บทที่ 5

ผลการวิจัย

การศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการพาความร้อนแบบบังคับในท่อสามเหลี่ยมซึ่งมีการไหลเป็นแบบปั่นป่วน (Turbulent) ในช่วงที่มีการแจกแจงรูปร่างของความเร็วและอุณหภูมิกำลังเปลี่ยนรูปไปพร้อมๆ กัน (Simultaneously Developing Velocity and Temperature Profiles) ที่สภาวะของขอบเขตความร้อน (Thermal Boundary Condition) เป็นแบบการให้ความร้อนต่อพื้นที่ผิวคงที่ (Constant Heat Flux) โดยใช้อากาศเป็นของไหล และ ค่า Re ที่ทำการทดลองอยู่ในช่วงประมาณ 10,000 ถึง 35,000 ซึ่งมีผลของการแจกแจงรูปร่างของความเร็วและอุณหภูมิกำลังเปลี่ยนรูปไปพร้อมๆ กัน จากปากทางเข้าท่อในช่วงที่มีอัตราส่วนของความยาวท่อต่อเส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิค L/D_h ประมาณ 6.9 ถึง 9.5 โดยที่ที่ใช้ทดสอบมีค่า L/D_h ประมาณ 30.

5.1 ผลการทดลอง

ผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ในรูปของกราฟตั้งแต่รูปที่ 5.1 ถึง 5.8 โดยกราฟแต่ละรูปจะแสดงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อค่านัสเซลท์นัมเบอร์เฉลี่ย Nu_l สำหรับข้อมูลที่ได้จากการทดลองและผลการทดลองจะแสดงอยู่ในภาคผนวก ก. และตัวอย่างการคำนวณแสดงอยู่ในภาคผนวก ข.

5.1.1 อิทธิพลของเรย์โนลด์สนัมเบอร์

จากรูปที่ 5.1 และ 5.2 เป็นรูปที่ได้จากการพล็อตค่าของเรย์โนลด์สนัมเบอร์ Re กับค่าเฉลี่ยของนัสเซลท์นัมเบอร์ Nu_l ณ ตำแหน่งต่างๆ ของท่อ โดยใช้มาตราส่วนแบบ ล็อก-ล็อก จากรูปพบว่ากราฟแต่ละเส้นมีลักษณะขนานกัน โดยค่าของ Nu_l จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อ Re สูงขึ้น ซึ่งมีลักษณะเป็นไปตามสมการโดยทั่วไป คือ $Nu = cRe^m Pr^n$ โดยค่า c,m,n เป็นค่าคงที่และค่า Pr ของอากาศเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นค่าของ Nu_l จึงแปรผันตามค่า Re และจากกราฟยังพบว่าเมื่อพิจารณาที่ค่า Re คงที่ค่าหนึ่งท่อที่มีความสั้นกว่าจะมีค่า Nu_l สูงกว่าซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพล

ทางเข้า เมื่อท่อมีความยาวมากขึ้นผลของปากทางเข้าจะมีอิทธิพลต่อค่า Nu_l น้อยลงไปเรื่อยๆ โดยจะมีค่าเข้าไปใกล้กับค่า Nu_∞ ที่ได้จากสมการของ Disstus และ Boelter [8]

$$Nu_\infty = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \tag{5.1}$$

สำหรับสมการของ Disstus และ Boelter [8] นี้ เป็นสมการที่ใช้กับท่อกลมที่ของไหลภายในท่อมีการแจกแจงรูปร่างของความเร็วและอุณหภูมิมีการพัฒนาแล้ว (Fully developed thermal and velocity region) นั่นคือผลจากปากทางเข้ามีค่าน้อยมากโดยท่อที่ถือว่าใช้สมการนี้ได้คือท่อที่มีความยาวเป็น 200 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ ซึ่งได้พิสูจน์แล้วจากสมการที่ (2.4) ของ Nusselt [11] เมื่อค่า L/D มีค่าประมาณ 200 ค่าของตัวคูณ $(D/L)^{0.054}$ จะมีค่าประมาณ 0.75 ทำให้สมการสามารถเขียนเป็น $Nu = 0.024 Re^{0.8} Pr^{0.37}$ ซึ่งจะเห็นว่าเป็นสมการที่มีความใกล้เคียงกับสมการของ Disstus และ Boelter [8] มาก ดังนั้นเราจะถือว่าปากทางเข้าจะไม่มีผลต่อค่านัสเซลท์นัมเบอร์เมื่อค่า L/D มีค่ามากกว่า 200 สำหรับในท่อกลม

5.1.2 อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างความยาวท่อต่อเส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิค

จากรูปที่ 5.3 และ 5.4 เป็นรูปที่ได้จากการพล็อตค่าของอัตราส่วนของความยาวท่อต่อเส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิค โดยใช้มาตราส่วนแบบ ล็อก-ล็อก พบว่าเมื่อค่า Re คงที่ค่าหนึ่ง พบว่าเมื่อค่า L/D_h มีค่ามากขึ้นแล้วค่า Nu_l จะมีค่าลดลง นั่นคืออิทธิพลจากปากทางเข้าจะมีค่าลดลงเมื่อท่อมีความยาวมากขึ้น

