่อเวนทูรี จากนั้นของไหลแบบสองสถานะระหว่างน้ำและอากาศจะไหลเข้าสู่ถึงความดัน โดยจะมีการควบคุมความดันภายในถังที่ค่า 3, 4, 5 และ 6 bar ซึ่งมีการกำหนดค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของน้ำที่ $Re_w=16,000$ และกำหนดอุณหภูมิของน้ำก่อนที่จะพุ่งออกจากท่อเจ็ทที่ 28 ± 0.1 °C

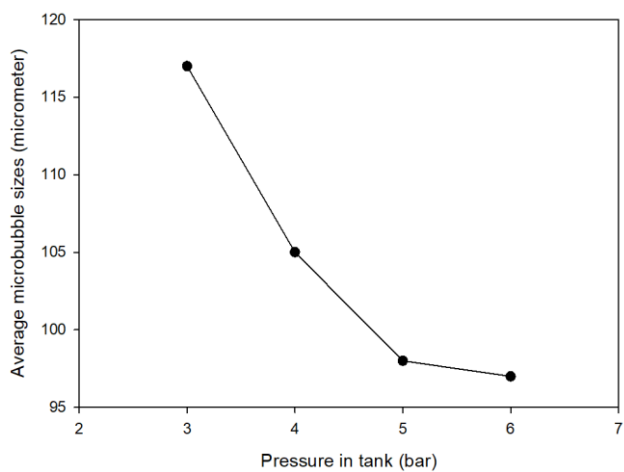
ในรูปที่ 4.40 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายฟองอากาศที่ค่าความดันที่ 3, 4, 5 และ 6 bar ซึ่งภาพถ่ายที่ได้จะถูกนำประมวลผลผ่าน Image processing เพื่อระบุขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศแต่ละฟอง ซึ่งต่อมาในรูปที่ 4.41 แสดงการแจกแจงจำนวนความถี่ที่พบขนาดของฟองอากาศที่ค่าความดันภายในถัง (ก) ความดันที่ 3 bar, (ข) ความดันที่ 4 bar, (ค) ความดันที่ 5 bar, และ (ง) ความดันที่ 6 bar ตามลำดับ ซึ่งจะพบขนาดของฟองอากาศตั้งแต่ 40 ถึง 300 ไมครอน สำหรับกรณีที่ใช้ความดันที่ 3 bar พบว่าจำนวนฟองอากาศพบมากอยู่ในช่วง 115 ถึง 120 ไมครอน กรณีที่ใช้ความดันที่ 4 bar พบว่าจำนวนฟองอากาศพบมากอยู่ในช่วง 99 ถึง 102 ไมครอน กรณีที่ใช้ความดันที่ 5 bar พบว่าจำนวนฟองอากาศพบมากอยู่ในช่วง 93 ถึง 98 ไมครอน และกรณีที่ใช้ความดันที่ 6 bar พบว่าจำนวนฟองอากาศพบมากอยู่ในช่วง 79 ถึง 82 ไมครอน ทั้งนี้จำนวนฟองอากาศทั้งหมดที่นำมาแจกแจงความถี่ที่พบ จำเป็นต้องหาค่าขนาดของฟองอากาศโดยเฉลี่ย ซึ่งในรูปที่ 4.42 แสดงค่าเฉลี่ยของฟองอากาศที่ค่าความดันภายในถังที่ 3, 4, 5 และ 6 bar พบว่าขนาดของฟองอากาศเฉลี่ยที่ 117, 105, 98 และ 97 ไมครอน ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการเพิ่มความดันที่ใช้ในถังความดัน ส่งผลทำให้ฟองอากาศมีขนาดเล็กลง



รูปที่ 4.40 ตัวอย่างภาพถ่ายฟองอากาศที่ค่าความดันต่าง ๆ



รูปที่ 4.41 การแจกแจงจำนวนความถี่ที่พบขนาดของฟองอากาศที่ค่าความดันภายในถังต่าง ๆ



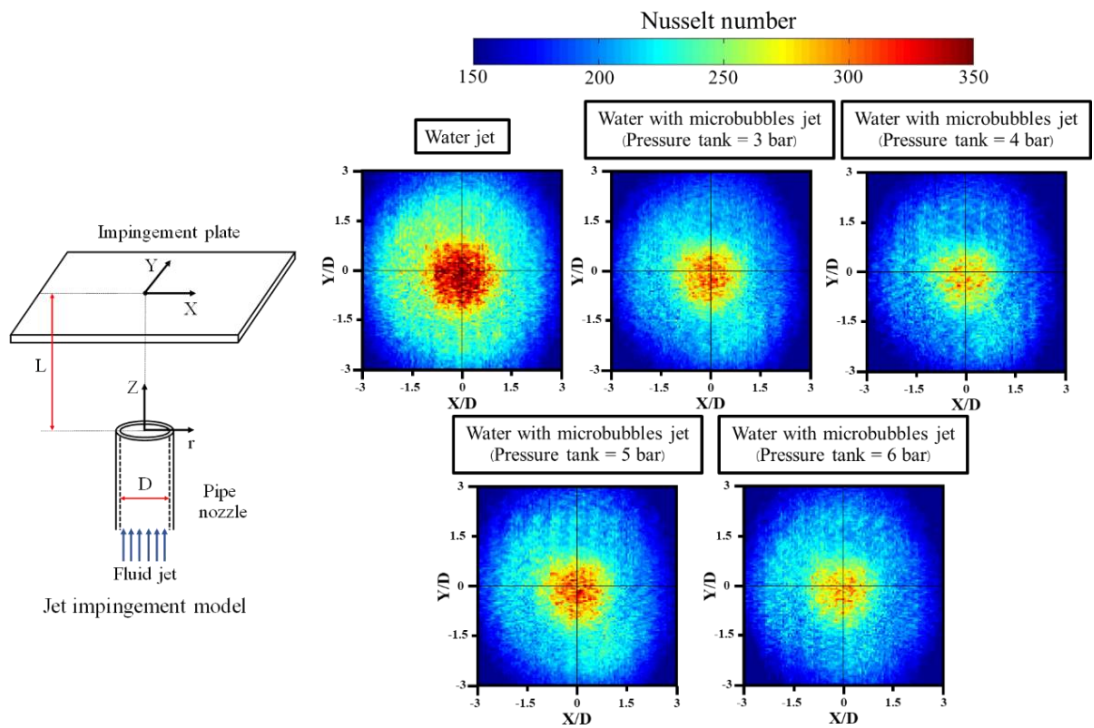
รูปที่ 4.42 ค่าเฉลี่ยของฟองอากาศที่ค่าความดันต่าง ๆ

4.2.2 ผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับฟองอากาศระดับ

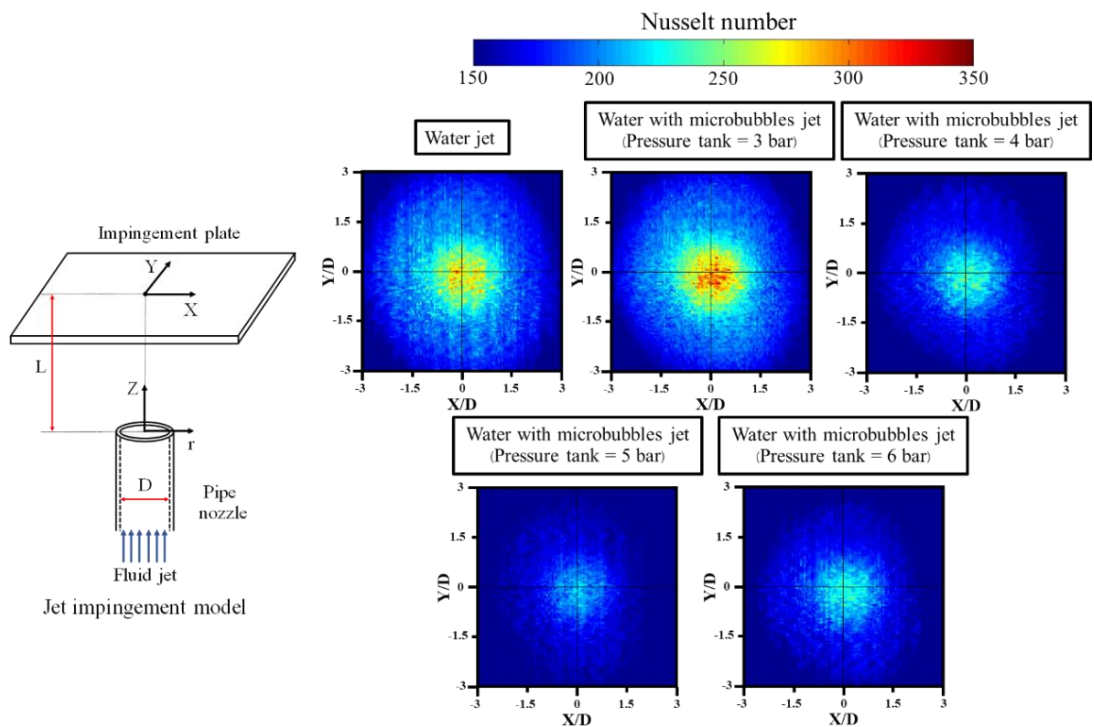
ไมครอน

ในส่วนนี้ได้อธิบายถึงผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับฟองอากาศระดับไมครอน ซึ่งใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน (Infrared camera) ในการบันทึกภาพพื้นผิวที่เจ็ทของไหลพุ่งชน โดยกำหนดค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำที่ 20 L/min และกำหนดให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศที่ 1 L/min ที่ไหลเข้ามาผสมบริเวณท่อเวนตูร์ จากนั้นของไหลแบบสองสถานะระหว่างน้ำและอากาศจะไหลเข้าสู่ถึงความดัน โดยจะมีการควบคุมความดันภายในถึงที่ค่า 3, 4, 5 และ 6 bar ซึ่งมีการกำหนดค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของน้ำที่ $Re_w=16,000$ และกำหนดอุณหภูมิของน้ำก่อนที่จะพุ่งออกจากท่อเจ็ทที่ 28 ± 0.1 °C สำหรับระยะพุ่งชนมีค่าเท่ากับ $L=1D, 2D, 4D$ และ $8D$ ตามลำดับ

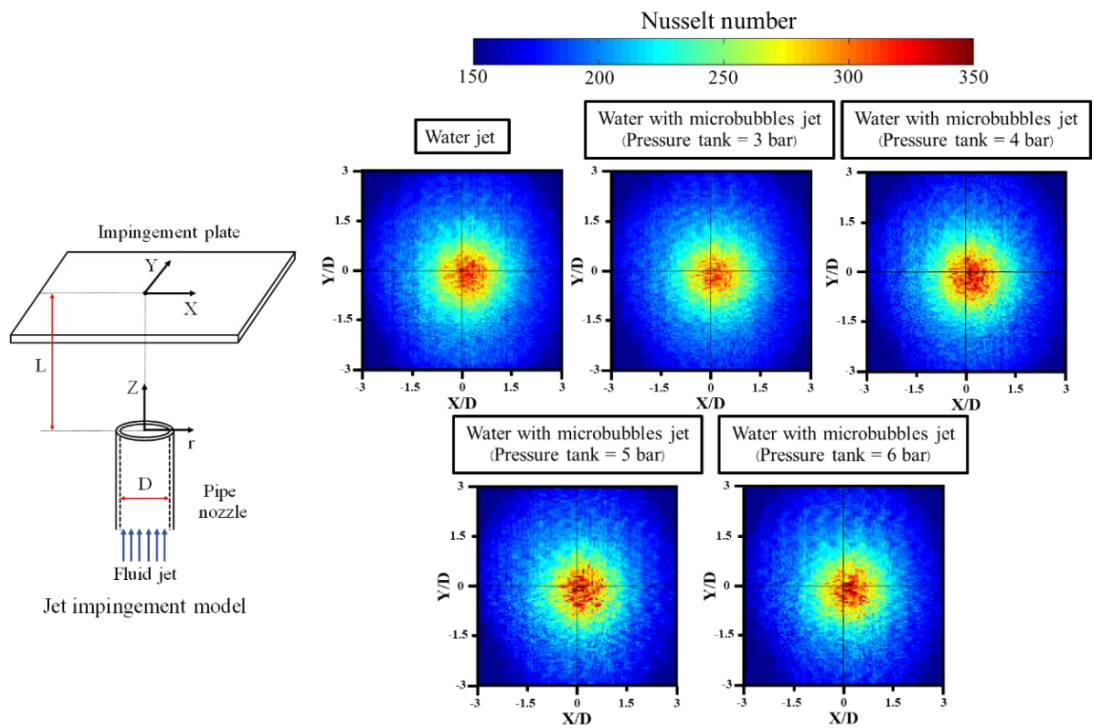
ในรูปที่ 4.43 ถึงรูปที่ 4.46 แสดงการกระจายนัสเซลล์ท์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=16,000$ ที่ระยะพุ่งชน $L=1D, 2D, 4D$ และ $8D$ ตามลำดับ สำหรับกรณีที่เจ็ทของไหลเป็นน้ำ และเจ็ทของไหลที่เป็นน้ำผสมกับฟองอากาศระดับไมครอนที่มีการควบคุมความดันที่ใช้ภายในถึงมีค่า 3, 4, 5 และ 6 bar เมื่อพิจารณาผลของการเพิ่มความดันที่ใช้ภายในถึงความดันที่ผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชน พบว่ากรณีที่เจ็ทของไหลเป็นน้ำจะให้ค่าการกระจายนัสเซลล์ท์นัมเบอร์บนพื้นผิวใกล้เคียงหรือสูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการใช้ของไหลที่เป็นน้ำผสมฟองอากาศระดับไมครอน เนื่องจากฟองอากาศระดับไมครอนมีขนาดมวลที่เบาและมีแรงลอยตัวที่ต่ำ โดยเมื่อปะทะกับพื้นผิว ฟองอากาศระดับไมครอนไม่สามารถแตกตัวขณะปะทะได้ ซึ่งส่งผลให้ไม่สามารถที่จะรบกวนชั้นขอบเขตความร้อนบนพื้นผิวได้ อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบกรณีของการใช้ของไหลที่เป็นน้ำผสมฟองอากาศระดับไมครอน ที่ความดันภายในถึงที่ค่าต่าง ๆ พบว่าการกระจายนัสเซลล์ท์นัมเบอร์บนพื้นผิวใกล้เคียงกัน เนื่องจากเหตุผลข้างต้นที่ฟองอากาศระดับไมครอนไม่สามารถที่จะรบกวนชั้นขอบเขตความร้อนบนพื้นผิวได้ ทำให้การใช้ฟองอากาศระดับไมครอนที่ไหลร่วมกับกระแสการไหลของลำเจ็ท จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนใกล้เคียงกันในทุกกรณี ซึ่งในรูปที่ 4.47 ถึงรูปที่ 4.50 แสดงการกระจายนัสเซลล์ท์นัมเบอร์เฉพาะจุดในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในตำแหน่ง $Y/D=0$ สำหรับเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=16,000$ ที่ระยะพุ่งชน $L=1D, 2D, 4D$ และ $8D$ ตามลำดับ และในรูปที่ 4.51 ถึงรูปที่ 4.54 แสดงค่านัสเซลล์ท์นัมเบอร์เฉลี่ยในช่วง $r/D \leq 1$, $r/D \leq 2$ และ $r/D \leq 3$ ตามลำดับ ที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=16,000$ ที่ระยะพุ่งชน $L=1D, 2D, 4D$ และ $8D$ ตามลำดับ



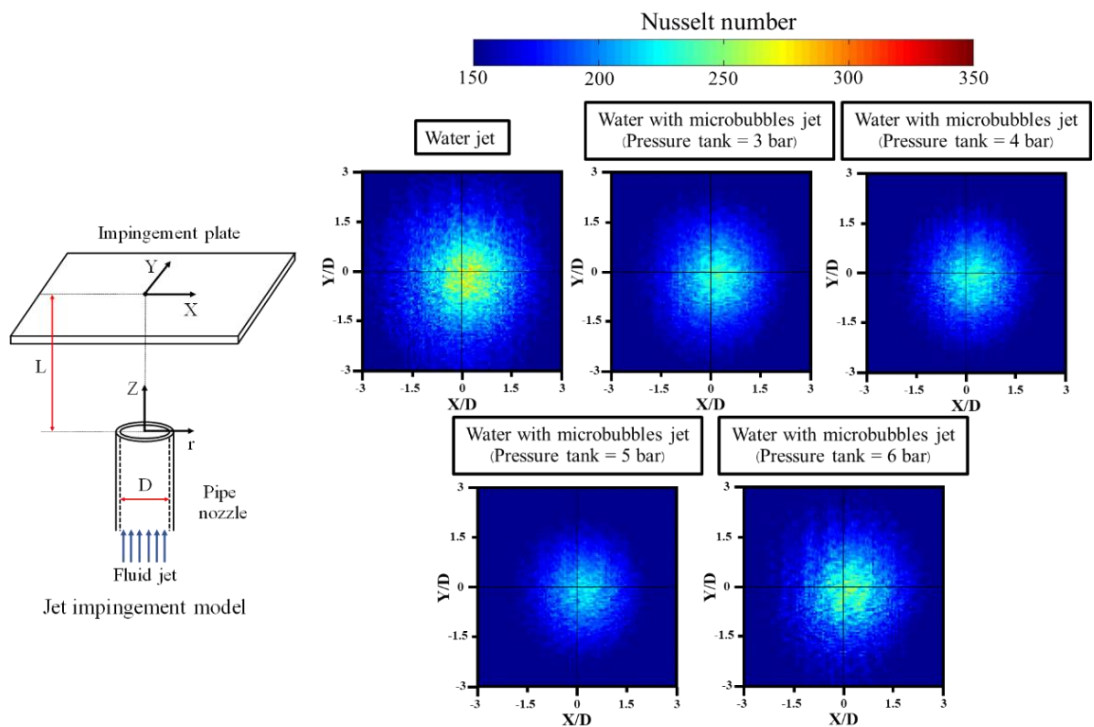
รูปที่ 4.43 การกระจายนัสเซลท์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=16,000$ ที่ระยะพุ่งชน $L=1D$



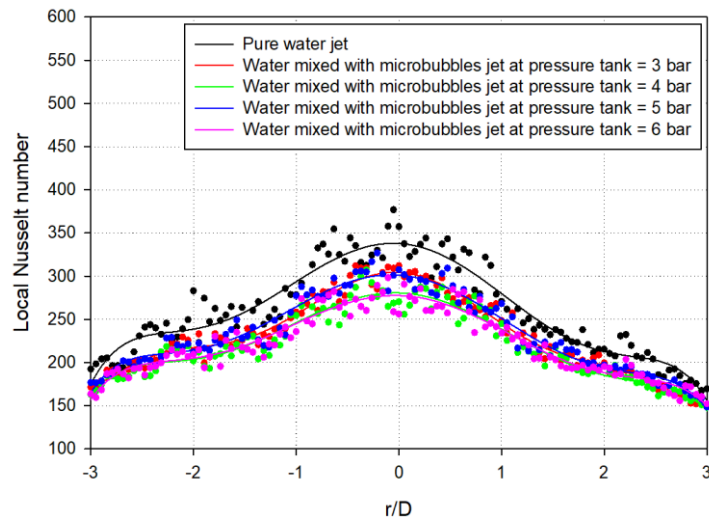
รูปที่ 4.44 การกระจายนัสเซลท์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=16,000$ ที่ระยะพุ่งชน $L=2D$



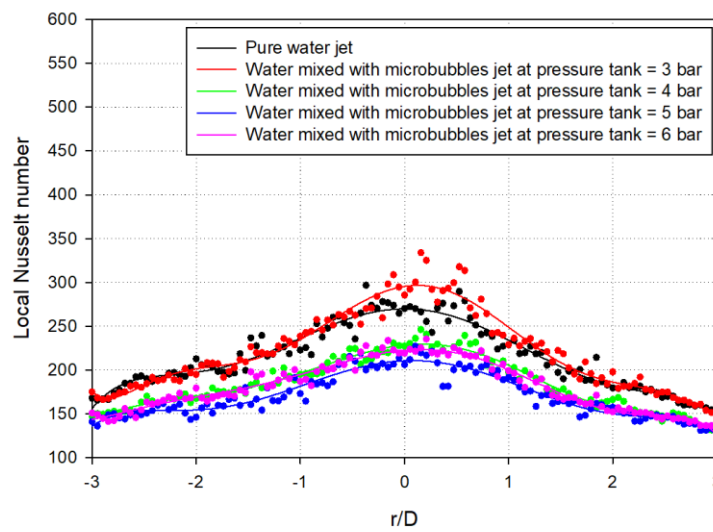
รูปที่ 4.45 การกระจายนัสเซลท์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=16,000$ ที่ระยะพุ่งชน $L=4D$



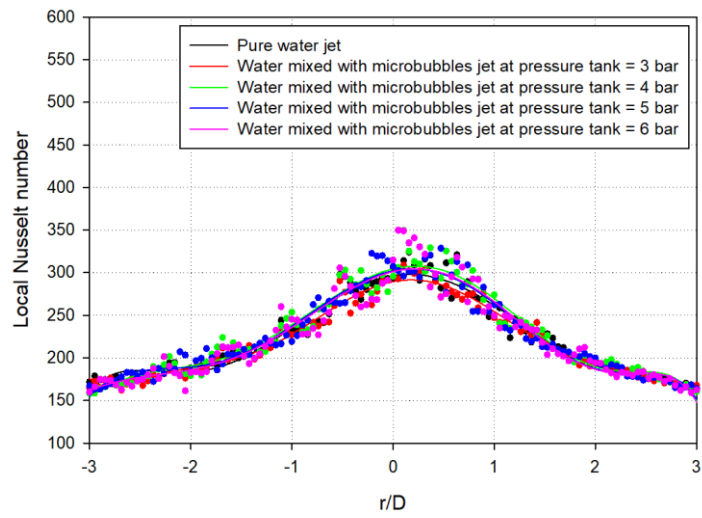
รูปที่ 4.46 การกระจายนัสเซลท์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=16,000$ ที่ระยะพุ่งชน $L=8D$



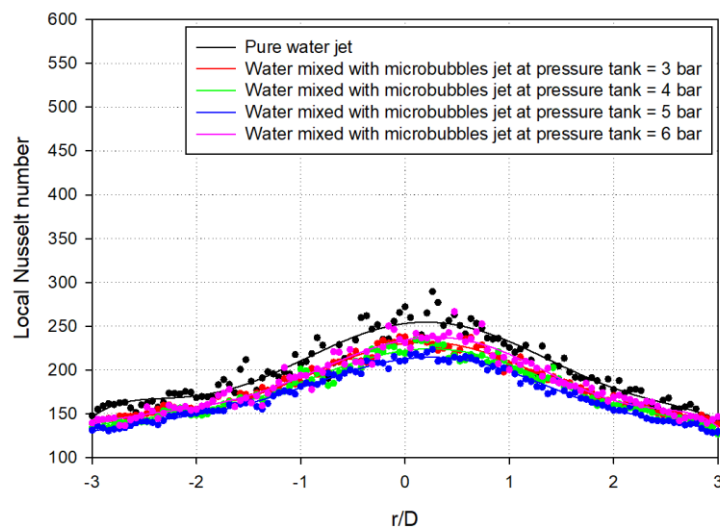
รูปที่ 4.47 การกระจายนัสเซลต์นัมเบอร์เฉพาะจุดในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในตำแหน่ง $Y/D=0$ สำหรับเรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=16,000$ ที่ระยะพุงชน $L=1D$



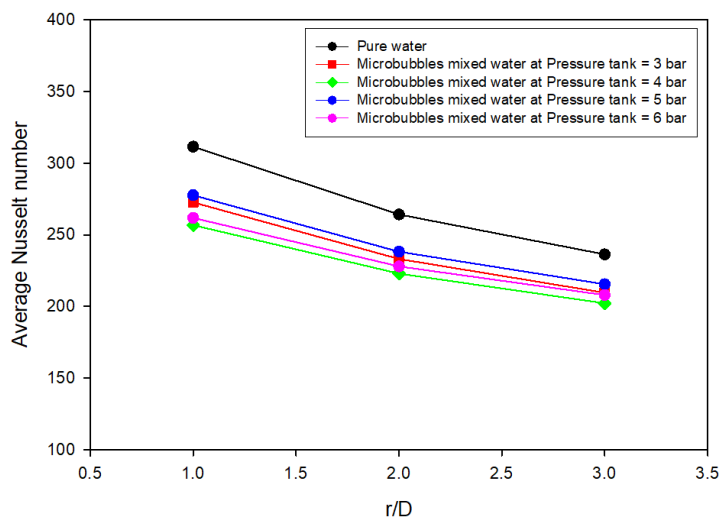
รูปที่ 4.48 การกระจายนัสเซลต์นัมเบอร์เฉพาะจุดในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในตำแหน่ง $Y/D=0$ สำหรับเรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=16,000$ ที่ระยะพุงชน $L=2D$



