



- Bhatti, M.S., "Laminar flow in the entrance region of elliptical ducts", **ASME Journal of Fluids Engineering**, Vol.105, pp.290-296, 1983.
- Bird, R.B., W.E. Stewart and E.N. Lightfoot, **Transport Phenomena**, Wiley, New York, 1960.
- Chapman, A.J., **Heat Transfer**, Macmillan, New York, 3rd ed., 1974.
- Charunyakorn, P., "Forced Convection in Triangular Ducts", Master's Thesis, Department of Mechanical Engineering, Chulalongkorn University, 1977.
- Dunwoody, N.T., "Thermal results for forced heat convection through elliptical duct", **ASME Journal of Applied Mechanics**, Vol.29, pp.165-170, 1962.
- Ebadian, M.A., H.C. Topakoglu and O.A. Arnas, "On the convective heat transfer in a tube of elliptic cross section maintained under constant wall temperature", **ASME Journal of Heat Transfer**, Vol.108, pp.33-39, 1986.
- Holman, J.P., **Heat Transfer**, fourth edition, McGraw - Hill, Tokyo, 4th ed., 1976.
- Hornback, R.W., "An all-numerical method for heat transfer in the inlet of a tube", ASME Paper No. 65-WA/HT-36, 1965.
- James, P.A., "Forced Convection Heat Transfer in Narrow Passages", **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, Vol. 48, pp.330-332, 1970.
- Lundgren, T.S., Sparrow, E.M., and Starr, J.B., "Pressure drop Due to Entrance Region in Ducts of Arbitrary Cross-Section", **ASME Journal of Basic Engineering**, Vol.86, pp.620-626, 1964.
- Luzadder, Warren J., **Basic Graphics**, Prentice - Hall, New Jersey, 2nd ed., 1968.

- McAdam, William H., **Heat Transmission**, McGraw - Hill, Tokyo, 4th ed., 1954.
- McComas, S.T., "Hydrodynamic entrance lengths for duct of arbitrary cross section", **ASME Journal of Basic Engineering**, Vol.89, pp.847-850, 1967.
- Mongomery, S.R. and P. Wibulswas, "Laminar flow heat transfer for simultaneously developing profiles in ducts of rectangular cross section", **Applied Scientific Research**, Hague, pp.247-259, Dec., 1967.
- Promvongse, P., "Laminar Flow Friction and Pressure Drop in Parallel Ducts with Abrupt Contraction and Expansion", Master's thesis, Department of Mechanical Engineering, Chulalongkorn University, 1984.
- Rao, S.Someswara, N.CH.Pattabhi Ramacharyulu and V.V.G. Krishnamurty, "Laminar forced convection in elliptical ducts", **Applied Scientific Research**, Vol.21, pp.185-193, 1969.
- Rohsnow, Warren M. and James P. Hartnett, **Handbook of Heat Transfer**, McGraw - Hill, New York, 1973.
- Schenk, J., and B.S. Han, "Heat transfer from laminar flow in ducts with elliptic cross-section", **Applied Scientific Research**, pp.96-114, Vol.17, 1967.
- Shah, R.K., and London, A.L., "Laminar Flow Forced Convection Heat Transfer and Flow Friction in Straight and Curved Ducts - A Summary of Analytical Solutions.", Technical Report No.75, Prepared under Contract Nohr 225(91), NR - 090 - 342, Department of Mechanical Engineering, Stanford University, 1971.
- Sieder, E.N., and G.E. Tate, "Heat Transfer and Pressure Drop of Liquids in Tubes", **Industrial and Engineering Chemistry**,

- pp.1429-1435, vol.28, 1963.
- Spiegel, Murray R., **Mathematical Handbook of Formulas and Tables**, McGraw - Hill, New York, 1968.
- Tangsirimongkol, P., "Laminar Forced Convection in Triangular Ducts", Master's Thesis, Department of Mechanical Engineering, Chulalongkorn University, 1976.
- Tao, L.N., "On some laminar forced convection problem", **ASME Journal of Heat Transfer**, Vol.83, pp.466-472, 1966.
- Streeter, Victor L. and E. Benjamin Wiley, **Fluid Mechanics**, McGraw - Hill, Tokyo, 7th ed., 1979.
- Tyagi, V.P., "Laminar forced convection of a dissipative fluid in a channel", **ASME Journal of Heat Transfer**, Vol.88, pp.161-169, 1966.
- Walpole, Ronald E. and Raymond H. Myers, **Probability and Statistics for Engineers and Scientists**, Macmillan, New York, 2ed., 1978.
- Yavanopas, S., "Laminar Forced Convection in Parallel Ducts with Abrupt Contraction and Expansion", Master's Thesis, Department of Mechanical Engineering, Chulalongkorn University, 1985.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

คุณสมบัติของน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ก.1 คุณสมบัติของน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ (Chapman, 1974)

T (°C)	Pr	μ (kg/m.s) $\times 10^{-4}$	γ (m ² /s) $\times 10^{-7}$	α (m ² /s) $\times 10^{-7}$
26.67	5.85	8.598	8.619	1.470
32.22	5.13	7.647	7.690	1.496
37.78	4.52	6.820	6.864	1.522
43.33	4.04	6.159	6.219	1.548
48.89	3.65	5.621	5.677	1.548
54.44	3.30	5.125	5.212	1.574
60.00	3.01	4.712	4.799	1.599
65.56	2.72	4.299	4.387	1.625
71.11	2.53	4.009	4.103	1.625
76.67	2.33	3.720	3.819	1.651
82.22	2.16	3.472	3.587	1.651
87.78	2.03	3.265	3.380	1.677
93.33	1.90	3.059	3.174	1.677
98.89	1.76	2.852	2.967	1.677
104.44	1.66	2.686	2.812	1.703

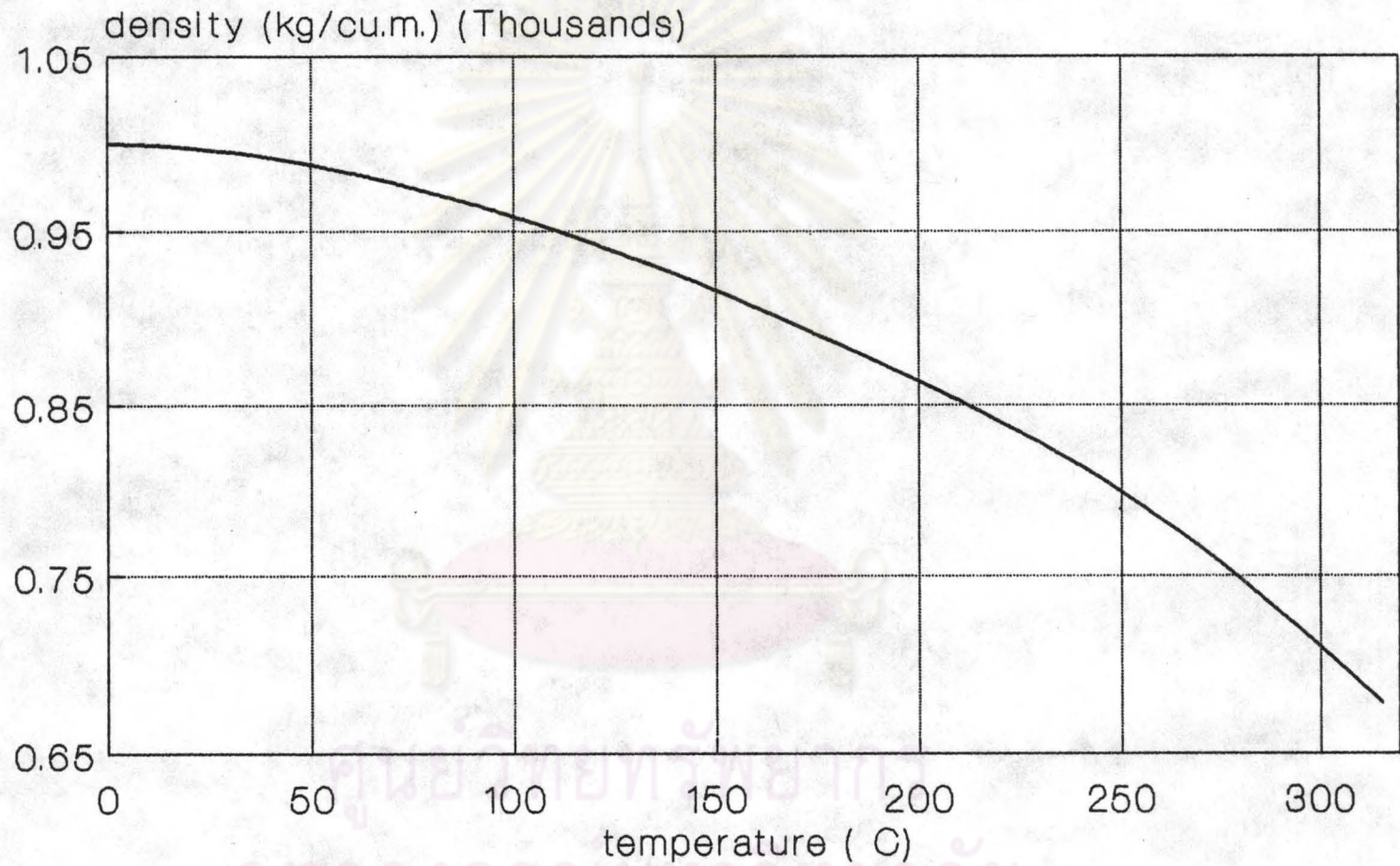
T = อุณหภูมิ (°C)

μ = dynamic viscosity (kg/m.s)

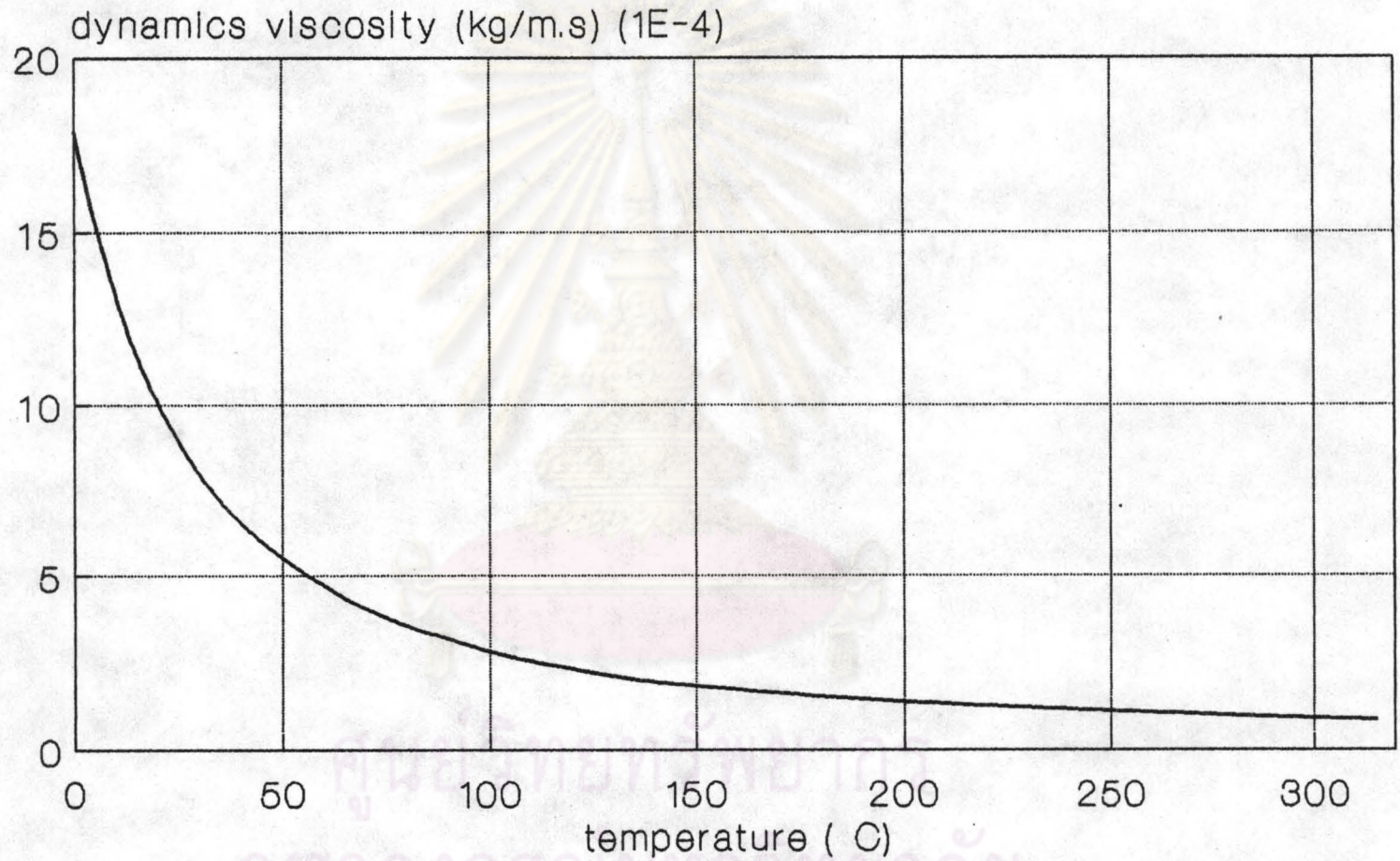
Pr = Prandtl number

γ = kinematic viscosity (m²/s)

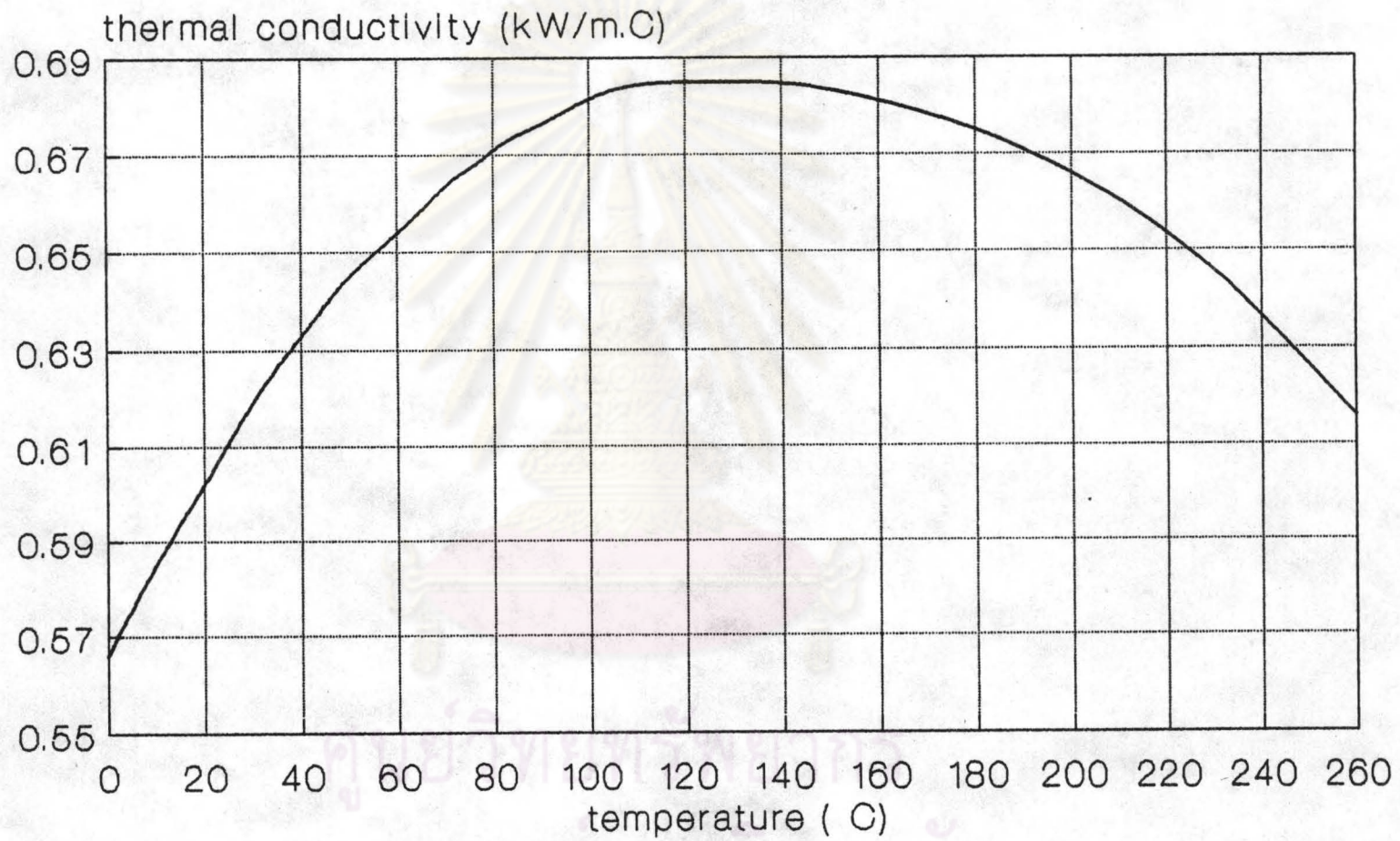
α = thermal diffusivity (m²/s)



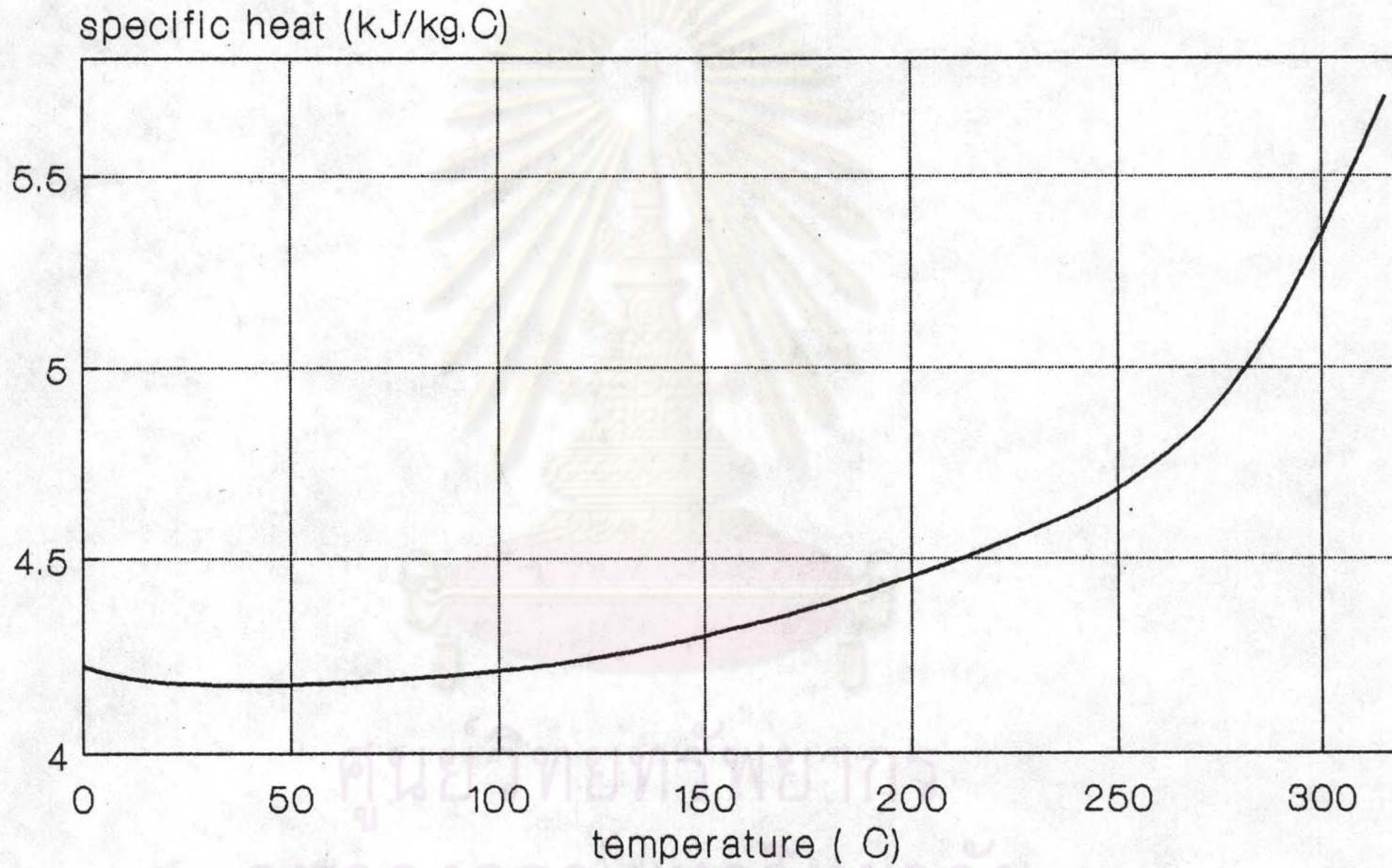
รูปที่ ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของน้ำ กับอุณหภูมิของน้ำ (Holman, 1976)



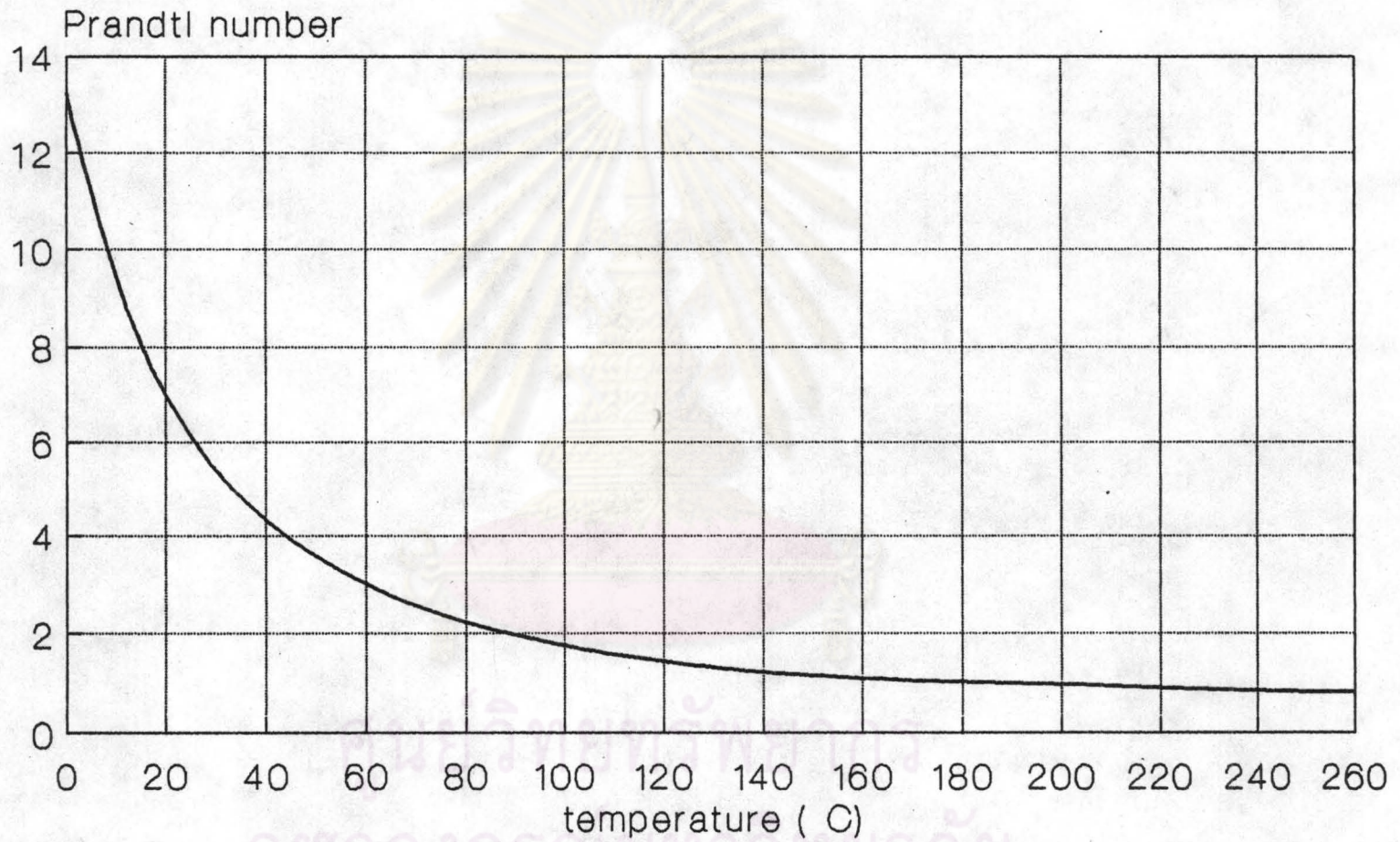
รูปที่ ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดไดนามิกของน้ำ กับอุณหภูมิของน้ำ (Holman, 1976)



รูปที่ ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความนำความร้อนของน้ำ กับอุณหภูมิของน้ำ (Holman, 1976)



รูปที่ ก.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนจำเพาะของน้ำ กับอุณหภูมิของน้ำ (Holman, 1976)



รูปที่ ก.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Prandtl number กับอุณหภูมิของน้ำ (Holman, 1976)

ภาคผนวก ข.