5.2 สมการเอมไพริคัล

จากกราฟรูปที่ 5.5 และ 5.6 เป็นรูปที่ได้จากการพล็อตค่าของ Nu_l / Nu_∞ กับค่า L/D_h จากเส้นกราฟจะเห็นว่าค่าของ Nu_l จะมีค่าสูงเมื่อ L/D_h มีค่าน้อย และค่าของ Nu_l จะมีค่าลดลงเรื่อยๆ เมื่อท่อมีความยาวมากขึ้น โดยจะมีลักษณะเป็นเช่นนี้ทั้งในท่อสามเหลี่ยมด้านเท่าและในท่อสามเหลี่ยมมุมฉาก สำหรับสมการเอมไพริคัลที่จะหาไว้ใช้งานต่อไปนั้นสามารถหาได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธี Least Square สมการที่จะใช้ในการวิเคราะห์มีรูปแบบดังนี้

$$\frac{Nu_l}{Nu_\infty} = C Re^m (L/D_h)^p \tag{5.2}$$

สำหรับท่อสามเหลี่ยมด้านเท่าใช้กราฟในรูปที่ 5.5 มาทำการวิเคราะห์ โดยยึดสมการในการวิเคราะห์ด้วยวิธี Least Square เพื่อหาค่า C, m และ p ได้เป็นสมการดังนี้

$$\frac{Nu_l}{Nu_\infty} = 3.48Re^{-0.034}(L/D_h)^{-0.20} \qquad (5.3)$$

สมการ (5.3) เป็นสมการที่ใช้หาค่า Nu_l สำหรับท่อสามเหลี่ยม โดยใช้เส้นผ่าศูนย์กลางไฮโดรลิคแทนเส้นผ่าศูนย์กลางของวงกลมเพื่อหาค่า Nu_∞ และค่าสหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient, r^2) ของสมการ (5.3) มีค่าเท่ากับ 0.949 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีความสอดคล้องกับสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ และเมื่อลองพิจารณาที่ค่า L/D_h เท่ากับ 80 เราจะได้สมการของค่านัสเซลท์นัมเบอร์เป็น $Nu_l = 1.059Nu_\infty - 1.015Nu_\infty$ สำหรับการไหลในช่วงที่ Re ประมาณ 10,000 ถึง 35,000 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าใกล้เคียงกับค่านัสเซลท์นัมเบอร์ของ Disstus และ Boelter [8] มาก หรือกล่าวได้ว่าสำหรับท่อสามเหลี่ยมด้านเท่าอิทธิพลของปากทางเข้ามีค่าน้อยมากเมื่อท่อมีความยาวมากกว่า 80 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ

สำหรับท่อสามเหลี่ยมมุมฉากจะใช้กราฟรูปที่ 5.6 มาทำการวิเคราะห์ โดยใช้สมการ (5.2) จะได้สมการเอมไพริคัลเป็น

$$\frac{Nu_l}{Nu_\infty} = 4.37Re^{-0.066}(L/D_h)^{-0.17} \qquad (5.4)$$

และค่าสหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient, r^2) ของสมการ (5.4) มีค่าเท่ากับ 0.926 และเมื่อพิจารณาที่ L/D_h เท่ากับ 80 เราจะได้สมการของค่านัสเซลท์นัมเบอร์เป็น $Nu_l = 1.129Nu_\infty - 1.040Nu_\infty$ สำหรับการไหลในช่วงที่ Re ประมาณ 10,000 ถึง 35,000 ตามลำดับ จะเห็นว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่านัสเซลท์นัมเบอร์ของ Disstus และ Boelter [8] มาก หรือกล่าวได้ว่าสำหรับท่อสามเหลี่ยมมุมฉากอิทธิพลของปากทางเข้ามีค่าน้อยมากเมื่อท่อมีความยาวมากกว่า 80 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ

รูปที่ 5.7 เป็นเส้นกราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่า Nu_l / Nu_∞ ที่ได้จากสมการ (5.3) และ (5.4) จะเห็นว่ามีเส้นกราฟทั้งสองมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกล่าวคือ ทั้งท่อสามเหลี่ยมด้านเท่าและท่อสามเหลี่ยมมุมฉากจะได้รับอิทธิพลจากปากทางเข้าเหมือนกัน โดยจะมี

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงเมื่อท่อมีความยาวน้อยและเมื่อท่อมีความยาวมากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะลดลงหรือได้รับอิทธิพลจากปากทางเข้าน้อยลงนั่นเอง และเมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลจากสมการของ Chen และ Chiou [5] พบว่าเส้นกราฟมีลักษณะที่เหมือนกับ เส้นกราฟที่ได้จากสมการของ Chen และ Chiou [5] เช่นเดียวกันกับการเปรียบเทียบกับข้อมูล จาก General Electric ใน DATA BOOKS HEAT TRANSFER AND FLUID FLOW [12] พบว่าเส้นกราฟมีลักษณะเหมือนกันและมีค่าที่แตกต่างกันเล็กน้อย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเราสามารถใช้เส้นผ่าศูนย์กลางไฮโดรลิคแทนได้ในกรณีที่ท่อเป็นท่อสามเหลี่ยม สำหรับการเปรียบเทียบผลการทดลองกับ พงษ์ธร จรัญญากรณ์ พบว่าเส้นกราฟมีแนวโน้มเหมือนกันแต่ผลจากการทดลองนี้จะมีค่า Nu_l / Nu_∞ สูงกว่าทั้งนี้เนื่องมากจากมีเงื่อนไขขอบเขตต่างกัน โดยในการทดลองนี้มีเงื่อนไขขอบเขตเป็นแบบการให้ความร้อนต่อพื้นที่ผิวท่อคงที่ในขณะที่ พงษ์ธร จรัญญากรณ์ เป็นแบบให้อุณหภูมิคงที่ตลอดพื้นที่ผิวท่อ

