

คุณลักษณะการถ่ายเทมวลบนแผ่นเรียบที่ถูกพุ่งชนโดยลำอากาศ

Local mass transfer characteristics on a flat plate impinged by an air jet

เอกชัย ปราบนคร¹, สุรัชชัย สนิทใจ²

ห้องปฏิบัติการเทอร์โมไดนามิกส์และการถ่ายเทความร้อน

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

Tel: 02-470-9109, Fax: 02-470-9111, Email: surachai.san@kmutt.ac.th²

Ekkachai Prabnakorn¹, Surachai Sanitjai²

Thermodynamics and Heat Transfer Laboratory (THT)

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi

126 Prachauthit Road, Bangmod, Thung Khru, Bangkok 10140 Thailand

Tel: 02-470-9109, Fax: 02-470-9111, Email: surachai.san@kmutt.ac.th²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาลักษณะของการถ่ายเทมวลสารบนแผ่นเรียบที่ถูกพุ่งชนด้วยลำอากาศ ผิวทดสอบเป็นแผ่นเรียบขนาด 200 x 200 mm² ถูกหล่อเคลือบด้วยลูกเหม็น สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลบนผิวทดสอบทั้งหมด 1,681 จุด ได้ถูกวัดโดยใช้เกจวัดความลึกแบบ LVDT โดยเน้นศึกษาถึงอิทธิพลของค่า Reynolds number ($5,000 < Re < 15,000$) และระยะห่างระหว่างปลายหัวฉีดถึงผิวแผ่นทดสอบ ($1 < H/d < 3$) ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล ผลการทดลองพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลจะมีค่าสูงสุดที่จุด stagnation และมีค่าคงที่ในช่วง $0 < x/d < 0.5$ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลจะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อ $x/d > 0.5$ จนมีค่าต่ำสุดที่ประมาณ $x/d = 1.2$ และจะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อ $x/d > 1.2$ เนื่องจากอิทธิพลของ ring vortex

Abstract

Local mass transfer characteristics on a flat plate impinged by a circular air jet are studied. A flat surface of 200 x 200 mm² is covered by naphthalene. Local mass transfer coefficients at 1681 locations are measured using LVDT depth gauge. The effects of the Reynolds number ($5,000 < Re < 15,000$) and the distance between the jet exit and the test plate ($1 < H/d < 3$) on local mass transfer coefficient are investigated. The experimental results show that the maximum mass transfer coefficient occurs at the stagnation point and is constant in the range of $0 < x/d < 0.5$. For $x/d > 0.5$, the mass transfer coefficient continuously decreases and reaches a minimum value at $x/d = 1.2$. As $x/d > 1.2$, the mass transfer

coefficient continuously increases due to the effect of ring vortex.

Keywords : Local mass transfer, Jet impingement

1. บทนำ

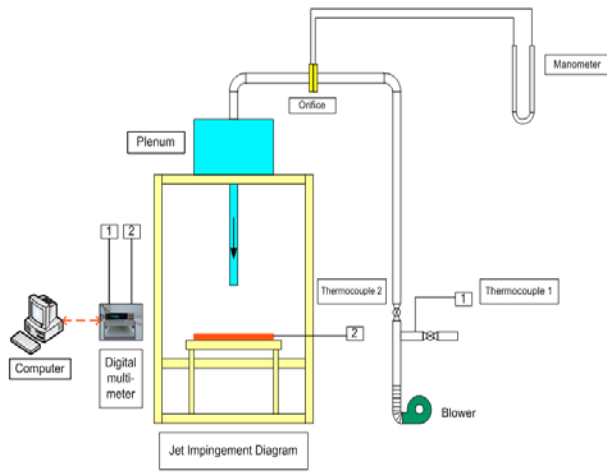
ในปัจจุบันอัตราการปลดปล่อยความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นตามกำลังไฟฟ้าใช้งานของอุปกรณ์เหล่านั้น เช่นหน่วยประมวลผลกลางของคอมพิวเตอร์ ถ้าการระบายความร้อนในอุปกรณ์เหล่านี้ไม่ดีก็จะทำให้อุปกรณ์มีอุณหภูมิสูงและอาจจะเสียหายได้ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเพิ่มสมรรถนะการระบายความร้อน วิธีการใช้ของไหลพุ่งชน (Jet impingement) ได้ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อน โดยพบว่าสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้มาก แต่อย่างไรก็ตามการวัดอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาเพียงอย่างเดียวจากการพุ่งชนของของไหลนั้นมีความยุ่งยากและมีความคลาดเคลื่อนสูงเนื่องจากการสูญเสียความร้อนโดยการนำความร้อนและการแผ่รังสี [1] เพื่อเป็นการลดความคลาดเคลื่อนดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงได้มีการนำเอาเทคนิคการวัดการถ่ายเทมวลสารจากลูกเหม็นมาใช้ในการแก้ปัญหาเหล่านี้ เนื่องจากการถ่ายเทมวลสารจะเกิดได้เฉพาะการพาเท่านั้น ค่าที่ได้จากการวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารสามารถนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนได้ โดยใช้ความคล้ายคลึงกันของการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวล (heat and mass transfer analogy) [2]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทมวลบนแผ่นเรียบที่ถูกพุ่งชนโดยลำอากาศจากหัวฉีดกลม โดยศึกษาถึงอิทธิพลของ ค่า Reynolds number และระยะระหว่างปลายหัวฉีดกับผิวทดสอบ (H/d)