การคำนวณค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของทอวงรีที่ใช้ในการทดลอง



ศูนย์วิทยพัชระ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ข.1 การคำนวณค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของทอวงรีที่ใช้ในการทดลองที่ $\text{aspect ratio} = 0.25$

ใช้ทอกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง $1 \frac{1}{4}$ นิ้ว หรือ $1 \frac{1}{4} \times 0.025$ เมตร
= 0.03125 เมตร

เส้นรอบวงของวงกลม (P)

$$\begin{aligned} P &= \pi D \quad \text{เมื่อ } D = \text{เส้นผ่าศูนย์กลางของวงกลม} \\ &= \pi(0.03125) \\ &= 0.0981747 \text{ เมตร} \end{aligned}$$

เส้นรอบวงของวงรี (Pe)

$$Pe = 4aE$$

เมื่อ $a =$ semi-major axis ของทอวงรี
 $E =$ complete elliptic integral of the second kind
ค่า E ที่ aspect ratio 0.25 = 1.07231

ดังนั้น

$$\begin{aligned} a &= Pe/4E \\ &= 0.0981747/4(1.07231) \\ &= 0.0228886 \text{ เมตร} \end{aligned}$$

เนื่องจาก aspect ratio , $b/a = 0.25$ เมื่อ $b =$ semi - minor axis

ดังนั้น

$$\begin{aligned} b &= a(0.25) \\ &= (0.0228886)(0.25) \\ &= 0.0057221 \text{ เมตร} \end{aligned}$$

พื้นที่หน้าตัดของทอวงรี (B)

$$\begin{aligned} B &= \pi ab \\ &= \pi(0.0228886)(0.0057221) \\ &= 4.1146068 \times 10^{-4} \text{ ตารางเมตร} \end{aligned}$$

เส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิก (D_h)

$$\begin{aligned} D_h &= 4B/Pe \\ &= 4(4.1146068 \times 10^{-4})/0.0981747 \end{aligned}$$

$$= 0.0167644 \text{ เมตร}$$

ข.2 การคำนวณค่าคุณสมบัติต่างๆของท่อวงรีที่ใช้ในการทดลอง ที่ aspect ratio 0.5

ใช้ท่อกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง $3/4$ นิ้ว หรือ $3/4 \times 0.025$ เมตร
 $= 0.01875$ เมตร

เส้นรอบวงของวงกลม (P)

$$\begin{aligned} P &= \pi D \text{ เมื่อ } D = \text{เส้นผ่าศูนย์กลางของวงกลม} \\ &= \pi(0.01875) \\ &= 0.0589048 \text{ เมตร} \end{aligned}$$

เส้นรอบวงของวงรี (Pe)

$$Pe = 4aE$$

เมื่อ $a =$ semi-major axis ของท่อวงรี
 $E =$ complete elliptic integral of the second kind
ค่า E ที่ aspect ratio 0.25 = 1.21106

ดังนั้น

$$\begin{aligned} a &= Pe/4E \\ &= 0.0589048/4(1.21106) \\ &= 0.0121597 \text{ เมตร} \end{aligned}$$

เนื่องจาก aspect ratio , $b/a = 0.25$ เมื่อ $b =$ semi-minor axis

ดังนั้น

$$\begin{aligned} b &= a(0.25) \\ &= (0.0121597)(0.25) \\ &= 0.00607985 \text{ เมตร} \end{aligned}$$

พื้นที่หน้าตัดของท่อวงรี (B)

$$\begin{aligned} B &= \pi ab \\ &= (0.0121597)(0.00607985) \\ &= 2.3225528 \times 10^{-4} \text{ ตารางเมตร} \end{aligned}$$

เส้นผ่าศูนย์กลางโฮดรอลิก (D_h)

$$\begin{aligned} D_h &= 4B/Pe \\ &= 4(2.3225528 \times 10^{-4})/0.0589048 \\ &= 0.0157715 \text{ เมตร} \end{aligned}$$



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค.

ตัวอย่างการคำนวณค่าต่างๆจากการทดลอง



ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค.1 ตัวอย่างการคำนวณค่าต่าง ๆ จากการทดลอง

ในการคำนวณนำข้อมูลมาจากการทดลอง ซึ่งท่อวงรีมีค่า spect ratio 0.5 และอุณหภูมิผนังท่อประมาณ 42 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) ที่การเก็บข้อมูลครั้งที่ 13 โดยจากตารางข้อมูลจะได้ว่า

อุณหภูมิของน้ำขาออก	36.92	$^{\circ}\text{C}$
อุณหภูมิของน้ำขาเข้า	30.22	$^{\circ}\text{C}$
อุณหภูมิผนังท่อ	42.54	$^{\circ}\text{C}$
อัตราการไหลของน้ำ	0.03211	กิโลกรัมต่อวินาที
ความสูงของระดับน้ำในนาโนมิเตอร์	10.11	มิลลิเมตร

จากหัวข้อที่ 2.3 สามารถนำสมการต่าง ๆ มาได้ดังนี้

ค่าตัวเลขที่ นัมเบอร์ (Nusselt number) จากสมการ (2.3.6) ซึ่งเขียนได้ว่า

$$\text{Nu} = \frac{\pi b \gamma \text{Re} (T_o - T_i)}{4 E L \alpha (T_w - T_b)_{\ln}} \quad \dots (2.3.6)$$

- เมื่อ
- b = semi-minor axis ของท่อวงรี
 - γ = kinematic viscosity ของของไหล
 - Re = Reynolds number
 - T_o = อุณหภูมิขาออกของน้ำ
 - T_i = อุณหภูมิขาเข้าของน้ำ
 - α = thermal diffusivity ของน้ำ
 - E = complete elliptic integral of the second kind
 - L = ความยาวของท่อทดสอบ
 - $(T_w - T_b)_{\ln}$ = อุณหภูมิแตกต่างเฉลี่ยแบบ log (logarithmic mean temperature difference)



ค่า Reynolds number สามารถหาได้จากสมการ (2.4.4) ซึ่งเขียนได้ว่า

$$Re = \frac{wD_h}{e\gamma} \quad \dots(2.4.4)$$

เมื่อ

- w = อัตราการไหลของมวลของน้ำ
- e = ความหนาแน่นของน้ำ
- B = พื้นที่หน้าตัดของท่อ
- D_h = เส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อ
- γ = kinematic viscosity ของน้ำ

ค่า logarithmic mean temperature difference $(T_w - T_b)_{\ln}$ สามารถหาได้จากสมการ (2.5.1) ซึ่งเขียนได้ว่า

$$T_w - T_b = \frac{T_1 - T_0}{\ln \frac{(T_w - T_0)}{(T_w - T_1)}} \quad \dots(2.5.1)$$

เมื่อ

- T_w = อุณหภูมิของผนังท่อ
- T_b = อุณหภูมิเฉลี่ย (cup-mixing) ของน้ำในท่อ
- T_1 = อุณหภูมิของน้ำขาเข้า
- T_0 = อุณหภูมิของน้ำขาออก

ค่าอุณหภูมิเฉลี่ย (T_b) ของน้ำในท่อสามารถหาได้จากสมการ (2.5.2) ซึ่งเขียนได้ว่า

$$T_b = T_w - \frac{T_1 - T_0}{\ln \frac{(T_w - T_0)}{(T_w - T_1)}} \quad \dots(2.5.2)$$

หาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ (T_b) โดยการแทนค่า T_o , T_1 และ T_w ลงในสมการ (2.5.2) จะได้

$$T_b = 42.54 - \frac{30.22 - 36.92}{\ln((42.54-36.92)/(42.54-30.22))}$$

$$= 34.00 \text{ } ^\circ\text{C}$$

ซึ่งค่าอุณหภูมิเฉลี่ย (T_b) ของน้ำที่ได้นี้สามารถนำไปหาค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของน้ำได้ โดยหาได้จากตารางคุณสมบัติของน้ำ ในภาคผนวก ก. ซึ่งจะได้ว่า

ที่อุณหภูมิน้ำ $34.00 \text{ } ^\circ\text{C}$

ค่า kinematic viscosity (ν)	=	$7.5855547 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
ค่า thermal diffusivity (α)	=	$1.5024776 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
ค่าความหนาแน่น (ρ)	=	998.38 kg/m^3

สำหรับค่ามิติและค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของท่อวงรี หาได้จาก ภาคผนวก ง. หัวข้อ ง.1 การคำนวณค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของท่อวงรี ซึ่งจะได้ว่า

ท่อ aspect ratio	=	0.5	
ค่า E	=	1.21106	
ค่า semi-minor axis (b)	=	0.006079	เมตร
ค่าความยาวของท่อ (L)	=	2.5	เมตร
ค่าพื้นที่หน้าตัดของท่อ (B)	=	2.32255×10^{-4}	ตารางเมตร
ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (D_h)	=	0.01569	เมตร

หาค่า logarithmic mean temperature difference ได้จาก

$$(T_w - T_b)_{\ln} = T_w - T_b$$

$$= 42.54 - 34.00$$

$$= 8.54 \text{ } ^\circ\text{C}$$

หาค่า Reynolds number ได้จาก

$$Re = \frac{wD_h}{\nu} \dots (2.4.5)$$

$$= \frac{(0.03211)(0.01569)}{(998.38)(2.32255 \times 10^{-4})(7.3855347 \times 10^{-7})}$$

$$= 2970.98$$

ดังนั้นจึงสามารถหาค่า Nusselt number ได้จาก

$$Nu = \frac{\pi(0.006079)(7.3855347 \times 10^{-7})(2941.84)(36.92 - 30.22)}{4(1.5024776 \times 10^{-7})(1.21106)(2.5)(8.54)}$$

$$= 18.04$$

ค่าเกรตซ์นัมเบอร์ (Graetz number) หาได้จากสมการ (2.4.5) ซึ่งเขียนได้ว่า

$$Gz = \frac{wPrD_h^2}{eByL} \quad \dots(2.4.5)$$

เมื่อ

- Gz = Graetz number
- w = อัตราการไหลของมวลน้ำ
- Pr = แพลนด์นัมเบอร์ (Prandtl number)
- D_h = เส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อวงรี
- e = ความหนาแน่นของน้ำ
- B = พื้นที่หน้าตัดของท่อวงรี
- γ = kinematic viscosity ของน้ำ
- L = ความยาวของท่อทดสอบ

และจากตารางคุณสมบัติของน้ำที่อุณหภูมิ 34.00 °C จะได้ว่าค่า Prandtl number (Pr) เป็น 4.9

เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (2.4.5) จะได้ว่า

$$Gz = \frac{(0.03211)(4.9)(0.01569)^2}{(998.38)(2.32255 \times 10^{-4})(7.3855347 \times 10^{-7})(2.5)}$$

$$= 82.8$$

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (friction factor) สามารถหาได้จากสมการ (2.6.3) ซึ่งเขียนได้ว่า

$$f = \frac{h_f}{\frac{L}{2gD_h} \left[\frac{w}{eB} \right]^2} \quad \dots(2.6.3)$$

- เมื่อ
- f = friction factor
 - h_f = ความสูงของระดับน้ำในหลอดแก้วมาโนมิเตอร์
 - L = ความยาวของท่อทดสอบ
 - g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
 - D_h = เส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อทดสอบ
 - w = อัตราการไหลของมวลของน้ำ
 - e = ความหนาแน่นของน้ำ
 - B = พื้นที่หน้าตัดของท่อทดสอบ

เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (2.6.3) จะได้ว่า

$$f = \frac{10.11 \times 10^{-3}}{\frac{2.5}{2(9.81)(0.01569)} \left[\frac{0.03211}{(998.38)(2.32255 \times 10^{-4})} \right]^2}$$

$$= 0.06421$$

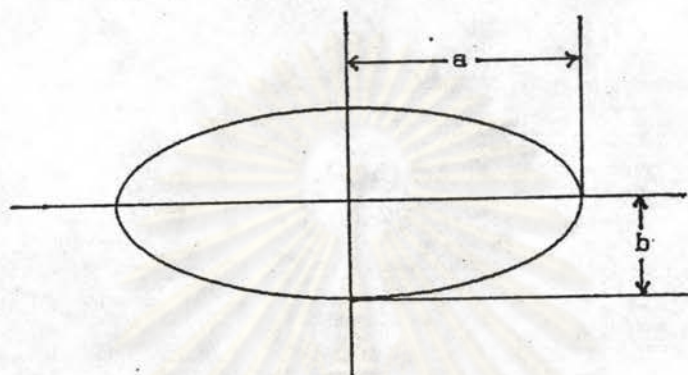
ภาคผนวก ง.

คุณสมบัติของรูปร่างรีและวิธีสร้างรูปร่างรี



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ง.1 คุณสมบัติของรูปวงรี



รูปที่ ง.1 แสดงมิติทั่วไปของรูปวงรี

a = semi-major axis

b = semi-minor axis

พื้นที่ของรูปวงรี (area, B) = πab

ความยาวของเส้นรอบรูป (perimeter, Pe) = $4aE$

เมื่อ E = complete elliptic integral of the second kind

$$= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta} \, d\theta$$

k = eccentricity

$$= \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$$

$$= \sqrt{1 - (b/a)^2}$$

$$= \sqrt{1 - e^2}$$

เมื่อ e = b/a = aspect ratio

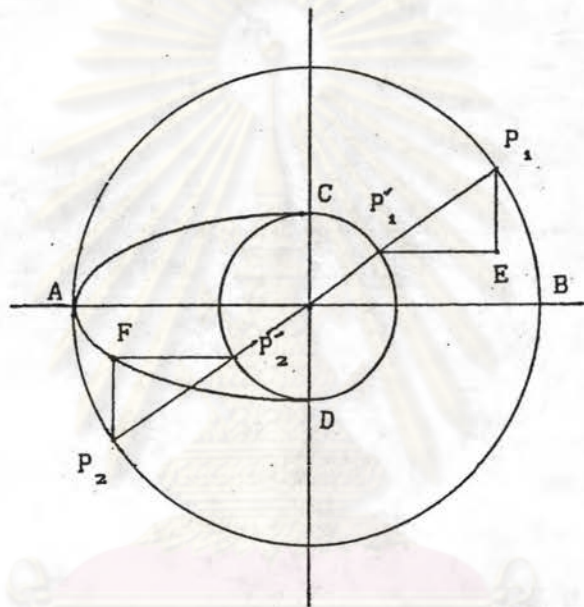
ที่ e = 0.25 จะได้ว่า E = 1.0723

e = 0.50 จะได้ว่า E = 1.31847

ง.2 วิธีสร้างรูปวงรี

รูปวงรีสามารถสร้างได้หลายวิธี เช่น วิธี Foci วิธี Trammel วิธี Concentric circle วิธี Four-Center และวิธี Parallelogram เป็นต้น วิธีที่มีความถูกต้องแม่นยำที่สุด คือวิธี Concentric circle ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีนี้

ง.2.1 การสร้างรูปวงรีโดยใช้วิธี Concentric Circle



รูปที่ ง.2 แสดงการสร้างรูปวงรีโดยวิธี concentric circle

เขียนแกนเอก (major axis) AB และแกนโท (minor axis) CD ใช้จุดศูนย์กลางของวงรี (จุด O) เป็นจุดหมุน จะได้วงกลมสองวงที่มีความยาวของแกนเอกและแกนโทเป็นเส้นผ่าศูนย์กลาง แบ่งวงกลมทั้งสองออกด้วยมุมเท่า ๆ กัน และลากเส้นตรงผ่านจุดศูนย์กลางของวงกลมทั้งสอง ดังเช่น เส้น P_1P_2 จากจุด P_1 บนเส้นรอบวงของวงกลมใหญ่ลากเส้นตรงขนานกับแกนโท CD และจากจุด P_1' ซึ่งเส้นผ่าศูนย์กลาง P_1P_2 ตัดกับวงกลมวงใน ลากเส้นตรงขนานกับแกนเอก AB จุดตัดของเส้นตรงทั้งสองเส้นคือ จุด E เป็นจุด ๆ หนึ่งบนรูปวงรีที่ต้องการ ที่จุด P_2 และ P_2' ทำวิธีการเหมือนเดิมจะได้จุด F จะเห็นได้ว่าจุดสองจุดนี้ได้จากเส้นตรง P_1P_2 ทำการสร้างจุดขึ้นมาหลาย ๆ จุด แล้วลากเส้นต่อระหว่างจุด ด้วยไม้บรรทัดโค้งก็จะได้รูปวงรี

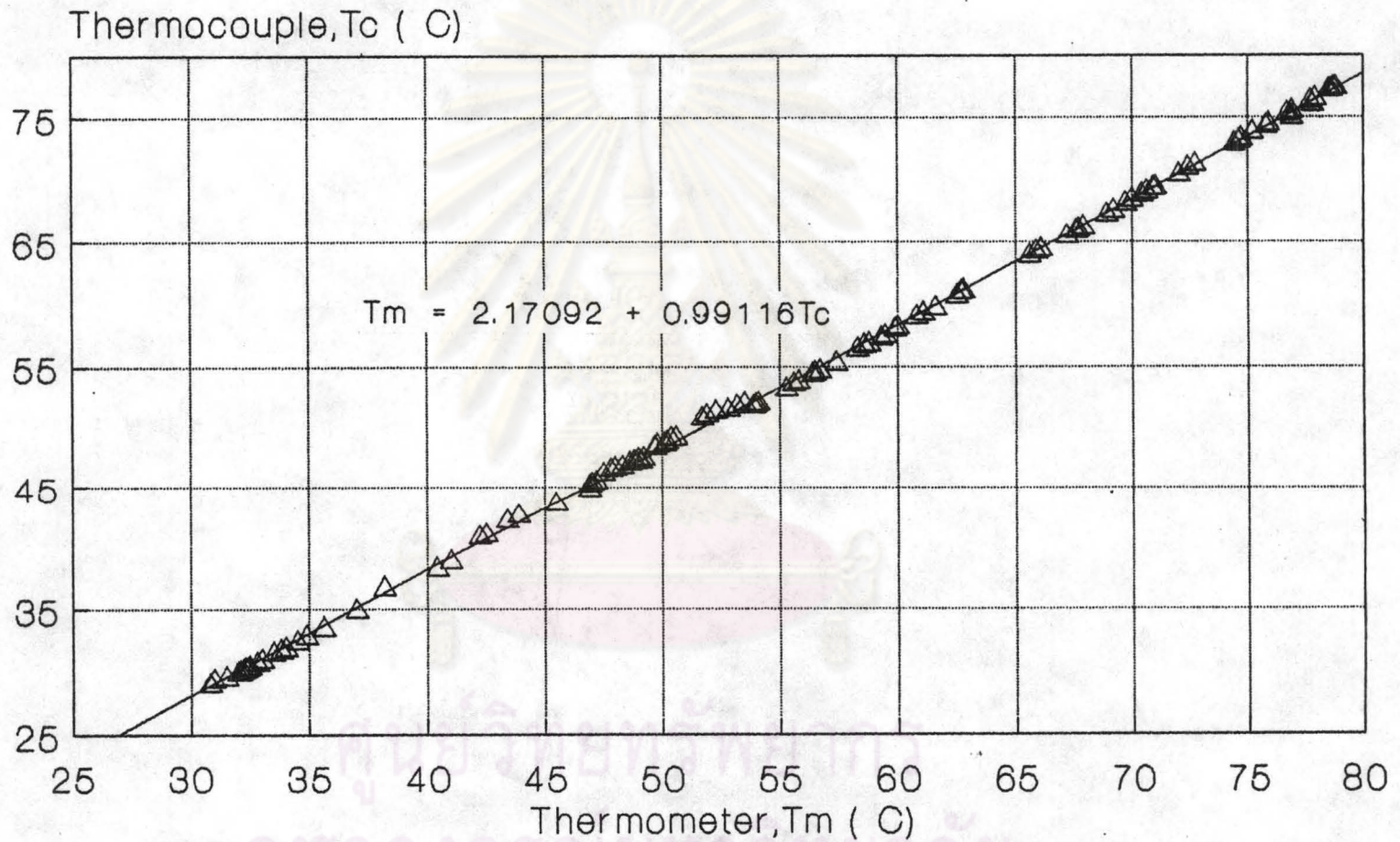


ภาคผนวก จ.

กราฟปรับแต่งของเทอร์โมคัปเปิลซึ่งใช้ในการทดลอง
(calibration curve)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ จ.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิซึ่งอ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิล กับค่าอุณหภูมิซึ่งอ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน

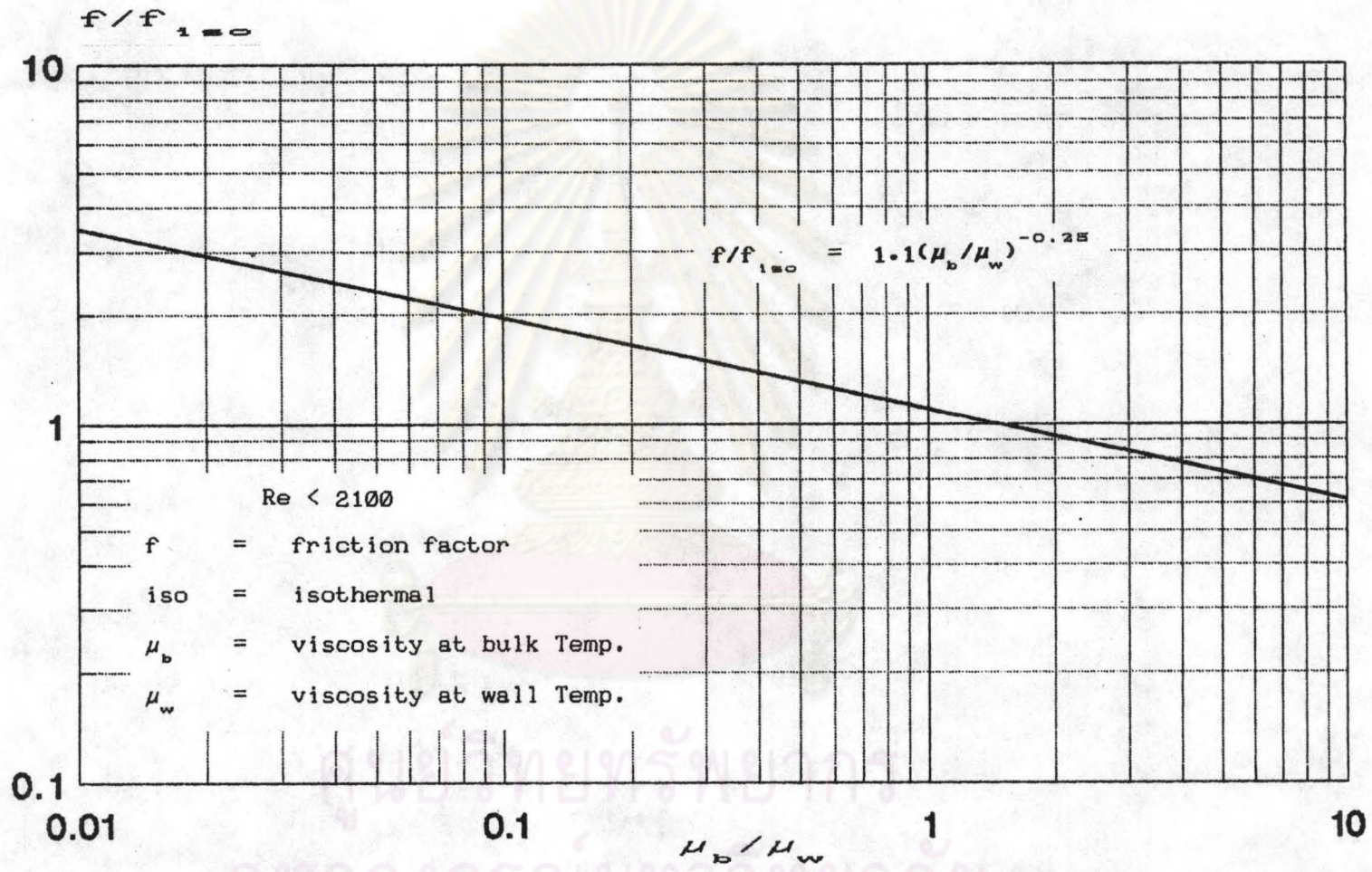
ภาคผนวก จ.

