



ผลการทดลองและการวิเคราะห์

4.1 ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

ในการทดลองได้ทำการทดลองกับอุปกรณ์ซึ่งได้สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาถึงการไหลของน้ำในท่อโดยที่ผนังท่อมืดอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของน้ำซึ่งไหลในท่อ เมื่ออุณหภูมิของผนังท่อกับอุณหภูมิของน้ำมีค่าไม่เท่ากันจึงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนขึ้น โดยผนังท่อยุ่จะสูญเสียความร้อนไปน้ำในท่อซึ่งมีคุณสมบัติต่ำกว่าน้ำในท่อเมื่อไหลผ่านท่อและได้รับความร้อนอุณหภูมิก็จะสูงขึ้น ดังนั้นค่าอุณหภูมิของน้ำขาออกจึงเป็นค่าหนึ่งที่ถูกทำการวัด โดยในการทดลองนี้ได้ทำการวัดอุณหภูมิขาออกที่ปากทางออกของท่อทดสอบ กระจายออกไป 12 จุด เพื่อครอบคลุมพื้นที่ ที่น้ำขาออกไหลผ่าน และถ้าอุณหภูมิของแต่ละจุดไม่เท่ากัน ก็จะสามารถหาค่าเฉลี่ยได้ อุณหภูมิของน้ำขาออกที่ได้นี้จะเปรียบเทียบกับอุณหภูมิของน้ำเมื่อยังไม่ได้รับการถ่ายเทความร้อน หรืออุณหภูมิของน้ำขาเข้า อุณหภูมิของน้ำขาเข้านี้ได้ถูกวัดที่ปากทางเข้าของท่อทดสอบเป็นจำนวน 2 จุด สำหรับค่าอุณหภูมิผนังท่อนั้น ได้ถูกทำการวัดที่ผิวท่อด้านนอกกระจายกันออกไป 3 จุด คือ ที่ต้นท่อ กลางท่อ และที่ท้ายท่อ ค่าที่ถูกทำการวัดอีกค่าหนึ่งก็คือ ค่าอัตราการไหลของน้ำ ซึ่งหาได้โดยการชั่งน้ำหนักของน้ำเทียบกับเวลา เมื่อมีการไหลของน้ำในท่อ สิ่งที่น่าสนใจอีกสิ่งหนึ่งก็คือ ความดันสถิต (static pressure) ที่ต้นท่อกับที่ท้ายท่อ ซึ่งในการทดลองนี้ได้ทำการวัดหาค่าความดัน โดยการเจาะรูที่ใกล้ ๆ กับปากทางออกของท่อทดสอบ แล้วจึงใช้มาโนมิเตอร์วัดความดันแตกต่างของทั้งสองจุดได้ ดังนั้นค่าข้อมูลซึ่งได้จากการวัดจากการทดลองโดยตรงมีดังนี้

1. อุณหภูมิของน้ำขาเข้าเครื่องมือวัดคือ เทอร์โมคัปเปิล หน่วยเป็น องศาเซนเซียส
2. อุณหภูมิของน้ำขาออกเครื่องมือวัดคือ เทอร์โมคัปเปิล หน่วยเป็น องศาเซนเซียส
3. อุณหภูมิของผนังท่อกับเครื่องมือวัดคือ เทอร์โมคัปเปิล หน่วยเป็น องศาเซนเซียส
4. ความดันสถิตแตกต่างในท่อ เครื่องมือวัดคือ มาโนมิเตอร์ หน่วยเป็น มิลลิเมตรน้ำ
5. อัตราการไหลของน้ำ เครื่องมือวัดคือตาชั่งกับนาฬิกาจับเวลา หน่วยเป็น กิโลกรัม

โลกรัมต่อวินาที

4.2 การวิเคราะห์ข้อมูล

4.2.1 กรณีไม่มีการถ่ายเทความร้อน

ในกรณีไม่มีการถ่ายเทความร้อนนี้ อุณหภูมิของน้ำ และอุณหภูมิของผนังท่อทดสอบมีค่าเท่ากันดังนั้นข้อมูลที่จะนำมาใช้คือ ขนาดของความแตกต่างของความดันสถิตในท่อทดสอบกับอัตราการไหลของน้ำ เพื่อให้ข้อมูลที่ได้สามารถนำไปใช้ได้ เมื่อตัวแปรต่าง ๆ ในการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงหรือมีค่าแตกต่างออกไปจากในงานวิจัยนี้ ดังนั้นจึงเป็นการเหมาะสมถ้านำวิธีการทางการวิเคราะห์โดยตัวแปรไร้มิติ (dimensionless analysis) มาใช้เมื่อพิจารณาถึงตัวแปรที่เกี่ยวข้องในกรณีน้ำไหลในท่อ น่าจะประกอบไปด้วย

1. ขนาดความแตกต่างของความดันสถิต (h_f)
2. ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อ (D)
3. ความยาวของท่อ (L)
4. ความเร็วเฉลี่ยของน้ำในท่อ (V)
5. ความหนาแน่นของน้ำ (ρ)
6. ความหนืดไดนามิกของน้ำ (μ)
7. อัตราแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (g)

ซึ่งจากการทดลอง (Streeter, 1979) จะได้ว่า

1. ขนาดความแตกต่างของความดันสถิตแปรผันโดยตรงกับความยาวของท่อ
2. ขนาดความแตกต่างของความดันสถิตมีความใกล้เคียงที่จะแปรผันโดยตรงกับความเร็วเฉลี่ยของน้ำในท่อ ยกกำลังสอง
3. ขนาดความแตกต่างของความดันสถิต มีความใกล้เคียงที่จะแปรผันกับขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ
4. ขนาดความแตกต่างของความดันสถิตขึ้นอยู่กับความหยาบของผิวด้านในของท่อ
5. ขนาดความแตกต่างของความดันสถิตขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของน้ำคือ ความหนาแน่นและความหนืด
6. ขนาดของความแตกต่างของความดันสถิตไม่ขึ้นกับขนาดของความดันภายในท่อ



และจากข้อสังเกตที่ได้เหล่านี้ จึงสามารถนำสมการ

$$h_f = (fLV^2)/(D2g)$$

ซึ่งเป็นสมการของดาร์ซี-ไวส์แบค (Darcy - Weisback equation) มาใช้ได้ โดยที่ค่า f เป็นตัวประกอบของความเสียดทาน (friction factor) เนื่องจากการไหลของน้ำในท่อ ซึ่งจะได้มาจากการทดลอง และปริมาณไร้มิติที่เกี่ยวข้องกับการไหลในท่ออีกตัวหนึ่ง คือ ปริมาณเรย์โนลด์ นัมเบอร์ (Reynolds number) ซึ่งโดยการไหลทั่วๆ ไปในท่อแล้ว ปริมาณไร้มิติ เรย์โนลด์ นัมเบอร์ นี้จะเป็นตัวชี้ว่าการไหลในท่อขณะนั้นเป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) หรือไม่ หรือการไหลเป็นแบบอื่น ซึ่งโดยปกติแล้วที่ค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ประมาณน้อยกว่า 2,000 ลงมาการไหลในท่อจะเป็นแบบราบเรียบ แต่ถ้าเรย์โนลด์ นัมเบอร์มีค่าเกิน 2,000 ขึ้นไปการไหลอาจจะยังคงเป็นแบบราบเรียบอยู่ หรืออาจจะเริ่มสูญเสียความราบเรียบไป ลักษณะการไหลอาจจะเริ่มเปลี่ยนเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) ซึ่งในช่วงการไหลนี้ลักษณะการไหลอาจจะไม่เสถียร (unstable) นั่นคือ อาจจะขึ้นกับเวลาด้วย (unsteady) สำหรับการไหลเป็นแบบปั่นป่วนเต็มที่ และมีเสถียรภาพดีแล้วนั้น อาจจะต้องการค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ ถึง 10,000 ขึ้นไป ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการทดลอง จึงถูกแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบความเสียดทาน และค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ หรืออาจกล่าวได้ว่าคล้ายคลึงกับกราฟของมูดี้ (moody diagram) เพื่อความสะดวกในการนิยามผลที่ได้

4.2.2 กรณีมีการถ่ายเทความร้อน

ในการทดลอง การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นเนื่องจาก อุณหภูมิผนังท่อมืดค่าสูงกว่าอุณหภูมิของน้ำในท่อ อุณหภูมิของน้ำซึ่งไหลเข้ามาในท่อทดสอบจะ เปลี่ยนแปลง ไปตลอดช่วงความยาวท่อทดสอบ เนื่องจากน้ำซึ่งไหลเข้ามา ได้ถูกกระทบจากอุณหภูมิผนังท่อมืดค่าสูงขึ้นอย่างทันทีทันใด เริ่มตั้งแต่ที่ปากทางเข้าของท่อทดสอบจนกระทั่งสิ้นสุดความยาวของท่อทดสอบ โดยอุณหภูมิผนังท่อมืดค่าคงที่ และมีค่าเท่ากันโดยตลอดทั้งท่อ ในกรณีเช่นนี้ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงไป ตัวแปรที่เกี่ยวข้องอาจจะประกอบไปด้วย

1. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อ (D)
2. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อความยาวของท่อ (L)
3. ความเร็วเฉลี่ยของน้ำในท่อ (V)