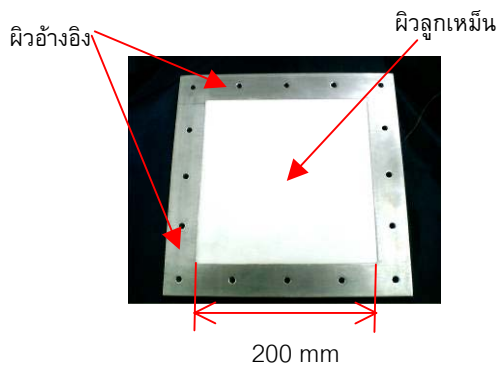
2. อุปกรณ์การทดลอง และ วิธีการทดลอง

อุปกรณ์การทดลองสำหรับการศึกษานี้ประกอบชุดส่งอากาศผ่านหัวฉีด และชุดวัดอัตราการถ่ายเทมวล

รูปที่ 1 แสดงชุดส่งอากาศ โดยอากาศจะถูกอัดผ่าน blower ให้ไหลไปตามท่อ แล้วไหลผ่านชุดออริฟิตเพื่อวัดอัตราการไหล แล้วเข้าสู่กล่องปรับการไหล โดยกล่องนี้ช่วยทำให้การไหลของอากาศมีความราบเรียบและสม่ำเสมอมากขึ้นก่อนที่จะไหลออกผ่านหัวฉีดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 54 mm (d) อากาศที่ออกจากหัวฉีดจะไหลเข้าพุ่งชนแผ่นทดสอบที่ตั้งแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งผิวด้านหน้าของแผ่นทดสอบขนาด 200 x 200 mm² หนา 3 mm จะหล่อด้วยลูกเหม็น อากาศที่ออกจากหัวฉีดด้วยความเร็วที่กำหนด จะเข้าพุ่งชนผิวของลูกเหม็นทำให้เกิดการพาเอามวลลูกเหม็นที่ระเหิดออกจากผิวทดสอบไปกับอากาศ



รูปที่ 1 แผนผังชุดส่งอากาศ



รูปที่ 2 ผิวทดสอบที่หล่อด้วยลูกเหม็น

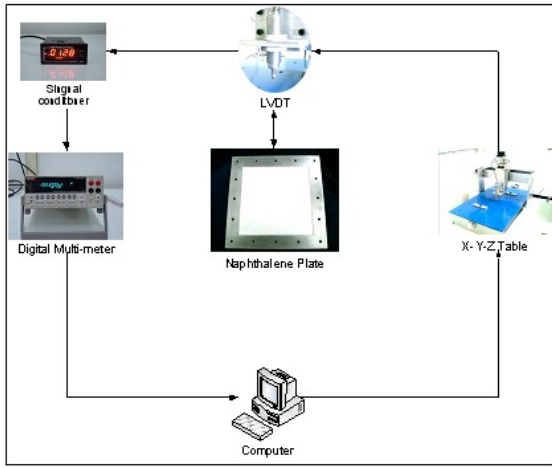
สำหรับชุดวัดอัตราการถ่ายเทมวลนั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 3 โดยชุดวัดนี้ประกอบด้วย โต๊ะทดสอบที่มีชุดขับเคลื่อน 3 แกน, ชุดวัดความลึกผิวแบบ LVDT, Signal conditioner และ Data logger ซึ่งชุดวัดนี้จะใช้วัดความลึกของพื้นผิวทดสอบที่ได้จากการหล่อและหลังจากนำผิวทดสอบไปวางไว้ในลำอากาศเพื่อให้อากาศพุ่งชนพาเอามวลที่ระเหิดออกจากผิวทดสอบ