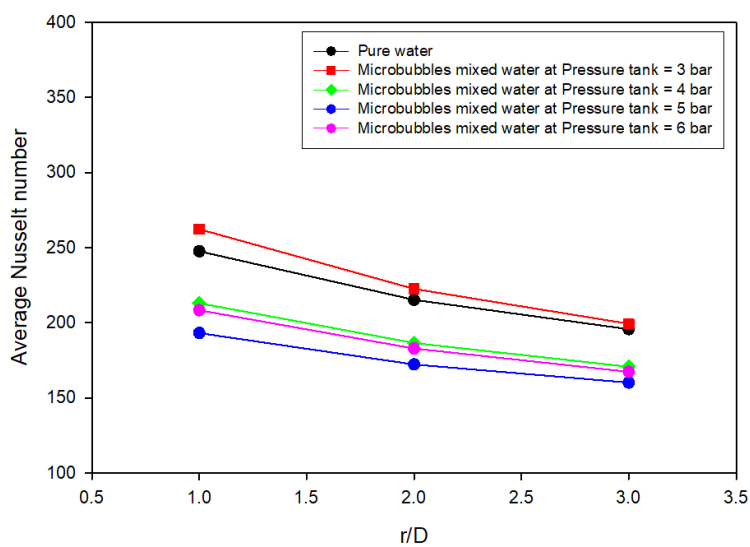
รูปที่ 4.49 การกระจายนัสเซลท์นัมเบอร์เฉพาะจุดในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในตำแหน่ง $Y/D=0$ สำหรับเรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=16,000$ ที่ระยะพุ่งชน $L=4D$



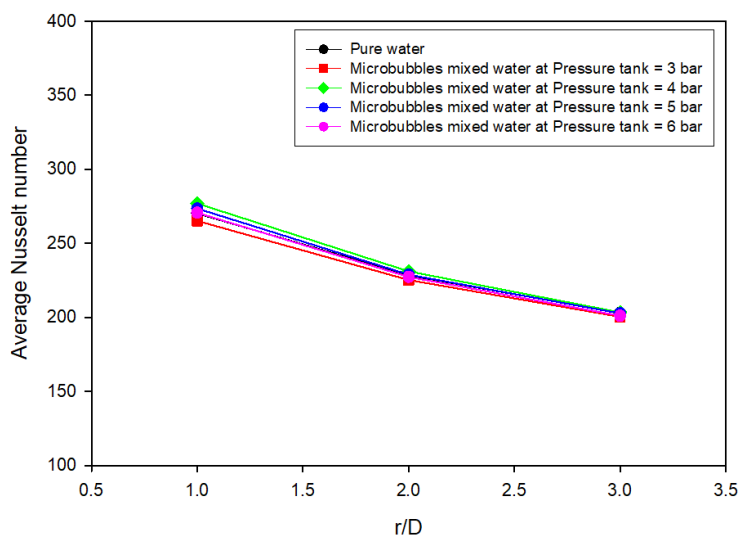
รูปที่ 4.50 การกระจายนัสเซลท์นัมเบอร์เฉพาะจุดในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในตำแหน่ง $Y/D=0$ สำหรับเรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w=16,000$ ที่ระยะพุ่งชน $L=8D$



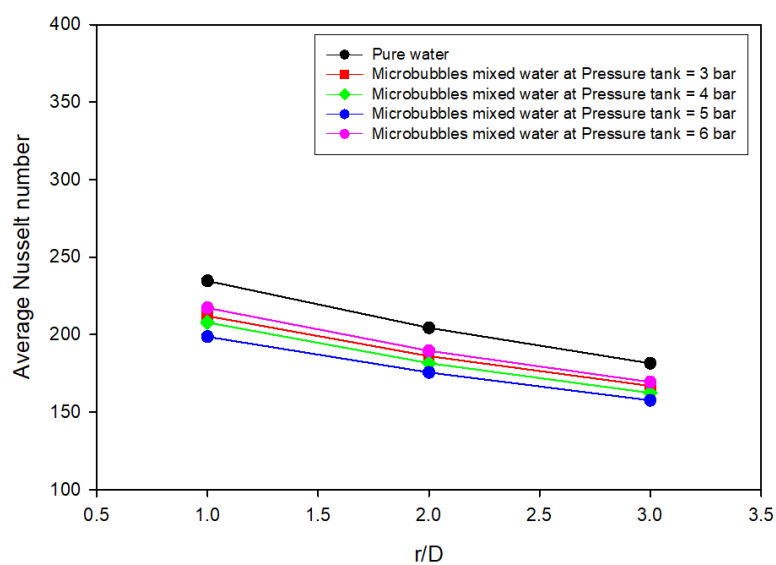
รูปที่ 4.51 คำนวณสเกลที่นมเบอร์เฉลี่ยในช่วง $r/D \leq 1$, $r/D \leq 2$ และ $r/D \leq 3$ ตามลำดับ ที่เรย์โนลด์นมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w = 16,000$ ที่ระยะพุ่งชน $L=1D$



รูปที่ 4.52 คำนวณสเกลที่นมเบอร์เฉลี่ยในช่วง $r/D \leq 1$, $r/D \leq 2$ และ $r/D \leq 3$ ตามลำดับ ที่เรย์โนลด์นมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w = 16,000$ ที่ระยะพุ่งชน $L=2D$



รูปที่ 4.53 คำนวณสเกลที่นมเบอร์เฉลี่ยในช่วง $r/D \leq 1$, $r/D \leq 2$ และ $r/D \leq 3$ ตามลำดับ ที่เรย์โนลด์์นมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w = 16,000$ ที่ระยะพุ่งชน $L = 4D$



รูปที่ 4.54 คำนวณสเกลที่นมเบอร์เฉลี่ยในช่วง $r/D \leq 1$, $r/D \leq 2$ และ $r/D \leq 3$ ตามลำดับ ที่เรย์โนลด์์นมเบอร์ของน้ำมีค่า $Re_w = 16,000$ ที่ระยะพุ่งชน $L = 8D$

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาผลของการไหลสองสถานะระหว่างน้ำและอากาศที่ใช้เป็นของไหลในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ซึ่งการไหลแบบสองสถานะจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ตามรูปแบบการสร้างการไหลแบบสองสถานะระหว่างน้ำและอากาศ ได้แก่ ส่วนที่หนึ่งจะเป็นการไหลแบบสองสถานะที่เป็นน้ำผสมร่วมกับอากาศ และส่วนที่สองจะเป็นการไหลแบบสองสถานะที่เป็นน้ำผสมร่วมกับฟองอากาศระดับไมครอน ซึ่งสามารถสรุปหัวข้อได้ดังนี้

5.1.1 สรุปผลการทดลองสำหรับการไหลแบบสองสถานะที่เป็นน้ำผสมร่วมกับอากาศ

(1) จากผลการศึกษาพฤติกรรมของการไหลภายในท่อเจ็ทที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่าอยู่ในช่วง 8,400 ถึง 26,700 ที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ 0.1 ถึง 0.7 พบว่ารูปแบบการไหลภายในท่อเจ็ทสามารถแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ Bubbly flow, Slug flow และ Churn flow ทั้งนี้ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่าอยู่ในช่วง 8,400 ถึง 21,400 ที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ 0.1 ถึง 0.7 จะปรากฏพฤติกรรมของการไหลภายในท่อ 2 รูปแบบ ได้แก่ Bubbly flow และ Slug flow และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า 24,000 และ 26,700 ที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ $\beta = 0.1$ ถึง 0.7 จะปรากฏพฤติกรรมของการไหลภายในท่อ 3 รูปแบบ ได้แก่ Bubbly flow, Slug flow และ Churn flow ดังนั้นในการศึกษาพฤติกรรมในการไหลขณะออกจากปากทางออกของท่อเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชน จึงเลือกศึกษากรณีที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า 24,000 และสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ $\beta = 0.1$ ถึง 0.7 ซึ่งเป็นช่วงที่ครอบคลุมพฤติกรรมของการไหลภายในท่อ

(2) จากผลของพฤติกรรมของการไหลของเจ็ทพุ่งด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศเรย์โนลด์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า 24,000 และสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ $\beta = 0.1$ ถึง 0.7 พบว่าในกรณีที่ค่า $\beta = 0.1$ ลักษณะการไหลภายในท่อและลักษณะการไหลที่ออกจากท่อเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชนจะมีรูปแบบที่เหมือนกัน คือ ฟองอากาศจะมีลักษณะเป็นก้อนขนาดเล็กกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเจ็ทกระจายตัวทั่วกระแสการไหลเจ็ท ต่อมาในกรณีที่ค่า $\beta = 0.2$ และ 0.3 ลักษณะการไหลภายในท่อเจ็ทมีรูปร่างคล้ายหัวกระสุน เมื่อเคลื่อนที่ออกจากท่อเจ็ทจะก่อให้เกิดการไหลเฉือนกันระหว่างฟองอากาศและน้ำบริเวณโดยรอบ ซึ่งจะแตกตัวเป็นฟองอากาศขนาดเล็กและเคลื่อนที่เข้าปะทะกับพื้นผิว และในกรณีที่ $\beta = 0.4, 0.5, 0.6$ และ 0.7 ลักษณะการไหลภายในท่อเจ็ทมีรูปร่างเป็นลำฟองอากาศที่ยาวและมีความปั่นป่วน เนื่องจากปริมาณอากาศที่เพิ่มสูงขึ้นในกระแสการไหลของลำเจ็ท เมื่อเคลื่อนที่ออกจากท่อเจ็ทจะก่อให้เกิดการรวมเป็นกลุ่มก้อนฟองอากาศคล้ายรูปหัวเห็ดและเข้าพุ่งชนกับพื้นผิว ทั้งนี้ลักษณะของฟองอากาศที่ปะทะกับพื้นผิวจะแตกต่างกัน อันเนื่องมาจากการเพิ่มระยะพุ่งชน ซึ่งในกรณีที่ระยะพุ่งชนที่ค่าน้อย คือ $L=2D$,

4D และ 6D พบว่าลักษณะของฟองอากาศที่ปะทะจะเป็นกลุ่มก้อนฟองอากาศขนาดใหญ่ มีผลทำให้ปริมาณอากาศโดยส่วนใหญ่จะปกคลุมทั่วทั้งพื้นผิว และในกรณีที่ระยะฟุ้งชนที่ค่ามาก คือ $L=8D$ และ $10D$ พบว่าลักษณะของฟองอากาศที่ปะทะจะเป็นกลุ่มก้อนฟองอากาศขนาดเล็กและมีจำนวนมาก โดยกลุ่มก้อนฟองอากาศที่เคลื่อนที่จะทำปฏิกิริยากับน้ำบริเวณโดยรอบ ทำให้เกิดการเนียนกันจนปริมาณอากาศกลุ่มก้อนนี้ เกิดการแตกตัวเป็นฟองอากาศย่อย ๆ

(3) จากผลการศึกษาพฤติกรรมการไหลขณะออกจากปากทางออกของท่อเจ็ทถึงพื้นผิวที่ฟุ้งชนที่มีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทฟุ้งชน สำหรับเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า 24,000 ที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ 0.0 ถึง 0.7 และระยะฟุ้งชนมีค่า $L=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ตามลำดับ พบว่าในกรณีที่ระยะฟุ้งชนมีค่า $L=2D, 4D$ และ $6D$ พบว่าผลของการเพิ่มสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ค่าต่ำ ($0.1 \leq \beta \leq 0.3$) โดยรวมแล้วจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงในช่วงนี้ เนื่องจากปริมาณอากาศที่ไม่มาก มีผลทำให้ฟองอากาศมีลักษณะเป็นก้อนฟองอากาศขนาดเล็ก ซึ่งจะไหลปะทะกับพื้นและสามารถรบกวนชั้นขอบเขตความร้อนบนพื้นผิวได้ แต่เมื่อค่าสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมสูงขึ้น ($0.3 < \beta \leq 0.7$) ก่อให้เกิดการเพิ่มปริมาณของอากาศในกระแสลำเจ็ทสูง สำหรับที่ระยะฟุ้งชนต่ำ ๆ จะทำให้ฟองอากาศที่ไหลในกระแสลำเจ็ทมีลักษณะค่อนข้างต่อเนื่องจากปากทางออกของท่อเจ็ทถึงพื้นผิวที่ฟุ้งชน ซึ่งพื้นผิวโดยส่วนใหญ่จะถูกปกคลุมด้วยปริมาณอากาศจำนวนมาก ส่งผลให้ลดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนลง แม้ว่าที่ค่าสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่สูง จะมีระดับความปั่นป่วนในกระแสการไหลของลำเจ็ทที่สูงก็ตาม และสำหรับในกรณีที่ระยะฟุ้งชน $L=8D$ และ $10D$ พบว่าผลของการเพิ่มสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ค่าสูง ๆ กล่าวคือ ที่ $\beta=0.4$ สำหรับในกรณีที่ระยะฟุ้งชน $L=8D$ และที่ $\beta=0.7$ สำหรับในกรณีที่ระยะฟุ้งชน $L=10D$ จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่สูง เนื่องจากในกรณีเหล่านี้มีระยะฟุ้งชนที่มาก ซึ่งการใช้ค่าสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่สูง โดยทั่วไปแล้วจะมีปริมาณอากาศที่ไหลในกระแสลำเจ็ทที่ค่อนข้างมาก โดยฟองอากาศที่อยู่ใกล้กับปากทางออกของท่อเจ็ท โดยรวมแล้วจะมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนฟองอากาศคล้ายรูปหัวเห็ด แต่ด้วยระยะทางที่มากขึ้นทำให้ฟองอากาศที่เคลื่อนที่เข้าปะทะกับพื้นผิวทำปฏิกิริยากับน้ำบริเวณโดยรอบ ซึ่งจะใช้เวลาในการเนียนกันนานกว่าที่ระยะฟุ้งชนน้อย ๆ ทำให้กลุ่มก้อนฟองอากาศจะเกิดการแตกตัวเป็นก้อนฟองอากาศขนาดเล็กลงจำนวนมาก ซึ่งเมื่อปะทะกับพื้นผิวจะก่อให้เกิดการรบกวนชั้นขอบเขตความร้อน

5.1.2 สรุปผลการทดลองสำหรับการไหลแบบสองสถานะที่เป็นน้ำผสมร่วมกับฟองอากาศระดับไมครอน

(1) จากผลการศึกษาการวัดขนาดของฟองอากาศที่มีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทฟุ้งชน สำหรับเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า 16,000 ที่ค่าความดันภายในถึงความดันสำหรับการสร้างฟองอากาศระดับไมครอนที่ 3, 4, 5 และ 6 bar โดยมีระยะฟุ้งชน $L=1D, 2D, 4D$ และ $8D$ ซึ่ง

พบว่าการใช้ความดันในการสร้างฟองอากาศระดับไมครอนที่ 3, 4, 5 และ 6 bar ให้ค่าขนาดฟองอากาศโดยเฉลี่ยที่ 117, 105, 98 และ 97 ไมครอน ตามลำดับ โดยค่าความดันที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการลดขนาดของฟองอากาศ

(2) จากผลการศึกษาผลการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทฟุ้งชนที่ระยะฟุ้งชน $L=1D, 2D, 4D$ และ $8D$ โดยพิจารณาค่าเฉลี่ยนี้สเซลท์นัมเบอร์บนพื้นผิว พบว่า การใช้ น้ำผสมฟองอากาศระดับไมครอนในกรณีที่ค่าความดันภายในถังมีค่า 3, 4, 5 และ 6 bar ตามลำดับ ไม่มีส่วนช่วยในเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวในทุกกรณีเมื่อเทียบการใช้เจ็ทของไหลที่เป็นน้ำ เนื่องจากฟองอากาศระดับไมครอนที่ใช้ในการไหลเจ็ทฟุ้งชนไม่มีผลต่อการเพิ่มระดับความปั่นป่วนในการไหลของกระแสเจ็ท และด้วยมวลของฟองอากาศที่มีขนาดน้อยมาก ไม่สามารถรบกวนชั้นขอบเขตความร้อน

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทฟุ้งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศ และการศึกษาขนาดของฟองอากาศที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทฟุ้งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศระดับไมครอน ในการศึกษาขั้นต่อไปอาจจะต้องปรับปรุงและเพิ่มขอบเขตในงานวิจัยนี้

(1) ศึกษาผลของความเร็วน้ำและความเร็วอากาศที่ใช้ในการสร้างการไหลแบบสองสถานะเพิ่มเติม เพื่อให้ได้ช่วงพฤติกรรมการไหลภายในท่อเจ็ทที่ครอบคลุมรูปแบบการไหลแบบสองสถานะระหว่างน้ำและอากาศมากกว่าข้อมูลที่มีอยู่ในตอนนี้

(2) ศึกษาผลของสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ $\beta \geq 0.7$ เพื่อพิจารณาถึงผลของการเพิ่มสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเพิ่มเติม ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทฟุ้งชน

(3) ในการทดลองได้มีการกำหนดระดับความลึกของน้ำจากปากทางออกของท่อเจ็ทถึงพื้นผิวบนน้ำที่ความสูง 190 mm โดยระดับความลึกของน้ำมีผลต่อพฤติกรรมในการไหลของเจ็ทฟุ้งชนด้วยน้ำผสมกับอากาศ ซึ่งในการศึกษาอาจปรับค่าที่ระดับความลึกในตำแหน่งอื่น ๆ

(4) ในกรณีการศึกษากการถ่ายเทความร้อนเจ็ทฟุ้งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศระดับไมครอน อาจมีการออกแบบชุดทดลองให้มีสเกลที่เล็กลง เนื่องจากผลการทดลองการใช้น้ำผสมฟองอากาศระดับไมครอนในขณะนี้ไม่สามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทฟุ้งชนได้ เพราะชุดทดลองหรือตัวแปรที่กำหนดมีสเกลที่ใหญ่

(5) อาจใช้วิธีในการสร้างฟองอากาศระดับไมครอนด้วยวิธีอื่น เนื่องจากในการทดลองครั้งนี้ระบบชุดทดลองมีการใช้พลังงานที่สูง อาจไม่คุ้มค่าในแง่ของการใช้งาน

บรรณานุกรม

- [1] Lasance, C., Advances in high-performance cooling for electronics. On-line. Available from internet, <https://www.electronics-cooling.com/2005/11/advances-in-high-performance-cooling-for-electronics/>, accessed 25 May 2020.
- [2] Yanus A. Cengel, and Afshin J. Ghajar, 2011. Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications Fourth Edition.
- [3] IMPINGING JETS. On-line. Available from internet, http://www.thermopedia.com/fr/content/872/?get_similar_search=arht, accessed 26 May 2020.
- [4] Incropera, F.P., and Ramadhyan S., 1994. Single-phase, Liquid jet impingement cooling of high-performance chips, Cooling of Electronic Systems, pp.457-506.
- [5] Kneer, R., Haustein, H.D., Ehrenpreis, C., Rohlf, W., 2014. Flow structures and heat transfer in submerged and free laminar jets, Proceedings of the 15th International Heat Transfer Conference, IHTC-15.
- [6] Glaspell, A.W., Heat Transfer and Fluid Flow Characteristics of Two-Phase Jet Impingement at Low Nozzle-to-Plate Spacing (Master' s Thesis, Ohio, Youngstown State University, 2018), p. 4.
- [7] Rohlf, W., Jörg, J., Ehrenpreis, C., Rietz, M., Haustein, H., and Kneer, R., 2015. Flow structures and heat transfer in submerged laminar jet impingement, Proceedings of the 1st Thermal and Fluids Engineering Summer Conference, New York City, USA, 9-12 August 2015, TFESC-12816.
- [8] Tadhg S. O'Donovan, Fluid Flow and Heat Transfer of an Impinging Air Jet (Doctor of Philosophy' s Thesis, Ireland, University of Dublin, 2005), p. 67
- [9] Naphon, P., and Wongwises, S., 2011. Experiment study of jet nanofluids impingement system for cooling computer processing unit, Journal of Electronics Cooling and Thermal Control, Vol. 1 pp. 38-44.
- [10] Naphon, P., Nakharintr, L., and Wiriyasart, S., 2018. Continuous nanofluids jet impingement heat transfer and flow in a micro-channel heat sink, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 126 pp. 924-932.
- [11] Nakharintr, L., Naphon, P., and Wiriyasart, S., 2018. Effect of jet-plate spacing to jet diameter ratios on nanofluids heat transfer in a mini-channel heat sink, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 116 pp. 352-361.

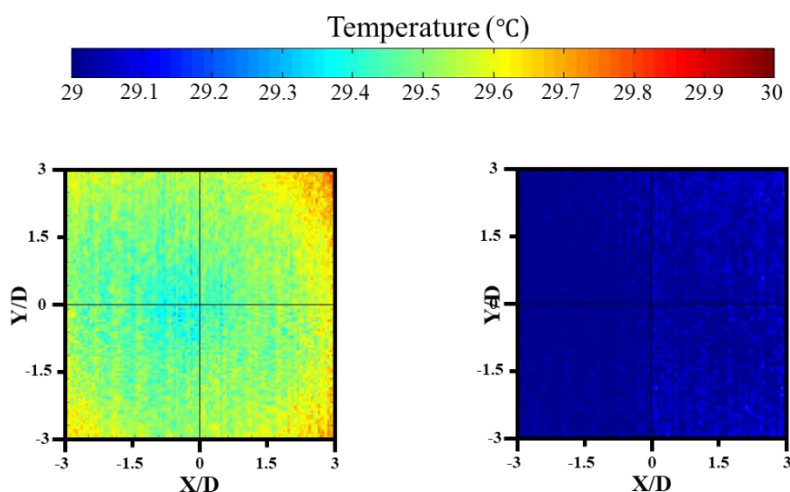
- [12] Lv, J., Hu, C., Bai, M., Zeng, K., Chang, S., and Gao, D., 2017. Experimental investigation of free single jet impingement using SiO₂-water nanofluid, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 84 pp. 39-46.
- [13] Sun, B., Qu, Y., and Yang, D., 2016. Heat transfer of single impinging jet with Cu nanofluids, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 102 pp. 701-707.
- [14] Lv, J., Chang, S., Hu, C., Bai, M., Wang, P., and Zeng, K., 2017. Experimental investigation of free single jet impingement using Al₂O₃-water nanofluid, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 88 pp. 126-135.
- [15] Barewar, S.D., Tawri, S., and Chougule, S.S., 2019. Heat transfer characteristics of free nanofluid impinging jet on flat surface with different jet to plate distance: An experimental investigation, *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, Vol. 136 pp. 1-10.
- [16] Thome, J.R., 2003. On Recent Advances in Modeling of Two-Phase Flow and Heat Transfer, *Heat Transfer Engineering*, Vol. 24, pp. 46-59.
- [17] Thome, J.R., and El Hajal, J., 2003. Two-Phase Flow Pattern Map for Evaporation in Horizontal Tubes: Latest Version, *Heat Transfer Engineering*, Vol. 24, pp. 3-10.
- [18] Hewitt, G.F., and Roberts, D.N., 1969. Studies of Two-Phase Flow Patterns by Simultaneous X-ray and Flash Photography, AERE-M 2159, HMSO.
- [19] Quon, W., and Tanzer, H.J., 1994. Liquid jet cold plate for impingement cooling, U.S. Patent 5,316,075.
- [20] Bezama, R.J., and Natarajan, G., 2007. High power microjet cooler, U.S. Patent US 2007/0227173 A1.
- [21] Nakajima, T., Ohashi, S., Kuwahara, H., Ashiwake, N., Sato, M., Hatsuda, T., Daikoku, T., Hatada, T., Sasaki, S., Inouye, H., Nishihara, A., and Kasai, K., 1993. Liquid impingement cooling module for semiconductor devices, U.S. Patent 5,270,572.
- [22] Joshi, S.N., and Dede, E.M., 2017. Two-phase jet impingement cooling devices and electronic device assemblies incorporating the same, U.S. Patent US 2017/0094837 A1.
- [23] Donoghue, D.B., Albadawi, A., Delauré, Y.M.C., Robinson, A.J., and Murray, D.B., 2014. Bubble impingement and the mechanisms of heat transfer, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 71 pp. 439-450.
- [24] Donoghue, D.B., Albadawi, A., Delauré, Y.M.C., Robinson, A.J., and Murray, D.B., 2018. Mechanisms of heat transfer for axisymmetric bubble impingement and rebound, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 54 pp. 2559-2570.

- [25] Choo, K., and Kim, S.J., 2010. Heat transfer and fluid flow characteristics of two-phase impinging jets, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53 pp. 5692-5699.
- [26] Trainer, D., Kim, J., and Kim, S.J., 2013. Heat transfer and flow characteristics of air-assisted impinging water jets, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 64 pp. 501-513.
- [27] Fredrich, B.K., Glaspell, A.W., and Choo, K., 2016. The effect of volumetric quality on heat transfer and fluid flow characteristics of air-assistant jet impingement, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 101 pp. 261-266.
- [28] Glaspell, A.W., Rouse, V.J., Fredrich, B.K., and Choo, K., 2019. Heat transfer and hydrodynamics for air assisted free water jet impingement at low nozzle-to-surface distances, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 132 pp. 138-142.
- [29] แสงนวล ศรีรัตนชัชวาล และ อนุรักษ์ ปิติรักษ์สกุล, กระบวนการลอยตะกอนแบบอากาศละลาย, วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 27, ฉบับที่ 1, มกราคม-เมษายน 2560, หน้า 205-217.
- [30] Etchepare, R., Oliverira, H., Azevedo, A., and Rubio, J., 2017, Separation of emulsified crude oil in saline water by dissolved air floatation with micro and nanobubbles, *Separation and Purification Technology*, Vol. 186, pp. 326-332.
- [31] Edzwald, J.K., 2007, Developments of high rate dissolved air flotation for drinking water treatment, *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, Vol.56 (6-7), pp. 399-409.
- [32] Arumugam, P., 2015, Understanding the Fundamental Mechanisms of a Dynamic Micro-bubble Generator for Water Processing and Cleaning Applications, Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Toronto.
- [33] Pourkarimi, Z., Rezai, B., Noaparast, M., 2017, Effective parameters on generation of nanobubbles by cavitation method for froth flotation applications, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, Vol. 53(2), pp. 920-942.