5.3 ข้อสรุป

จากผลการทดลองการพาความร้อนแบบบังคับในท่อสามเหลี่ยมด้านเท่าและท่อสามเหลี่ยมมุมฉากซึ่งมีการไหลเป็นแบบปั่นป่วน (Turbulent) ในช่วงที่มีการแจกแจงรูปร่างของความเร็วและอุณหภูมิกำลังเปลี่ยนรูปไปพร้อมๆ กัน (Simultaneously Developing Velocity and Temperature Profiles) ที่สภาวะของขอบเขตความร้อน (Thermal Boundary Condition) เป็นแบบการให้ความร้อนต่อพื้นที่ผิวคงที่ (Constant Wall Heat Flux) โดยใช้อากาศเป็นของไหล พบว่าในท่อสามเหลี่ยมทั้งสองแบบมีแนวโน้มแบบเดียวกัน โดยจะได้รับอิทธิพลจากการแจกแจงรูปร่างของความเร็วและอุณหภูมิกำลังเปลี่ยนรูปไปพร้อมๆ กัน (ปากทางเข้า) ทำให้ค่าของ Nu_l มีค่าสูงกว่า Nu_∞ และเราสามารถหาค่า Nu_l ได้จากสมการเอมไพริคัลที่ได้จากการทดลองดังนี้

$$\frac{Nu_l}{Nu_\infty} = 3.48 Re^{-0.034} (L/D_h)^{-0.20}$$ สำหรับใช้ในท่อสามเหลี่ยมด้านเท่า

$$\frac{Nu_l}{Nu_\infty} = 4.37 Re^{-0.066} (L/D_h)^{-0.17}$$ สำหรับใช้ในท่อสามเหลี่ยมมุมฉาก

โดยแนะนำให้ใช้กับท่อสั้นที่ $10 \le L/D_h \le 80$

5.4 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาการพาความร้อนแบบบังคับในท่อสามเหลี่ยม ที่มีการไหลเป็นแบบปั่นป่วน ยังมีสิ่งที่น่าจะทำการวิจัยต่อไปเพื่อให้ได้ข้อมูลที่มากขึ้นและเป็นประโยชน์ในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนต่อไป ข้อเสนอแนะที่ควรจะทำการศึกษาต่อจะแบ่งเป็นข้อๆ ดังนี้

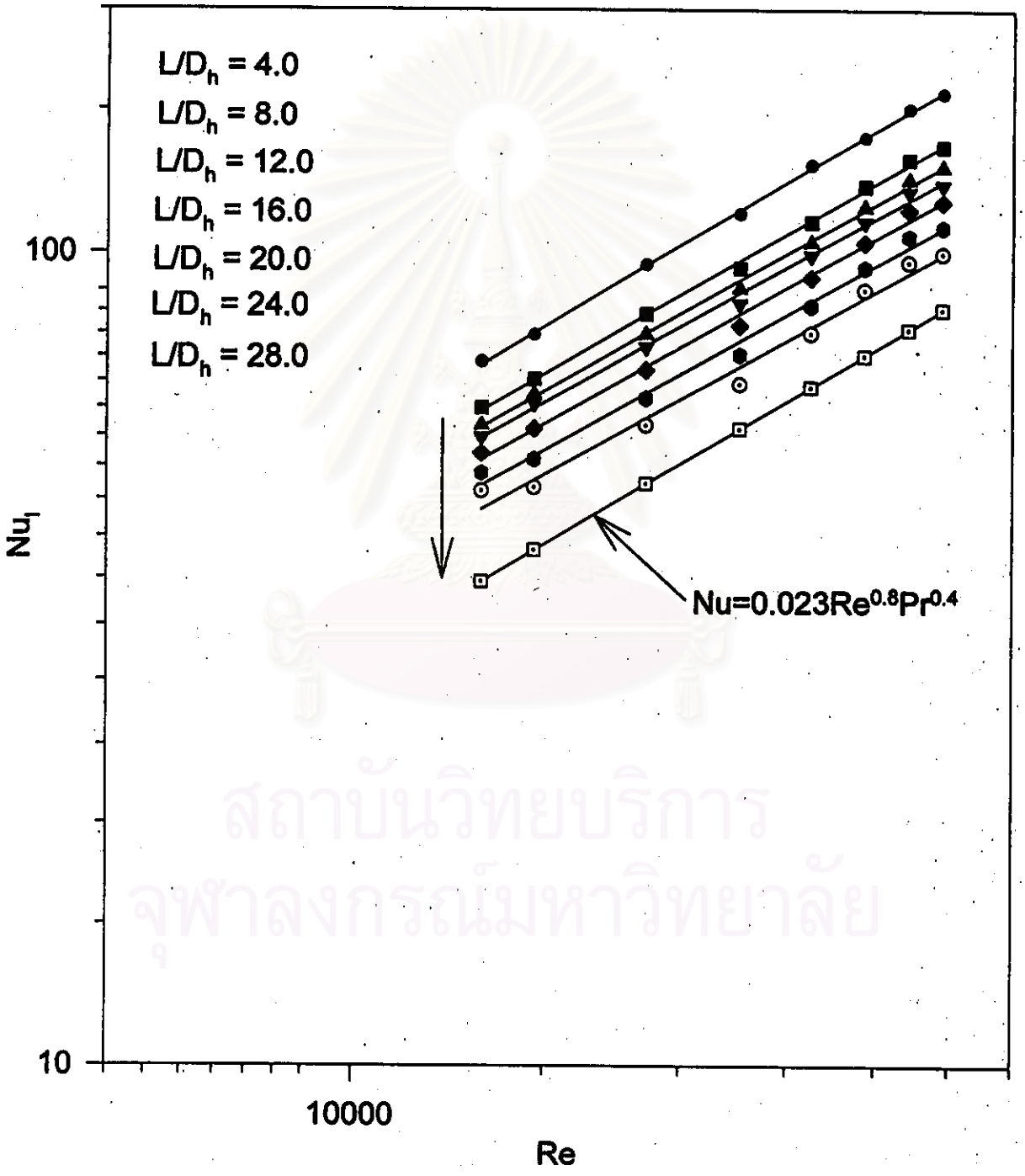
5.4.1 งานวิจัยในครั้งนี้ได้ศึกษาเฉพาะของไหลที่เป็นอากาศเท่านั้น กล่าวคือมีค่าของแพรนด์เดิลนัมเบอร์เพียงค่าเดียว ดังนั้นจึงควรที่จะทำการศึกษาและเก็บข้อมูลโดยใช้ของไหลที่มีค่าแพรนด์เดิลนัมเบอร์ต่างๆ กัน เพื่อจะได้ทราบถึงอิทธิพลของค่าแพรนด์เดิลนัมเบอร์ที่มีต่อค่านัสเซลท์นัมเบอร์

5.4.2 จากงานวิจัยในครั้งนี้พบว่าเมื่อใช้สมการเอมไพริคัลที่ได้โดยแทนค่าอัตราส่วนของความยาวท่อต่อเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 80 พบว่าค่านัสเซลท์นัมเบอร์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับสมการในช่วงที่การแจกแจงรูปร่างความเร็วและอุณหภูมิคงรูปแล้วมาก ดังนั้นจึงควรทำการศึกษาและเก็บข้อมูลสำหรับการพาความร้อนในช่วงที่การแจกแจงรูปร่างความเร็วและอุณหภูมิคงรูปแล้วโดยมีการให้ความร้อนต่อพื้นที่ผิวคงที่เพื่อมาเทียบกับผลที่ได้จากงานวิจัยนี้

5.4.3 ควรศึกษาและเก็บข้อมูลของการพาความร้อนแบบปั่นป่วนในท่อสามเหลี่ยมโดยใช้รูปร่างที่ปากทางเข้าเป็นแบบต่างๆ กันเพื่อเปรียบเทียบผลกับสมการ (3.28) ของ Boelter,Young และ Iversen [14]

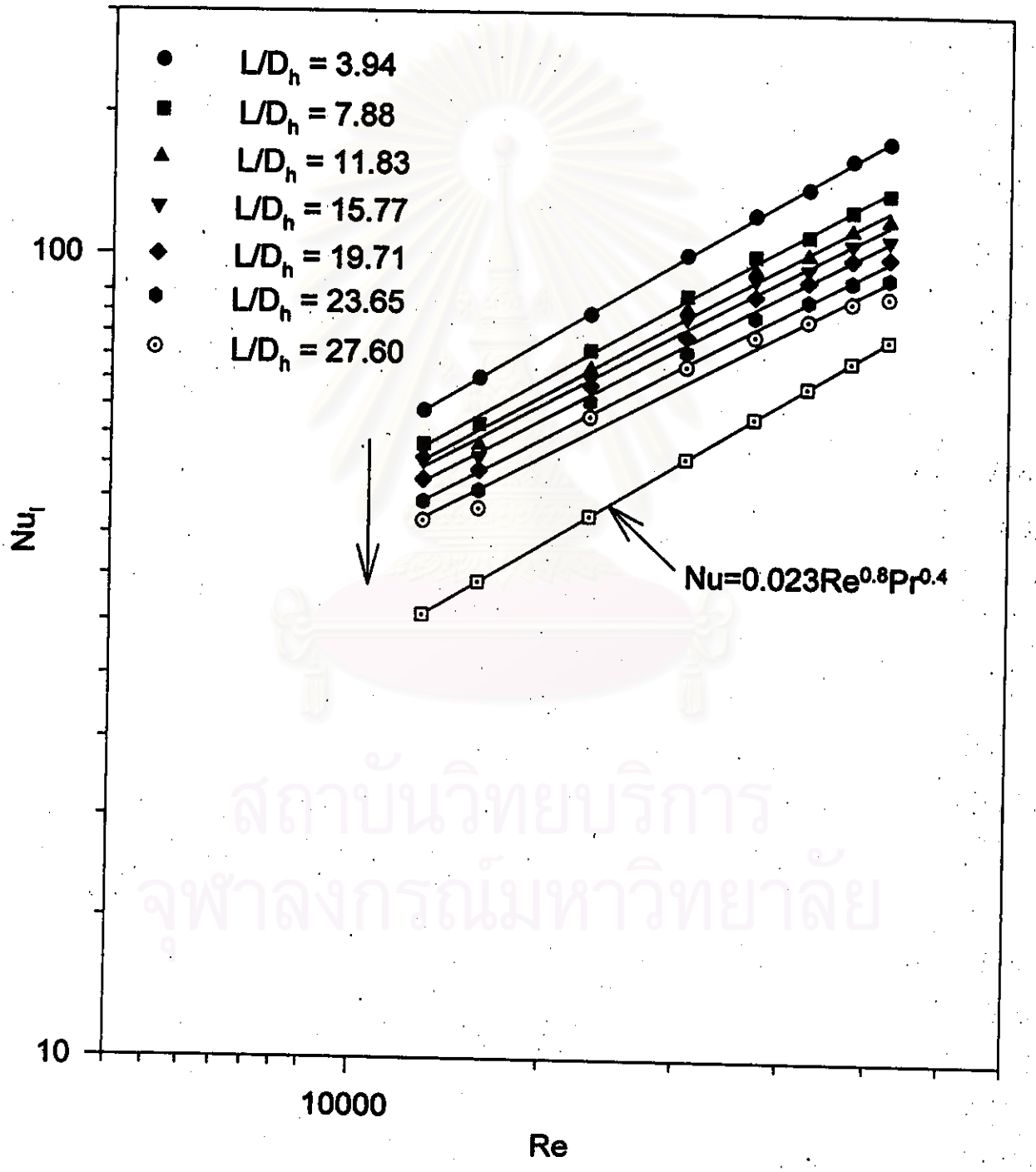
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Fig 5.1 Nusselt number plotted against Re for turbulent forced convection in equilateral triangular duct with simultaneously developing velocity and temperature profiles and thermal boundary condition of uniform heat flux



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Fig. 5.2 Nusselt number plotted against Re for turbulent forced convection in right-angled isosceles triangular duct with simultaneously developing velocity and temperature profiles and thermal boundary condition of uniform heat flux.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I17956237

Fig 5.3 Nusselt number plotted against length-diameter ratio for turbulent forced convection in equilateral triangular duct with uniform heat flux

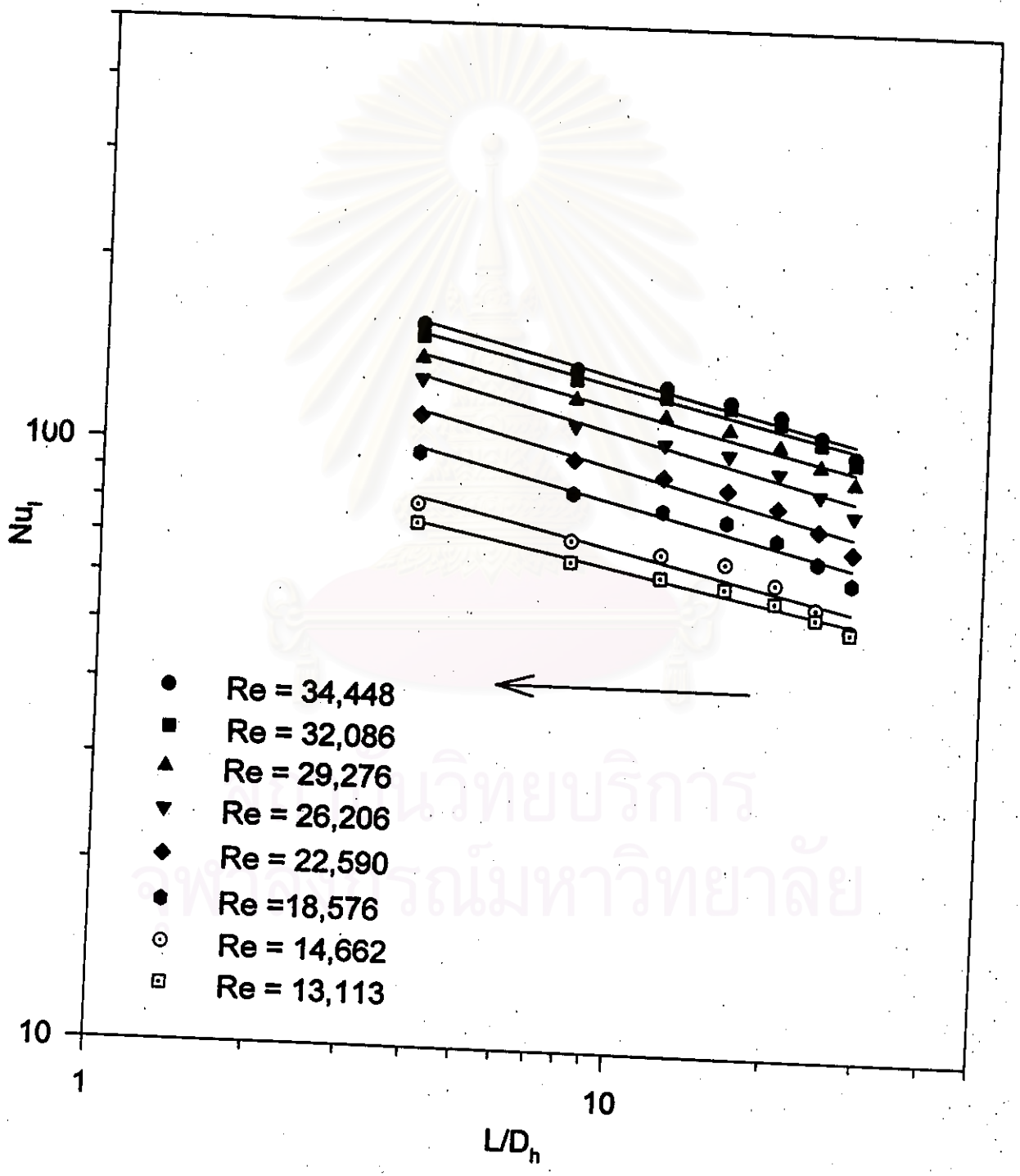


Fig 5.4 Nusselt number plotted against length-diameter ratio for turbulent forced convection in right-angled isosceles triangular duct with uniform heat flux

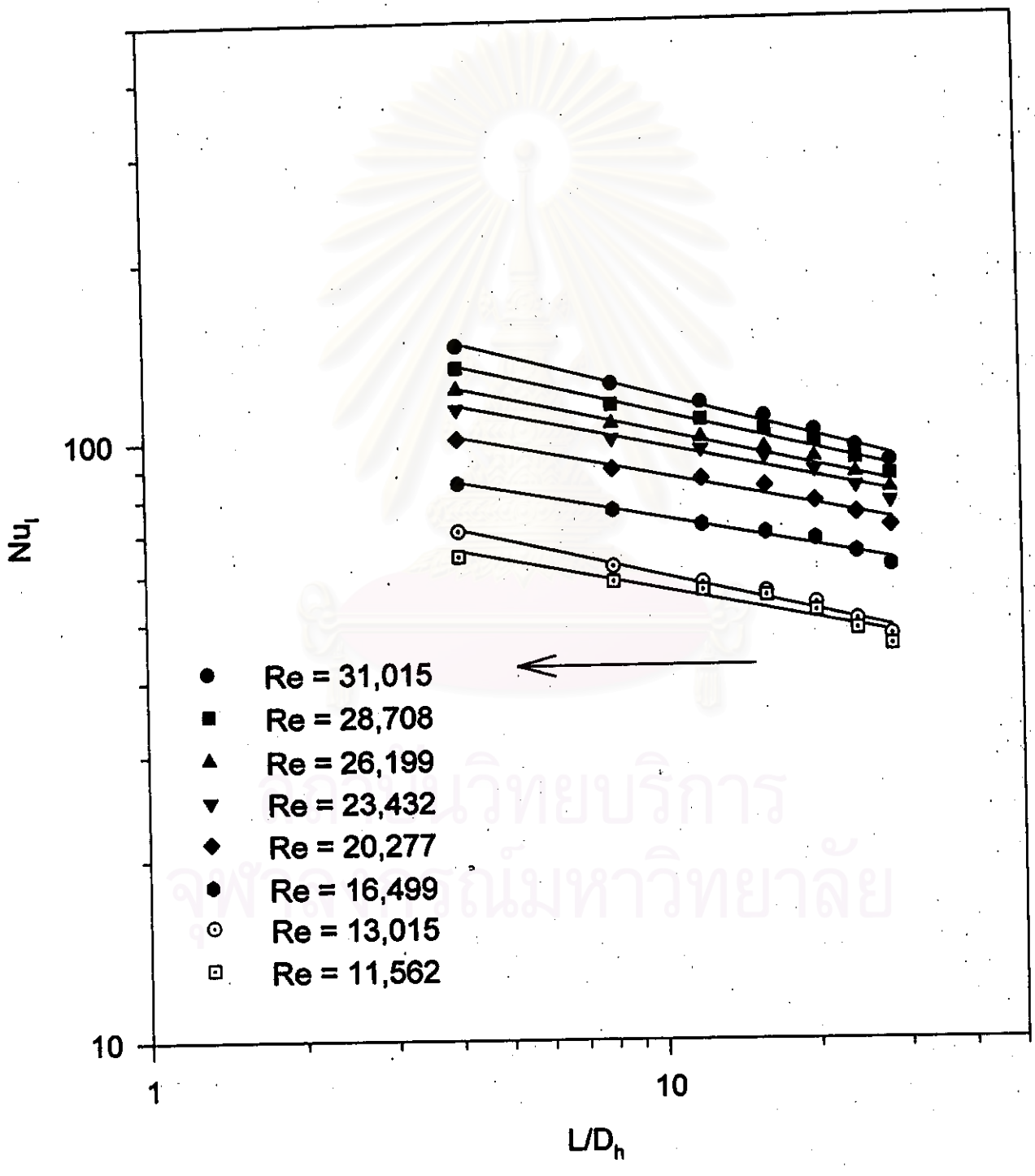


Fig 5.5 Nu_l/Nu_∞ plotted against L/D_h for turbulent forced convection in equilateral triangular duct with simultaneously developing velocity and temperature profiles and thermal boundary condition of uniform heat flux.

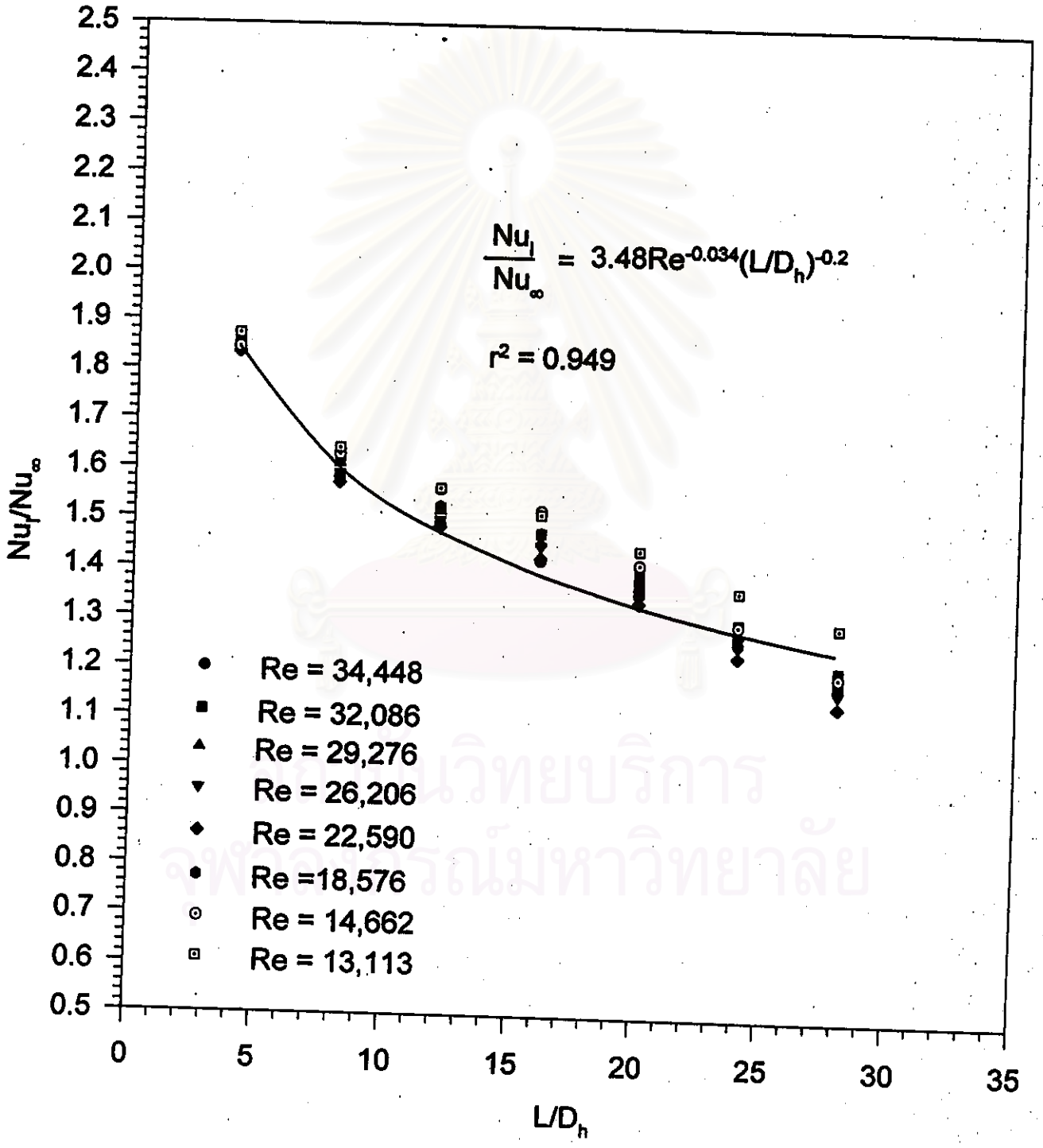


Fig 5.6 Nu_l/Nu_∞ plotted against L/D_h for turbulent forced convection in right-angular isosceles triangular duct with simultaneously developing velocity and temperature profiles and thermal boundary condition of uniform heat flux.

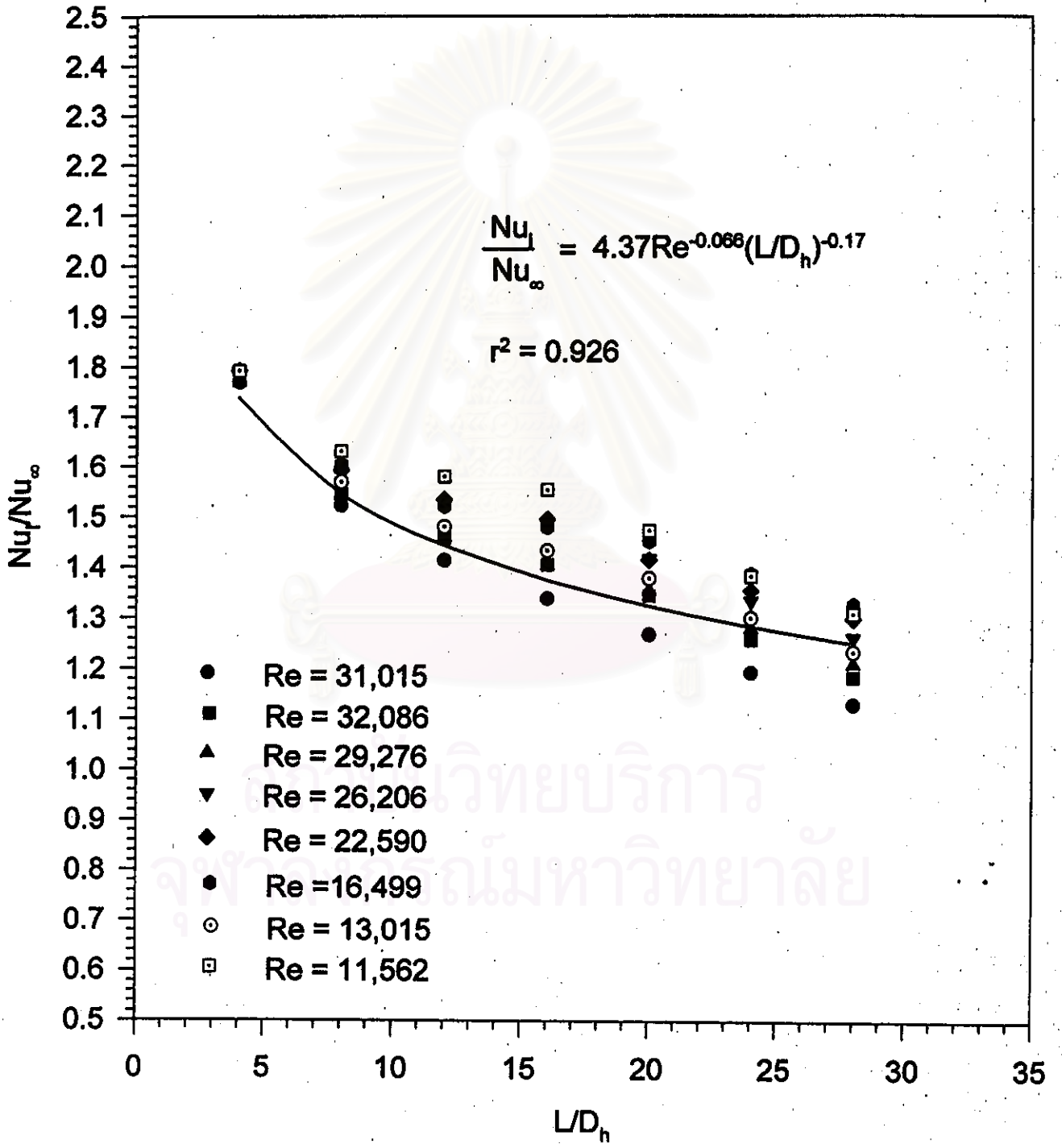
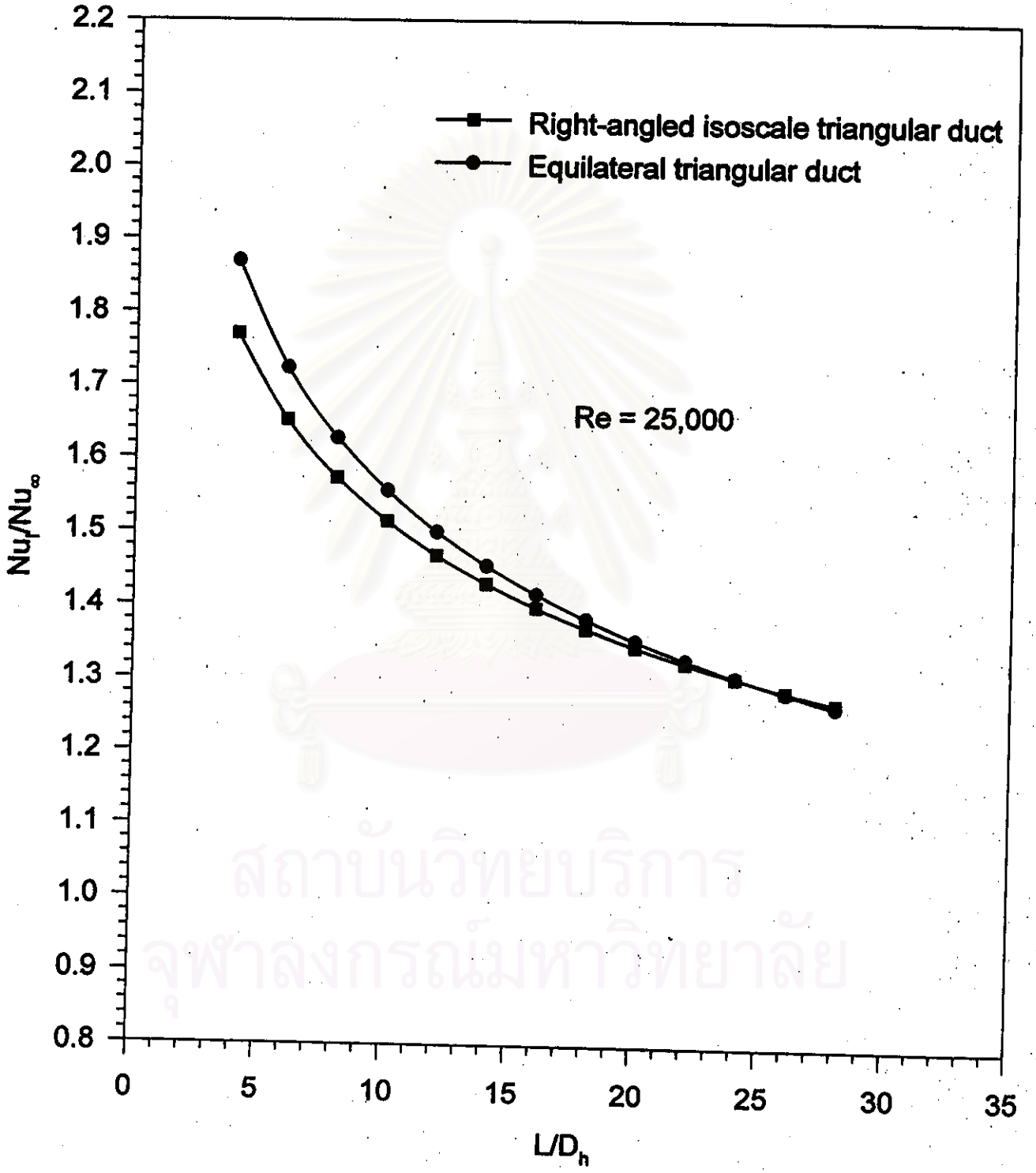


Fig 5.7 Nu_l/Nu_∞ plotted against L/D_h for Turbulent forced convection at Re = 25,000



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

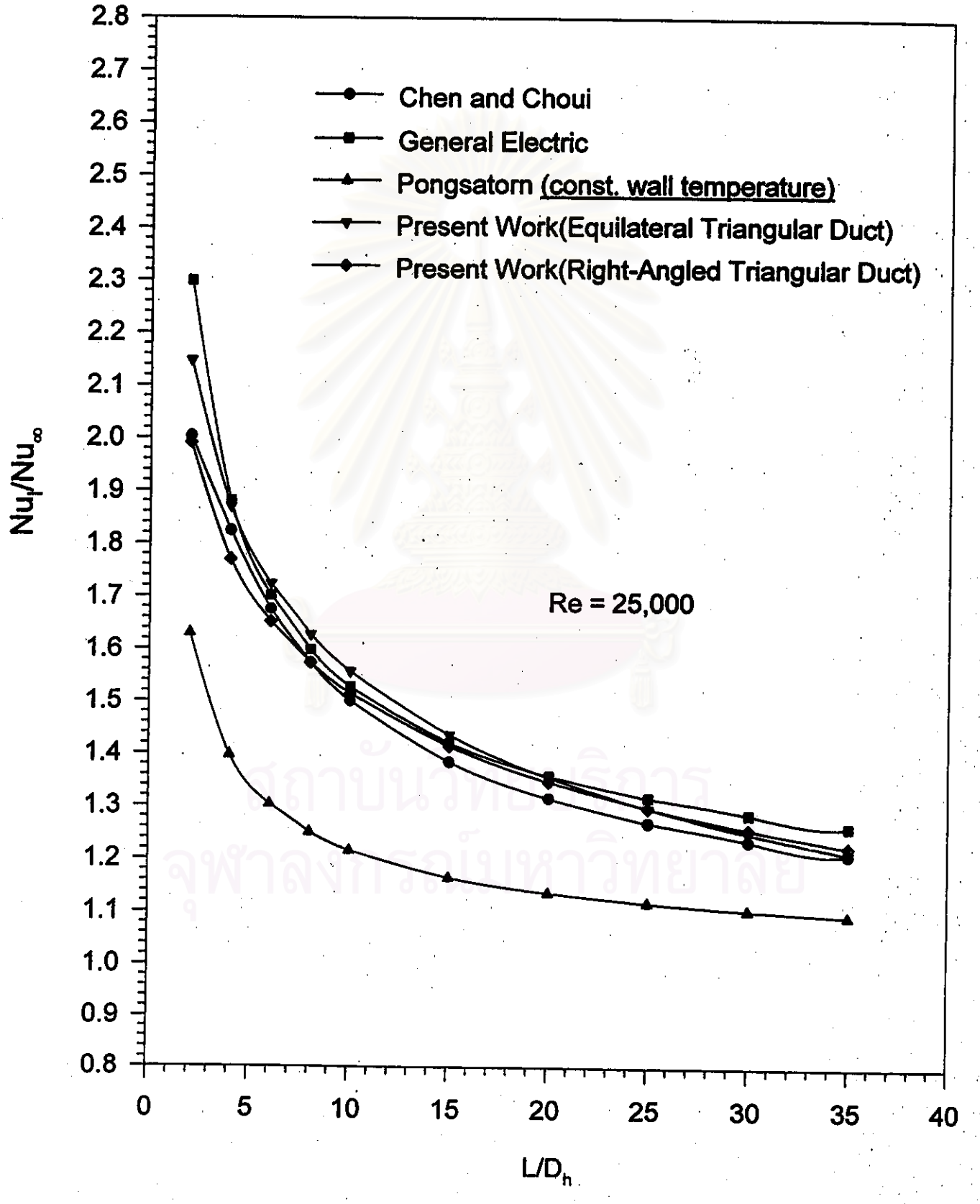



Fig 5.8 Nusselt number in developing thermal and velocity region with constant heat flux