4. ความหนาแน่นของน้ำ (ρ)
5. ความหนืดไดนามิกของน้ำ (μ)
6. ความนำความร้อนของน้ำ (k)
7. ความร้อนจำเพาะของน้ำ (C_p)

ในการถ่ายเทความร้อน ความร้อนจะถูกถ่ายเทจากผนังท่อด้านในมายังน้ำซึ่งสัมผัสกับผนังท่อ เนื่องจากน้ำไม่มีการเปลี่ยนสถานะ ดังนั้นจะเห็นว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิของผนังท่อกับอุณหภูมิของน้ำในท่อ และพื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นจึงได้ความสัมพันธ์ว่า

$$Q = hA\Delta T$$

เมื่อ Q เป็นอัตราการถ่ายเทความร้อน, A เป็นพื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อนและ ΔT เป็นความแตกต่างของอุณหภูมิของผนังท่อกับน้ำ และสำหรับ h นั้นเป็นตัวประกอบซึ่งในกรณีนี้ถูกเรียกว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (heat-transfer coefficient) ซึ่งเป็นตัวประกอบที่สำคัญในกรณีที่มีการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนโดยบังคับ (forced convection) เมื่อพิจารณาถึง การถ่ายเทความร้อนโดยมวลแล้วจะ ได้ความสัมพันธ์ว่า

$$Q = \dot{m}C_p \Delta t$$

โดยที่ Q เป็นอัตราการถ่ายเทความร้อน, \dot{m} เป็นอัตราการไหลของมวลของน้ำ, C_p เป็นค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ และ Δt เป็นความแตกต่างของอุณหภูมิของน้ำขาเข้ากับอุณหภูมิของน้ำขาออก ซึ่งจะเห็นว่ามีความเกี่ยวข้องกับแตกต่างออกไป เพื่อให้ข้อมูลที่ได้รับการทดลองนี้สะดวกต่อการพิจารณา และครอบคลุมถึงในกรณีที่ตัวแปรที่มีค่าต่างออกไป จึงได้นำปริมาณไร้มิติมาใช้ โดยใช้ตัวเลข นัมเบอร์ (Nusselt number) ซึ่ง

$$Nu = hD/k$$

โดยที่ Nu เป็นตัวเลข นัมเบอร์, h เป็นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, D เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก และ k เป็นค่าความนำความร้อนของน้ำ และปริมาณไร้มิติที่มีความสำคัญในกรณีการถ่ายเทความร้อน เป็นแบบการพาความร้อนแบบบังคับ อีกตัวหนึ่งคือ กราตซ์ นัมเบอร์ (Graetz number) ซึ่ง

$$Gz = (RePrD)/L$$

โดยที่ Gz เป็นกราฟตซ์ นัมเบอร์ Re เป็นเรย์โนลด์ นัมเบอร์ (Reynolds number), Pr เป็นแพลนด์ นัมเบอร์ (Prandtl number), D เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อ และ L เป็นความยาวท่อ ในปริมาณกราฟตซ์ นัมเบอร์นี้ ประกอบไปด้วยปริมาณไร้มิติอีกสองตัวคือ เรย์โนลด์ นัมเบอร์ (Re) ซึ่ง $Re = (\rho v D)/\mu$ และแพลนด์

นัมเบอร์ (Pr) ซึ่ง $Pr = (C_p \mu) / k$ โดยที่ e เป็นความหนาแน่นของน้ำ, v เป็นความเร็วเฉลี่ยของน้ำในท่อ, μ เป็นความหนืดไดนามิกของน้ำ และ C_p เป็นความร้อนจำเพาะของน้ำ ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณไร้มิติเหล่านี้ครอบคลุมตัวแปรซึ่งเกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อน ในกรณีของการทดลองนี้ สำหรับข้อมูลซึ่งได้จากการทดลองนั้น ได้ถูกแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ y เมื่อ $y = f(Re, Pr, D/L)$

4.3 วิจารณ์

4.3.1 กรณีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

ในรูปที่ 4.1 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขนัมเบอร์ กับค่าเกรตซ์ นัมเบอร์ ที่ aspect ratio 0.25 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่างค่าซึ่งได้จากการทดลองกับค่าซึ่งได้จากการวิเคราะห์โดยทางทฤษฎี ซึ่งประกอบไปด้วยการวิเคราะห์ของ Dunwoody (1962), Rao et.al (1969), Schenk กับ Han (1967) และ James (1970) แต่เงื่อนไขของการวิเคราะห์จะมีข้อแตกต่างกับเงื่อนไขของการทดลองอยู่บ้าง

นั่นคือ ในการวิเคราะห์โดยทางทฤษฎีมีเงื่อนไขว่า รูปร่างของความเร็ว (velocity profile) ของน้ำในท่อ จะมีการพัฒนาเต็มที่แล้ว (fully developed flow) แต่ทางด้านอุณหภูมินั้นจะเป็นแบบทางเข้าความร้อน (thermal entrance) หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งว่าทางด้านอุณหภูมินั้นรูปร่างของอุณหภูมิ (temperature profile) กำลังเริ่มที่จะมีการพัฒนาในขณะที่รูปร่างของความเร็วมีการพัฒนาเต็มที่แล้ว (thermal entry length, fully developed velocity profile)

สำหรับในการทดลองมีเงื่อนไขว่า รูปร่างของความเร็ว และรูปร่างของอุณหภูมิมิมีการพัฒนาไปพร้อมๆ กัน (combine thermal and hydrodynamic entry length) โดยหน้าตัดของท่อจะเปลี่ยนจากสี่เหลี่ยมผืนผ้าหัดเล็กลง เป็นท่อหน้าตัดรูปวงรีซึ่งเป็นท่อทดสอบอย่างทันทีทันใด เนื่องจากต้องการที่จะรองรับกับอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนในทางปฏิบัติซึ่งเงื่อนไขจะเป็นแบบพัฒนาทั้งความเร็ว และอุณหภูมิไปพร้อมๆ กันมากกว่า แต่ในกรณีแบบนี้ไม่พบว่าได้มีการกระทำการวิเคราะห์โดยทางทฤษฎีไว้แต่อย่างใด ดังนั้นจึงได้เลือกเอางานวิจัยซึ่งมีการวิเคราะห์โดยทางทฤษฎีซึ่งมีความใกล้เคียงกับเงื่อนไขที่ต้องการที่สุดมาเปรียบเทียบ ซึ่งงานวิจัยที่มีการวิเคราะห์โดยทางทฤษฎีที่เลือกมาดังกล่าวเป็นการวิเคราะห์ในช่วงการไหลที่เป็นแบบราบเรียบ (laminar flow) ทั้งสิ้น ดังนั้นจึงทำการเปรียบเทียบได้เฉพาะในช่วง

การไหลเป็นแบบราบเรียบเท่านั้น

สำหรับรูปที่ 4.1 นี้จะเห็นว่าที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ น้อยกว่า 300 ลงมา ผลที่ได้จากการทดลองจะมีค่าต่ำลงมากกว่าผลทางทฤษฎี จะต่ำกว่าผลการวิเคราะห์ของ Dunwoody (1962) และของ Schenk กับ Han (1967) แต่มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ของ Rao et.al (1969) และ James (1970) ดังนั้นในช่วงเรย์โนลด์ นัมเบอร์ ต่ำกว่า 300 นี้ ในการหาสูตรเอมไพริคัล (empirical formula) จึงใช้แบบจำลอง $Nu = aGz^b$ โดยที่ a และ b เป็นค่าคงที่ซึ่งหาได้จากการทดลอง ซึ่งจากข้อมูลในการทดลองนี้จะได้ว่า $Nu = 0.12Gz^{1.05}$ ซึ่งหาได้โดยใช้วิธี least square

สำหรับที่ค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ มีค่าเกิน 300 ขึ้นไปจนถึงประมาณ 2,000 หรือ ค่าเกรตซ์ นัมเบอร์ มีค่าเกินประมาณ 8 ขึ้นไปจนถึงประมาณ 55 ผลที่ได้จากการทดลอง จะมีค่าสูงกว่าผลที่ได้โดยทางทฤษฎี และผลที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับการวิเคราะห์ของ Dunwoody (1962) ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการหาสูตรเอมไพริคัลจะเป็น $Nu = a + bGz$ โดยที่ a และ b เป็นค่าคงที่ซึ่งหาได้จากการทดลอง ซึ่งในการทดลองนี้จะได้ว่า $Nu = 5 + 0.11Gz$

ในช่วงค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ เกิน 2,000 ขึ้นไปนั้นอยู่ในช่วงทรานสิชัน (transition) ไปจนถึงช่วงไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) ได้เลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการหาสูตรเอมไพริคัลขึ้นมาอีกตัวหนึ่งนั่นคือ $Nu = aRe^b Pr^c$ โดยที่ a, b และ c เป็นค่าคงที่ซึ่งหาได้จากการทดลอง ในการทดลองนี้ได้ว่า $Nu = 0.39Re^{0.50} Pr^{-0.18}$