ลำดับวิธีการทดสอบความลึกของผิวลูกเหม็นแสดงในรูปที่ 4 การทดสอบจะเริ่มต้นจากการที่นำแผ่นทดสอบที่หล่อด้วยลูกเหม็นไปทำการวัดระดับความลึกอ้างอิงของพื้นผิวลูกเหม็น โดยนำแผ่นทดสอบไปวางบนโต๊ะทดสอบที่มีชุดขับเคลื่อน 3 แกน (X-Y-Z Table) ที่ใช้สกรูในการขับเคลื่อนเพื่อกำหนดตำแหน่งการวัดของหัวอ่านความลึกแบบ LVDT ชุดขับเคลื่อนนี้แต่ละแกนจะประกอบด้วยสกรูที่ขับเคลื่อนโดย stepping motor เพื่อควบคุมระยะการเคลื่อนที่ด้วยคอมพิวเตอร์ ในการศึกษานี้ได้กำหนดจุดต่างๆบนผิวชิ้นทดสอบเป็นจำนวน 1681 จุด โดยมีระยะห่างระหว่างจุดประมาณ 4.75 mm เมื่อหัวอ่านความลึกเคลื่อนที่ไปอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการและหยุดนิ่งแล้ว โปรแกรมคอมพิวเตอร์จะส่งการให้อ่านค่าความลึกของผิว โดยอ่านค่าสัญญาณจาก digital multimeter ซึ่งรับสัญญาณมาจากชุด signal conditioner ของหัวอ่านความลึกแบบ LVDT ค่าสัญญาณที่อ่านได้จะนำมาใช้คำนวณหาความลึกของผิวโดยการสอบเทียบค่าสัญญาณกับเกจวัดความลึกมาตรฐาน



รูปที่ 3 เครื่องมือวัดอัตราการถ่ายเทมวลของผิวทดสอบแบบอัตโนมัติ 3 แกน (X-Y-Z Table)

หลังจากทำการวัดความลึกของผิวทดสอบที่ได้จากการหล่อเรียบร้อยแล้วก็นำแผ่นทดสอบไปวางไว้ในลำอากาศที่ออกจากหัวฉีดเพื่อทดสอบการถ่ายเทมวล โดยวางตำแหน่งให้จุดศูนย์กลางของลำอากาศอยู่ตรงแกนกลางของแผ่นทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 1 แล้วทำการทดลองที่แต่ละ H/d = 1, 2, 3 ที่ค่า Reynolds number = 5000, 10000, 15000 โดยใช้เวลาในการทดสอบประมาณ 4 ชั่วโมง จากนั้นนำแผ่นทดสอบมาทำการวัดความลึกของผิวทดสอบอีกครั้งหนึ่ง ผลต่างของความลึกของผิวทดสอบที่ได้จากการวัดทั้งสองครั้งนี้จะบอกถึงปริมาณของมวลลูกเหม็นที่ถูกพาออกไปโดยอากาศที่พุ่งชน



รูปที่ 4 แผนผังการทำงานของชุดวัดความลึกของผิวทดสอบ

3. การวิเคราะห์การถ่ายเทมวล

จากผลต่างของความลึกของผิวทดสอบที่ได้จากการวัดทั้งสองครั้งนั้นสามารถนำมาคำนวณหาอัตราการพาของมวลสารต่อพื้นที่ (\dot{m}) ได้ดังสมการที่ (1) ดังนี้

$$\dot{m} = \rho_s \frac{\partial z}{\partial t} \quad (1)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (h_m) สามารถคำนวณได้ดังนี้ [2]

$$h_m = \frac{\dot{m}}{\rho_{v,w} - \rho_{v,\infty}} \quad (2)$$

หรือ

$$h_m = \rho_s \frac{\partial z / \partial t}{\rho_{v,w}} \quad (3)$$

โดยที่ $\rho_{v,\infty} = 0$ เนื่องจากอากาศที่ออกจากหัวฉีดไม่มีไอน้ำของลูกเหม็น ส่วนการคำนวณหาค่าความหนาแน่นของไอลูกเหม็น ($\rho_{v,w}$) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\rho_{v,w} = \frac{P_{v,w}}{RT_w} \quad (4)$$

