



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อน ของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศ

Study of Flow and Heat Transfer Characteristics of Air Bubbles with Water Impinging Jet

ฉัตว์วัส อรุณรุจิพันธ์ ชินดิษฐ์ สองนาม ปฐมพร นระระโต ญัฐพร แก้วชูทอง และ ชยุต นันทดุสิต*

Chattawat Aroonrujiphan Chinnadit Songnam Pathomporn Narato Natthaporn Kaewchoothong
and Chayut Nuntadusit*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Department of Mechanical and Mechatronics Engineering,
Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

Received: 12 April 2021

Revised: 1 June 2021

Accepted: 4 June 2021

Available online: 14 June 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการเติมอากาศที่มีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทน้ำพุ่งชนพื้นผิวเรียบที่จมในน้ำ โดยกำหนดให้เลขเรย์โนลด์ส์ของน้ำมีค่าเท่ากับ 2.4×10^4 สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ 0.0 และ 0.1 และระยะจากปากทางออกท่อเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่ $L = 2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ตามลำดับ ในการศึกษาพฤติกรรมของฟองอากาศในเจ็ทน้ำใช้วิธีการถ่ายภาพด้วยกล้องความเร็วสูง และศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน จากผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มอากาศที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเท่ากับ 0.1 สำหรับระยะพุ่งชนที่ $L = 2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ และมีค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยตามแนวรัศมีเพิ่มขึ้น 27.27%, 1.98%, 24.37%, 3.84% และ 8.10% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีของเจ็ทน้ำที่ไม่ผสมฟองอากาศ ซึ่งเกิดจากพฤติกรรมของฟองอากาศขนาดเล็กที่เกิดการรวมตัวกัน

เป็นฟองขนาดใหญ่แล้วไหลปะทะพื้นผิว และฟองอากาศขนาดเล็กที่ไหลปะทะบนพื้นผิวและรบกวนชั้นขอบเขตความร้อน

คำสำคัญ: เจ็ทน้ำพุ่งชน การเติมฟองอากาศ พฤติกรรมการไหลของฟองอากาศ การเพิ่มความสามารถการถ่ายเทความร้อน

Abstract

In this research, the effect of air bubble addition on the heat transfer enhancement of a water impinging jet was investigated on a submerged smooth surface. The parameters for Reynolds number of water is 2.4×10^4 , the ratio between the volumetric flow rate of the air to the total volumetric flow rate of 0.0 and 0.1 and the distance from the jet exit to the impingement surface at $L = 2D, 4D, 6D, 8D$ and $10D$ were studied. The behaviour of air bubbles in a water jet was visualized using a high-speed camera. The heat transfer on the impingement surface was measured with a thermal imaging camera. According to the results, the air addition at the ratio between the volumetric airflow rate and the total volumetric flow rate was 0.1 for the impingement distance at $L = 2D, 4D, 6D, 8D$ and $10D$ can increase the average Nusselt number along radial direction about 27.27%, 1.98%, 24.37%, 3.84% and 8.10%, respectively, compared to the case of the pure water jet. This is caused by the behaviour of small air bubbles that coalesce to form large bubbles and then impinged against the surface and small air bubbles that impinge on the surface and disturb the thermal boundary layer.

Keywords: Water impinging jet: Air bubble addition: Bubble flow behavior: Heat transfer enhancement

1. บทนำ

การจัดการพลังงานความร้อนถือเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกพัฒนาให้มีขนาดเล็กลง ทำให้อัตราการเกิดความร้อนต่อขนาดอุปกรณ์ที่เพิ่มสูงมากขึ้น และขนาดอุปกรณ์ที่เล็กลงทำให้ยากต่อการระบายความร้อน และอาจเกิดปัญหาความร้อนที่กำเนิดบนชิ้นส่วนที่สูงเกินไป จึงเป็นผลให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลงและสร้างความเสียหายแก่อุปกรณ์ได้ จึงจำเป็นต้องมีการจัดการพลังงานความร้อนส่วนเกินและมีการควบคุมอุณหภูมิที่มีสมรรถนะสูงสามารถตอบสนองการเพิ่มของความร้อนได้อย่างรวดเร็ว เพื่อยืดอายุการใช้งานและหลีกเลี่ยงความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ [1, 2]

การใช้เจ็ทของไหลพุ่งชนพื้นผิวเป็นวิธีการเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนที่นิยมใช้งานในอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมอบแห้ง อุตสาหกรรมโลหะ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และกังหันใบพัดของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบ เป็นต้น [3-6] เนื่องจากเป็นวิธีการระบายความร้อนที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ค่อนข้างสูงโดยเฉพาะในบริเวณที่เจ็ทของไหลพุ่งชน จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการระบายความร้อนแบบรวดเร็วบนพื้นผิว

ที่ผ่านมา มีงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ศึกษาการใช้เจ็ทของไหลพุ่งชนพื้นผิวโดยใช้น้ำหรือของเหลวเป็นตัวกลางในการระบายความร้อน เนื่องจากน้ำมีความสามารถระบายความร้อนที่สูงเมื่อเทียบกับอากาศ ส่งผลให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการระบายความร้อนของเจ็ทของไหลพุ่งชน ต่อมา มีการศึกษาเทคนิคเพื่อเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้น โดย

การเติมอนุภาคนาโนผสมในเจ็ทของเหลว ซึ่งจะเพิ่มค่าการนำความร้อนของของไหลเมื่อเทียบกับน้ำหรือของเหลวเพียงอย่างเดียว ส่งผลให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทของไหลพุ่งชนเพิ่มสูงขึ้น แต่การเติมอนุภาคนาโนลงในน้ำ มักพบปัญหาการเกิดคราบตะกอนของอนุภาคนาโนบนพื้นผิวที่พุ่งชน ส่งผลให้ลดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนลง อีกทั้งระบบการทำงานของปั๊มจำเป็นต้องใช้พลังงานที่สูงขึ้น [7]

การใช้เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวด้วยน้ำผสมฟองอากาศถือเป็นทางเลือกหนึ่งที่มีส่วนช่วยในการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อน โดยฟองอากาศเมื่อพุ่งชนกับพื้นผิวที่ร้อน จะก่อให้เกิดการรบกวนในชั้นขอบเขตการไหลบนพื้นผิวและเพิ่มระดับความปั่นป่วนในการไหลของลำเจ็ทเป็นผลให้เกิดการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนเมื่อเทียบกับตัวกลางที่เป็นน้ำ