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่างตัวประกอบความเสียดทานในท่อกลม
เมื่อมีการถ่ายเทความร้อนกับเมื่อไม่มีการถ่ายเทความร้อน กับอัตราส่วนระหว่างความหนืด
ของน้ำมันที่อุณหภูมิเฉลี่ยกับที่อุณหภูมิผนังท่อ (Sieder and Tate, 1963)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

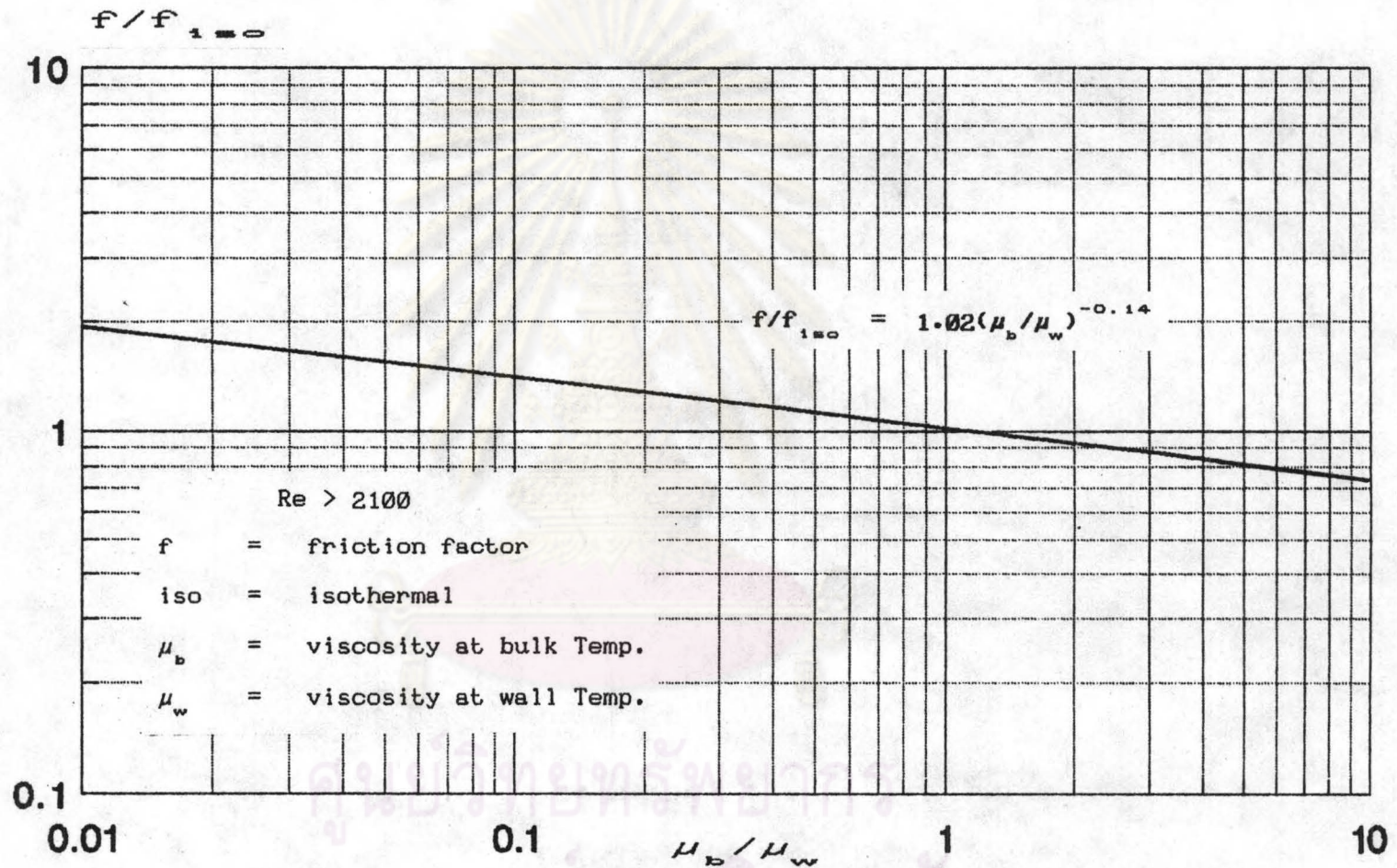
laminar



รูปที่ ฉ.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f/f_{iso} กับค่า μ_b/μ_w ของท่อกลม ที่ $Re < 2100$

13/1

tu, subject



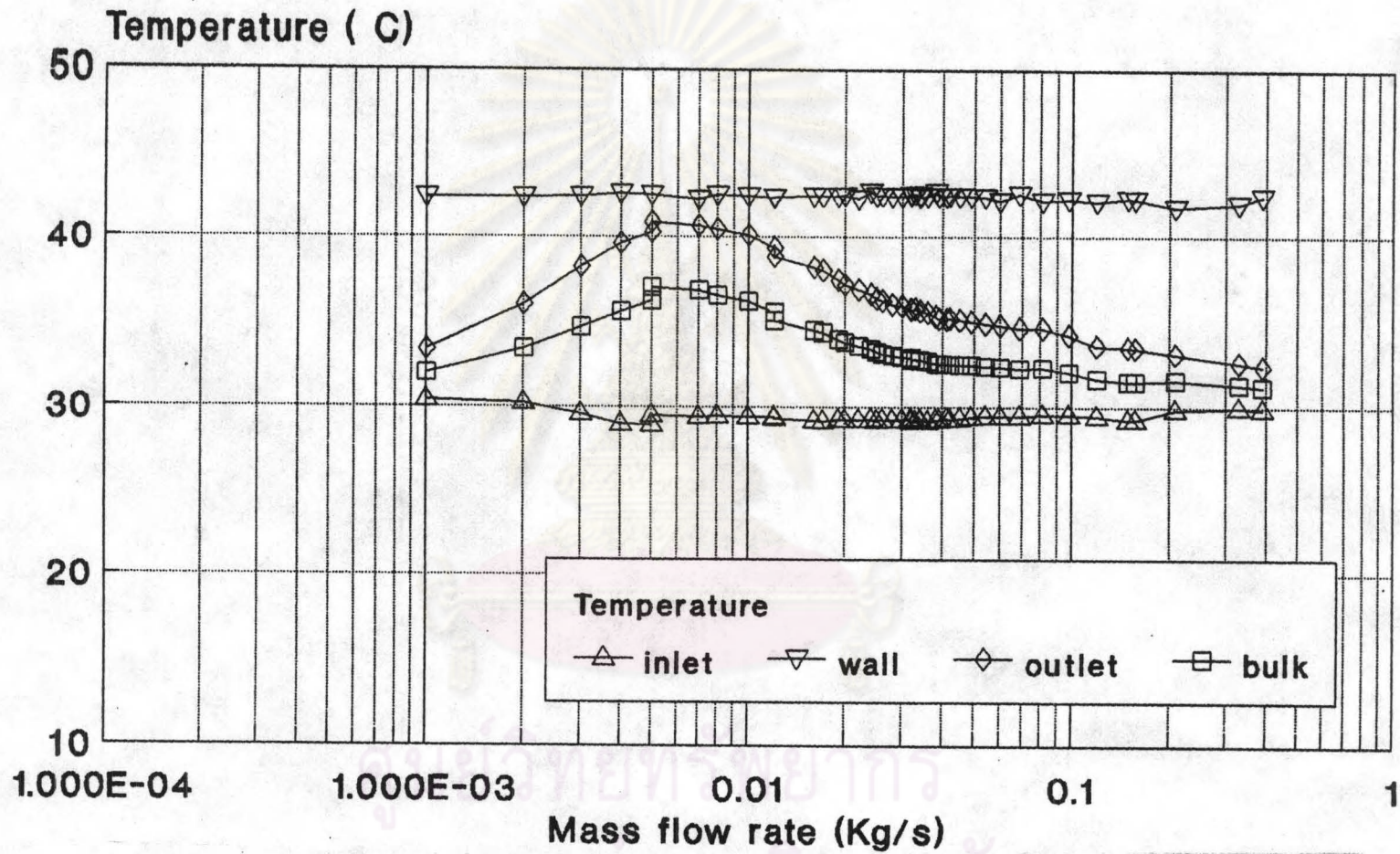
รูปที่ ๑.๒ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f/f_{iso} กับค่า μ_b/μ_w ของท่อกลม ที่ $Re > 2100$

ภาคผนวก ๑.

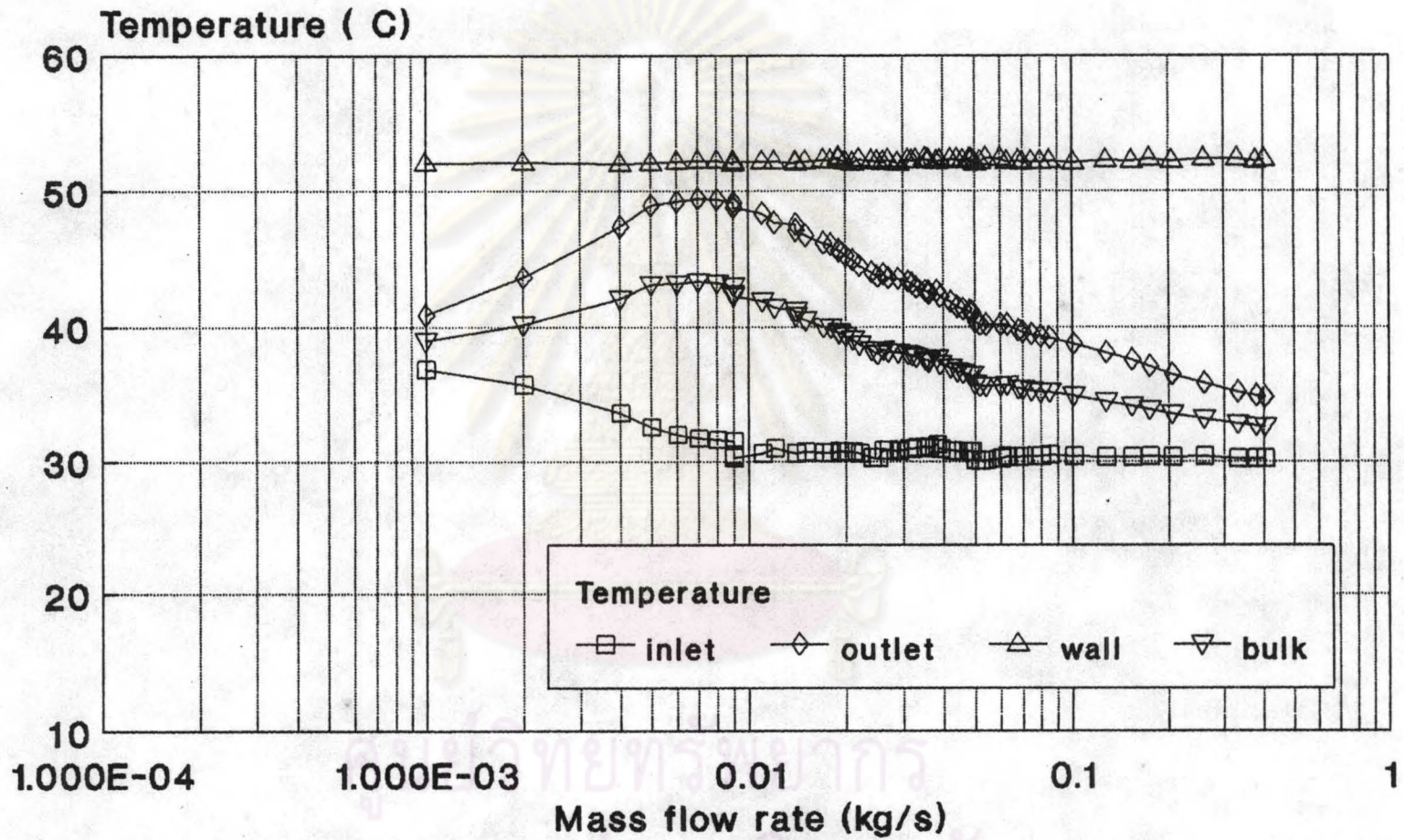
กราฟแสดงความสัมพันธ์ต่างๆของข้อมูลจากการทดลอง



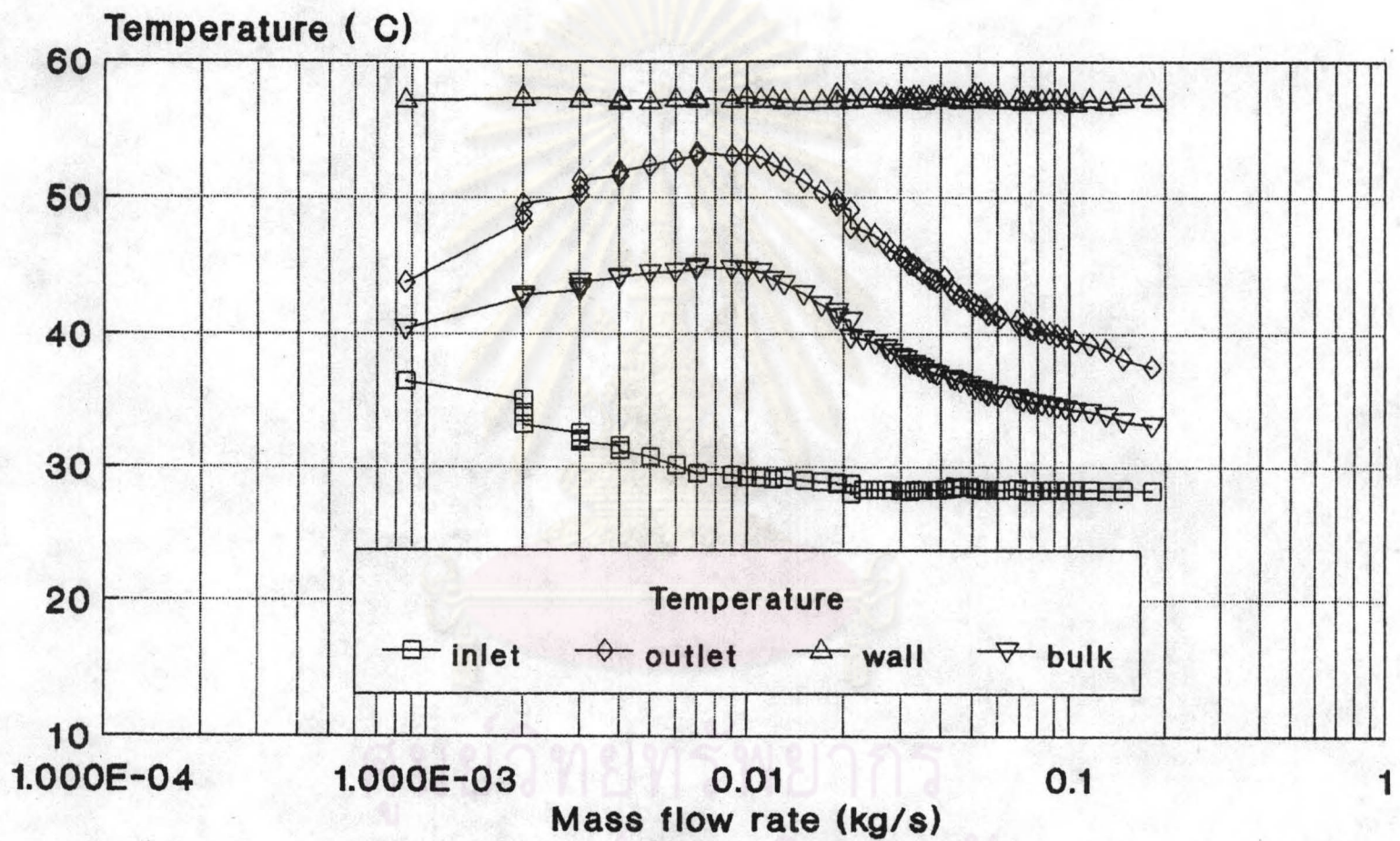
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



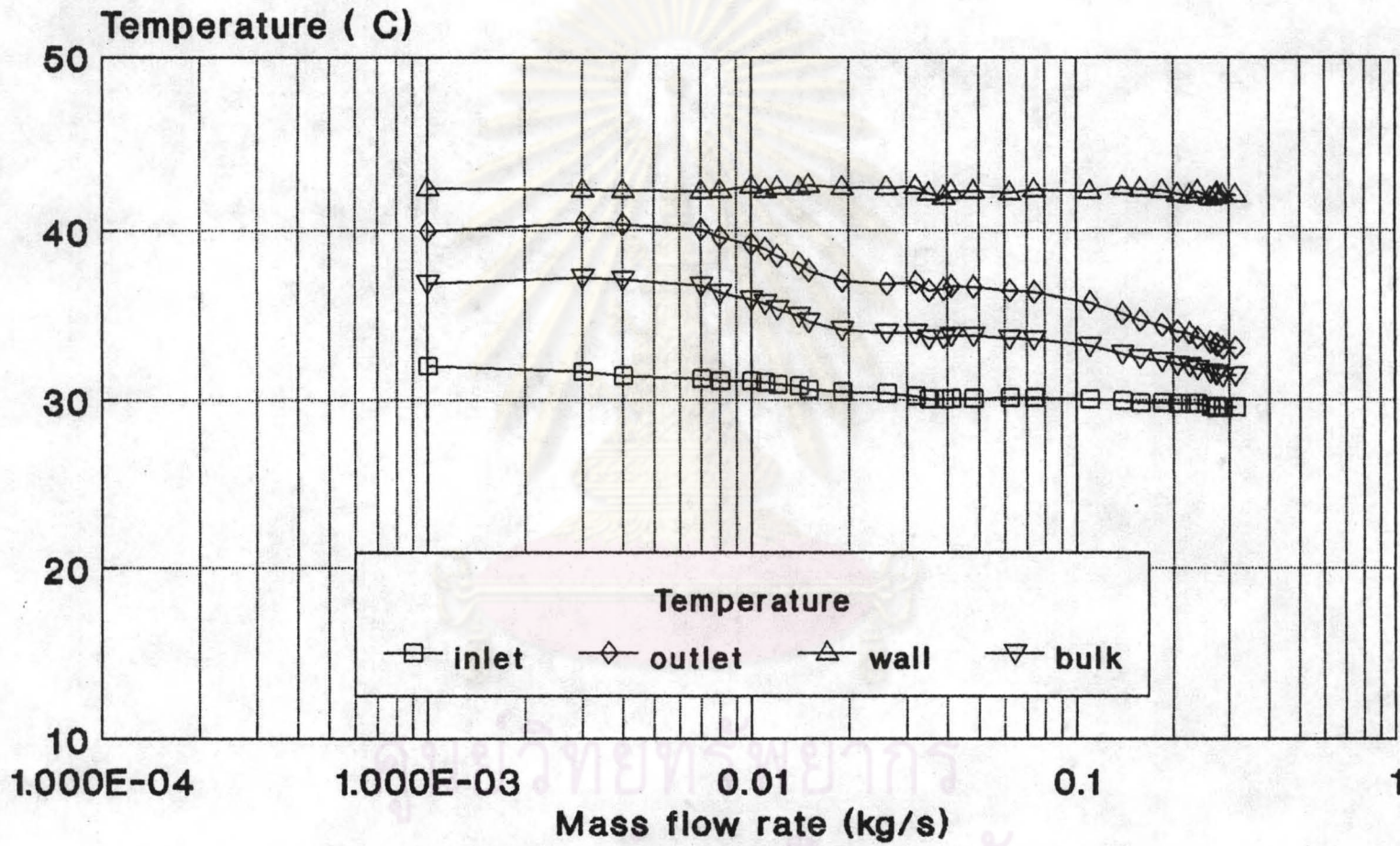
รูปที่ ช.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำขาเข้า อุณหภูมิของน้ำขาออก อุณหภูมิผนังท่อ และ อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ กับอัตราการไหลของน้ำ ที่ aspect ratio 0.25 อุณหภูมิผนังท่อ 42 °C



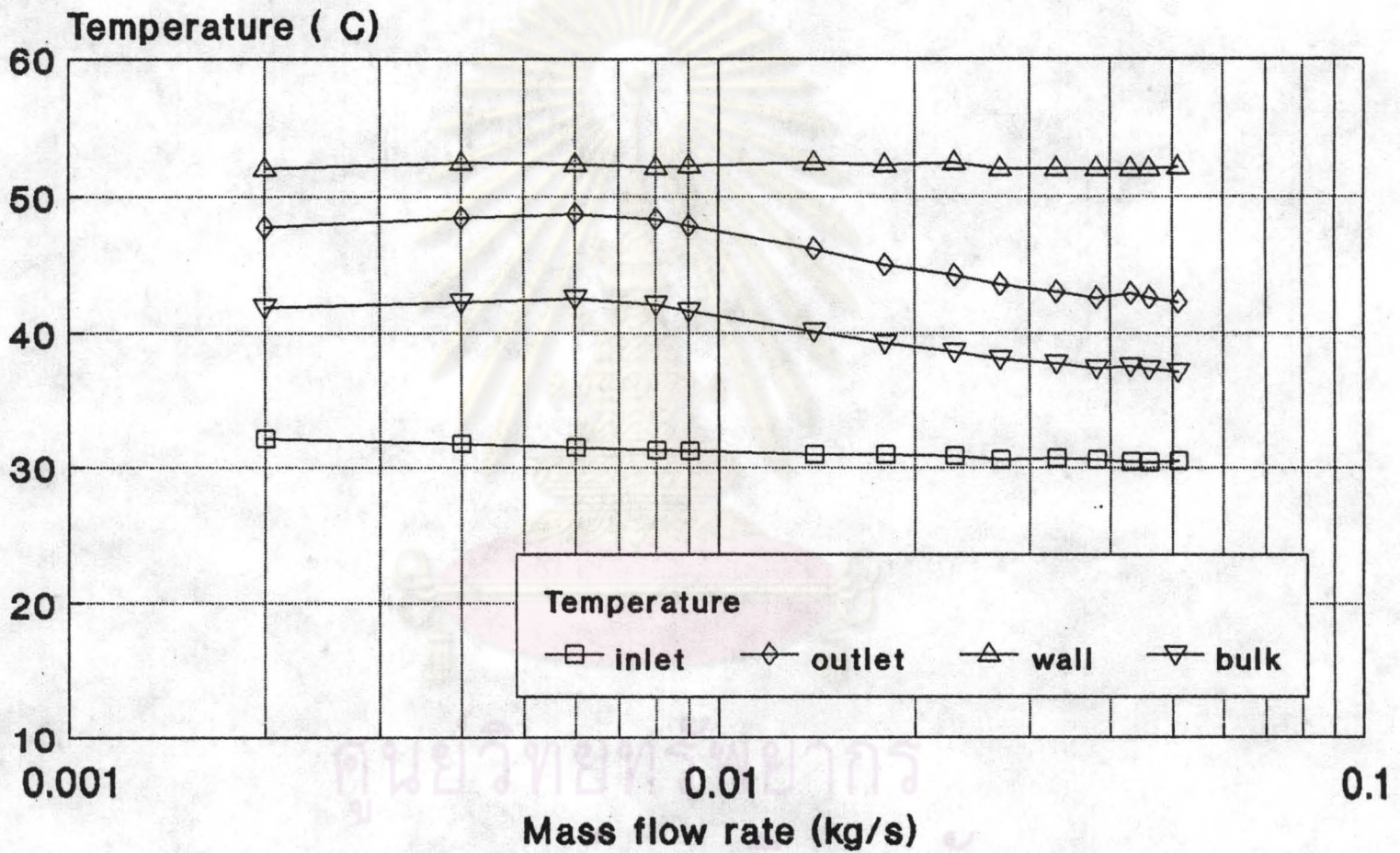
รูปที่ ๕.๒ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำขาเข้า อุณหภูมิของน้ำขาออก อุณหภูมิผนังท่อ และ อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ กับอัตราการไหลของน้ำ ที่ aspect ratio ๐.๒๕ อุณหภูมิผนังท่อ 52 °C



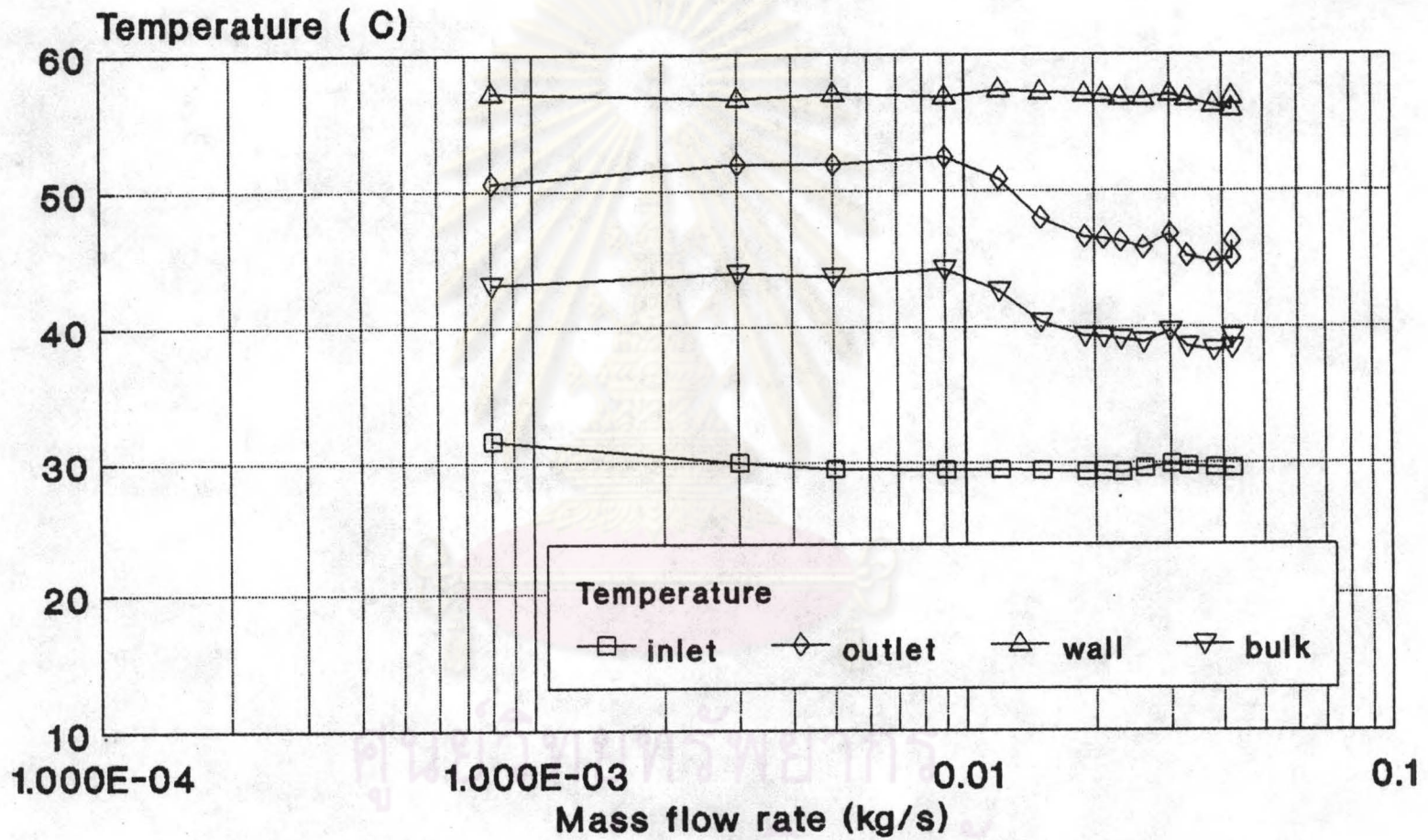
รูปที่ ข.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำขาเข้า อุณหภูมิของน้ำขาออก อุณหภูมิผนังท่อ และ อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ กับอัตราการไหลของน้ำ ที่ aspect ratio 0.25 อุณหภูมิผนังท่อ 57 °C