จากผลที่ได้จากการทดลองจะสังเกตเห็นได้ว่า ที่อุณหภูมิผนังท่อ $57^{\circ}C$ ค่านัสเซลท์ นัมเบอร์จะมีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ $52^{\circ}C$ และ $42^{\circ}C$ และที่อุณหภูมิ $52^{\circ}C$ ค่านัสเซลท์ นัมเบอร์ มีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ $42^{\circ}C$ โดยเฉพาะในช่วงเกรตซ์ นัมเบอร์ ประมาณ 20 ถึง ประมาณ 100 หรืออาจจะกล่าวได้ว่าที่อุณหภูมิผนังท่อสูงกว่า ค่านัสเซลท์ นัมเบอร์ที่ได้จะมีค่าสูงกว่าค่า นัสเซลท์ นัมเบอร์ที่ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งอาจจะเนื่องมาจากคุณสมบัติต่าง ๆ ของน้ำมีค่าเปลี่ยนแปลง เมื่ออุณหภูมิมีค่าแตกต่างกันออกไป

สำหรับที่ aspect ratio 0.5 ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่านัสเซลท์ นัมเบอร์ กับค่าเกรตซ์ นัมเบอร์ ความสัมพันธ์ที่ได้มีความคล้ายคลึงกับผลการทดลองที่ค่า aspect ratio 0.25 นั่นคือ ที่ค่า เกรตซ์ นัมเบอร์ มีค่าต่ำกว่า 10 ลงมาผลที่ได้จากการทดลอง จะมีค่าต่ำกว่าผลการวิเคราะห์โดยทางทฤษฎี และมีแนวโน้มที่จะเข้าใกล้ผลการวิเคราะห์ของ Rao et.al. (1969) และ James (1970) ซึ่งจะได้สูตรเอมไพริคัลว่า

$$Nu = 0.38Gz^{1.09}$$

สำหรับที่ค่า เกรตซ์ นัมเบอร์สูงกว่า 10 ขึ้นไป หรือค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์มีค่าประมาณ 400 ขึ้นไปจนถึงค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ ประมาณ 2,000 หรือที่ค่า เกรตซ์ นัมเบอร์ ประมาณ 60 ผลการทดลองมีค่าสูงกว่าผลซึ่งได้จากการวิเคราะห์โดยทางทฤษฎี และสามารถหาสูตรเอมไพริคัลได้ว่า $Nu = 5 + 0.13Gz$

ที่ค่าเกรตซ์ นัมเบอร์ เกินประมาณ 60 ขึ้นไป หรือค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ มีค่าเกิน 2,000 ขึ้นไป จะได้สูตรเอมไพริคัลว่า $Nu = 0.24Re^{0.59}Pr^{-0.21}$ และจะเห็นว่าที่อุณหภูมิผนังท่อที่มีค่าสูง ค่านัสเซลท์ นัมเบอร์ที่ได้จะมีแนวโน้มว่ามีค่าสูงกว่าค่า นัสเซลท์ นัมเบอร์ ที่อุณหภูมิผนังท่อที่มีค่าต่ำกว่า และจากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าที่ช่วงการไหลเป็นแบบราบเรียบ ค่านัสเซลท์ นัมเบอร์ ของทั้งท่อค่า aspect ratio 0.5 มีค่าไม่ต่างกันมากนักแต่ที่ช่วงเรย์โนลด์ นัมเบอร์ ใกล้จะ 2,000 ขึ้นไปปรากฏว่าค่านัสเซลท์ นัมเบอร์ของท่อ aspect ratio 0.5 จะมีค่าสูงกว่าค่านัสเซลท์ นัมเบอร์ของท่อ aspect ratio 0.25 ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นเนื่องมาจากผลของความปั่นป่วนของน้ำในท่อก็ได้ และท่อที่ aspect ratio 0.5 จะมีผลกระทบจากความปั่นป่วนของน้ำมากกว่าท่อ aspect ratio 0.25

4.3.2 กรณีตัวประกอบความเสียดทาน

ในรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 นั้นได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในท่อ (friction factor, f) กับค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ (Re) โดยแสดงผลที่ได้จากการทดลอง เปรียบเทียบกับผลจากการวิเคราะห์โดยทางทฤษฎีของ Bhatti (1983) ในรูปที่ 4.3 นั้นได้แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของท่อ aspect ratio 0.25 ตั้งแต่ที่การไหลเป็นแบบราบเรียบไปจนกระทั่งการไหลเป็นแบบปั่นป่วน หรือที่ค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ ประมาณ 20,000 และประกอบไปด้วยการทดลอง 4 กรณี คือ การทดลองในกรณีที่อุณหภูมิของผนังท่อ และอุณหภูมิของน้ำมีค่าเท่ากัน คือ มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง (ประมาณ 29 °C) การทดลองในกรณีที่อุณหภูมิของผนังท่อมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของน้ำ คืออุณหภูมิของผนังท่อเป็น 42 °C, 52 °C และ 57 °C ซึ่งจากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าผลที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยทางทฤษฎี และจากกราฟจะเห็นว่าจุดเปลี่ยนโค้งของกราฟ หรือจุด critical Reynolds number นั้นอยู่ที่ประมาณค่า Reynolds number 2,000 นั่นคือ ที่เรย์โนลด์ นัมเบอร์ ประมาณ 2,000 การไหลจะไม่เป็นแบบราบเรียบอีกต่อไปเมื่อถึงถึงอิทธิพลของอุณหภูมิของผนังท่อที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานนั้น จะเห็น

ว่าที่อุณหภูมิผนังท่อ เท่ากับอุณหภูมิห้อง และ เท่ากับอุณหภูมิของน้ำนั้นเมื่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงที่สุด และรองลงมาเป็นที่อุณหภูมิผนังท่อ 42°C , 52°C และ 57°C ตามลำดับ

ผลที่ได้นี้ปรากฏว่าตรงกับงานวิจัยของ Sieder and Tate (1936) ซึ่งได้เสนอว่า ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิ์ความเสียดทาน ของการไหลของน้ำมันในท่อกลมจะมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำมันมีค่าสูงขึ้นหรือเมื่อความหนืดของน้ำมันมีค่าลดลง ซึ่งแสดงในรูปสูตรเอมไพริกัลได้ว่า $f/f_{100} = 1.1(\mu_b/\mu_w)^{-0.25}$ ที่เรย์โนลด์ นัมเบอร์ ต่ำกว่า 2,100 และ $f/f_{100} = 1.02(\mu_b/\mu_w)^{-0.14}$ ที่เรย์โนลด์ นัมเบอร์ สูงกว่า 2,100 ขึ้นไป โดยที่ f คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่อุณหภูมิใด ๆ f_{100} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่อุณหภูมิของน้ำมันมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของผนังท่อ μ_b คือ ค่าความหนืดของน้ำมันที่อุณหภูมิเฉลี่ย และ μ_w คือ ค่าความหนืดของน้ำมันที่อุณหภูมิผนังท่อ

และที่ค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ เกิน 2,000 ขึ้นไป จะสังเกตไม่ได้แน่ชัดว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีความแตกต่างกันอย่างไร ซึ่งอาจจะเป็นเพราะว่าน้ำในท่อเริ่มที่จะเกิดการปั่นป่วนขึ้น ผลของความปั่นป่วนที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีมากกว่าผลเนื่องจากอุณหภูมิ ซึ่งที่ค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ ต่ำกว่า 2,000 ลงไป หรือการไหลเป็นแบบราบเรียบนั้น เมื่ออุณหภูมิผนังท่อมีค่าสูงขึ้นจะทำให้อุณหภูมิของน้ำมีค่าสูงขึ้นด้วย ซึ่งทำให้ค่าความหนืดของน้ำมีค่าลดลง จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิผนังท่อมีค่าสูงขึ้น ในการวิเคราะห์โดยทางทฤษฎีนั้น ได้มีเงื่อนไขว่า รูปร่างของความเร็วน้ำที่ปากทางเข้าของท่อเป็นแบบสม่ำเสมอ แต่ในการทดลองนี้ที่ปากทางเข้าของท่อทดสอบ เป็นส่วนที่ต่อออกมาจากท่อหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งอาจจะทำให้รูปร่างของความเร็วน้ำที่ปากทางเข้าของท่อทดสอบมีค่าไม่สม่ำเสมอ และอาจจะเนื่องจากการถูกรบกวนจากปากทางออกของท่อด้วย จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าสูงกว่า ผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยทางทฤษฎี

สำหรับในรูปที่ 4.4. ก็เช่นเดียวกันได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ ซึ่งผลที่ได้คล้ายคลึงกับรูปที่ 4.3 เมื่อพิจารณารูปที่ 4.6 จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของท่อ aspect ratio 0.25 มีค่าสูงกว่าท่อ aspect ratio 0.5 เล็กน้อยซึ่งอาจจะเนื่องมาจากรูปร่างของหน้าตัดของท่อซึ่งท่อ aspect ratio 0.25 มีความรีมากกว่า จึงอาจจะทำให้มีความเสียดทานมากกว่าท่อ aspect ratio 0.5 ซึ่งมีความรีน้อยกว่า ซึ่งผลจากการวิเคราะห์โดยทางทฤษฎีก็แสดงให้เห็นว่าท่อ aspect ratio 0.25 มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน สูงกว่าท่อ aspect ratio 0.5 ที่การไหลเป็นแบบราบเรียบ



สำหรับในรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 นั้นได้แสดงถึงผลการทดลองกับสูตรเอมไพริคัล จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับเรย์โนลด์ นัมเบอร์ ซึ่งในรูปที่ 4.9 นั้นได้แสดงให้เห็นว่าที่ค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ ต่ำกว่า 2,000 ลงมา ที่อุณหภูมิห้องจะได้สูตรว่า $f = 564Re^{-1.30}$ ที่อุณหภูมิ 42 °C ได้สูตรว่า $f = 306Re^{-1.24}$ ที่ 52 °C ได้สูตรว่า $f = 95Re^{-1.07}$ และที่ 57 °C ได้สูตรว่า $f = 62Re^{-1.01}$

ที่ค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์เกิน 2,000 ขึ้นไปจะได้สูตรว่า $f = 0.24Re^{-0.17}$ สำหรับในรูปที่ 4.10 ก็เช่นเดียวกันได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ โดยแสดงถึงผลการทดลอง และสูตรเอมไพริคัลโดยที่ค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ มีค่าต่ำกว่า 2,000 ลงมาที่อุณหภูมิห้องได้สูตรว่า $f = 118Re^{-1.05}$ ที่อุณหภูมิผนังท่อ 42 °C ได้สูตรว่า $f = 137Re^{-1.14}$ ที่อุณหภูมิ 52 °C จะได้สูตรว่า $f = 567Re^{-1.35}$ และที่อุณหภูมิ 57 °C จะได้สูตรว่า $f = 685Re^{-0.17}$ ที่ค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ มากกว่า 2,000 ขึ้นไปจะได้สูตรว่า $f = 0.24Re^{-0.17}$ สำหรับในรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 ก็เช่นเดียวกันได้แสดงความสัมพันธ์ของค่าไนส์เชลท์ นัมเบอร์กับค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ โดยแสดงผลที่ได้จากการทดลองและสูตรซึ่งหาได้จากการทดลอง โดยรูปที่ 4.8 แสดงที่ท่อ aspect ratio เป็น 0.5 และรูปที่ 4.7 แสดงที่ท่อ aspect ratio เป็น 0.25

4.4 สรุป

ผลที่ได้จากการทดลอง ทั้งในกรณีมีการถ่ายเทความร้อน และในกรณีที่ไม่มี การถ่ายเทความร้อน มีความใกล้เคียงกับผลของการวิเคราะห์โดยทางทฤษฎี และมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ผลที่ได้จากการทดลองสามารถรวบรวมเป็นสูตรเอมไพริคัลได้ดังนี้

$$\text{ที่ } \underline{\text{aspect ratio} = 0.25}$$

$$Nu = 0.12Gz^{1.6}$$

$$R^2 = 0.98$$

$$Nu = 5 + 0.11Gz$$

$$R^2 = 0.74$$

$$\text{ที่ } Gz < 10$$

$$\text{ที่ } 10 < Gz < 60$$

$$\text{Nu} = 0.39\text{Re}^{0.5}\text{Pr}^{-0.18} \quad \text{ที่} \quad \text{Gz} > 60$$

$$R^2 = 0.34$$

$$\text{ที่} \quad \text{Re} < 2,000$$

$$f = 564\text{Re}^{-1.30} \quad \text{ที่} \quad \text{Tw} = 29^\circ\text{C}$$

$$R^2 = 0.99$$

$$f = 306\text{Re}^{-1.2} \quad \text{ที่} \quad \text{Tw} = 42^\circ\text{C}$$

$$R^2 = 0.99$$

$$f = 95\text{Re}^{-1.07} \quad \text{ที่} \quad \text{Tw} = 52^\circ\text{C}$$

$$R^2 = 0.99$$

$$f = 62\text{Re}^{-1.01} \quad \text{ที่} \quad \text{Tw} = 57^\circ\text{C}$$

$$R^2 = 0.98$$

$$\text{ที่} \quad \text{Re} > 2000$$

$$f = 0.11\text{Re}^{-0.13}$$

$$R^2 = .41$$

$$\text{ที่} \quad \text{aspect ratio} = 0.5$$

$$\text{Nu} = 0.38\text{Gz}^{1.1} \quad \text{ที่} \quad \text{Gz} < 10$$

$$R^2 = 0.99$$

$$\text{Nu} = 5.9 + 0.13\text{Gz} \quad \text{ที่} \quad 10 < \text{Gz} < 60$$

$$R^2 = 0.56$$

$$\text{Nu} = 0.24\text{Re}^{0.59}\text{Pr}^{-0.21} \quad \text{ที่} \quad 60 < \text{Gz}$$

$$R^2 = 0.98$$

$$\text{ที่} \quad \text{Re} < 2,000$$

$$f = 118\text{Re}^{-1.05} \quad \text{ที่} \quad \text{Tw} = 29^\circ\text{C}$$

$$R^2 = 0.99$$

$$f = 137Re^{-1.1} \quad \text{ที่} \quad T_w = 42^\circ\text{C}$$

$$R^2 = 0.99$$

$$f = 567Re^{-1.3} \quad \text{ที่} \quad T_w = 52^\circ\text{C}$$

$$R^2 = 0.84$$

$$f = 685Re^{-1.4} \quad \text{ที่} \quad T_w = 57^\circ\text{C}$$

$$R^2 = 0.99$$

$$\text{ที่ } Re > 2,000$$

$$f = 0.24Re^{-1.7}$$

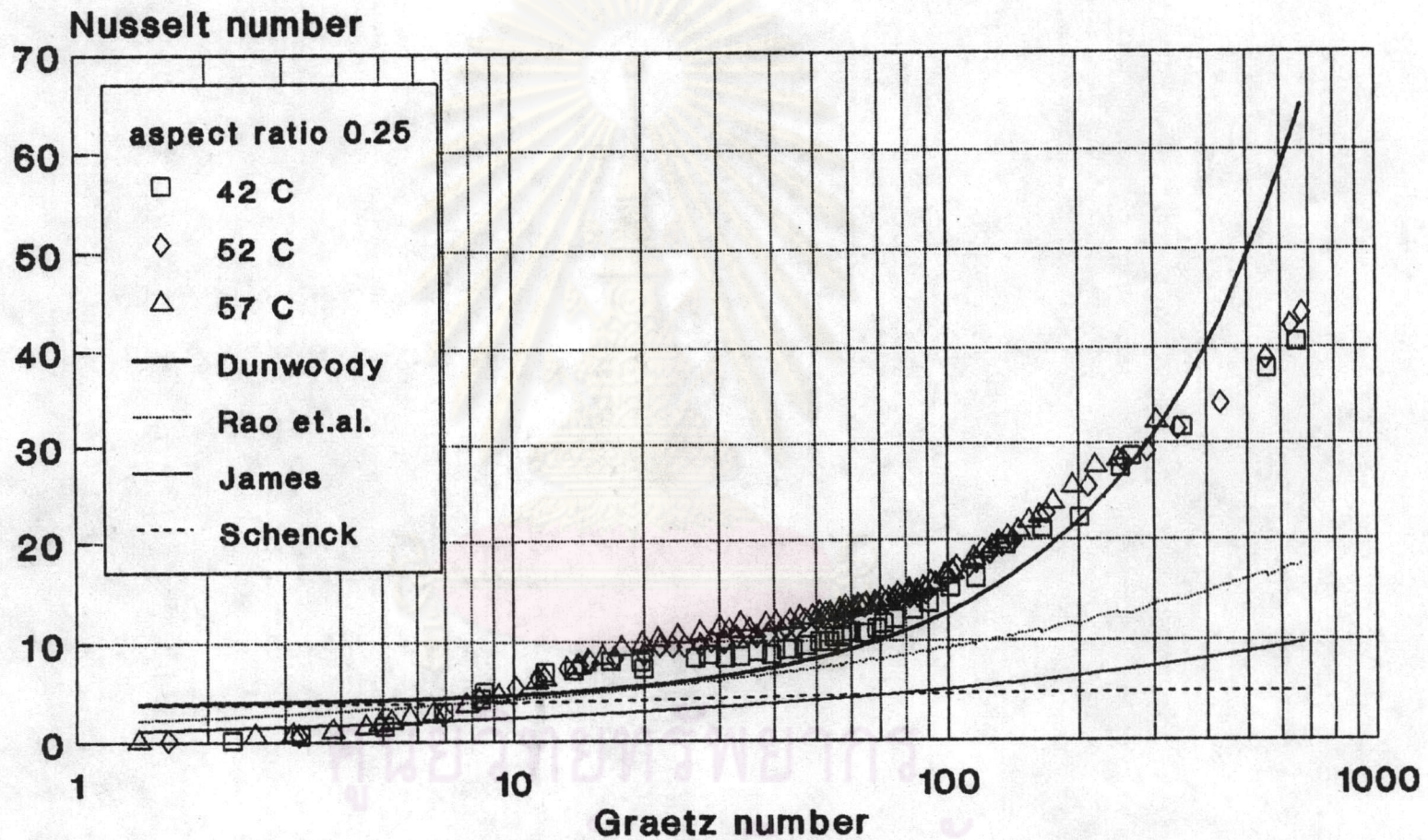
$$R^2 = 0.85$$

โดยที่ R คือ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) ของสูตรเอมไพริคัล กับ ข้อมูลการทดลองซึ่งถูกทำ curve fitting (Walpole and Myers, 1978)

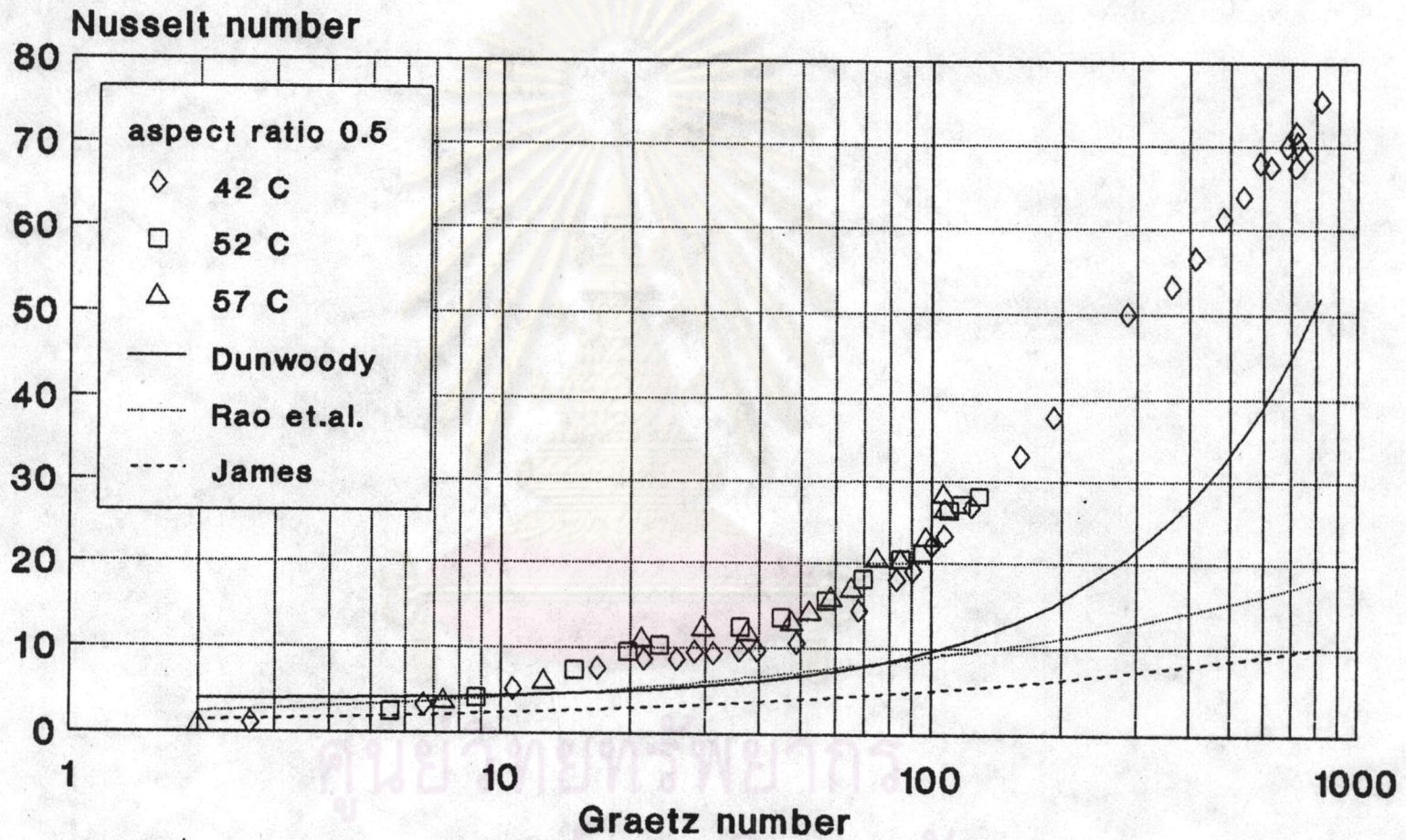
4.5 ข้อเสนอแนะ

หากจะมีการทำการวิจัยในเรื่องนี้ต่อไป ควรจะพิจารณา ดังนี้

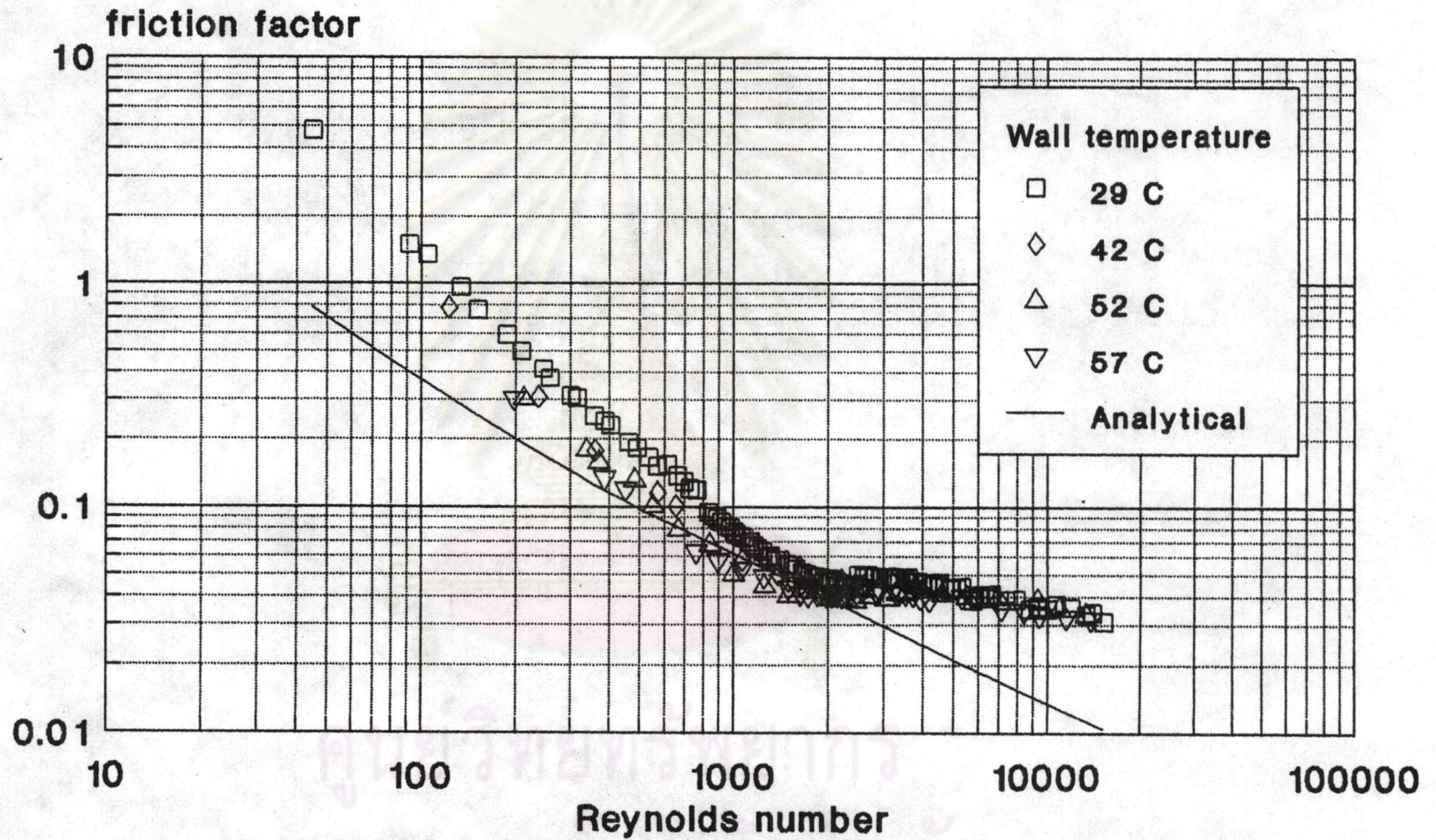
1. ทำการทดลองที่อุณหภูมิผนังที่มีค่าสูงขึ้นไปอีก
2. ทำการทดลองในกรณีที่อุณหภูมิของผนังที่มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของของไหลในท่อ หรือเรียกว่าเป็นการทำความเย็น (cooling)
3. เปลี่ยนของไหลเป็นของไหลชนิดอื่น เช่น อากาศ น้ำมัน หรือ ปรอท
4. ทำการทดลองในกรณีที่ heat flux มีค่าคงที่
5. เปลี่ยนความยาวของท่อหลาย ๆ ค่า เพื่อสังเกตถึงผลกระทบของอิทธิพลของปากทางเข้า
6. ทำการทดลองในกรณีการไหลเป็นแบบพัฒนาเต็มที่แล้ว ทั้งรูปร่างความเร็ว และรูปร่างอุณหภูมิ
7. ทำการวิเคราะห์โดยทางทฤษฎีที่เงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ต่าง ๆ โดยใช้วิธีวิเคราะห์ที่มีความแตกต่างออกไป



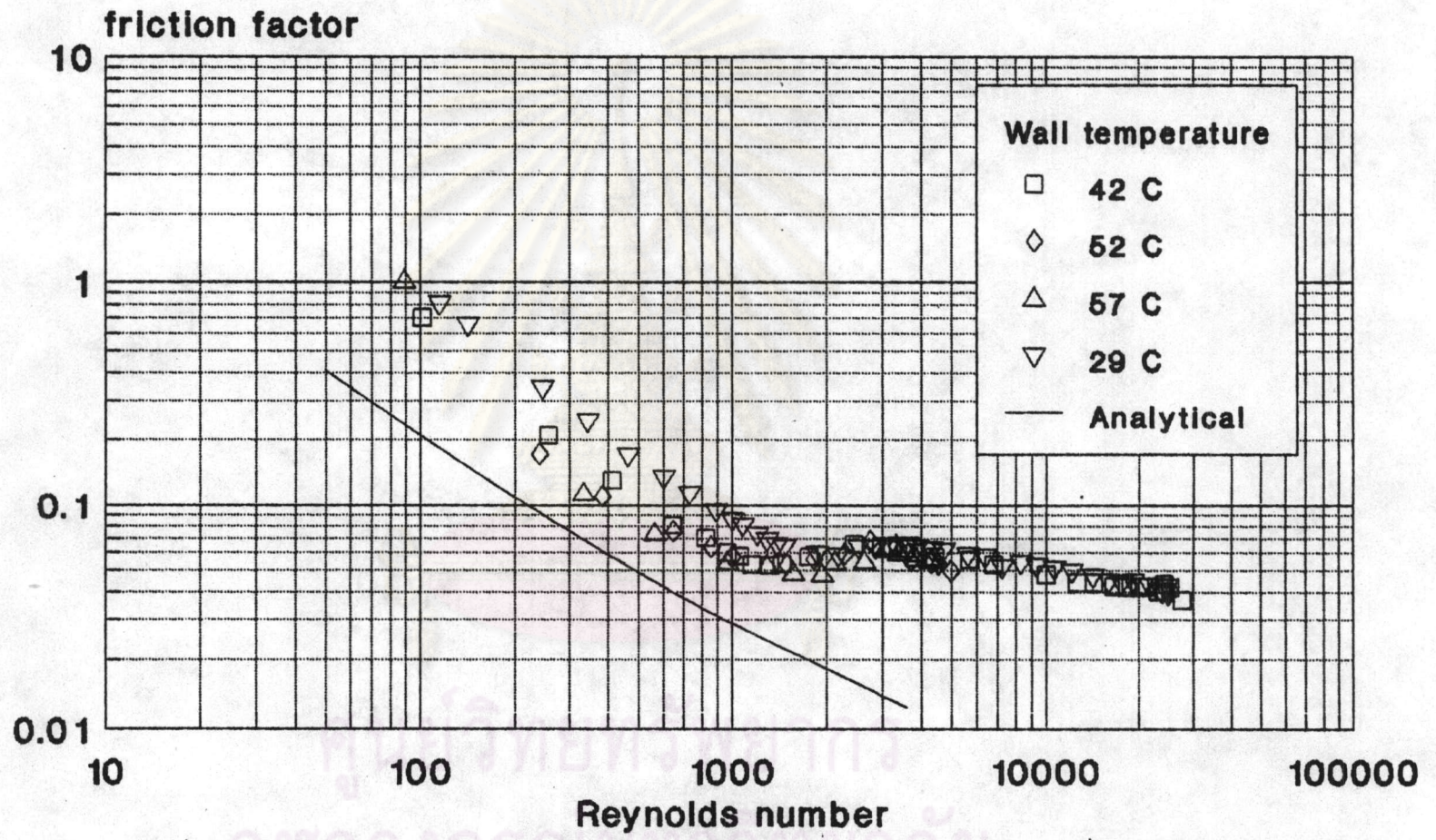
รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Nusselt number กับ Graetz number ที่ aspect ratio 0.25



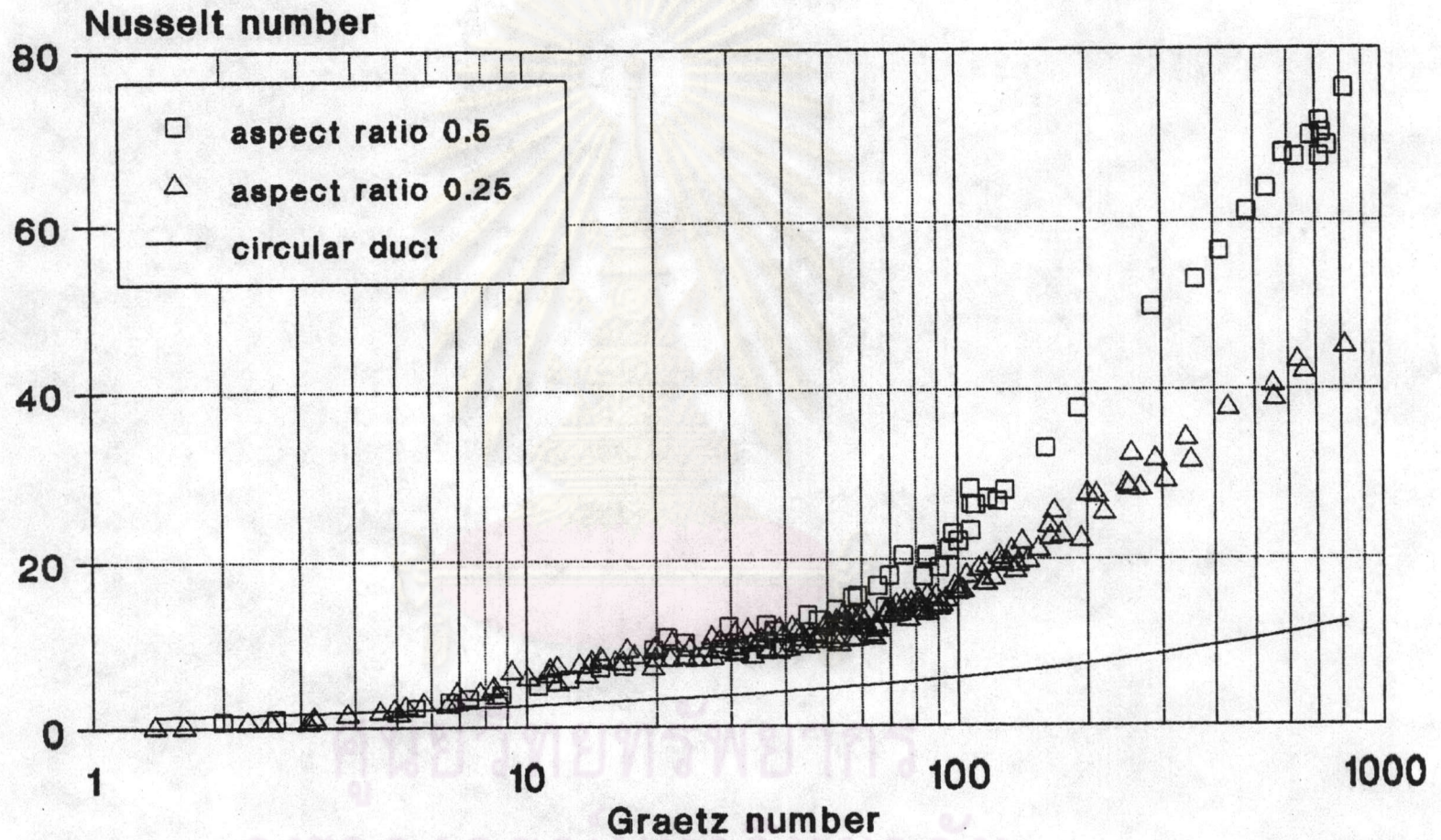
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Nusselt number กับ Graetz number ที่ aspect ratio 0.5