ภาคผนวก ก ตัวอย่างวิธีการคำนวณค่าดัชนีเซลท์นัมเบอร์เฉพาะจุดบนพื้นผิวที่เจ็ทพุงชน

การคำนวณหาค่านัมเชิลท์นัมเบอร์ในแต่ละจุดบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

ผลลัพธ์ที่ได้จากการถ่ายภาพความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน จะอยู่ในรูปของการกระจายอุณหภูมิในแต่ละจุดบนพื้นผิว โดยตัวอย่างในกรณีที่ทำกรวัดการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชน สำหรับเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของน้ำมีค่าเท่ากับ 24,000 ที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ 0.0 และระยะพุ่งชนที่ $L=2D$ ได้ทดลองในการถ่ายภาพบนพื้นผิวจำนวน 500 รูป สำหรับกรณีที่พื้นผิวแผ่นสแตนเลสมีฟลักซ์ความร้อน (มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่แผ่นสแตนเลส) และในกรณีที่พื้นผิวแผ่นสแตนเลสไม่มีฟลักซ์ความร้อนหรือเป็นพื้นผิวแบบ Adiabatic (ไม่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่แผ่นสแตนเลส) จากนั้นนำผลลัพธ์การกระจายอุณหภูมิในแต่ละภาพ เข้าสู่กระบวนการ MATLAB Processing เพื่อทำการเฉลี่ยอุณหภูมิที่จุดเดียวกัน ทั้งหมด 500 รูป ซึ่งจะได้รูปภาพการกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยในกรณีที่มีฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวจำนวน 1 รูป และในกรณีที่ไม่มีฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวจำนวน 1 รูป ดังแสดงในรูปที่ ก1 จากนั้นโปรแกรมจะคำนวณเพื่อหาผลลัพธ์สุดท้าย คือ การกระจายค่านัมเชิลท์นัมเบอร์ในแต่ละจุดบนพื้นผิว



(ก) กรณีที่มีฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิว (ข) กรณีที่ไม่มีฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิว

รูปที่ ก1 ตัวอย่างผลลัพธ์ของการกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิว ที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์ของน้ำมีค่า 24,000 สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ 0.0 และระยะพุ่งชนที่ $L=2D$

ในตัวอย่างนี้จะแสดงวิธีการคำนวณค่าสเกลที่นัมเบอร์ที่จุด Stagnation หรือที่พิกัด $X/D, Y/D = (0,0)$ โดยในแต่ละจุดจะใช้วิธีการคำนวณในลักษณะเดียวกันผ่านโปรแกรม MATLAB โดยมีการกำหนดให้

\bar{T}_w คือ อุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวฟุ้งชนที่มีการให้ค่าฟลักซ์ความร้อน

\bar{T}_{aw} คือ อุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวฟุ้งชนที่ไม่มีมีการให้ค่าฟลักซ์ความร้อน

$T_{w,local}$ คือ อุณหภูมิที่เฉพาะจุดบนพื้นผิวฟุ้งชนที่มีการให้ค่าฟลักซ์ความร้อน

$T_{aw,local}$ คือ อุณหภูมิที่เฉพาะจุดบนพื้นผิวฟุ้งชนที่ไม่มีมีการให้ค่าฟลักซ์ความร้อน

ขั้นตอนแรก คำนวณหาค่าฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวได้จาก

$$\dot{q}_{input} = \frac{IV}{A} \quad (ก1)$$

โดยในการวัดกระแสไฟฟ้า (I) และความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) บนพื้นผิวสแตนเลส ซึ่งถูกจ่าย ฟลักซ์ความร้อนด้วย DC power supply สามารถวัดได้จากมัลติมิเตอร์ เนื่องจากมีการสูญเสียพลังงานจากความต้านทานของสายไฟ จะได้ $I = 41.9 \text{ A}$, $V = 1.546 \text{ V}$ และ A คือ พื้นที่ผิวของแผ่นสแตนเลสมีค่า $0.10 \times 0.10 \text{ m}^2$ จากนั้นแทนในสมการที่ (ก1) จะได้

$$\dot{q}_{input} = \frac{41.9 \times 1.546}{0.10 \times 0.10} = 6477.74 \text{ W/m}^2$$

ขั้นตอนที่สอง คำนวณหาการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติได้จาก

$$\dot{q}_{conv} = h_c (\bar{T}_w - \bar{T}_{surr}) \quad (ก2)$$

โดยอุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวฟุ้งชนที่มีการให้ค่าฟลักซ์ความร้อน (\bar{T}_w) มีค่าเท่ากับ $29.52 \text{ }^\circ\text{C}$ และอุณหภูมิห้องขณะทดลอง (\bar{T}_{surr}) มีค่าประมาณ $25.00 \text{ }^\circ\text{C}$ โดยการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (h_c) โดยมีวิธีการดังนี้

$$\text{คำนวณหาคุณสมบัติของอากาศจากอุณหภูมิที่ใกล้บริเวณพื้นผิวแผ่นสแตนเลส } (\bar{T}_{film})$$

$$\bar{T}_{film} = \frac{\bar{T}_w + \bar{T}_{surr}}{2} = \frac{29.52 + 25}{2} = 27.26 \text{ }^\circ\text{C}$$

เปิดตารางหาคคุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ $\bar{T}_{\text{film}} = 27.26 \text{ }^{\circ}\text{C}$ จะได้

$$k_{\text{film}} = 0.02633 \text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Pr} = 0.706943$$

$$v_{\text{film}} = 15.9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

$$\beta = \frac{1}{\bar{T}_{\text{film}}} = \frac{1}{273.15 + 27.26} = 0.003329 \text{ 1/K}$$

ลักษณะการวางแผ่นเป็นแบบวางในแนวนอนซึ่งตั้งฉากกับทิศทางแรงโน้มถ่วง โดยแผ่นด้านบนเป็นแผ่นที่มีอุณหภูมิร้อนสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่เป็นอากาศ จะได้ว่า

คำนวณหา Characteristic length ของพื้นผิว ได้จาก

$$L = \frac{A_s}{p} = \frac{0.10 \times 0.10}{(2 \times 0.10) + (2 \times 0.10)} = 0.025$$

คำนวณหา Rayleigh number ได้จาก

$$\begin{aligned} \text{Ra}_L &= \frac{g\beta(\bar{T}_w - \bar{T}_{\text{surr}})L^3}{v^2} \text{Pr} \\ &= \frac{(9.81)(0.003329)(29.52 - 25)(0.025^3)}{(15.9 \times 10^{-6})^2} (0.706943) \\ &= 6420.497 \end{aligned}$$

คำนวณหาค่านัสเซลท์ที่นับเบอร์จากการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติ ได้จาก

$$\text{Nu}_{\text{conv}} = 0.54 \text{Ra}_L^{1/4} = (0.54)(6420.497)^{1/4} = 4.834$$

ต่อมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ ได้จาก

$$h_c = \frac{\text{Nu}_{\text{conv}} k_{\text{film}}}{L} = \frac{(4.834)(0.02633)}{(0.025)} = 5.091 \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$$

จากสมการที่ (ก2) จะได้

$$\dot{q}_{\text{conv}} = h_c (\bar{T}_w - \bar{T}_{\text{surr}}) = (5.091)(29.52 - 25) = 23.01 \text{ W/m}^2$$

ขั้นตอนที่สาม คำนวณหาการสูญเสียฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยด้วยการแผ่รังสีความร้อน ได้จาก

$$\begin{aligned}
 \dot{q}_{\text{rad}} &= \varepsilon\sigma(\bar{T}_w^4 - \bar{T}_{\text{surr}}^4) \\
 &= (0.95)(5.67037310^{-8}) \left[(273.15+29.52)^4 - (273.15+25)^4 \right] \\
 &= 26.39 \text{ W/m}^2
 \end{aligned} \tag{ก3}$$

ขั้นตอนที่สี่ คำนวณหาฟลักซ์ความร้อนสุทธิ ได้จาก

$$\begin{aligned}
 \dot{q}_{\text{net}} &= \dot{q}_{\text{input}} - \dot{q}_{\text{conv}} - \dot{q}_{\text{rad}} \\
 &= 6477.74 - 23.01 - 26.39 \\
 &= 6428.34 \text{ W/m}^2
 \end{aligned} \tag{ก4}$$

ขั้นตอนที่ห้า คำนวณหาค่านัสเซลล์ที่มุมเบอร์ที่จุด (0,0) ได้จาก

$$\text{Nu}_{\text{local}} = \frac{h_{\text{local}} D}{k_{\text{film,local}}} \tag{ก5}$$

คำนวณหาคณสมบัติของน้ำจากอุณหภูมิที่ใกล้บริเวณพื้นผิวแผ่นแอสแตนเลส ($T_{\text{film,local}}$) โดยอุณหภูมิที่จุด (0,0) บนพื้นผิวพุ่งชนที่มีการให้ค่าฟลักซ์ความร้อน ($T_{w,\text{local}}$) มีค่าเท่ากับ 29.38 °C และอุณหภูมิที่จุด (0,0) บนพื้นผิวพุ่งชนที่ไม่มีการให้ค่าฟลักซ์ความร้อน ($T_{aw,\text{local}}$) มีค่าเท่ากับ 28.99 °C

$$T_{\text{film,local}} = \frac{T_{w,\text{local}} + T_{aw,\text{local}}}{2} = \frac{29.38 + 28.99}{2} = 29.185 \text{ °C}$$

เปิดตารางหาคณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ $\bar{T}_{\text{film}} = 29.185 \text{ °C}$ จะได้

$$k_{\text{film,local}} = 0.6163 \text{ W/m} \cdot \text{°C}$$

จากสมการที่ (ก4) จะได้

$$\dot{q}_{\text{net}} = h_{\text{local}} (T_{w,\text{local}} - T_{aw,\text{local}})$$

$$h_{\text{local}} = \frac{\dot{q}_{\text{net}}}{(T_{w,\text{local}} - T_{aw,\text{local}})} = \frac{6428.34}{29.38 - 28.99} = 16,482.92 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

จากสมการที่ (ก5) จะได้

$$\text{ดังนั้น} \text{ นัสเซลล์ที่มุมเบอร์ที่จุด (0,0) มีค่า } \text{Nu}_{\text{local}} = \frac{(16,482.92)(0.0095)}{(0.6163)} = 254.077$$

ภาคผนวก ข การคำนวณหาความไม่แน่นอนของผลลัพธ์จากการวัดการถ่ายเทความร้อนของเจ็ท
พุ่งชนโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน

การคำนวณหาความไม่แน่นอนของผลลัพธ์จากการวัดการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุงชนโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน (Infrared thermal imaging camera)

ในการวัดการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุงชน ผลลัพธ์ที่ได้คือค่าการกระจายนัสเซลท์เบอร์ในแต่ละจุดบนพื้นผิว ทั้งนี้วิธีการที่นำมาสู่ผลลัพธ์ที่ได้ อาจมีความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในกาทดลอง เช่น การวัดระยะของท่อเจ็ทโดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์ การวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศและน้ำโดยใช้โรตاميเตอร์ การวัดอุณหภูมิของอากาศและน้ำด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด PT-100 และการวัดการกระจายอุณหภูมิโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน เป็นต้น โดยวิธีการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของค่านัสเซลท์เบอร์ ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของน้ำ และค่าสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม ซึ่งแสดงรายละเอียดดังนี้

Uncertainties of Nusselt number by using infrared thermal imaging camera method

Table 1 Uncertainties of measured parameters

No.	Parameters	Symbol	Instrument	Uncertainty
1	Stainless surface area			
	Width	W	Linear scale	± 1.00 mm
	Length	L	Linear scale	± 1.00 mm
2	Diameter of pipe jet	D	Linear scale	± 0.01 mm
3	Distribution of temperature on surface	-	Infrared thermal imaging camera	± 0.02 °C
4	Temperature measurement	-	PT-100 thermocouple	± 0.05 °C
5	Water flow rate	\dot{Q}_w	Water flow meter (Z-5008c)	± 0.03 LPM
6	Air flow rate	\dot{Q}_a	Air flow meter (k-1012)	± 0.025 LPM
7	Electrical current	I	DC power supply	± 0.1 A
8	Voltage	V	Digital voltmeter	± 0.005 V

To find the Nusselt number (Nu)

- Area of stainless surface

$$A = W \times L \quad (91)$$

$$\frac{\delta A}{A} = \left[\left(\frac{\delta W}{W} \right)^2 + \left(\frac{\delta L}{L} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta A}{A} = \left[\left(\frac{1}{100} \right)^2 + \left(\frac{1}{100} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta A}{A} = 0.01414 \text{ or } 1.414\%$$

- Input heat flux (\dot{q}_{input})

$$\dot{q}_{\text{input}} = \frac{IV}{A} \quad (92)$$

$$\frac{\delta \dot{q}_{\text{input}}}{\dot{q}_{\text{input}}} = \left[\left(\frac{\delta I}{I} \right)^2 + \left(\frac{\delta V}{V} \right)^2 + \left(\frac{\delta A}{A} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta \dot{q}_{\text{input}}}{\dot{q}_{\text{input}}} = \left[\left(\frac{0.1}{41.9} \right)^2 + \left(\frac{0.005}{1.546} \right)^2 + (0.01414)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta \dot{q}_{\text{input}}}{\dot{q}_{\text{input}}} = 0.01470 \text{ or } 1.470\%$$

- Heat loss from radiation (\dot{q}_{rad})

$$\dot{q}_{\text{rad}} = \sigma \varepsilon (\bar{T}_w^4 - \bar{T}_{\text{surr}}^4) \quad (93)$$

$$\frac{\delta \dot{q}_{\text{rad}}}{\dot{q}_{\text{rad}}} = \left[\left(\frac{\delta \sigma}{\sigma} \right)^2 + \left(\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon} \right)^2 + \left(\frac{\delta \bar{T}_w}{\bar{T}_w} \right)^2 + \left(\frac{\delta \bar{T}_{\text{surr}}}{\bar{T}_{\text{surr}}} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta \dot{q}_{\text{rad}}}{\dot{q}_{\text{rad}}} = \left[\left(\frac{0.01}{5.67} \right)^2 + \left(\frac{0.01}{0.95} \right)^2 + \left(\frac{0.02}{29.5175} \right)^2 + \left(\frac{0.05}{25} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta \dot{q}_{\text{rad}}}{\dot{q}_{\text{rad}}} = 0.01088 \text{ or } 1.088\%$$

- Characteristics length (L_c)

$$L_c = \frac{4 \times (W \times L)}{2W + 2L} \quad (94)$$

$$\frac{\delta A}{A} = \left[\left(\frac{\delta W}{W} \right)^2 + \left(\frac{\delta L}{L} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta A}{A} = \left[\left(\frac{1}{100} \right)^2 + \left(\frac{1}{100} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta A}{A} = 0.01414 \text{ or } 1.414\%$$

- Rayleigh number (Ra_L)

$$Ra_L = \frac{g\beta(\bar{T}_w - \bar{T}_{surr})L_c^3 Pr}{\mu} \quad (95)$$

$$\frac{\delta Ra_L}{Ra_L} = \left[\left(\frac{\delta g}{g} \right)^2 + \left(\frac{\delta \beta}{\beta} \right)^2 + \left(\frac{\delta \bar{T}_w}{\bar{T}_w} \right)^2 + \left(\frac{\delta \bar{T}_{surr}}{\bar{T}_{surr}} \right)^2 + \left(\frac{\delta L_c}{L_c} \right)^2 + \left(\frac{\delta \mu}{\mu} \right)^2 + \left(\frac{\delta Pr}{Pr} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta Ra_L}{Ra_L} = \left[\left(\frac{0.01}{9.81} \right)^2 + \left(\frac{0.1}{25} \right)^2 + \left(\frac{0.02}{29.5175} \right)^2 + \left(\frac{0.05}{25} \right)^2 + (0.01414)^2 + \left(\frac{0.001}{1.593} \right)^2 + \left(\frac{0.0002}{0.7069} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta Ra_L}{Ra_L} = 0.0149 \text{ or } 1.49\%$$

- Nusselt number of natural convection (Nu_L)

$$Nu_L = 0.54 \times (Ra_L)^{0.25} \quad (96)$$

$$\frac{\delta Nu_L}{Nu_L} = \left(\left(\frac{\delta Ra_L}{Ra_L} \right)^2 \right)^{0.5} = 0.0149 \text{ or } 1.49\%$$

- Heat transfer coefficient of natural convection (h_{convec})

$$h_{convec} = \frac{Nu_L \cdot k}{L_c} \quad (97)$$

$$\frac{\delta h_{convec}}{h_{convec}} = \left[\left(\frac{\delta Nu_L}{Nu_L} \right)^2 + \left(\frac{\delta k}{k} \right)^2 + \left(\frac{\delta L_c}{L_c} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta h_{convec}}{h_{convec}} = \left[(0.0149)^2 + \left(\frac{0.00001}{0.02633} \right)^2 + (0.01414)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta h_{\text{convec}}}{h_{\text{convec}}} = 0.020545 \text{ or } 2.0545\%$$

- Heat loss from convection (\dot{q}_{convec})

$$\dot{q}_{\text{convec}} = h_{\text{convec}} (\bar{T}_w - \bar{T}_{\text{surr}}) \quad (98)$$

$$\frac{\delta \dot{q}_{\text{convec}}}{\dot{q}_{\text{convec}}} = \left[\left(\frac{\delta h_{\text{convec}}}{h_{\text{convec}}} \right)^2 + \left(\frac{\delta \bar{T}_w}{\bar{T}_w} \right)^2 + \left(\frac{\delta \bar{T}_{\text{surr}}}{\bar{T}_{\text{surr}}} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta \dot{q}_{\text{convec}}}{\dot{q}_{\text{convec}}} = \left[(0.020545)^2 + \left(\frac{0.02}{29.5175} \right)^2 + \left(\frac{0.05}{25} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta \dot{q}_{\text{convec}}}{\dot{q}_{\text{convec}}} = 0.020653 \text{ or } 2.0653\%$$

- Heat transfer coefficient (h)

$$h = \frac{\dot{q}_{\text{input}} - \dot{q}_{\text{rad}} - \dot{q}_{\text{convec}}}{\bar{T}_w - \bar{T}_{\text{aw}}} \quad (99)$$

$$\frac{\delta h}{h} = \left[\left(\frac{\delta \dot{q}_{\text{input}}}{\dot{q}_{\text{input}}} \right)^2 + \left(\frac{\delta \dot{q}_{\text{rad}}}{\dot{q}_{\text{rad}}} \right)^2 + \left(\frac{\delta \dot{q}_{\text{convec}}}{\dot{q}_{\text{convec}}} \right)^2 + \left(\frac{\delta \bar{T}_w}{\bar{T}_w} \right)^2 + \left(\frac{\delta \bar{T}_{\text{aw}}}{\bar{T}_{\text{aw}}} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta h}{h} = \left[(0.01470)^2 + (0.01088)^2 + (0.020653)^2 + \left(\frac{0.02}{29.5175} \right)^2 + \left(\frac{0.02}{29.0007} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta h}{h} = 0.027603 \text{ or } 2.7603\%$$

- Nusselt number (Nu)

$$Nu = \frac{hD}{k_w} \quad (10)$$

$$\frac{\delta Nu}{Nu} = \left[\left(\frac{\delta h}{h} \right)^2 + \left(\frac{\delta D}{D} \right)^2 + \left(\frac{\delta k_w}{k_w} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta Nu}{Nu} = \left[(0.027603)^2 + \left(\frac{0.01}{9.5} \right)^2 + \left(\frac{0.001}{0.616} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta Nu}{Nu} = 0.027671 \text{ or } 2.7671\%$$

To find the Reynolds number of water (Re_w)

- Average velocity of water jet in flow in pipe (v_w)

$$v_w = \frac{\dot{Q}_w}{A_{jet}} = \frac{4\dot{Q}_w}{\pi D^2} \quad (11)$$

$$\frac{\delta v_w}{v_w} = \left[\left(\frac{\delta \dot{Q}_w}{\dot{Q}_w} \right)^2 + \left(\frac{\delta D}{D} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta v_w}{v_w} = \left[\left(\frac{0.03}{9} \right)^2 + \left(\frac{0.01}{9.5} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta v_w}{v_w} = 0.0035 \text{ or } 0.35\%$$

- Reynolds number of water (Re_w)

$$Re_w = \frac{\rho_w v_w D}{\mu_w} \quad (12)$$

$$\frac{\delta Re_w}{Re_w} = \left[\left(\frac{\delta \rho_w}{\rho_w} \right)^2 + \left(\frac{\delta v_w}{v_w} \right)^2 + \left(\frac{\delta D}{D} \right)^2 + \left(\frac{\delta \mu_w}{\mu_w} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta Re_w}{Re_w} = \left[\left(\frac{0.6}{997.009} \right)^2 + (0.0035)^2 + \left(\frac{0.01}{9.5} \right)^2 + \left(\frac{10}{855} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta Re_w}{Re_w} = 0.012288 \text{ or } 1.2288\%$$

To find the volumetric fraction (β)

- Volumetric fraction (β)

$$\beta = \frac{\dot{Q}_a}{\dot{Q}_a + \dot{Q}_w} \quad (13)$$

$$\frac{\delta \beta}{\beta} = \left[\left(\frac{\delta \dot{Q}_w}{\dot{Q}_w} \right)^2 + \left(\frac{\delta \dot{Q}_a}{\dot{Q}_a} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta \beta}{\beta} = \left[\left(\frac{0.03}{9} \right)^2 + \left(\frac{0.025}{1} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta \beta}{\beta} = 0.025 \text{ or } 2.5\%$$

ภาคผนวก ค บทความสำหรับเผยแพร่ 1
การศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศ



การศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทฟุ้งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศ STUDY OF FLOW AND HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF AIR BUBBLES WITH WATER IMPINGING JET

ณัฏวิมล อรุณรุจิพันธ์

ปฐมพร นระระโต

ณัฐพร แก้วชูทอง

ชยุต นันทดุสิต*

สถานวิจัยเทคโนโลยีพลังงานและภาควิชา

วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ.สงขลา 90112

*E-mail: chayut.n@psu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการใช้น้ำผสมฟองอากาศที่มีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทฟุ้งชน โดยกำหนดให้เลขเรย์โนลด์สของน้ำมีค่าเท่ากับ 2.4×10^4 สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม ที่ 0.0 และ 0.1 และระยะฟุ้งชนที่ $L = 2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ตามลำดับ ในการศึกษาพฤติกรรมของฟองอากาศใช้วิธีการถ่ายภาพด้วยกล้องความเร็วสูงสำหรับการไหลของเจ็ทปะทะกับพื้นผิว และศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทฟุ้งชนโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน จากผลการศึกษาพบว่าที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ 0.1 สำหรับระยะฟุ้งชนที่ $L = 2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ตามลำดับ จะมีลักษณะการไหลแบบ Bubbly flow และมีค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยพื้นผิวเพิ่มขึ้น 27.27%, 1.98%, 24.37%, 3.84% และ 8.10% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีของเจ็ทน้ำ
คำสำคัญ : น้ำผสมฟองอากาศ, เจ็ทฟุ้งชนด้วยน้ำ, การเพิ่มความสามารถการถ่ายเทความร้อน

Abstract

This research investigated the effect of air bubbles with water impinging jet on heat transfer enhancement. The Reynolds number of water is fixed at 2.4×10^4 , the volumetric fraction is also determined at 0.0 and 0.1, and the nozzle to impingement plate distances are 2D, 4D, 6D, 8D and 10D, respectively. The flow visualization of impinging jet flow to study bubble behavior is taken by high speed camera and heat transfer on impingement plate is also inspected by an infrared thermal imaging camera. The result shows that at the volumetric fraction of 0.1 for nozzle to impingement plate distances is 2D, 4D, 6D, 8D and 10D, respectively, the flow visualization has a bubbly flow and it affects to increase average Nusselt number on impingement plate which are 27.27%, 1.98%, 24.37%, 3.84% and 8.10%, respectively, when compared for water jet.