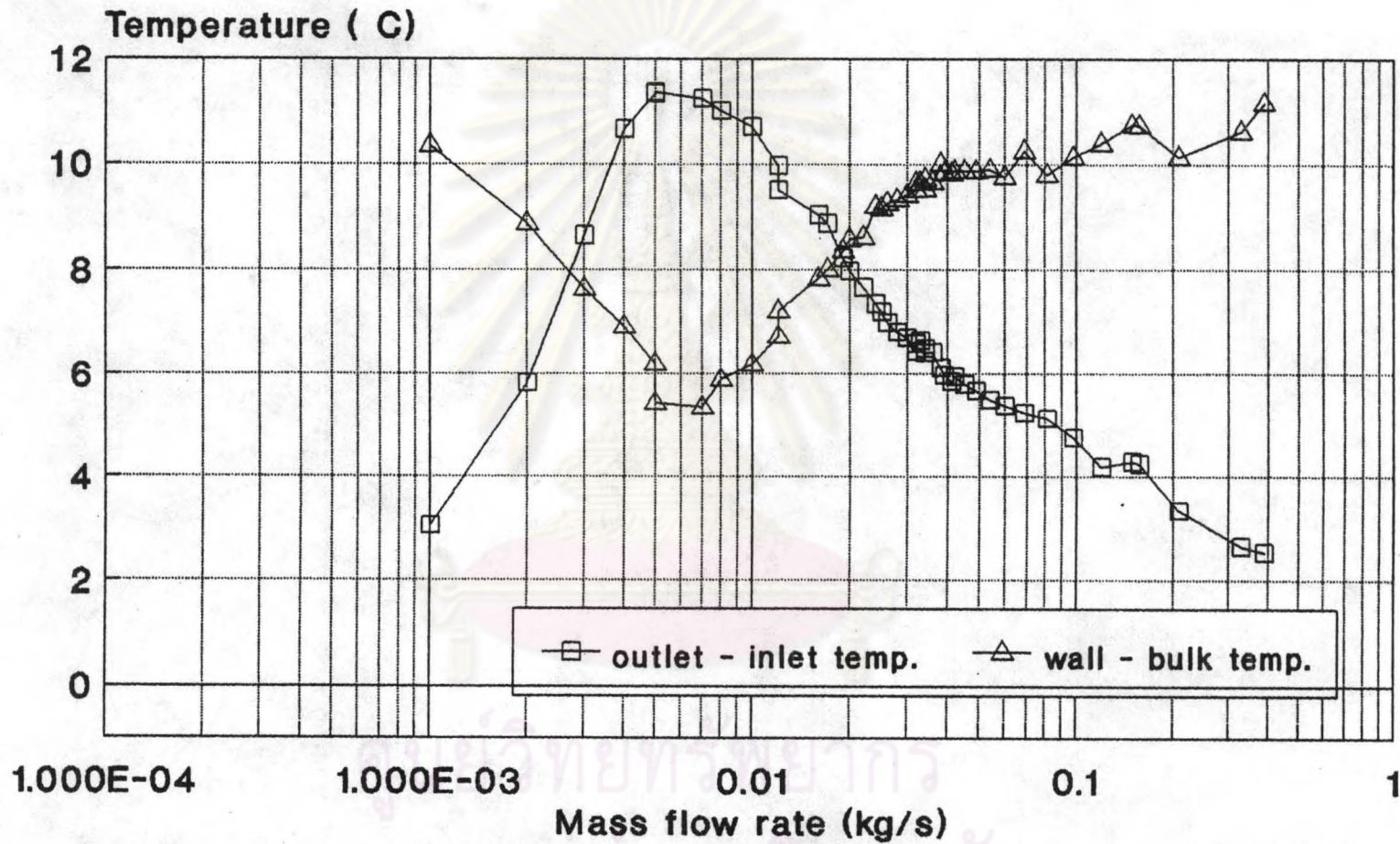
รูปที่ ช.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำขาเข้า อุณหภูมิของน้ำขาออก อุณหภูมิผนังท่อ และ อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ กับอัตราการไหลของน้ำ ที่ aspect ratio 0.5 อุณหภูมิผนังท่อ 42 °C



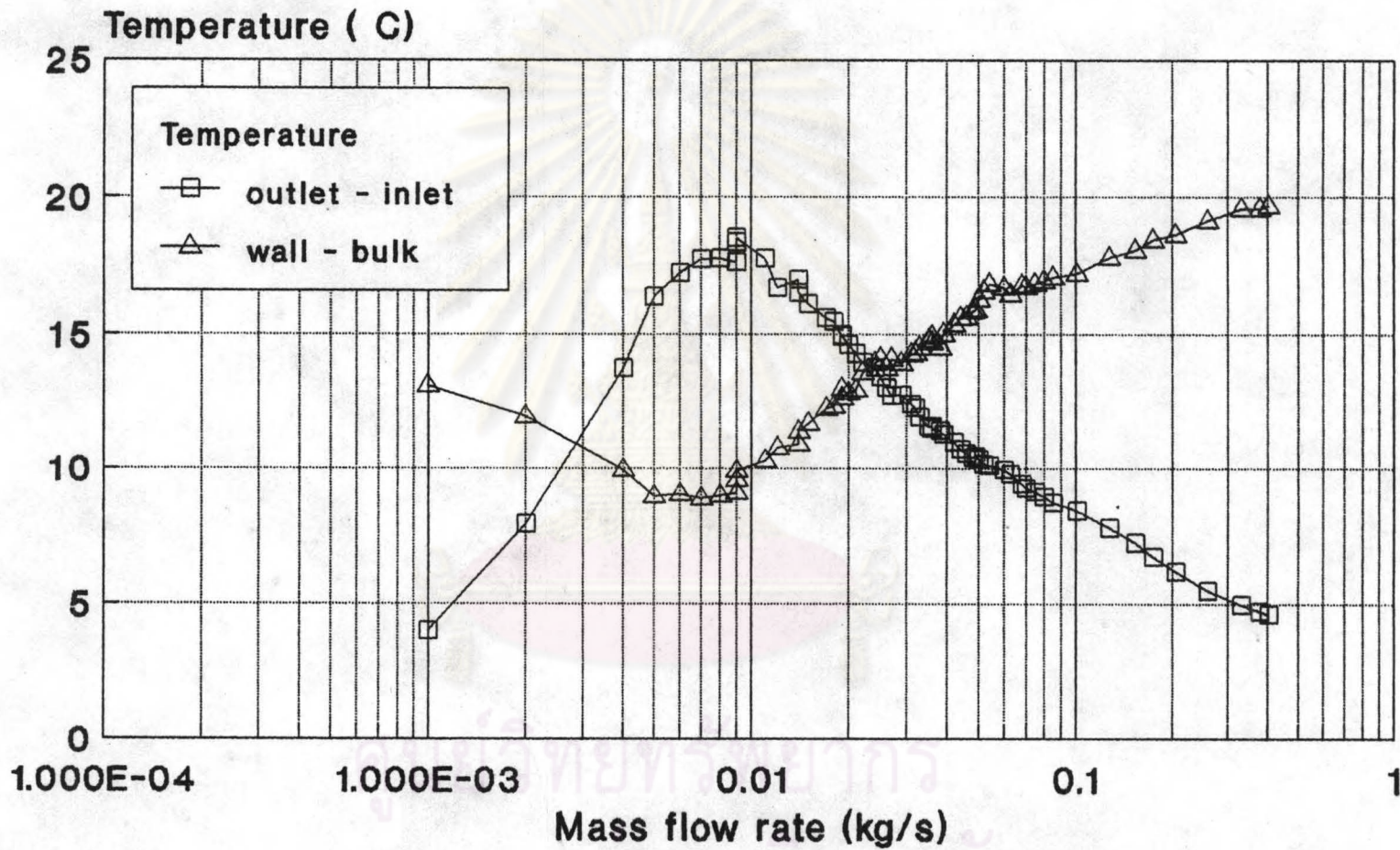
รูปที่ ๕.๕ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำขาเข้า อุณหภูมิของน้ำขาออก อุณหภูมิผนังท่อ และ อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ กับอัตราการไหลของน้ำ ที่ aspect ratio ๐.๕ อุณหภูมิผนังท่อ 52 °C



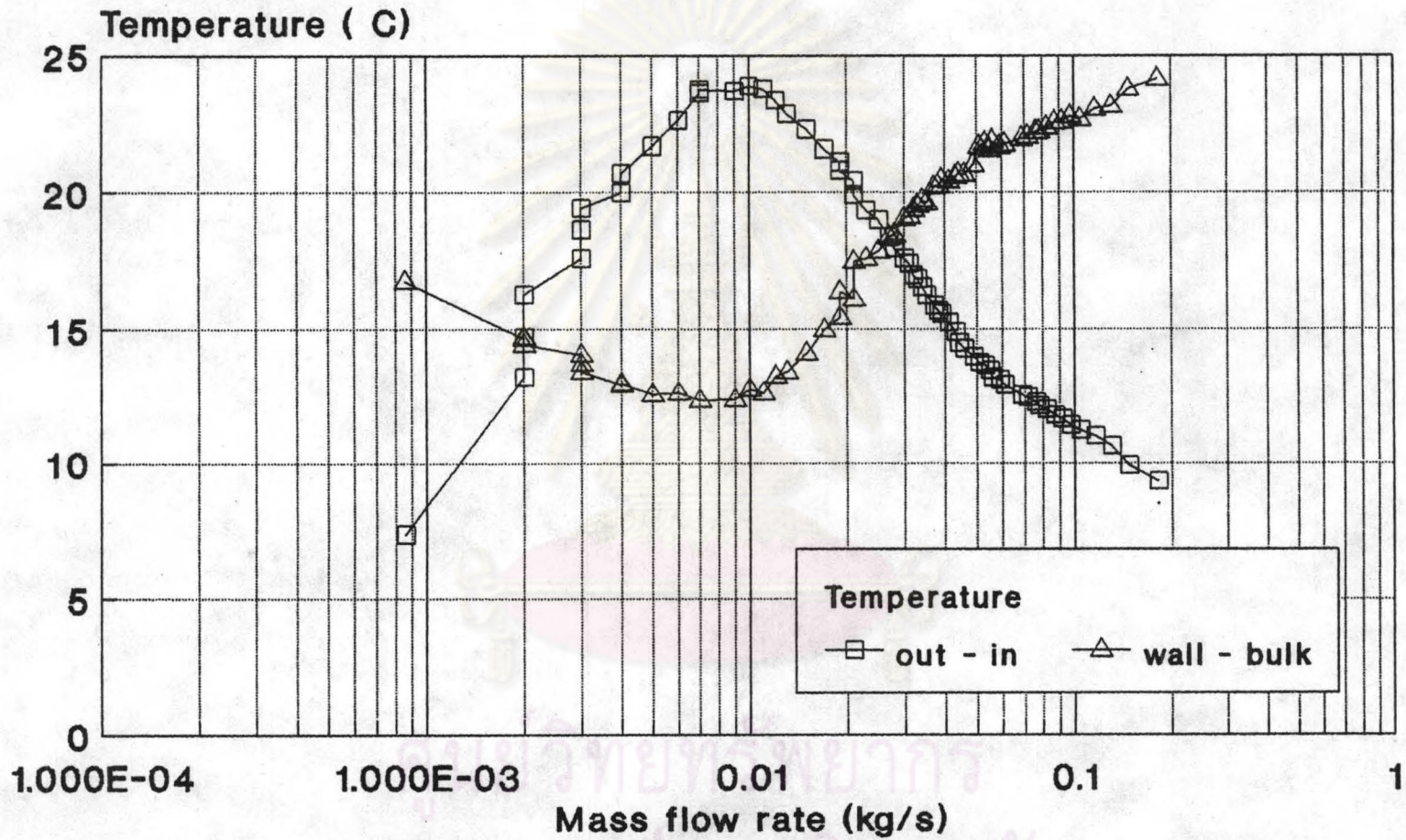
รูปที่ ช.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำขาเข้า อุณหภูมิของน้ำขาออก อุณหภูมิผนังท่อ และ อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ กับอัตราการไหลของน้ำ ที่ aspect ratio 0.5 อุณหภูมิผนังท่อ 57 °C



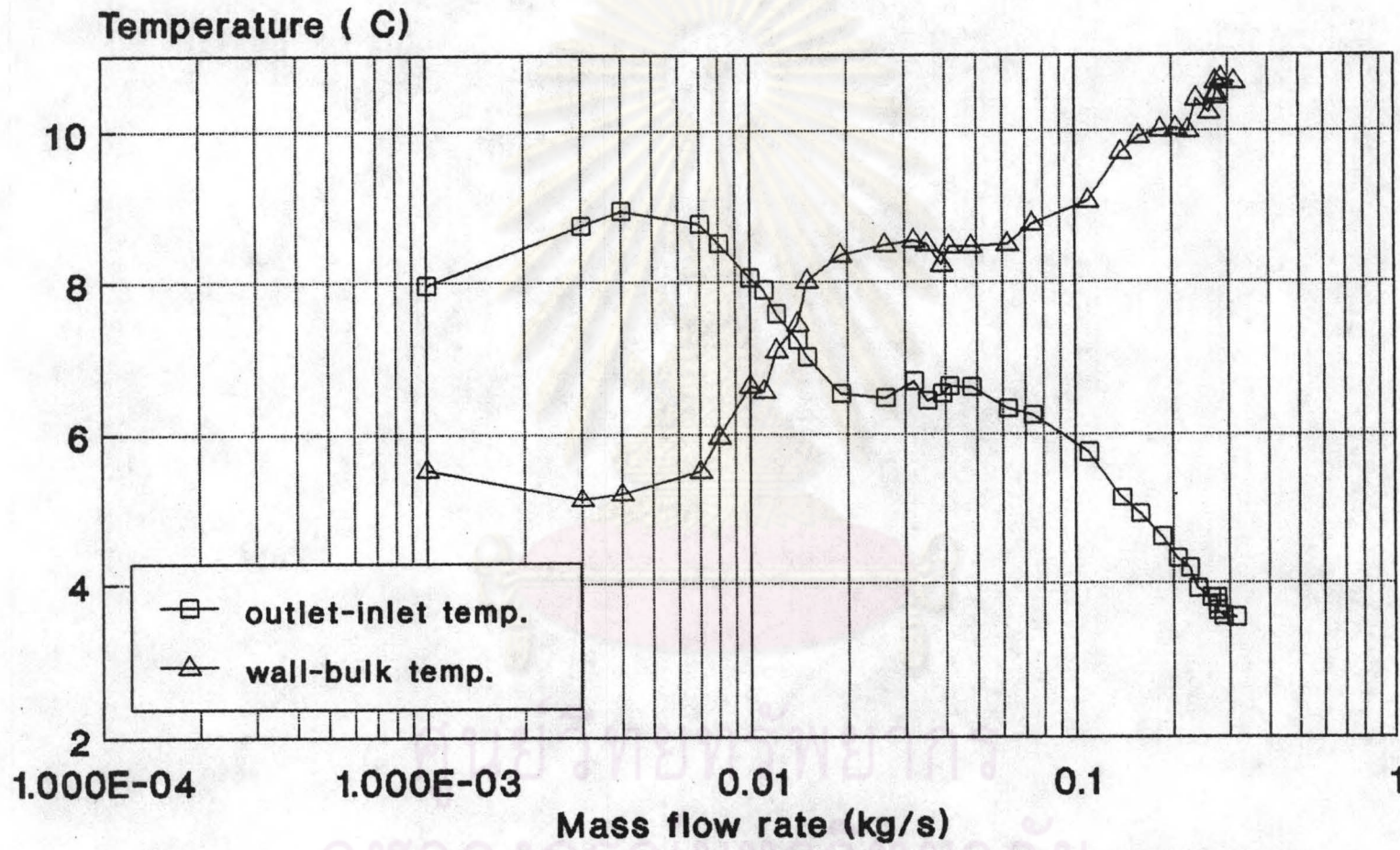
รูปที่ ๗.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิของน้ำขาออกกับอุณหภูมิของน้ำขาเข้าและผลต่างของอุณหภูมิของผนังท่อกับอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำกับอัตราการไหลของน้ำที่ aspect ratio 0.25 อุณหภูมิผนังท่อ 42 °C



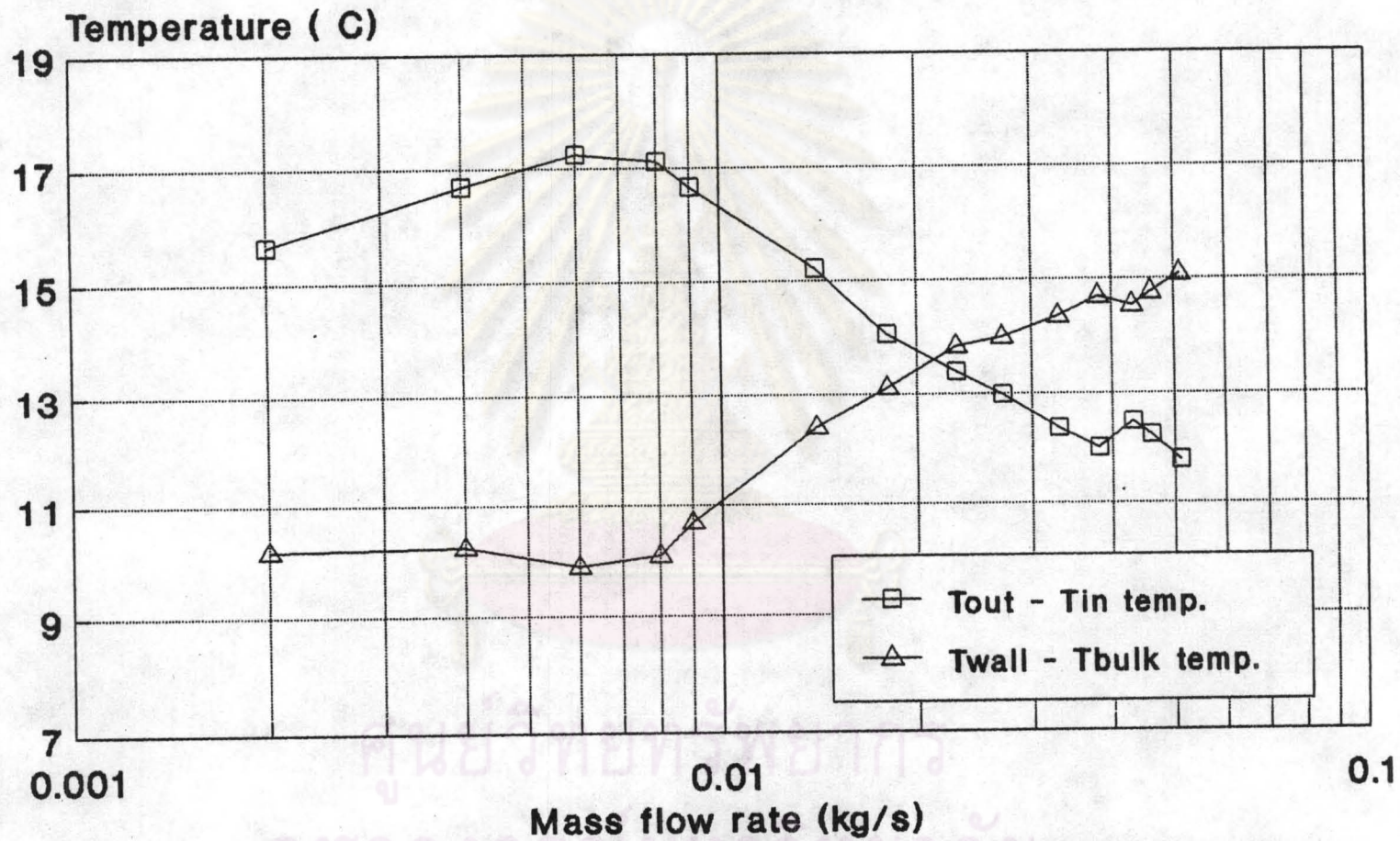
รูปที่ ๗.๘ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิของน้ำขาออกกับอุณหภูมิของน้ำขาเข้าและผลต่างของอุณหภูมิของผนังท่อกับอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำกับอัตราการไหลของน้ำที่ aspect ratio ๐.๒๕ อุณหภูมิผนังท่อ 52 °C



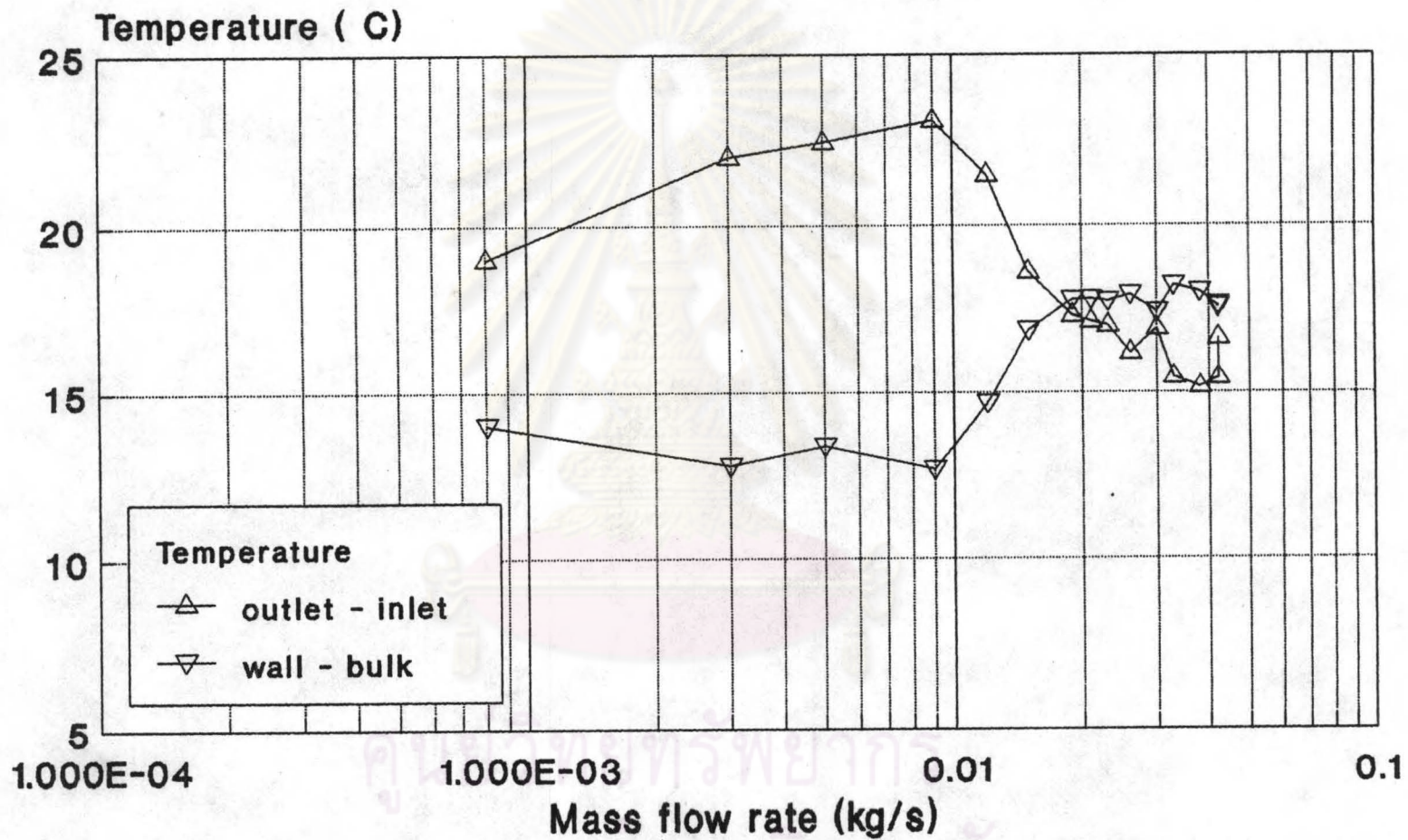
รูปที่ ๗.๙ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิของน้ำขาออกกับอุณหภูมิของน้ำขาเข้าและผลต่างของอุณหภูมิของผนังท่อกับอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำกับอัตราการไหลของน้ำที่ aspect ratio ๐.๒๕ อุณหภูมิผนังท่อ 57 °C