ที่ผ่านมา Donoghue และคณะ [8] ได้ศึกษาหลักการถ่ายเทความร้อนของฟองอากาศเดี่ยวขณะปะทะกับพื้นผิวในน้ำ ในงานวิจัยได้ใช้กล้องอินฟราเรดในการวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวที่ฟองอากาศปะทะและใช้กล้องความเร็วสูงในการศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ โดยฟองอากาศเดี่ยวจะไหลออกจากรูออริฟิสที่มีขนาด 1 mm เข้าปะทะกับพื้นผิวร้อนที่ห่างจากรูออริฟิสที่ 30 mm พบว่าพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของฟองอากาศขณะปะทะพื้นผิวแบ่งได้เป็น 3 ช่วง โดยในช่วงแรกฟองอากาศขณะปะทะกับพื้นผิวจะมีรูปร่างแบน โดยจะมีการกักเก็บพลังงานในรูปของแรงตึงผิว เมื่อปะทะกับพื้นผิวพลังงานนี้จะถูกปลดปล่อย และเข้าสู่ช่วงที่สองที่ฟองอากาศ

จะกระดอนออกจากพื้นผิวและเข้าปะทะกับพื้นผิวอีกครั้ง ฟองอากาศจะมีรูปร่างกลมและพลังงานที่ถูกกักเก็บในรูปของแรงตึงผิวในตอนแรกจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานศักย์และพลังงานจลน์ จากนั้นฟองอากาศจะเคลื่อนที่ปะทะกับพื้นผิวอีกครั้ง และเข้าสู่ช่วงที่สามที่ฟองอากาศจะเคลื่อนที่บนพื้นผิว และพบว่าในช่วงแรกที่ฟองอากาศปะทะกับพื้นผิวและในช่วงที่สองฟองอากาศกระดอนออกจากพื้นผิวและเข้าปะทะกับพื้นผิวอีกครั้งจะช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้โดยเฉพาะในช่วงแรก ต่อมา Donoghue และคณะ [9] ได้ศึกษาเพิ่มเติมถึงกลไกการถ่ายเทความร้อนสำหรับฟองอากาศขณะปะทะพื้นผิวในน้ำ พบว่าบริเวณที่ให้การถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด คือบริเวณที่ฟองอากาศปะทะกับพื้นผิวโดยตรง หลังจากนั้นฟองอากาศจะเกิดการกระดอนออกจากพื้นผิว และน้ำในบริเวณรอบจะถูกดึงและก่อให้เกิดการหมุนวนปะทะพื้นผิวซึ่งมีส่วนช่วยในการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อน

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวด้วยน้ำผสมฟองอากาศ Choo และ Kim [10] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและคุณลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศจากหัวฉีดแบบท่อในกรณีที่อากาศอยู่รอบลำเจ็ท โดยศึกษาผลของสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมในช่วง 0 ถึง 0.9 ที่เงื่อนไขระยะห่างจากปากทางออกท่อเจ็ทถึงผนังถ่ายเทความร้อนมีค่าเท่ากับ 7 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด จากผลการศึกษาพบว่าที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.3

ฟองอากาศจะมีรูปร่างบิดเบี้ยวและไม่ต่อเนื่อง โดยรอบฟองจะเป็นน้ำ ต่อมาในช่วง 0.4 ถึง 0.5 ฟองอากาศมีลักษณะคล้ายหัวกระสุนเคลื่อนที่ในท่อน้ำ และในช่วงสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม 0.5 ถึง 0.9 จะมีลักษณะการไหลแบบวงแหวนกระสุน ซึ่งน้ำจะไหลเป็นชั้นฟิล์มวงแหวนรอบผนังท่อ ซึ่งบริเวณกลางท่อจะเป็นอากาศ ในส่วนของการถ่ายเทความร้อนพบว่า ค่าของนัสเซลท์ที่มุมเบอร์ทันท์ที่เจ็ทไหลปะทะมีค่าสูงสุด เมื่อสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมมีค่า 0.2 ถึง 0.3 โดยในช่วงแรกที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม เท่ากับ 0.1 พบว่าให้การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น 30% เมื่อเทียบกับกรณีเจ็ทน้ำไม่ผสมอากาศ และในช่วง 0.1 ถึง 0.3 พบว่าค่าของนัสเซลท์ที่มุมเบอร์ทันท์ที่เจ็ทไหลปะทะเพิ่มขึ้นสูงสุดตามลำดับ เนื่องจากมีฟองอากาศมารบกวนการไหลของเจ็ทน้ำ ซึ่งช่วยในการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อน และในช่วงสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม 0.4 ถึง 0.9 พบว่าความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจะลดลงเมื่อเทียบกับกรณีเจ็ทน้ำไม่ผสมอากาศ เนื่องจากอากาศส่วนใหญ่น้ำไหลปะทะบนพื้นผิว

Friedrich และคณะ [11] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าของนัสเซลท์ที่มุมเบอร์ทันท์จุดพุ่งชน (Stagnation point) สำหรับเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมร่วมกับอากาศจากหัวฉีดแบบท่อในกรณีที่อากาศอยู่รอบลำเจ็ท ในการทดลองกำหนดให้อัตราการไหล

ของน้ำค้างที่ และเพิ่มอัตราการไหลของอากาศโดยกำหนดสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมอยู่ในช่วง 0 ถึง 0.9 ที่เงื่อนไขระยะห่างจากปากทางออกท่อเจ็ทถึงผนังถ่ายเทความร้อนมีค่าเท่ากับ 1 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด จากการศึกษาพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าของนัสเซลท์กับเบอร์ที่จุดพุงชนกับสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงแรกที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมอยู่ในช่วง 0 ถึง 0.5 พบว่าค่าของนัสเซลท์กับเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นตรง เนื่องจากลักษณะการไหลในช่วงนี้จะมีลักษณะการไหลแบบน้ำผสมฟองอากาศขนาดเล็ก เมื่อเพิ่มค่าสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเป็นผลทำให้จำนวนฟองอากาศเพิ่มขึ้นตาม ช่วงที่สองที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 0.8 พบว่าค่าของนัสเซลท์กับเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้นแบบเอกซโพเนนเชียล ซึ่งในช่วงนี้จะเป็นช่วงที่นัสเซลท์กับเบอร์มีค่าสูงสุดและช่วงที่สามที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมอยู่ในช่วง 0.8 ถึง 0.9 พบว่าค่าของนัสเซลท์กับเบอร์มีค่าลดลง เนื่องจากการไหลมีปริมาตรของอากาศมากเกินไป จึงส่งผลให้ลดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนลง

Glaspell และคณะ [12] ศึกษาการใช้เจ็ทพุงชนพื้นผิวโดยใช้น้ำผสมกับฟองอากาศที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว พวกเขากำหนดเงื่อนไข

ของระยะที่เจ็ทพุงชนพื้นผิวตั้งแต่ 0.02 ถึง 0.51 และค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเท่ากับ 0.3 ถึง 0.8 จากการทดลองพบว่า การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นที่การลดลงของระยะที่เจ็ทพุงชนพื้นผิว การถ่ายเทความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นได้ดีบริเวณจุดหยุดนิ่ง (Stagnation point) Baghel และคณะ [13] ศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุงชนด้วยน้ำมันพื้นผิวโค้ง พวกเขากำหนดเงื่อนไขระยะของเจ็ทพุงชนเท่ากับ 4 ภายใต้ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 17,036 ถึง 42,590 จากการทดลองพบว่า ผลของพื้นผิวโค้งทำให้การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณจุดหยุดนิ่ง ในขณะที่ Alnak และคณะ [14] ศึกษาการใช้เจ็ทพุงชนโดยใช้น้ำในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวทรงกระบอก พวกเขากำหนดเงื่อนไขการทดลองและกำลังการไหลที่ระยะพุงชนของเจ็ทเท่ากับ 4, 6 และ 10 ตามลำดับ ในขณะที่กำหนดค่าตัวเลขเรย์โนลด์สูงถึง 20000 จากการทดลองพวกเขาพบว่า การถ่ายเทความร้อนลดลงที่การเพิ่มขึ้นของระยะพุงชนและยังลดการปะทะของลำเจ็ทบนพื้นผิวทรงกระบอก และยังพบว่าที่ระยะพุงชนเท่ากับ 4 ให้การถ่ายเทความร้อนสูงสุด ไม่นานมานี้ Aroonrujiphan และ Nuntadusit [15] ศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุงชนบนพื้นผิวโดยใช้น้ำผสมฟองอากาศ พวกเขา กำหนดค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเท่ากับ 0.0 ถึง 0.7 ที่ระยะพุงชนเท่ากับ 2 โดยกำหนดค่าตัวเลขเรย์โนลด์คงที่ที่ 24,000 ในการทดลองได้ใช้กล้องอินฟราเรดในการวัดการกระจายการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุงชน จากการทดลองพบว่า ที่ค่าอัตราการไหล

เชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเท่ากับ 0.2 ให้การถ่ายเทความร้อนสูงสุดถึง 33% เมื่อเทียบกับที่ค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเท่ากับ 0.0

จากผลการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ว่างานวิจัยโดยส่วนใหญ่จะเป็นเจ็ทของไหลพุ่งชนที่เป็นน้ำผสมร่วมกับอากาศแบบรอบลำเจ็ทเป็นอากาศ (แบบ Free-surface jet) แต่ยังไม่มีการศึกษาเจ็ทของไหลพุ่งชนที่เป็นน้ำผสมร่วมกับอากาศแบบรอบลำเจ็ทเป็นน้ำ (แบบ Submerged jet) โดยทั่วไปแล้วเจ็ทของไหลพุ่งชนต่างชนิดกัน มีผลทำให้โครงสร้างการไหลและการถ่ายเทความร้อนต่างกัน และการศึกษาโดยการวัดการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทของไหลพุ่งชนโดยส่วนใหญ่ ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลบนพื้นผิวพุ่งชน ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นค่าตำแหน่งเฉพาะจุดเท่านั้น [10- 15]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทพุ่งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศ โดยลักษณะของหัวฉีดเจ็ทเป็นแบบท่อเจ็ท (Pipe nozzle) พิจารณาผลของระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชน และศึกษาผลของการเติมอากาศผสมในเจ็ทน้ำปริมาณน้อย ในการศึกษาได้บันทึกภาพพฤติกรรมของเจ็ทน้ำผสมฟองอากาศและวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนเพื่อระบายความร้อน

2. วิธีการวิจัย

2.1 โมเดลและตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 1 แสดงโมเดลของเจ็ทพุ่งชนที่ใช้ในการศึกษา โดยลักษณะของเจ็ทเป็นแบบท่อเจ็ท

(Pipe nozzle) โดยน้ำจะไหลออกจากท่อเจ็ทที่ทำจากท่ออะคริลิกในห้องทดลอง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน $D = 9.5 \text{ mm}$ จากนั้นจะไหลพุ่งชนกับพื้นผิวที่เงื่อนไขระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวพุ่งชน $L = 2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ตามลำดับ โดยมีน้ำเป็นของไหลที่อยู่บริเวณรอบของลำเจ็ท ในการทดลองจะกำหนดให้การไหลของเจ็ทเป็นแบบปั่นป่วน มีเลขเรย์โนลด์สของน้ำ $Re = 2.4 \times 10^4$ (พิจารณาจากอัตราการไหลของน้ำและเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเจ็ท) หรือมีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเท่ากับ 9 ลิตรต่อนาที โดยใช้ปั๊มตู้ปลา และกำหนดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศเท่ากับ 0.0 และ 1.0 ลิตรต่อนาที หรือสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเท่ากับ 0.0 และ 0.1 ตามลำดับ สำหรับการสร้างการไหลแบบสองสถานะระหว่างน้ำกับอากาศ

สำหรับเลขเรย์โนลด์สของน้ำของการไหลแบบสองสถานะในงานวิจัยนี้อยู่ในช่วงการไหลแบบ Bubbly flow [16] จึงสามารถคำนวณจากสมการ

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

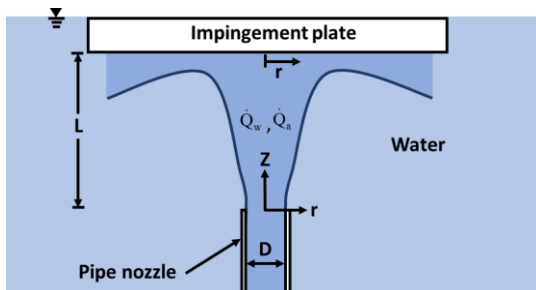
โดยที่ ρ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)
 $\dot{Q}_w$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำ (m^3/s)
 μ_w คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดเชิงพลวัตของน้ำ (kg/m.s)
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจ็ท (m)

และสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมคำนวณจากสมการ

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

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

$\dot{Q}_w$ คืออัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำ (L/min)



รูปที่ 1 โมเดลของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว

2.2 ชุดทดลอง

รูปที่ 2 แสดงแผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษา น้ำที่อยู่ในถังพักน้ำ (Reservoir tank) ซึ่งมีชุดท่อทองแดงที่มีสารทำความเย็นไหลผ่านจุ่มอยู่เพื่อลดอุณหภูมิของน้ำ จากนั้นน้ำจะถูกดูดเข้าปั๊มน้ำเข้าสู่ถังสำหรับควบคุมอุณหภูมิ น้ำ ซึ่งจะติดตั้งฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ต่อเข้ากับชุดควบคุมอุณหภูมิ เพื่อให้อุณหภูมิของเจ็ทน้ำคงที่ระหว่างการทดลอง ต่อมาน้ำจะไหลผ่านโรตารีเตอร์เพื่อวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำ ในขณะที่อากาศจะถูกส่งจากปั๊มลมเข้าสู่ชุดวัดความชื้นและวาล์วปรับความดัน (ในการทดลองปรับที่ความดันเกจ 5.0 bar) จากนั้นอากาศจะไหลเข้าสู่โรตารีเตอร์เพื่อวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ ต่อมาน้ำและอากาศจะไหลเข้าสู่ท่อเวนจูรี

เพื่อสร้างของไหลแบบสองสถานะระหว่างน้ำและอากาศ โดยในการทดลองจะวัดอุณหภูมิของน้ำและอากาศก่อนการผสมที่ท่อเวนจูรีด้วยหัววัดอุณหภูมิชนิด Pt-100 และกำหนดอุณหภูมิของน้ำและอากาศที่ $28 \pm 0.1^\circ\text{C}$ และอุณหภูมิในห้องทดลองมีค่าเท่ากับ $25 \pm 0.1^\circ\text{C}$ จากนั้นของไหลที่เป็นน้ำผสมฟองอากาศจะไหลเข้าสู่ส่วนทดสอบต่อไป

รูปที่ 3 แสดงรายละเอียดของส่วนทดสอบและผนังวัดการถ่ายเทความร้อน โดยของไหลที่เป็นน้ำผสมฟองอากาศจะไหลเข้าสู่ท่อเจ็ทที่มีความยาวท่อ 1 เมตร เพื่อให้เกิดการไหลที่พัฒนาอย่างสมบูรณ์ (Fully developed flow) ก่อนไหลออกจากท่อเจ็ท จากนั้นของไหลจะไหลออกจากท่อเจ็ทเข้าพุ่งชนกับพื้นผิวของผนังวัดการถ่ายเทความร้อนที่วางในแนวระดับเหนือท่อเจ็ท จากนั้นเจ็ทที่พุ่งชนและไหลบนพื้นผิวของผนังจะไหลออกจากส่วนทดสอบ ไหลกลับเข้าสู่เข้าสู่ถังพักน้ำและหมุนเวียนในระบบต่อไปโดยผนังวัดการถ่ายเทความร้อนนี้เป็นแผ่นสแตนเลส (SUS 304) ที่มีความกว้าง 100 mm ความยาว 100 mm และความหนา 0.03 mm แผ่นสแตนเลสจะถูกยึดเข้ากับแผ่นอะคริลิกและด้านหลังของผนังพุ่งชนประกอบเป็นกล่องสำหรับวัดอุณหภูมิจากด้านหลังของแผ่นที่เจ็ทพุ่งชน

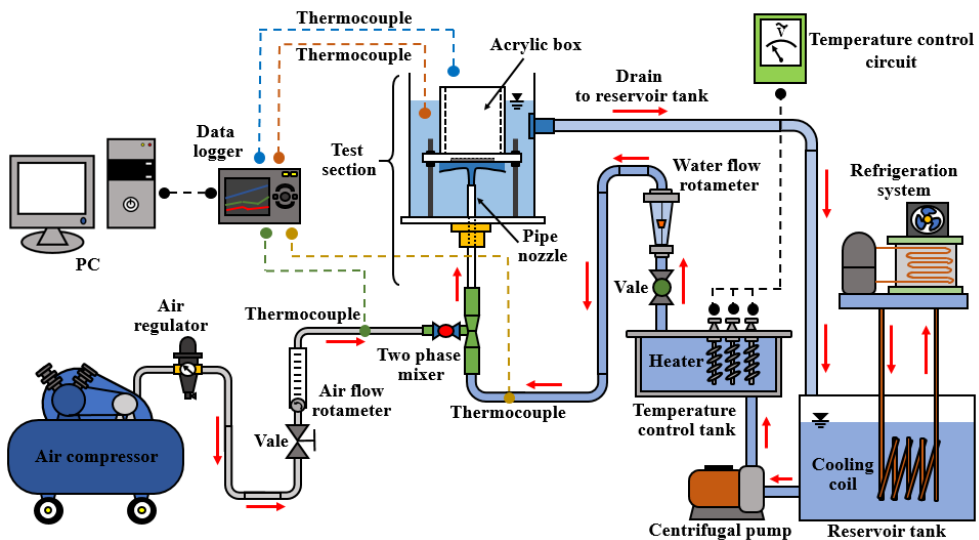
3. วิธีการทดลอง

ในการทดลองได้ศึกษาลักษณะการไหลและพฤติกรรมของฟองอากาศที่ปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชนโดยการบันทึกภาพด้วยกล้องความเร็วสูงและศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนโดยใช้กล้องอินฟราเรดถ่ายภาพการกระจายอุณหภูมิ