Keywords: Air bubbles, Water impinging jet, Heat transfer enhancement

1. บทนำ

การจัดการพลังงานความร้อนถือเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากในโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกพัฒนาให้มีสมรรถนะในการทำงานที่สูงขึ้นและมีขนาดเล็กลง แต่ยังคงพบความร้อนที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนที่สูงเกินกว่าสภาวะการทำงาน จึงเป็นผลให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลงและอาจสร้างความเสียหายแก่อุปกรณ์ได้ จึงจำเป็นต้องมีการจัดการพลังงานความร้อนส่วนเกินและมีการควบคุมอุณหภูมิบนชิ้นส่วนเพื่อยืดอายุการใช้งานและหลีกเลี่ยงความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ได้

การใช้เจ็ทของไหลฟุ้งชนพื้นผิวถือเป็นวิธีการระบายความร้อนอีกทางเลือกหนึ่งที่นิยมใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมอวกาศ, อุตสาหกรรมโลหะ, อุตสาหกรรมเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบและอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น เนื่องจากเป็นวิธีการระบายความ

ร้อนเฉพาะจุด โดยมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ค่อนข้างสูงในบริเวณที่เจ็ทของไหลฟุ้งชน จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการระบายความร้อนแบบรวดเร็วบนพื้นผิว ในปัจจุบันได้มีงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ศึกษาการใช้เจ็ทของไหลฟุ้งชนพื้นผิวโดยใช้น้ำเป็นตัวกลางในการระบายความร้อน เนื่องจากน้ำมีค่าการนำความร้อนที่สูงเมื่อเทียบกับอากาศ ซึ่งส่งผลให้เพิ่มประสิทธิภาพในการระบายความร้อนของเจ็ทของไหลฟุ้งชน ต่อมางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เจ็ทฟุ้งชนยังได้มีศึกษาและพัฒนาเพื่อเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้น โดยการเติมอนุภาคนาโนลงในน้ำ ซึ่งจะเพิ่มค่าการนำความร้อนของของไหลเมื่อเทียบกับน้ำ ส่งผลให้เพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทของไหลฟุ้งชน แต่การเติมอนุภาคนาโนลงในน้ำ มักพบปัญหาการเกิดคราบตะกอนของอนุภาคนาโนบนพื้นผิวที่ฟุ้งชน ส่งผลให้ลดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนลง อีกทั้งระบบการทำงานจำเป็นต้องใช้พลังงานที่สูง

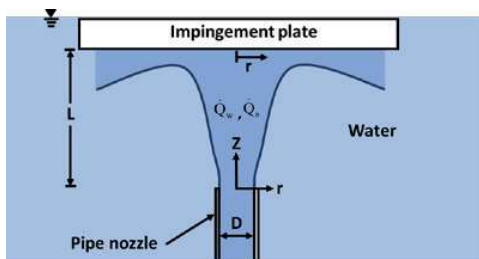
การใช้เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวด้วยน้ำผสมฟองอากาศถือเป็นทางเลือกหนึ่งที่มีส่วนช่วยในการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อน โดยฟองอากาศเมื่อพุ่งชนกับพื้นผิวที่ร้อน จะก่อให้เกิดการรบกวนในชั้นขอบเขตการไหลบนพื้นผิว [1] และเพิ่มระดับความปั่นป่วนในการไหลของลำเจ็ท [2-4] เป็นผลให้เกิดการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนเมื่อเทียบกับตัวกลางที่เป็นน้ำ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศ โดยพิจารณาผลของระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชนที่ $L = 2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ตามลำดับ โดย D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อรูเจ็ทมีค่าเท่ากับ 9.5 mm , เลขเรย์โนลด์สของน้ำมีค่าเท่ากับ 2.4×10^4 และสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ 0.0 และ 0.1 โดยลักษณะของเจ็ทเป็นแบบท่อเจ็ท (Pipe nozzle) นอกจากนี้ได้มีการบันทึกภาพพฤติกรรมของฟองอากาศสำหรับการไหลจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชนด้วยกล้องความเร็วสูงและมีการถ่ายภาพบนพื้นผิวร้อนที่เจ็ทพุ่งชนด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน

2. โมเดลและชุดทดลอง

2.1 โมเดลและตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 1 แสดงโมเดลของเจ็ทพุ่งชนที่ใช้ในการศึกษา โดยลักษณะของเจ็ทเป็นแบบท่อเจ็ท (Pipe nozzle) โดยของไหลจะไหลพุ่งออกจากท่อเจ็ทที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ $D = 9.5 \text{ mm}$ จากนั้นจะเข้าพุ่งชนกับพื้นผิวที่มีระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวพุ่งชน $L = 2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ตามลำดับ โดยชนิดของเจ็ทพุ่งชนที่ใช้ในการศึกษาเป็นแบบ Submerged ซึ่งน้ำเป็นของไหลที่อยู่บริเวณโดยรอบของเจ็ท ในการทดลองจะกำหนดให้เลขเรย์โนลด์สของน้ำมีค่าเท่ากับ 2.4×10^4 หรือมีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเท่ากับ 9 ลิตรต่อวินาทีและอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศเท่ากับ 0 และ 1 ลิตรต่อวินาที หรือกล่าวคือที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ 0.0 และ 0.1 ตามลำดับ สำหรับการสร้างการไหลแบบสองสถานะระหว่างน้ำกับอากาศ



รูปที่ 1 โมเดลของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว

สำหรับเลขเรย์โนลด์สของน้ำของการไหลแบบสองสถานะ จาก Faghri และคณะ [5] สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Re_w = \frac{4\rho_w \dot{Q}_w}{\pi D \mu_w} \quad (1)$$

โดยที่ ρ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)

\dot{Q}_w คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำ (m^3/s)

μ_w คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดเชิงพลวัตของน้ำ ($\text{kg/m}\cdot\text{s}$)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจ็ท (m)

สำหรับสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\beta = \frac{\dot{Q}_a}{\dot{Q}_w + \dot{Q}_a} \quad (2)$$

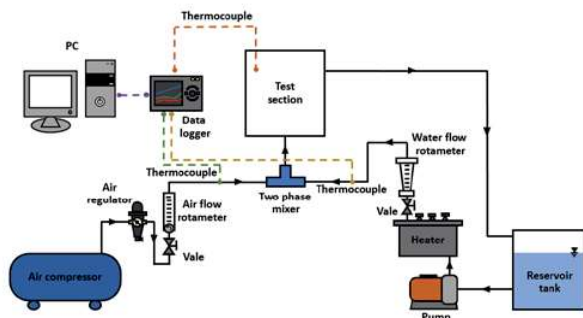
โดยที่ \dot{Q}_a คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ (Litre/min)

\dot{Q}_w คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำ (Litre/min)

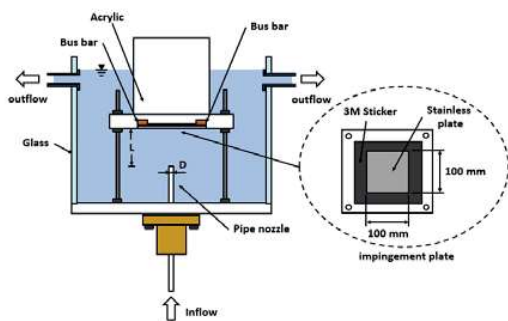
2.2 ชุดทดลอง

รูปที่ 2 แสดงแผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษา น้ำที่อยู่ในถังน้ำ (Reservoir tank) ซึ่งจะถูกควบคุมโดยการลดอุณหภูมิในถัง จากนั้นจะถูกปั๊มน้ำสู่อุปกรณ์ทำความร้อน (Heater tank) ซึ่งจะถูกควบคุมโดยการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำให้สูงขึ้น เพื่อให้อุณหภูมิของน้ำคงที่ ต่อมาน้ำจะไหลผ่านโรตاميเตอร์สำหรับน้ำ ซึ่งทำหน้าที่ในการวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำ ในขณะที่ตัวถังอากาศจะถูกบีบด้วยปั๊มลมเข้าสู่ชุดวัดความชื้นและวาล์วปรับความดัน จากนั้นอากาศจะไหลเข้าสู่โรตاميเตอร์สำหรับอากาศเพื่อทำหน้าที่ในการวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ ต่อมาน้ำและอากาศจะไหลเข้าสู่ท่อเวนจูรีเพื่อสร้างของไหลแบบสองสถานะระหว่างน้ำและอากาศ โดยในการทดลองจะมีการวัดอุณหภูมิของน้ำและอากาศก่อนการผสมที่ท่อเวนจูรีด้วยเทอร์โมคัปเปิล ชนิด PT-100 ($\pm 0.01 \text{ }^\circ\text{C}$) และกำหนดอุณหภูมิของน้ำที่ $28.0 \pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ และอุณหภูมิของอากาศมีค่าเท่ากับ $25.0 \pm 1.0 \text{ }^\circ\text{C}$ สำหรับการคำนวณสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศ ไม่ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของอากาศ [3] เช่น ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดเชิงพลวัตของอากาศและค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ เป็นต้น จากนั้นของไหลที่เป็นน้ำผสมฟองอากาศจะไหลเข้าสู่ชุดทดสอบ (Test section)

รูปที่ 3 แสดงชุดทดสอบ โดยของไหลที่เป็นน้ำผสมฟองอากาศจะไหลเข้าสู่ท่อเจ็ทที่มีความยาวท่อ 1 เมตร เพื่อให้ของไหลเกิดการไหลพัฒนาอย่างสมบูรณ์ (Fully developed flow) จากนั้นของไหลจะไหลออกจากท่อเจ็ทสู่บริเวณโดยรอบที่ตัวกลางเป็นน้ำและเข้าพุ่งชนกับพื้นผิวที่เป็นแผ่นสแตนเลส (SUS304) ที่มีความกว้าง, ความยาวและความหนาเท่ากับ 100 mm , 100 mm และ 0.03 mm จากนั้นของไหลที่พุ่งชนพื้นผิวจะไหลออกสู่ชุดทดสอบเพื่อเข้าสู่ถังน้ำและหมุนเวียนในระบบต่อไป



รูปที่ 2 แผนภาพชุดทดลอง

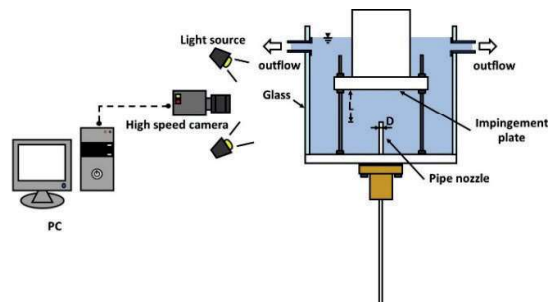


รูปที่ 3 ชุดทดสอบ

3. วิธีการทดลอง

ในการทดลองได้ศึกษาลักษณะการไหลและพฤติกรรมของฟองอากาศที่ปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชน โดยการบันทึกภาพด้วยกล้องความเร็วสูงและได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนโดยการบันทึกภาพจากกล้องถ่ายภาพความร้อน ทั้งนี้ในการศึกษาเพื่อวิเคราะห์ผลของพฤติกรรมของฟองอากาศที่มีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศ

3.1 การศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศ

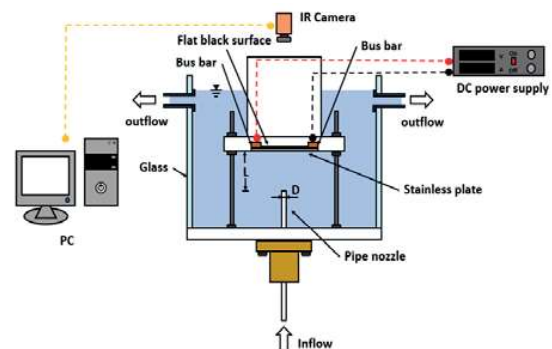


รูปที่ 4 แผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชน

ในการทดลองจะศึกษาที่เลขเรย์โนลด์ส์ของน้ำมีค่าเท่ากับ 2.4×10^4 และที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเท่ากับ 0.1 โดยการบันทึกภาพในบริเวณที่ของไหลไหลออกจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชน ที่ระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวพุ่งชน $L = 2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ตามลำดับ ซึ่งในการบันทึกภาพจะใช้กล้องความเร็วสูงดังแสดงในรูปที่ 4

3.2 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว

ในการทดลองจะศึกษากรณีของเลขเรย์โนลด์ส์ของน้ำมีค่าเท่ากับ 2.4×10^4 และที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเท่ากับ 0.0 และ 0.1 โดยที่ระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวพุ่งชน $L = 2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ตามลำดับ โดยการทำบันทึกภาพบนพื้นผิวร้อนที่เจ็ทพุ่งชน ซึ่งแผ่นสแตนเลสจะถูกขึงด้วยแท่งทองแดงทั้งสองด้าน โดยบนแผ่นสแตนเลสจะถูกพ่นสีดำเพื่อใช้ในการถ่ายภาพด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน ต่อมาเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply) จะจ่ายกระแสไฟผ่านแท่งทองแดงให้แก่แผ่นสแตนเลสเพื่อให้พื้นผิวร้อน แสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว

ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน ซึ่งภาพที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม MATLAB เพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวหรือค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยบนพื้นผิว โดยวิธีการคำนวณจะแสดงในสมการที่ 3 ถึง 8

สำหรับค่าฟลักซ์ความร้อนที่จ่ายให้แก่แผ่นสแตนเลส ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

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

โดยที่ I คือ กระแสไฟฟ้า (A)

V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)

A คือ พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิว (m^2)

ในการทดลองแผ่นสแตนเลสที่ถูกทำให้ร้อน จะมีการสูญเสียฟลักซ์ความร้อนอันเนื่องมาจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติและการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (4) และ (5) ตามลำดับ

$$\dot{q}_{conv} = h_c(\bar{T}_{heat} - \bar{T}_{surr}) \quad (4)$$

$$\dot{q}_{rad} = \epsilon\sigma(\bar{T}_{heat}^4 - \bar{T}_{surr}^4) \quad (5)$$

โดยที่ h_c คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ ($W/m^2.K$)

ϵ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

σ คือ ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann ($W/m^2.K^2$)

\bar{T}_{heat} คือ อุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวร้อนที่เจ็ทพุ่งชน ($^{\circ}C$)

\bar{T}_{surr} คือ อุณหภูมิของอากาศโดยรอบ ($^{\circ}C$)

สำหรับค่าฟลักซ์ความร้อนสุทธิสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\dot{q}_{net} = \dot{q}_{input} - \dot{q}_{conv} - \dot{q}_{rad} \quad (6)$$

โดยที่ \dot{q}_{input} คือ ฟลักซ์ความร้อนที่ให้แก่แผ่นสแตนเลส (W/m^2)

\dot{q}_{conv} คือ การสูญเสียฟลักซ์ความร้อนด้วยการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (W/m^2)

\dot{q}_{rad} คือ การสูญเสียฟลักซ์ความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อน (W/m^2)

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\bar{h} = \frac{\dot{q}_{net}}{(\bar{T}_{heat} - \bar{T}_{no\ heat})} \quad (7)$$

โดยที่ \dot{q}_{net} คือ ฟลักซ์ความร้อนสุทธิ (W/m^2)

\bar{T}_{heat} คือ อุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวร้อนขณะเจ็ทพุ่งชน ($^{\circ}C$)

$\bar{T}_{no\ heat}$ คือ อุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวที่ไม่ถูกทำให้ร้อนขณะเจ็ทพุ่งชน ($^{\circ}C$)

สำหรับเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยบนพื้นผิวสามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$\bar{Nu} = \frac{\bar{h}D}{k_w} \quad (8)$$

โดยที่ \bar{h} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ($W/m^2.K$)

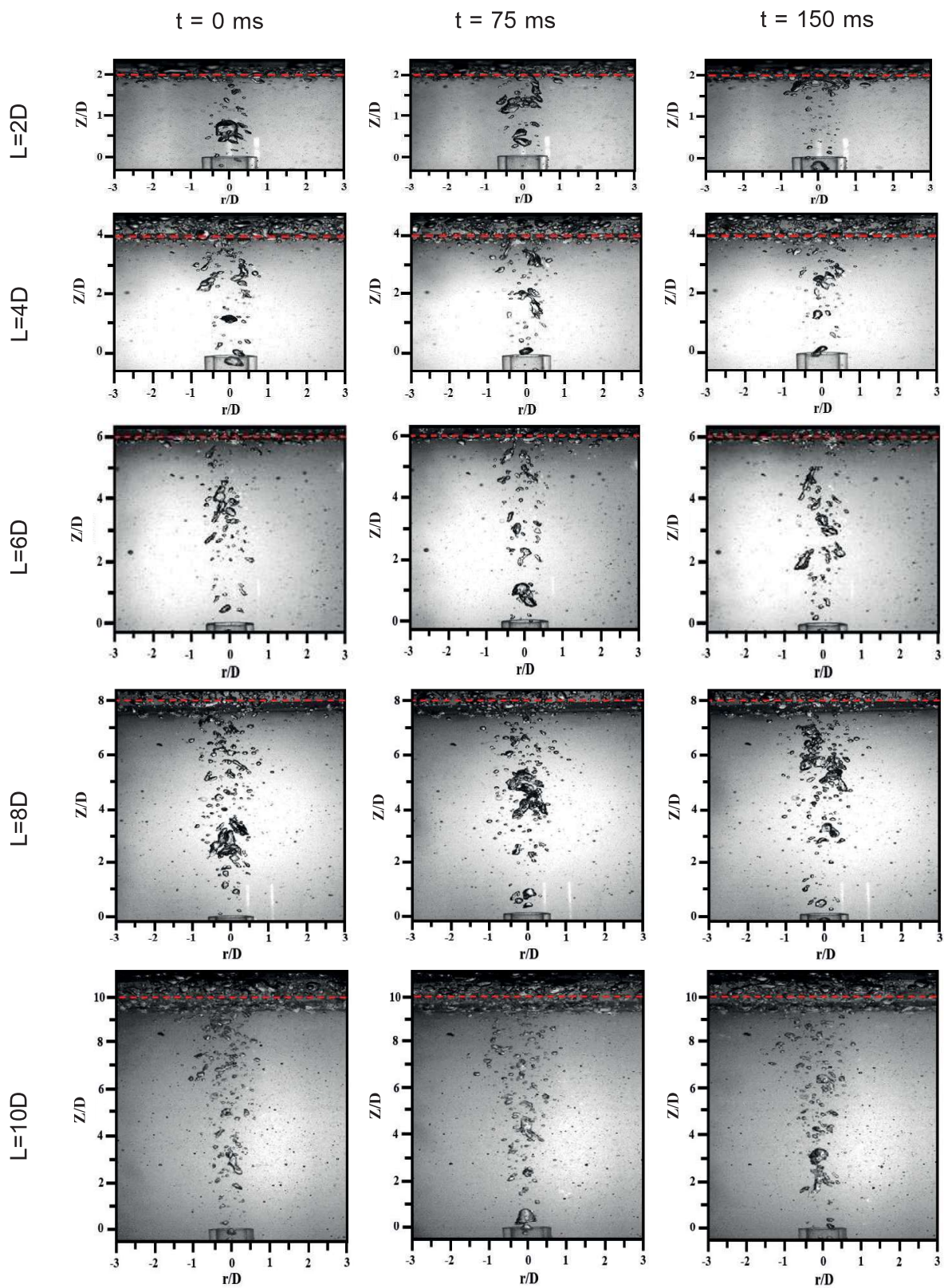
D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจ็ท (m)

k_w คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของน้ำ ($W/m.K$)

4. ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศ

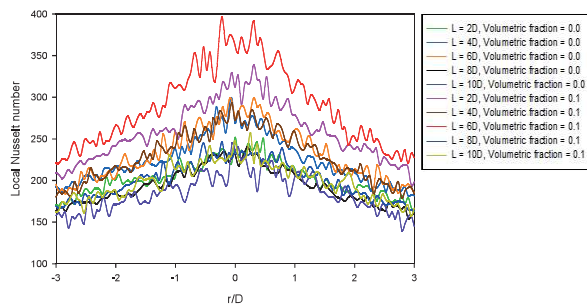
รูปที่ 6 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศสำหรับสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ 0.1 ซึ่งมีระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวพุ่งชน $L = 2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ตามลำดับ โดยจะแสดงเวลาที่ $t = 0\ ms, 75\ ms$ และ $150\ ms$ ซึ่งจะเห็นว่าลักษณะของฟองอากาศที่พุ่งออกจากปากทางออกของเจ็ทจะมีลักษณะเป็นฟองอากาศขนาดเล็ก โดยรูปร่างของฟองอากาศที่พบจะมีรูปร่างเป็นก้อนกลม (Sphere shape) รูปร่างแบน (Flat shape) และฟองอากาศแบบไร้รูปร่าง (Irregular shape) โดยจะเกิดการชนกันระหว่างฟองอากาศแต่ละฟองก่อนที่จะเข้าปะทะกับพื้นผิว เป็นผลทำให้ฟองอากาศแตกตัวเป็นขนาดฟองเล็ก ๆ และเข้าพุ่งชนกับพื้นผิว โดยเมื่อฟองอากาศเข้าพุ่งชนกับพื้นผิวแล้ว ฟองอากาศบางส่วนจะเกิดการแตกตัวอีกรอบและบางส่วนไม่เกิดการแตกตัว โดยต่อมาฟองอากาศจะไหลเรียบไปกับพื้นผิวต่อไป โดยลักษณะรูปแบบการไหลระหว่างปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชน มีลักษณะรูปแบบ Bubbly flow



รูปที่ 6 ลักษณะการไหลของเจ็ทพวงชนที่ตัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเท่ากับ 0.1 โดยมีระยะพวงชนที่ $L = 2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$

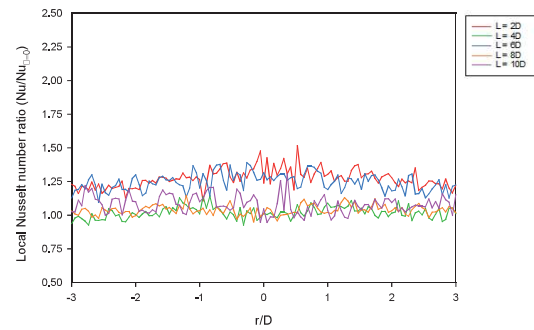
4.2 ผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว

รูปที่ 7 แสดงค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะจุดบนพื้นผิวตามแนวรัศมีสำหรับสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ 0.0 และ 0.1 โดยมีระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชน $L = 2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ตามลำดับ ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่ากรณีที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเท่ากับ 0.1 จะมีแนวโน้มค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะจุดตามแนวรัศมีสูงกว่าในกรณีสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ 0.0 โดยเทียบที่ระยะพุ่งชนเดียวกัน



รูปที่ 7 ค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะจุดที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม และระยะพุ่งชนต่าง ๆ บนพื้นผิวตามแนวรัศมี

จากรูปที่ 8 แสดงอัตราส่วนระหว่างเลขนัสเซลล์เฉพาะจุดของสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ 0.1 (Nu) ซึ่งลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนเป็นแบบน้ำผสมฟองอากาศกับเลขนัสเซลล์เฉพาะจุดของสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ 0.0 ($Nu_{\beta=0}$) ซึ่งลักษณะการไหลเป็นแบบเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำ โดยการเทียบอัตราส่วนที่ระยะพุ่งชนเดียวกัน ซึ่งจะพบได้ว่าค่าอัตราส่วนระหว่างเลขนัสเซลล์เฉพาะจุดของสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ 0.1 เทียบกับ 0.0 ที่ระยะพุ่งชน $L = 2D$ และ $6D$ มีค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์เฉพาะจุดใกล้เคียงกันและมีค่าสูงกว่าในกรณีที่ระยะพุ่งชน $L = 4D, 8D$ และ $10D$ ซึ่งเมื่อคิดเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนเลขนัสเซลล์เฉพาะจุดพบว่าสำหรับที่ระยะพุ่งชน $L = 2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ มีค่าเพิ่มขึ้นคิดเป็น 27.27%, 1.98%, 24.37%, 3.84% และ 8.10% ตามลำดับ



รูปที่ 8 อัตราส่วนระหว่างเลขนัสเซลล์เฉพาะจุดของสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ 0.1 เทียบกับที่ 0.0 ($Nu/Nu_{\beta=0}$) บนพื้นผิวตามแนวรัศมี

จากผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนพบว่าที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเท่ากับ 0.1 หรือรูปแบบการไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศมีส่วนช่วยในการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนสำหรับระยะพุ่งชนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ซึ่งฟองอากาศที่ปะทะกับพื้นผิวจะก่อให้เกิดการปั่นป่วนบริเวณพื้นผิว โดยจะไปทำลายชั้นขอบเขตความร้อน (Thermal boundary layer) ทำให้เกิดการเพิ่มประสิทธิภาพการพาความร้อนบนพื้นผิว [1]

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศ โดยในงานวิจัยนี้สามารถกล่าวสรุปได้เป็น 3 ข้อหลัก

1. ลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเท่ากับ 0.1 จะมีรูปแบบการไหลที่มีลักษณะ Bubbly flow สำหรับระยะพุ่งชน $L = 2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ตามลำดับ
2. การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเท่ากับ 0.1 สำหรับระยะพุ่งชน $L = 2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ พบว่ามีการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้ 27.27%, 1.98%, 24.37%, 3.84% และ 8.10% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเท่ากับ 0.0
3. การใช้เจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศมีส่วนช่วยในการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนเมื่อเทียบกับการใช้เจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำธรรมดา โดยฟองอากาศมีผลทำให้เพิ่มความปั่นป่วนในการไหลของลำเจ็ทและก่อให้เกิดความปั่นป่วนบริเวณพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

6. เอกสารอ้างอิง

- [1]. Donoghue, D.B., Albadawi, A., Delauré, Y.M.C., Robinson, A.J., Murray, D.B., 2014, “Bubble impingement and the mechanisms of heat transfer”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 71 pp.439-450.
- [2]. Choo, K., Kim, S.J., 2019, “Heat transfer and fluid flow characteristics of two-phase impinging jets”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.53 pp.5692-5699.
- [3]. Trainer, D., Kim, J., Kim, S.J., 2013, “Heat transfer and flow characteristics of air-assisted impinging water jets”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.64 pp.501-513.
- [4]. Friedrich, B.K., Ford, T.D., Glaspell, A.W., Choo, K., 2017, “Experimental study of the hydrodynamic and heat transfer of air-assistant circular water jet impinging a flat circular disk.”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.106 pp.804-809.
- [5]. Faghri, A., Zhang, Y., 2006, *11-TWO-PHASE FLOW AND HEAT TRANSFER*”, *Transport Phenomena in Multiphase Systems*, pp.853-949.