โดยค่าความดันไออิ่มตัว ($P_{v,w}$) ของลูกเหม็นสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

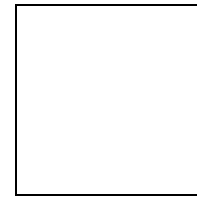
$$T \log P_{v,w} = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i E_i(x) \quad (5)$$

เมื่อ $a_0 = 301.6247$; $a_1 = 791.4937$; $a_2 = -8.2536$;
 $a_3 = 0.4043$; $x = (T-287)/57$; $E_1(x) = x$; $E_2(x) = 2x^2 - 1$;
 $E_3(x) = 4x^3 - 3x$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลที่คำนวณได้จะนำเสนอในรูปแบบของมิติ Sherwood number (Sh) ซึ่งสามารถคำนวณค่าได้จากสมการดังนี้

$$Sh = \frac{h_m d}{D_{naph}} \quad (6)$$

สำหรับปริมาณของอากาศที่ออกจากหัวฉีดนั้นจะนำเสนอในรูปแบบของค่า Reynolds number (Re) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้



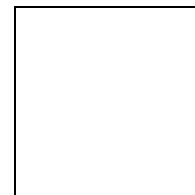
(7)

4. ผลการทดลอง

ผลการศึกษาในครั้งนี้จะแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ (1) ลักษณะความเร็วของอากาศจากหัวฉีด (2) ภาพการสังเกตลักษณะการฟุ้งชนของอากาศบนแผ่นเรียบ และ (3) การถ่ายเทมวลจากการฟุ้งชนของอากาศบนแผ่นเรียบ

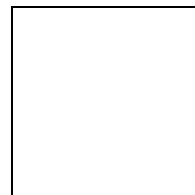
4.1 ลักษณะของความเร็วของอากาศจากหัวฉีด

ความเร็วของอากาศที่ออกจากหัวฉีดที่ Reynolds number เท่ากับ 10000 ได้ถูกวัดด้วย hot wire anemometer เพื่อศึกษาลักษณะของการไหลของอากาศที่ออกจากหัวฉีด โดยวัดค่า average velocity และค่า turbulence intensity ที่ระยะห่างจากปลายหัวฉีด 5 mm ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ



รูปที่ 5 average velocity ของอากาศที่ออกจากหัวฉีดในแนว

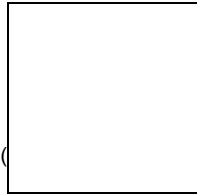
แกน X



รูปที่ 6 ค่า turbulence intensity ของอากาศที่ออกจากหัวฉีดในแนวแกน X

จากผลการทดลองในรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าความเร็วที่ออกจากหัวฉีดมีลักษณะสมมาตรรอบแกน $X=0$ และมีความสม่ำเสมอของความเร็วดลอดหน้าตัดของหัวฉีด ความเร็วของอากาศจะลดลงอย่างรวดเร็วที่บริเวณใกล้กับขอบด้านในของหัวฉีดทั้งด้านซ้ายและขวา

($x/d = -0.5$ และ $x/d = 0.5$) สำหรับค่า turbulence intensity



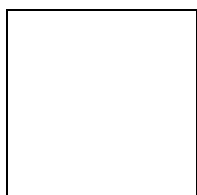
() ที่ $Re = 10000$ ดังแสดงในรูปที่ 6 นั้น จะ

เห็นได้ว่าการไหลของอากาศออกจากหัวฉีดเป็นการไหลแบบ turbulent flow ที่มีค่า turbulence intensity ที่แกนกลางของหัวฉีด ประมาณ 4% โดยที่ค่า turbulence intensity จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อระยะห่างจากแกนกลางของหัวฉีดเพิ่มขึ้น จนมีค่าสูงสุดที่ x/d ประมาณ 0.5 , -0.5 ทั้งนี้เป็นผลมาจากอิทธิพลของ shear layer

