

## บทที่ 5

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

#### ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

ในการศึกษาวิจัย เป็นการศึกษากการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานของอากาศที่ไหลภายในท่ออะลูมิเนียมชนิดหุ่่นที่มีลักษณะของผิวท่อและรูปแบบการวางตัวต่างๆ ในอุปกรณ์การทดลอง การให้ความร้อนแก่ท่ออะลูมิเนียมชนิดหุ่่นเป็นแบบค่าความร้อนต่อหน่วยพื้นที่คงที่ (Constant heat flux) การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นจากอุณหภูมิที่ผิวท่อกว่ามีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของอากาศที่ไหลภายในท่อทำให้อุณหภูมิของอากาศที่ไหลภายในมีการเปลี่ยนแปลงในทางสูงขึ้นตลอดแนวแกนการไหล ในขณะที่เดียวกับที่มีการถ่ายเทความร้อนได้ทำการศึกษาความเสียดทานที่เกิดขึ้นในการไหลของอากาศด้วย ค่าตัวแปรที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานที่พิจารณาประกอบด้วย

1. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ ,  $D$
2. ลักษณะของผิวท่อซึ่งแทนด้วยระยะแอมปริจูดของผิวท่อ ,  $a$
3. ความยาวท่อ ,  $L$
4. รูปแบบการวางตัวของท่อซึ่งแทนด้วยมุมความโค้งของท่อ ,  $\theta$
5. ความเร็วโดยเฉลี่ยของอากาศ ,  $v$
6. ความหนาแน่นของอากาศ ,  $\rho$
7. สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ ,  $k$
8. ความหนืดของอากาศ ,  $\mu$
9. ความร้อนจำเพาะของอากาศ ,  $c_p$
10. สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ ,  $h$
11. ค่าความดันลด ,  $p$

จากลักษณะโดยทั่วไปของท่อและคุณสมบัติของอากาศที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานของอากาศดังกล่าว สามารถลดตัวแปรต่างๆลงโดยวิธีการวิเคราะห์ทางมิติ

(Dimensional analysis) เพื่อให้ตัวแปรเหล่านี้รวมอยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless variable) โดยนำตัวแปรไร้มิติเหล่านี้ไปควบคุมการทดลองโดยแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ตัวแปรไร้มิติที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทาน

รูปแบบการวางตัวของท่อ	ตัวแปรไร้มิติ	
	การถ่ายเทความร้อน	ความเสียดทาน
ท่อตรง ( $\theta = \infty$ )	$Nu, Re, Pr, a/D, L/D$	$f, Re, a/D, L/D$
ท่อโค้ง ( $\theta = 90^\circ$ )	$Nu, Re, Pr, a/D, R/D$	$K, Re, a/D, R/D$

จากค่าตัวแปรไร้มิติดังกล่าวสามารถแสดงผลที่ได้จากการทดลอง ในรูปสมการทางเอมไพริกัล โดยครอบคลุมในช่วงเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Re) ตั้งแต่ 30,000 - 120,000 ซึ่งได้แสดงไว้ใน การวิเคราะห์ผลการวิจัย

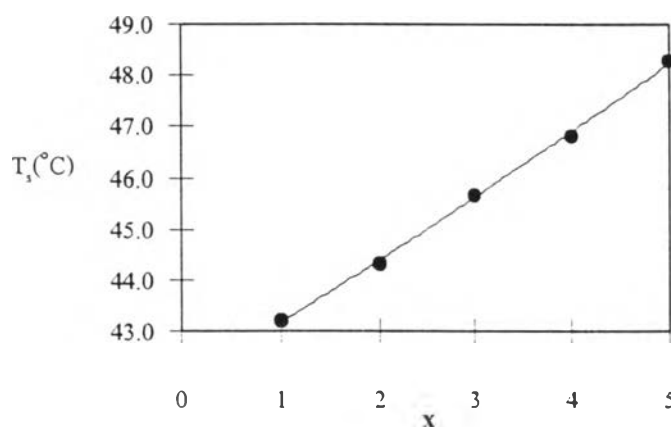
**การวิเคราะห์ผลการวิจัย**

การวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานของอากาศที่ไหลภายในท่ออะลูมิเนียมยัดหุ้มที่วางตัวในลักษณะต่างๆ โดยพิจารณาพร้อมกับตาราง แสดงผลการทดลองและการคำนวณ (ภาคผนวก ข) กราฟที่ได้จากการทดลอง (ภาคผนวก ค) และ ตัวอย่างการคำนวณซึ่งนำมาวิเคราะห์ผล (ภาคผนวก ง) ได้ดังต่อไปนี้

**ผลกระทบที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนของของไหล**

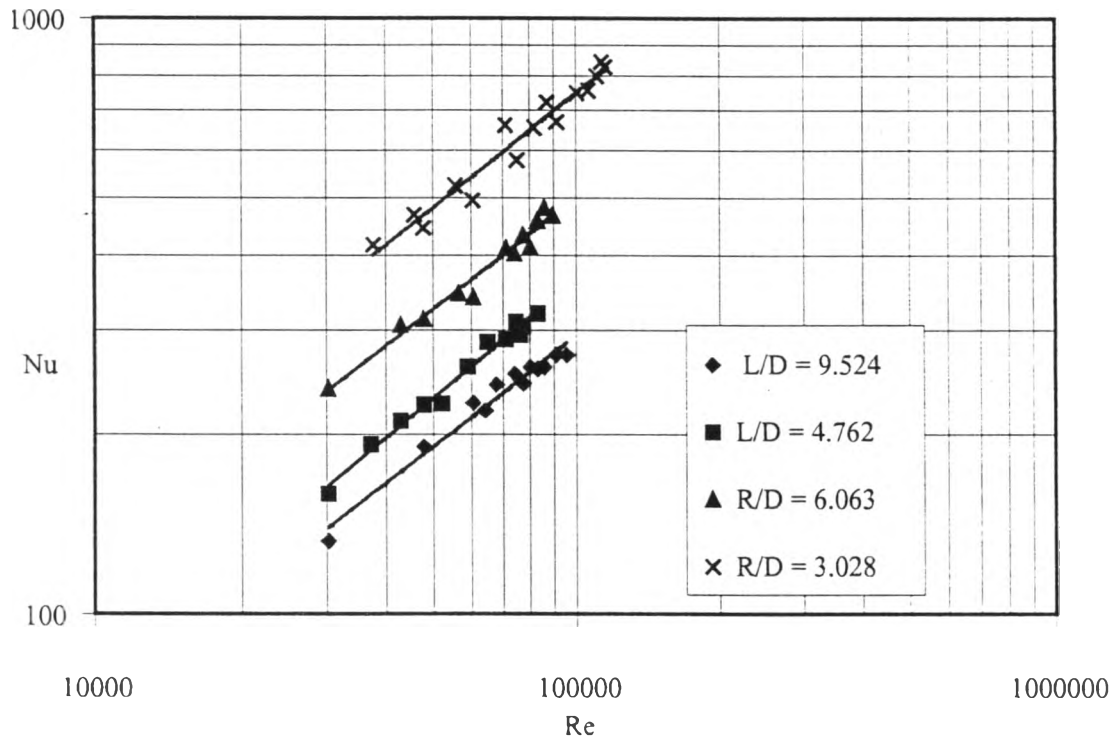
1. อุณหภูมิที่ผิวท่อมีแนวโน้มสูงขึ้นตลอดแนวแกนการไหล จากการให้พลังงาน ความร้อนแก่ท่ออะลูมิเนียมยัดหุ้มซึ่งมีสภาพการให้ความร้อนเป็นแบบค่าความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ คงที่ (Constant heat flux) ทำให้อุณหภูมิที่ผิวท่อมีค่าสูงขึ้นและในขณะเดียวกันเมื่อมีอากาศที่มี อุณหภูมิต่ำกว่าไหลภายในท่อจะทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวท่อกับอากาศที่ไหลอยู่ ภายในเป็นผลทำให้อุณหภูมิของอากาศสูงขึ้นตลอดแนวแกนการไหล จากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ของอากาศจึงทำให้อุณหภูมิที่ผิวท่อมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นด้วย จากรูปที่ 5.1 แสดงการเพิ่มขึ้นของ

อุณหภูมิที่ผิวท่อ โดยนำผลการทดลองจากการทดลองที่ s0.5P10dT5[H] (ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ 24ข) ที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ เท่ากับ 36148.3



รูปที่ 5.1 แสดงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ผิวท่อ ที่  $Re=36148.3$   
(ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ 24ข)

2. เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบท่อวางตัวในแนวตรงความยาว 0.5 เมตร ( $L/D=4.76$ ) กับท่อที่มีความยาว 1 เมตร ( $L/D = 9.523$ ) พบว่าท่อวางตัวแนวตรงที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 4.76 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยมีแนวโน้มสูงกว่าท่อที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 9.523 ทั้งนี้เพราะอิทธิพลที่ปากทางเข้า (Entrance effect) ที่เกิดขึ้นในท่อที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 4.76 มีมากกว่าท่อที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 9.523 ซึ่งจะทำให้ค่าความลาดเอียงของอุณหภูมิ (Temperature gradient) ในท่อตรงที่มีค่าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 4.76 มีค่าสูงกว่าท่อที่มีค่าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 9.523 ซึ่งจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยและค่าตัวเลขถ่ายเทความร้อนของอากาศภายในท่อที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 4.76 มีค่าสูงกว่าท่อที่มีค่าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 9.523 และในทำนองเดียวกันจากอิทธิพลที่ปากทางเข้าจึงทำให้ท่อที่วางตัวในแนวโค้งที่มีอัตราส่วนรัศมีความโค้งต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 3.028 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยและค่าตัวเลขถ่ายเทความร้อน มีแนวโน้มที่สูงกว่าท่อที่มีอัตราส่วนรัศมีความโค้งต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 6.063 จากรูปที่ 5.2 แสดงถึงอิทธิพลของความยาวท่อต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (สำหรับท่อที่วางตัวแนวตรง) และ อัตราส่วนรัศมีความโค้งต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (สำหรับท่อที่วางตัวในแนวโค้ง) มีต่อค่าตัวเลขถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ต่างๆ