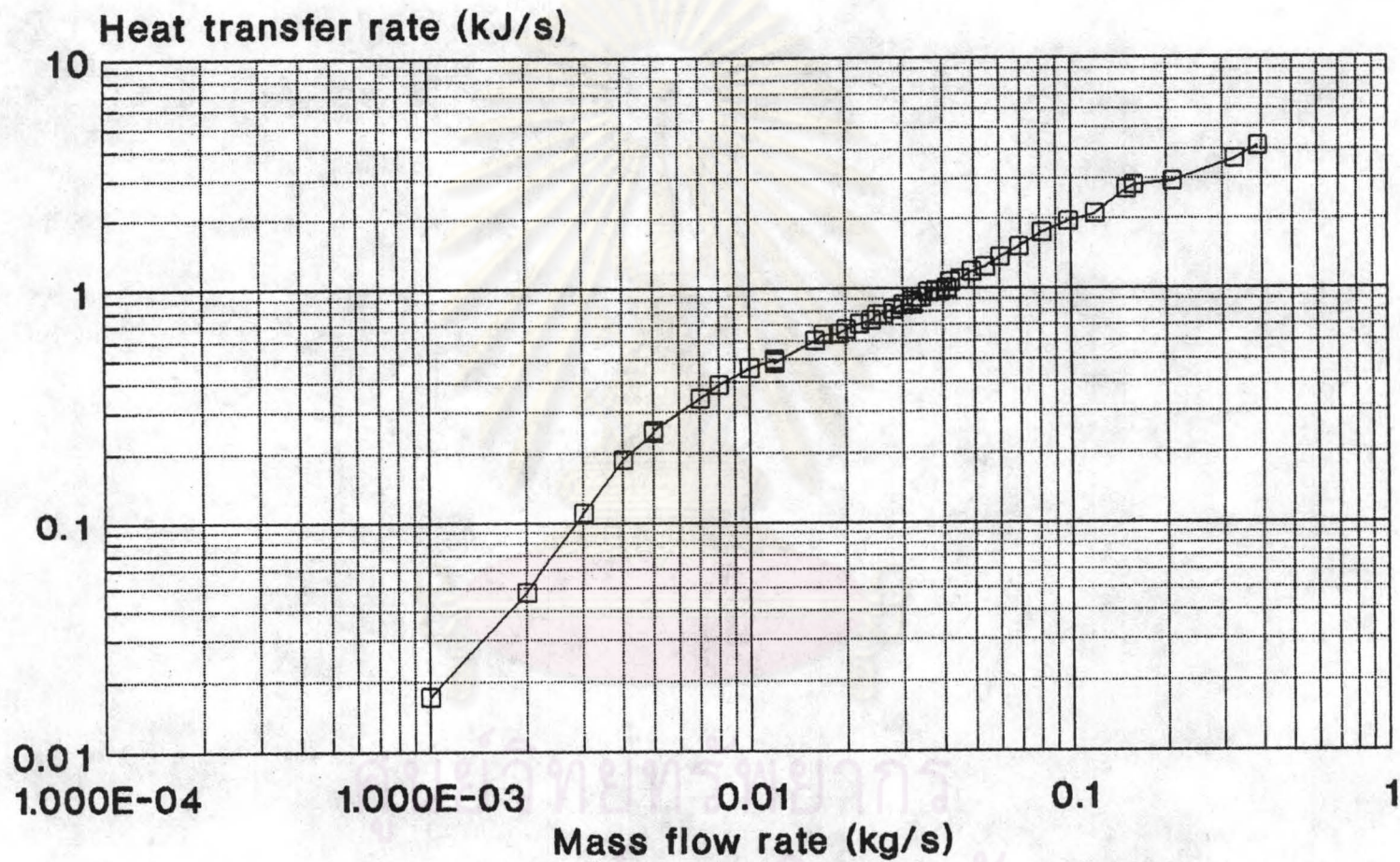
รูปที่ ๗.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิของน้ำขาออกกับอุณหภูมิของน้ำขาเข้าและผลต่างของอุณหภูมิของผนังท่อกับอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำกับอัตราการไหลของน้ำที่ aspect ratio 0.5 อุณหภูมิผนังท่อ 42 °C



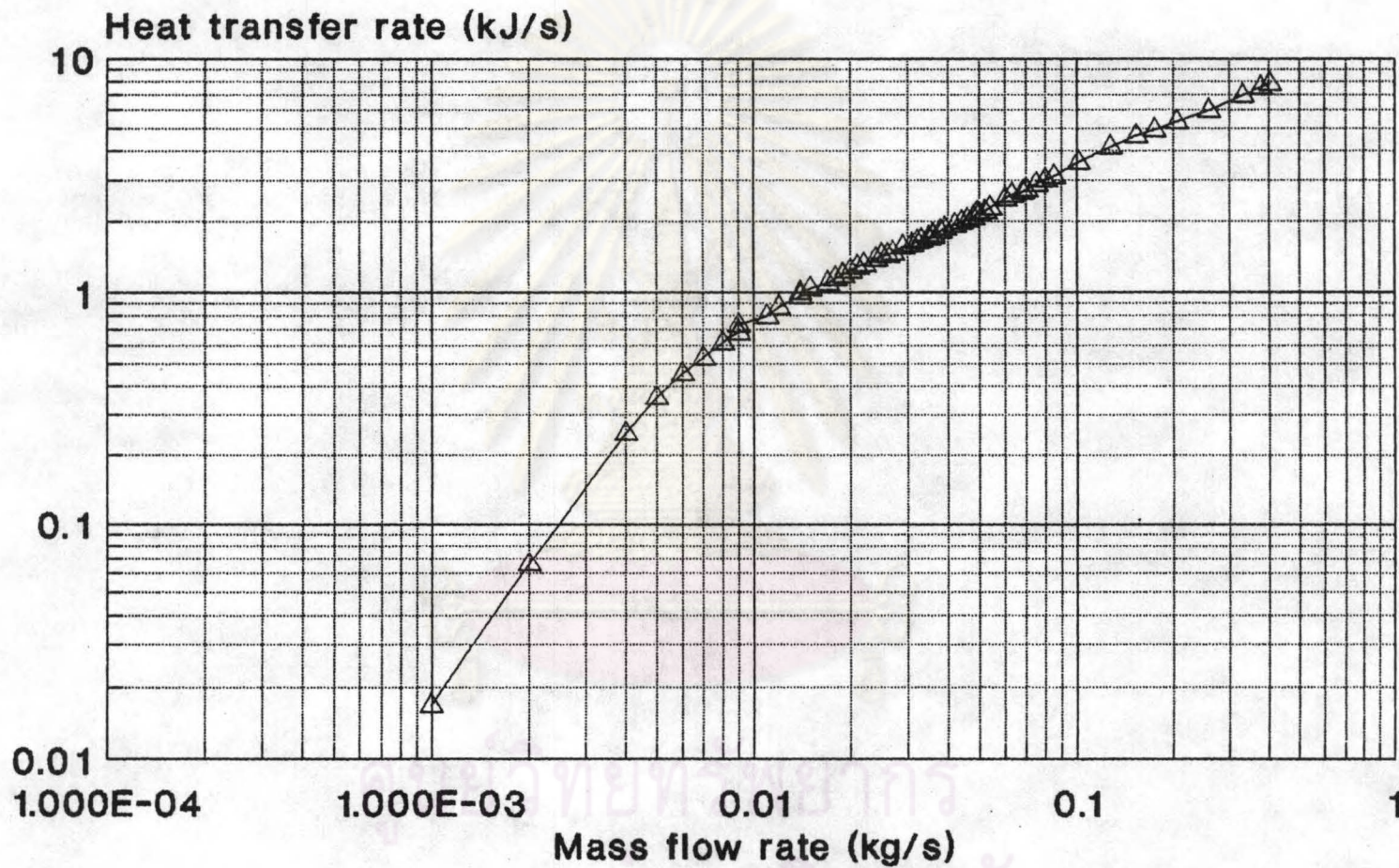
รูปที่ ช.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิของน้ำขาออกกับอุณหภูมิของน้ำขาเข้าและผลต่างของอุณหภูมิของผนังท่อกับอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำกับอัตราการไหลของน้ำที่ aspect ratio 0.5 อุณหภูมิผนังท่อ 52 °C



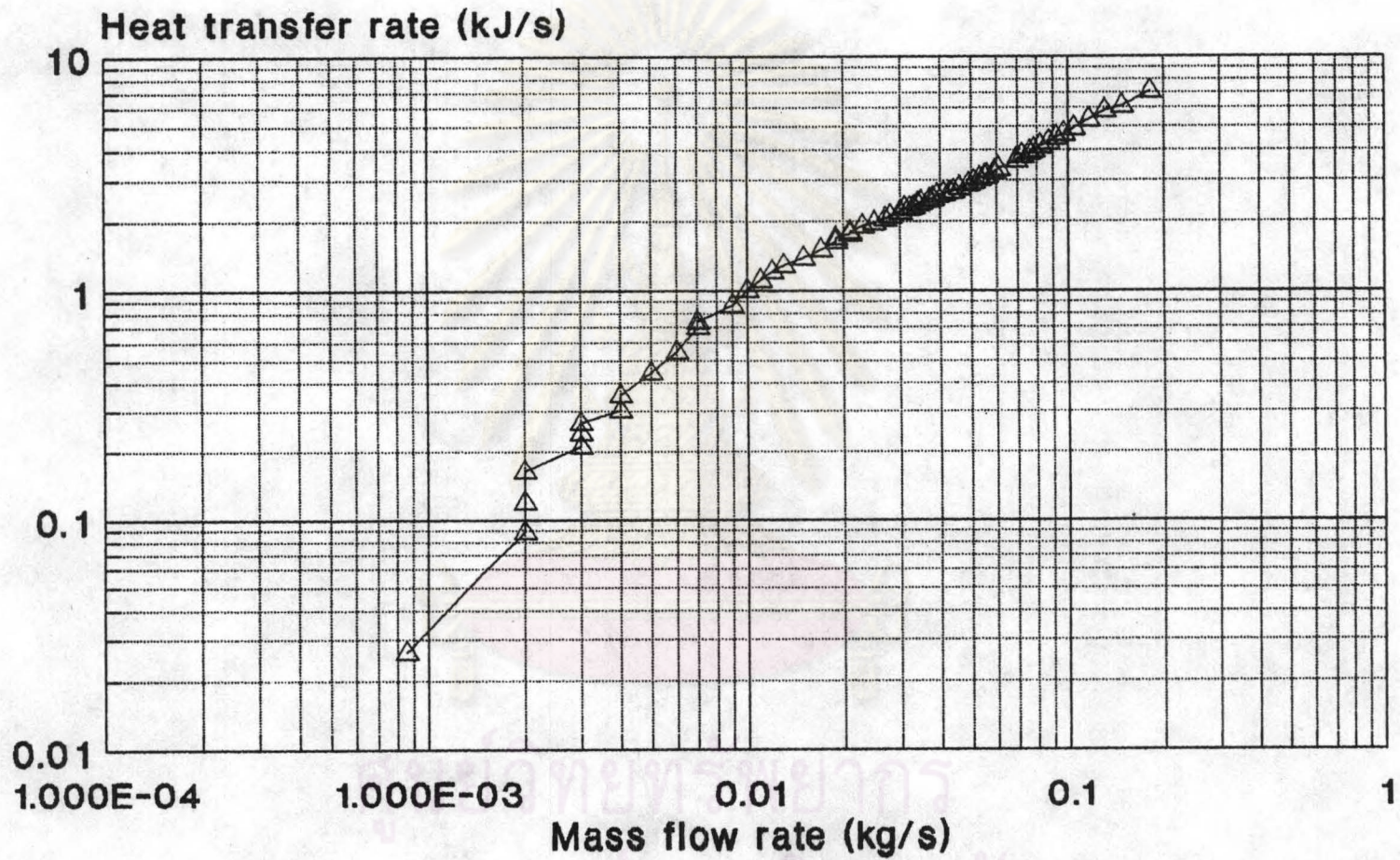
รูปที่ ๕.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิของน้ำขาออกกับอุณหภูมิของน้ำขาเข้าและผลต่างของอุณหภูมิของผนังท่อกับอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำกับอัตราการไหลของน้ำที่ aspect ratio 0.5 อุณหภูมิผนังท่อ 57 °C



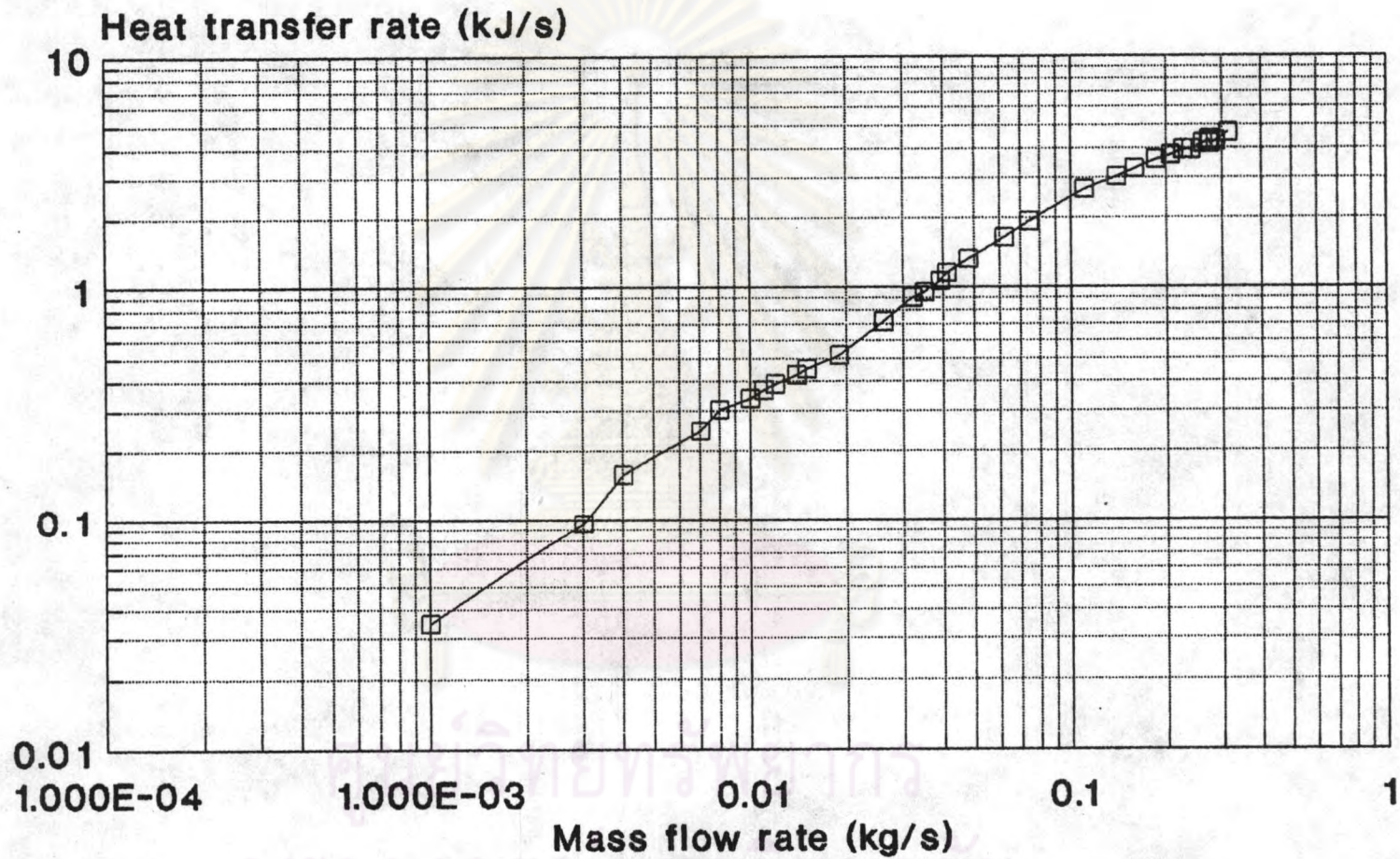
รูปที่ ๑.๑๓ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อน กับอัตราการไหลของน้ำ ที่ aspect ratio ๐.๒๕ อุณหภูมิผนังท่อ 42 °C



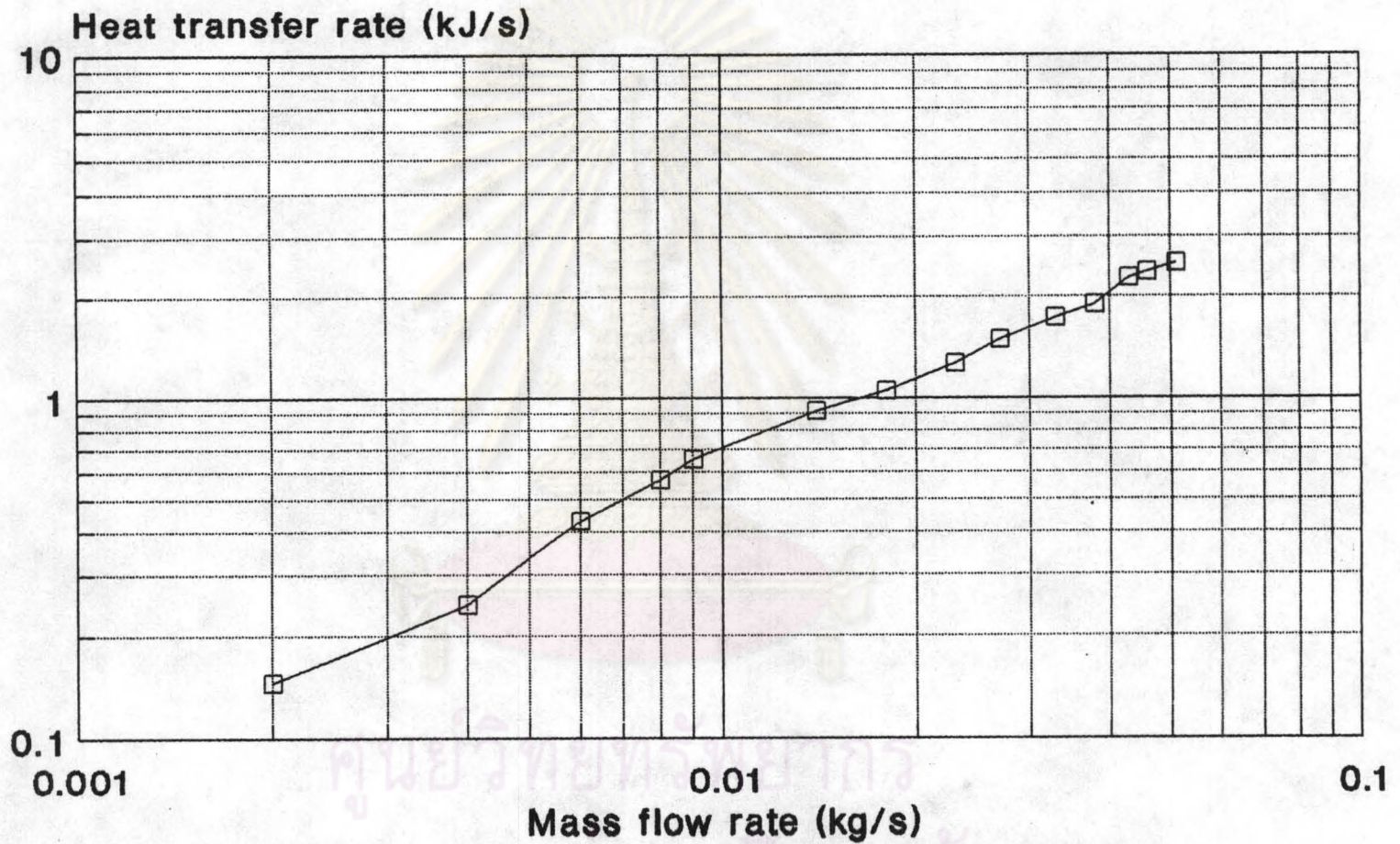
รูปที่ ข.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อน กับอัตราการไหลของน้ำ ที่ aspect ratio 0.25 อุณหภูมิผนังท่อ 52 °C



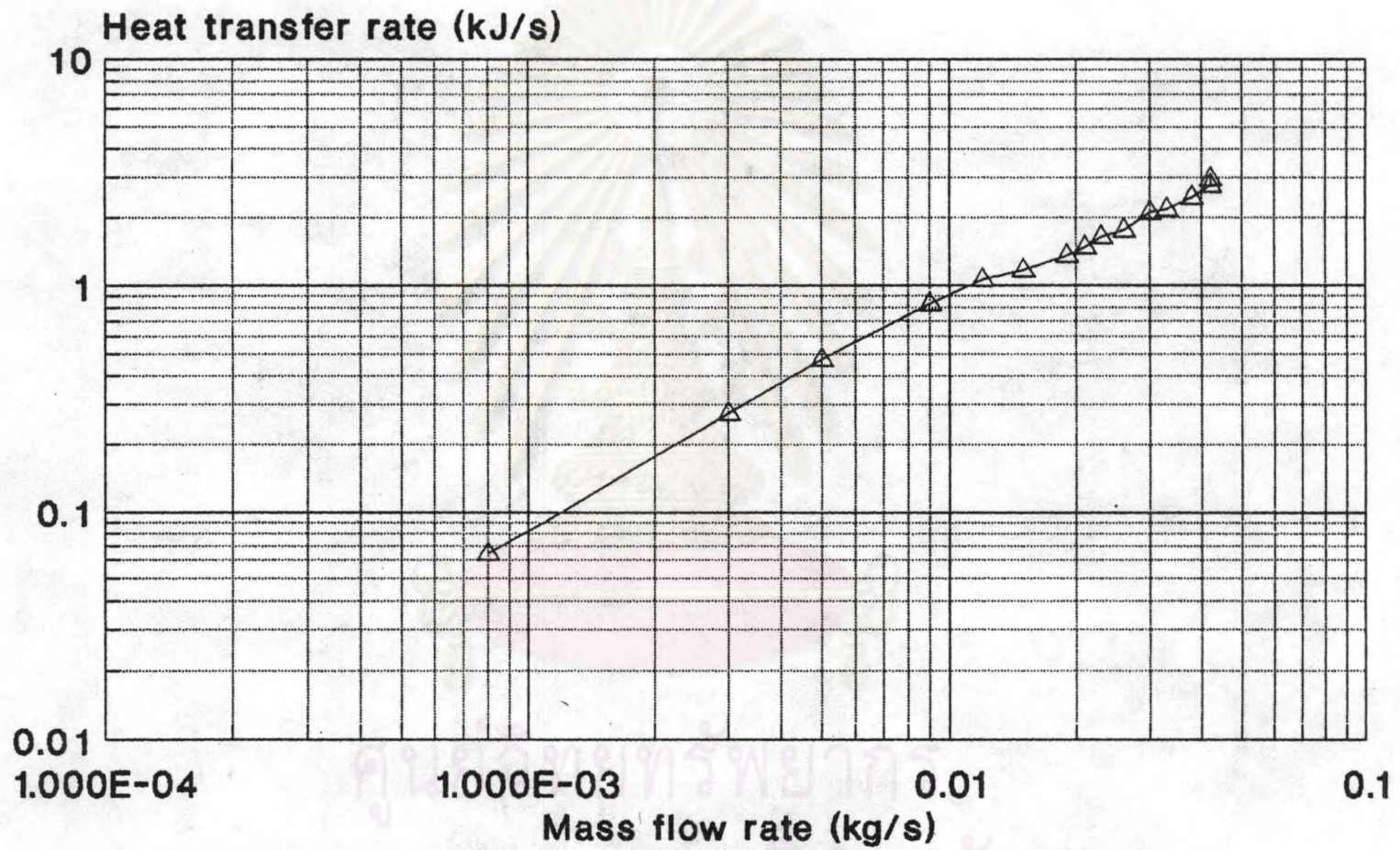
รูปที่ ๕.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อน กับอัตราการไหลของน้ำ ที่ aspect ratio ๐.25
อุณหภูมิผนังท่อ 57 °C



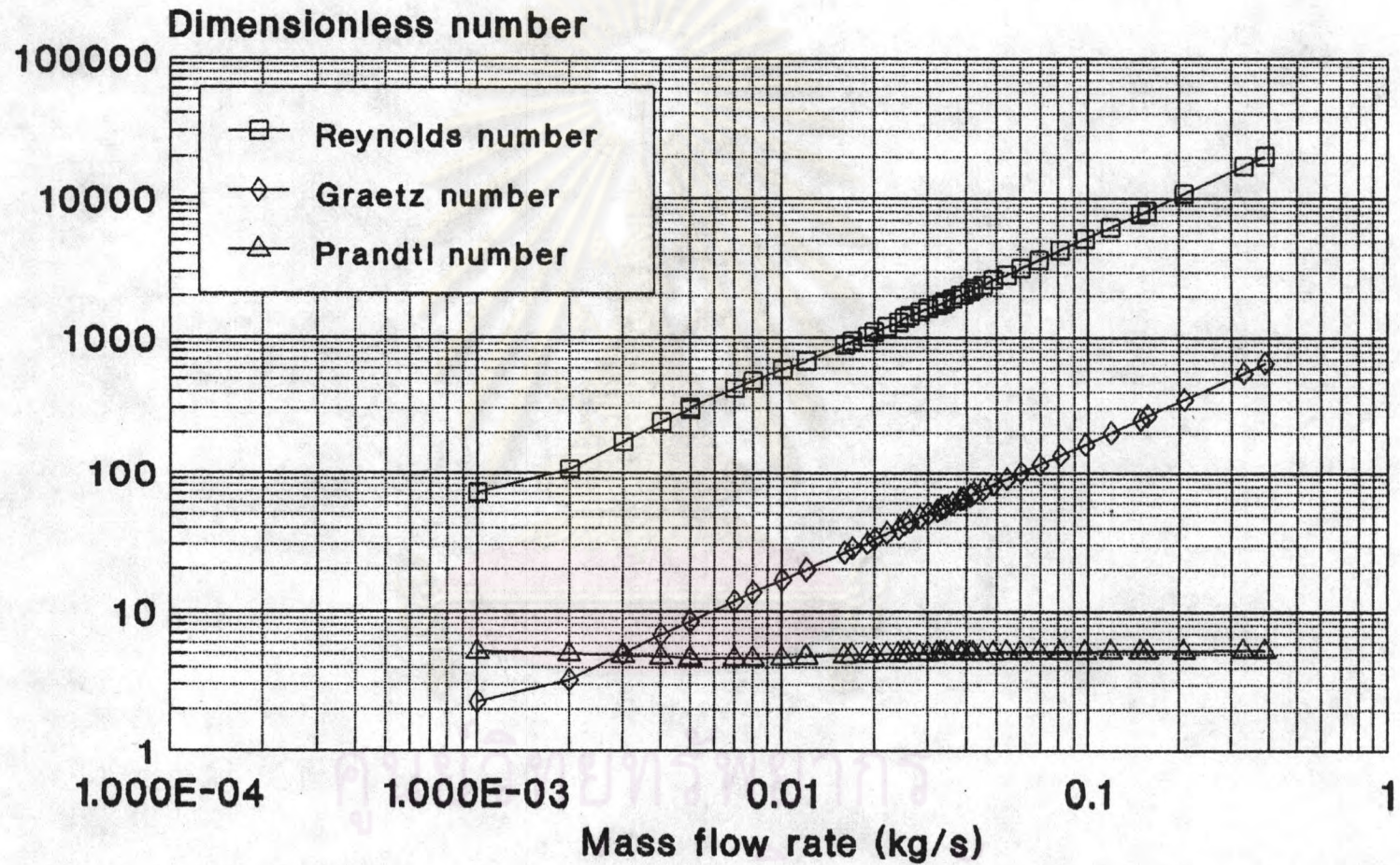
รูปที่ ช.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อน กับอัตราการไหลของน้ำ ที่ aspect ratio 0.5
อุณหภูมิผนังท่อ 42 °C