ภาคผนวก ง บทความสำหรับเผยแพร่ 2
การศึกษาพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศ



การศึกษาพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศ Study of Flow Behavior and Heat Transfer Characteristics of Air Mixed Water Jet Impingement

ฉัตรวิสต์ อรุณรุจิพันธ์, ปฐมพร นระระโต, ณัฐพร แก้วชูทอง และ ชยุต นันทดุสิต*

สถานวิจัยเทคโนโลยีพลังงานและภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ.สงขลา 90112

*ติดต่อ: chayut.n@psu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการเติมอากาศร่วมกับน้ำในการไหลของเจ็ทที่มีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวเรียบ ก่อนที่การไหลของอากาศจะผสมกับการไหลของน้ำเพื่อสร้างการไหลแบบสองสถานะในการแสการไหลของเจ็ท โดยอัตราการไหลของน้ำมีค่าเท่ากับ 9 ลิตรต่อนาทีหรือแสดงในเทอมของเลขเรย์โนลด์ส์ของน้ำ (Re_w) ที่ 2.4×10^4 อัตราการไหลของอากาศแสดงอยู่ในเทอมของสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม (β) ที่ 0.0 ถึง 0.7 และที่ระยะพุ่งชนพื้นผิวที่ $L=8D$ โดยขนาดท่อเจ็ทมีค่า $D=9.5$ mm ในการศึกษาพฤติกรรมการไหลของเจ็ทพุ่งชนที่มีน้ำผสมร่วมกับอากาศใช้วิธีการถ่ายภาพด้วยกล้องความเร็วสูงและการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนใช้วิธีการถ่ายภาพความร้อน จากผลการศึกษาพบว่าที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 ตามลำดับ มีค่าเฉลี่ยเลขคณิตพื้นผิวเพิ่มขึ้น 3.77%, 8.81%, 9.53%, 40.42%, 36.88% และ 8.08% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำ แม้ว่าการเพิ่มสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมมากขึ้นส่งผลให้เกิดการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อน แต่สำหรับที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ 0.7 พบว่ามีค่าเฉลี่ยเลขคณิตพื้นผิวลดลง 11.90% เมื่อเทียบกับกรณีของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำ

คำหลัก: การไหลแบบสองสถานะ, เจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำ, การถ่ายเทความร้อน

Abstract

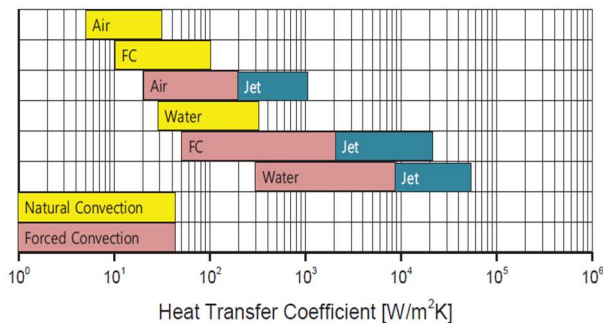
This research investigated the effect of adding air flow mixed with water jet flow for heat transfer enhancement of water impinging jet on flat plate. Before the air flow is mixed with the water flow to produce two-phase flow in the jet stream, the water flow rate is fixed at 9 L/min or presented in term Reynold number of water (Re_w) is 24,000, the air flow rate is varied or presented in term volumetric fraction (β) from 0.0 to 0.7, the nozzle to impingement plate distances at 8D, and diameter of jet is $D=9.5$ mm. The flow visualization of impinging jet to study air mixed water jet behavior is taken by high-speed camera and heat transfer on impingement plate is also inspected by an infrared thermal imaging camera. The result shows that the volumetric fraction at 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 and 0.6 have an effect to increase the average Nusselt number that is 3.77%, 8.81%, 9.53%, 40.42%, 36.88% and 8.08%, respectively, when compared with water jet case. Although the increase of volumetric fraction affects to enhance heat transfer, the volumetric fraction at 0.7 has an effect to decrease the average Nusselt number that is 11.90%, when compared with water jet case.

Keywords: Two-phase flow, Water impinging jet, Heat transfer



1 บทนำ

เจ็ทพุงชนเป็นระบบระบายความร้อนรูปแบบหนึ่งที่ยิยมใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมโลหะ และ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น เนื่องจากเป็นระบบที่ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนหรือค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงในบริเวณพื้นผิวที่เจ็ทของไหลพุงชนและสามารถกำจัดปริมาณความร้อนบนพื้นผิวได้อย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับการระบายความร้อนในรูปแบบอื่น ๆ ตามแสดงในรูปที่ 1 โดยทั่วไปอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่มีการปลดปล่อยพลังงานความร้อนอย่างต่อเนื่องในขณะที่ใช้งาน อาจก่อให้เกิดความเสียหายแก่ชิ้นส่วนได้ และกรรมวิธีการชุบในกระบวนการผลิตโลหะที่มีการควบคุมอุณหภูมิบนพื้นผิววัสดุไม่เหมาะสม ก็อาจก่อให้เกิดรอยตำหนิในวัสดุได้เช่นกัน ดังนั้นการประยุกต์ใช้ระบบเจ็ทของไหลพุงชนเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวมา ถือเป็นระบบที่เหมาะสม โดยสามารถกำจัดปริมาณความร้อนส่วนเกินได้อย่างรวดเร็วบนชิ้นส่วนและควบคุมอุณหภูมิบนพื้นผิววัสดุได้ตามความต้องการ



รูปที่ 1 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของวิธีการระบายความร้อนในแบบต่าง ๆ [1]

ในปัจจุบันงานวิจัยส่วนใหญ่ได้มีการศึกษาเจ็ทของไหลพุงชนที่มีน้ำเป็นตัวกลางในการระบายความร้อน เนื่องจากน้ำมีค่าการนำความร้อนที่สูงเมื่อเทียบกับอากาศ ซึ่งมีผลทำให้ระบบเจ็ทพุงชนด้วยน้ำมีประสิทธิภาพในการระบายความร้อนค่อนข้างสูง โดยทั่วไประบบเจ็ทพุงชนมีตัวแปรต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อความสามารถในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว เช่น อัตราการไหลที่ออกจากหัวฉีด, ระยะห่างระหว่างหัวฉีดถึงพื้นผิวที่พุงชน และขนาดของหัวฉีด เป็นต้น Naphon และ Wongwises [2] ได้แสดงให้เห็นถึงค่าอัตราการไหลที่ออกจากหัวฉีดมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานความร้อนของแผงระบายความร้อนลดลงตาม L_v และคณะ [3] ได้แสดงให้เห็นถึงระยะห่างระหว่างหัวฉีดถึงพื้นผิวที่พุงชนต่อขนาดของ

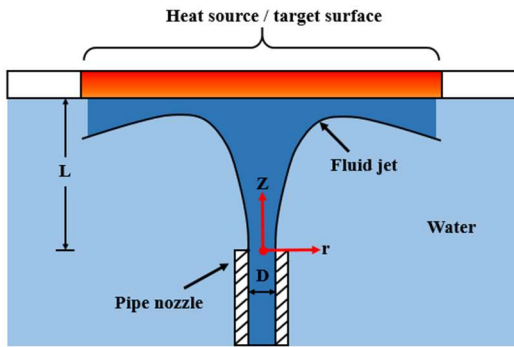
หัวฉีดที่ 2 ถึง 4 ที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิว โดยพบว่าค่าระยะห่างระหว่างหัวฉีดถึงพื้นผิวที่พุงชนต่อขนาดของหัวฉีดที่ 4 จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวสูงที่สุดเมื่อเทียบกับที่ระยะห่างอื่น ๆ Nakharintr และคณะ [4] ได้แสดงให้เห็นถึงขนาดของหัวฉีดที่แตกต่างกันมีผลต่อค่าความต้านทานความร้อนของแผงระบายความร้อน โดยในงานวิจัยพบว่าขนาดของหัวฉีดที่ใหญ่กว่า จะส่งผลให้ค่าความต้านทานความร้อนของแผงระบายความร้อนลดลงได้มากกว่าเมื่อเทียบกับขนาดของหัวฉีดที่เล็กกว่า ต่อมานักวิจัยส่วนใหญ่ได้มีการพัฒนาและปรับปรุงระบบเจ็ทของไหลพุงชนโดยใช้ของไหลนาโนเป็นตัวกลางในการระบายความร้อน เนื่องจากการเติมอนุภาคนาโนลงในน้ำ จะช่วยเพิ่มค่าการนำความร้อนของของไหล ส่งผลให้เกิดการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อน [5-7] แต่การใช้ของไหลนาโนในระบบเจ็ทพุงชนมักพบปัญหาของการเกิดคราบตะกอนของอนุภาคนาโนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุงชน เป็นผลให้ลดความสามารถในการถ่ายเทความร้อน [7] อีกทั้งระบบการทำงานจำเป็นต้องใช้พลังงานสูง

การใช้เจ็ทพุงชนด้วยน้ำผสมอากาศถือเป็นทางเลือกหนึ่ง ที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากปริมาณอากาศในการไหลของลำเจ็ทน้ำ มีผลต่อการเพิ่มระดับความปั่นป่วนของลำเจ็ท [8-10] อีกทั้งปริมาณอากาศที่แตกตัวเป็นก้อนฟองอากาศในกระแสการไหลของลำเจ็ท เมื่อฟองอากาศกระทบกับพื้นผิว ก่อให้เกิดการรบกวนชั้นขอบเขตความร้อนบนพื้นผิวที่พุงชน ด้วยเหตุนี้การใช้น้ำผสมอากาศเป็นตัวกลางในการระบายความร้อนของเจ็ทพุงชนมีประสิทธิภาพสูงกว่าเมื่อเทียบกับตัวกลางที่เป็นน้ำ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทพุงชนด้วยน้ำผสมอากาศ โดยพิจารณาผลของระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุงชนที่ $L = 8D$ โดย D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเจ็ทมีค่าเท่ากับ 9.5 mm, เลขเรย์โนลด์สของน้ำมีค่าเท่ากับ 2.4×10^4 และสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ 0.0 ถึง 0.7 โดยลักษณะของเจ็ทเป็นแบบท่อเจ็ท (Pipe nozzle) นอกจากนี้ได้มีการบันทึกภาพพฤติกรรมของไหลที่เป็นน้ำผสมกับอากาศภายในท่อเจ็ทและการไหลจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุงชนด้วยกล้องความเร็วสูงและมีการถ่ายภาพบนพื้นผิวร้อนที่เจ็ทพุงชนด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน

2 โมเดลและชุดทดลอง

2.1 โมเดลและตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 2 โมเดลเจ็ทของไหลพุ่งชนพื้นผิว

รูปที่ 2 แสดงโมเดลของเจ็ทพุ่งชนที่ใช้ในการศึกษา โดยลักษณะของเจ็ทเป็นแบบท่อเจ็ท (Pipe nozzle) โดยของไหลจะไหลพุ่งออกจากท่อเจ็ทที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ $D = 9.5 \text{ mm}$ จากนั้นจะเข้าพุ่งชนกับพื้นผิวที่มีระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวพุ่งชน $L = 8D$ โดยชนิดของเจ็ทพุ่งชนที่ใช้ในการศึกษาเป็นแบบ Submerged ซึ่งน้ำเป็นของไหลที่อยู่บริเวณโดยรอบของเจ็ท ในการทดลองจะกำหนดให้เลขเรย์โนลด์ส์ของน้ำมีค่าเท่ากับ 2.4×10^4 หรือมีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเท่ากับ 9 ลิตรต่ออนาทีและอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศมีค่าตามแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศจะถูกผสมเข้ากับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเพื่อสร้างเจ็ทของไหลแบบสองสถานะ

ตารางที่ 1 ค่าสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม

สัดส่วนระหว่างอัตรา การไหลเชิงปริมาตรของ อากาศกับอัตราการไหล เชิงปริมาตรรวม	อัตราการไหล เชิงปริมาตรของ น้ำ (ลิตร/นาที)	อัตราการไหล เชิงปริมาตร ของอากาศ (ลิตร/นาที)
0.0	9	0
0.1	9	1
0.2	9	2.25
0.3	9	3.86
0.4	9	6
0.5	9	9
0.6	9	13.5
0.7	9	21

สำหรับเลขเรย์โนลด์ส์ของน้ำของการไหลแบบสองสถานะ จาก Faghri และคณะ [11] สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Re_w = \frac{4\rho_w \dot{Q}_w}{\pi D \mu_w} \quad (1)$$

โดยที่ ρ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)

\dot{Q}_w คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำ (m^3/s)

μ_w คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดเชิงพลวัตของน้ำ (kg/m.s)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ท (m)

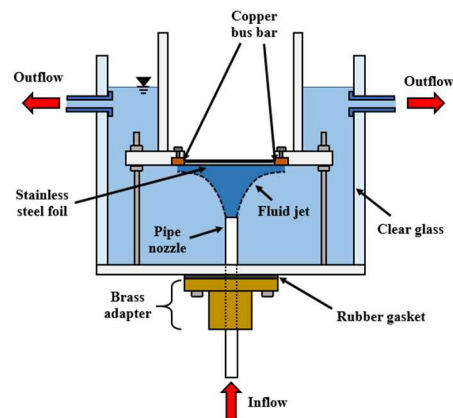
สำหรับสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\beta = \frac{\dot{Q}_a}{\dot{Q}_w + \dot{Q}_a} \quad (2)$$

โดยที่ \dot{Q}_a คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ (Lit/min)

\dot{Q}_w คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำ (Lit/min)

2.2 ชุดทดลอง



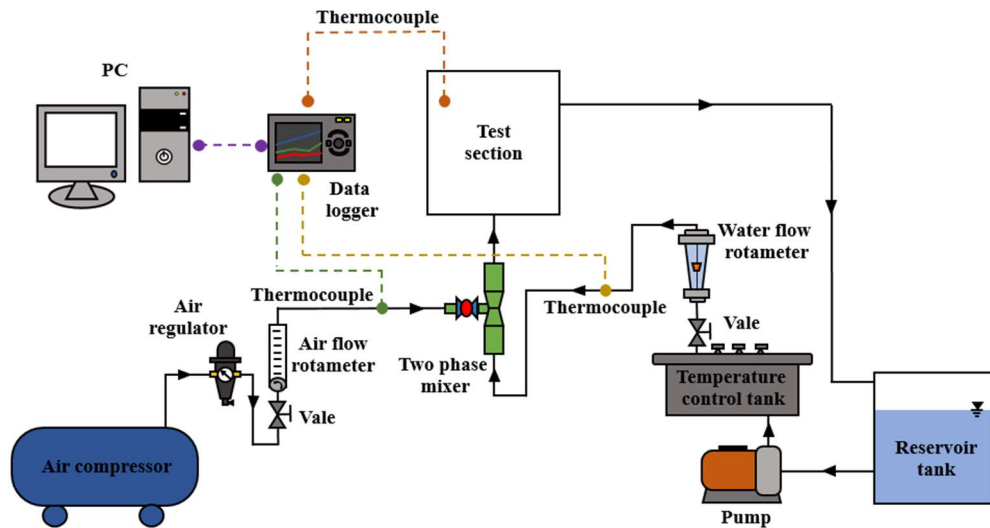
รูปที่ 3 ชุดทดสอบ (Test section)

จากรูปที่ 3 แสดงชุดทดสอบที่ใช้ในการทดลอง โดยของไหลจะเข้าสู่ชุดทดสอบผ่านทางท่อเจ็ท จากนั้นของไหลจะพุ่งออกสู่บริเวณโดยรอบที่มีสภาพแวดล้อมที่เป็นน้ำและเข้าปะทะกับแผ่นสแตนเลส ซึ่งเป็นบริเวณพื้นที่ที่เจ็ทของไหลพุ่งชน มีขนาดความกว้าง ความยาวและความหนาเท่ากับ $100 \times 100 \times 0.03 \text{ mm}$ ตามลำดับ ซึ่งแผ่นสแตนเลสถูกยึดด้วยแท่งทองแดงทั้งสองด้าน บริเวณผิวสแตนเลสด้านหนึ่งถูกพันด้วยลวด

ดำดำนซึ่งสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่เป็นอากาศเพื่อใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชน ด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน

ต่อมารูปที่ 4 แสดงแผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษา โดยเริ่มต้นจากน้ำที่อยู่ในถังน้ำ (Reservoir tank) ซึ่งจะถูควบคุมโดยการลดอุณหภูมิในถัง จากนั้นจะถูกปั้มน้ำสู่อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (Temperature control tank) ซึ่งจะมีควบคุมอุณหภูมิของน้ำให้คงที่ ต่อมาน้ำจะไหลผ่านโรตاميเตอร์น้ำ ซึ่งทำหน้าที่ในการวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำ ในขณะที่เดียวกันอากาศจะถูกปั้มน้ำด้วยปั้ลมเข้าสู่ชุดทำความชื้นและวาล์วปรับความดัน จากนั้นอากาศจะไหลเข้าสู่โรตاميเตอร์อากาศเพื่อทำหน้าที่ในการวัดอัตราการไหลเชิง

ปริมาตรของอากาศ ต่อมาน้ำและอากาศจะไหลเข้าสู่ท่อเวนจูรีเพื่อสร้างของไหลแบบสองสถานะระหว่างน้ำและอากาศ โดยในการทดลองจะมีการวัดอุณหภูมิของน้ำและอากาศก่อนการผสมที่ท่อเวนจูรีด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด PT-100 (± 0.05 °C) และกำหนดอุณหภูมิของน้ำที่ 28.0 ± 0.1 °C และอุณหภูมิของอากาศมีค่าเท่ากับ 25.0 ± 1.0 °C ในการคำนวณสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมอากาศไม่ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของอากาศ [9] เช่น ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดเชิงพลวัตของอากาศและค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ เป็นต้น จากนั้นของไหลที่เป็นน้ำผสมอากาศจะไหลเข้าสู่ชุดทดสอบต่อไป



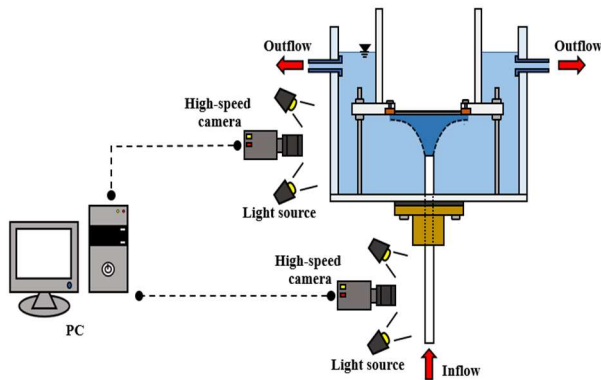
รูปที่ 4 แผนภาพชุดทดลอง

3 วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาพฤติกรรมของการไหลแบบสองสถานะระหว่างน้ำผสมกับอากาศบริเวณภายในท่อเจ็ทและที่ปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชนโดยการบันทึกภาพด้วยกล้องความเร็วสูงและได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทของไหลพุ่งชนโดยการบันทึกภาพจากกล้องถ่ายภาพความร้อน ทั้งนี้ในการศึกษาเพื่อวิเคราะห์ผลของพฤติกรรมของเจ็ทของไหลด้วยน้ำผสมกับอากาศที่มีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อน

3.1 การศึกษาพฤติกรรมการไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมอากาศ

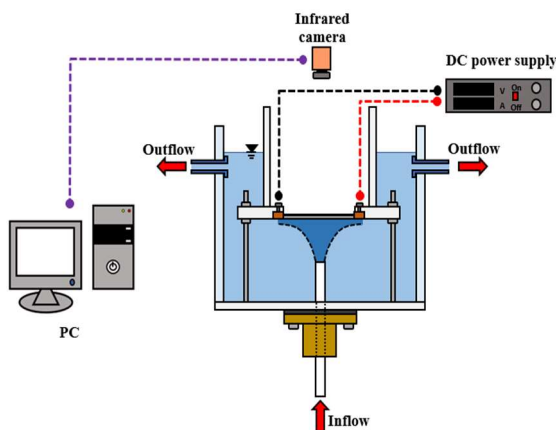
ในการทดลองจะศึกษาที่ค่าเลขเรย์โนลด์ส์ของน้ำมีค่าเท่ากับ 2.4×10^4 และที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมในช่วง 0.1 ถึง 0.7 โดยการบันทึกภาพบริเวณภายในท่อเจ็ท ซึ่งท่อเจ็ทเป็นวัสดุอะคริลิกใสที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 9.5$ mm และมีขนาดความยาวของท่อเท่ากับ 1000 mm เพื่อให้ของไหลพัฒนาการไหลแบบสมบูรณ์ (Fully developed flow) อีกทั้งมีการบันทึกภาพในบริเวณที่ของไหลไหลออกจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวพุ่งชนที่ระยะห่าง $L = 8D$ ซึ่งในการบันทึกภาพจะใช้กล้องความเร็วสูง (High-speed camera) ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ชุดทดสอบสำหรับศึกษาพฤติกรรมการไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมอากาศ

3.2 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว

ในการทดลองจะศึกษาที่ค่าเลขเรย์โนลด์ส์ของน้ำมีค่าเท่ากับ 2.4×10^4 และที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมในช่วง 0.0 ถึง 0.7 ด้วยการบันทึกภาพบนพื้นผิวร้อนที่เจ็ทของไหลพุ่งชน โดยมีแผ่นสแตนเลสที่ถูกยิงด้วยแท่งทองแดงทั้งสองด้านเป็นพื้นผิวที่เจ็ทของไหลเข้าปะทะ ด้านบนแผ่นสแตนเลสจะถูกพันลวดเพื่อใช้ในการถ่ายภาพด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน (Infrared camera) และมีเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply) จ่ายกระแสไฟผ่านแท่งทองแดงให้แก่แผ่นสแตนเลสเพื่อทำให้พื้นผิวร้อน ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ชุดทดสอบสำหรับศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทของไหลพุ่งชน

ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทของไหลพุ่งชนด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน โดยการบันทึกภาพจำนวน 500 รูป ซึ่งแต่ละรูปที่ถ่ายจะเป็นภาพที่แสดงถึงการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวที่ของไหลเจ็ทปะทะ เนื่องจากการศึกษาของไหลเจ็ทที่เป็นน้ำผสมอากาศ โดยพองอากาศจะ

มีการเคลื่อนที่บนพื้นผิวซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ดังนั้นการกระจายอุณหภูมิตั้งพื้นผิวจึงขึ้นอยู่กับเวลาเช่นกัน ต่อมาภาพที่ถ่ายได้จะถูกนำมาคิดอุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวผ่านการวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม MATLAB เพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวหรือค่าเลขนัสเซลต์เฉลี่ยบนพื้นผิว โดยวิธีการคำนวณจะแสดงในสมการที่ 3 ถึง 8

สำหรับค่าฟลักซ์ความร้อนที่จ่ายให้แก่แผ่นสแตนเลส ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

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

โดยที่ I คือ กระแสไฟฟ้า (A)

V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)

A คือ พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนบริเวณที่เจ็ทของไหลพุ่งชนพื้นผิว (m^2)

ในการทดลองแผ่นสแตนเลสที่ถูกทำให้ร้อน จะมีการสูญเสีย ฟลักซ์ความร้อนอันเนื่องมาจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติและการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (4) และ (5) ตามลำดับ

$$\dot{q}_{conv} = h_c(\bar{T}_w - \bar{T}_{surr}) \quad (4)$$

$$\dot{q}_{rad} = \varepsilon\sigma(\bar{T}_w^4 - \bar{T}_{surr}^4) \quad (5)$$

โดยที่ h_c คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ ($W/m^2.K$)