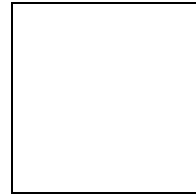
4.2 ภาพการสังเกตลักษณะการฟุ้งชนของอากาศบนแผ่นเรียบ

การทดลองนี้ทำการศึกษาลักษณะการไหลของอากาศที่ฟุ้งชนแผ่นเรียบที่เกิดขึ้นในสถานะต่างๆ โดยประยุกต์ใช้เทคนิค Smoke wire flow visualization [3] ซึ่งเป็นเทคนิคการถ่ายภาพการไหลของอากาศที่มีการป้อนควันสีขาวให้ไหลไปตามกระแสการไหลของอากาศเพื่อให้ถ่ายภาพการไหลได้ชัดเจน เทคนิคนี้เริ่มจากการใช้เส้นลวดความต้านทานสูงขนาดเล็กเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.15 mm มาทำการขึงเส้นลวดขวางเส้นทางการไหลของอากาศที่ออกจากหัวฉีด แล้วทำน้ำมันบนเส้นลวด ซึ่งน้ำมันเหล่านี้จะรวมตัวกันเป็นหยดๆ เกาะบนขดลวดที่ระยะห่างสม่ำเสมอ หลังจากนั้นก็จ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่เส้นลวดจนเส้นลวดร้อนแดงเพื่อทำให้เกิดการเผาไหม้ของน้ำมันที่อยู่บนเส้นลวดจนเกิดควันสีขาวไหลไปตามการไหลของอากาศ ภาพที่เกิดจากการไหลของควันสีขาวจะถูกบันทึกด้วยกล้องถ่ายรูปเพื่อนำมาวิเคราะห์ลักษณะการฟุ้งชนของอากาศบนแผ่นเรียบ

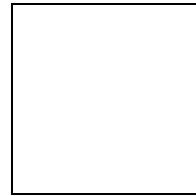
ลักษณะการไหลของอากาศที่ฟุ้งชนแผ่นทดสอบที่ระยะ $H/d = 1, 2, 3, Re = 2000$ นั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 7-9 ตามลำดับโดยจะสังเกตเห็นได้ว่าที่ระยะ $H/d = 1$ และ 2 นั้น ควันมีทิศทางการไหลในแนวแกนอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นอากาศที่ไหลเข้าฟุ้งชนแผ่นเรียบจึงมีความสม่ำเสมอสูง เมื่ออากาศเข้าฟุ้งชนแผ่นเรียบแล้วจะไหลออกทางด้านข้าง ทำให้เกิด ring vortex ขึ้นในบริเวณ wall jet region โดย ring vortex นี้จะไหลออกไปทางด้านข้าง อย่างไรก็ตามเมื่อ $H/d = 3$ จะสังเกตเห็นได้ว่าควันมีทิศทางการไหลในแนวแกนไม่สม่ำเสมอ โดยมี ring vortex เกิดขึ้นในแนวแกน ซึ่ง ring vortex นี้จะไหลไปในแนวแกนจะเข้าปะทะกับแผ่นเรียบแล้วสลายตัวไป ส่วนบริเวณ wall jet region นั้นจะยังคงมี ring vortex เกิดขึ้นแต่ไม่ชัดเจนและสลายตัวไปอย่างรวดเร็ว บริเวณ wall jet region นี้จะมีค่า turbulence intensity สูง



รูปที่ 7 ลักษณะการไหลของอากาศฟุ้งชนแผ่นทดสอบ ที่ $H/d = 1$



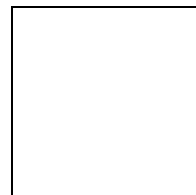
รูปที่ 8 ลักษณะการไหลของอากาศฟุ้งชนแผ่นทดสอบ ที่ $H/d = 2$



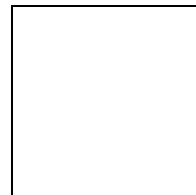
รูปที่ 9 ลักษณะการไหลของอากาศฟุ้งชนแผ่นทดสอบ ที่ $H/d = 3$

4.3 การถ่ายเทมวลจากการฟุ้งชนของอากาศบนแผ่นเรียบ

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลจากการฟุ้งชนของอากาศบนแผ่นเรียบแสดงในเทอมของ Sherwood number ที่จุดต่างๆบนผิวชั้นทดสอบขนาด $20 \times 20 \text{ cm}^2$ จำนวน 1681 จุด ได้แสดงไว้ในรูปที่ 10 ซึ่งเป็นกราฟ 3 มิติ และรูปที่ 11 ซึ่งเป็นกราฟ contour



รูปที่ 10 การกระจายของค่า Sherwood number ที่ $H/d = 1, Re = 10000$ ในรูปแบบ 3 มิติ



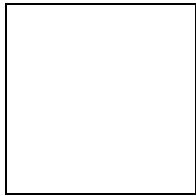
รูปที่ 11 การกระจายของค่า Sherwood number ที่ $H/d = 1, Re = 10000$ ในรูปแบบ contour

จากกราฟในรูปที่ 10 และ 11 จะเห็นได้ว่าการกระจายของค่า Sherwood number ที่ $H/d = 1, Re = 10000$ นั้น มีลักษณะที่สอดคล้องกับลักษณะการไหลของอากาศที่เข้าฟุ้งชนแผ่นทดสอบ กล่าวคือ ค่า Sherwood number จะมีค่าสูงและค่อนข้างคงที่ที่บริเวณแกนกลาง ($-0.5 < x/d < 0.5$) ทั้งนี้เนื่องจากความเร็วของลำอากาศที่ไหลเข้าฟุ้งชนมีค่าค่อนข้างคงที่ ค่า Sherwood number ลดลงอย่างต่อเนื่อง

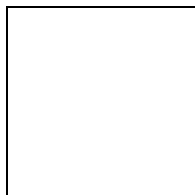
เนื่องเมื่อ $x/d > 0.5$ เนื่องจากความเร็วในแนวรัศมีมีค่าลดลง พร้อมทั้งความหนาของชั้น concentration boundary layer มีค่าสูงขึ้นทำให้ความต้านทานการถ่ายเทมวลมีค่าสูงขึ้น ค่า Sherwood number ที่ลดลงอย่างต่อเนื่องจะมีค่าต่ำสุดที่ $x/d = 1.2$ ซึ่งเป็นบริเวณที่อากาศหลังจากพุงชนแผ่นเรียบแล้วไหลออกไปทางด้านข้างเกิดการยกตัว (flow separation) ทำให้เกิด ring vortex ขึ้น โดยจะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อ $x/d > 1.2$ ค่า Sherwood number จะมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะอิทธิพลของ ring vortex ที่ส่งเสริมการพามวลสาร โดย ring vortex จะนำเอาอากาศที่มีไอของมวลสารที่ความเข้มข้นต่ำเข้าปะทะกับแผ่นทดสอบทำให้การพามวลสารมีอัตราสูงขึ้น

อิทธิพลของ H/d ต่อการถ่ายเทมวล

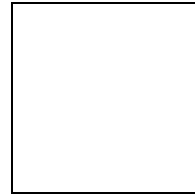
การศึกษานี้ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของระยะห่างจากทางออกของหัวฉีดถึงแผ่นทดสอบ (H) โดยทำการทดลองที่ $H/d = 1, 2$ และ 3 โดยรูปที่ 12 - 14 แสดงอิทธิพลของค่า H/d ต่อค่า Sherwood number ที่ Reynolds number เท่ากัน 5000, 10000, และ 15000 ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า Sherwood number ในช่วง $0 < x/d < 1.2$ ที่ $H/d = 1, 2$ และ 3 มีค่าใกล้เคียงกันทั้งนี้เนื่องจากความเร็วของแกนของลำอากาศ (potential core of jet) ที่ไหลเข้าพุงชนแผ่นทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งในอนาคตจะทำการวิจัยที่ H/d มีค่าสูงขึ้นกว่านี้ อย่างไรก็ตามที่ $x/d > 1.2$ จะสังเกตเห็นอิทธิพลของ H/d ต่ออัตราการถ่ายเทมวลสาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ Reynolds number สูงๆ เช่น $Re = 15000$ โดยจะเห็นได้ว่าที่ H/d ต่ำ ค่า Sherwood number จะมีค่าสูงกว่าค่าที่ H/d สูงๆ ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า ความเข้มของ ring vortex ที่เกิดขึ้นที่ H/d ต่ำๆ จะมีค่าสูงกว่า ทำให้สามารถนำเอาอากาศที่มีไอความเข้มข้นต่ำของมวลสารเข้าปะทะกับแผ่นทดสอบได้สูงทำให้อัตราการถ่ายเทมวลสูงขึ้น



รูปที่ 12 Sherwood number ในแนวแกน X ที่ $Re = 5000$ ที่ H/d ต่างๆ



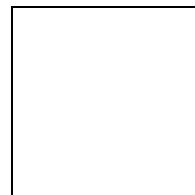
รูปที่ 13 Sherwood number ในแนวแกน X ที่ $Re = 10000$ ที่ H/d ต่างๆ



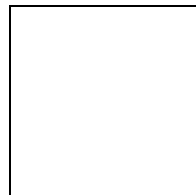
รูปที่ 14 Sherwood number ในแนวแกน X ที่ $Re = 15000$ ที่ H/d ต่างๆ

อิทธิพลของ Reynolds number ต่อการถ่ายเทมวล

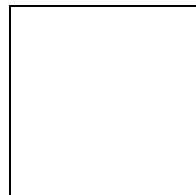
งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าพุงชนแผ่นทดสอบต่อการถ่ายเทมวล โดยความเร็วของอากาศนี้จะนำเสนอในรูปแบบแปรไร้มิติ ของค่า Reynolds number (Re) โดยทำการทดลองที่ $Re = 5000, 10000$ และ 15000 ผลการทดลองหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลนั้นแสดงในเทอม Sherwood number ได้แสดงไว้ในรูปที่ 15 - 17 ที่ $H/d = 1, 2$ และ 3 ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่า Sherwood number เพิ่มขึ้นเมื่อค่าของ Reynolds number เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของความเร็วที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาของชั้น concentration boundary layer มีความหนาลดลง ทำให้การถ่ายเทมวลของลูกเหม็นกับอากาศทำได้ง่ายยิ่งขึ้น นอกจากนี้ค่าของ Reynolds number ที่เพิ่มขึ้นยังมีผลทำให้อิทธิพลของ ring vortex ในการส่งเสริมการพาของมวลเพิ่มมากขึ้นในบริเวณ $x/d > 1.2$ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ $H/d = 1$



รูปที่ 15 Sherwood number ในแนวแกน X ที่ $H/d = 1$ ที่ Re ต่างๆ



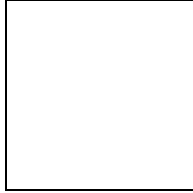
รูปที่ 16 Sherwood number ในแนวแกน X ที่ $H/d = 2$ ที่ Re ต่างๆ



รูปที่ 17 Sherwood number ในแนวแกน X ที่ $H/d = 3$
ที่ Re ต่างๆ

Normalized Sherwood number

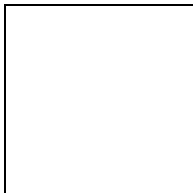
จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่า Sherwood number นั้นจะเป็นฟังก์ชันของ Reynolds number, คุณสมบัติของไอลูมิเนียมหรือ Schmidt number และ ตำแหน่งบนแผ่นทดสอบ ดังนั้นค่า Sherwood number ที่ตำแหน่งต่างๆ สามารถเขียนอยู่ในรูปของ



โดยทั่วไปแล้วที่ค่า m มีค่าเท่ากับ 0.5 และ n มีค่าเท่ากับ 1/3 สำหรับการไหลของของไหลที่มีค่า turbulence intensity ต่ำ ผลการทดลองนี้สามารถนำเสนอในรูปของ normalized Sherwood number



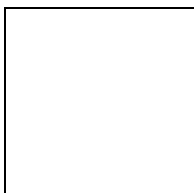
() ดังแสดงในรูปที่ 18 ที่ $H/d = 1$ โดยจะเห็นได้ว่า normalized Sherwood number เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 15 นั้นมีค่าใกล้เคียงกันมาก ในช่วง $0 < x/d < 1.2$ สำหรับ $Re = 5000, 10000, \text{ และ } 15000$ และที่จุด $x/d = 0$ ค่า Sherwood number มีค่าประมาณ 1.17



รูปที่ 18 Normalized Sherwood number ที่ $H/d=1$

Average Sherwood number

ค่า average Sherwood number ที่ H/d ต่างๆ ตามแนวแกน X แสดงในรูปที่ 19 โดยจะเห็นได้ว่าค่า average Sherwood number มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ Reynolds number เพิ่มขึ้น และ H/d ลดลง



รูปที่ 19 Average Sherwood number ที่ H/d ต่างๆ

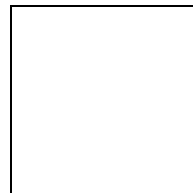
5. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงลักษณะการไหลของอากาศที่เข้าฟุ้งชนแผ่นเรียบและการถ่ายเทมวลสาร ถ่ายภาพการไหลของอากาศทำให้สามารถเข้าใจถึงคุณลักษณะการไหลของอากาศทั้งก่อนฟุ้งชนแผ่นเรียบและหลังฟุ้งชนแผ่นเรียบ และทราบถึงกลไกการถ่ายเทมวลสารจากการฟุ้งชนของอากาศ ผลการทดลองวัดอัตราการถ่ายเทมวลสารบนแผ่นเรียบที่ถูกฟุ้งชนด้วยล้าอากาศที่ 1681 ตำแหน่ง ในช่วงของ $5000 < Re < 15000$ และ $1 < H/d < 3$ พบว่า เมื่อ Reynolds number เพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารสูงขึ้นในทุกตำแหน่ง สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารมีค่าสูงสุดที่ $x/d = 0$ และจะลดลงเมื่อ x/d มีค่าเพิ่มขึ้น จนมีค่าต่ำสุดที่ $x/d = 1.2$ และเมื่อ $x/d > 1.2$ การถ่ายเทมวลสารจะเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการส่งเสริมการถ่ายเทมวลสารของ ring vortex ที่เกิดขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ H/d ต่ำ ค่า Reynolds number ที่สูงขึ้นทำให้การส่งเสริมการพามวลโดย ring vortex เพิ่มขึ้น ส่วนอิทธิพลของ H/d นั้น จะพบว่า H/d จะไม่มีผลต่อการส่งเสริมการถ่ายเทมวลสารในบริเวณ $0 < x/d < 1.2$ ในช่วงของ Reynolds number ที่ทำการศึกษา แต่ที่ $x/d > 1.2$ จะพบว่า ค่า H/d ที่ต่ำลงจะทำให้การถ่ายเทมวลสารเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจจะเนื่องมาจาก ความเข้มข้นของ ring vortex มีค่าเพิ่มขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

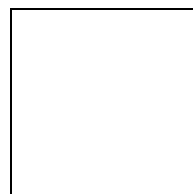
งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนจาก เงินงบประมาณ ประจำปี 2546-2547 ภายใต้ทุนวิจัยพระจอมเกล้าธนบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

7. รายการสัญลักษณ์



ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของลูมิเนียมใน

อากาศ (m^2/s)



เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด (m)

ทดสอบ (m)

ระยะห่างระหว่างหัวฉีดถึงแผ่น

อุณหภูมิที่ผิวลูกเหม็น (K)

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (m/s)

ความเร็วของอากาศ (m/s)

อัตราการถ่ายเทมวลต่อพื้นที่ (kg/s

เวลาในการทดลองที่ผิวทดสอบถูก

m²)

อากาศพุ่งชน (s)

ความดันไอของลูกเหม็น (Pa)

ผลต่างของระดับผิวทดสอบก่อนและ

gas constant ของลูกเหม็น = 64.89

หลังทดลอง (m)

(Nm/kg K)

dynamic viscosity (kg/m s)

Reynolds number

kinematic viscosity (m²/s)

Sherwood number

ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m³)

ความหนาแน่นของลูกเหม็นใน

สถานะของแข็ง (kg/m³)

ความหนาแน่นของไอลูกเหม็นที่ผิว

ลูกเหม็น (kg/m³)

เอกสารอ้างอิง

- [1] E. R. G. Eckert and Drake, R. M., "Analysis of Heat and Mass Transfer", McGraw-Hill, New York, 1972.
- [2] R.J. Goldstein, and Cho, H. H., (1995), A Review of Mass Transfer Measurements Using Naphthalene Sublimation, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 10, pp. 416-434.
- [3] C. Cornaro, Fleischer, A.S. and Goldstein, R.J., (1999) Flow visualization of a round jet impinging on cylindrical surfaces, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 20 pp. 66-78.