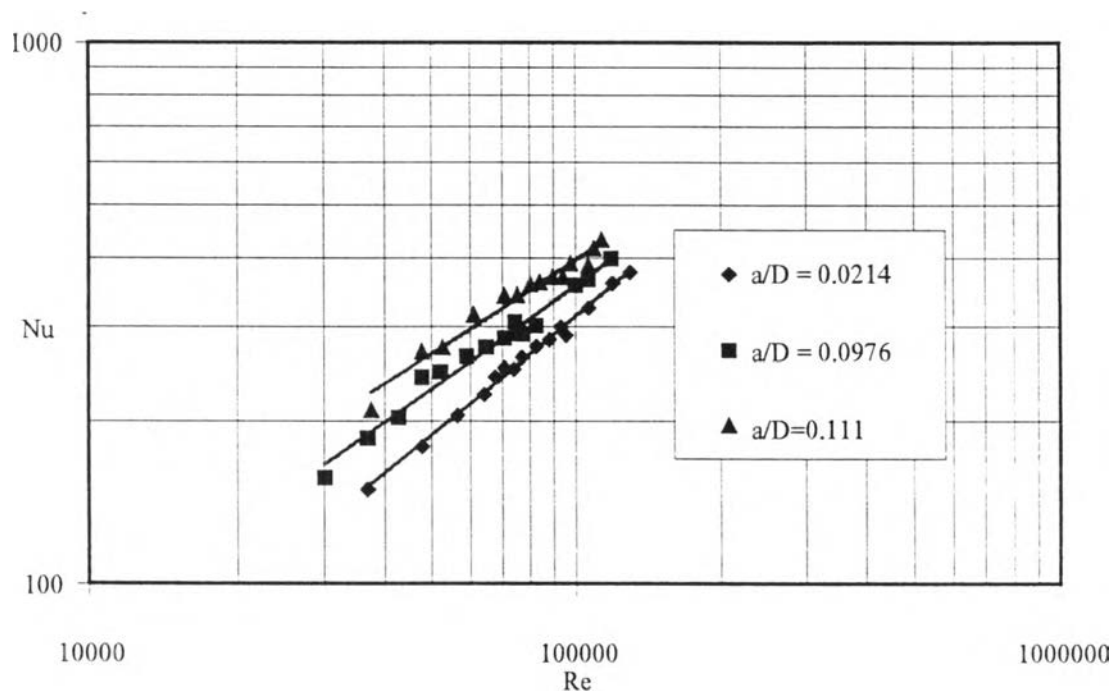
รูปที่ 5.2 แสดงการเปรียบเทียบอิทธิพลของค่า  $L/D$  (ในท่อวางตัวแนวตรง) และ  $R/D$  (ในท่อวางตัวแนวโค้ง) ที่มีต่อ  $Nu$  ที่  $Re$  ต่างๆ โดยมี  $L/D=9.524$  ,  $4.762$  และ  $R/D=6.063$  ,  $3.028$

พิจารณาที่  $a/D$  อุณหภูมิอากาศเข้าท่อ และอุณหภูมิอากาศออกจากท่อ เดียวกัน

(ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ 2ข , 14ข , 26ข และ 38ข ตามลำดับ )

3. ค่าตัวเลขที่นัมเบอร์เฉลี่ยของอากาศซึ่งไหลภายในท่ออะลูมิเนียมยัดหุ้มที่มีอัตราส่วนระยะแอมปริจูดต่อเส้นผ่านศูนย์กลางมากจะมีแนวโน้มสูงกว่าท่ออะลูมิเนียมยัดหุ้มที่มีระยะแอมปริจูดต่อเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยเมื่อพิจารณาที่ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ และ อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ เดียวกัน เพราะท่อที่มีอัตราส่วนระยะแอมปริจูดต่อเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่ามากอิทธิพลของความหยาบที่ผิวท่อจะมีมากกว่าท่อที่มีอัตราส่วนระยะแอมปริจูดต่อเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าน้อย กล่าวคือเมื่อการไหลของอากาศไหลภายในท่อเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ความหยาบที่ผิวท่อจะทำให้ความหนาของชั้นราบเรียบ (Laminar sublayer) ลดลงในขณะที่ชั้นปั่นป่วนสมบูรณ์ (Fully turbulent) เพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้รูปแบบของอุณหภูมิ (Temperature profile) มีพฤติกรรมแบบปั่นป่วนมากขึ้นซึ่งแสดงในรูปที่ 3.9 (ข) ทำให้ค่าความลาดเอียงอุณหภูมิของอากาศเมื่อเทียบกับระยะตามแนวรัศมีมีค่าสูงขึ้น จากสมการที่ (3.6) และ (3.9) ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย และค่าตัวเลขที่นัมเบอร์เฉลี่ยมีค่าสูงขึ้นตามลำดับ จากรูปที่ 5.3 แสดง

อิทธิพลของอัตราส่วนระยะแอมปริจูดต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่มีค่านัสเซิลท์นัมเบอร์เฉลี่ย ซึ่งประกอบด้วย  $a/D = 0.0214, 0.0976, 0.111$  โดยพิจารณาที่ อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง อุณหภูมิอากาศเข้า และอุณหภูมิอากาศออกจากท่อ ที่เท่ากัน



รูปที่ 5.3 แสดงอิทธิพลของค่า  $a/D$  ที่มีต่อค่า  $Nu$  ที่  $Re$  ต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย  $a/D$  เท่ากับ 0.0214, 0.0976, 0.111 พิจารณาที่ค่า  $L/D$  อุณหภูมิอากาศเข้า และ อุณหภูมิอากาศออกจากท่อ เดียวกัน (ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ 16ข, 17ข และ 18ข ตามลำดับ)

4. เมื่อพิจารณาในทุกรูปแบบการวางตัวของท่อ พบว่าค่านัสเซิลท์นัมเบอร์เฉลี่ย มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สูงขึ้น และค่านัสเซิลท์นัมเบอร์เฉลี่ยมีความสัมพันธ์กับเรย์โนลด์นัมเบอร์ในรูปแบบการยกกำลัง ( $Nu = i Re^j$  เมื่อ  $i, j$  เป็นค่าคงที่และมีค่าเป็นบวก) เพราะว่าเมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สูงขึ้นจะทำให้เพิ่มพฤติกรรมแบบปั่นป่วนของรูปแบบของอุณหภูมิ (Temperature profile) ขึ้น แสดงในรูป 3.9 (ข) ทำให้ค่าความลาดเอียงของอุณหภูมิ (Temperature gradient) เทียบกับรัศมีท่อมีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย และค่านัสเซิลท์นัมเบอร์เฉลี่ยมีค่าสูงขึ้น สมการทางเอมไพริคัลที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

ท่อตรง( $\theta = \infty$ ) ความยาว 0.5 เมตร ( $L/D = 4.762$ )

ที่ ระยะพิท 25 มิลลิเมตร ( $a/D=0.0214$ )

$$T_m = 17.25 \text{ }^\circ\text{C} \quad Nu = 0.1065 Re^{0.694} \quad , Pr=0.7122$$

$$T_m = 18.5 \text{ }^\circ\text{C} \quad Nu = 0.07 Re^{0.7299} \quad , Pr=0.712$$

$$T_m = 32.25 \text{ }^\circ\text{C} \quad Nu = 0.09 Re^{0.7} \quad , Pr=0.7097$$

$$T_m = 33.5 \text{ }^\circ\text{C} \quad Nu = 0.089 Re^{0.704} \quad , Pr=0.7095$$

ที่ ระยะพิท 15 มิลลิเมตร ( $a/D=0.0976$ )

$$T_m = 17.25 \text{ }^\circ\text{C} \quad Nu = 0.1087 Re^{0.7075} \quad , Pr=0.7122$$

$$T_m = 18.5 \text{ }^\circ\text{C} \quad Nu = 0.15 Re^{0.6775} \quad , Pr=0.712$$

$$T_m = 32.25 \text{ }^\circ\text{C} \quad Nu = 0.144 Re^{0.67} \quad , Pr=0.7097$$

$$T_m = 33.5 \text{ }^\circ\text{C} \quad Nu = 0.16 Re^{0.68} \quad , Pr=0.7095$$

ที่ ระยะพิท 10 มิลลิเมตร ( $a/D=0.111$ )

$$T_m = 17.25 \text{ }^\circ\text{C} \quad Nu = 0.22 Re^{0.6554} \quad , Pr=0.7122$$

$$T_m = 18.5 \text{ }^\circ\text{C} \quad Nu = 0.3257 Re^{0.6222} \quad , Pr=0.712$$

$$T_m = 32.25 \text{ }^\circ\text{C} \quad Nu = 0.2277 Re^{0.6548} \quad , Pr=0.7097$$

$$T_m = 33.5 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad Nu = 0.3506 Re^{0.6209} \quad , \quad Pr = 0.7095$$

ท่อตรง( $\theta = \infty$ ) ความยาว 1 เมตร ( $L/D = 9.524$ )

ที่ ระยะพิท 25 มิลลิเมตร ( $a/D = 0.0214$ )

$$T_m = 17.25 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad Nu = 0.0491 Re^{0.7353} \quad , \quad Pr = 0.7122$$

$$T_m = 18.5 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad Nu = 0.05 Re^{0.73} \quad , \quad Pr = 0.712$$

$$T_m = 32.25 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad Nu = 0.055 Re^{0.72} \quad , \quad Pr = 0.7097$$

$$T_m = 33.5 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad Nu = 0.0445 Re^{0.7425} \quad , \quad Pr = 0.7095$$

ที่ ระยะพิท 15 มิลลิเมตร ( $a/D = 0.0976$ )

$$T_m = 17.25 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad Nu = 0.093 Re^{0.6972} \quad , \quad Pr = 0.7122$$

$$T_m = 18.5 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad Nu = 0.0921 Re^{0.6972} \quad , \quad Pr = 0.712$$

$$T_m = 32.25 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad Nu = 0.081 Re^{0.7} \quad , \quad Pr = 0.7097$$

$$T_m = 33.5 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad Nu = 0.1082 Re^{0.6819} \quad , \quad Pr = 0.7095$$

ที่ ระยะพิท 10 มิลลิเมตร ( $a/D = 0.111$ )

$$T_m = 17.25 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad Nu = 0.484 Re^{0.565} \quad , \quad Pr = 0.7122$$

$$T_m = 18.5 \text{ }^\circ\text{C} \quad Nu = 0.55 Re^{0.554} \quad , \quad Pr = 0.712$$

$$T_m = 32.25 \text{ }^\circ\text{C} \quad Nu = 0.4189 Re^{0.5765} \quad , \quad Pr = 0.7097$$

$$T_m = 33.5 \text{ }^\circ\text{C} \quad Nu = 0.48 Re^{0.56} \quad , \quad Pr = 0.7095$$