ε คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

σ คือ ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann ($W/m^2.K^2$)

\bar{T}_w คือ อุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทของไหลพุ่งชนขณะมีการจ่ายฟลักซ์ความร้อน ($^{\circ}C$)

\bar{T}_{surr} คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศโดยรอบ ($^{\circ}C$)

สำหรับค่าฟลักซ์ความร้อนสุทธิสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\dot{q}_{net} = \dot{q}_{input} - \dot{q}_{conv} - \dot{q}_{rad} \quad (6)$$

โดยที่ \dot{q}_{input} คือ ฟลักซ์ความร้อนที่ให้แก่แผ่นสแตนเลส (W/m^2)

\dot{q}_{conv} คือ การสูญเสียฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยด้วยการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (W/m^2)

\dot{q}_{rad} คือ การสูญเสียฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยด้วยการแผ่รังสีความร้อน (W/m^2)

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนสามารถคำนวณได้จากสมการ



$$\bar{h} = \frac{\dot{q}_{net}}{(\bar{T}_w - \bar{T}_{aw})} \quad (7)$$

โดยที่ \dot{q}_{net} คือ ฟลักซ์ความร้อนสุทธิ (W/m^2)

\bar{T}_w คือ อุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทของไหลพุ่งชน
ขณะมีการถ่ายฟลักซ์ความร้อน ($^{\circ}C$)

\bar{T}_{aw} คือ อุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทของไหลพุ่งชน
ขณะไม่มีการถ่ายฟลักซ์ความร้อน ($^{\circ}C$)

สำหรับเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยบนพื้นผิวสามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$\bar{Nu} = \frac{\bar{h}D}{k_w} \quad (8)$$

โดยที่ \bar{h} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิว
ที่เจ็ทพุ่งชน ($W/m^2.K$)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจ็ท (m)

k_w คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของน้ำ
($W/m.K$)

4 ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาพฤติกรรมการไหลภายในท่อเจ็ทและไหล จากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชน

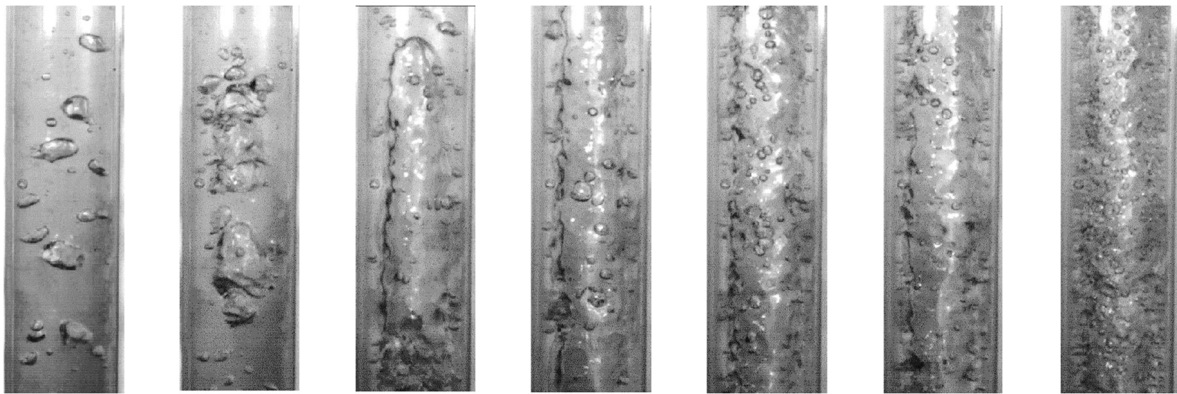
4.1.1 ผลการศึกษาพฤติกรรมการไหลภายในท่อเจ็ท

จากรูปที่ 7 แสดงลักษณะการไหลภายในท่อเจ็ทที่ค่าเลข
เรย์โนลด์ส์ของน้ำมีค่าเท่ากับ 2.4×10^4 และสัดส่วนระหว่าง
อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิง
ปริมาตรรวมในช่วง 0.1 ถึง 0.7 จากผลการศึกษาพบว่า
สามารถแบ่งลักษณะการไหลได้เป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบ
ที่หนึ่งที่ $\beta = 0.1$ พบว่ารูปแบบการไหลเป็นแบบ Bubbly
flow โดยฟองอากาศจะมีลักษณะเป็นก้อนรูปร่างไม่แน่นอน
และกระจายตัวทั่วท่อเจ็ท ขนาดฟองอากาศแต่ละฟองจะมี
ขนาดน้อยกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเจ็ท รูปแบบที่
สองที่ $\beta = 0.2$ และ 0.3 พบว่ารูปแบบการไหลเป็นแบบ

Slug flow เกิดจากปริมาณอากาศที่เพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดการ
รวมตัวกันของฟองอากาศ โดยรูปแบบการไหลจะเห็นได้ว่า
ก้อนฟองอากาศจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ไปด้านบน ทำให้ลักษณะ
ด้านบนของฟองอากาศมีลักษณะมนคล้ายหัวกระสุน และ
รูปแบบที่สามที่ $\beta = 0.4$ ถึง 0.7 พบว่ารูปแบบการไหลเป็น
แบบ Churn flow เกิดจากปริมาณอากาศที่เพิ่มมากขึ้น ทำ
ให้เกิดการรวมตัวกันของ Slug bubbles จากรูปแบบที่สอง
โดยรูปแบบการไหลนั้นจะเห็นได้ว่าปริมาณน้ำจะไหลเป็นชั้น
ฟิล์มรอบท่อเจ็ทและในบริเวณแกนกลางจะเป็นปริมาณ
อากาศโดยส่วนใหญ่

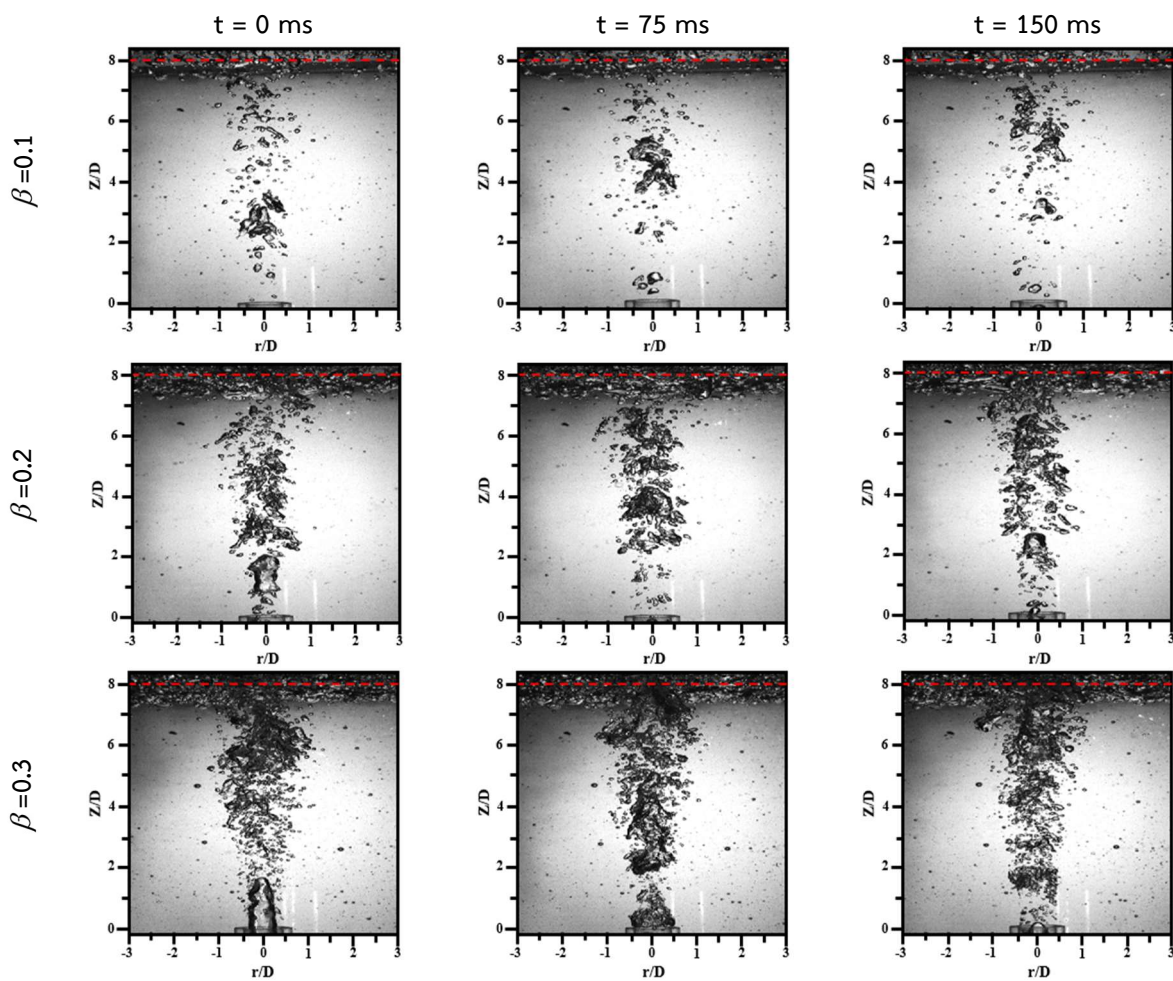
4.1.2 ผลการศึกษาพฤติกรรมการไหลจากปากทางออกของ เจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชน

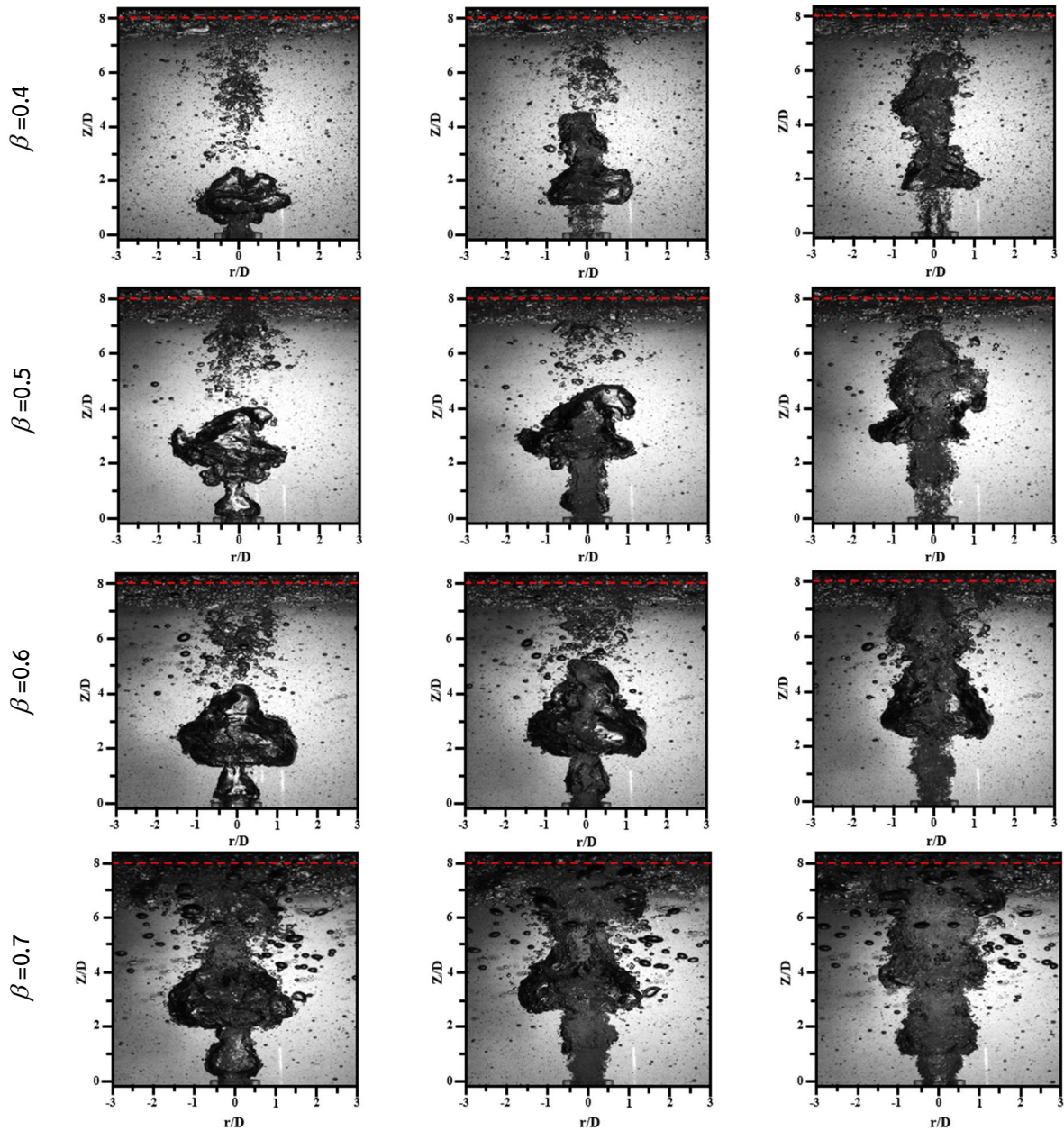
จากรูปที่ 8 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทของไหลขณะ
ออกจากปากทางออกของท่อเจ็ทถึงพื้นผิวปะทะที่ระยะ $L =$
 $8D$ สำหรับค่าเลขเรย์โนลด์ส์ของน้ำมีค่าเท่ากับ 2.4×10^4 ที่
สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตรา
การไหลเชิงปริมาตรรวมในช่วง 0.1 ถึง 0.7 ในช่วงเวลา 0 ถึง
150 มิลลิวินาที จากผลการศึกษาพบว่าสามารถแบ่งลักษณะ
การไหลได้เป็น 4 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบที่หนึ่งที่ $\beta = 0.1$
พบว่าลักษณะฟองอากาศเป็นก้อนรูปร่างมีขนาดเล็กกว่า
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเจ็ทกระจายตัวทั่วลำเจ็ทและ
เข้าพุ่งชนกับพื้นผิว รูปแบบที่สองที่ $\beta = 0.2$ และ 0.3 พบว่า
ฟองอากาศที่มีรูปร่างคล้ายหัวกระสุนในท่อเจ็ทเมื่อออกจาก
ท่อเจ็ท จะเกิดการแตกตัวเป็นฟองขนาดเล็กทั่วลำเจ็ทและเข้า
ปะทะกับพื้นผิว รูปแบบที่สามที่ $\beta = 0.4, 0.5$ และ 0.6
พบว่าฟองอากาศที่ออกจากท่อเจ็ท จะเกิดการรวมตัวกัน
บริเวณใกล้ปากทางออกเป็นก้อนฟองอากาศรูปร่างคล้ายเห็ด
หลังจากนั้นฟองอากาศจะถูกเร่งด้วยของไหลเจ็ทที่เคลื่อนที่
ตามมาทีหลัง และเข้าปะทะกับพื้นผิวต่อไป และรูปแบบที่สี่ที่
 $\beta = 0.7$ พบว่าฟองอากาศที่ออกจากท่อเจ็ทเกิดการรวมตัว
เหมือนในรูปแบบที่สาม แต่ลำเจ็ทโดยส่วนใหญ่จะถูกปกคลุม
ด้วยสถานะอากาศ ทำให้ฟองอากาศของลำเจ็ทมีลักษณะ
ค่อนข้างต่อเนื่องขณะออกจากท่อเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชน



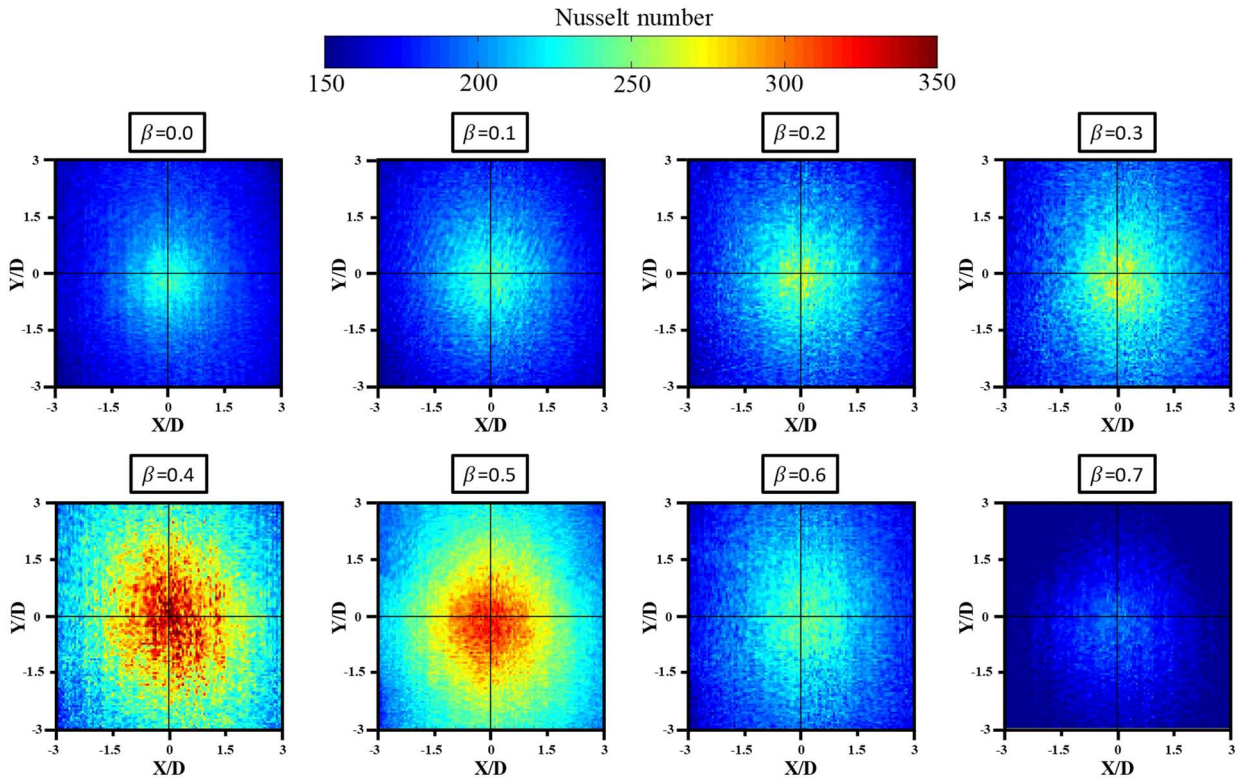
$\beta = 0.1$ $\beta = 0.2$ $\beta = 0.3$ $\beta = 0.4$ $\beta = 0.5$ $\beta = 0.6$ $\beta = 0.7$

รูปที่ 7 ลักษณะการไหลภายในท่อเจ็ทที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม ในช่วง 0.1 ถึง 0.7 สำหรับเลขเรย์โนลด์ส์ของน้ำเท่ากับ 2.4×10^4





รูปที่ 8 ลักษณะการไหลจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวพุงชนที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมในช่วง 0.1 ถึง 0.7 สำหรับเลขเรย์โนลด์ส์ของน้ำเท่ากับ 2.4×10^4 ในช่วงเวลา 0-150 ms



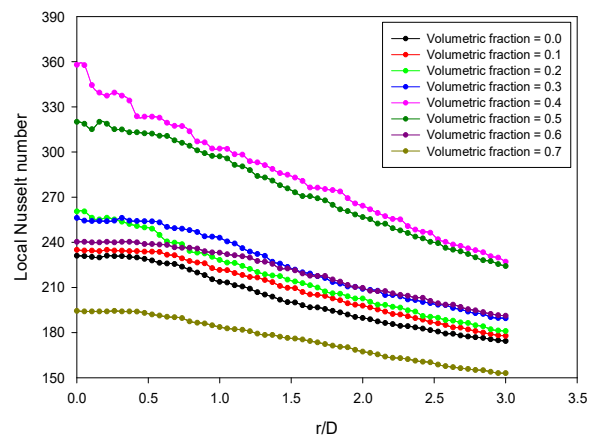
รูปที่ 9 การกระจายเลขนัสเซลต์บนพื้นผิวที่พุ่งชนที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมในช่วง 0.0 ถึง 0.7 สำหรับเลขเรย์โนลด์ส์ของน้ำเท่ากับ 2.4×10^4

4.2 ผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทของไหลพุ่งชนพื้นผิว

จากรูปที่ 9 แสดงการกระจายเลขนัสเซลต์บนพื้นผิวพุ่งชนที่ $-3D \leq X, Y \leq 3D$ สำหรับสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมในช่วง 0.0 ถึง 0.7 พบว่ากรณีที่มี $\beta = 0.1$ และ 0.6 มีค่าการกระจายเลขนัสเซลต์เฉพาะจุดบนพื้นผิวสูงกว่ากรณีที่มี $\beta = 0.0$ ซึ่งแสดงถึงการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทของไหลน้ำผสมกับอากาศเมื่อเทียบเจ็ทของไหลที่เป็นน้ำ และกรณีที่มี $\beta = 0.7$ ค่าการกระจายเลขนัสเซลต์เฉพาะจุดบนพื้นผิวต่ำกว่ากรณีที่มี $\beta = 0.0$ ซึ่งแสดงถึงการลดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทของไหลน้ำผสมกับอากาศเมื่อเทียบกับเจ็ทของไหลที่เป็นน้ำ

จากรูปที่ 10 แสดงโปรไฟล์เลขนัสเซลต์เฉพาะจุดบนพื้นผิวในแนวรัศมีของท่อเจ็ทในช่วง $0 \leq r/D \leq 3$ สำหรับสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมในช่วง 0.0 ถึง 0.7 ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่ากรณีที่มี $\beta = 0.1$ ถึง 0.6 จะมีแนวโน้มค่าเลขนัสเซลต์เฉพาะจุดตามแนวรัศมีสูงกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่มี $\beta =$

0.0 แต่ในกรณีที่ $\beta = 0.7$ มีแนวโน้มค่าเลขนัสเซลต์เฉพาะจุดตามแนวรัศมีต่ำกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่มี $\beta = 0.0$



รูปที่ 10 โปรไฟล์เลขนัสเซลต์เฉพาะจุดที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมในช่วง 0.0 ถึง 0.7 บนพื้นผิวในแนวรัศมีของท่อเจ็ท



จากรูปที่ 10 แสดงโปรไฟล์เลขคณิตเฉพาะจุดบนพื้นผิวในแนวรัศมีของท่อเจ็ทในช่วง $0 \leq r/D \leq 3$ สำหรับสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมในช่วง 0.0 ถึง 0.7 ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่ากรณีที่มี $\beta = 0.1$ ถึง 0.6 จะมีแนวโน้มค่าเลขคณิตเฉพาะจุดตามแนวรัศมีสูงกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่มี $\beta = 0.0$ แต่ในกรณีที่มี $\beta = 0.7$ มีแนวโน้มค่าเลขคณิตเฉพาะจุดตามแนวรัศมีต่ำกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่มี $\beta = 0.0$

จากผลการศึกษาด้านการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนของไหลที่เป็นน้ำผสมกับอากาศ เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยเลขคณิตบนพื้นผิวในช่วง $-3D \leq X, Y \leq 3D$ ของการไหลที่เป็นน้ำผสมกับอากาศเทียบกับของไหลที่เป็นน้ำพบว่าในกรณีที่มี $\beta = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ และ 0.6 มีค่าเฉลี่ยเลขคณิตบนพื้นผิวเพิ่มขึ้นเป็น 3.77%, 8.81%, 9.53%, 40.42%, 36.88% และ 8.08% ตามลำดับ เนื่องจากลักษณะการไหลของน้ำผสมพองอากาศในช่วงนี้ ปริมาณพองอากาศมีผลต่อการเพิ่มระดับความปั่นในการไหลของลำเจ็ทและสามารถทำลายชั้นขอบเขตความร้อนได้ จึงนำไปสู่การเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อน แต่ในกรณีที่มี $\beta = 0.7$ พบว่าค่าเฉลี่ยเลขคณิตบนพื้นผิวลดลง 11.90% เนื่องจากการไหลของลำเจ็ทอยู่ในสถานะของอากาศโดยส่วนใหญ่หรือลักษณะของพองอากาศที่ค่อนข้างต่อเนื่องขณะออกจากท่อเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชน ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ลดความสามารถในการถ่ายเทความร้อน ถึงแม้ว่าจะมีการเพิ่มระดับความปั่นป่วนในการไหลของลำเจ็ท

5 สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมกับอากาศ โดยในงานวิจัยนี้สามารถกล่าวสรุปได้เป็น 3 ข้อหลัก

(1) พฤติกรรมการไหลในท่อเจ็ท สามารถแบ่งรูปแบบการไหลได้ 3 รูปแบบ ได้แก่ กรณีที่มี $\beta = 0.1$ เรียกรูปแบบการไหลว่า Bubbly flow, กรณีที่มี $\beta = 0.2$ และ 0.3 เรียกรูปแบบการไหลว่า Slug flow และกรณีที่มี $\beta = 0.4$ ถึง 0.7 เรียกรูปแบบการไหลว่า Churn flow

(2) พฤติกรรมการไหลที่ปากทางออกท่อเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชน สามารถแบ่งรูปแบบการไหลได้ 4 กรณี ได้แก่ กรณีที่หนึ่งที่มี $\beta = 0.1$ มีลักษณะเป็นก้อนพองอากาศขนาดเล็กกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเจ็ทกระจายตัวทั่วลำเจ็ท กรณีที่สองที่มี $\beta = 0.2$ และ 0.3 พองอากาศมีลักษณะคล้ายหัวกระสุนขณะออกจากท่อเจ็ทและเกิดการแตกตัวเป็นก้อน

พองอากาศขนาดเล็กเข้าปะทะพื้นผิว กรณีที่สามที่มี $\beta = 0.4, 0.5$ และ 0.6 พองอากาศมีลักษณะคล้ายเม็ดขณะออกจากท่อเจ็ทและเคลื่อนที่เข้าปะทะพื้นผิว และกรณีที่มี $\beta = 0.7$ พองอากาศมีลักษณะค่อนข้างต่อเนื่องกันจากปากทางออกของท่อเจ็ทถึงพื้นผิวที่ปะทะ

(3) การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนของไหลที่เป็นน้ำผสมกับอากาศ สามารถแบ่งได้ 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่หนึ่งที่มี $\beta = 0.1, 0.2, 0.3,$ และ 0.4 มีค่าเฉลี่ยเลขคณิตบนพื้นผิวเพิ่มขึ้นเป็น 3.77%, 8.81%, 9.53% และ 40.42% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีที่มี $\beta = 0.0$ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงปริมาณอากาศที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อน แต่ในกรณีที่สองที่มี $\beta = 0.5, 0.6,$ และ 0.7 มีค่าเฉลี่ยเลขคณิตบนพื้นผิวเพิ่มขึ้นเป็น 36.88% และ 8.08% และมีค่าเฉลี่ยเลขคณิตบนพื้นผิวลดลง 11.90% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีที่มี $\beta = 0.0$ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงปริมาณอากาศที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการลดความสามารถในการถ่ายเทความร้อน โดยเฉพาะในกรณีของ $\beta = 0.7$ ที่ลำเจ็ทเปรียบเสมือนของไหลที่เป็นสถานะอากาศ เป็นผลให้ประสิทธิภาพในการระบายความร้อนน้อยกว่ากรณีที่มี $\beta = 0.0$ หรือของไหลที่เป็นน้ำ

6 กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัยครั้งนี้

7 เอกสารอ้างอิง

- [1] Lasance, C. (2005). Advances in High-Performance Cooling for Electronics, URL: <https://www.electroniccooling.com/2005/11/advances-in-high-performance-cooling-for-electronics/>, accessed on 1/04/2020.
- [2] Naphon, P., and Wongwises, S. (2010). Investigation on the jet liquid impingement heat transfer for the central processing unit of personal computers, International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 37, June 2010, pp. 822 – 826.
- [3] Lv, J., Hu, C., Bai, M., Zeng, K., Chang, S., and Gao, D. (2017). Experimental investigation of free single jet impingement using SiO₂-water nanofluid,



Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 84, September 2017, pp. 39 – 46.