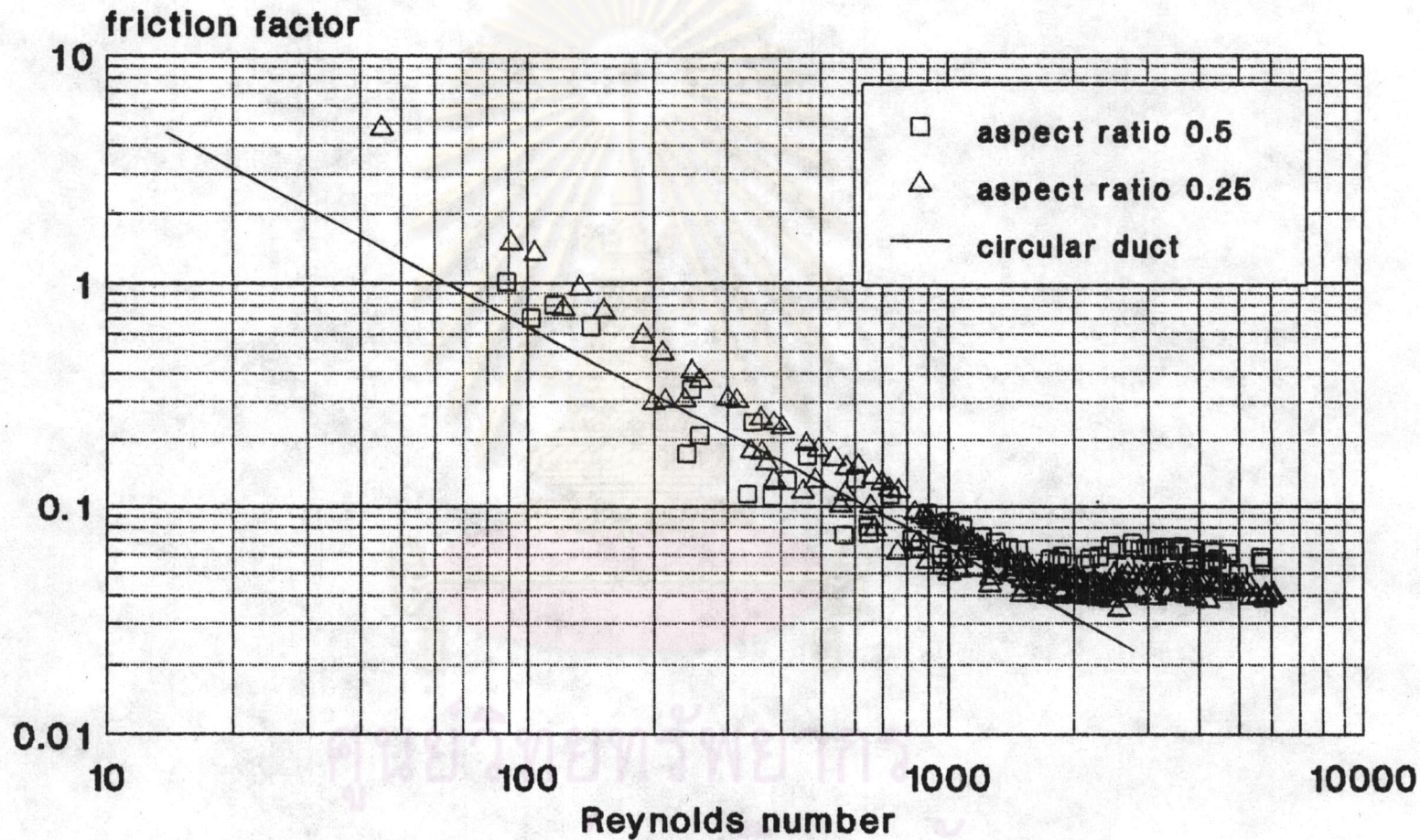
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง friction factor กับ Reynolds number ที่ aspect ratio 0.25



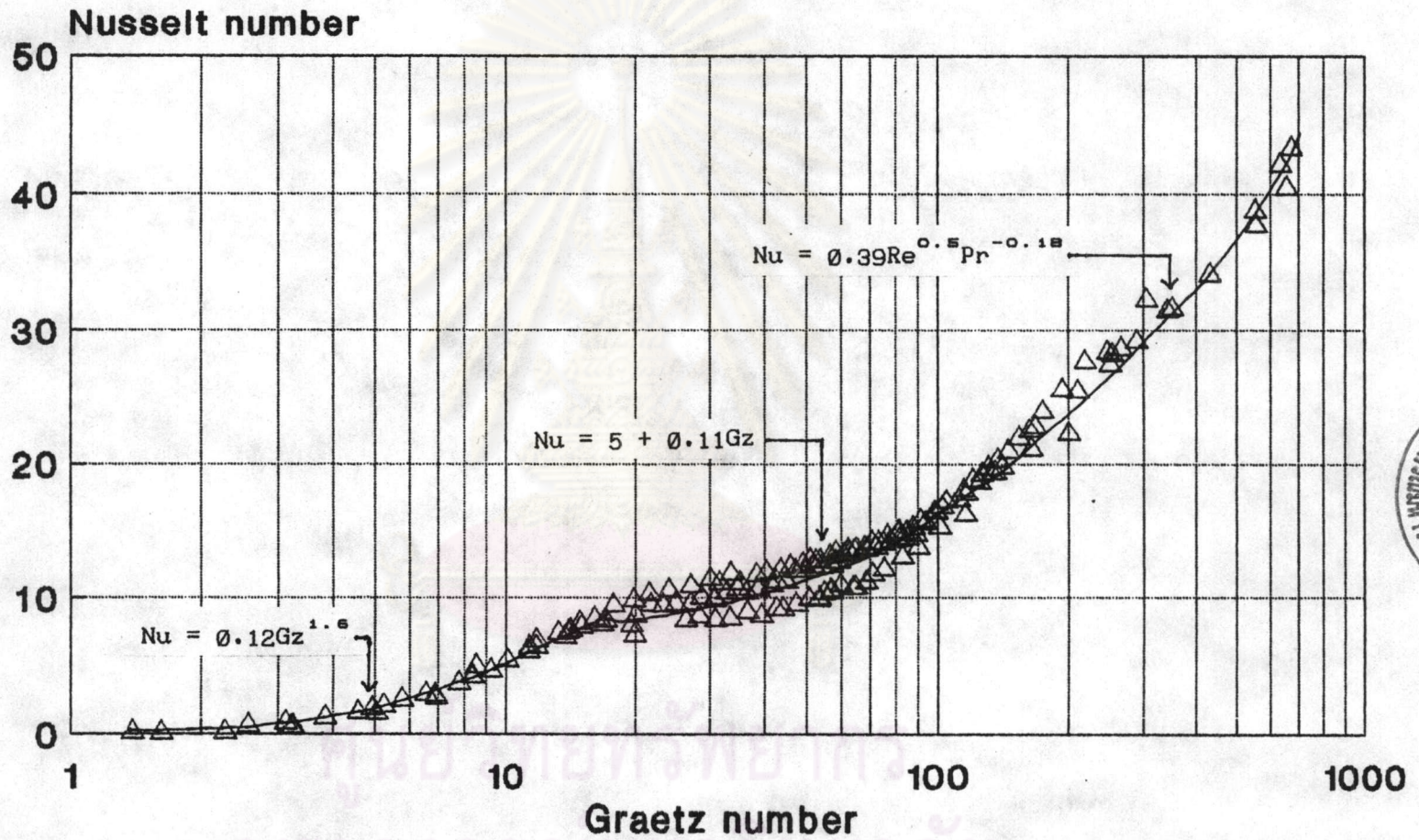
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง friction factor กับ Reynolds number ที่ aspect ratio 0.5



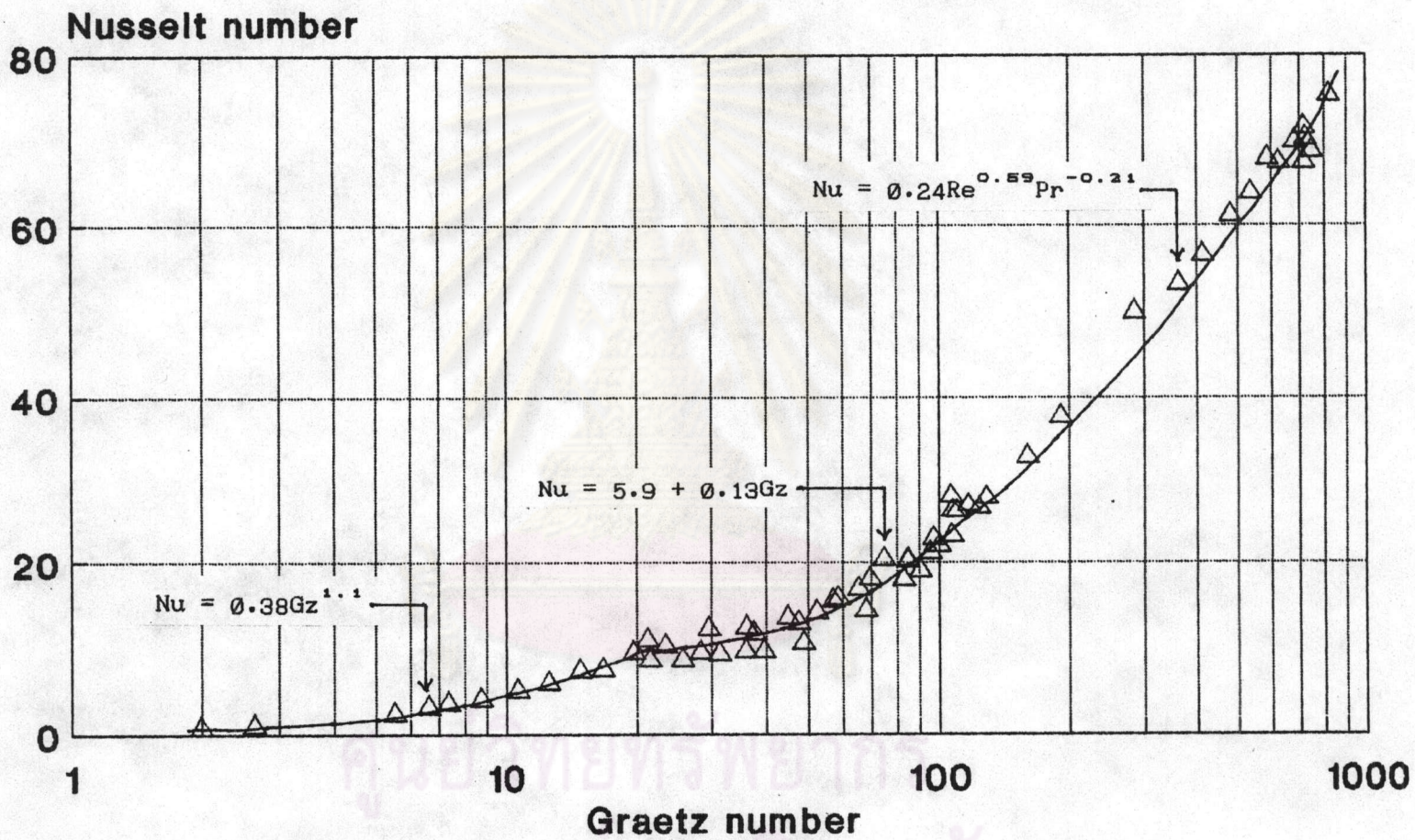
รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบค่า Nusselt number ของท่อวงรีกับท่อกลม (Hornbeck, 1965)



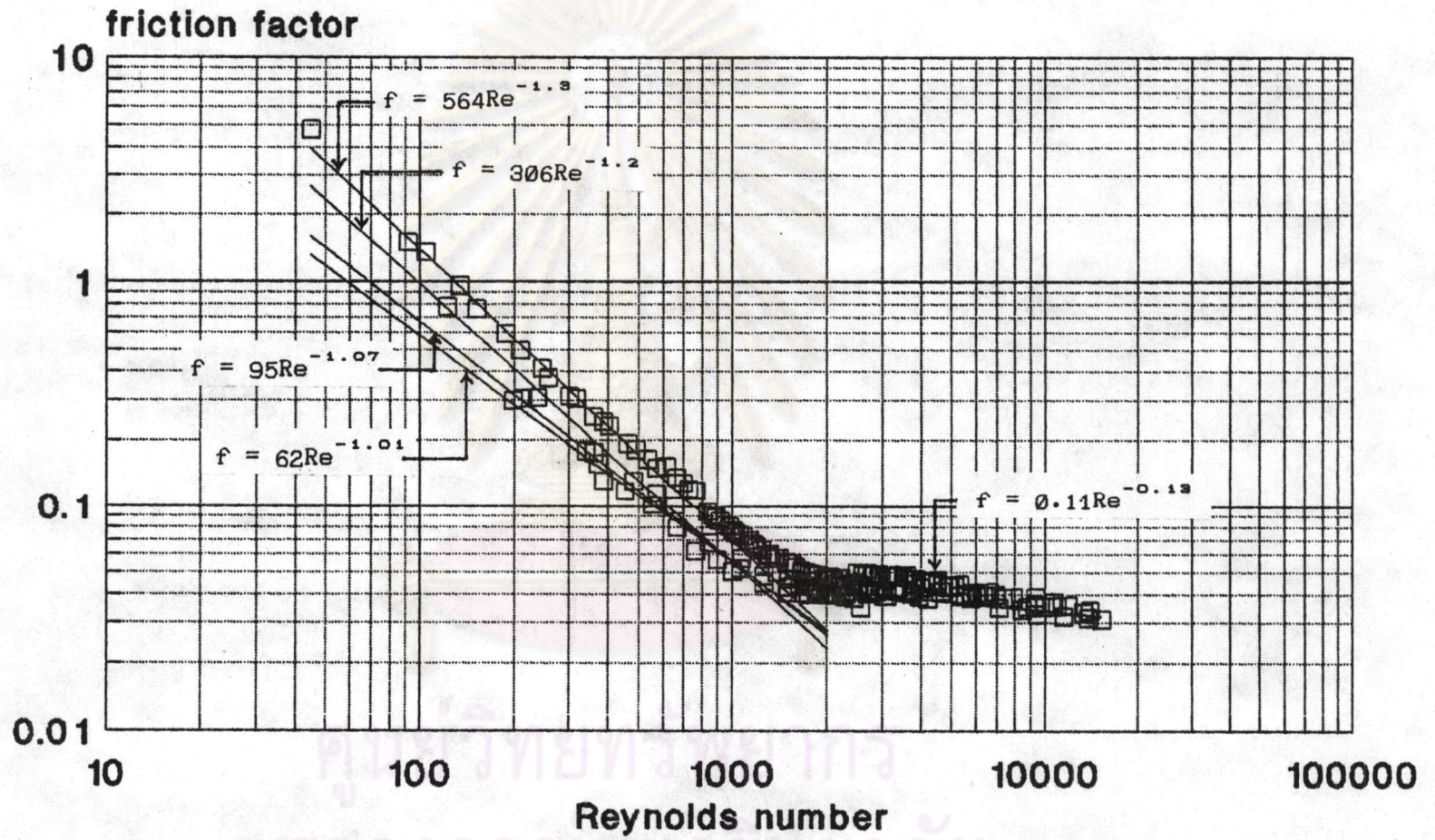
รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบค่า friction factor ของท่อวงรีกับท่อกลม



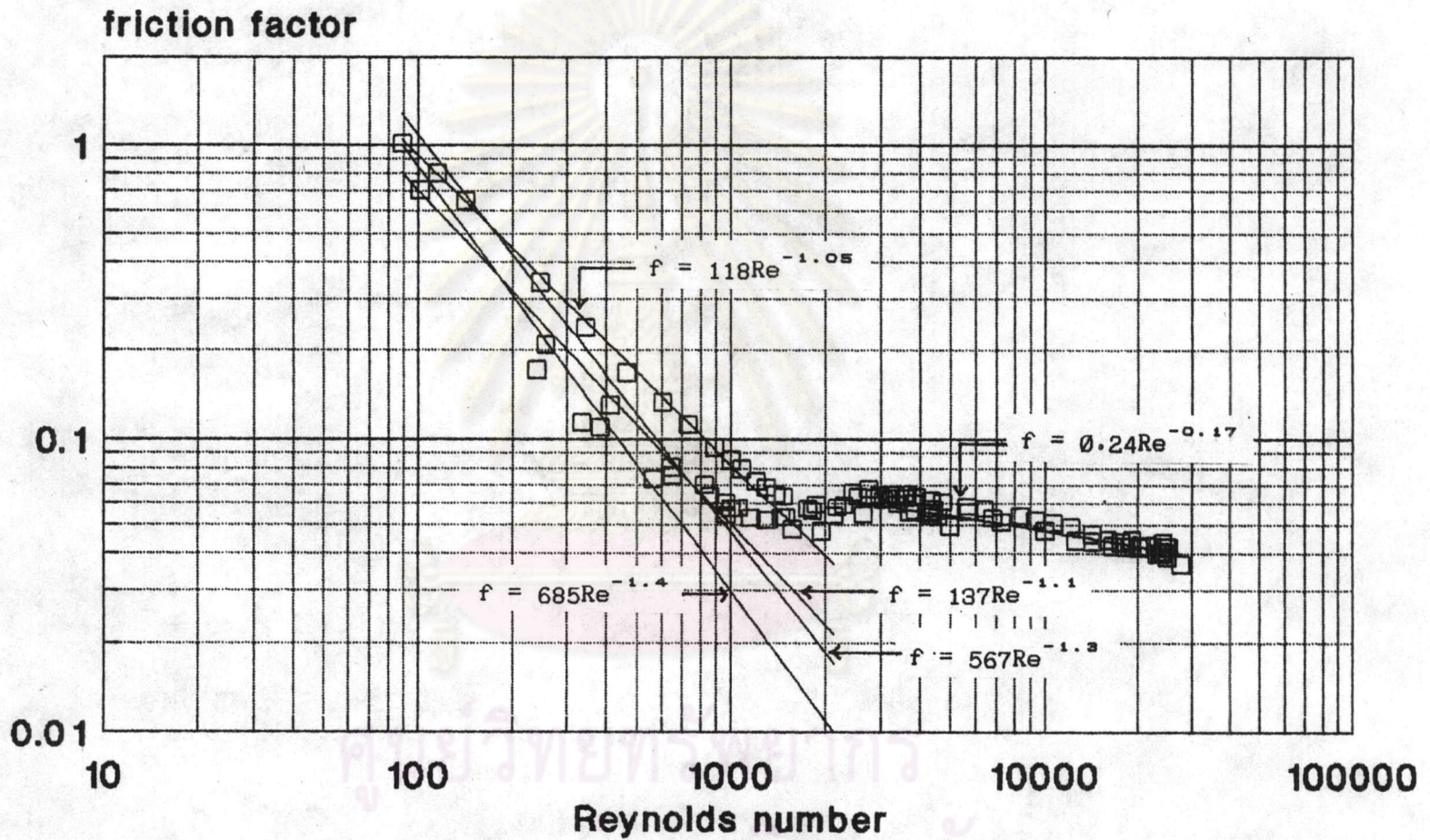
รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบระหว่างสูตรเอมไพริคัลกับข้อมูลการทดลองที่ aspect ratio 0.25



รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบระหว่างสูตรเอมไพริคัลกับข้อมูลการทดลองที่ aspect ratio 0.5



รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบระหว่างสูตรเอมไพริคัลกับข้อมูลการทดลองที่ aspect ratio 0.25



รูปที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบระหว่างสูตรเอมไพริคัลกับข้อมูลการทดลองที่ aspect ratio 0.5