ท่อโค้ง ( $\theta = 90^\circ$ ) ความยาว 0.5 เมตร ( $R/D = 3.028$ )

ที่ ระยะพิท 23 มิลลิเมตร ( $a/D = 0.0513$ )

$$T_m = 17.25 \text{ }^\circ\text{C} \quad Nu = 0.3713 Re^{0.6377} \quad , \quad Pr = 0.7122$$

$$T_m = 18.5 \text{ }^\circ\text{C} \quad Nu = 0.4 Re^{0.625} \quad , \quad Pr = 0.712$$

$$T_m = 32.25 \text{ }^\circ\text{C} \quad Nu = 0.45 Re^{0.624} \quad , \quad Pr = 0.7097$$

$$T_m = 33.5 \text{ }^\circ\text{C} \quad Nu = 0.3532 Re^{0.6457} \quad , \quad Pr = 0.7095$$

ที่ ระยะพิท 15 มิลลิเมตร ( $a/D = 0.0976$ )

$$T_m = 17.25 \text{ }^\circ\text{C} \quad Nu = 0.4933 Re^{0.6358} \quad , \quad Pr = 0.7122$$

$$T_m = 18.5 \text{ }^\circ\text{C} \quad Nu = 0.6883 Re^{0.6053} \quad , \quad Pr = 0.712$$

$$T_m = 32.25 \text{ }^\circ\text{C} \quad Nu = 0.715 Re^{0.595} \quad , \quad Pr = 0.7097$$

$$T_m = 33.5 \text{ }^\circ\text{C} \quad Nu = 0.65 Re^{0.615} \quad , \quad Pr = 0.7095$$



ที่ ระยะพิท 10 มิลลิเมตร ( $a/D=0.111$ )

$$T_m = 17.25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad Nu = 1.0227 Re^{0.5883} \quad , \quad Pr=0.7122$$

$$T_m = 18.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad Nu = 1.7018 Re^{0.5412} \quad , \quad Pr=0.712$$

$$T_m = 32.25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad Nu = 1.4588 Re^{0.553} \quad , \quad Pr=0.7097$$

$$T_m = 33.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad Nu = 1.645 Re^{0.5462} \quad , \quad Pr=0.7095$$

ท่อโค้ง( $\theta = 90^\circ$ ) ความยาว 1 เมตร ( $R/D = 6.063$ )

ที่ ระยะพิท 23 มิลลิเมตร ( $a/D=0.0513$ )

$$T_m = 17.25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad Nu = 0.2283 Re^{0.6478} \quad , \quad Pr=0.7122$$

$$T_m = 18.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad Nu = 0.23 Re^{0.6391} \quad , \quad Pr=0.712$$

$$T_m = 32.25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad Nu = 0.19 Re^{0.66} \quad , \quad Pr=0.7097$$

$$T_m = 33.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad Nu = 0.24 Re^{0.65} \quad , \quad Pr=0.7095$$

ที่ ระยะพิท 15 มิลลิเมตร ( $a/D=0.0976$ )

$$T_m = 17.25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad Nu = 0.3765 Re^{0.6234} \quad , \quad Pr=0.7122$$

$$T_m = 18.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad Nu = 0.3095 Re^{0.6403} \quad , \quad Pr=0.712$$

$$T_m = 32.25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad Nu = 0.35 Re^{0.63} \quad , \quad Pr=0.7097$$

$$T_m = 33.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad Nu = 0.345 Re^{0.6275} \quad , \quad Pr = 0.7095$$

ที่ ระยะพิททา 10 มิลลิเมตร ( $a/D=0.111$ )

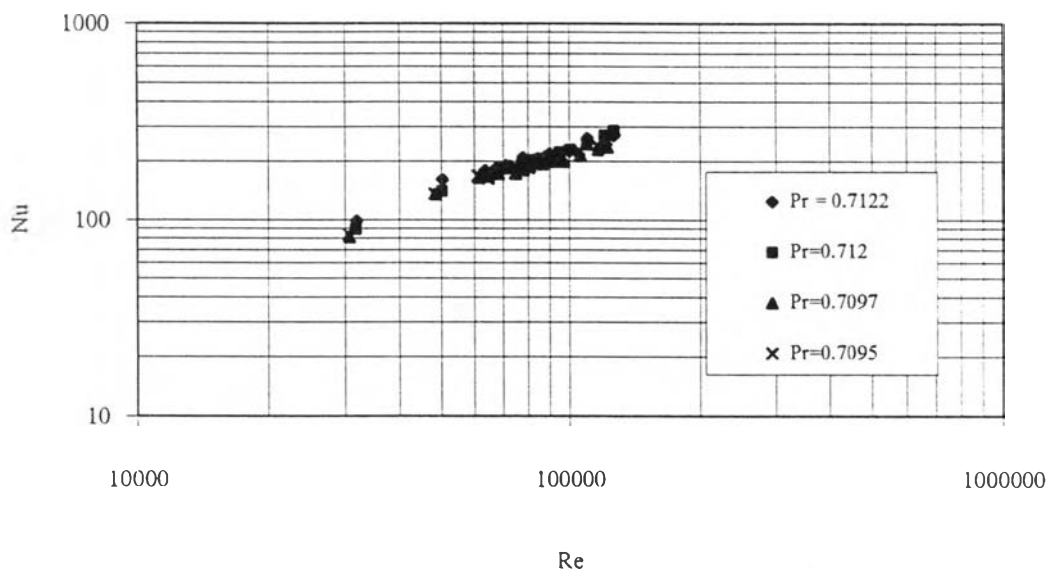
$$T_m = 17.25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad Nu = 0.9748 Re^{0.5518} \quad , \quad Pr = 0.7122$$

$$T_m = 18.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad Nu = 1.248 Re^{0.5288} \quad , \quad Pr = 0.712$$

$$T_m = 32.25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad Nu = 1.4 Re^{0.515} \quad , \quad Pr = 0.7097$$

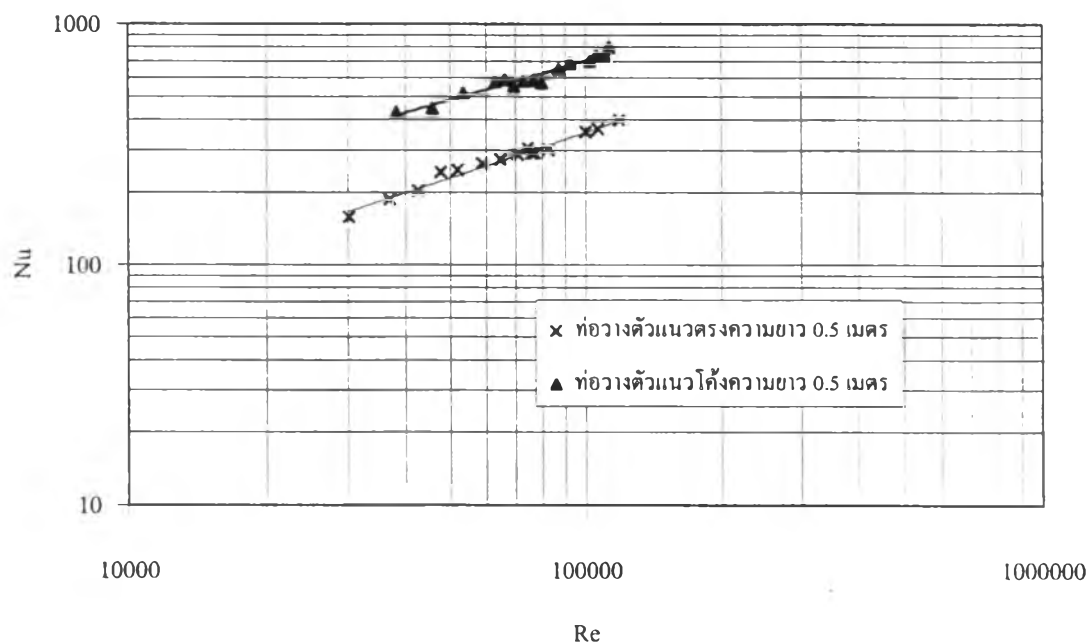
$$T_m = 33.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad Nu = 1.5202 Re^{0.5075} \quad , \quad Pr = 0.7095$$

5. ในการศึกษาวิจัยพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน ซึ่งในการทดลองได้ทำการควบคุมอุณหภูมิของอากาศที่เข้าและออกท่ออะลูมิเนียม ยึดหุ่นที่วางตัวในรูปแบบต่างๆ ในช่วงอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศตั้งแต่ 17.25 - 33.5  $^{\circ}\text{C}$  ซึ่งค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศจะเป็นตัวกำหนดค่าแพร้นเดลินัมเบอร์ เนื่องจากแพร้นเดลินัมเบอร์เป็นตัวแปรไร้มิติที่รวมคุณสมบัติทั้งหมดของอากาศที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน พบว่าในช่วงอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศที่พิจารณาค่าแพร้นเดลินัมเบอร์มีค่าตั้งแต่ 0.71 ถึง 0.712 (มีความแตกต่างกันในช่วงทศนิยมอันดับที่ 3) ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าในช่วงอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศที่พิจารณา ค่าแพร้นเดลินัมเบอร์ค่อนข้างคงที่ดังนั้นค่าแพร้นเดลินัมเบอร์จึงไม่ปรากฏในสมการทางเอมไพริคัลที่แสดงในหัวข้อที่ 4. เพราะถูกรวมเข้ากับค่าตัวคูณคงที่ ในสมการทางเอมไพริคัลทั้งหมดแล้ว และเนื่องจากค่าแพร้นเดลินัมเบอร์เป็นตัวแปรไร้มิติที่รวมคุณสมบัติทั้งหมดของอากาศที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน จากสมการทางเอมไพริคัลในหัวข้อที่ 4 ถ้าพิจารณาที่ อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ (สำหรับท่อวางตัวแนวตรง) อัตราส่วนรัศมีความโค้งต่อเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ (สำหรับท่อวางตัวแนวโค้ง) และอัตราส่วนระยะแอมปริจูดต่อเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ เดียวกัน ที่ค่าแพร้นเดลินัมเบอร์ต่างๆ พบว่าจากสมการทางเอมไพริคัลที่ได้มีค่าสัมประสิทธิ์นัมเบอร์เฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เดียวกัน เนื่องจากค่าแพร้นเดลินัมเบอร์เหล่านั้นมีค่าใกล้เคียงกันมากคือมีค่าเท่ากับ 0.7122 , 0.712 , 0.7097 , 0.7095 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.4 แสดงอิทธิพลของแพร้นเดลินัมเบอร์ที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์นัมเบอร์เฉลี่ย



