

บทที่ 3

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

บทนี้เป็นการศึกษาเชิงคำนวณการกระแทกของเจ็ทของอากาศลงบนแผ่นเรียบ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) ในการคำนวณปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อน ซึ่งในที่นี้เรากำหนดให้พื้นผิวตกระแทกมีฟลักซ์ความร้อนที่เป็น 1500 W/m^2 อุณหภูมิของเจ็ทเป็น 300 K และคุณสมบัติเชิงความร้อนของอากาศมีค่าคงที่ คือ $\rho = 1.1614 \text{ kg/m}^3$, $C_p = 1.007 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ และ $k = 0.0263 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ในการศึกษาเราทำการทดสอบการไหลแบบราบเรียบที่ $Re = 400-1500$ และ $H/D_j = 2-6$ สำหรับโจทย์การกระแทกของเจ็ทของอากาศลงบนแผ่นเรียบในที่นี้กำหนดให้เป็นการไหลในสองมิติแบบสมมาตร (2D Axial-symmetric flow) ก่อนที่จะพิจารณาผลกระทบของ Re และ H/D_j เราจะตรวจสอบความถูกต้องของซอฟต์แวร์ที่เลือกใช้ ซึ่งได้แก่ COMSOL ด้วยการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากเอกสารอ้างอิงเสียก่อน

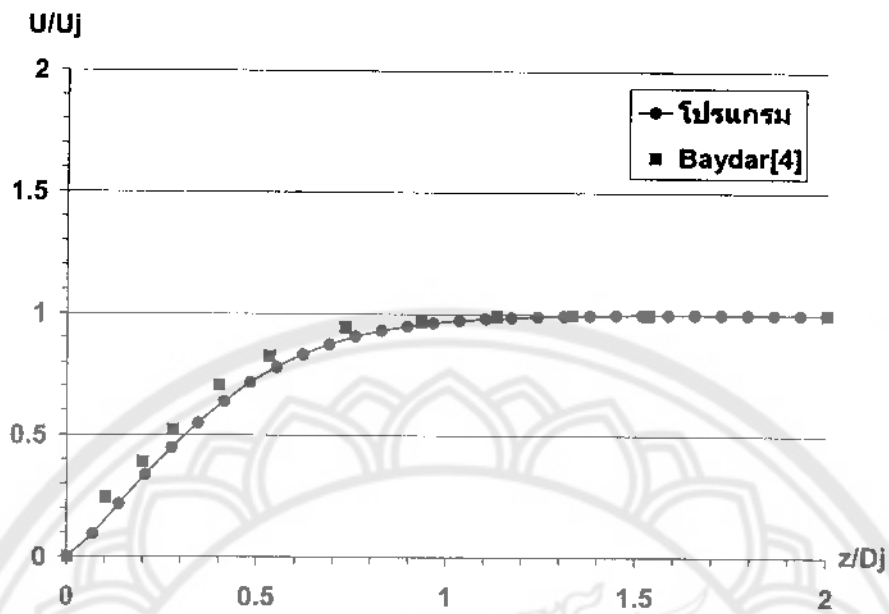
3.1 การเปรียบเทียบผลการคำนวณจากโปรแกรม COMSOL กับผลการทดลองจากเอกสารอ้างอิง (Program validation)

ในหัวข้อนี้เป็นการนำผลที่ได้จากการประมวลผลทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลการทดลองจากเอกสารอ้างอิง โดยแบ่งการพิจารณาออกเป็น ความเร็วที่แกนสมมาตร ซึ่งอยู่ในรูป U/U_j และการถ่ายเทความร้อนในรูปของตัวแปรไร้มิติ Nusselt Number เฉพาะที่

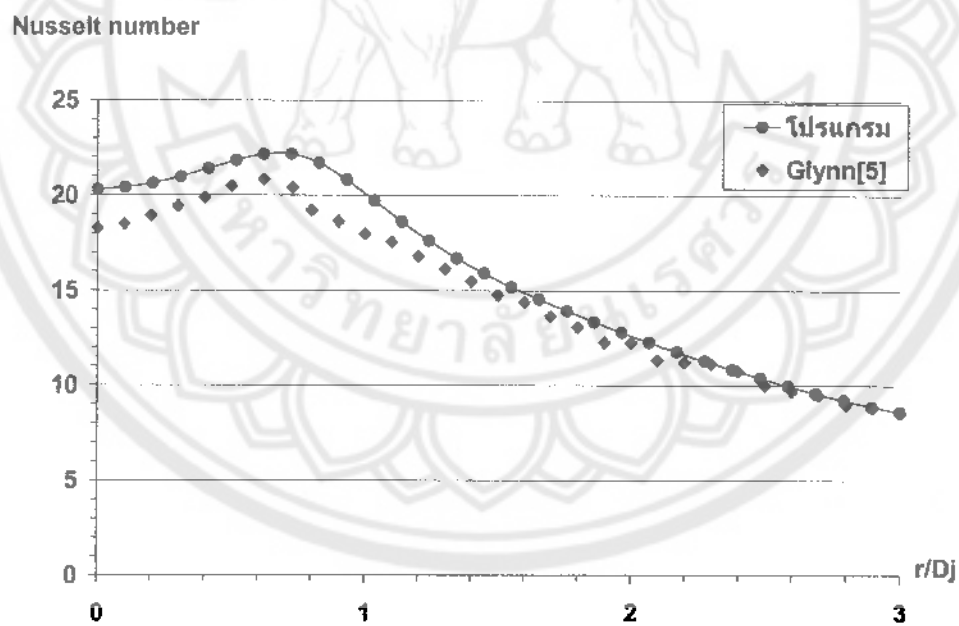
การเปรียบเทียบความเร็วของเจ็ทที่แกนสมมาตรกับผลการทดลองของ Baydar [4] รูปที่ 3.1 ที่ $Re = 1000$ และ $H/D_j = 2$ พบว่า ผลที่ได้จากการคำนวณทางโปรแกรม COMSOL สอดคล้องกับผลการทดลองของ Baydar [4] โดยมีความแตกต่างกัน 1.13% โดยเฉลี่ย

ส่วนในการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนจะทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Glynn และคณะ [5] ดังรูปที่ 3.2 ที่ $Re = 1000$ และ $H/D_j = 2$ และกำหนดให้ค่าฟลักซ์ความร้อนของแบบจำลองมีค่าเท่ากับ 1200 W/m^2 ผลที่ได้จากการคำนวณทางโปรแกรม COMSOL สอดคล้องกับผลการทดลองของ Glynn และคณะ [5] โดยมีความแตกต่างกัน 6.14% โดยเฉลี่ย