[4] Nakharintr, L., Naphon, P., and Wiriyasart, S. (2018). Effect of jet-plate spacing to jet diameter ratios on nanofluids heat transfer in a mini-channel heat sink, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 116, January 2018, pp. 352 – 361.

[5] Barewar, S.D., Tawri, S., and Chougule, S.S. (2019). Heat transfer characteristics of free nanofluid impinging jet on flat surface with different jet to plate distance: An experimental investigation, *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, vol. 136, December 2018, pp. 1 – 10.

[6] Sun, B., Qu, Y., and Yang, D. (2016). Heat transfer of single impinging jet with Cu nanofluids, *Applied Thermal Engineering*, vol. 102, April 2016, pp. 701 – 707.

[7] Lv, J., Chang, S., Hu, C., Bai, M., Wang, P., and Zeng, K. (2017). Experimental investigation of free single jet impingement using Al₂O₃-water nanofluid,

International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 88, September 2017, pp. 126 – 135.

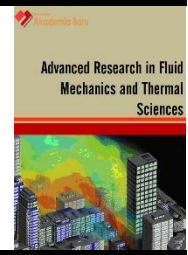
[8] Choo, K., and Kim, S.J. (2010). Heat transfer and fluid flow characteristics of two-phase impinging jets, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, December 2010, pp. 5692 – 5699.

[9] Trainer, D., Kim, J., and Kim, S.J. (2013). Heat transfer and flow characteristics of air-assisted impinging water jets, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 64, May 2013, pp. 501 – 513.

[10] Friedrich, B.K., Ford, T.D., Glaspell, A.W., and Choo, K. (2017). Experimental study of the hydrodynamic and heat transfer of air-assisted circular water jet impinging a flat circular disk, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 106, March 2017, pp. 804 – 809.

[11] Faghri, A., and Zhang, Y. (2006). 11-TWO-PHASE FLOW AND HEAT TRANSFER, *Transport Phenomena in Multiphase Systems*, May 2006, pp.853-949.

ภาคผนวก จ บทความสำหรับเผยแพร่ 3
Flow and Heat Transfer Characteristics of Impinging Bubbly Jet



Flow and Heat Transfer Characteristics of Impinging Bubbly Jet

Open
Access

Chattawat Aroonrujiphan¹, Chayut Nuntadusit^{1,*}

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received 20 December 2019

Received in revised form 30 April 2020

Accepted 7 May 2020

Available online 15 August 2020

The effect of adding air into water jet flow for heat transfer enhancement was investigated for submerged impinging jet. The Reynolds number of water jet was fixed at $Re_L = 2.4 \times 10^4$, the nozzle to impingement surface distance was also fixed at $L = 2D$, and the volumetric fraction was varied from $\beta = 0.0$ to 0.7 . The heat transfer measurement was studied using an infrared thermal imaging camera. The flow behavior of bubbly jet was observed by a high-speed camera. The result showed that the heat transfer of the bubbly jet for all cases were higher than the water jet case. The average Nusselt number on surface was continuously increased for increasing volumetric fraction $\beta = 0.0$ to 0.2 . It was found that the volumetric fraction at $\beta = 0.2$ gave the maximum heat transfer enhancement about 33% compared to case of water jet. But the increase of volumetric fraction in range $\beta = 0.2$ to 0.7 decreased the average Nusselt number.

Keywords:

Submerged impinging jet; Bubbly jet;

Volumetric fraction; Heat transfer

enhancement

Copyright © 2020 PENERBIT AKADEMIA BARU - All rights reserved

1. Introduction

Jet impingement is widely used in cooling system about thermal equipment or industrial process that operate high temperature because it has high cooling capability in impingement region [1] and it is a rapid cooling system [2]. For example, it has been used for microelectronic components that are operated on extreme temperature condition [3-5], and quenching of steel plates during the manufacturing process that needs to control temperature on materials [6-8]. In the field of electronic cooling, air impinging has been contributed to high heat flux device. Umair *et al.*, [9] studied the effect of pulsating impinging jet on pin fin surface for heat transfer enhancement. They proposed the correlation for predicting heat transfer from pin fin surface to pulsing jet. Siddique *et al.*, [10] also investigated for air impinging jet with consideration to the effect of wall thickness. The uniformity of Nusselt number distribution was studied for different wall target thickness. It was found that

* Corresponding author.

E-mail address: chayut.n@psu.ac.th

impinging air jet cooling becomes more uniform when increasing the target thickness. Due to the development of high heat flux in electronic devices, several researchers have investigated the heat transfer of impinging jet with liquid phase because it can enhance heat transfer rates larger than air or gas phase.

Liquid jet impingement is continuously investigated for heat transfer process due to the high performance of cooling. Commonly, the liquid impinging jet can be divided into 2 types: Free-surface jet and submerged jet as shown in Figure 1 which have a different flow structure. The free-surface impinging jet develops from free jet region to decaying jet region which has no effect shearing between jet flow and surrounding fluid. It causes the velocity of jet flow has almost uniform along a radial direction. The submerged impinging jet develops from free jet region to decaying jet region which has the shearing effect between jet flow and surrounding fluid. It appears shear layer around the jet flow. Therefore, the fluid around the jet flow is accelerated by momentum transfer to surrounding affects to increase mass flow in the jet [11]. Both types of jet flow have impingement region and wall jet region characteristics when its impact on the surface. The free-surface impinging jet is revealed about a phenomenon that is called hydraulic jump, which cannot be found for the submerged impinging. In the past, many researchers have observed for heat transfer characteristics of liquid jet impingement. The important parameters consist of nozzle-to-impingement surface distance (L), Reynolds number (Re), and Prandtl number (Pr). Lv *et al.*, [12] studied heat transfer characteristics of free-surface impinging jet that the effect on impingement distance (L/D) varied from 2 to 5 and Reynolds number in range of 8,000-13,000. The result showed that the maximum heat transfer coefficient was found at $L/D = 4$. Nakharintr *et al.*, [13] studied the effect of jet diameter on heat transfer characteristics for impinging jet in a mini-channel heat sink. They showed that the average Nusselt number decreased as the jet diameter decreased because the smaller jet diameter had a smaller stagnation region, which was an important area to high cooling rate on the impingement surface. Sun *et al.*, [14] studied the convection heat transfer rate for submerged impinging jet. The Reynolds number of water jet was varied from 5,000 to 36,000, and jet impingement distance was also varied from 1 to 20 of jet diameter. The result showed that the Nusselt number at stagnation point increased when the Reynolds number of water jet increased. Womac *et al.*, [15] developed the correlation equations for heat transfer of free-surface and submerged liquid impinging jet. Water and fluorocarbon liquid (FC-77) were used for working fluids in both of impinging jet system. They showed that the average Nusselt number on surface for fluorocarbon liquid jet was higher than the water jet.

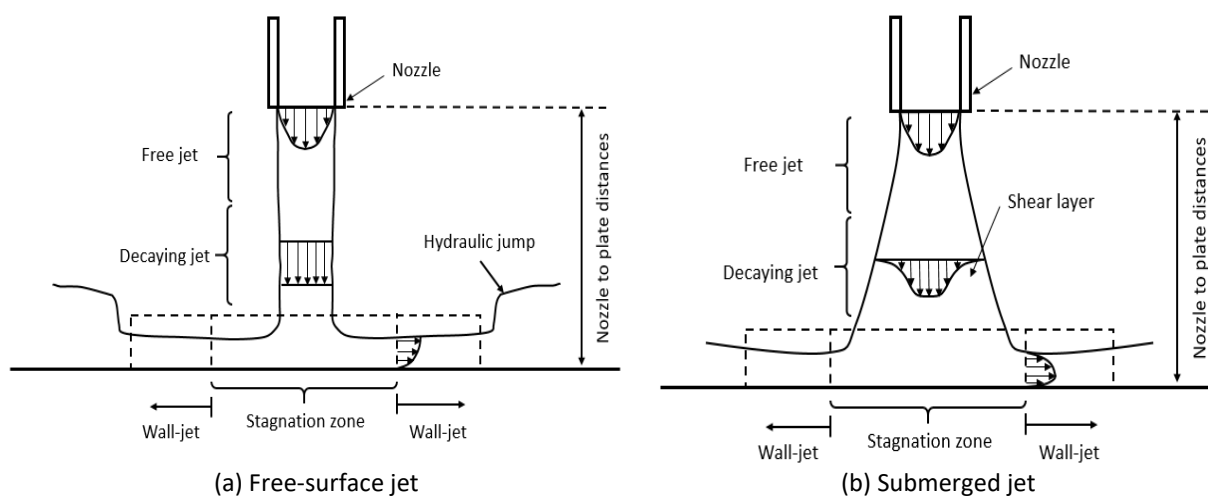


Fig. 1. Structure of jet impingement

Improvement of jet impingement cooling system is still important for high heat flux application. Two-phase jet impingement has been investigated recently to enhance heat transfer on the surface which is improved than single-phase jet impingement. For example, nanofluid is widely used for working fluid in impinging jet system. It is a mixture that is between the solid-phase and the liquid-phase and it contributes to increasing the thermal conductivity of jet flow. Naphon *et al.*, [16] investigated the heat transfer of impinging jet for TiO₂ nanofluids in micro-channel heat sink. The result showed that the convective heat transfer increased by 18.56% at 0.015% of volume concentration nanofluid. It could decrease the average temperature of micro-channel heat sink that was by 3.00% for 0.4% of nanofluids concentration when compared with single-phase liquid jet impingement [17]. Barewar *et al.*, [18] studied the heat transfer characteristics of impinging jet for ZnO-water nanofluid. Reynolds number of jet was varied from 2,192 to 9,241 and the impingement distance was varied from 2 to 7.5 of jet diameter. The concentration of nanofluid was also varied 0.02%, 0.04%, 0.06%, and 0.10% by volume. The experimental result showed that the maximum value of heat transfer coefficient increased by 51%, 41.7%, 32.9%, and 14.1% for the concentration at 0.02%, 0.04%, 0.06%, and 0.10%, respectively. Sun *et al.*, [19] studied the effect of cooling performance of Cu-water nanofluid jet impingement, the volume concentration nanofluid was varied between from 0.1% to 0.5%. The result showed that the convective heat transfer increased by using Cu-water nanofluids jet for all the volume concentration. Lv *et al.*, [20] studied the heat transfer characteristics of nanofluids impinging jet by using Al₂O₃-water. The experimental result showed that the convective heat transfer of Al₂O₃-water nanofluids jet increased by 1.17 to 1.64 times of using water jet for the volume concentration nanofluid was varied between 0.5% to 2%. Although the application of nanofluids contributes to enhancing heat transfer significantly. The main problem may produce the deposition of nanoparticles on impingement plate, which leads to a decrease in heat transfer rate [19].

Instead of applying nanofluid, few researchers have investigated the effect of adding air bubbles into water jet impingement for heat transfer enhancement. Because the jet flow is disturbed by the bubbles that lead to increase turbulence intensity on the impinging jet and some bubbles can disturb the thermal boundary layer on the impingement surface. Choo and Kim [21] studied the effect of adding air bubbles on heat transfer and flow characteristics of free-surface jet impingement for fixed pumping power condition. The volumetric fraction of air was varied from $0 \leq \beta \leq 0.9$. The results showed that the maximum value of Nusselt number was found for volumetric fraction at around $\beta = 0.2-0.3$ which the flow in pipe nozzle was bubbly flow regime. Trainer *et al.*, [22] studied the heat transfer characteristic of air assistant water for free-surface jet impingement. The Reynolds number of water was between $7,500 \leq Re_L \leq 15,000$ and Reynolds number of air was between $0 \leq Re_G \leq 5,900$. The results showed that the local Nusselt number at stagnation point increased 2.6 times when compared with the liquid phase only. Friedrich *et al.*, [23] studied the effect of volumetric fraction increment for heat transfer characteristics of air assistant water jet impingement. The results showed that volumetric fraction in range of $\beta = 0.1-0.8$ can increase Nusselt number at stagnation point. But the Nusselt number decrease around $\beta = 0.8-0.9$ due to the jet flow is largely in the phase of air. Kneer *et al.*, [24] compared the heat transfer rate for submerged and free-surface impinging jets. The result showed that the heat transfer coefficient for submerged jet was higher than the case of free-surface jet. However, the study was limited to a water impinging jet with no air addition.

The purpose of study is to investigate the effect of adding air on flow and heat transfer characteristics of submerged impinging jet. The Reynolds number of water (Re_L) was fixed at 2.4×10^4 and the impingement distance was also fixed at $L = 2D$. The volumetric fraction of air was varied at $\beta = 0.0-0.7$. The heat transfer on cooling surface was evaluated using a thermal infrared camera. The flow structure of bubbly jet was also recorded with a high-speed camera.

2. Methodology

2.1 Experimental Setup

The experimental model for submerged impinging jet is shown in Figure 2. The jet flow which ejected from the pipe nozzle impinged to the flat surface that had constant heat flux for cooling. The pipe nozzle has an inner diameter at $D = 9.5$ mm and 1,000 mm for length that was ensured fully developed flow at nozzle exit. In this experiment, the distance between nozzle to impingement surface was fixed at $L = 2D$.

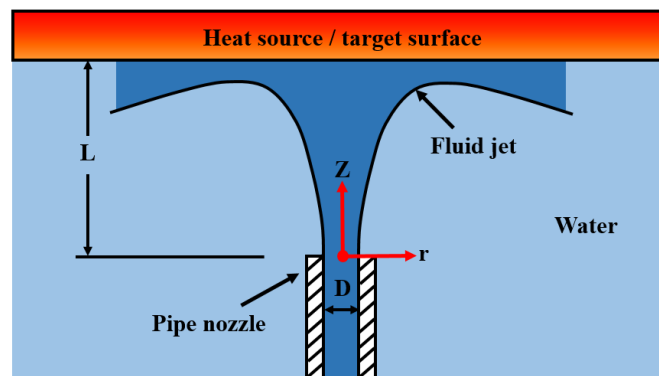


Fig. 2. Impinging jet model for experiment

The diagram of experiment setup is shown in Figure 3. The water was pumped from the reservoir tank by centrifugal pump. And then the water flowed through the temperature control tank to control the water temperature. In the meantime, the air was supplied by air compressor. The flow of water and air were controlled with rotameters. A venturi tube was used as a two-phase mixer between air and water. The temperature of air and water were measured by thermocouples before entering the venturi tube. And then the air mixed water jet flow through the pipe nozzle to the test section. The overflow from test section was connected to the reservoir tank. The water in reservoir tank was cooled with cool water flow via cooling coil. The water temperature including room temperature were also monitored through thermocouples. The temperatures via thermocouples were recorded with data logger during the experiment.

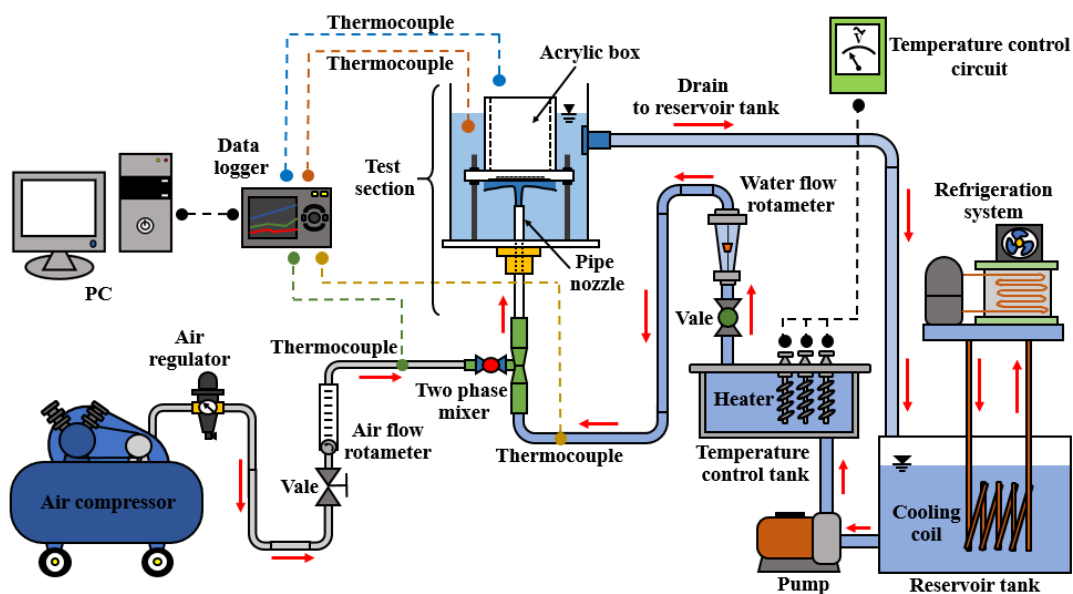


Fig. 3. Schematic diagram of experiment setup

Figure 4 shows the detail of test section. The test section consists of water tank, pipe nozzle, and impingement plate. The water tank was made of the clear glass plate for sidewall and acrylic plate for the bottom wall. The size of the tank is 30 cm x 30 cm and 30 cm for height. There are 4 overflow outlets on each sidewall. The pipe nozzle was made of clear acrylic pipe and inserted from the bottom wall of the tank and fixed with a nozzle adapter. The impingement surface was made of stainless foil SUS304 (100 mm x 100 mm and 0.03 mm in thickness) attached on the acrylic plate window with two copper bus bars as shown in Figure 4. Acrylic box was set on the backside of impingement plate for temperature measurement on the rear side of stainless foil using a thermal infrared camera.

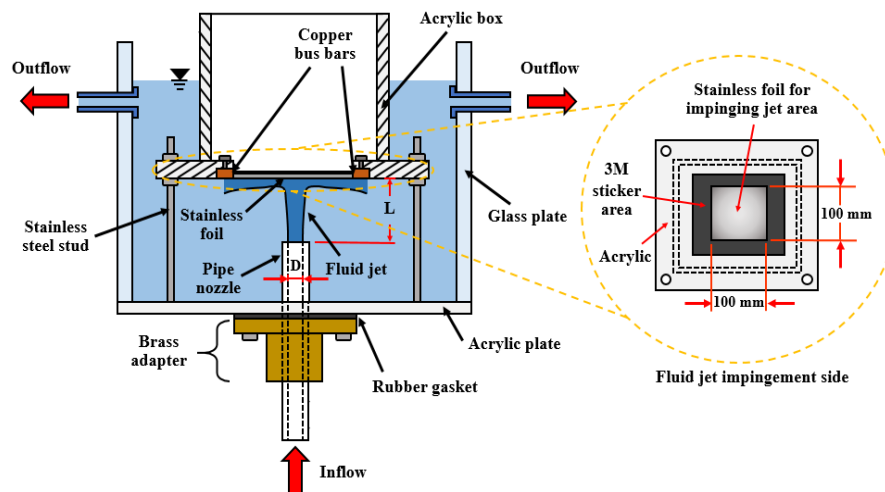


Fig. 4. Detail of test section

2.2 Experimental Conditions and Parameters

Experimental parameters are shown in Table 1. The temperature of water flow rate was controlled at 28 ± 0.1 °C, before it was mixed with the air flow rate. The room temperature was controlled at 25 ± 0.5 °C. The temperature of air flow was same as water.

Table 1

Experimental parameters

Parameters and symbol	Values
Reynolds number of water, Re_L	2.4×10^4
Volumetric fraction, β	$0.0 \leq \beta \leq 0.7$
Diameter of jet, D	9.5 mm
Nozzle to impingement plate distance, L	$2D$

In this study, the flow rate of water jet was fixed at 9 LPM which is corresponded to Reynolds number at 2.4×10^4 . The Reynolds number is calculated from Eq. (1).

$$Re_L = \frac{\rho_L V D}{\mu_L} \tag{1}$$

where, μ_L is the dynamic viscosity of water. ρ_L is density of water. V is the average velocity for water jet. The flow rate of air was varied and correspond to the volumetric fraction as shown in Table 2. And it is calculated from Eq. (2).

$$\beta = \frac{Q_G}{Q_L + Q_G} \quad (2)$$

where the water flow rate, Q_L was taken as 9 LPM and the air flow rate, Q_G were taken as 0 to 21 LPM. Volumetric fraction was varied from 0.0 to 0.7 by increments of 0.1. This parameter was important for two-phase flow that affect to flow regime of jet flow.

Table 2
 The volumetric fraction of jet flow

β	Q_L (LPM)	Q_G (LPM)
0.0	9	0
0.1	9	1
0.2	9	2.25
0.3	9	3.86
0.4	9	6
0.5	9	9
0.6	9	13.5
0.7	9	21

2.3 Flow Visualization and Heat Transfer Measurement

Experimental setup for flow visualization is shown in Figure 5. the pipe nozzle and water tank wall were made of a clear material. The high-speed camera was used to record the water-air flow in pipe nozzle and water-air jet flow from nozzle to impingement plate.

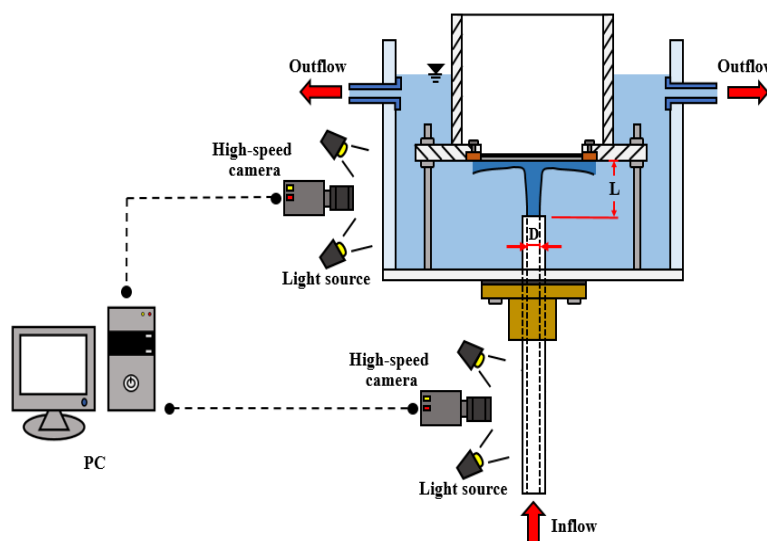


Fig. 5. Experimental setup for flow visualization

Experimental setup for heat transfer measurement is shown in Figure 6. The infrared thermal imaging camera was used to measured temperature distribution on the rear side of the stainless foil. The measured surface was painted with black spray had emissivity at 0.95. The stainless foil was then heated by constant heat flux condition with electrical current from DC power supply via the copper bus bars. The heat was generated by resistance of stainless foil with Joule effect. The digital power meter was used to measure voltage drop and current through the copper bus bars.

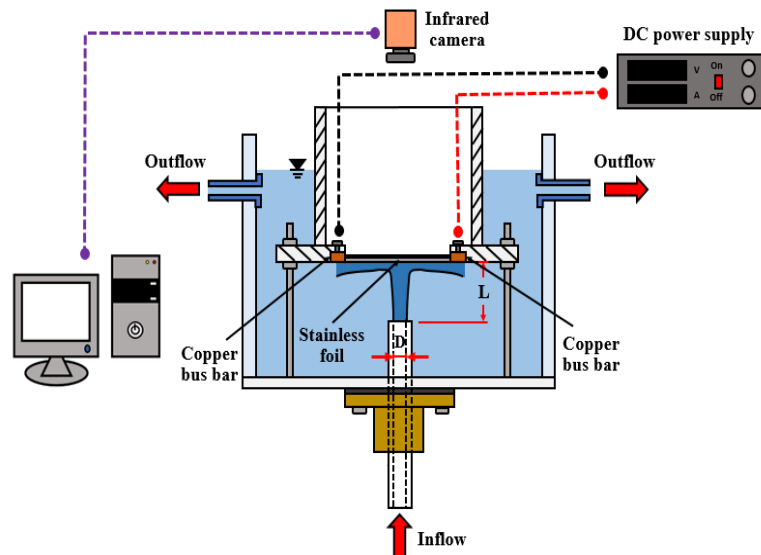


Fig. 6. Experimental setup for study of heat transfer measurement

For heat transfer calculation, input heat flux to stainless surface was

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

The heat loss due to radiation and natural convection from rear side of the stainless foil to surrounding were

$$\dot{q}_{rad} = \sigma \varepsilon (\bar{T}_w^4 - \bar{T}_{sur}^4) \quad (4)$$

$$\dot{q}_{conv} = h_c (\bar{T}_w - \bar{T}_{sur}) \quad (5)$$

And the net heat flux from the impingement surface to the jet flow was

$$\dot{q}_{net} = \dot{q}_{input} - \dot{q}_{rad} - \dot{q}_{conv} \quad (6)$$

The heat transfer coefficient was calculated with

$$h = \frac{\dot{q}_{net}}{(\bar{T}_w - \bar{T}_{aw})} \quad (7)$$

where I , V and A were current, voltage of electric power and area of heat transfer surface, respectively. σ was the Stefan-Boltzmann constant ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$). ε was the emissivity of black surface (0.95). \bar{T}_w was the time average temperature on a surface with heat flux and \bar{T}_{aw} was the time average temperature on a surface without heat flux. These values were averaged from 500 images taken from the infrared camera every 1 image/second. This is due to the impingement of bubbles in water jet flow affect to change of the temperature on the surface. \bar{T}_{sur} was the average room temperature during the experiment which was recorded by the data logger and h_c was the heat transfer coefficient for natural convection for heated horizontal plate.

Finally, the Nusselt number was calculated from

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (8)$$

where k was the conductivity of the water.

3. Results

3.1 The Flow Visualization for In Pipe Nozzle and Impinging Jet

Figure 7 shows the flow visualization results in the middle part of pipe nozzle at different volumetric fractions. The high-speed camera was used to capture at 6400 fps. However, the instantaneous flow pattern was shown in Figure 7. The air bubbles increase according to the increase of the volumetric fractions. The results of flow patterns in pipe were divided into 3 cases. For case of $\beta = 0.1$, it was in bubbly flow regime which having some small air bubbles distributed in flow pipe. For case of $0.2 \leq \beta \leq 0.3$, it was slug flow regime that the small air bubbles merge to larger a bubble and the shape of air bubble like the bullet shape. For case of $0.4 \leq \beta \leq 0.7$, it was in annular flow regime that the slug bubbles merge together and the middle area of pipe was mostly covered by gas phase. the liquid phase with small air bubbles was on the pipe wall.

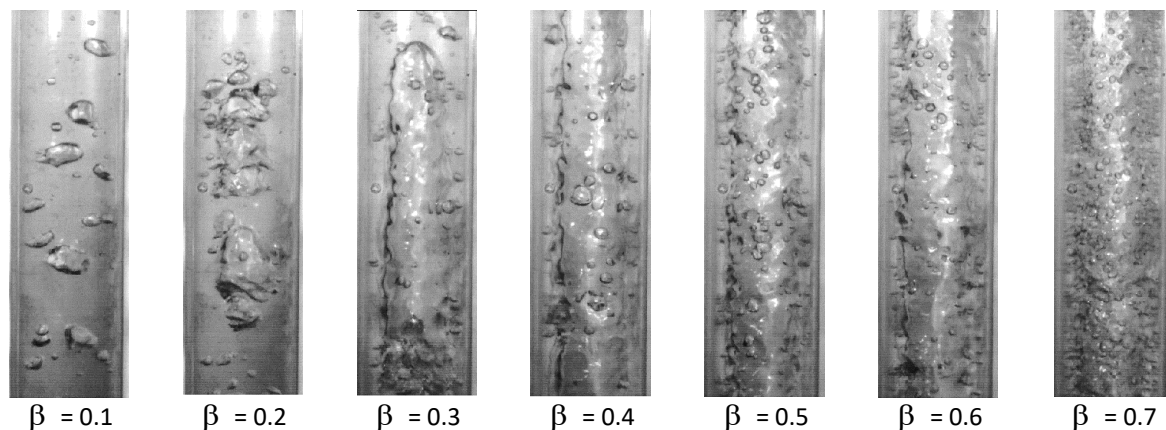


Fig. 7. Flow visualization in pipe nozzle at different volumetric fractions

Figure 8 shows the flow visualization of impinging jet for different volumetric fractions. Each case shows the instantaneous flow at 3 timings: t , $t+75$ ms and $t+150$ ms. Results of flow patterns of impinging jet can be divided into 4 patterns. For case of $\beta = 0.1$, the jet flow was similar to the bubbly regime in pipe nozzle and impinged on the impingement surface.

For case of $\beta = 0.2$ and 0.3 , the bubble in jet flow was like bullet shape. The air bubble interacted with the surrounding of water and the cloud of bubbles changed to mushroom shape. This cloud of bubbles impinged on the surface cover a large area in impingement region. This can promote the heat transfer than case of $\beta = 0.1$.

For case of $\beta = 0.4$ and 0.5 , the bubble cloud appears near the pipe nozzle and moved to impinge on the surface. The mushroom shape of the bubble cloud becomes larger with the increase of volumetric fraction. The cloud of bubble covers a large area on impingement surface. This trend is the same for case of $\beta = 0.6$ and 0.7 . However, the bubble cloud expands from the nozzle exit to the impingement surface.

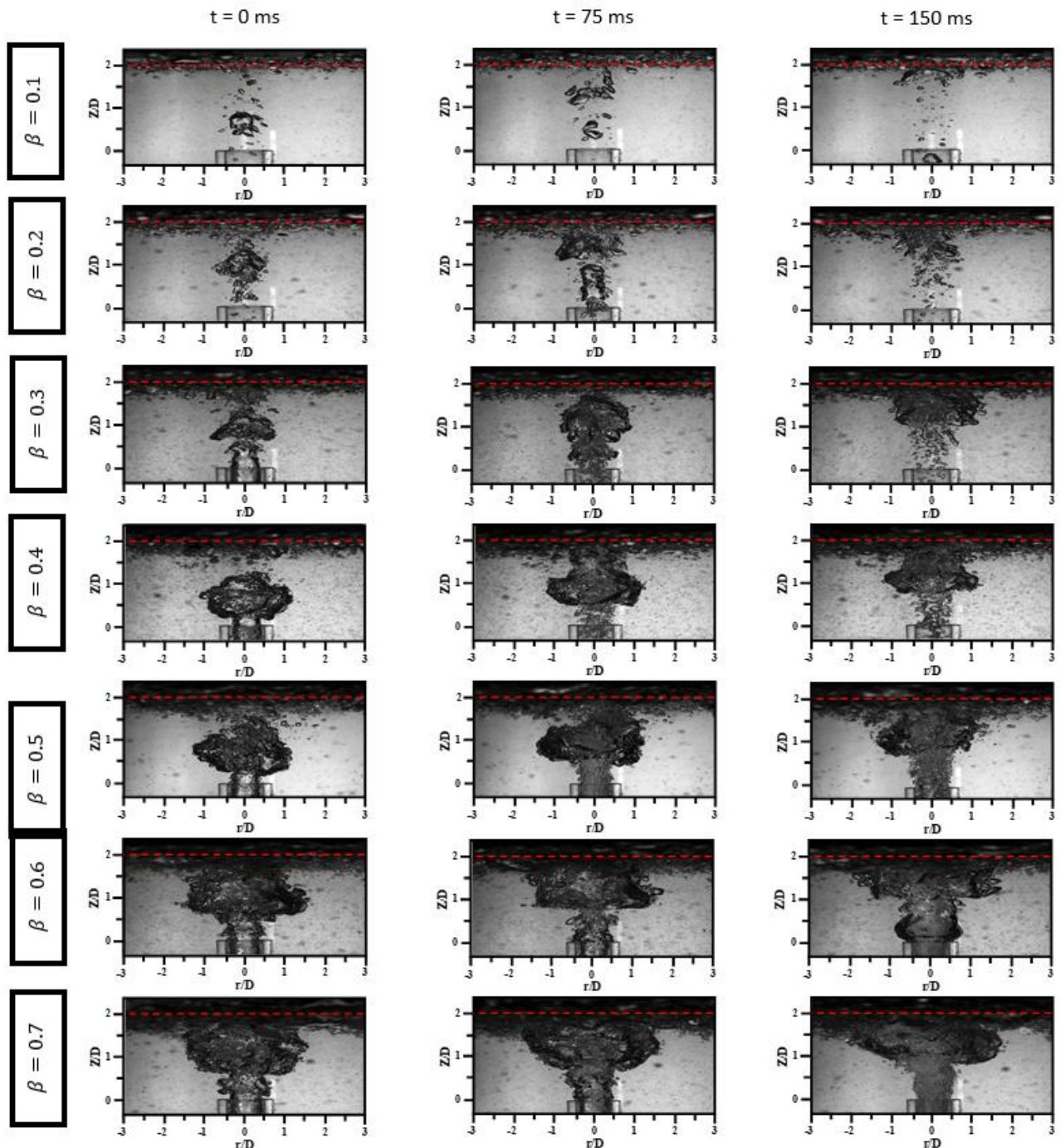


Fig. 8. Flow visualization of impinging jet at different volumetric fractions

3.2 Heat Transfer Characteristics

Figure 9 shows the contour of time-average Nusselt number distribution. The volumetric fractions were varied from 0.0 to 0.7 at nozzle to impingement plate distances of $L = 2D$ and Reynolds number of water of $Re_L = 2.4 \times 10^4$. For case of $\beta = 0.0$, the local Nusselt number is lowest when compared to the other cases. When adding the airflow into the water jet flow, the local Nusselt number in impingement region and wall jet region increase significantly. Particularly, the case of $\beta = 0.2$ gives the maximum Nusselt number in impingement region. This is due to the mushroom shape of cloud bubbles impinged on the surface. And the air bubbles disturb the thermal boundary on impingement

surface. However, the Nusselt number tends to decrease when the increase of volumetric fraction is more than 0.2. This is due to the large cloud bubbles impact the surface.

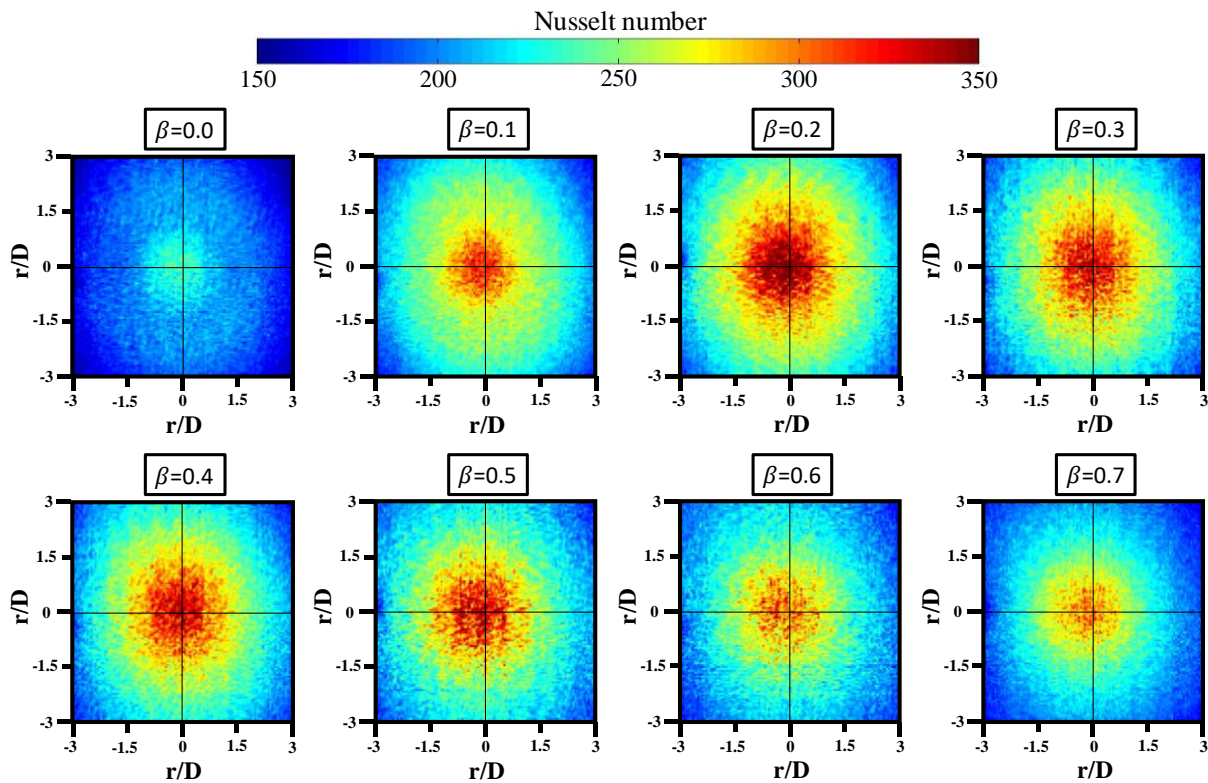


Fig. 9. Contour of time-average Nusselt number distribution at different volumetric fractions for $L = 2D$ and $Re_L = 24,000$

Figure 10 shows local Nusselt number distribution along r -axis at different volumetric fractions. The Nusselt number becomes maximum at the $r/D = 0$ and decreases gradually as going far from the downstream. It is cleared that the air bubbles can promote the heat transfer overall the impingement surface. The volumetric fraction has an effect on the heat transfer enhancement. The volumetric fraction, $\beta = 0.2$ gives the maximum Nusselt number.

To compare the heat transfer enhancement, the average Nusselt number in area of $-3D \leq r \leq 3D$ was compared between impinging bubbly jet (\overline{Nu}) and impinging jet for case of $\beta = 0.0$ (\overline{Nu}_0) as average Nusselt number ratio ($\overline{Nu}/\overline{Nu}_0$) shown in Table 3. It was found that case of $\beta = 0.2$ gives the maximum heat transfer enhancement about 33%. The other cases of volumetric fraction give the heat transfer enhancement in range of 15%-28%.

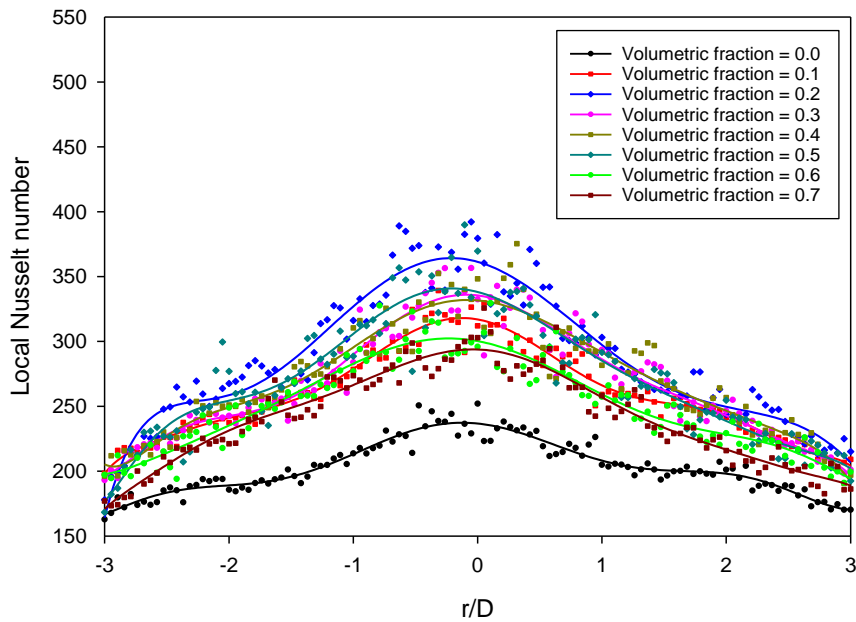


Fig. 10. Local Nusselt number distribution along r-axis at different volumetric fractions

Table 3

Average Nusselt number ratio between bubbly jet and water jet ($\beta = 0.0$)

Volumetric fraction, β	$\overline{Nu}/\overline{Nu}_0$
0.1	1.24
0.2	1.33
0.3	1.28
0.4	1.27
0.5	1.25
0.6	1.19
0.7	1.15

4. Conclusions

In the present, this research for the heat transfer enhancement and flow visualization of bubbly jet impingement were investigated under fixed Reynolds number of water ($Re_L = 2.4 \times 10^4$) and nozzle to impingement plate distance ($L = 2D$), the volumetric fraction was varied from 0.0 to 0.7. It can be summarized as follow:

- i. Heat transfer enhancement by adding air into water impinging jet for all volumetric fractions are higher than a case of pure water impinging jet.
- ii. For $\beta = 0.1$ to 0.2, it was found that the average Nusselt number is continuously increased and volumetric fraction at $\beta = 0.2$ gives the maximum average Nusselt number about 33%. The jet flow pattern forms the cloud bubble with a mushroom shape that is interacted with the surrounding water. It presents proper air quantity that occurs to disturb the thermal boundary layer on the impingement surface and increases turbulence intensity on jet flow.
- iii. For $\beta = 0.2$ to 0.7, it was found that the average Nusselt number is continuously decreased. The jet flow pattern is also found that the cloud bubble with mushroom shape that rapidly expanded when the volumetric fraction increases. It leads to the cloud of bubble covers a large region on the impingement surface which decreases the heat transfer.

Acknowledgement

This research was funded by a grant from Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Thailand.

References

- [1] Wae-hayee, Makatar, Kirttayoth Yeranee, Ibroheng Piya, Yu Rao, and Chayut Nuntadusit. "Heat transfer correlation of impinging jet array from pipe nozzle under fully developed flow." *Applied Thermal Engineering* 154 (2019): 37-45.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.044>
- [2] Nuntadusit, C., M. Wae-hayee, and N. Kaewchoothong. "Heat transfer enhancement on a surface of impinging jet by increasing entrainment using air-augmented duct." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 127 (2018): 751-767.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.06.130>
- [3] Sabato, Massimo, Andrea Fregni, Enrico Stalio, Federico Brusiani, Maurizio Tranchero, and Thierry Baritaud. "Numerical study of submerged impinging jets for power electronics cooling." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 141 (2019): 707-718.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.06.081>
- [4] de Oliveira, Pablo A., and Jader R. Barbosa Jr. "Novel two-phase jet impingement heat sink for active cooling of electronic devices." *Applied Thermal Engineering* 112 (2017): 952-964.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.133>
- [5] Masip, Yunesky, Antonio Campo, and Suleivys M. Nunez. "Experimental analysis of the thermal performance on electronic cooling by a combination of cross-flow and an impinging air jet." *Applied Thermal Engineering* 167 (2020): 114779.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114779>
- [6] Lee, Jaewon, Gihun Son, and Han Young Yoon. "Numerical simulation of the quenching process in liquid jet impingement." *International Communications in Heat and Mass Transfer* 61 (2015): 146-152.
<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.12.017>
- [7] Waldeck, Steffen, Hermann Woche, Eckehard Specht, and Udo Fritsching. "Evaluation of heat transfer in quenching processes with impinging liquid jets." *International Journal of Thermal Sciences* 134 (2018): 160-167.
<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.08.001>
- [8] Karwa, Nitin, Lukas Schmidt, and Peter Stephan. "Hydrodynamics of quenching with impinging free-surface jet." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 55, no. 13-14 (2012): 3677-3685.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.02.035>
- [9] Umair, Siddique Mohd, Sher Afghan Khan, Abdulrahman Alrobaian, and Emaad Ansari. "Numerical study of heat transfer augmentation using pulse jet impinging on pin fin heat sink." *CFD Letters* 11 (2018): 84-91.
- [10] Siddique, Umair, Emaad Ansari, Sher Afghan Khan, and Rajesh Patil. "On Numerical Investigation of Nusselt Distribution Profile of Heat Sink Using Lateral Impingement of Air Jet." *CFD Letters* 11, no. 9 (2019): 59-68.
- [11] Bieber, Malte, Reinhold Kneer, and Wilko Rohlf. "Self-similarity of heat transfer characteristics in laminar submerged and free-surface slot jet impingement." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 104 (2017): 1341-1352.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.104>
- [12] Lv, Jizu, Chengzhi Hu, Minli Bai, Ke Zeng, Shengnan Chang, and Dongdong Gao. "Experimental investigation of free single jet impingement using SiO₂-water nanofluid." *Experimental Thermal and Fluid Science* 84 (2017): 39-46.
<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.01.010>
- [13] Nakharintr, Lursukd, Paisarn Naphon, and Songkran Wiriyaart. "Effect of jet-plate spacing to jet diameter ratios on nanofluids heat transfer in a mini-channel heat sink." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 116 (2018): 352-361.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.09.037>
- [14] Sun, H., C. F. Ma, and W. Nakayama. "Local characteristics of convective heat transfer from simulated microelectronic chips to impinging submerged round water jets." *Journal of Electronic Packaging* 115 (1993): 71-77.
<https://doi.org/10.1115/1.2909304>
- [15] Womac, D. J., S. Ramadhyani, and F. P. Incropera. "Correlating equations for impingement cooling of small heat sources with single circular liquid jets." *Journal of Heat Transfer* 115, no. 1 (1993): 106-115.
<https://doi.org/10.1115/1.2910635>

- [16] Naphon, Paisarn, and Somchai Wongwises. "Experimental Study of Jet Nanofluids Impingement System for Cooling Computer Processing Unit." *Journal of Electronics Cooling and Thermal Control* 1 (2011): 38-44.
<https://doi.org/10.4236/jectc.2011.13005>
- [17] Naphon, P., L. Nakharintr, and S. Wiriyasart. "Continuous nanofluids jet impingement heat transfer and flow in a micro-channel heat sink." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 126 (2018): 924-932.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.05.101>
- [18] Barewar, Surendra D., Shravan Tawri, and Sandesh S. Chougule. "Heat transfer characteristics of free nanofluid impinging jet on flat surface with different jet to plate distance: An experimental investigation." *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification* 136 (2019): 1-10.
<https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.12.001>
- [19] Sun, Bin, Yi Qu, and Di Yang. "Heat transfer of single impinging jet with Cu nanofluids." *Applied Thermal Engineering* 102 (2016): 701-707.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.03.166>
- [20] Lv, Jizu, Shengnan Chang, Chengzhi Hu, Minli Bai, Peng Wang, and Ke Zeng. "Experimental investigation of free single jet impingement using Al₂O₃-water nanofluid." *International Communications in Heat and Mass Transfer* 88 (2017): 126-135.
<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.08.017>
- [21] Choo, Kyosung, and Sung Jin Kim. "Heat transfer and fluid flow characteristics of two-phase impinging jets." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53, no. 25-26 (2010): 5692-5699.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.08.013>
- [22] Trainer, Daniel, Jungho Kim, and Sung Jin Kim. "Heat transfer and flow characteristics of air-assisted impinging water jets." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 64 (2013): 501-513.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.04.048>
- [23] Friedrich, Brian K., Tamira D. Ford, Aspen W. Glaspell, and Kyosung Choo. "Experimental study of the hydrodynamic and heat transfer of air-assistant circular water jet impinging a flat circular disk." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 106 (2017): 804-809.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.09.102>
- [24] Kneer, Reinhold, Herman Haustein, Claas Ehrenpreis, and Wilko Rohlf. "Flow structures and heat transfer in submerged and free laminar jets." In *International Heat Transfer Conference Digital Library*. Begel House Inc., 2014.
<https://doi.org/10.1615/IHTC15.kn.000028>