รูปที่ 5.4 แสดงอิทธิพลของค่า Pr ที่มีต่อค่า Nu ที่ Re ต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย Pr เท่ากับ 0.7122 , 0.712 , 0.7097 , 0.7095 โดยพิจารณาที่  $L/D$   $a/D$  เดียวกัน (ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ 1ข , 4ข , 7ข , 10ข ตามลำดับ)

6. คำนวณสเกลทึ่มเบอร์เฉลี่ยของอากาศที่ไหลภายในท่ออะลูมิเนียมชนิดหุ่่นที่วางตัวในแนวโค้งมีแนวโน้มสูงกว่าท่อที่วางตัวในแนวตรงอย่างเห็นได้ชัดเจนเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนระยะแอมปริจูดต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง ความยาวท่อ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ และเรย์โนลด์์นัมเบอร์ เดียวกัน เพราะเมื่ออากาศไหลเข้าสู่ท่อที่วางตัวในแนวโค้งทำให้ของไหลมีการเปลี่ยนทิศทางการไหลโดยตลอดแนวแกนการไหล ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของรูปแบบของอุณหภูมิ (Temperature profile) จึงทำให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย และนัสเซิลทึ่มเบอร์เฉลี่ยสูงกว่าท่อวางตัวแนวตรงอย่างมาก รูปที่ 5.5 แสดงอิทธิพลของความโค้งที่มีต่อสเกลทึ่มเบอร์เฉลี่ยของท่อวางตัวแนวโค้งและท่อวางตัวแนวตรง โดยพิจารณาระหว่าง ท่อวางตัวแนวตรงความยาว 0.5 เมตร กับ ท่อวางตัวแนวโค้งความยาว 0.5 เมตร ซึ่งมี อัตราส่วนระยะแอมปริจูดต่อเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศเข้าและออกจากท่อ เดียวกัน

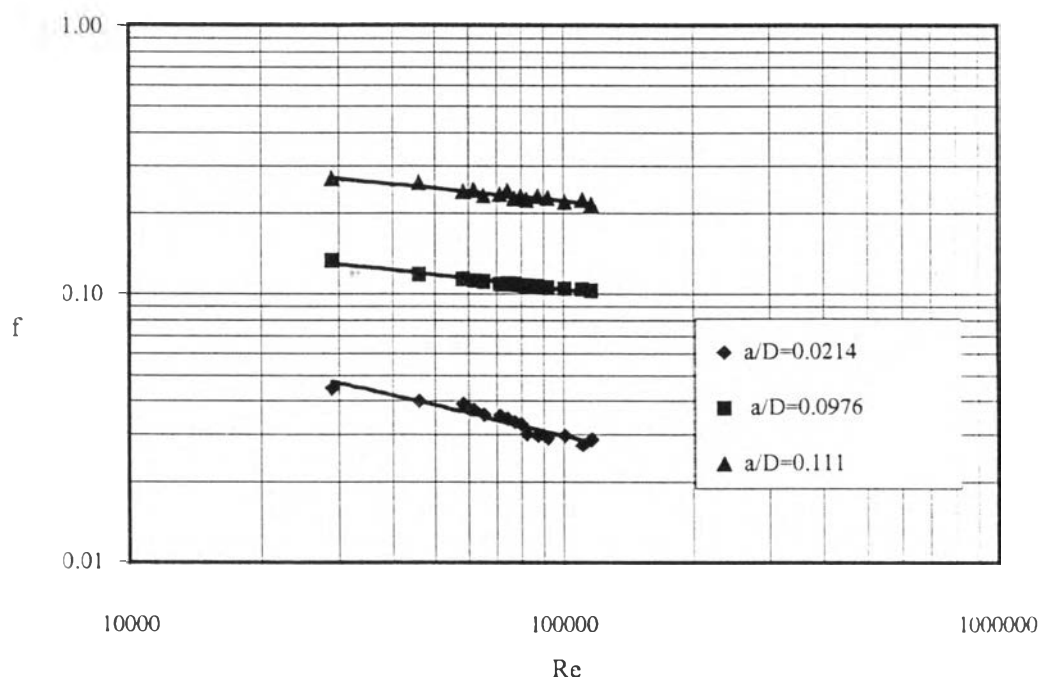


รูปที่ 5.5 แสดงอิทธิพลของความโค้งที่มีต่อค่า Nu ที่ Re ต่างๆ โดยพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างท่อวางตัวแนวตรงความยาว 0.5 เมตร กับท่อวางตัวแนวโค้งความยาว 0.5 เมตร ซึ่งมีค่า  $w/D$  อุณหภูมิอากาศเข้า และอุณหภูมิอากาศออกจากท่อ เดียวกัน (ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ 17x และ 41x ตามลำดับ)

#### ผลกระทบที่มีต่อความเสียดทาน

1. เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นในท่อที่วางตัวแนวตรง พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่ออัตราส่วนระยะแอมปริจูดต่อเส้นผ่านศูนย์กลางกลางท่อเพิ่มขึ้น โดยพิจารณาที่อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางกลางท่อ และค่าเรย์โนลด์สันัมเบอร์เดียวกัน เพราะเมื่ออัตราส่วนระยะแอมปริจูดต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มทำให้ความหยาบของผิวท่อเพิ่มขึ้น และจากผลของความหยาบที่มากขึ้นทำให้เป็นการเพิ่มพฤติกรรมการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศที่ไหลภายใน ทำให้ช่วงปั่นป่วนสมบูรณ์ (Fully turbulent) เพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ความลาดเอียงของความเร็ว (Velocity gradient) เมื่อเทียบกับแนวรัศมีมีค่าสูงขึ้น เป็นผลให้เป็นการเพิ่มความเค้นเฉือนที่ผิวท่อ (Wall shear stress,  $\tau_w$ ) จากสมการที่ 3.3 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะแปรผันโดยตรงกับความเค้นเฉือนที่ผิวท่อ จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่า

สูงขึ้น รูปที่ 5.6 แสดงถึงอิทธิพลของอัตราส่วนระยะแอมปริจูดต่อเส้นผ่าศูนย์กลางที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในท่อที่วางตัวในแนวตรง ที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ต่างๆ และในทำนองเดียว

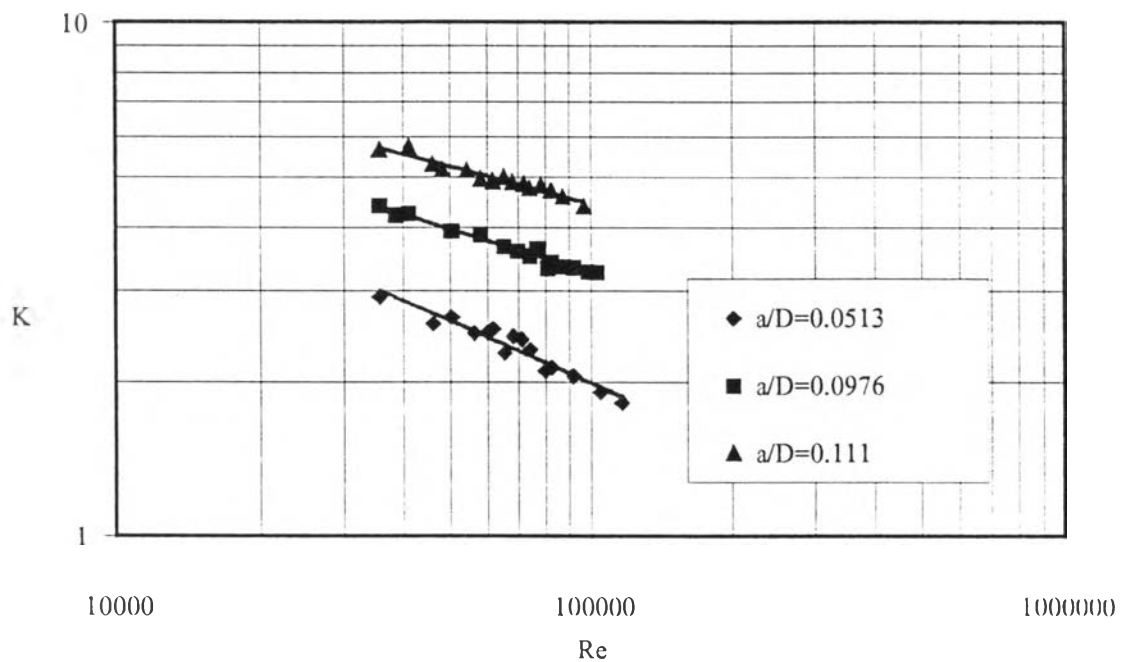


รูปที่ 5.6 แสดงอิทธิพลของ  $a/D$  ที่มีต่อ  $f$  ที่  $Re$  ต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย  $a/D$  เท่ากับ 0.0214 , 0.0976 , 0.111 ซึ่งมีค่า  $L/D$  อุณหภูมิอากาศเข้าท่อ และอุณหภูมิอากาศออกจากท่อ เดียวกัน (ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ 10ข , 11ข , 12ข ตามลำดับ)

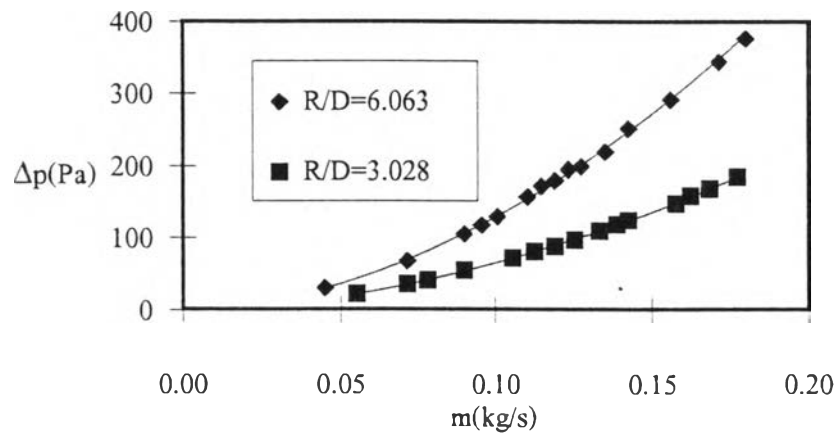
กันเนื่องจากความหยาบของผิวท่อที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานความโค้งที่เกิดขึ้นภายในท่อที่วางตัวในแนวโค้งมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนระยะแอมปริจูดต่อเส้นผ่าศูนย์กลางท่อเพิ่มขึ้น โดยพิจารณาที่อัตราส่วนรัศมีความโค้งต่อเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เดียวกัน รูปที่ 5.7 แสดงถึงอิทธิพลของอัตราส่วนระยะแอมปริจูดต่อเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ ที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานความโค้ง ที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ต่างๆ