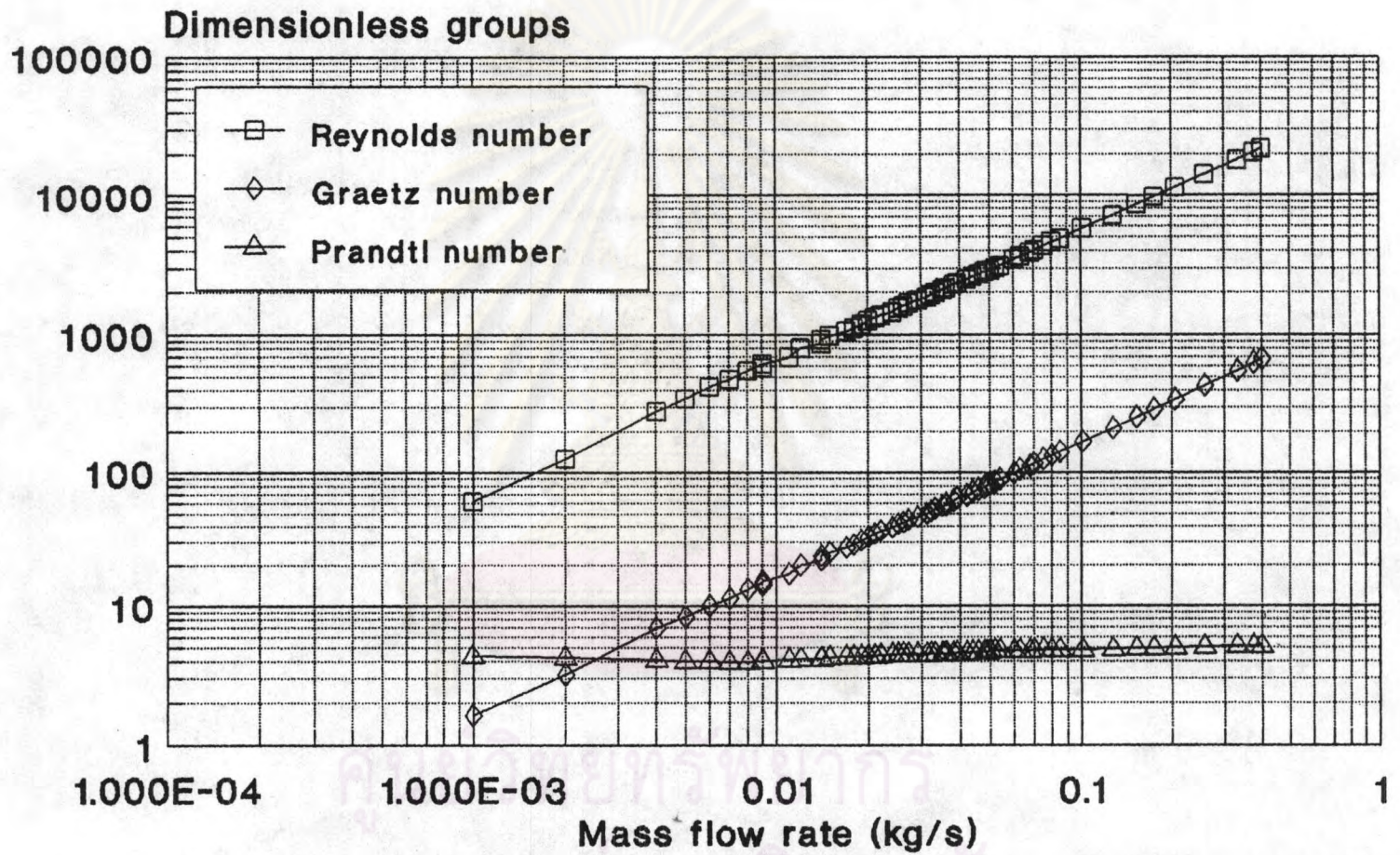
รูปที่ ช.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อน กับอัตราการไหลของน้ำ ที่ aspect ratio ๑.5
อุณหภูมิผนังท่อ 52 °C



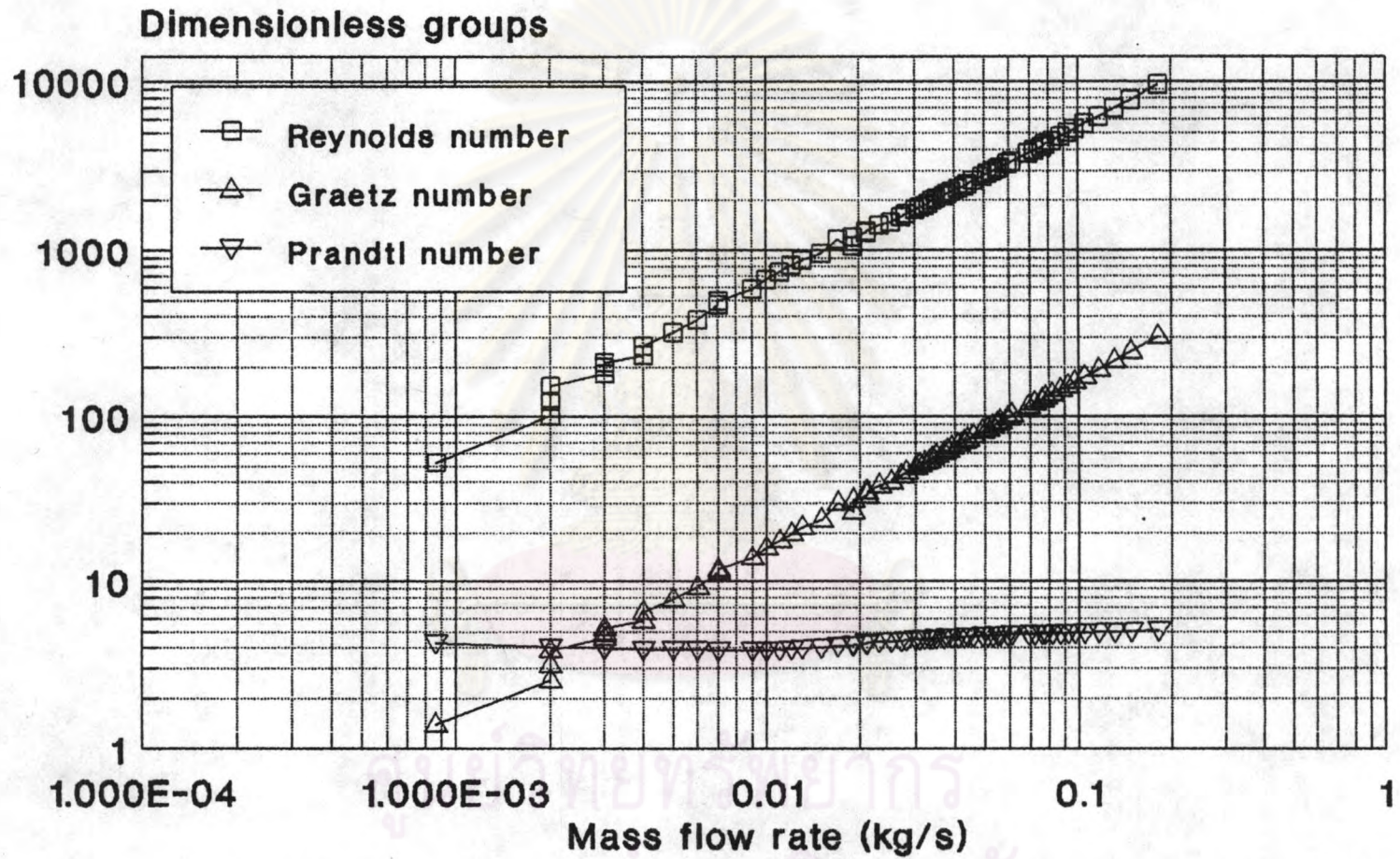
รูปที่ ๕.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อน กับอัตราการไหลของน้ำ ที่ aspect ratio 0.5
อุณหภูมิผนังท่อ 57 °C



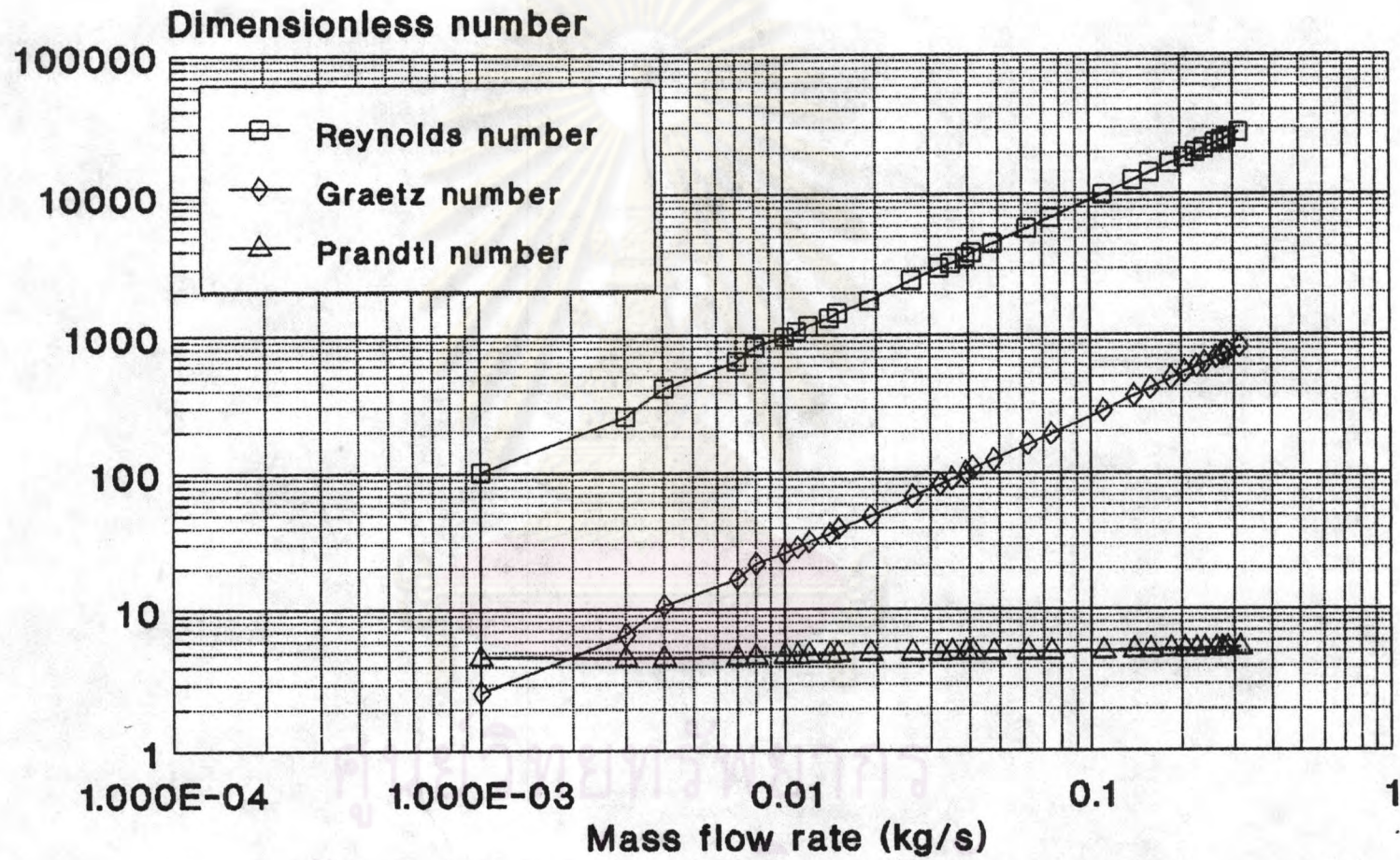
รูปที่ ข.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Reynolds number Graetz number และ Prandtl number กับอัตราการไหลของน้ำ ที่ aspect ratio 0.25 อุณหภูมิผนังท่อ 42 °C



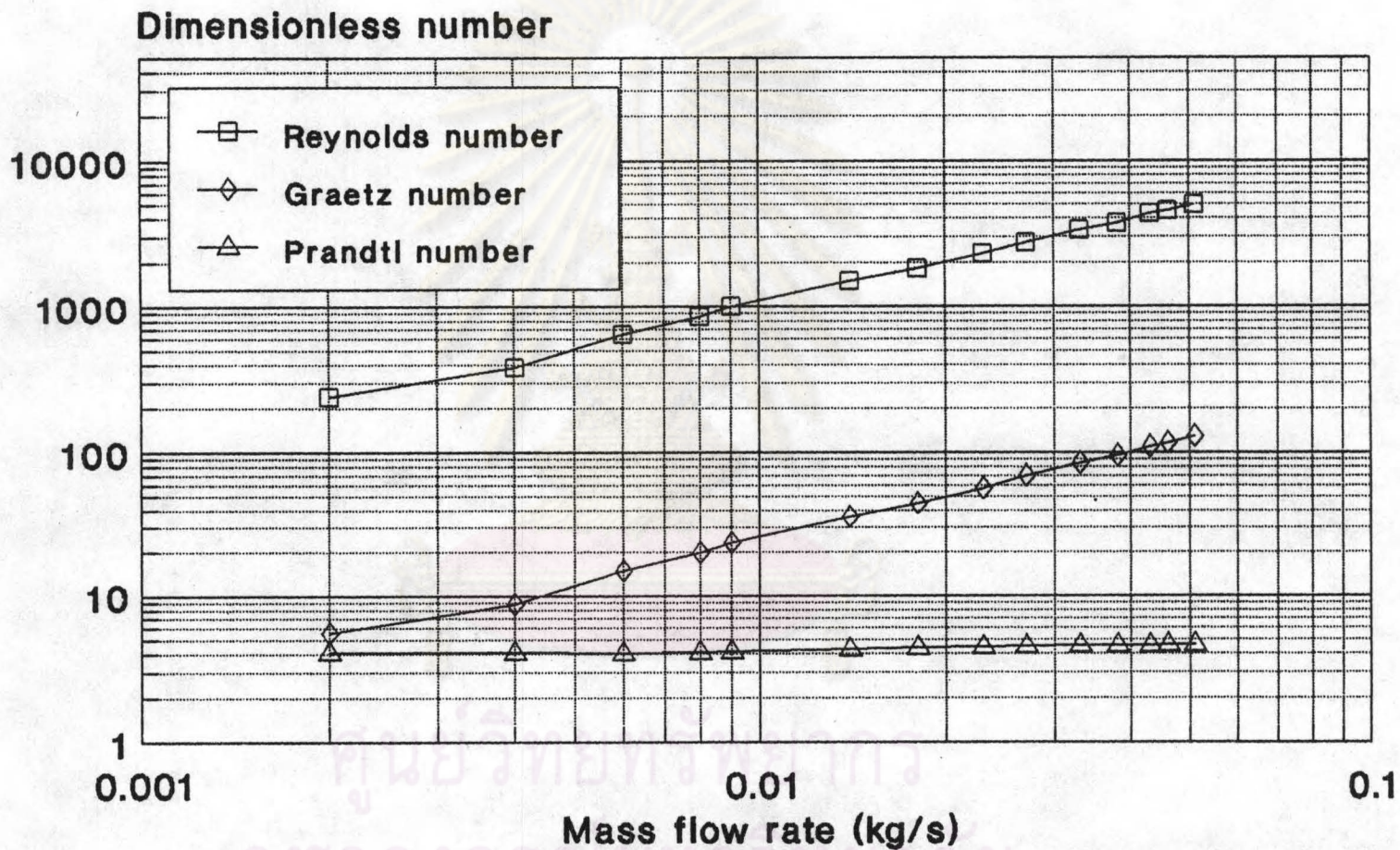
รูปที่ ๔.๒๐ กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Reynolds number Graetz number และ Prandtl number กับอัตราการไหลของน้ำ ที่ aspect ratio ๐.๒๕ อุณหภูมิผนังท่อ 52 °C



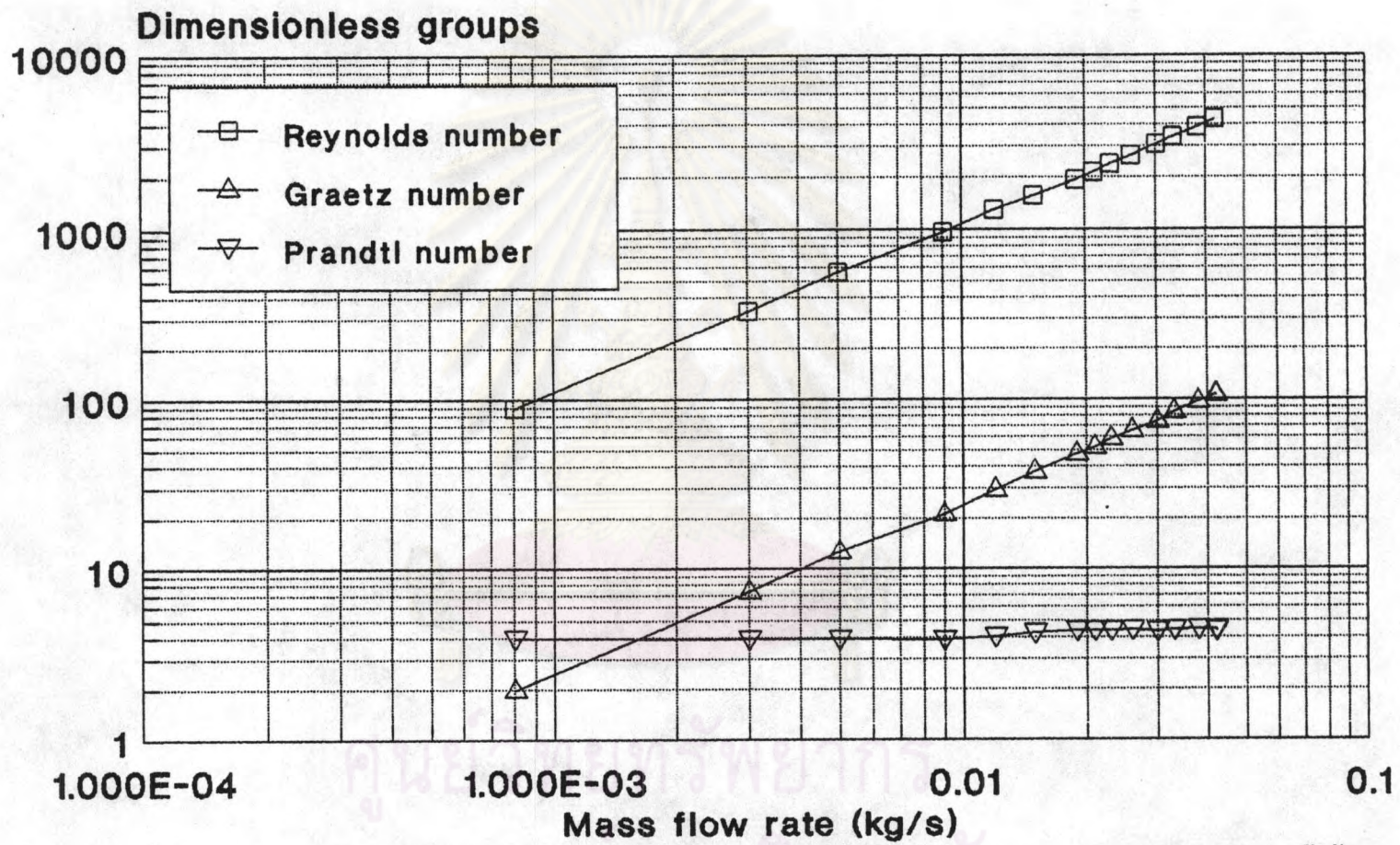
รูปที่ ข.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Reynolds number Graetz number และ Prandtl number กับอัตราการไหลของน้ำ ที่ aspect ratio 0.25 อุณหภูมิผนังท่อ 57 °C



รูปที่ ช.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Reynolds number Graetz number และ Prandtl number กับอัตราการไหลของน้ำ ที่ aspect ratio 0.5 อุณหภูมิผนังท่อ 42 °C



รูปที่ ช.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Reynolds number Graetz number และ Prandtl number กับอัตราการไหลของน้ำ ที่ aspect ratio 0.5 อุณหภูมิผนังท่อ 52 °C



รูปที่ ช.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Reynolds number Graetz number และ Prandtl number กับอัตราการไหลของน้ำ ที่ aspect ratio 0.5 อุณหภูมิผนังท่อ 57 °C



ภาคผนวก ๑.