จากการตรวจสอบความถูกต้องของซอฟต์แวร์ที่เลือกใช้ ด้วยการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากเอกสารอ้างอิง พบว่า ค่าที่ได้จากการประมวลผลทางโปรแกรมมีผลใกล้เคียงกับเอกสารอ้างอิง ดังนั้นจึงสามารถนำซอฟต์แวร์มาใช้ในโครงการนี้ได้



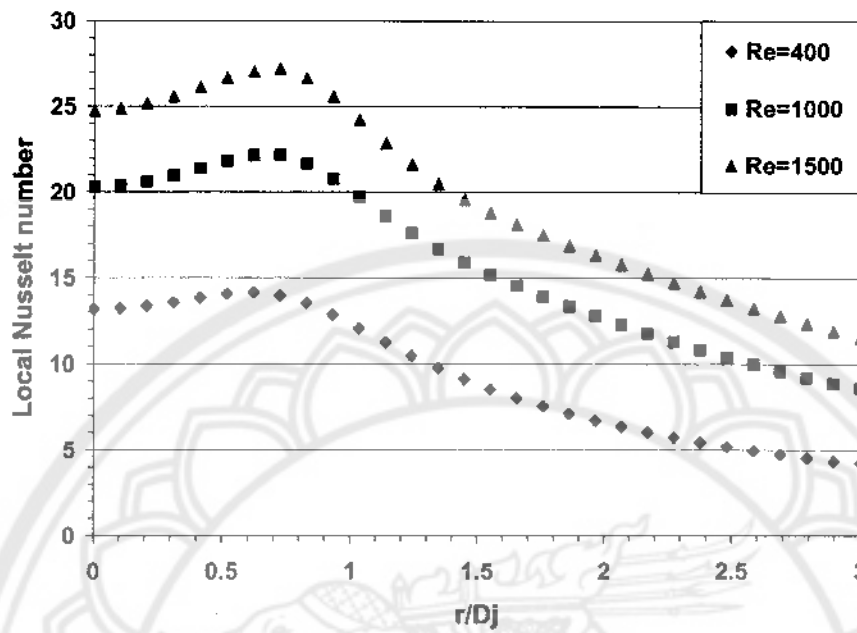
รูปที่ 3.1 การเปรียบเทียบผลของความเร็วเจ็ตามแกนสมมาตรกับผลการทดลองของ Baydar [4] ที่ $Re = 1000$ และ $H/D_j = 2$



รูปที่ 3.2 การเปรียบเทียบผลของการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่กับผลการทดลองของ Glynn และคณะ [5] ที่ $Re = 1000$ และ $H/D_j = 2$

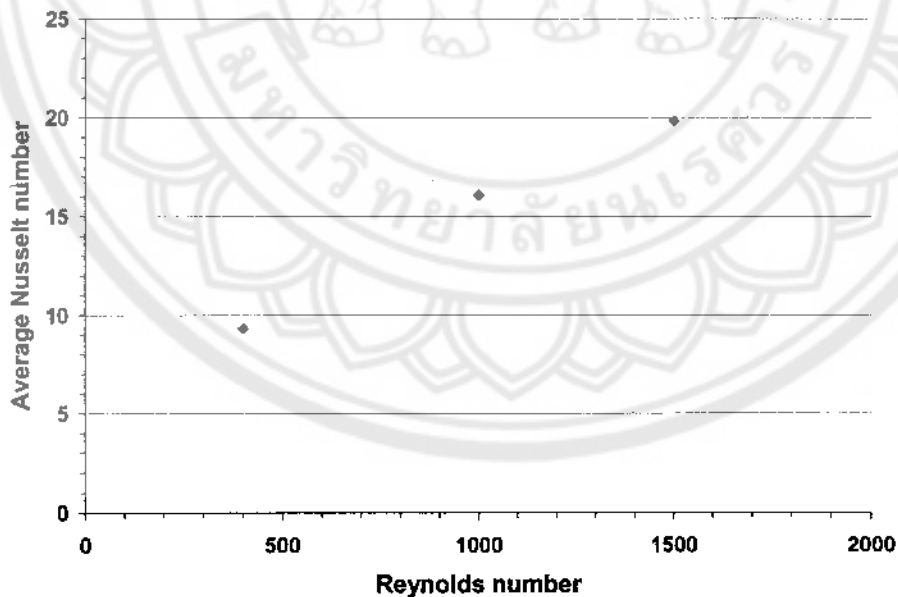
3.2 ผลกระทบของค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number)

สำหรับหัวข้อนี้เป็นการพิจารณาที่ $Re = 400-1500$ และ $H/D_j = 2-6$ ซึ่งความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของแผ่นเป้าหมายจะพิจารณาอยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ ค่าตัวเลขนัสเซลท์เฉพาะที่ (Local Nusselt number ; Nu) ดังรูปที่ 3.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซลท์เฉพาะที่ที่ $Re = 400-1500$ และ $H/D_j = 2$ พบว่า สำหรับทุกๆค่า Re ที่เพิ่มขึ้น ลักษณะแนวโน้มของค่า Nu มีลักษณะเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ในช่วงบริเวณ $0 \leq r/D_j \leq 0.8$ ค่า Nu มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีค่า Nu สูงที่สุดที่ $r/D_j = 0.8$ หลังจากนั้นที่บริเวณ $r/D_j > 0.8$ ค่า Nu มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องสำหรับทุกค่า Re ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบค่า Re ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของแผ่นเป้าหมาย โดยพิจารณาที่ค่าตัวเลขนัสเซลท์เฉลี่ย (Average Nusselt Number) ที่ $Re = 400-1500$ และ $H/D_j = 2$ ดังรูปที่ 3.4 พบว่า ที่ค่า Re เท่ากับ 400 ค่า \overline{Nu} มีค่าเท่ากับ 9.26 และเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้นเท่ากับ 1000 และ 1500 ค่า \overline{Nu} มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 15.78 และ 19.41 ตามลำดับ ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้น ส่งผลให้แผ่นเป้าหมายมีการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้น รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะสนามการไหลที่ $Re = 400-1500$ และ $H/D_j = 2$ พบว่า สนามการไหลของเจ็ทของอากาศหลังจากตกกระทบกับแผ่นเป้าหมาย สังเกตบริเวณสัญลักษณ์วงรีเส้นประสีแดง มีลักษณะดันตัวออกไปทางด้านข้างและไหลแนวซิดไปกับแผ่นเป้าหมายได้ไกลกว่า เมื่อค่า Re มีค่าเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นทำการวัดค่าความเร็วของเจ็ทตามระยะแกน r ที่ $z = 0.001$ ดังรูปที่ 3.6 โดยพิจารณาอยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ U/U_j ที่ $Re = 400 - 1500$ และ $H/D_j = 2$ พบว่า ลักษณะแนวโน้มของค่า U/U_j มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ บริเวณ $0 \leq r/D_j \leq 0.8$ ค่า U/U_j มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีค่าสูงที่สุดที่ $r/D_j = 0.8$ หลังจากนั้นที่บริเวณ $r/D_j > 0.8$ ค่า U/U_j มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องสำหรับทุกค่า Re ซึ่งผลของค่า U/U_j มีความสอดคล้องกับผลของค่า Nu ดังนั้น ค่า Nu ที่เพิ่มขึ้นในช่วงบริเวณ $0 \leq r/D_j \leq 0.8$ และสูงที่สุดที่ $r/D_j = 0.8$ เนื่องจาก เจ็ทผนัง (Wall jet) มีโมเมนตัมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงส่งผลให้ช่วงบริเวณนี้มีการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุด และหลังจาก $r/D_j > 0.8$ ค่า Nu มีค่าลดลง เนื่องจาก เจ็ทผนังมีการถ่ายเทโมเมนตัมบางส่วนให้กับอากาศแวดล้อม และพบว่าเมื่อค่า Re มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แผ่นเป้าหมายมีการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้น เนื่องจากโมเมนตัมของเจ็ทมีค่าเพิ่มขึ้นนั่นเอง



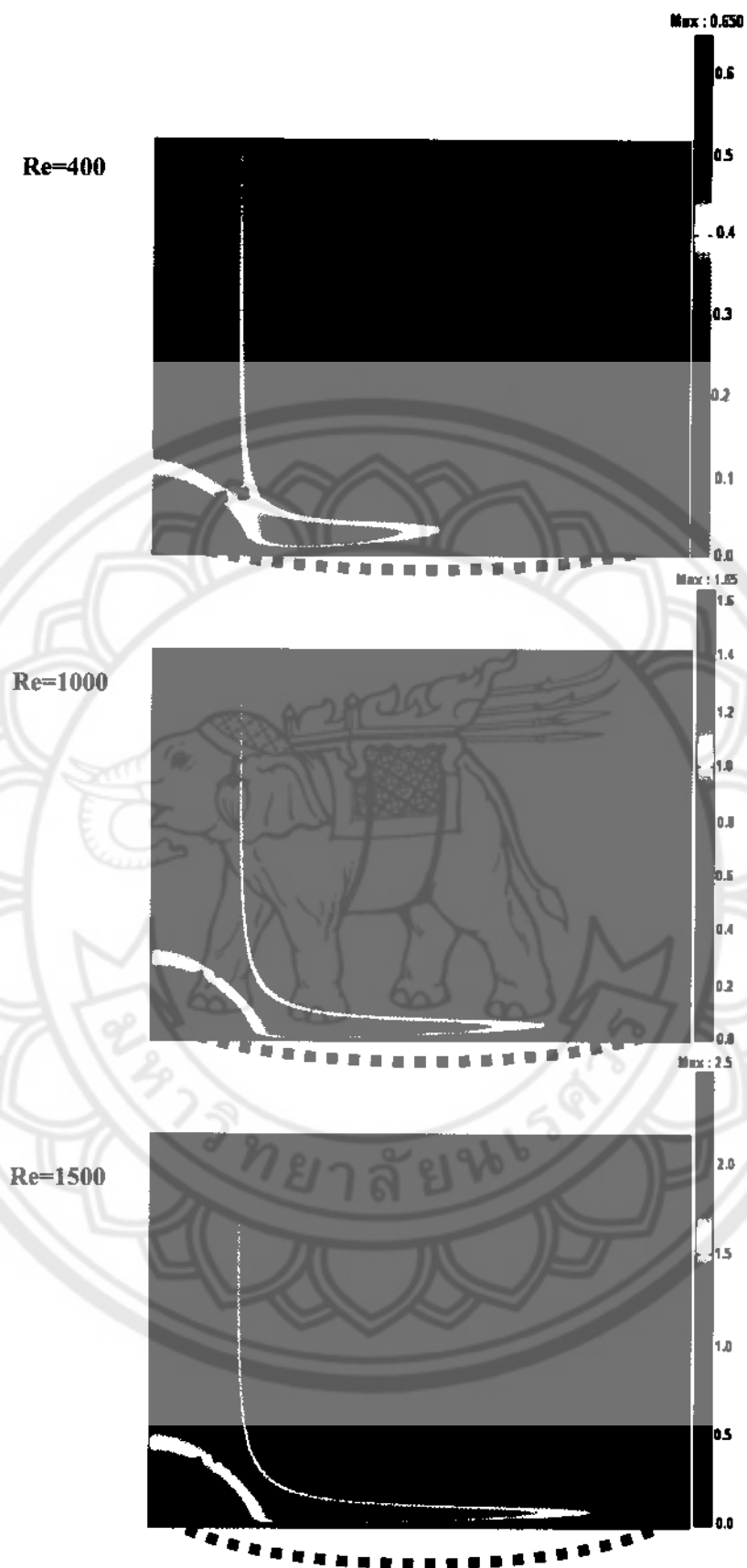
รูปที่ 3.3 การเปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉพาะที่ (Local nusselt number)

Re = 400-1500 และ $H/D_j = 2$

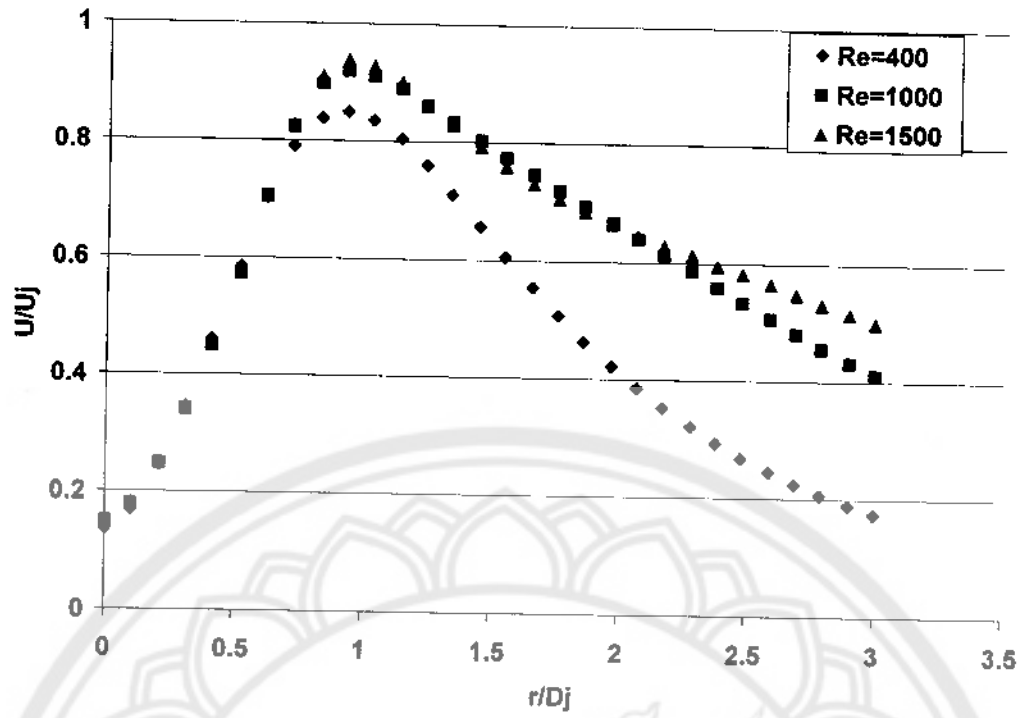


รูปที่ 3.4 การเปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉลี่ย (Average nusselt number)

Re = 400-1500 และ $H/D_j = 2$



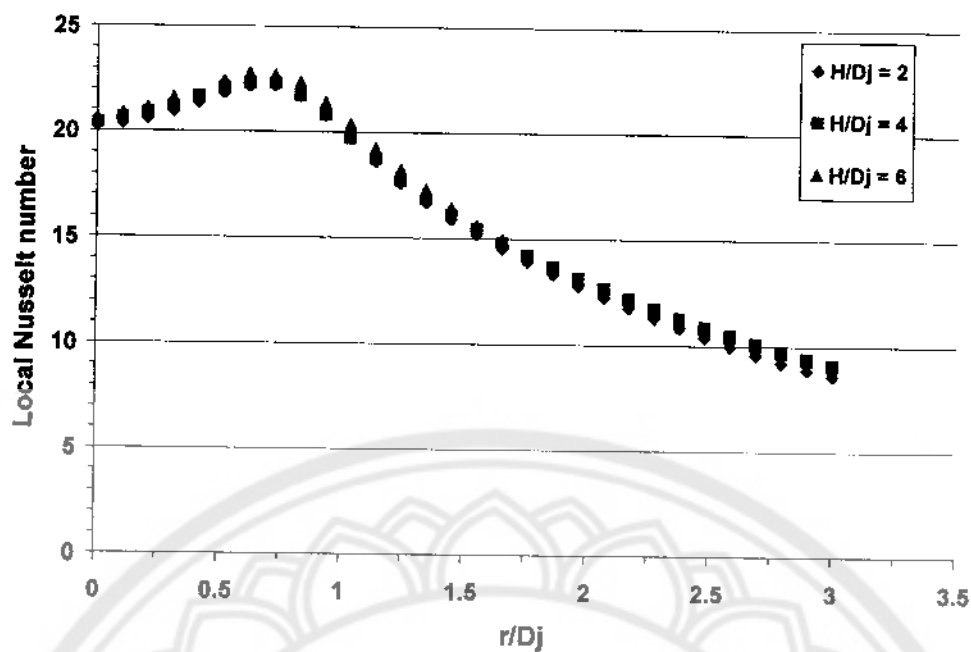
รูปที่ 3.5 ลักษณะสนามการไหลที่ $Re = 400 - 1500$ และ $H/D_j = 2$



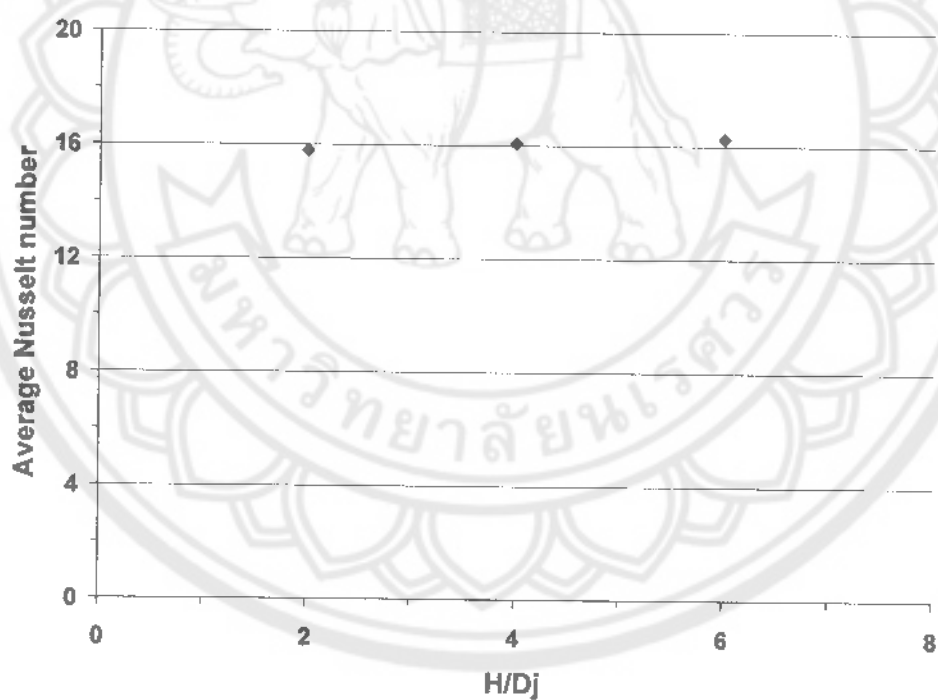
รูปที่ 3.6 ความเร็วของเจ็ตตามระยะแกน r ที่ $z = 0.001$ ซึ่งอยู่ในรูปตัวแปรไร้หน่วย U/U_j ,
ที่ $Re = 400 - 1500$ และ $H/D_j = 2$

3.3 ผลกระทบของค่าระยะห่างระหว่างทางออกหัวฉีดถึงแผ่นเป้าหมาย (jet-to-plate spacing)

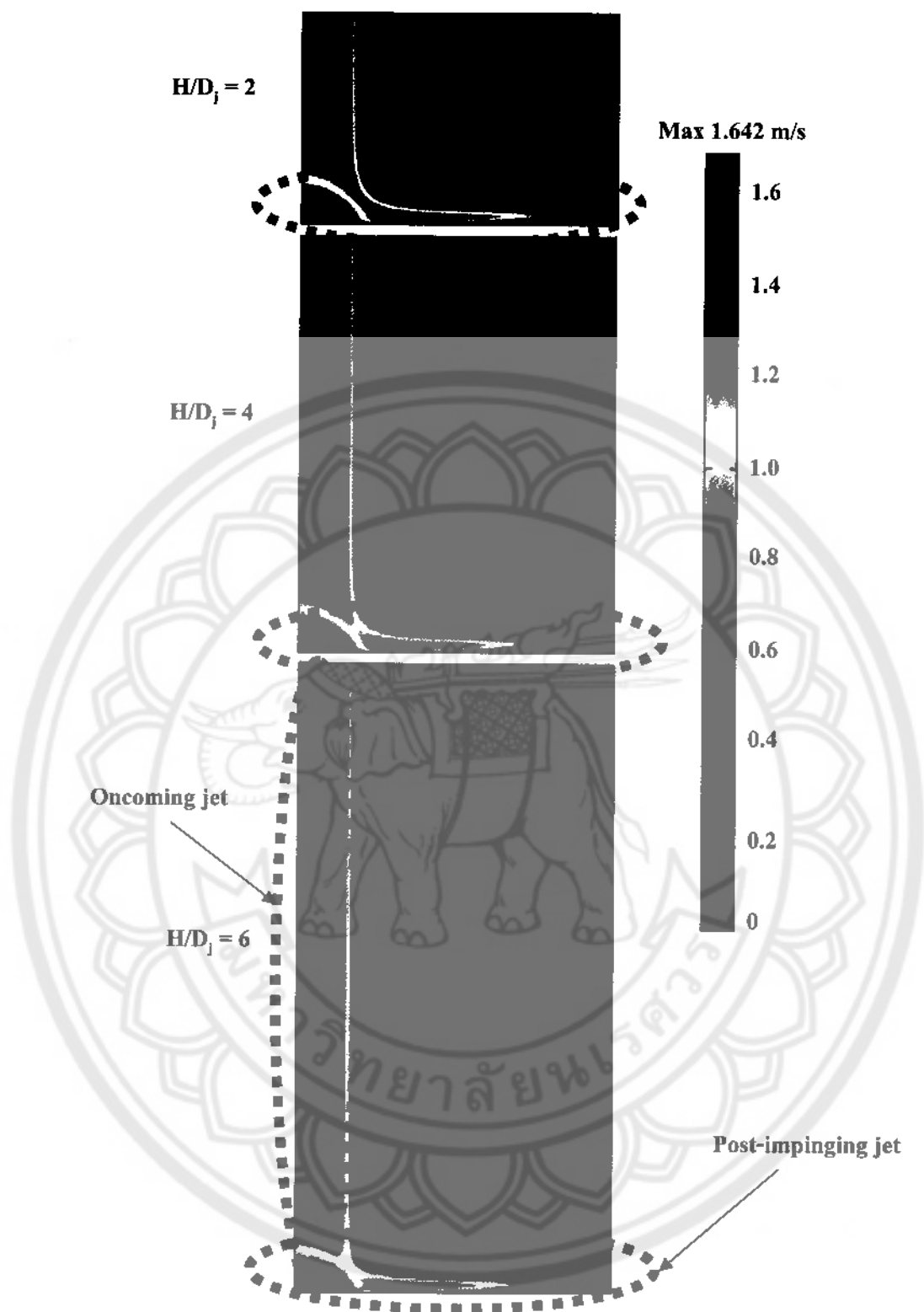
ในการศึกษาหัวข้อนี้เป็นการพิจารณาที่ค่า $Re = 400-1500$ และ $H/D_j = 2-6$ ซึ่งความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของแผ่นเป้าหมายจะพิจารณาอยู่ในรูปของตัวแปรไร้หน่วย ค่าตัวเลขนัสเซลท์เฉพาะที่ (Local Nusselt number ; Nu) ดังรูปที่ 3.7 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซลท์เฉพาะที่ ที่ค่า $H/D_j = 2-6$ และ $Re = 1000$ พบว่า สำหรับทุกค่าของ H/D_j ที่เพิ่มขึ้น ลักษณะแนวโน้มของค่า Nu มีลักษณะเป็นไปในทิศทางเดียวกันและมีค่า Nu ใกล้เคียงกันมาก กล่าวคือค่า Nu มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงบริเวณ $0 \leq r/D_j \leq 0.8$ และมีค่า Nu สูงที่สุดที่ $r/D_j = 0.8$ หลังจากนั้นที่บริเวณ $r/D_j > 0.8$ ค่า Nu มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องสำหรับทุกค่า H/D_j ดังนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบค่า H/D_j ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของแผ่นเป้าหมายโดยพิจารณาอยู่ในรูปค่าตัวเลขนัสเซลท์เฉลี่ย (Average nusselt number) ดังรูปที่ 3.8 พบว่าที่ค่า H/D_j เท่ากับ 2 ค่า \overline{Nu} มีค่าเท่ากับ 15.78 และเมื่อค่า H/D_j เพิ่มขึ้นเท่ากับ 4 และ 6 ค่า \overline{Nu} มีค่าเท่ากับ 16.08 และ 16.26 ตามลำดับ ดังนั้น เมื่อค่า H/D_j มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของแผ่นเป้าหมายน้อยมาก รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะสนามการไหลที่ค่า $H/D = 2-6$ และ $Re = 1000$ สังเกตบริเวณสัญลักษณ์วงรีเส้นปะสีแดงพบว่าหลังจากเจ็ทตกกระทบกับแผ่นเป้าหมายจะเกิดบริเวณความเร็วสูงซึ่งปรากฏอยู่ในช่วง $0.7 \leq r/D_j \leq 0.8$ สำหรับทุกค่า H/D_j และเมื่อค่า H/D_j มีค่าเพิ่มขึ้นบริเวณความเร็วสูงจะมีค่าความเร็วลดลง ซึ่งเมื่อทำการวัดค่าความเร็วของเจ็ทตามระยะแกน r ที่ $z = 0.001$ ดังรูปที่ 3.10 โดยพิจารณาอยู่ในรูปตัวแปรไร้หน่วย U/U_j ที่ค่า $H/D_j = 2-6$ และ $Re = 1000$ พบว่า ลักษณะแนวโน้มของค่า U/U_j มีทิศทางและแนวโน้มใกล้เคียงกันมาก กล่าวคือสำหรับทุกค่า H/D_j ค่า U/U_j มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องที่บริเวณ $0 \leq r/D_j \leq 0.8$ และมีค่าสูงที่สุดที่ $r/D_j = 0.8$ หลังจากนั้นเมื่อ $r/D_j > 0.8$ ค่า U/U_j มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งผลของค่า U/U_j มีความสอดคล้องกับผลของค่า Nu ดังนั้นในช่วงบริเวณ $0 \leq r/D_j \leq 0.8$ ค่า Nu มีค่าเพิ่มขึ้นและสูงที่สุดที่ $r/D_j = 0.8$ เนื่องจากเจ็ทผนังมีโมเมนตัมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจึงส่งผลให้ช่วงบริเวณนี้มีการถ่ายเทความร้อนได้มากที่สุดและหลังจากนั้นบริเวณ $r/D_j > 0.8$ ค่า Nu มีค่าลดลง เนื่องจากเจ็ทผนังมีการสูญเสียโมเมนตัมบางส่วนให้กับอากาศรอบข้างและเมื่อค่า H/D_j มีค่าเพิ่มขึ้น ผลกระทบต่อการถ่ายเทความร้อนของแผ่นเป้าหมายมีผลน้อยมาก เนื่องจากการถ่ายเทโมเมนตัมระหว่างเจ็ทที่กำลังตกลงมา (Oncoming jet) กับอากาศแวดล้อม (Ambient air) มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับอัตราการถ่ายเทโมเมนตัมระหว่างเจ็ทหลังตกกระทบ (Post-impinging jet) กับแผ่นเป้าหมาย



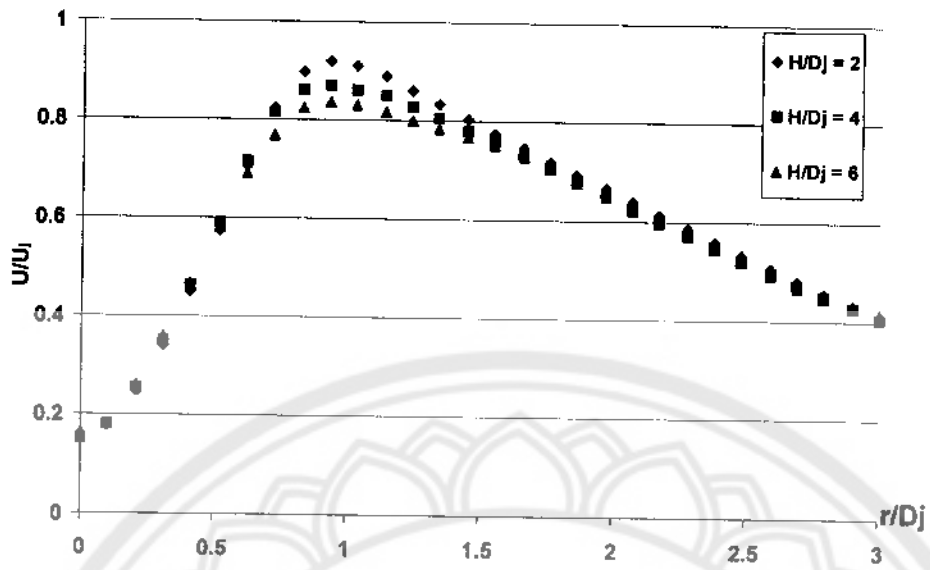
รูปที่ 3.7 การเปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉพาะที่ (Local nusselt number) ที่ $H/D_j = 2-6$ และ $Re = 1000$



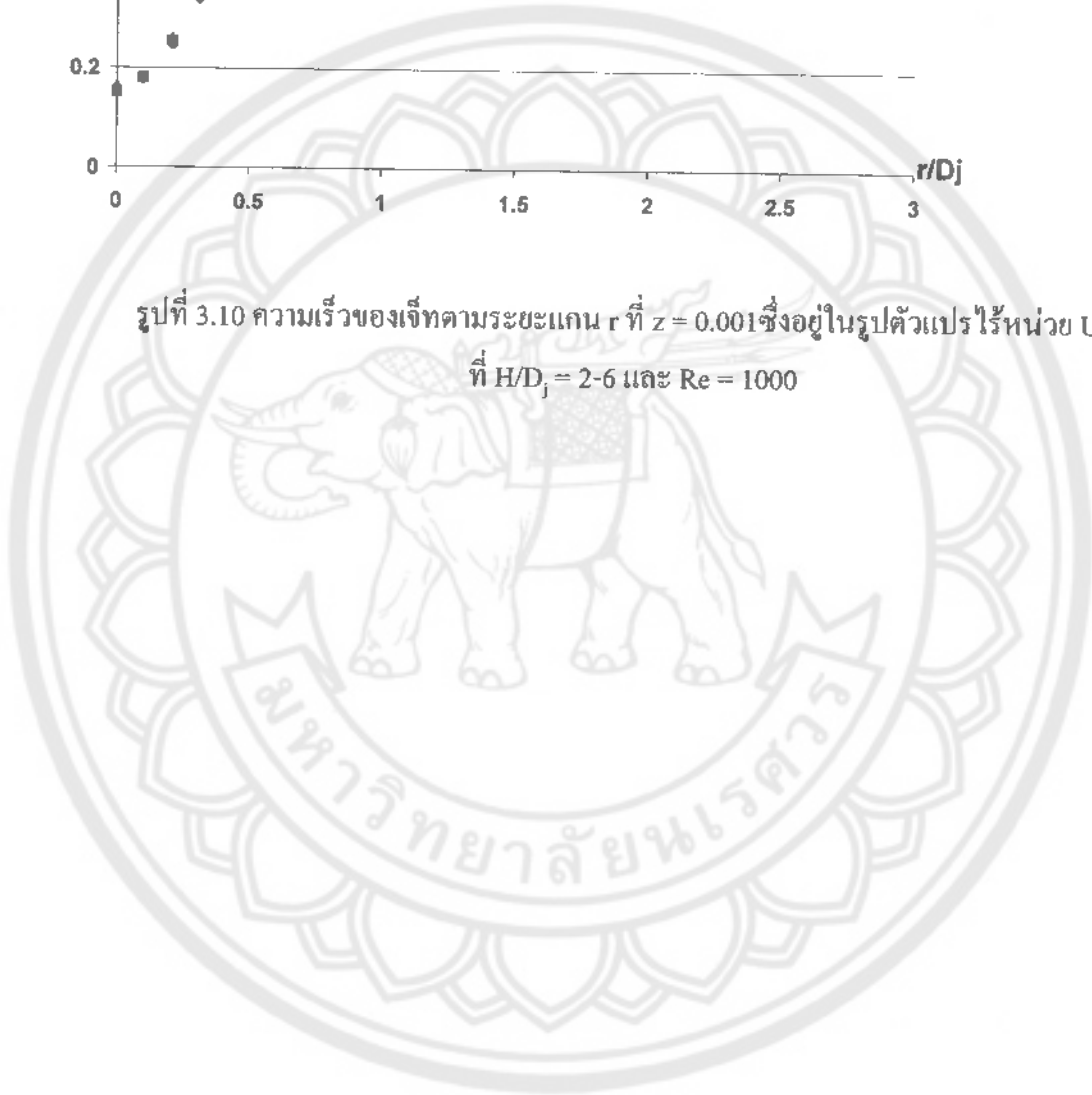
รูปที่ 3.8 การเปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉลี่ย (Average nusselt number) ที่ $H/D_j = 2-6$ และ $Re = 1000$



รูปที่ 3.9 ลักษณะสนามการไหลที่ $H/D_j = 2-6$ และ $Re = 1000$



รูปที่ 3.10 ความเร็วของเจ็ตตามระยะแกน r ที่ $z = 0.001$ ซึ่งอยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ U/U_j ที่ $H/D_j = 2-6$ และ $Re = 1000$



3.4 การสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง Average Nusselt number กับ Reynolds number

ในการสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง \overline{Nu} กับ Re ซึ่งเป็นการนำผลของค่า \overline{Nu} ที่พิจารณาในช่วง $Re = 400-1500$ และ $H/D_j = 2-6$ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และทำการสร้างความสัมพันธ์ในแต่ละกรณี ดังรูปที่ 4.1(a), (b) และ (c) เพื่อหาค่า m และ C ซึ่งจะนำไปใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่าง \overline{Nu} กับ Re ในรูปของ

$$\overline{Nu} = CRe^m \left(\frac{H}{D_j} \right)^n Pr^{1/3} \quad \dots\dots\dots 4.1$$

โดยที่ m, n, C และ Pr เป็นค่าคงที่

จากการประมวลผลทางโปรแกรม COMSOL พบว่า H/D_j มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของแผ่นเป่าหมายน้อยมาก จึงไม่นำมาคำนวณในที่นี้ ดังนั้นสมการ 4.1 จึงจัดใหม่ได้เป็น

$$\overline{Nu} = KRe^m \quad \dots\dots\dots 4.2$$

เมื่อ $K = CPr^{1/3}$

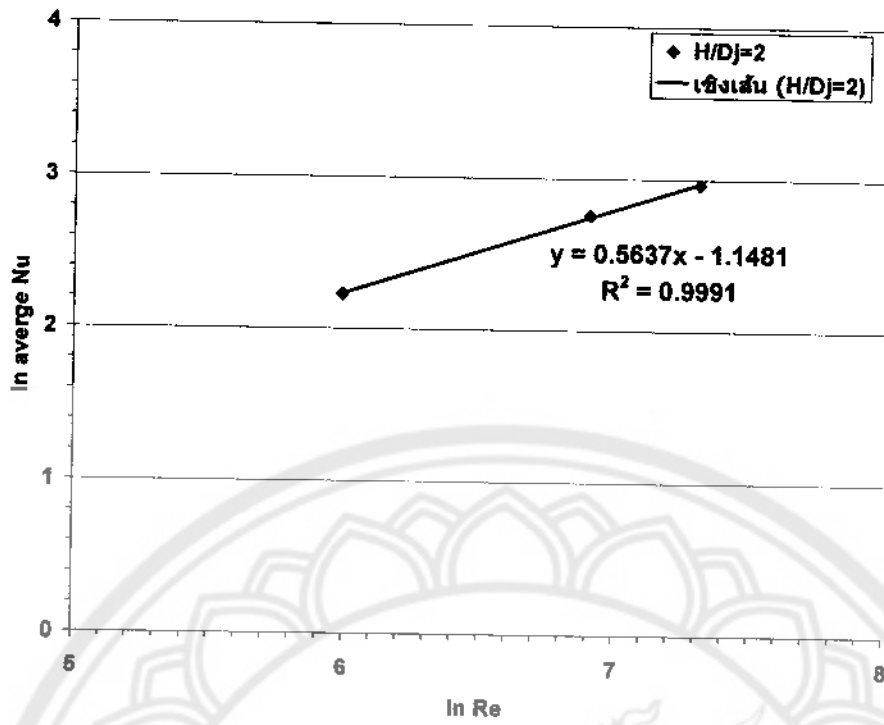
จากนั้นทำการใส่ Natural Logarithm ตลอดสมการ เพื่อทำการหาค่า m_{av} และ C_{av} ซึ่งแสดงดังสมการ 4.3

$$\ln \overline{Nu} = m \ln Re + \ln K \quad \dots\dots\dots 4.3$$

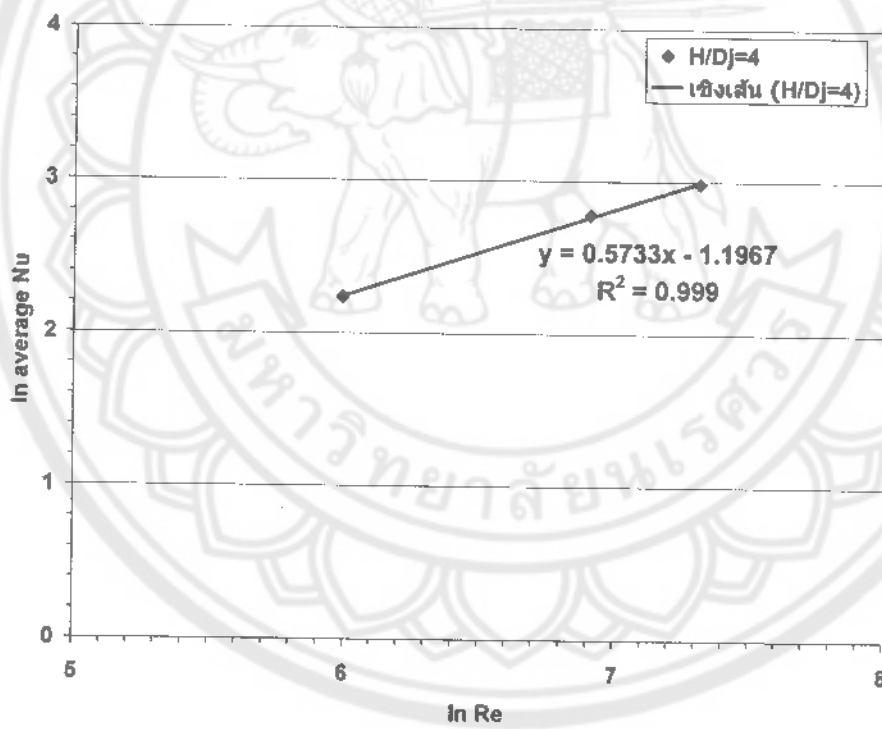
ซึ่งเป็นสมการเส้นตรงที่มีความชันเป็น m และ intercept เป็น $\ln K$ จากนั้นทำการ plot ระหว่าง $\ln \overline{Nu}$ และ $\ln Re$ สำหรับแต่ละค่าของ H/D_j จะได้รูปที่ 4.1 ที่ให้ค่า $R^2 = 0.999$ เป็นที่น่าพอใจใน curve fitting นอกจากนี้ยังได้สมการจาก curve fitting แสดงในแต่ละกรณีด้วย โดยที่ y คือ $\ln \overline{Nu}$ และ x คือ $\ln Re$

ตารางที่ 4.1 ค่า \overline{Nu} ที่ $Re = 400-1500$ และ $H/D_j = 2-6$

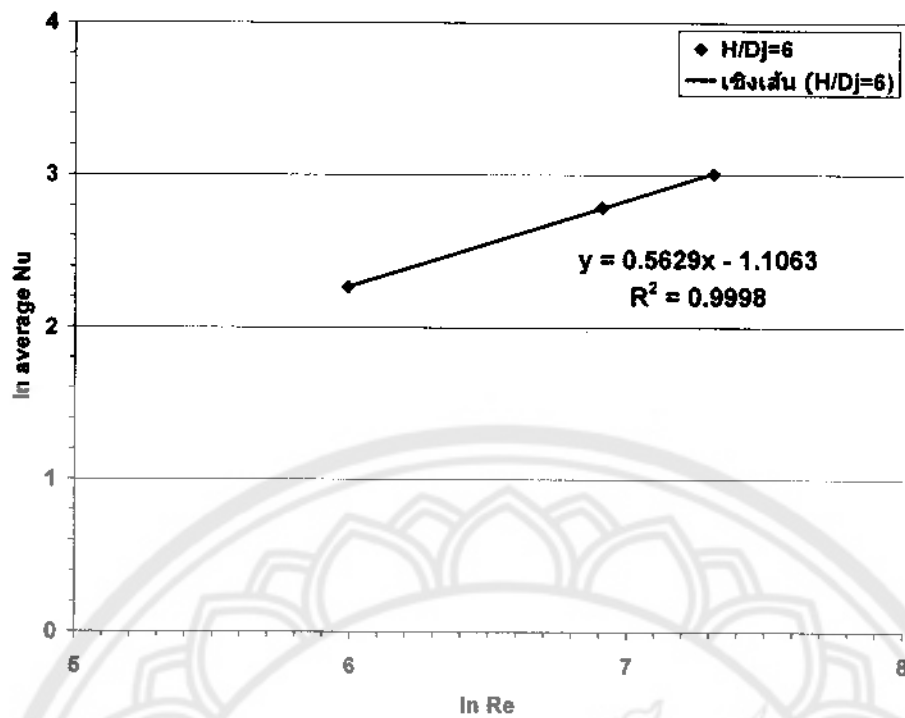
H/D_j	Reynolds number	Average Nusselt number
2	400	9.258749
	1000	15.78061
	1500	19.40934
4	400	9.336775
	1000	16.0804
	1500	19.81261
6	400	9.625479
	1000	16.26403
	1500	20.20426



(a.) $H/D_j = 2$



(b.) $H/D_j = 4$

(c.) $H/D_j = 6$ รูปที่ 4.1 การแสดงความสัมพันธ์และสมการของ \overline{Nu} กับ Re

ตารางที่ 4.2 สรุปค่าความชัน m และ $\ln C$ ที่ได้จากแต่ละกรณีของ H/D_j นอกจากนี้หาค่าเฉลี่ย m และ $\ln C$ ได้เป็น $m_{av} = 0.5666$ และ $\ln C_{av} = -1.1505$

ตารางที่ 4.2 แสดงค่า m_{av} และ $\ln C_{av}$ ที่ได้จากรูปที่ 4.1

H/D_j	m	$\ln C$
2	0.5637	-1.1481
4	0.5733	-1.1967
6	0.5629	-1.1063
	$m_{av} = 0.5666$	$\ln C_{av} = -1.1505$

และนำค่า m_{av} และ $\ln C_{av}$ แทนลงในสมการที่ 4.3 โดยที่ $\ln K = \ln C_{av} + \ln Pr^{1/3}$; $Pr = 0.707$

$$\ln \overline{Nu} = -1.1505 + 0.5666 \ln Re - 0.1156$$

$$\ln Nu = -1.266 + 0.5666 \ln Re$$

จากนั้นทำการใส่เอ็กซ์โพเนนเชียลทั้งสมการ ดังนั้นจึงได้ความสัมพันธ์ระหว่าง \overline{Nu} กับ Re ดังสมการ

$$\overline{Nu} = 0.282Re^{0.5666}$$

ซึ่งเป็นสมการสำหรับเจ็ทแบบราบเรียบตกกระทบบนแผ่นเรียบ ที่พิจารณาในช่วง $Re = 400-1500$ และ $H/D_j = 2-6$



สำนักหอสมุด
17 มี.ค. 2551