2. ท่อที่วางตัวในแนวตรง ค่าความดันลดและค่าแรงดันนำสูญเสียในท่อที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 9.524 จะสูงกว่าท่อที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 4.76 เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนระยะแอมปริจูดต่อเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ และเรย์โนลด์ส์-

นัมเบอร์เดียวกัน ทั้งนี้เป็นเพราะจากผลของความยาวท่อที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือ เมื่อพิจารณาสมการที่ 3.2 พบว่าความยาวท่อแปรผันโดยตรงกับความดันลด และในทำนองเดียวกันเพราะผลจากความยาวท่อจึงทำให้ค่าความดันลดและค่าแรงดันน้ำสูญเสียในท่อที่วางตัวแนวโค้งที่มีอัตราส่วนรัศมีความโค้งต่อเส้นผ่าศูนย์กลางท่อเท่ากับ 6.063 จะสูงกว่าท่อที่มีอัตราส่วนรัศมีความโค้งต่อเส้นผ่าศูนย์กลางท่อเท่ากับ 3.028 เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนระยะแอมปริจูดต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง และ เรย์โนลด์นัมเบอร์เดียวกัน รูปที่ 5.8 แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนรัศมีความโค้งต่อเส้นผ่าศูนย์กลางที่มีต่อความดันลด โดยพิจารณาที่อัตราส่วนระยะแอมปริจูดต่อเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ อุณหภูมิอากาศเข้าและออกจากท่อ เดียวกัน



รูปที่ 5.7 แสดงอิทธิพลของค่า  $a/D$  ที่มีผลต่อ  $K$  ที่  $Re$  ต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย  $a/D$  เท่ากับ 0.0513 , 0.0976 , 0.111 โดยพิจารณาที่ค่า  $R/D$  อุณหภูมิอากาศเข้าท่อ และ อุณหภูมิอากาศออกจากท่อ เดียวกัน  
(ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ 34ข , 35ข , 36ข ตามลำดับ )



รูปที่ 5.8 แสดงอิทธิพลของ R/D ที่มีต่อ  $\Delta p$  ที่อัตราการไหล ต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย R/D เท่ากับ 6.063 และ 3.028 โดยพิจารณาที่  $a/D$  อุณหภูมิอากาศเข้าท่อ และอุณหภูมิอากาศออกจากท่อ เดียวกัน (ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ 25 ข และ 37 ข ตามลำดับ)

3. ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในท่อที่วางตัวแนวตรง และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานความโค้งในท่อที่วางตัวแนวโค้ง มีความสัมพันธ์กับเรย์โนลด์์นัมเบอร์ในรูปแบบการยกกำลัง สมการทางเอมไพริคัลจากการวิเคราะห์ผลการทดลองแสดงดังต่อไปนี้

ท่อตรง ( $\theta = \infty$ ) ความยาว 0.5 เมตร ( $L/D = 4.762$ )

ที่ ระยะพิง 25 มิลลิเมตร ( $a/D=0.0214$ )

$$T_m = 17.25 \text{ }^\circ\text{C} \quad f = 4.7639 \text{ Re}^{-0.4443}$$

$$T_m = 18.5 \text{ }^\circ\text{C} \quad f = 4.3657 \text{ Re}^{-0.4349}$$

$$T_m = 32.25 \text{ }^\circ\text{C} \quad f = 3.7735 \text{ Re}^{-0.425}$$

$$T_m = 33.5 \text{ }^\circ\text{C} \quad f = 5.3516 \text{ Re}^{-0.4495}$$

ที่ระยะพิท 15 มิลลิเมตร ( $a/D=0.0976$ )

$$T_m = 17.25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad f = 0.9689 \text{ Re}^{-0.1928}$$

$$T_m = 18.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad f = 0.983 \text{ Re}^{-0.1954}$$

$$T_m = 32.25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad f = 0.7805 \text{ Re}^{-0.1775}$$

$$T_m = 33.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad f = 0.88 \text{ Re}^{-0.185}$$

ที่ระยะพิท 10 มิลลิเมตร ( $a/D=0.111$ )

$$T_m = 17.25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad f = 1.3245 \text{ Re}^{-0.1552}$$

$$T_m = 18.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad f = 1.6526 \text{ Re}^{-0.1744}$$

$$T_m = 32.25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad f = 1.6849 \text{ Re}^{-0.177}$$

$$T_m = 33.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad f = 1.2565 \text{ Re}^{-0.1512}$$

ท่อตรง ( $\theta = \infty$ ) ความยาว 1 เมตร ( $L/D = 9.524$ )

ที่ ระยะพิท 25 มิลลิเมตร ( $a/D=0.0214$ )

$$T_m = 17.25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad f = 2.5663 \text{ Re}^{-0.3815}$$

$$T_m = 18.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad f = 2.5534 \text{ Re}^{-0.3816}$$

$$T_m = 32.25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad f = 2.399 \text{ Re}^{-0.3815}$$



$$T_m = 33.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad f = 2.3937 \text{ Re}^{-0.3818}$$

ที่ ระยะพิท 15 มิลลิเมตร ( $a/D=0.0976$ )

$$T_m = 17.25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad f = 0.91 \text{ Re}^{-0.183}$$

$$T_m = 18.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad f = 0.8827 \text{ Re}^{-0.1807}$$

$$T_m = 32.25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad f = 0.8694 \text{ Re}^{-0.1843}$$

$$T_m = 33.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad f = 0.8043 \text{ Re}^{-0.1776}$$

ที่ ระยะพิท 10 มิลลิเมตร ( $a/D=0.111$ )

$$T_m = 17.25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad f = 1.3346 \text{ Re}^{-0.1557}$$

$$T_m = 18.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad f = 1.3732 \text{ Re}^{-0.1586}$$

$$T_m = 32.25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad f = 1.348 \text{ Re}^{-0.1581}$$

$$T_m = 33.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad f = 1.4116 \text{ Re}^{-0.1611}$$

ท่อโค้ง ( $\theta = 90^\circ$ ) ความยาว 0.5 เมตร ( $R/D = 3.028$ )

ที่ ระยะพิท 23 มิลลิเมตร ( $a/D=0.0513$ )

$$T_m = 17.25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad K = 29.59 \text{ Re}^{-0.2672}$$

$$T_m = 18.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad K = 26.818 \text{ Re}^{-0.2584}$$

$$T_m = 32.25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad K = 26.161 \text{ Re}^{-0.2562}$$

$$T_m = 33.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad K = 26.1 \text{ Re}^{-0.2573}$$

ที่ ระยะพิท 15 มิลลิเมตร ( $a/D=0.0976$ )

$$T_m = 17.25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad K = 19.163 \text{ Re}^{-0.1912}$$

$$T_m = 18.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad K = 21.899 \text{ Re}^{-0.2039}$$

$$T_m = 32.25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad K = 24.211 \text{ Re}^{-0.213}$$

$$T_m = 33.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad K = 17.465 \text{ Re}^{-0.1843}$$

ที่ ระยะพิท 10 มิลลิเมตร ( $a/D=0.111$ )

$$T_m = 17.25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad K = 31.804 \text{ Re}^{-0.2086}$$

$$T_m = 18.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad K = 31.686 \text{ Re}^{-0.2095}$$

$$T_m = 32.25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad K = 35.665 \text{ Re}^{-0.2197}$$

$$T_m = 33.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad K = 34.207 \text{ Re}^{-0.216}$$

ท่อโค้ง( $\theta = 90^\circ$ ) ความยาว 1 เมตร ( $R/D = 6.063$ )

ที่ ระยะพิท 23 มิลลิเมตร ( $a/D=0.0513$ )

$$T_m = 17.25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad K = 53.703 \text{ Re}^{-0.2783}$$

$$T_m = 18.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad K = 56.5 \text{ Re}^{-0.2781}$$

$$T_m = 32.25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad K = 55.5 \text{ Re}^{-0.2815}$$

$$T_m = 33.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad K = 55.2 \text{ Re}^{-0.281}$$

ที่ ระยะพิททา 15 มิลลิเมตร ( $a/D=0.0976$ )

$$T_m = 17.25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad K = 40.315 \text{ Re}^{-0.2156}$$

$$T_m = 18.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad K = 42.964 \text{ Re}^{-0.2233}$$

$$T_m = 32.25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad K = 43.3 \text{ Re}^{-0.221}$$

$$T_m = 33.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad K = 50.476 \text{ Re}^{-0.2362}$$

ที่ระยะพิททา 10 มิลลิเมตร ( $a/D=0.111$ )

$$T_m = 17.25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad K = 105.5 \text{ Re}^{-0.2785}$$

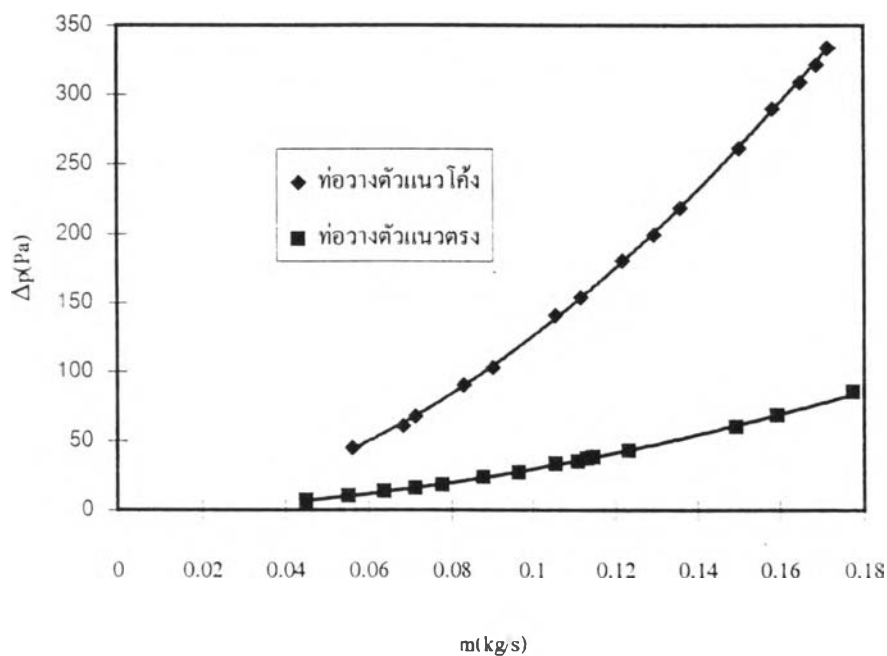
$$T_m = 18.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad K = 106.9 \text{ Re}^{-0.28}$$

$$T_m = 32.25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad K = 110.5 \text{ Re}^{-0.281}$$

$$T_m = 33.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad K = 112.5 \text{ Re}^{-0.2865}$$

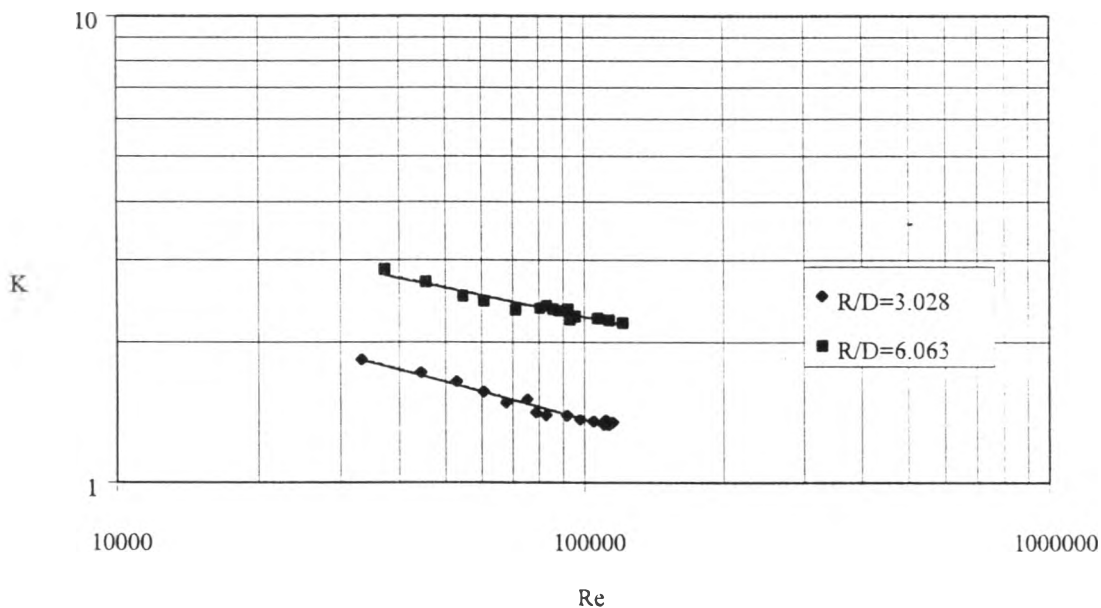
4. ค่าความดันลดที่เกิดขึ้นในท่อวางตัวแนวโค้งสูงกว่าในท่อวางตัวแนวตรงอย่างมาก เมื่อพิจารณาที่ อัตราส่วนระยะแอมปริจูดต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ ความยาวท่อและ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ เดียวกัน ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนทิศทางการไหลของอากาศตลอดแกนการไหลสำหรับการไหลของอากาศภายในท่อวางตัวแนวโค้ง จึงทำให้รูปแบบของความเร็ว (Velocity

profile) มีการเปลี่ยนรูปตลอดทิศทางการไหล ซึ่งมีความคล้ายกับรูปแบบการไหลในช่วงปากทางเข้าด้วยเหตุนี้ทำให้เป็นการเพิ่มผลจากปากทางเข้า (Entrance effect) ดังนั้นจึงทำให้ค่าความลาดเอียงของความเร็วเทียบกับแกนรัศมีสูงขึ้น และจากค่าตัวแปรไร้มิติค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในท่อวางตัวแนวตรงซึ่งแสดงในสมการที่ 3.24 และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานความโค้งซึ่งแสดงในสมการที่ 3.25 อยู่ในรูปสมการที่แตกต่างกันทำให้ไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ รูปที่ 5.9 แสดงอิทธิพลของความโค้งที่มีต่อความดันตก ที่อัตราการไหลต่างๆ



รูปที่ 5.9 แสดงอิทธิพลของความโค้งที่มีต่อความดันตกที่อัตราการไหลต่างๆ เปรียบเทียบระหว่างท่อวางตัวแนวโค้งและท่อวางตัวแนวตรง ซึ่งมีค่า  $\alpha/D$  ความยาวท่อ และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อเดียวกัน (ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ 38ข และ 14ข ตามลำดับ)

5. ในท่อวางตัวแนวโค้งที่มีอัตราส่วนรัศมีความโค้งต่อเส้นผ่าศูนย์กลางท่อมักจะส่งผลให้ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานความโค้งมีค่าสูงขึ้นโดย พิจารณาที่อัตราส่วนรัศมีความโค้งต่อเส้นผ่าศูนย์กลางท่อตั้งแต่ 3.028 ถึง 6.063 อาจเป็นเพราะผลจากความยาวที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นมีมากกว่าผลจากการเปลี่ยนทิศทางการไหล รูปที่ 5.10 แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนความโค้งต่อเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ ที่มีต่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทานความโค้ง ที่เรย์โนลด์-นัมเบอร์ต่างๆ



รูปที่ 5.10 แสดงถึงอิทธิพลของค่า  $R/D$  ที่มีต่อ  $K$  ที่  $Re$  ต่างๆ โดยพิจารณาเปรียบเทียบระหว่าง  $R/D$  เท่ากับ 3.028 และ 6.063 โดยที่มีค่า  $a/D$  , อุณหภูมิของอากาศเข้าและออกจากท่อ เดียวกัน (ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ 37ข และ 25ข ตามลำดับ )

### การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### การเปรียบเทียบผลการศึกษาวิจัยกับงานวิจัยของ H.Ito

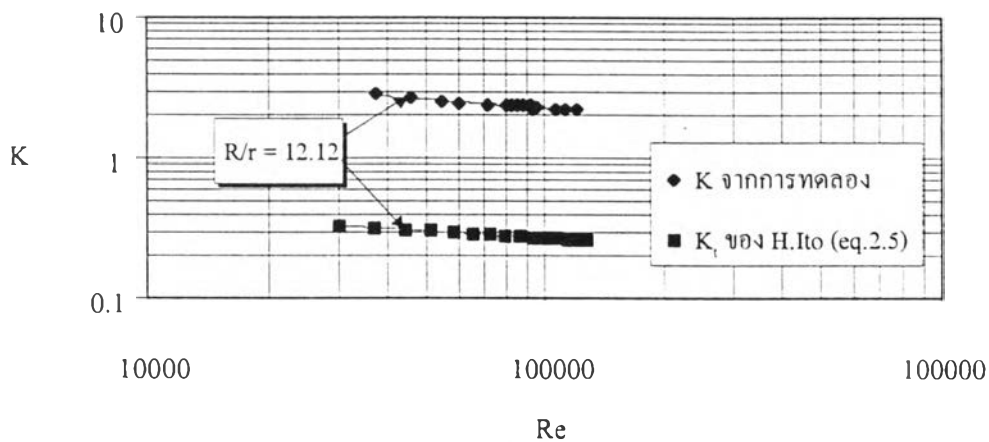
งานวิจัยของ H.Ito เป็นงานวิจัยที่ศึกษาการเกิดความดันลด ในการไหลของน้ำแบบปั่นป่วน ในช่วงเรย์โนลด์ส์นับเบอร์ ตั้งแต่  $2 \times 10^4$  ถึง  $4 \times 10^5$  ในท่อวางตัวแนวโค้งหน้าตัดกลมผิวเรียบในการเปรียบเทียบผลการวิจัยของ H.Ito กับงานวิจัยนี้พบว่า การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานความโค้งในงานวิจัยนี้มีแนวโน้มเช่นเดียวกับงานวิจัยของ H.Ito กล่าวคือค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานความโค้ง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนรัศมีความโค้งต่อรัศมีท่อเพิ่มขึ้น

ในงานวิจัยของ H.Ito พบว่าท่อโค้งที่มีรัศมีความโค้งต่อรัศมีท่อ มากกว่า 10.4 จะไม่ทำให้เกิดผลของความดันลดเนื่องจากความโค้งที่เกิดขึ้นในท่อตรงด้านทานออก(Downstream)

กล่าวคือ  $\Delta h_u = 0$  สำหรับ  $R/r > 10.4$  ดังนั้นความดันลดที่เกิดขึ้นจากท่อวางตัวแนวโค้งทั้งหมด จะเกิดขึ้นเฉพาะในส่วนโค้งเท่านั้น จากสมการที่ 2.1 จึงทำให้  $\Delta h_c = \Delta h_w$  ดังนั้น

$$K_c = K \quad \text{ที่} \quad \frac{R}{r} = 10.4 \quad (5.1)$$

ทำให้พบว่าการศึกษาการเกิดความดันลดของอากาศที่ไหลภายในท่ออะลูมิเนียม ยืดหยุ่นที่วางตัวในแนวโค้ง ในกรณีอัตราส่วนรัศมีความโค้งต่อเส้นผ่าศูนย์กลางท่อซึ่งเท่ากับ 6.063 (ท่อวางตัวแนวโค้ง  $90^\circ$  ความยาว 1 เมตร) จะมีค่าอัตราส่วนรัศมีความโค้งต่อรัศมีท่อเท่ากับ 12.126 ไม่เกิดความดันลดเนื่องจากความโค้งในท่อตรงด้านทางออก ( $h_u=0$ ) ทำให้สามารถนำผลการวิจัยในกรณีนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยของ H.Ito ได้ รูปที่ 5.11 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานความโค้งรวม( $K_c$ ) ซึ่งได้จากสมการทางเอมไพริคัล (สมการที่ 2.5) จากงานวิจัยของ H.Ito กับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานความโค้งที่ได้จากงานวิจัยนี้ โดยพิจารณาที่อัตราส่วนรัศมีความโค้งต่อรัศมีท่อเดียวกันคือเท่ากับ 12.12 และพบว่า การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานความโค้งมีแนวโน้มเดียวกัน แต่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานความโค้งจากผลการทดลองมีค่าสูงกว่าอย่างมากเพราะอิทธิพลของความหยาบที่ผิวท่อ



รูปที่ 5.11 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานความโค้งรวมซึ่งได้จากสมการทางเอมไพริคัล (สมการที่ 2.5) จากงานวิจัยของ H.Ito กับ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานความโค้งได้จากท่ออะลูมิเนียมยืดหยุ่นวางตัวแนวโค้ง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ความยาว 1 เมตร ระยะพิท 23 มิลลิเมตร อุณหภูมิอากาศเข้า  $16^\circ\text{C}$  และ อุณหภูมิอากาศออก  $18.5^\circ\text{C}$

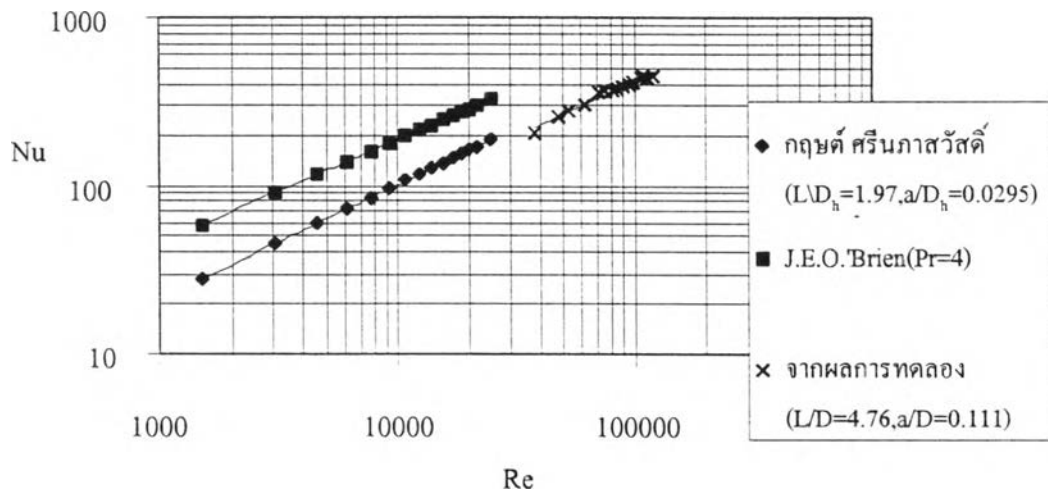
(ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ 25ข)

## การเปรียบเทียบผลการศึกษาวิจัยกับงานวิจัยของ J.E.O.'Brien และ กฤษต์ ศรีนภา- สวัสดิ์

งานวิจัยของ J.E.O.'Brien ทำการศึกษาวิจัยการถ่ายเทความร้อนในท่อลูกฟูกหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด  $12.7 \times 50.8$  ตารางมิลลิเมตร ความยาว 203.2 มิลลิเมตร ผิวท่อลูกฟูกทำมุม 30 องศา กับแนวระดับ โดยทำการศึกษาในช่วงรูปแบบของความเร็วและอุณหภูมิคงรูปแล้ว (Fully Developed region) โดยทำการศึกษาที่การไหลของน้ำแบบราบเรียบจนถึงปั่นป่วน ในช่วงเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ตั้งแต่ 1500 ถึง 25000 มีสภาพการให้ความร้อนแบบค่าความร้อนต่อหน่วยพื้นที่คงที่ (Constant heat flux) จากสมการทางเอมไพริคัลที่ได้จากผลการวิจัยของ J.E.O.'Brien พบว่า ค่านัสเซิลท์นัมเบอร์เฉลี่ยมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดลองเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเกิดจากของไหลที่ใช้ในการวิจัยมีความแตกต่างกัน ทำให้คุณสมบัติของของไหลที่มีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อนซึ่งรวมอยู่ในรูปแฟร็คชันนัมเบอร์ มีความแตกต่างกัน กล่าวคือ ในงานวิจัยของ J.E.O.Brien ใช้น้ำ เป็นของไหลในการวิจัยซึ่งมีค่าแฟร็คชันนัมเบอร์ อยู่ระหว่าง 4 ถึง 8 แต่ในการศึกษาวิจัยนี้ใช้ อากาศซึ่งมีค่าแฟร็คชันนัมเบอร์ประมาณ 0.71 เป็นของไหลในการวิจัย

งานวิจัยของกฤษต์ ศรีนภาสวัสดิ์ ทำการศึกษาวิจัยการถ่ายเทความร้อนในท่อลูกฟูกหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด  $60 \times 330$  ตารางมิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร ผิวท่อมัลลักษณะเป็นรูปไซน์เคิร์ฟ โดยมีอัตราส่วนระยะแอมปริจูดต่อเส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิก ( $a/D_h$ ) เท่ากับ 0.0295 และอัตราส่วนความยาวท่อต่อเส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิก ( $L/D_h$ ) เท่ากับ 1.97 โดยทำการศึกษาที่การไหลของอากาศเป็นแบบราบเรียบจนถึงปั่นป่วน ช่วงเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ตั้งแต่ 1500 ถึง 18000 โดยมีสภาพการให้ความร้อนเป็นแบบค่าความร้อนต่อหน่วยพื้นที่คงที่ (Constant heat flux) พิจารณาในช่วงรูปแบบของความเร็วและอุณหภูมิกำลังเปลี่ยนรูป (Developing region) จากสมการทางเอมไพริคัลที่ได้จากผลการศึกษาวิจัยของกฤษต์ ศรีนภาสวัสดิ์ สมการที่ 2.8 เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองท่ออะลูมิเนียมขีดหย่นความยาว 0.5 เมตร ( $L/D=4.762$ ) ระยะพิท 10 มิลลิเมตร ( $a/D=0.111$ ) มีแนวโน้มของค่านัสเซิลท์นัมเบอร์เฉลี่ยใกล้เคียงกับผลการทดลองมาก

จากรูปที่ 5.12 แสดงการเปรียบเทียบสมการทางเอมไพริคัลจากผลการวิจัยของ J.E.O.'Brien และกฤษต์ ศรีนภาสวัสดิ์ กับผลการทดลองท่ออะลูมิเนียมขีดหย่นความยาว 0.5 เมตร ( $L/D=4.762$ ) ระยะพิท 10 มิลลิเมตร ( $a/D=0.111$ ) อุณหภูมิอากาศที่เข้าท่อเท่ากับ  $16^\circ\text{C}$  และ อุณหภูมิอากาศที่ออกจากท่อเท่ากับ  $18.5^\circ\text{C}$



รูปที่ 5.12 แสดงการเปรียบเทียบสมการทางอเนกปริมาตรจากผลการวิจัยของ J.E.O.'Brien และ กฤษณ์ ศรีนภาสวัสดิ์ กับผลการทดลอง ท่ออะลูมิเนียมยืดหยุ่นวางตัวแนวตรง ความยาว 0.5 เมตร ( $L/D=4.76$ ) ระยะพิท 10 มิลลิเมตร ( $a/D=0.111$ ) อุณหภูมิอากาศเข้า  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$  และอุณหภูมิอากาศออกจากท่อ  $18.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ 15ข)

#### ผลการศึกษารวบรวมกับค่าความดันลดที่แนะนำ

ค่าความดันลดที่แนะนำจากบริษัทตะวันออกโพลิเมอร์อุตสาหกรรม จำกัด ซึ่งเป็นผู้ผลิตท่ออะลูมิเนียมยืดหยุ่น (Aeroduct) แสดงอยู่ในรูปแผนภูมิระหว่างค่าความดันลดต่อความยาวท่อ 1 เมตร ที่ท่อยืดตัวสูงสุด (Fully extended) กับอัตราการไหลเชิงปริมาตร ที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ และความเร็วลมต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างความดันลดที่ความยาวท่อ 1 เมตร ระยะพิท 25 มิลลิเมตร (ยืดตัวสูงสุด) ที่ได้จากการทดลองกับแผนภูมิดังกล่าวพบว่า ค่าความดันลดที่ได้จากการทดลองมีค่าน้อยกว่าแผนภูมิที่แนะนำโดย บริษัทตะวันออกโพลิเมอร์อุตสาหกรรม จำกัด เล็กน้อย

รูปที่ 5.13 แสดงแผนภูมิต่างค่าความดันลดต่อความยาวท่อ 1 เมตร ที่อัตราการไหล ความเร็วลม และขนาดท่อต่างๆ ของท่อวางตัวแนวตรงความยาว 1 เมตร ระยะพิท 25 มิลลิเมตร (ยืดตัวสูงสุด) มีระยะแอมปริจูดเท่ากับ 2.245 มิลลิเมตร) อุณหภูมิอากาศเข้าท่อ  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$  และอุณหภูมิอากาศ



ออกจากท่อ  $18.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ  $17.25\text{ }^{\circ}\text{C}$  (ข้อมูลจากการทดลองที่ s1P25dT2.5[C] ภาคผนวก ข ตารางที่ 1ข )

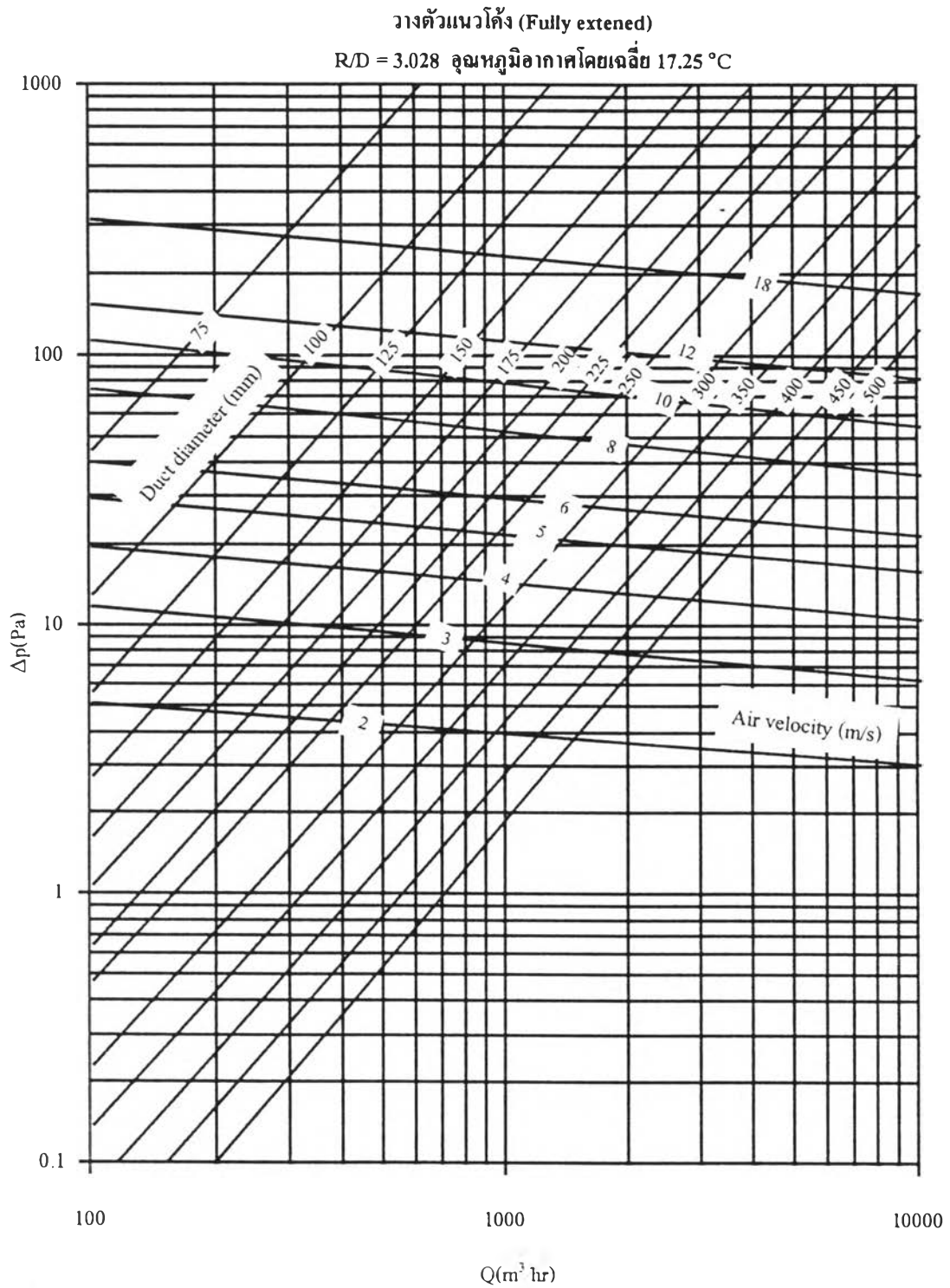
รูปที่ 5.14 แสดงแผนภูมิค่าความดันลด ที่อัตราการไหล ความเร็วลม และขนาดท่อต่างๆ ของท่อวางตัวแนวโค้ง  $90^{\circ}$  ซึ่งมีอัตราส่วนรัศมีความโค้งต่อเส้นผ่าศูนย์กลางท่อเท่ากับ 6.063 ระยะพิท 23 มิลลิเมตร (ขีดตัวสูงสุด มีระยะแอมปริจูดเท่ากับ 5.389 มิลลิเมตร) อุณหภูมิอากาศเข้า  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$  และอุณหภูมิอากาศออกจากท่อ  $18.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ  $17.25\text{ }^{\circ}\text{C}$  (ข้อมูลจากการทดลองที่ b1P23dT2.5[C] ภาคผนวก ข ตารางที่ 25ข)

รูปที่ 5.15 แสดงแผนภูมิค่าความดันลด ที่อัตราการไหล ความเร็วลม และขนาดท่อต่างๆ ของท่อวางตัวแนวโค้ง  $90^{\circ}$  ซึ่งมีอัตราส่วนรัศมีความโค้งต่อเส้นผ่าศูนย์กลางท่อเท่ากับ 3.028 ระยะพิท 23 มิลลิเมตร (ขีดตัวสูงสุด มีระยะแอมปริจูดเท่ากับ 5.389 มิลลิเมตร) อุณหภูมิอากาศเข้า  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$  และอุณหภูมิอากาศออกจากท่อ  $18.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ  $17.25\text{ }^{\circ}\text{C}$  (ข้อมูลจากการทดลองที่ b0.5P23dT2.5[C] ภาคผนวก ข ตารางที่ 37ข)

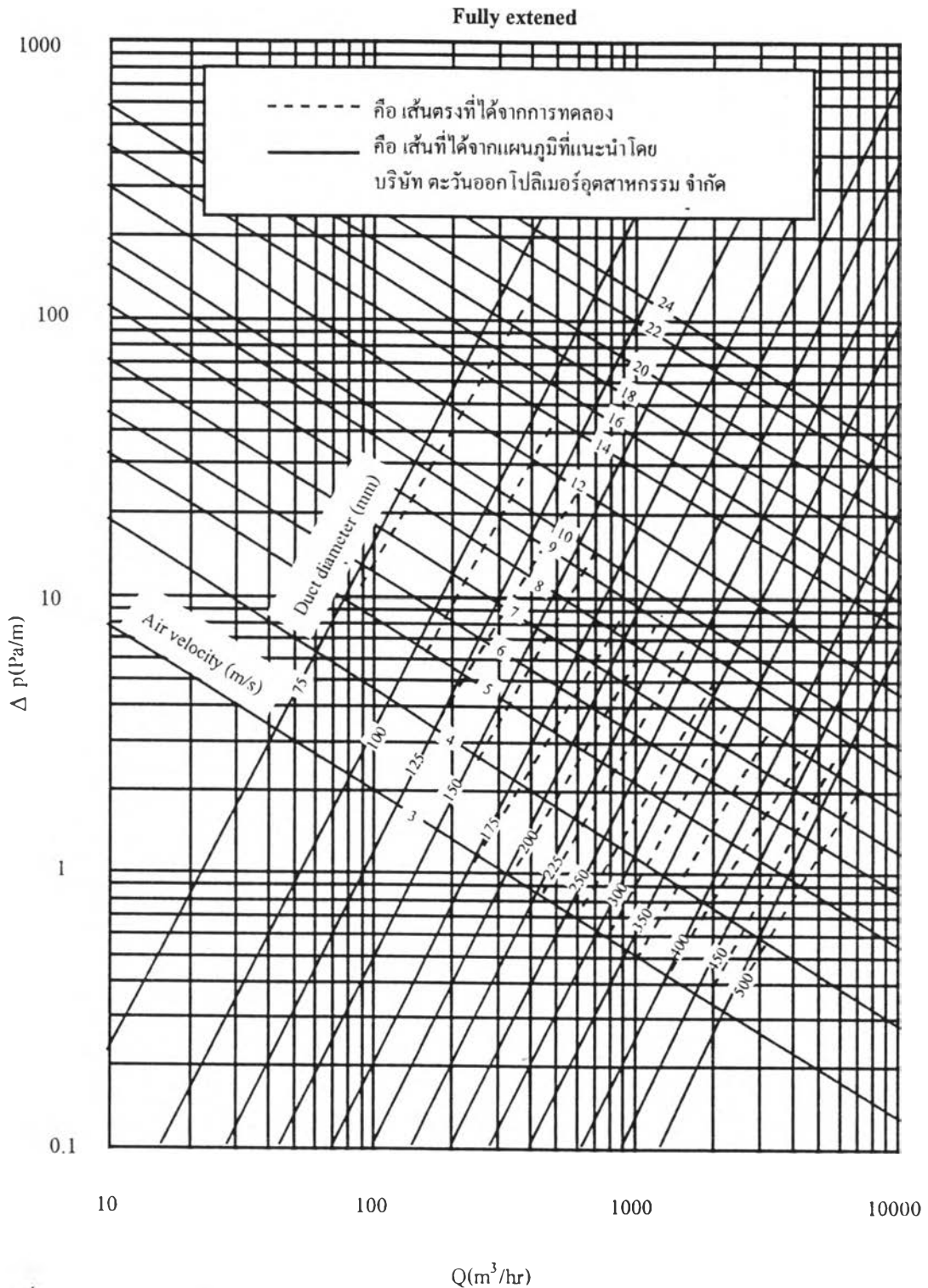
รูปที่ 5.16 แสดงแผนภูมิเปรียบเทียบค่าความดันลดต่อความยาวท่อ 1 เมตร ที่อัตราการไหล ความเร็วลมและขนาดท่อต่างๆ ระหว่างค่าความดันลดที่ความยาวท่อ 1 เมตร ระยะพิท 25 มิลลิเมตร(ขีดตัวสูงสุด มีระยะแอมปริจูดเท่ากับ 2.245 มิลลิเมตร) อุณหภูมิเฉลี่ย  $17.25\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( การทดลองที่ s1P25dT2.5[C] ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ 1ข) กับแผนภูมิที่แนะนำโดยบริษัท ตะวันออกโปลีเมอร์ อุตสาหกรรม จำกัด







รูปที่ 5.15 แสดงแผนภูมิค่าความดันตก ที่อัตราการไหล ความเร็ว และขนาดท่อต่างๆ ที่ได้สร้างขึ้น จากผลการทดลองที่วางตัวแนวโค้ง 90° อัตราส่วนรัศมีความโค้งต่อเส้นผ่าศูนย์กลางท่อเท่ากับ 3.028 ระยะพิท 23 มิลลิเมตร(ขีดตัวจนสุด) อุณหภูมิอากาศเข้า 16°C และอุณหภูมิอากาศออกจากท่อ 18.5°C (ข้อมูลจาก ภาคผนวก ข ตารางที่ 37ข)



รูปที่ 5.16 แสดงแผนภูมิเปรียบเทียบค่าความดันลดต่อความยาวท่อ 1 เมตร ที่อัตราการไหล ความเร็ว และขนาดท่อต่างๆ ระหว่างค่าความดันลดที่ความยาวท่อ 1 เมตร ระยะพิท 25 มิลลิเมตร อุณหภูมิเฉลี่ย 17.25 °C ( ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ 1ข ) กับแผนภูมิที่แนะนำโดย บริษัท ตะวันออกโปลีเมอร์ อุตสาหกรรม จำกัด