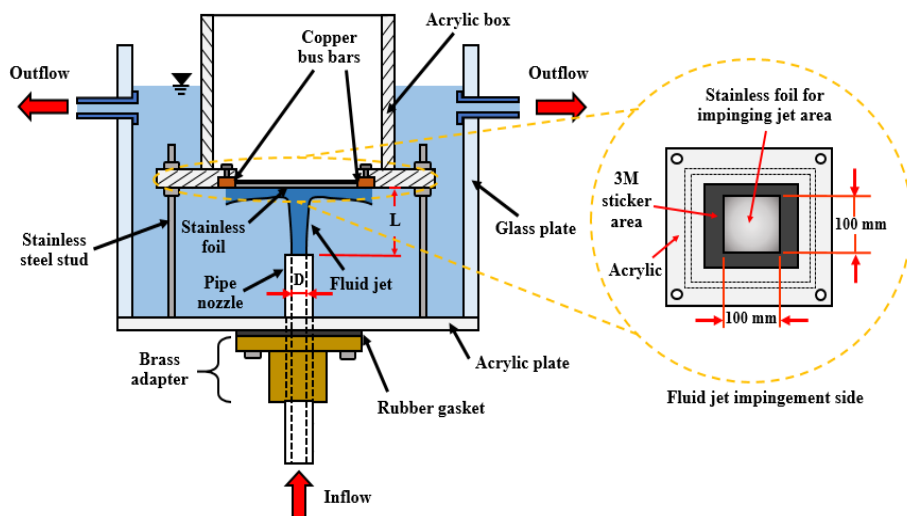
3.1 การศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำผสมฟองอากาศ

รูปที่ 4 แสดงแผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษา ลักษณะการไหลของเจ็ทจากปากทางออกของเจ็ทถึง พื้นผิวที่พุ่งชน โดยผนังถังน้ำทำจากแผ่นกระจกใส

ดังแสดงในรูปได้ติดตั้งกล้องความเร็วสูงและหลอดไฟ ให้แสงสว่าง และถ่ายภาพพฤติกรรมของฟองอากาศ ที่เคลื่อนที่ออกจากท่อเจ็ทไปจนปะทะพื้นผิว จากด้านข้างของถังน้ำ



รูปที่ 2 รายละเอียดของแผนภาพชุดทดลอง



รูปที่ 3 รายละเอียดของส่วนทดสอบและผนังวัดการถ่ายเทความร้อน

3.2 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุงชนพื้นผิว

รูปที่ 5 แสดงแผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุงชนพื้นผิว ดังแสดงในภาพแผ่นสแตนเลสจะถูกขึ้นด้วยแท่งทองแดงทั้งสองด้านบนแผ่นอะคริลิก และใช้เครื่องจ่ายไฟฟ้าจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงผ่านแท่งทองแดงให้กับแผ่นสแตนเลสเพื่อทำให้เกิดฟลักซ์ความร้อนคงที่ตลอดพื้นผิว โดยบนแผ่นสแตนเลสด้านที่วัดอุณหภูมิจะถูกพันลวดต้านที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี เท่ากับ 0.95 เพื่อใช้ในการถ่ายภาพการกระจายอุณหภูมิด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน

ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุงชน การกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวจะถูกนำมาวิเคราะห์ เพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวและค่าเลขนัสเซลต์บนพื้นผิว โดยใช้สมการที่ (3) ถึง (8) โดยฟลักซ์ความร้อนที่จ่ายให้แก่แผ่นสแตนเลส ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

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

โดยที่ I คือ กระแสไฟฟ้า (A)

V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)

A คือ พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนบริเวณที่เจ็ทพุงชนพื้นผิว (m^2)

สำหรับค่าฟลักซ์ความร้อนสุทธิสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\dot{q}_{net} = \dot{q}_{input} - (\dot{q}_{conv} + \dot{q}_{rad}) \quad (4)$$

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)

โดยการสูญเสียฟลักซ์ความร้อนอันเนื่องมาจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติและการแผ่รังสีความร้อนจากด้านหลังของแผ่นสแตนเลส ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (5) และ (6) ตามลำดับ

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

$$\dot{q}_{rad} = \sigma \varepsilon (\bar{T}_w^4 - T_{surr}^4) \quad (6)$$

โดยที่ h_c คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ ($W/m^2.K$) คำนวณจากสมการของกรนีพื้นผิวเรียบที่มีอุณหภูมิคงที่อยู่ในแนวระดับมีค่าเท่ากันตลอดทั้งพื้นผิว [17]

ε คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

σ คือ ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann ($W/m^2.K^4$)

$\bar{T}_w$ คือ อุณหภูมิเฉลี่ย

บนพื้นผิวร้อนที่เจ็ทพุง

ชน (K)

T_{surr} คือ อุณหภูมิของอากาศโดยรอบ (K)

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุงชนสามารถคำนวณได้จากสมการ

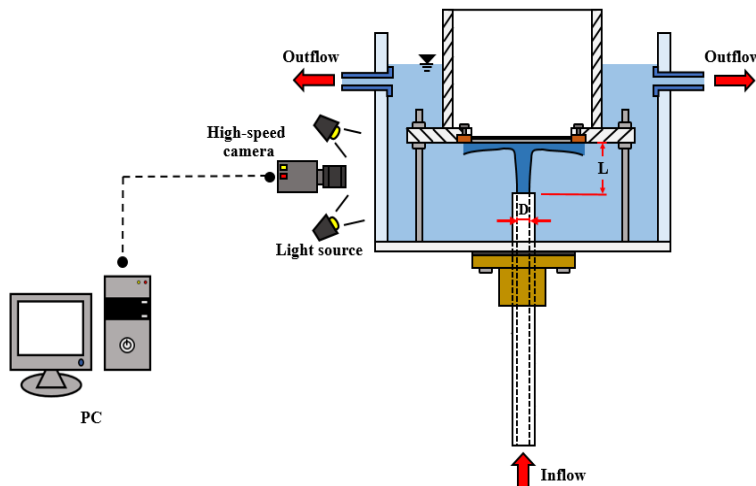
$$h = \frac{\dot{q}_{net}}{T_w - T_{aw}} \quad (7)$$

โดยที่ $\dot{q}_{net}$ คือ ฟลักซ์ความร้อนสุทธิ (W/m^2)
 T_w คือ อุณหภูมิเฉพาะจุดบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่ง
 ชนในกรณีที่มีพื้นผิวมีฟลักซ์ความร้อน
 (K)
 T_{aw} คือ อุณหภูมิเฉพาะจุดบนพื้นผิวที่เจ็ท
 พุ่งชนในกรณีที่ไม่มีฟลักซ์ความร้อน
 หรือไม่จ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านแผ่น (K)
 สำหรับเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยบนพื้นผิวสามารถ
 คำนวณได้จากสมการ

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

โดยที่ h คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน
 เฉพาะจุดบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของรูท่อ
 เจ็ท (m)
 k_w คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของ
 น้ำ ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)

ในการทดลองความแม่นยำในการวัดอุณหภูมิ
 ของกล้องอินฟราเรดอยู่ในช่วง $\pm 0.02^\circ\text{C}$ และจาก
 การประเมินหาค่าความไม่แน่นอนของการวัดค่า
 เลขนัสเซิลต์โดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนพบว่า
 ไม่เกิน 1.5%



รูปที่ 4 แผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ท

4. ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ท พุ่งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศ

รูปที่ 6 แสดงพฤติกรรมการไหลของฟองอากาศที่
 ผสมในลำเจ็ทน้ำ ที่เงื่อนไขสัดส่วนระหว่างอัตราการ
 ไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิง
 ปริมาตรรวมที่ 0.1 ซึ่งมีระยะห่างจากปากทางออก

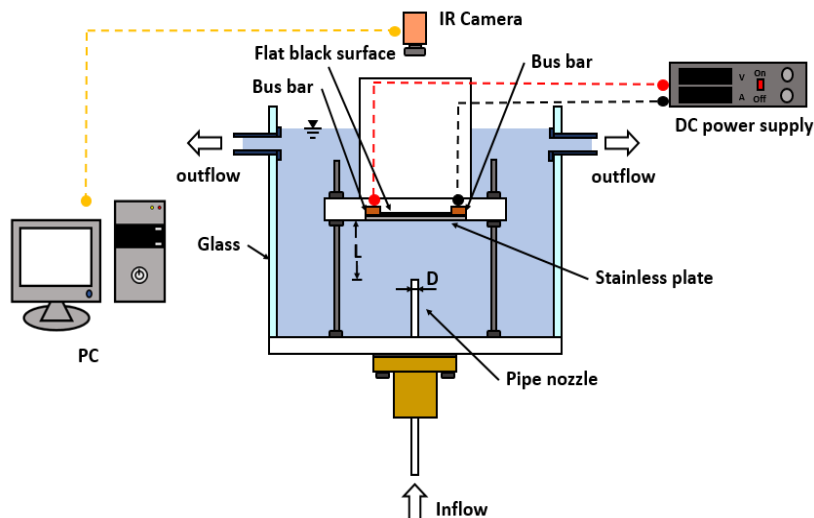
ของเจ็ทถึงพื้นผิวพุ่งชน $L = 2D, 4D, 6D, 8D$ และ
 $10D$ ตามลำดับ โดยจะแสดงเวลาที่ $t = t_0 \text{ ms}, t_0 + 75 \text{ ms}$
 และ $t_0 + 150 \text{ ms}$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าลักษณะของ
 ฟองอากาศที่ไหลออกจากปากทางออกของเจ็ทจะมี
 ลักษณะเป็นฟองอากาศขนาดเล็กหรือ Bubbly flow
 โดยรูปร่างของฟองอากาศที่พบจะมีรูปร่างกลม และ
 ฟองอากาศแบบไร้รูปร่างผสมปนกัน และมีการชนกัน
 ระหว่างฟองอากาศรวมเป็นก้อนฟองใหญ่

และเมื่อพองขนาดใหญ่นี้เข้าปะทะกับพื้นผิว ทำให้พองอากาศแตกตัวเป็นขนาดพองเล็กอีกครั้ง และมีช่วงเวลาที่พองอากาศขนาดเล็กที่ไม่มีการชนกันปะทะพื้นผิวโดยเมื่อพองอากาศเข้าพุงชนกับพื้นผิวแล้วพองอากาศบางส่วนจะเกิดการแตกตัวอีกรอบและบางส่วนไม่เกิดการแตกตัว โดยต่อมาพองอากาศจะไหลเรียบไปกับพื้นผิวต่อไป

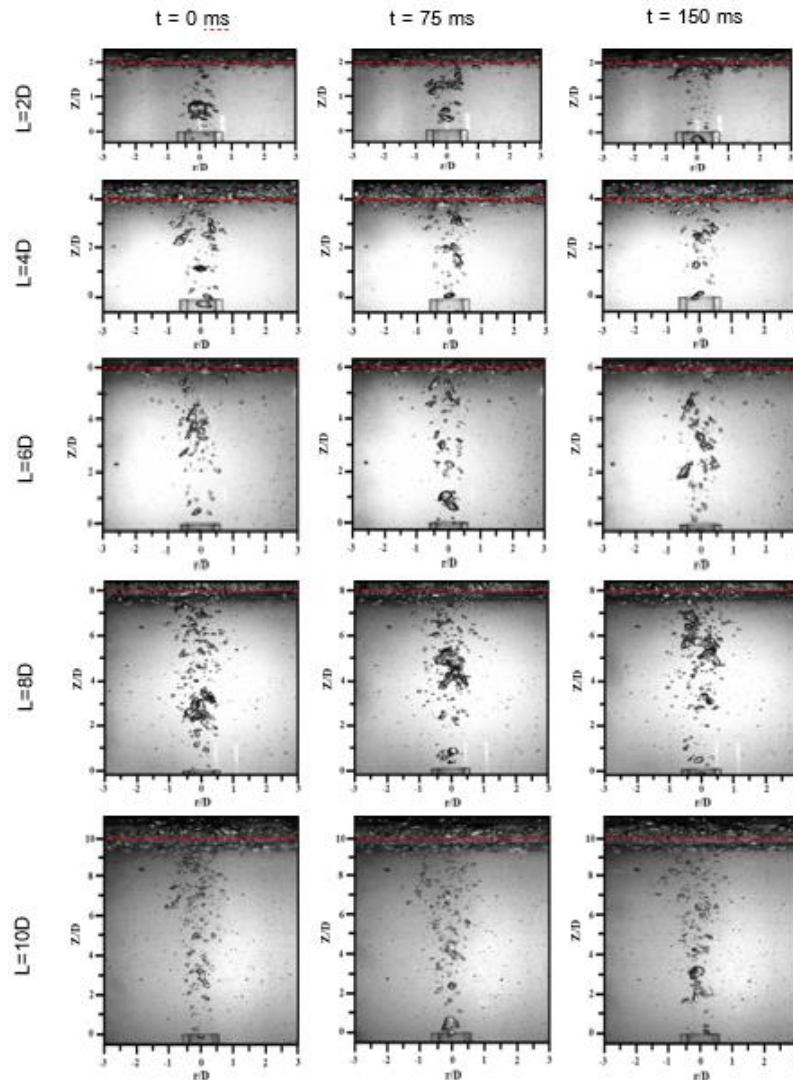
สำหรับผลของระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวพุงชนพบว่า ที่เงื่อนไขระยะพุงชนต่ำพองอากาศขนาดเล็กในบริเวณแกนกลางของลำเจ็ท จะเกิดการรวมตัวเป็นพองใหญ่ แล้วไหลปะทะพื้นผิว ในขณะที่เมื่อเพิ่มระยะพุงชนพบว่าพองอากาศขนาด

เล็กกระจายตัวในแนวรัศมีเพิ่มมากขึ้นก่อนที่จะไหลปะทะพื้นผิว เนื่องจากผลของความเค้นเฉือนระหว่างลำเจ็ทกับน้ำที่หุ้ดนิ่งรอบลำเจ็ททำให้น้ำด้านของลำเจ็ทขยายตัวออกในแนวรัศมี ส่งผลให้เกิดการรวมของพองอากาศขนาดเล็กกลดลงที่เงื่อนไขระยะพุงชนที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในกรณีที่ $L = 10D$

ในการทดลองเนื่องจากวางแผ่นพุงชนไว้เหนือท่อเจ็ท ดังนั้นจะมีผลของแรงลอยตัวของพองอากาศที่เพิ่มความเร็วในการไหลปะทะพื้นผิว โดยพองอากาศที่มีขนาดเล็กจะมีแรงลอยตัวต่ำกว่าพองอากาศที่มีขนาดใหญ่



รูปที่ 5 แผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุงชนพื้นผิว



รูปที่ 6 ลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม เท่ากับ 0.1 โดยมีระยะพุ่งชนที่ $L = 2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$

4.2 ผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว

รูปที่ 7 แสดงค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะจุดบนพื้นผิวตามแนวรัศมี สำหรับสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ 0.0 และ 0.1 โดยมีระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชน $L = 2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$

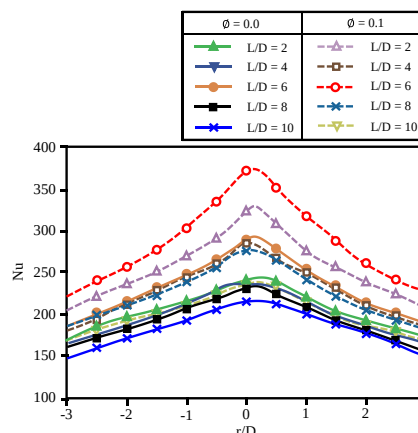
ตามลำดับ ซึ่งจากรูปพบว่ากรณีที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเท่ากับ 0.1 จะมีแนวโน้มค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะจุดตามแนวรัศมีสูงกว่าในกรณีสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ 0.0 โดยเทียบที่ระยะพุ่งชนเดียวกัน

รูปที่ 8 แสดงอัตราส่วนระหว่างเลขนัสเซลล์เฉพาะจุดของกรณีสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ 0.1 เทียบกับกรณีเจ็ทน้ำไม่ผสมอากาศ ($Nu_\beta = 0$) โดยเทียบตามแนวแกนรัศมีที่ระยะฟุ้งชนเดียวกัน ซึ่งพบว่าค่าอัตราส่วนระหว่างเลขนัสเซลล์เฉพาะจุด ที่ระยะฟุ้งชน $L = 2D$ และ $6D$ มีค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์เฉพาะจุดใกล้เคียงกันและมีค่าสูงกว่าในกรณีที่ระยะฟุ้งชน $L = 4D, 8D$ และ $10D$ ซึ่งเมื่อคิดเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนเลขนัสเซลล์เฉพาะจุด และพบว่าที่เงื่อนไขระยะฟุ้งชน $L = 2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ มีค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ยตามแนวรัศมีเพิ่มขึ้นคิดเป็น 27.27%, 1.98%, 24.37%, 3.84% และ 8.10% ตามลำดับ

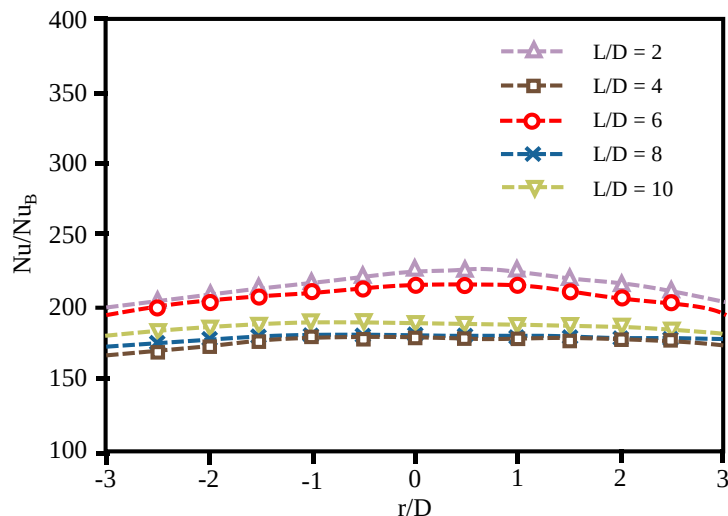
ในกรณีของระยะฟุ้งชน $L = 2D$ การเพิ่มของ Nu เกิดจากโมเมนต์ของเจ็ทที่สูงไหลปะทะพื้นผิว และฟองอากาศเพิ่มความปั่นป่วนในลำเจ็ทก่อนไหลปะทะพื้นผิว และเกิดจากฟองขนาดเล็กที่ไหลรอบวนชั้นขอบเขตบนพื้นผิว และในกรณีของระยะฟุ้งชน $L = 6D$

การเพิ่มของ Nu เกิดจากผลของการเพิ่มระดับความปั่นป่วนในเจ็ทที่ปะทะพื้นผิวมากกว่ากรณีของระยะฟุ้งชน $L = 4D$ แต่เมื่อเพิ่มระยะฟุ้งชนเป็น $L = 8D$ จะทำให้โมเมนต์ในการปะทะพื้นผิวดลดลง ทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลง อย่างไรก็ตามการเพิ่มฟองอากาศในลำเจ็ทสามารถช่วยรบกวนชั้นขอบเขตการไหลและเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ทั่วทั้งพื้นผิว

จากผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทฟุ้งชนพบว่าที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเท่ากับ 0.1 หรือรูปแบบการไหลของเจ็ทฟุ้งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศมีส่วนช่วยในการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนสำหรับระยะฟุ้งชนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ซึ่งฟองอากาศที่ปะทะกับพื้นผิวจะก่อให้เกิดการปั่นป่วนบริเวณพื้นผิว โดยจะไปทำลายชั้นขอบเขตความร้อน (Thermal boundary layer) ทำให้ความสามารถถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับกรณีของเจ็ทน้ำผสมอากาศในกรณีที่รอบลำเจ็ทเป็นอากาศ [1]



รูปที่ 7 ค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะจุดที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม และระยะฟุ้งชนต่าง ๆ บนพื้นผิวตามแนวรัศมี



รูปที่ 8 อัตราส่วนระหว่างเลขนัสเซลต์เฉพาะจุดของสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมที่ 0.1 เทียบกับที่ 0.0 (Nu / Nu_B) บนพื้นผิวตามแนวรัศมี

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทฟุ้งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศ โดยในงานวิจัยนี้สามารถกล่าวสรุปได้ดังนี้

1. ลักษณะการไหลของเจ็ทฟุ้งชนที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเท่ากับ 0.1 จะมีรูปแบบการไหลที่มีลักษณะเป็นฟองอากาศขนาดเล็กหรือ Bubbly flow และที่เงื่อนไขระยะฟุ้งชนต่ำ ฟองอากาศขนาดเล็กในบริเวณแกนกลางของลำเจ็ทจะเกิดการรวมตัวเป็นฟองใหญ่ แล้วไหลปะทะพื้นผิว ในขณะที่เมื่อเพิ่มระยะฟุ้งชนพบว่าฟองอากาศขนาดเล็กกระจายตัวในแนวรัศมีเพิ่มมากขึ้นก่อนที่ไหลปะทะพื้นผิว ส่งผลให้เกิดการรวมของฟองอากาศขนาดเล็กกลดลงที่เงื่อนไขระยะฟุ้งชนที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในกรณี L = 10D

2. การเติมฟองอากาศในลำเจ็ทน้ำที่เงื่อนไขสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเท่ากับ 0.1 ที่ระยะฟุ้งชน L = 2D, 4D, 6D, 8D และ 10D สามารถเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้ 27.27%, 1.98%, 24.37%, 3.84% และ 8.10% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีของเจ็ทน้ำฟุ้งชน โดยเฉพาะกรณีที่ระยะฟุ้งชน L=2D และ 6D เกิดจากพฤติกรรมของฟองอากาศขนาดเล็กที่เกิดการรวมตัวกันเป็นฟองขนาดใหญ่แล้วไหลปะทะพื้นผิว

3. การไหลของเจ็ทฟุ้งชนด้วยน้ำผสมฟองอากาศที่สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมเท่ากับ 0.1 มีส่วนช่วยในการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนสำหรับระยะฟุ้งชนที่ต่าง ๆ ซึ่งฟองอากาศที่ปะทะกับพื้นผิวจะก่อให้เกิดการปั่นป่วนบริเวณพื้นผิว

โดยจะไปทำลายชั้นขอบเขตความร้อน (Thermal boundary layer) ทำให้ความสามารถถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนวิจัยหลังปริญญาเอก มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Yeh LT. Review of heat transfer technologies in electronic equipment. *Journal of Electronic Packaging*. 1995; 117(4): 333-9.
- [2] Mudawar I. Assessment of high-heat-flux thermal management schemes, *IEEE Transaction on Components and Packaging Technologies*. 2001; 24 (2): 122–41.
- [3] Polat S. Heat and mass transfer in impingement drying, *Drying Technology*. 1993; 11(6): 1147–76.
- [4] Viskanta R. Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets, *Experimental Thermal and Fluid Science*. 1993; 6(2): 111–34.
- [5] Han B, Goldstein RJ. Jet-impingement heat transfer in gas turbine systems. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2001; 934(1): 147–61.
- [6] Zuckerman N and Lior N. Jet impingement heat transfer: physics, correlations and numerical modeling. *Advances in Heat Transfer*. 2006; 39: 565–631.
- [7] Barewar SD, Tawri S, Chougule SS. 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*. 2019; 136: 1-10.
- [8] Donoghue DB, Albadawi A, Delauré YMC, Robinson AJ, Murray DB. Bubble impingement and the mechanisms of heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014; 71: 439-50.
- [9] Donoghue DB, Albadawi A, Delauré YMC, Robinson AJ, Murray DB. Mechanisms of heat transfer for axisymmetric bubble impingement and rebound. *Heat and Mass Transfer*. 2018; 54: 2559-70.
- [10] Choo K, Kim SJ. Heat transfer and fluid flow characteristics of two-phase impinging jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010; 53: 5692-9.

- [11] Fredrich BK, Glaspell AW, Choo K. The effect of volumetric quality on heat transfer and fluid flow characteristics of air-assistant jet impingement. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016; 101: 261-6.
- [12] Faghri A, Zhang Y. Two-phase flow and heat transfer. *Transport Phenomena in Multiphase Systems*. 2006; 853-949.
- [13] Glaspell AW, Rouse VJ, Friedrich BK, Choo K. Heat transfer and hydrodynamics of air assisted free water jet impingement at low nozzle-to-surface distances. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019; 132: 138–42.
- [14] Baghel BK, Sridharan A, Murallidharan JS. Heat transfer characteristics of free surface water jet impingement on a curved surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021; 164: 120487.
- [15] Alnak CDE, Varol Y, Firat M, Oztop HF, Ozalp C. Experimental and numerical investigation of impinged water jet effects on heated cylinders for convective heat transfer. *International Journal of Thermal Sciences*. 2019; 135: 493–508.
- [16] Aroonrujiphan C, Nuntadusit C. Flow and Heat Transfer Characteristics of Impinging Bubbly Jet. *Journal of Advance Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2020; 74(1): 68–80.
- [17] Cengel YA, Ghajar AJ. *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications. Natural Convection*. 2015; 533-5.