ข้อมูลจากการทดลอง



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลจากการทดลองที่ aspect ratio 0.25 อุณหภูมิผนังท่อ 42 °C

RUN No.	Mass Flow rate (Kg/s)	Inlet Temperature (°C)	Wall Temperature (°C)
1	0.001351	30.37	42.31
2	0.001949	30.22	42.31
3	0.003047	29.58	42.35
4	0.004173	28.98	42.54
5	0.005116	28.93	42.45
6	0.005224	29.48	42.45
7	0.007211	29.38	42.18
8	0.008388	29.43	42.45
9	0.010201	29.38	42.38
10	0.011873	29.38	42.28
11	0.012097	29.33	42.31
12	0.015850	29.18	42.38
13	0.016998	29.13	42.38
14	0.018556	29.23	42.38
15	0.019972	29.23	42.41
16	0.021915	29.23	42.25
17	0.023596	29.28	42.64
18	0.025438	29.18	42.41
19	0.026434	29.23	42.41
20	0.028304	29.23	42.38
21	0.030257	29.23	42.38
22	0.031766	29.33	42.41
23	0.031877	29.13	42.45
24	0.032765	29.13	42.48
25	0.033863	29.13	42.45
26	0.034129	29.23	42.31
27	0.035803	29.13	42.35
28	0.038197	29.23	42.61
29	0.038654	29.23	42.35
30	0.040799	29.33	42.38
31	0.042408	29.28	42.41
32	0.044923	29.33	42.38
33	0.049431	29.38	42.35
34	0.053734	29.43	42.31
35	0.060132	29.43	42.11
36	0.068917	29.43	42.51
37	0.080710	29.53	42.11
38	0.097751	29.53	42.21
39	0.119189	29.43	42.05
40	0.148588	29.23	42.25
41	0.156739	29.23	42.21
42	0.208333	29.82	41.72
43	0.328947	29.97	41.95
44	0.387596	29.87	42.35

ตารางที่ ๗.1 (ต่อ)

RUN No.	Outlet Temperature (°C)	Reynolds number	Graetz number
1	33.41	71.13	2.27
2	36.04	105.80	3.25
3	38.23	169.69	5.04
4	39.63	236.69	6.88
5	40.27	293.83	8.41
6	40.84	304.62	8.56
7	40.62	418.99	11.83
8	40.44	484.71	13.77
9	40.07	585.23	16.77
10	39.34	672.39	19.58
11	38.83	678.91	19.99
12	38.21	879.83	26.25
13	38.01	940.33	28.18
14	37.46	1019.01	30.81
15	37.21	1092.61	33.19
16	36.90	1194.12	36.46
17	36.65	1280.98	39.29
18	36.39	1375.66	42.39
19	36.23	1426.71	44.07
20	36.05	1524.23	47.22
21	35.94	1626.81	50.49
22	35.77	1705.71	53.03
23	35.72	1707.82	53.25
24	35.78	1756.50	54.72
25	35.62	1811.85	56.58
26	35.64	1827.88	57.01
27	35.55	1913.81	59.84
28	35.35	2037.93	63.87
29	35.21	2058.73	64.66
30	35.18	2174.23	68.24
31	35.23	2260.11	70.93
32	35.13	2392.18	75.15
33	35.04	2630.75	82.70
34	34.91	2856.37	89.93
35	34.81	3192.41	100.67
36	34.66	3651.27	115.44
37	34.65	4280.09	135.16
38	34.27	5159.42	163.89
39	33.62	6236.52	200.29
40	33.52	7750.90	249.89
41	33.47	8171.27	265.64
42	33.15	10882.93	350.24
43	32.61	17099.03	553.73
44	32.41	20081.91	653.03

ตารางที่ ๗.1 (ต่อ)

RUN No.	experimental Nusselt number	Analytical Nusselt number(1)	Analytical Nusselt number(2)
1	0.18	4.00	2.59
2	0.59	4.09	2.91
3	1.59	4.25	3.36
4	2.94	4.42	3.72
5	4.28	4.55	3.97
6	5.00	4.57	3.98
7	6.92	4.86	4.43
8	7.17	5.04	4.67
9	8.07	5.31	4.99
10	8.03	5.57	5.27
11	7.29	5.60	5.31
12	8.38	6.17	5.83
13	8.66	6.35	5.97
14	8.41	6.59	6.15
15	8.53	6.80	6.31
16	8.99	7.10	6.51
17	8.71	7.35	6.69
18	9.23	7.63	6.86
19	9.21	7.79	6.95
20	9.56	8.07	7.12
21	9.96	8.37	7.28
22	9.94	8.60	7.40
23	10.05	8.62	7.41
24	10.41	8.75	7.48
25	10.44	8.92	7.56
26	10.59	8.96	7.58
27	10.97	9.22	7.71
28	10.79	9.58	7.88
29	10.86	9.65	7.91
30	11.22	9.98	8.06
31	11.80	10.22	8.16
32	12.19	10.60	8.32
33	13.11	11.29	8.59
34	13.77	11.94	8.83
35	15.31	12.92	9.17
36	16.23	14.26	9.61
37	19.45	16.04	10.12
38	21.12	18.65	10.80
39	22.24	21.95	11.56
40	27.48	26.44	12.45
41	28.66	27.87	12.69
42	31.67	35.54	13.92
43	37.78	53.98	16.23
44	40.51	62.98	17.17

ตารางที่ ๗.1 (ต่อ)

RUN No.	experimental Nusselt number	Analytical Nusselt number(1)	Analytical Nusselt number(2)
1	0.18	4.00	2.59
2	0.59	4.09	2.91
3	1.59	4.25	3.36
4	2.94	4.42	3.72
5	4.28	4.55	3.97
6	5.00	4.57	3.98
7	6.92	4.86	4.43
8	7.17	5.04	4.67
9	8.07	5.31	4.99
10	8.03	5.57	5.27
11	7.29	5.60	5.31
12	8.38	6.17	5.83
13	8.66	6.35	5.97
14	8.41	6.59	6.15
15	8.53	6.80	6.31
16	8.99	7.10	6.51
17	8.71	7.35	6.69
18	9.23	7.63	6.86
19	9.21	7.79	6.95
20	9.56	8.07	7.12
21	9.96	8.37	7.28
22	9.94	8.60	7.40
23	10.05	8.62	7.41
24	10.41	8.75	7.48
25	10.44	8.92	7.56
26	10.59	8.96	7.58
27	10.97	9.22	7.71
28	10.79	9.58	7.88
29	10.86	9.65	7.91
30	11.22	9.98	8.06
31	11.80	10.22	8.16
32	12.19	10.60	8.32
33	13.11	11.29	8.59
34	13.77	11.94	8.83
35	15.31	12.92	9.17
36	16.23	14.26	9.61
37	19.45	16.04	10.12
38	21.12	18.65	10.80
39	22.24	21.95	11.56
40	27.48	26.44	12.45
41	28.66	27.87	12.69
42	31.67	35.54	13.92
43	37.78	53.98	16.23
44	40.51	62.98	17.17

(1)Dunwoody

(2)Rao et.al

(3)James

ตารางที่ ๗.1 (ต่อ)

RUN No.	Analytical Nusselt number(3)	Analytical Nusselt number(4)
1	1.46	3.792507
2	1.64	3.796589
3	1.90	3.820269
4	2.11	3.860309
5	2.26	3.899110
6	2.27	3.903026
7	2.53	3.988282
8	2.66	4.036853
9	2.84	4.106221
10	2.99	4.164451
11	3.01	4.172431
12	3.30	4.279652
13	3.38	4.307571
14	3.48	4.342604
15	3.57	4.371399
16	3.68	4.407021
17	3.77	4.434779
18	3.87	4.462332
19	3.92	4.476117
20	4.01	4.500019
21	4.10	4.522624
22	4.17	4.538682
23	4.18	4.539991
24	4.21	4.548761
25	4.26	4.559332
26	4.27	4.561703
27	4.34	4.576603
28	4.44	4.596066
29	4.46	4.599666
30	4.54	4.615089
31	4.59	4.625855
32	4.68	4.641478
33	4.84	4.666106
34	4.97	4.686384
35	5.16	4.711874
36	5.40	4.740096
37	5.70	4.769142
38	6.07	4.799995
39	6.49	4.827231
40	6.99	4.852274
41	7.14	4.858368
42	7.82	4.882085
43	9.12	4.910180
44	9.63	4.917663

(4)Schenk and Han

ตารางที่ ช.1 (ต่อ)

RUN No.	Mass Flow rate (Kg/s)	Pressure Drop (mm. water)	Reynolds number
1	0.002131	0.09	121.89
2	0.004093	0.14	236.04
3	0.006239	0.19	360.54
4	0.009946	0.30	569.42
5	0.011522	0.35	654.65
6	0.019406	0.49	1069.67
7	0.025517	0.73	1391.00
8	0.027571	0.79	1498.01
9	0.030084	0.87	1628.41
10	0.030921	0.92	1684.33
11	0.031949	1.02	1728.14
12	0.032690	1.05	1762.16
13	0.034904	1.07	1877.95
14	0.037397	1.20	2009.43
15	0.038536	1.25	2066.11
16	0.040866	1.57	2185.44
17	0.041597	1.71	2220.46
18	0.044209	1.78	2358.81
19	0.047985	2.08	2558.42
20	0.053476	2.45	2849.13
21	0.058893	3.40	3131.83
22	0.066578	3.73	3529.05
23	0.076628	4.20	3938.80
24	0.110132	9.28	5793.15

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๗.๑ (ต่อ)

RUN No.	Experimental friction factor
1	0.95915
2	0.38503
3	0.22076
4	0.14444
5	0.12690
6	0.07229
7	0.05746
8	0.05244
9	0.04759
10	0.04676
11	0.04591
12	0.04551
13	0.04188
14	0.04040
15	0.03994
16	0.03785
17	0.03734
18	0.03473
19	0.03484
20	0.03310
21	0.03369
22	0.03248
23	0.03718
24	0.03107

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลจากการทดลองที่ aspect ratio 0.25 อุณหภูมิผนังที่ 52 °C

RUN No.	Outlet Temperature (°C)	Inlet Temperature (°C)	Wall Temperature (°C)
1	40.88	36.86	52.09
2	43.68	35.77	52.13
3	47.40	33.64	51.99
4	48.93	32.55	52.06
5	49.19	31.96	52.19
6	49.45	31.71	52.22
7	49.38	31.61	52.22
8	49.14	31.51	52.09
9	48.83	30.47	51.99
10	48.81	30.27	52.19
11	48.34	30.57	52.19
12	47.67	30.96	52.16
13	47.57	30.57	52.09
14	47.13	30.62	52.19
15	46.77	30.67	52.19
16	46.21	30.62	52.29
17	46.09	30.62	52.26
18	45.58	30.67	52.52
19	45.70	30.72	52.32
20	45.30	30.67	52.19
21	44.97	30.67	52.06
22	44.54	30.57	52.32
23	44.06	30.27	52.22
24	43.70	30.27	52.16
25	43.87	30.82	52.13
26	43.61	30.87	52.29
27	43.54	30.77	52.06
28	43.32	30.91	52.29
29	43.20	30.91	52.26
30	42.94	31.01	52.29
31	42.64	31.06	52.39
32	42.60	31.01	52.26
33	42.45	30.96	52.36
34	42.64	31.21	52.19
35	42.21	30.91	52.26
36	41.82	30.82	52.32
37	41.48	30.77	52.32
38	41.31	30.77	52.26
39	41.16	30.77	52.36
40	41.11	30.67	52.36
41	40.41	30.07	52.06
42	40.19	30.02	52.19
43	40.17	30.07	52.46
44	40.16	30.22	52.39
45	40.15	30.37	52.19
46	39.72	30.32	52.22



ตารางที่ ๗.๒ (ต่อ)

RUN No.	Mass Flow rate (Kg/s)	Reynolds number	Graetz number
1	0.000994	61.17	1.62
2	0.001989	125.22	3.22
3	0.004296	280.32	6.91
4	0.005197	345.70	8.33
5	0.006294	419.12	10.08
6	0.007114	475.34	11.38
7	0.008286	552.59	13.26
8	0.009275	615.95	14.86
9	0.008831	579.95	14.18
10	0.009370	613.71	15.05
11	0.010649	692.65	17.13
12	0.012414	799.93	20.00
13	0.013509	867.16	21.78
14	0.014396	917.30	23.25
15	0.015351	972.82	24.81
16	0.016652	1045.65	26.96
17	0.017636	1105.37	28.57
18	0.018875	1173.90	30.62
19	0.018814	1145.41	30.65
20	0.020116	1246.88	32.66
21	0.021299	1314.30	34.61
22	0.022351	1369.16	36.37
23	0.023713	1439.97	38.65
24	0.025367	1533.15	41.39
25	0.026102	1587.31	42.53
26	0.027412	1661.31	44.70
27	0.028843	1745.92	47.04
28	0.030581	1847.13	49.90
29	0.031655	1908.80	51.67
30	0.033068	1988.85	54.01
31	0.034855	2088.49	56.97
32	0.035511	2126.44	58.05
33	0.036271	2166.70	59.32
34	0.037936	2276.16	61.99
35	0.039308	2339.90	64.33
36	0.041649	2464.87	68.25
37	0.043994	2591.47	72.16
38	0.045766	2690.58	75.10
39	0.047528	2788.38	78.02
40	0.049358	2891.61	81.05
41	0.049554	2864.73	81.60
42	0.051572	2972.13	84.99
43	0.053850	3103.09	88.74
44	0.060096	3466.97	99.01
45	0.063331	3657.80	104.31
46	0.067613	3882.95	111.51

ตารางที่ ๗.๒ (ต่อ)

RUN No.	Mass Flow rate (Kg/s)	Reynolds number	Graetz number
47	0.070422	4040.76	116.16
48	0.075244	4320.58	124.60
49	0.080321	4591.44	132.60
50	0.084817	4845.36	140.40
51	0.101214	5750.56	167.32
52	0.126742	7139.64	209.93
53	0.152671	8548.19	253.24
54	0.173913	9687.57	288.82
55	0.205338	11357.34	341.58
56	0.258397	14189.83	430.59
57	0.331125	18027.57	552.95
58	0.377358	20489.63	630.58
59	0.401606	21776.89	671.32

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๗.๒ (ต่อ)

RUN No.	Experimental Nusselt number	Analytical Nusselt number(1)	Analytical Nusselt number(2)
1	0.14	3.93	2.32
2	0.60	4.08	2.91
3	2.70	4.41	3.74
4	4.31	4.54	3.97
5	5.44	4.70	4.23
6	6.44	4.82	4.40
7	7.43	4.99	4.64
8	8.16	5.13	4.82
9	7.67	5.07	4.75
10	7.93	5.15	4.85
11	8.34	5.34	5.07
12	8.74	5.60	5.34
13	9.56	5.76	5.50
14	9.47	5.89	5.63
15	9.61	6.04	5.75
16	9.63	6.23	5.93
17	10.06	6.38	6.04
18	9.85	6.56	6.19
19	4.01	6.57	6.21
20	10.43	6.75	6.33
21	10.72	6.92	6.45
22	10.47	7.08	6.57
23	10.68	7.29	6.71
24	11.01	7.54	6.87
25	11.28	7.60	6.93
26	11.28	7.84	7.05
27	12.06	8.05	7.17
28	12.11	8.31	7.32
29	12.37	8.47	7.40
30	12.41	8.68	7.52
31	12.45	8.95	7.66
32	12.79	9.05	7.70
33	12.76	9.16	7.76
34	13.61	9.41	7.87
35	13.52	9.62	7.98
36	13.63	9.97	8.14
37	13.81	10.33	8.30
38	14.13	1.59	8.41
39	14.26	10.86	8.52
40	14.82	11.13	8.64
41	14.40	11.18	8.67
42	14.50	11.49	8.79
43	14.78	11.83	8.93
44	16.36	12.76	9.25
45	17.23	13.24	9.41
46	17.36	13.89	9.63

ตารางที่ ๕.๒ (ต่อ)

RUN No.	Experimental Nusselt number	Analytical Nusselt number(1)	Analytical Nusselt number(2)
47	17.84	14.32	9.76
48	18.67	15.04	9.98
49	19.42	15.81	10.21
50	19.85	16.48	10.40
51	22.72	18.95	11.04
52	25.47	22.82	11.93
53	28.24	26.74	12.71
54	29.22	29.97	13.29
55	31.49	34.75	14.06
56	34.13	42.82	15.21
57	38.85	53.91	16.56
58	42.16	60.94	17.30
59	43.44	64.64	17.67

(1)Dunwoody

(2)Rao et.al

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๗.๒ (ต่อ)

RUN No.	Analytical Nusselt number(3)	Analytical Nusselt number(4)
1	1.30	3.7920275
2	1.63	3.7964045
3	2.11	3.8610048
4	2.24	3.8969253
5	2.39	3.9429531
6	2.49	3.9768470
7	2.62	4.0243498
8	2.72	4.0628431
9	2.68	4.0467215
10	2.74	4.0672827
11	2.86	4.1139824
12	3.01	4.1726947
13	3.09	4.2059110
14	3.16	4.2316156
15	3.23	4.2572918
16	3.32	4.2901724
17	3.39	4.3130428
18	3.47	4.3401849
19	3.47	4.3405666
20	3.54	4.3651891
21	3.61	4.3873959
22	3.67	4.4061446
23	3.75	4.4287747
24	3.83	4.4537473
25	3.87	4.4634884
26	3.93	4.4810707
27	4.00	4.4987342
28	4.08	4.5186837
29	4.13	4.5302129
30	4.19	4.5445853
31	4.27	4.5614768
32	4.29	4.5673107
33	4.32	4.5739609
34	4.39	4.5872474
35	4.44	4.5981758
36	4.53	4.6151380
37	4.62	4.6305670
38	4.68	4.6413013
39	4.74	4.6513009
40	4.80	4.6610427
41	4.81	4.6627463
42	4.88	4.6728372
43	4.95	4.6832387
44	5.13	4.7082470
45	5.22	4.7194776
46	5.34	4.7332321

ตารางที่ ๕.๒ (ต่อ)

RUN No.	Analytical Nusselt number(3)	Analytical Nusselt number(4)
47	5.41	4.7413147
48	5.53	4.7546113
49	5.66	4.7658118
50	5.76	4.7756218
51	6.11	4.8030246
52	6.59	4.8329669
53	7.02	4.8536292
54	7.33	4.8661839
55	7.75	4.8801760
56	8.38	4.8962529
57	9.11	4.9101108
58	9.51	4.9161737
59	9.71	4.9188056

(3)James

(4)Schenk and Han

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๗.๒ (ต่อ)

RUN No.	Mass Flow rate (Kg/s)	Pressuer Drop (mm.water)	Reynolds number
1	0.003386	0.07	212.38
2	0.005291	0.11	339.27
3	0.005667	0.12	370.06
4	0.007329	0.17	481.59
5	0.008433	0.17	552.94
6	0.010257	0.19	667.44
7	0.013267	0.25	841.28
8	0.016149	0.26	1002.85
9	0.021367	0.32	1252.26
10	0.025516	0.42	1490.34
11	0.032258	0.67	1852.90
12	0.035625	0.73	2036.94
13	0.037481	0.82	2143.73
14	0.039793	0.91	2281.54
15	0.042680	1.03	2435.01
16	0.047687	1.32	2702.56
17	0.053908	1.64	3038.98
18	0.055309	1.70	3122.59
19	0.058719	2.00	3317.20
20	0.062814	2.33	3540.99
21	0.067476	2.83	3795.51
22	0.071275	3.03	3998.97
23	0.082850	3.87	4621.76
24	0.099800	5.25	5537.74
25	0.126262	8.04	6935.77
26	0.170648	14.24	9285.76
27	0.202839	17.90	10940.38
28	0.248138	25.11	13279.01

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๗.๒ (ต่อ)

RUN No.	Experimental friction factor
1	0.31084
2	0.22474
3	0.20233
4	0.13803
5	0.13668
6	0.11544
7	0.08522
8	0.07275
9	0.05618
10	0.05120
11	0.04443
12	0.04010
13	0.03306
14	0.03194
15	0.03208
16	0.03515
17	0.03350
18	0.03205
19	0.03529
20	0.03252
21	0.03208
22	0.03245
23	0.03261
24	0.03562
25	0.03368
26	0.03067
27	0.03119
28	0.03049

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๕.๒ (ต่อ)

RUN No.	Outlet Temperature (°C)	Inlet Temperature (°C)	Wall Temperature (°C)
47	39.60	30.37	52.13
48	39.48	30.37	52.16
49	39.29	30.37	52.16
50	39.17	30.47	52.26
51	38.79	30.37	52.13
52	38.10	30.32	52.29
53	37.58	30.32	52.26
54	37.11	30.37	52.39
55	36.52	30.32	52.22
56	35.85	30.37	52.39
57	35.20	30.22	52.39
58	34.96	30.22	52.26
59	34.85	30.22	52.32

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๕.๓ ข้อมูลจากการทดลองที่ aspect ratio ๐.๒๕ อุณหภูมิผนังที่ 57 °C

RUN No.	Outlet Temperature (°C)	Inlet Temperature (°C)	Wall Temperature (°C)
1	41.98	34.60	57.15
2	46.49	33.15	57.28
3	47.03	32.20	57.35
4	47.78	31.35	57.31
5	48.46	30.70	57.25
6	49.01	30.20	57.18
7	49.53	29.95	57.25
8	49.86	29.70	57.02
9	50.18	29.30	57.18
10	50.64	28.80	57.08
11	50.98	28.20	57.25
12	51.35	27.55	57.18
13	51.55	27.60	57.35
14	51.35	27.45	57.18
15	51.37	27.30	57.44
16	51.22	27.25	57.21
17	50.68	27.15	57.25
18	50.27	27.25	57.08
19	49.49	27.05	57.02
20	48.65	26.90	57.08
21	48.12	26.85	57.08
22	47.73	26.75	57.61
23	47.35	26.75	57.11
24	46.08	26.00	57.21
25	45.82	26.30	57.25
26	45.45	26.30	57.25
27	44.88	26.35	57.35
28	44.43	26.30	57.11
29	43.98	26.25	57.35
30	43.82	26.25	57.31
31	43.33	26.20	57.21
32	43.28	26.30	57.38
33	43.00	26.30	57.38
34	42.70	26.30	57.08
35	42.32	26.30	57.41
36	42.16	26.35	57.38
37	42.01	26.30	57.48
38	72.61	26.40	57.31
39	41.49	26.45	57.31
40	41.23	26.60	57.31
41	40.96	26.55	57.11
42	40.64	26.55	57.25
43	40.33	26.45	57.64
44	40.18	26.40	57.64
45	39.88	26.30	57.21
46	39.62	26.30	57.35



ตารางที่ ๗.๓ (ต่อ)

RUN No.	Outlet Temperature (°C)	Inlet Temperature (°C)	Wall Temperature (°C)
47	39.63	26.40	57.21
48	39.41	26.35	57.15
49	39.10	26.45	57.18
50	38.88	26.30	57.05
51	38.63	26.25	57.05
52	38.56	26.30	57.05
53	38.41	26.30	57.11
54	38.21	26.30	57.18
55	38.08	26.30	57.11
56	37.88	26.35	57.21
57	37.64	26.30	56.95
58	37.42	26.30	57.18
59	36.98	26.25	57.02
60	36.26	26.25	57.25
61	35.66	26.25	57.28

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๕.๓ (ต่อ)

RUN No.	Mass Flow rate (Kg/s)	Reynolds number	Graetz number
1	0.000859	52.44	1.39
2	0.001588	101.22	2.56
3	0.001934	123.26	3.12
4	0.002387	152.90	3.85
5	0.002838	182.84	4.57
6	0.003071	198.92	4.94
7	0.003259	212.43	5.23
8	0.003602	235.88	5.78
9	0.004074	267.46	6.54
10	0.004873	321.74	7.81
11	0.005767	381.53	9.24
12	0.007070	469.60	11.33
13	0.007383	491.93	11.82
14	0.008731	579.62	13.99
15	0.010039	664.98	16.09
16	0.011112	734.78	17.82
17	0.012353	808.12	19.85
18	0.013417	872.37	21.58
19	0.014859	952.34	23.97
20	0.016694	1157.67	29.98
21	0.018505	1053.87	27.00
22	0.019365	1201.49	31.43
23	0.020555	1269.83	33.39
24	0.021482	1294.93	35.07
25	0.023441	1410.48	38.28
26	0.024631	1474.31	40.26
27	0.026504	1573.70	43.40
28	0.027925	1647.63	45.79
29	0.029727	1741.94	48.81
30	0.030921	1807.80	50.80
31	0.031837	1848.66	52.37
32	0.032563	1890.56	53.57
33	0.034247	1980.83	56.39
34	0.035361	2037.75	58.27
35	0.036832	2110.79	60.77
36	0.037893	2167.93	62.54
37	0.039355	2245.96	64.99
38	0.041000	2329.89	67.77
39	0.042589	2417.69	70.42
40	0.044053	2495.34	72.87
41	0.046211	2607.51	76.51
42	0.049116	2760.14	81.39
43	0.051020	2852.72	84.65
44	0.052910	2951.17	87.84
45	0.054975	3053.44	91.36
46	0.056338	3118.22	93.70

ตารางที่ ๕.๓ (ต่อ)

RUN No.	Mass Flow rate (Kg/s)	Reynolds number	Graetz number
47	0.059032	3271.11	98.15
48	0.061425	3392.65	102.21
49	0.068681	3782.30	114.37
50	0.072202	3960.03	120.35
51	0.075586	4131.42	126.09
52	0.078309	4277.84	130.65
53	0.082034	4472.89	136.94
54	0.086957	4729.39	145.24
55	0.091911	4991.35	153.58
56	0.096993	5256.77	162.15
57	0.104275	5633.00	174.47
58	0.115740	6234.17	193.79
59	0.130378	6982.43	218.62
60	0.147058	7806.90	247.16
61	0.180831	9531.00	304.50

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๗.๓ (ต่อ)

RUN No.	Experimental Nusselt number	Analytical Nusselt number(1)	Analytical Nusselt number(2)
1	0.17	3.91	2.23
2	0.65	4.02	2.71
3	0.87	4.07	2.90
4	1.22	4.14	3.11
5	1.61	4.20	3.29
6	1.89	4.24	3.37
7	2.13	4.26	3.43
8	2.51	4.31	3.55
9	2.94	4.38	3.70
10	3.79	4.50	3.92
11	4.66	4.63	4.15
12	6.10	4.81	4.43
13	6.42	4.86	4.50
14	7.55	5.06	4.76
15	8.49	5.25	4.99
16	9.46	5.40	5.16
17	9.86	5.59	5.36
18	10.35	5.74	5.51
19	10.64	5.96	5.72
20	11.49	6.23	5.97
21	10.93	6.50	6.18
22	11.17	6.64	6.30
23	11.85	6.81	6.42
24	11.15	6.97	6.55
25	11.75	7.26	6.75
26	11.95	7.44	6.87
27	12.10	7.72	7.05
28	12.42	7.94	7.18
29	12.55	8.21	7.35
30	12.88	8.39	7.45
31	12.78	8.53	7.53
32	12.84	8.64	7.59
33	13.16	8.90	7.72
34	13.43	9.07	7.81
35	13.26	9.30	7.93
36	13.42	9.46	8.01
37	13.71	9.68	8.12
38	13.80	9.93	8.23
39	14.15	10.17	8.34
40	14.17	10.39	8.44
41	14.64	10.72	8.58
42	15.00	11.16	8.76
43	14.90	11.46	8.89
44	15.25	11.75	9.01
45	15.79	12.07	9.12
46	15.65	12.28	9.21

ตารางที่ ๗.๓ (ต่อ)

RUN No.	Experimental Nusselt number	Analytical Nusselt number(1)	Analytical Nusselt number(2)
47	16.44	12.68	9.34
48	16.81	13.05	9.47
49	18.08	14.15	9.84
50	18.84	14.70	10.01
51	19.29	15.22	10.17
52	19.75	15.63	10.30
53	20.29	16.20	10.46
54	20.98	16.95	10.68
55	21.95	17.71	10.88
56	22.49	18.48	11.08
57	23.91	19.60	11.35
58	25.58	21.35	11.77
59	27.70	23.60	12.26
60	28.38	26.19	12.79
61	32.32	31.39	13.73

(1)Dunwoody (2)Rao et al. (3)James

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๗.๓ (ต่อ)

RUN No.	Analytical Nusselt number(3)	Analytical Nusselt number(4)
1	1.23	3.79
2	1.51	3.79
3	1.62	3.80
4	1.73	3.80
5	1.84	3.81
6	1.89	3.82
7	1.92	3.82
8	1.99	3.84
9	2.07	3.85
10	2.20	3.88
11	2.32	3.92
12	2.49	3.98
13	2.52	3.99
14	2.67	4.04
15	2.80	4.09
16	2.89	4.13
17	3.00	4.17
18	3.09	4.20
19	3.20	4.24
20	3.33	4.33
21	3.44	4.29
22	3.50	4.35
23	3.57	4.37
24	3.63	4.39
25	3.74	4.43
26	3.80	4.44
27	3.90	4.47
28	3.97	4.49
29	4.05	4.51
30	4.11	4.52
31	4.15	4.53
32	4.18	4.54
33	4.25	4.56
34	4.30	4.57
35	4.36	4.58
36	4.40	4.59
37	4.46	4.60
38	4.52	4.61
39	4.58	4.62
40	4.63	4.63
41	4.71	4.65
42	4.81	4.66
43	4.87	4.67
44	4.93	4.68
45	4.99	4.69
46	5.04	4.70

ตารางที่ ๗.๓ (ต่อ)

RUN No.	Analytical Nusselt number(3)	Analytical Nusselt number(4)
47	5.12	4.71
48	5.18	4.72
49	5.38	4.74
50	5.48	4.75
51	5.56	4.76
52	5.63	4.76
53	5.72	4.77
54	5.83	4.78
55	5.94	4.79
56	6.05	4.80
57	6.20	4.81
58	6.42	4.82
59	6.68	4.84
60	6.96	4.85
61	7.46	4.87

(4)Schenk and Han

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๗.๓ (ต่อ)

RUN No.	Mass Flow rate (Kg/s)	Pressure Drop (mm.water)	Reynolds number
1	0.003244	0.04	198.38
2	0.005964	0.08	386.06
3	0.006699	0.16	450.46
4	0.011160	0.16	759.85
5	0.013385	0.19	891.69
6	0.016270	0.24	1060.99
7	0.019592	0.31	1257.85
8	0.023998	0.38	1503.44
9	0.026274	0.42	1630.69
10	0.028066	0.46	1732.73
11	0.030339	0.53	1855.35
12	0.032658	0.58	1981.96
13	0.034013	0.62	2055.44
14	0.035448	0.67	2131.71
15	0.037023	0.71	2215.09
16	0.038417	0.77	2290.99
17	0.039463	0.86	2361.60
18	0.043878	1.00	2582.53
19	0.050890	1.16	2865.70
20	0.058072	1.65	3379.71
21	0.064308	1.98	3726.34
22	0.072833	2.30	4200.80
23	0.091240	3.98	5330.26
24	0.125786	5.90	7115.05
25	0.150375	8.38	8428.61
26	0.169204	9.77	9419.99
27	0.207468	13.89	11452.07
28	0.253164	20.10	13812.76

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๗.๓ (ต่อ)

RUN No.	Experimental friction factor
1	0.29825
2	0.13159
3	0.11756
4	0.06205
5	0.05653
6	0.05162
7	0.04820
8	0.04290
9	0.04063
10	0.04007
11	0.04047
12	0.03993
13	0.03991
14	0.03991
15	0.03961
16	0.04018
17	0.04114
18	0.04232
19	0.04124
20	0.04130
21	0.04014
22	0.03833
23	0.03949
24	0.03505
25	0.03410
26	0.03261
27	0.03182
28	0.03141

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๔.4 ข้อมูลจากการทดลองที่ aspect ratio ๐.25 อุณหภูมิผนังท่อ 29 °C

RUN No.	Mass Flow rate (Kg/s)	Pressure Drop (mm.water)	Reynolds number
1	0.000890	0.15	45.00
2	0.001809	0.19	91.42
3	0.002063	0.22	104.24
4	0.002638	0.26	133.28
5	0.003000	0.26	151.59
6	0.003717	0.31	187.80
7	0.004141	0.33	209.20
8	0.004861	0.38	245.57
9	0.005089	0.37	257.07
10	0.005939	0.42	300.04
11	0.006227	0.46	314.60
12	0.007090	0.49	358.16
13	0.007633	0.54	385.58
14	0.007966	0.56	402.41
15	0.009092	0.61	459.31
16	0.009718	0.66	490.91
17	0.010598	0.71	535.40
18	0.011298	0.74	570.72
19	0.012124	0.86	612.45
20	0.013071	0.90	660.32
21	0.013758	0.94	695.03
22	0.014359	0.96	725.37
23	0.015087	1.04	762.14
24	0.016714	1.01	831.57
25	0.017346	1.05	868.52
26	0.017765	1.08	889.50
27	0.018224	1.09	912.52
28	0.018932	1.12	947.94
29	0.019443	1.17	973.56
30	0.020104	1.20	1006.63
31	0.020441	1.21	1023.51
32	0.021052	1.26	1054.10
33	0.021533	1.30	1078.16
34	0.022351	1.34	1119.13
35	0.022660	1.38	1134.60
36	0.023353	1.40	1169.31
37	0.023946	1.43	1198.99
38	0.024838	1.49	1243.66
39	0.025746	1.52	1289.13
40	0.026150	1.58	1309.36
41	0.027262	1.66	1365.05
42	0.027397	1.67	1371.78
43	0.028058	1.76	1404.88
44	0.029700	1.88	1487.08
45	0.030220	1.92	1513.14
46	0.030835	2.01	1543.94

ตารางที่ ๗.4 (ต่อ)

RUN No.	Mass Flow rate (Kg/s)	Pressure Drop (mm. water)	Reynolds number
47	0.031625	2.02	1583.49
48	0.033046	2.13	1654.66
49	0.033300	2.14	1667.33
50	0.034246	2.26	1714.72
51	0.035026	2.33	1753.76
52	0.036101	2.45	1807.58
53	0.037037	2.56	1854.44
54	0.037735	2.65	1889.43
55	0.038910	2.71	1948.25
56	0.039888	2.94	1997.21
57	0.039808	2.94	1993.23
58	0.040683	3.04	2037.02
59	0.041911	3.13	2098.49
60	0.043140	3.20	2160.05
61	0.043859	3.29	2196.05
62	0.045045	3.38	2255.40
63	0.045454	3.56	2275.91
64	0.047214	3.82	2364.02
65	0.048402	4.03	2423.52
66	0.050025	4.22	2504.75
67	0.050556	4.32	2531.34
68	0.052164	4.55	2611.89
69	0.050125	4.79	2493.78
70	0.052356	5.13	2604.76
71	0.053879	5.56	2680.55
72	0.056369	5.91	2804.45
73	0.058616	6.37	2916.24
74	0.059808	6.73	2975.54
75	0.062189	7.29	3093.97
76	0.063532	7.58	3160.80
77	0.064892	7.80	3228.49
78	0.065746	8.05	3270.94
79	0.067796	8.55	3372.95
80	0.070372	9.08	3501.13
81	0.072150	9.68	3589.54
82	0.075244	10.17	3743.49
83	0.076687	10.53	3815.26
84	0.077639	10.86	3862.65
85	0.080710	11.46	4015.41
86	0.082781	12.16	4118.46
87	0.086730	12.89	4314.92
88	0.088105	13.42	4383.35
89	0.090334	13.91	4494.22
90	0.090661	14.55	4510.52
91	0.094428	15.11	4697.92
92	0.098135	15.98	4882.33



ตารางที่ ๕.4 (ต่อ)

RUN No.	Mass Flow rate (Kg/s)	Pressure Drop (mm. water)	Reynolds number
93	0.099502	16.70	4950.35
94	0.102774	17.64	5113.15
95	0.106609	19.26	5303.94
96	0.115473	19.78	5781.75
97	0.115874	20.99	5801.85
98	0.120336	22.09	6025.26
99	0.121359	22.92	6076.45
100	0.125944	24.24	6306.04
101	0.129533	25.47	6485.74
102	0.131926	27.40	6605.53
103	0.146198	31.65	7320.17
104	0.157977	37.32	7909.94
105	0.175438	41.86	8784.20
106	0.184501	47.09	9238.00
107	0.199600	54.19	9994.00
108	0.212765	64.15	10653.18
109	0.238095	78.23	11921.42
110	0.265251	89.64	13281.15
111	0.279329	101.58	13986.02
112	0.303951	110.49	15218.83

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๗.๔ (ต่อ)

RUN No.	Experimental friction factor	Analytical friction factor
1	4.77313	0.78560
2	1.49255	0.40200
3	1.34454	0.35620
4	0.96158	0.28519
5	0.75807	0.25430
6	0.58949	0.21110
7	0.49819	0.19260
8	0.41370	0.16850
9	0.37412	0.16230
10	0.31209	0.14340
11	0.30545	0.13810
12	0.25319	0.12500
13	0.24038	0.11825
14	0.22902	0.11455
15	0.19178	0.10404
16	0.18094	0.09923
17	0.16388	0.09340
18	0.15008	0.08939
19	0.15220	0.08523
20	0.13660	0.08106
21	0.12865	0.07835
22	0.12046	0.07619
23	0.11841	0.07377
24	0.09420	0.06972
25	0.09043	0.06779
26	0.08882	0.06675
27	0.08536	0.06566
28	0.08130	0.06407
29	0.08067	0.06298
30	0.07687	0.06163
31	0.07530	0.06098
32	0.07357	0.05983
33	0.07264	0.05896
34	0.06942	0.05755
35	0.06963	0.05704
36	0.06667	0.05594
37	0.06460	0.05503
38	0.06265	0.05374
39	0.05944	0.05249
40	0.06013	0.05196
41	0.05801	0.05055
42	0.05759	0.05039
43	0.05791	0.04960
44	0.05529	0.04777
45	0.05461	0.04722
46	0.05483	0.04660

ตารางที่ ๕.4 (ต่อ)

RUN No.	Experimental friction factor	Analytical friction factor
47	0.05248	0.04582
48	0.05055	0.04449
49	0.05001	0.04426
50	0.04994	0.04344
51	0.04931	0.04279
52	0.04881	0.04193
53	0.04851	0.04121
54	0.04833	0.04069
55	0.04640	0.03986
56	0.04805	0.03920
57	0.04815	0.03925
58	0.04765	0.03868
59	0.04627	0.03790
60	0.04465	0.03717
61	0.04433	0.03675
62	0.04324	0.03609
63	0.04479	0.03587
64	0.04451	0.03496
65	0.04467	0.03437
66	0.04375	0.03361
67	0.04383	0.03337
68	0.04344	0.03266
69	0.04949	0.03371
70	0.04855	0.03272
71	0.04971	0.03209
72	0.04831	0.03112
73	0.04812	0.03030
74	0.04886	0.02989
75	0.04891	0.02911
76	0.04873	0.02869
77	0.04808	0.02828
78	0.04837	0.02803
79	0.04831	0.02745
80	0.04762	0.02677
81	0.04828	0.02632
82	0.04661	0.02559
83	0.04648	0.02527
84	0.04677	0.02506
85	0.04568	0.02441
86	0.04606	0.02400
87	0.04450	0.02327
88	0.04489	0.02302
89	0.04424	0.02265
90	0.04595	0.02259
91	0.04399	0.02199
92	0.04309	0.02144

ตารางที่ ๗.4 (ต่อ)

RUN No.	Experimental friction factor	Analytical friction factor
93	0.04379	0.02124
94	0.04335	0.02079
95	0.04399	0.02030
96	0.03851	0.01919
97	0.04058	0.01914
98	0.03959	0.01868
99	0.04039	0.01858
100	0.03966	0.01813
101	0.03941	0.01781
102	0.04086	0.01760
103	0.03844	0.01648
104	0.03882	0.01569
105	0.03530	0.01468
106	0.03591	0.01423
107	0.03531	0.01355
108	0.03679	0.01302
109	0.03582	0.01216
110	0.03307	0.01138
111	0.03379	0.01103
112	0.03104	0.01049

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๕.5 ข้อมูลจากการทดลองที่ aspect ratio 0.5 อุณหภูมิผนังที่ 42 °C

Run No.	Outlet Temperature (°C)	Inlet Temperature (°C)	Wall Temperature (°C)
1	39.97	32.00	42.45
2	40.41	31.66	42.35
3	40.36	31.41	42.31
4	40.03	31.26	42.28
5	39.62	31.11	42.31
6	39.17	31.11	42.58
7	38.91	31.01	42.31
8	38.50	30.91	42.48
9	38.06	30.82	42.48
10	37.64	30.62	42.64
11	37.00	30.47	42.51
12	36.85	30.37	42.51
13	36.92	30.22	42.54
14	36.47	30.02	42.15
15	36.56	30.02	41.95
16	36.70	30.07	42.28
17	36.70	30.07	42.28
18	36.46	30.12	42.18
19	36.37	30.12	42.38
20	35.79	30.02	42.28
21	35.12	29.97	42.48
22	34.75	29.82	42.41
23	34.43	29.82	42.31
24	34.09	29.77	42.11
25	33.96	29.77	42.02
26	56.83	29.77	42.28
27	33.43	29.63	41.88
28	33.32	29.53	41.98
29	33.25	29.63	42.18
30	33.33	29.63	42.08
31	33.09	29.53	42.08
32	33.12	29.58	42.08

ศูนย์ถ่ายทอดวิชาการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๕.5 (ต่อ)

Run No.	Mass Flow rate (Kg/s)	Pressuer Drop (mm.water)	Reynolds number
1	0.00104	0.18	101.48
2	0.00260	0.43	256.31
3	0.00418	0.55	411.56
4	0.00658	0.98	643.00
5	0.00844	1.34	818.60
6	0.01000	1.64	961.63
7	0.01103	1.85	1057.36
8	0.01217	2.13	1157.53
9	0.01396	2.48	1317.77
10	0.01533	3.01	1436.46
11	0.01885	4.20	1749.71
12	0.02628	6.95	2432.26
13	0.03211	10.11	2970.98
14	0.03505	12.16	3219.40
15	0.03870	14.33	3561.09
16	0.04146	15.81	3821.32
17	0.04789	20.11	4413.66
18	0.06180	32.42	5680.40
19	0.07375	43.94	6768.76
20	0.10953	86.98	9970.27
21	0.13947	129.48	12582.42
22	0.15848	166.05	14213.99
23	0.18450	217.45	16486.25
24	0.20576	268.85	18303.71
25	0.22472	318.27	19959.60
26	0.23923	365.71	21211.76
27	0.26110	410.19	23011.35
28	0.27322	454.67	24026.20
29	0.27397	488.28	24096.34
30	0.27548	457.64	24252.40
31	0.28571	512.00	25056.23
32	0.31250	538.69	27430.92

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๗.5 (ต่อ)

Run No.	Experimental Graetz number	Experimental Nusselt number	Analytical Nusselt number(1)
1	2.63	1.06	3.89
2	6.60	3.16	4.13
3	10.63	5.11	4.37
4	16.77	7.46	4.73
5	21.53	8.59	5.01
6	25.55	8.66	5.25
7	28.20	9.46	5.41
8	31.19	9.28	5.58
9	35.81	9.69	5.85
10	39.41	9.62	6.07
11	48.57	10.58	6.61
12	67.76	14.40	7.74
13	82.80	18.04	8.63
14	90.53	19.07	9.09
15	99.92	22.10	9.65
16	106.99	23.30	10.06
17	123.60	26.85	11.05
18	159.61	33.02	13.18
19	190.51	37.71	15.00
20	283.52	49.95	20.50
21	361.82	53.15	25.13
22	411.73	56.55	28.08
23	479.80	61.22	32.11
24	535.70	63.91	35.41
25	585.29	67.89	38.35
26	623.37	67.48	40.60
27	681.41	69.91	44.03
28	713.48	71.53	45.93
29	715.40	67.46	46.04
30	719.16	70.28	46.26
31	746.63	68.77	47.89
32	816.43	75.31	52.01

(1)Dunwoody

ตารางที่ ๗.5 (ต่อ)

Run No.	Analytical Nusselt number(2)	Analytical Nusselt number(3)	Experimental friction factor
1	2.63	1.49	1.07008
2	3.57	2.03	0.39796
3	4.19	2.38	0.20017
4	4.86	2.77	0.14374
5	5.31	3.02	0.12009
6	5.63	3.19	0.10524
7	5.82	3.30	0.09783
8	6.03	3.41	0.09300
9	6.32	3.57	0.08247
10	6.53	3.69	0.08338
11	7.01	3.96	0.07729
12	7.84	4.42	0.06585
13	8.38	4.73	0.06421
14	8.63	4.87	0.06500
15	8.91	5.03	0.06281
16	9.12	5.15	0.06034
17	9.57	5.40	0.05752
18	10.43	5.89	0.05573
19	11.07	6.24	0.05308
20	12.65	7.13	0.04779
21	13.75	7.73	0.04403
22	14.36	8.07	0.04382
23	15.12	8.50	0.04239
24	15.68	8.82	0.04220
25	16.15	9.08	0.04190
26	16.51	9.27	0.04250
27	17.01	9.55	0.04009
28	17.28	9.70	0.04061
29	17.30	9.71	0.04337
30	17.33	9.72	0.04019
31	17.55	9.85	0.04185
32	18.08	10.15	0.03680

(2)Rao et.al. (3)James

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๗.6 ข้อมูลจากการทดลองที่ aspect ratio ๐.5 อุณหภูมิผนังท่อ 52 °C

RUN No.	Outlet Temperature (°C)	Inlet Temperature (°C)	Wall Temperature (°C)
1	47.79	32.15	52.06
2	48.44	31.76	52.49
3	48.76	31.51	52.39
4	48.37	31.26	52.19
5	47.86	31.21	52.29
6	46.18	30.96	52.49
7	45.04	30.96	52.36
8	44.27	30.87	52.49
9	43.56	30.57	52.06
10	43.03	30.67	52.09
11	42.58	30.57	52.09
12	42.90	30.42	52.09
13	42.61	30.37	52.09
14	42.25	30.47	52.19

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๕.6 (ต่อ)

RUN No.	Mass Flow rate (Kg/s)	Pressure Drop (mm.water)	Reynolds number
1	0.00221	0.32	238.90
2	0.00351	0.60	380.88
3	0.00594	1.24	648.00
4	0.00788	1.80	854.10
5	0.00933	2.24	1001.00
6	0.01428	5.88	1489.30
7	0.01773	4.96	1819.05
8	0.02255	6.52	2286.74
9	0.02737	8.17	2745.31
10	0.03334	11.48	3322.57
11	0.03752	11.48	3713.55
12	0.04325	16.09	4293.80
13	0.04587	17.86	4535.23
14	0.05051	19.96	4972.53

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๗.๖ (ต่อ)

RUN No.	Experimental Graetz number	Experimental Nusselt number	Analytical Nusselt number(1)
1	5.53	2.41	4.60
2	8.74	4.05	4.25
3	14.81	7.35	4.61
4	19.67	9.47	4.90
5	23.32	10.30	5.12
6	35.91	12.43	5.86
7	44.72	13.51	6.38
8	57.00	15.52	7.11
9	69.36	18.09	7.84
10	84.60	20.44	8.74
11	95.34	21.20	9.38
12	109.82	26.41	10.23
13	116.57	27.12	10.63
14	128.46	28.13	11.33

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๗.๖ (ต่อ)

RUN No.	Analytical Nusselt number(2)	Analytical Nusselt number(3)	Experimental friction factor
1	3.40	1.92	0.37183
2	3.96	2.23	0.27956
3	4.72	2.66	0.19940
4	5.19	2.93	0.16590
5	5.51	3.10	0.14930
6	6.39	3.58	0.17317
7	6.89	3.85	0.09624
8	7.48	4.17	0.07912
9	7.99	4.46	0.06785
10	8.55	4.76	0.06466
11	8.90	4.96	0.05130
12	9.33	5.20	0.05397
13	9.52	5.30	0.05344
14	9.84	5.47	0.04942

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๗.7 ข้อมูลจากการทดลองที่ aspect ratio 0.5 อุณหภูมิผนังท่อ 57 °C

RUN No.	Outlet Temperature (°C)	Inlet Temperature (°C)	Wall Temperature (°C)
1	46.25	29.63	56.85
2	45.04	29.58	55.99
3	44.80	29.63	56.29
4	45.20	29.73	56.75
5	46.78	29.87	57.08
6	45.79	29.58	56.82
7	46.24	29.23	56.82
8	46.47	29.33	57.05
9	46.58	29.28	57.08
10	48.00	29.38	57.25
11	50.90	29.43	57.38
12	52.49	29.43	56.95
13	51.96	29.53	57.11
14	51.97	29.97	56.75
15	50.62	31.61	57.21

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ๗.7 (ต่อ)

RUN No.	Mass Flow rate (Kg/s)	Pressure Drop (mm. water)	Reynolds number
1	0.04216	16.25	4324.86
2	0.04234	15.95	4276.34
3	0.03834	13.30	3860.72
4	0.03346	10.80	3387.46
5	0.02958	8.95	3060.45
6	0.02585	5.40	2635.92
7	0.02313	5.40	2365.13
8	0.02064	7.77	2118.68
9	0.01875	4.48	1926.07
10	0.01493	3.16	1564.84
11	0.01180	2.76	1292.42
12	0.00856	2.23	964.83
13	0.00505	3.59	564.11
14	0.00296	0.58	331.96
15	0.00080	0.43	88.76

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๗.๗ (ต่อ)

RUN No.	Experimental Graetz number	Experimental Nusselt number	Theoretical Nusselt number(1)
1	106.35	28.26	10.30
2	107.13	26.50	10.07
3	97.08	22.96	9.48
4	84.61	20.23	8.74
5	74.49	20.40	8.40
6	65.30	16.87	7.60
7	58.37	15.75	7.19
8	52.07	14.13	6.82
9	47.28	12.96	6.53
10	37.49	11.69	5.95
11	29.40	12.21	5.48
12	21.21	10.99	4.99
13	12.54	5.99	4.48
14	7.34	3.59	4.17
15	1.99	0.77	3.86

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๗.๗ (ต่อ)

RUN No.	Theoretical Nusselt number(2)	Theoretical Nusselt number(3)	Experimental friction factor
1	9.29	5.14	0.05578
2	9.31	5.15	0.05507
3	9.02	4.99	0.05612
4	8.62	4.76	0.05956
5	8.24	4.56	0.06192
6	7.90	4.37	0.04956
7	7.60	4.21	0.06176
8	7.32	4.05	0.11118
9	7.09	3.92	0.07759
10	6.54	3.63	0.08463
11	6.00	3.35	0.11219
12	5.35	3.00	0.16432
13	4.50	2.52	0.77338
14	3.76	2.11	0.36355
15	2.44	1.36	3.71191

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๗.๘ ข้อมูลจากการทดลองที่ aspect ratio ๐.๕ อุณหภูมิผนังท่อ 29 °C

RUN No.	Pressure Drop (mm. water)	Mass Flow rate (Kg/s)	Reynolds number
1	0.17	0.001408	115.16
2	0.29	0.001744	141.13
3	0.46	0.003026	244.88
4	0.64	0.004237	342.89
5	0.81	0.005703	461.53
6	1.10	0.007418	600.32
7	1.35	0.008975	726.32
8	1.57	0.010619	889.37
9	1.80	0.011951	1000.93
10	1.97	0.012899	1080.33
11	2.22	0.014363	1202.95
12	2.42	0.015420	1291.47
13	2.64	0.016564	1387.29
14	2.89	0.017513	1466.77
15	4.40	0.022331	1862.44
16	5.86	0.026109	2177.53
17	8.64	0.030257	2523.48
18	11.10	0.034352	2865.01
19	13.29	0.037721	3145.99
20	18.51	0.043763	3612.33
21	20.87	0.047058	3884.31
22	25.10	0.052328	4319.32
23	29.33	0.057012	4705.95
24	40.36	0.068259	5634.31
25	50.79	0.077220	6373.98
26	58.66	0.087796	7246.96
27	80.71	0.100603	8304.09
28	98.43	0.112739	9305.84
29	124.02	0.128205	10582.45
30	157.49	0.147058	12138.64
31	201.78	0.170940	14109.94
32	246.08	0.193423	15965.76
33	290.37	0.211864	17487.93
34	350.41	0.230414	19019.11
35	388.80	0.248138	20482.11
36	433.10	0.262467	21664.87
37	487.23	0.286532	23651.27
38	559.09	0.298507	24639.73
39	524.64	0.301204	24862.35

ตารางที่ ๗.๘ (ต่อ)

RUN No.	Experimental friction factor
1	0.56144
2	0.64495
3	0.33969
4	0.23949
5	0.16792
6	0.13368
7	0.11217
8	0.09351
9	0.08494
10	0.07954
11	0.07227
12	0.06847
13	0.06463
14	0.06343
15	0.05933
16	0.05787
17	0.06348
18	0.06331
19	0.06285
20	0.06510
21	0.06349
22	0.06176
23	0.06080
24	0.05836
25	0.05739
26	0.05128
27	0.05373
28	0.05218
29	0.05084
30	0.04906
31	0.04653
32	0.04431
33	0.04358
34	0.04447
35	0.04254
36	0.04236
37	0.03998
38	0.04227
39	0.03896

ศูนย์ทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ประวัติผู้เขียน

นาย พงศธร สุ่มันตกุล เกิดเมื่อวันที่ 25 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2506 ที่อำเภอ เมือง
จังหวัด แพร่ จบการศึกษา ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จาก โรงเรียน ยุพราช วิทยาลัย
จังหวัด เชียงใหม่ จบการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา วิศวกรรม
เครื่องกล จาก มหาวิทยาลัยขอนแก่น และเข้าศึกษาในระดับปริญญาโท สาขา วิศวกรรม
เครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2529

ศูนย์วิทยะพายัพ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย