

## บทที่ 5

### ผลการวิจัย

การทดลองได้กระทำขึ้นในช่วงการไหลที่มีการแจกแจงรูปร่างของความเร็วและอุณหภูมิกำลังเปลี่ยนรูปร่างพร้อม ๆ กัน ( Simultaneously Developing Velocity and Temperature Profile ) โดยมีการให้ความร้อนต่อพื้นที่ผิวคงที่ และใช้อากาศเป็นของไหลในท่อโดยการไหลมีค่า  $Re$  ประมาณ 700 ถึง 1925

อนึ่งการทดลองได้กระทำในช่วงค่า Greatz Number ( $Gz$ ) ประมาณ 20 ถึง 260 สำหรับการไหลในช่วงที่มีค่าเกิน 260 จะเกิดในช่วงซึ่งท่อมีความยาวสั้นเกินไป นอกนั้นอัตราการไหลจะเกินช่วงลามินาร์ (Laminar) เช่น การไหลของอากาศที่มีค่า  $Re = 1600$  และ  $Gz = 260$  ท่อจะมีค่าอัตราส่วนของความยาวท่อต่อเส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิก ( $Z/D_h$ ) = 4.3 ซึ่งเป็นเส้นท่อซึ่งสั้นเกินกว่าที่จะนำไปใช้งานได้

#### 5.1 ผลการทดลอง

ผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มเหมือนกับ ผลการทดลองที่ได้จากท่อซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลมสี่เหลี่ยม สามเหลี่ยมด้านเท่า และแผ่นขนาน กล่าวคือค่า  $Nu_1$  จะเพิ่มตามค่าของ  $Gz$

เมื่อนำผลการทดลองไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ( Numerical Method ) โดย P Wibulswas ( 1966 ) ดังกราฟรูปที่ 5.1 พบว่าในช่วง  $Gz$  ต่ำๆ หรือบริเวณที่ห่างจากปากทางเข้ามาก ๆ กล่าวคือมี  $Z/D_h$  สูงๆค่า  $Nu_1$  ที่ได้จะมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ( Numerical Method ) ทั้งนี้ บริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณซึ่งมีอุณหภูมิของผิวท่อและอุณหภูมิของอากาศที่ใกล้กับผิวท่อสูงกว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศที่ได้การวิเคราะห์เชิงตัวเลข ( Numerical Method ) และในทำนองตรงกันข้ามจะเกิดขึ้นในบริเวณแกนกลางของท่อ ซึ่งเป็นบริเวณที่อุณหภูมิของอากาศต่ำกว่าค่าเฉลี่ย อย่างไรก็ตามผลที่เกิดขึ้นตามบริเวณนี้มีค่าแตกต่างจากค่าเฉลี่ยดังกล่าวน้อยกว่า ดังนั้น ผลที่ได้จึงทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศที่วัดได้สูงกว่าที่ค่าได้การวิเคราะห์เชิงตัวเลข ( Numerical Method ) จึงส่งผลทำให้ได้ค่า  $Nu_1$  ที่สูงกว่าค่าได้การวิเคราะห์เชิงตัวเลข ( Numerical Method ) ส่วนช่วงบริเวณที่มีค่า  $Re$  ต่ำ ๆ นั้นค่า  $Nu_1$  ที่ได้จากการทดลองจะมีค่าที่ได้จากการทดลองจะมีค่าน้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องมาจากอิทธิพลของการสูญเสีย

ความร้อนโดยการพาความร้อนแบบ Free Convection ซึ่งเกิดขึ้นกับทุก ๆ ครั้งของการทดลองแต่อิทธิพลนี้ จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่า Re ต่ำลง ( P. Wibuswas , 1966 ) ซึ่งผลการทดลองที่ได้มานี้จะเป็นไปในทำนองเดียวกันกับการพาความร้อนไปท่สามเหลี่ยมด้านเท่า โดยมีสภาวะทางความร้อนที่ผิวและสภาพการไหลที่เหมือนกัน ดังกราฟรูปที่ 5.3

จากการหาสมการเพื่อทำนายผลการทดลอง และผลที่ได้การวิเคราะห์เชิงตัวเลข ( Numerical method ) ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu_l$  และ  $Gz$  จะได้สมการทำนายความสัมพันธ์ของการพาความร้อนในท่สามเหลี่ยมหน้าจั่วมุมฉาก ดังนี้

$$\text{สมการจากการทดลอง} \quad Nu_l = 2.810 Gz^{0.296} \quad (5.1)$$

$$\text{สมการจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลข} \quad Nu_m = 2.829 Gz^{0.2802} \quad (5.2)$$

ทั้งนี้ การทำนายความสัมพันธ์ทำโดยวิธี Least Square และมีค่าสหสัมพันธ์ ( Correlation Coefficient ,  $r^2$  ) เท่ากับ 0.309 และ 0.998 ตามลำดับ เมื่อนำสมการทั้งสองมาลัดเปรียบเทียบกัน พบว่าสมการทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยสมการที่ทำนายที่ได้จากการทดลองจะมีค่ามากกว่าเล็กน้อย ดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.2

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปเปรียบเทียบกับ การพาความร้อนที่มีสภาวะการให้ความร้อนที่ผิว และสภาพการไหลเดียวกันของสามเหลี่ยมด้านเท่า ที่มีอัตราส่วนความยาวท่ต่อเส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิก ที่ใกล้เคียงกันพบว่าค่า  $Nu_l$  ที่ได้ มีแนวโน้มเดียวกันมีการเบี่ยงเบนไปจากค่าที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ( Numerical Method ) ไปทิศทางที่เหมือนกันและมีค่าใกล้เคียงกันดังกราฟรูปที่ 5.3 และ 5.5 จากการหาสมการทำนายผลการทดลอง และผลที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ( Numerical Method ) ด้วยวิธีที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นจะได้สมการ ดังต่อไปนี้

$$\text{สมการจากการทดลอง} \quad Nu_l = 2.176 Gz^{0.348} \quad (5.3)$$

$$\text{สมการจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลข} \quad Nu_m = 2.008 Gz^{0.362} \quad (5.4)$$

โดยมีค่าสหสัมพันธ์ ( Correlation Coefficient ,  $r^2$  ) เท่ากับ 0.66 และ 0.99 ตามลำดับเมื่อนำผลที่ได้จากการทดลองของสามเหลี่ยมชนิดเดียวกัน โดยมีสภาวะการให้ความร้อนที่ผิวเป็นแบบอุณหภูมิที่ผิวคงที่และมีสภาวะการไหลเหมือนกันดังกราฟรูปที่ 5.10 พบว่าในสภาวะที่อุณหภูมิที่ผิวที่คงที่นั้นผลการทดลองจะมีการเบี่ยงเบนไปจากค่าที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ( Numerical Method ) มากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของการนำความร้อนในแนวแกน ( Axial Heat Conduction ) ในสภาพดังกล่าวมีมากกว่าสภาวะการให้ความร้อนต่อพื้นที่ผิวคงที่นั่นเอง ( Hennecke ) ซึ่งอิทธิพลดังกล่าวมิได้ถูกนำมาพิจารณาในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ( Numerical Method ) โดย P. Wibulswas ( 1966 )

ในสภาวะที่ผิวของท่อมีอุณหภูมิคงที่ตามกราฟรูปที่ 5.10 นั้นพบว่า  $Nu_l$  ค่อนข้างขึ้นอยู่กับค่า  $Gz$  เท่านั้น ส่วนในสภาวะการให้ความร้อนต่อพื้นที่ผิวคงที่นั้นเมื่อพิจารณา รูปที่ 5.1 และ 5.2 พบว่าเส้นกราฟที่ได้จากวิธีการ Least Square ระหว่าง  $Nu_l$  และ  $Gz$  ไม่สามารถอธิบายข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการทดลองได้ ยิ่งไปกว่านั้นข้อมูลยังเรียงตัวแยกกันตาม  $Z/D_h$  อีกด้วย นั่น แสดงว่า  $RePr$  และ  $Z/D_h$  มีอิทธิพลต่อ  $Nu_l$  ไม่เท่ากัน ดังนั้น จึงอาจกล่าวได้ว่า  $Nu_l$  ไม่ได้เป็นฟังก์ชัน ( Function ) ของ  $Gz$  แต่เพียงอย่างเดียวเท่านั้น

## 5.2 สมการ Empirical

จากการที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น การพาความร้อนแบบลามินา ( Laminar ) ในช่วงที่มีการแจกแจงรูปร่างของความเร็วและอุณหภูมิกำลังเปลี่ยนแปลงพร้อมๆ กัน ( Simultaneously Developing Velocity and Temperature Profile ) ของท่อสามเหลี่ยมด้านเท่าและสามเหลี่ยมหน้าจั่วมุมฉากในสภาวะการให้ความร้อนต่อพื้นที่ผิวคงที่มีค่าและแนวโน้มใกล้เคียงกัน ดังนั้น ในการพาความร้อนด้วยสภาวะดังกล่าวของท่อสามเหลี่ยมทั้งสองน่าจะใช้สมการเดียวกันได้ เมื่อพิจารณาค่าสหสัมพันธ์ ( Correlation Coefficient ,  $r^2$  ) ของความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu_l$  และ  $Gz$  ของการทดลองของท่อสามเหลี่ยมทั้งสองจะมีค่าเพียง 0.309 และ 0.665 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า  $Nu_l$  และ  $Gz$  ไม่ใคร่จะมีความสัมพันธ์กันเท่าใดนัก ดังนั้นการพาความร้อนในท่อสามเหลี่ยมในสภาวะดังกล่าวจึงน่าจะมีตัวแปรอื่นที่สัมพันธ์กับสมการเพิ่มขึ้น ซึ่งจากสมการ 2.44 จะเขียนสมการได้ว่า

$$Nu_l = f(Gz, Re, Pr) \quad (5.4)$$

ดังนั้นเราอาจเขียนสมการใหม่เพื่อใช้ทำนายผลที่ได้จากการทดลองได้ว่า

$$Nu_l = C (RePr)^m (Z/D_h)^n \quad (5.5)$$

จากกราฟรูปที่ 5.6 เป็นรูปที่ได้จากการพล็อตระหว่างค่า  $Nu_l$  และค่า  $RePr$  ในกราฟ  $\log - \log$  พบว่าแนวโน้มของกราฟที่ได้เป็นเส้นตรง และมีค่าสหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient,  $r^2$ ) เท่ากับ 0.870 มีความชันของกราฟ เท่ากับ  $(m)$  0.9191

นำผลที่ได้จากกราฟรูปที่ 5.6 ไปประมาณค่าอิทธิพลของ  $Z/D_h$  ที่มีต่อ  $Nu_l$  โดยนำค่าความชันของกราฟ  $(m)$  ในรูปกราฟที่ 5.6 มาเป็นตัวเลขยกกำลังของ  $RePr$  แล้วทำการพล็อตระหว่าง  $Nu_l / (RePr)^{0.9191}$  และ  $Z/D_h$  จะได้ความชันเฉลี่ยของกราฟ  $(n)$  เท่ากับ -0.10 ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการการพาความร้อนได้ดังนี้

$$Nu_l = C (RePr)^m (Z/D_h)^{-0.1} \quad (5.6)$$

จากสมการ 5.6 นำค่า  $Nu_l / (Z/D_h)^{-0.1}$  มาพล็อตกับค่า  $RePr$  ลงในกระดาษ  $\log - \log$  เพื่อหาค่า  $C, m$  ดังกราฟรูป 5.8 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากราฟมีความสัมพันธ์กันเป็นเชิงเส้นจากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยวิธี Least Square ได้สมการดังนี้

$$Nu_l = 0.0263 (RePr)^{0.9185} (Z/D_h)^{-0.1} \quad (5.7)$$

หรือสามารถจัดใหม่ได้เป็น

$$Nu_l = 0.0263 (Gz)^{0.1} (RePr)^{0.8185} \quad (5.8)$$

$$Nu_l = 0.0263 (Gz)^{0.1} (Pe)^{0.8185} \quad (5.9)$$

Gz : Graetz Number

$$= \frac{RePr}{(Z / D_h)}$$

Pe : Peclet Number

$$= RePr$$

และมีค่าสหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient,  $r^2$ ) เท่ากับ 0.896 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีความสอดคล้องกับสมการเป็นอย่างดีอย่างไรก็ตามเพื่อมิให้อุปกรณ์ที่ออกแบบมีขนาดเล็กเกินไปสำหรับการทำงานบางจุด สมการการพาความร้อนดังกล่าวควรมีจุดที่ได้จากการทดลองอยู่บนเส้นกราฟทุกจุด ยกเว้นบางจุดซึ่งอาจจะเกิดจากความผิดพลาดไปการทดลอง โดยวิธีการนี้เราสามารถหาสมการสำหรับการออกแบบได้เป็นดังกราฟรูปที่ 5.8

$$Nu_l = 0.0242 (RePr)^{0.9185} (Z / D_h)^{-0.1} \quad (5.10)$$

หรือสามารถจัดใหม่ได้เป็น

$$Nu_l = 0.0242 (Gz)^{0.1} (Pe)^{0.8185} \quad (5.11)$$

### 5.3 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองการพาความร้อนแบบบังคับในท่อสามเหลี่ยมหน้าจั่วมุมฉากและสามเหลี่ยมด้านเท่า ที่มีการไหลแบบลามินาร์ (Laminar) โดยมีการให้ความร้อนต่อพื้นที่ผิวคงที่ ในช่วงที่มีการแจกแจงรูปร่างความเร็วและอุณหภูมิกำลังเปลี่ยนรูปพร้อม ๆ กัน (Simultaneously Developing Velocity and Temperature Profile) มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ดังนั้นเราจึงอาจใช้สมการเพียงสมการเดียวในการอธิบายการพาความร้อนในท่อทั้งสองชนิดได้ ซึ่งสามารถสรุปได้สองสมการกล่าวคือ

$$\text{สมการที่ได้จากวิธี Least Square} \quad Nu_f = 0.0263 (Gz_f)^{0.1} (Pe_f)^{0.8185}$$

$$\text{สมการสำหรับการออกแบบ} \quad Nu_f = 0.0242 (Gz_f)^{0.1} (Pe_f)^{0.8185}$$

ซึ่งใช้ได้ทั้งท่อสามเหลี่ยมหน้าจั่วมุมฉากและสามเหลี่ยมด้านเท่าในช่วง  $Re$  ประมาณ 700 ถึง 1925,  $5.18 < Z/D_h < 21.43$  และคุณสมบัติของของไหลที่ใช้ในการคำนวณเป็นคุณสมบัติที่ Mean Bulk Temperature

ผลที่ได้จากการทดลองมีค่าแตกต่างไปจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Method) อันเนื่องมาจากการละทิ้งการนำความร้อนในแนวแกน (Axial Heat Conduction) ความเร็วในแนวตั้งฉากกับการไหล และการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของของไหลเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Method) นั้นเอง ซึ่งสมการที่ได้มีรูปแบบเดียวกันกับการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Method) ในทอกลมของ Zeldin and Schmidt เมื่อคำนึงถึงการนำความร้อนในแกน (Axial Heat Conduction) ด้วย

อย่างไรก็ตามสมการ Empirical ที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้ ได้นำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Method) ดังกราฟรูปที่ 5.9

อนึ่ง สภาพการวิจัยในครั้งนี้ เป็นการยากที่จะทำให้เกิดสภาพการให้ความร้อนต่อพื้นที่ผิวคงที่ โดยสมบูรณ์ (Shah and London) ซึ่งการวิจัยครั้งนี้ใช้ลวดทำความร้อนเป็นตัวให้ความร้อนอันเป็นผลทำให้เกิดความเข้มของความร้อนชั้นบริเวณเส้นลวดอันเป็นผลทำให้เกิดสภาวะดังกล่าวไม่สมบูรณ์ และจากผลการทดลองที่ได้ พบว่า อุณหภูมิบริเวณรอบผิวท่อที่ระยะห่างจากปากทางเข้า ณ ตำแหน่งใด ๆ ก็ตาม อุณหภูมิที่มุมของผิวท่อจะสูงกว่าที่จุดอื่น

#### 5.4 ข้อเสนอแนะ

การพาความร้อนแบบลามินาร์ในท่อสามเหลี่ยม ยังมีข้อปดล็กย่อยอีกหลายประการที่ควรทำ การวิจัยเพื่อที่จะทำให้เกิดความสมบูรณ์ของความรู้และข้อมูล เกี่ยวกับการพาความร้อนในสภาวะดังกล่าว อันเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งอาจพอสรุปได้ดังนี้

1. ศึกษาและเก็บข้อมูลเกี่ยวกับอิทธิพลของ  $Pr$  ต่อ  $Nu$  โดยการใช้ของไหลหลายๆชนิดเป็นตัวพา ความร้อน ทั้งในสภาวะการให้ความร้อนแบบอุณหภูมิที่ผิวคงที่และการให้ความร้อนต่อพื้นที่ผิวคงที่
2. ศึกษาและเก็บข้อมูลเกี่ยวกับการพาความร้อนในช่วงการแจกแจงรูปร่างความเร็วและอุณหภูมิ คงรูปแล้วโดยมีการให้ความร้อนต่อพื้นที่ผิวคงที่
3. วิเคราะห์การพาความร้อนในสภาวะดังกล่าวด้วยวิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลข ( Numerical Method ) โดยนำ  $Pe$  การสูญเสียความร้อนแบบ Free Convection ในช่วง  $Re$  ต่ำ ๆ และอิทธิพลของอุณหภูมิ ที่มุมของท่อมาพิจารณาด้วย

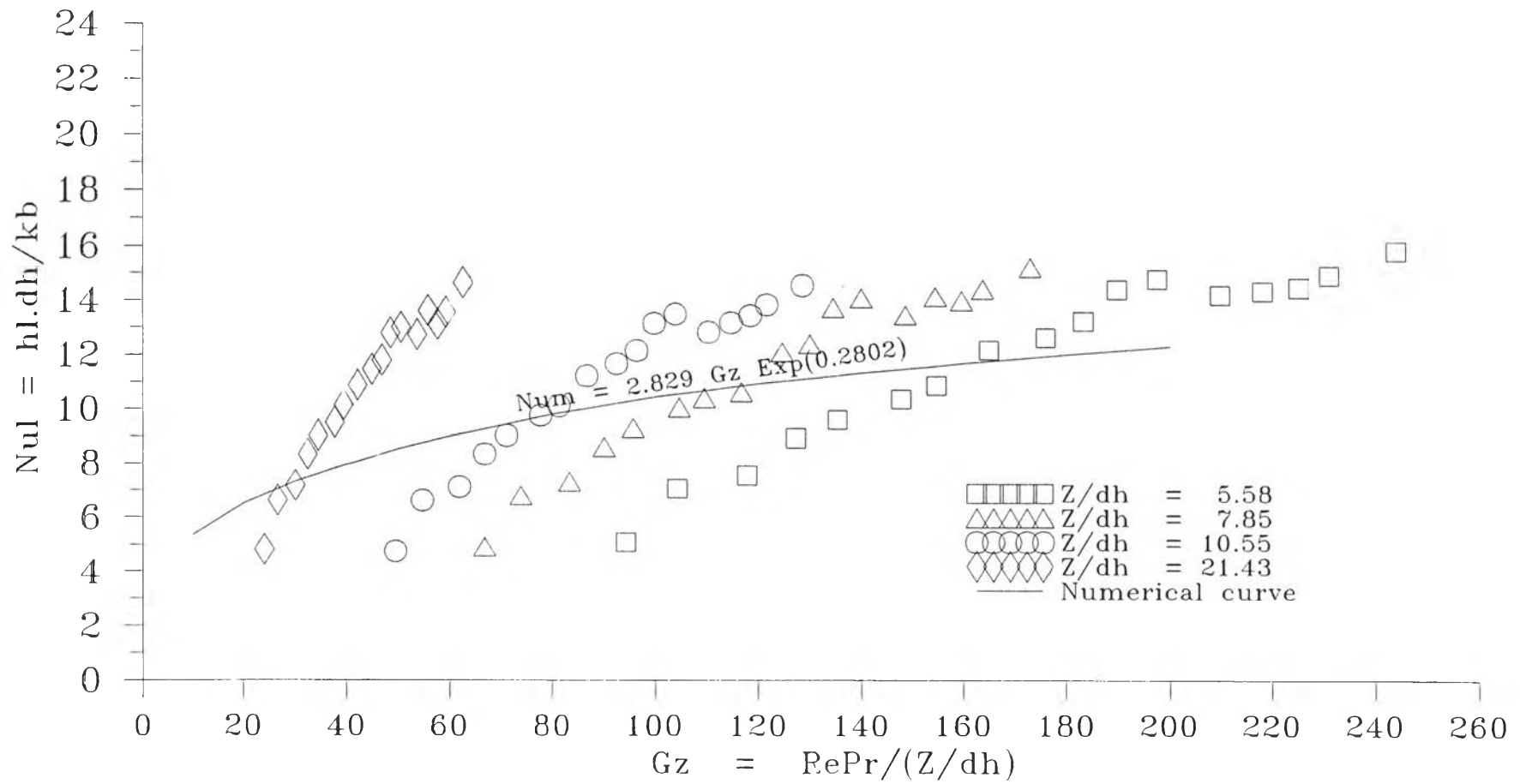


FIG 5.1 Measured logarithmic mean Nusselt Numbers ,Nul, plotted against Graetz Numbers ,Gz, for simultaneously developing profiles in right-angled isosceles triangular duct with constant heat flux



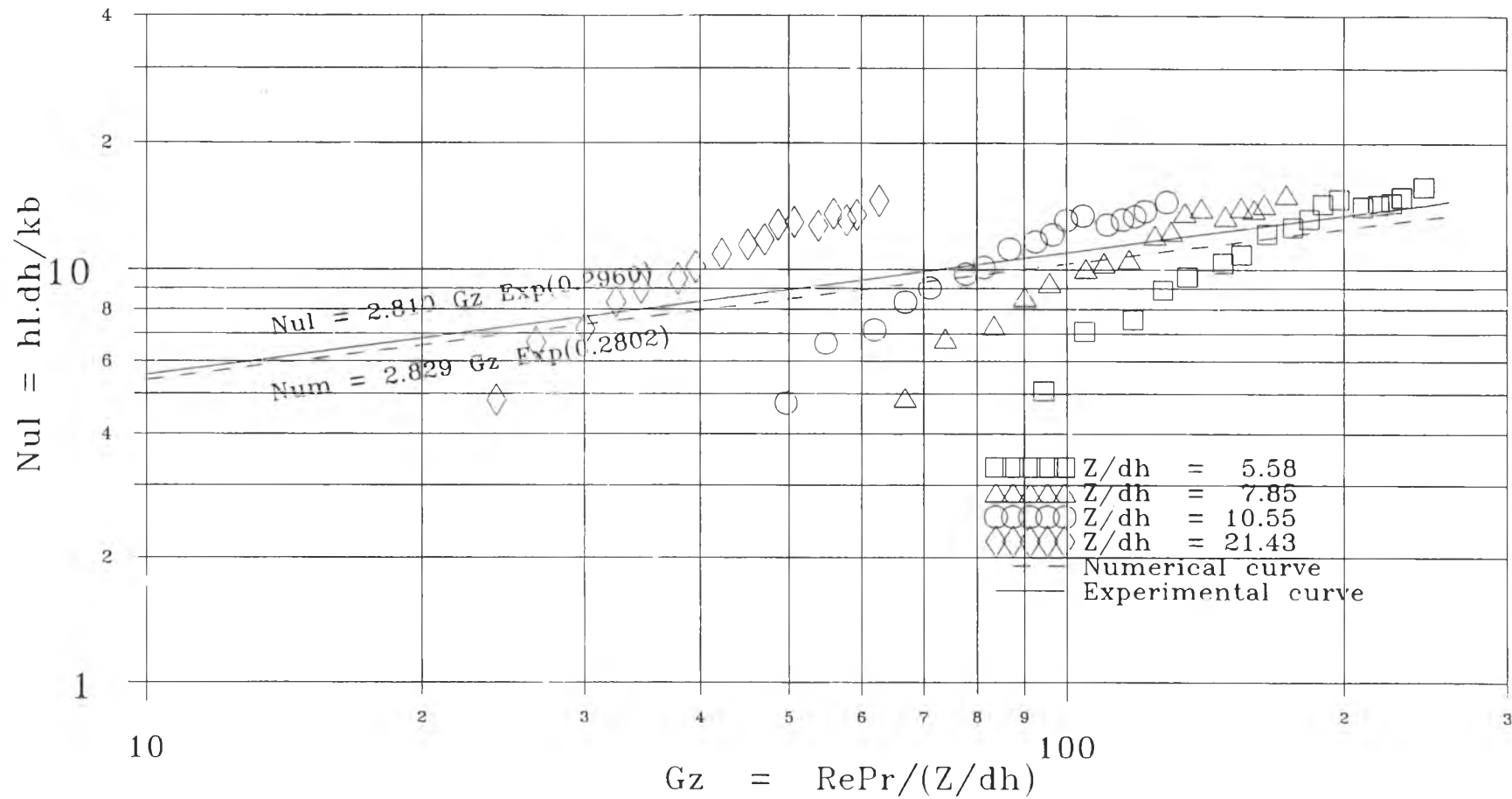


FIG 5.2 Measured logarithmic mean Nusselt Numbers,  $Nul$ , plotted against Graetz Numbers,  $Gz$ , for simultaneously developing profiles in right-angled isosceles triangular duct with constant heat flux.

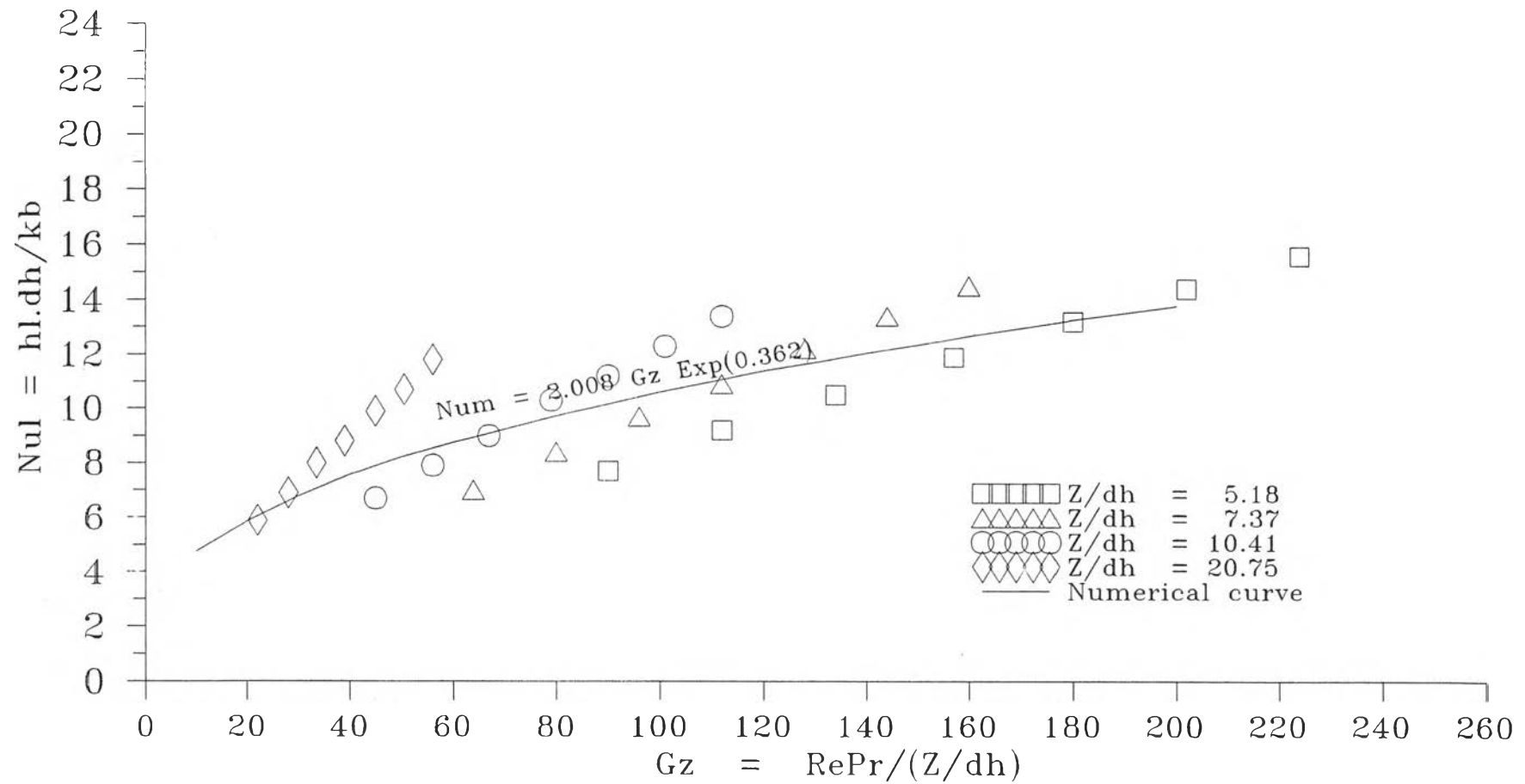


FIG 5.3 Measured logarithmic mean Nusselt Numbers,  $Nul$ , plotted against Graetz Numbers,  $Gz$ , for simultaneously developing profiles in equilateral triangular duct with constant heat flux P. Wibulswas(1966).

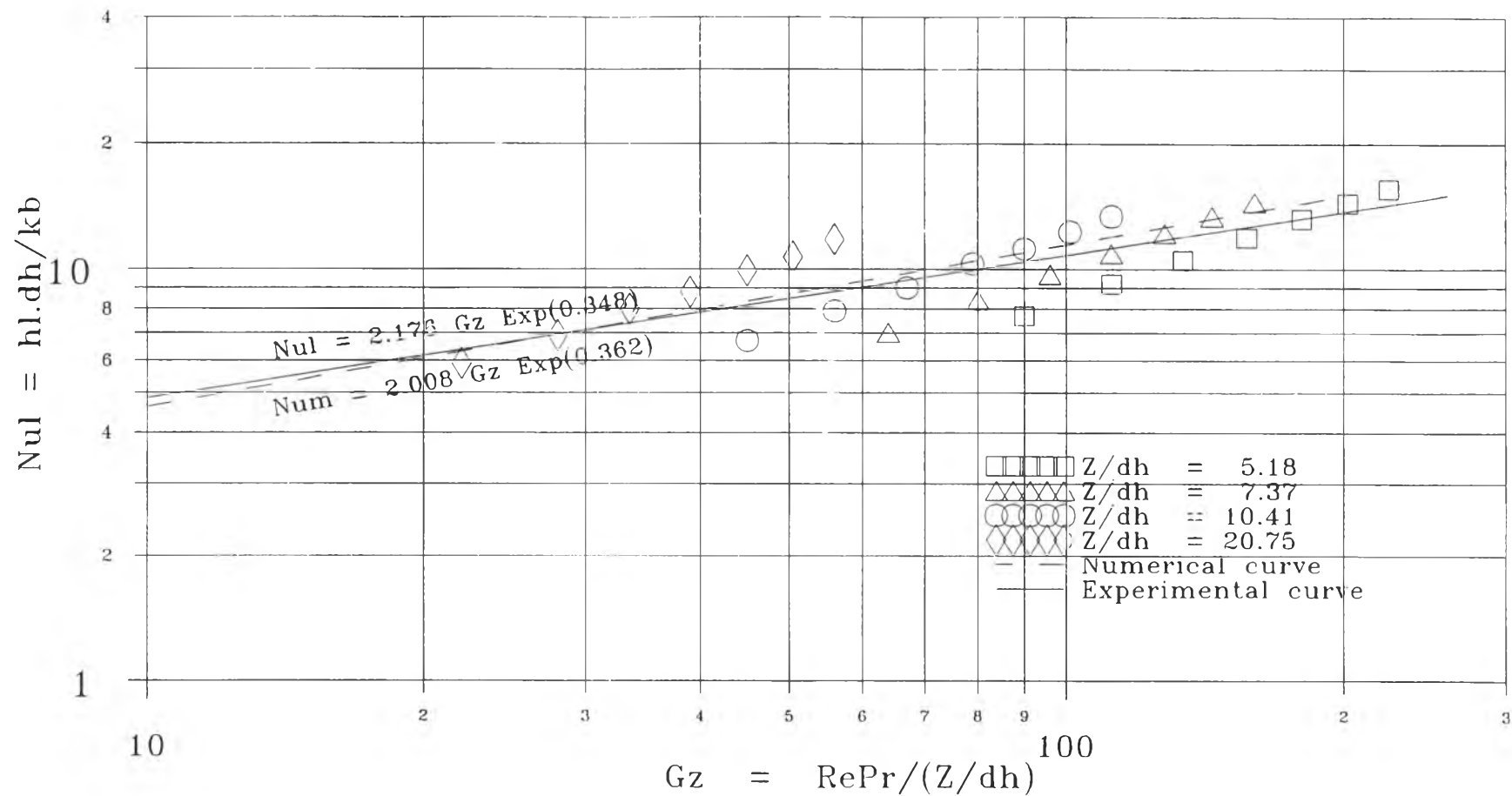


FIG 5.4 Measured logarithmic mean Nusselt Numbers,  $Nul$ , plotted against Graetz Numbers,  $Gz$ , for simultaneously developing profiles in equilateral triangular duct with constant heat flux, P. Wibuswas (1966).

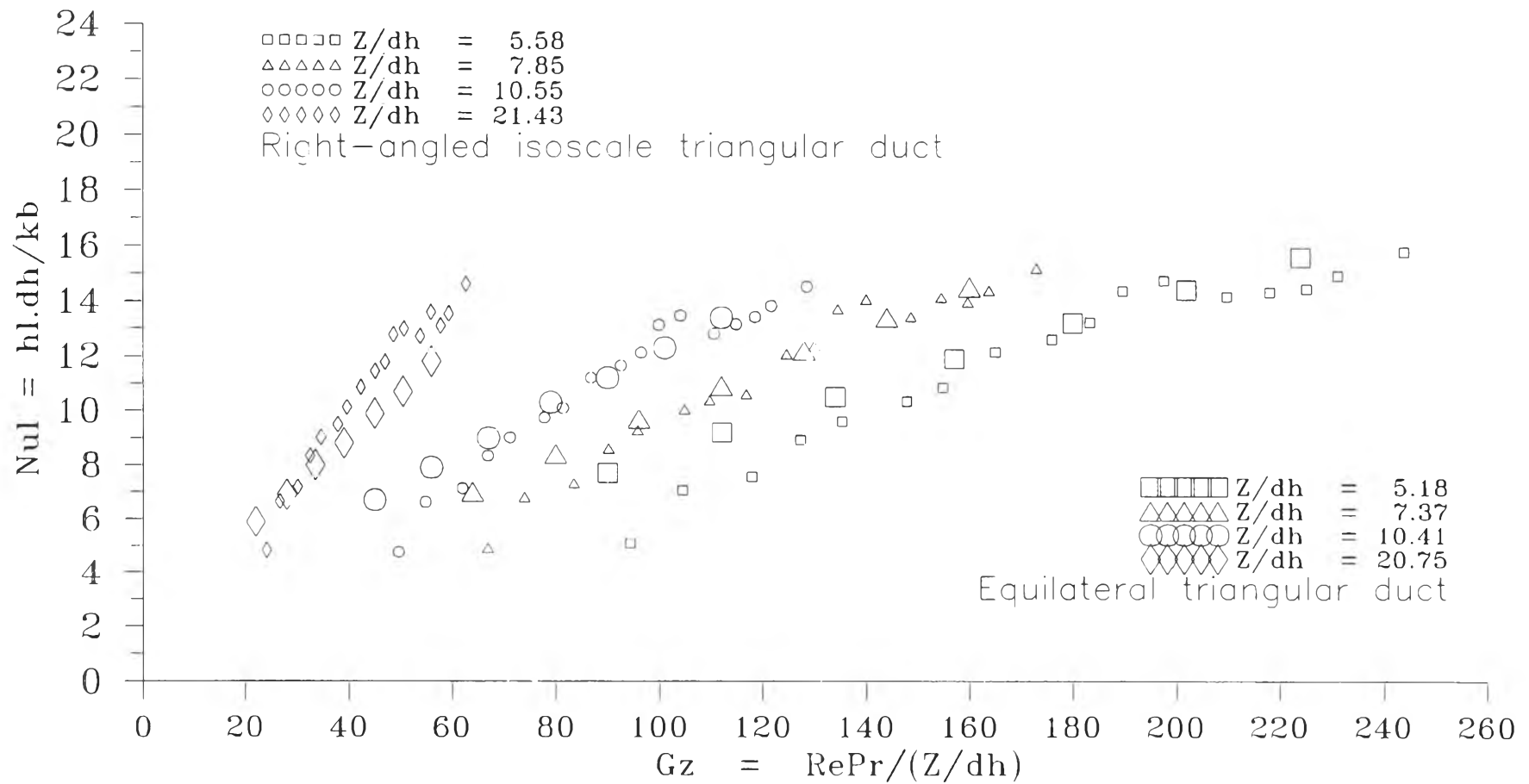


FIG 5.5 Measured logarithmic mean Nusselt Numbers,  $Nu_l$ , plotted against Graetz Numbers,  $Gz$ , for simultaneously developing profiles in equilateral and right-angled isoscales triangular duct with constant heat flux.

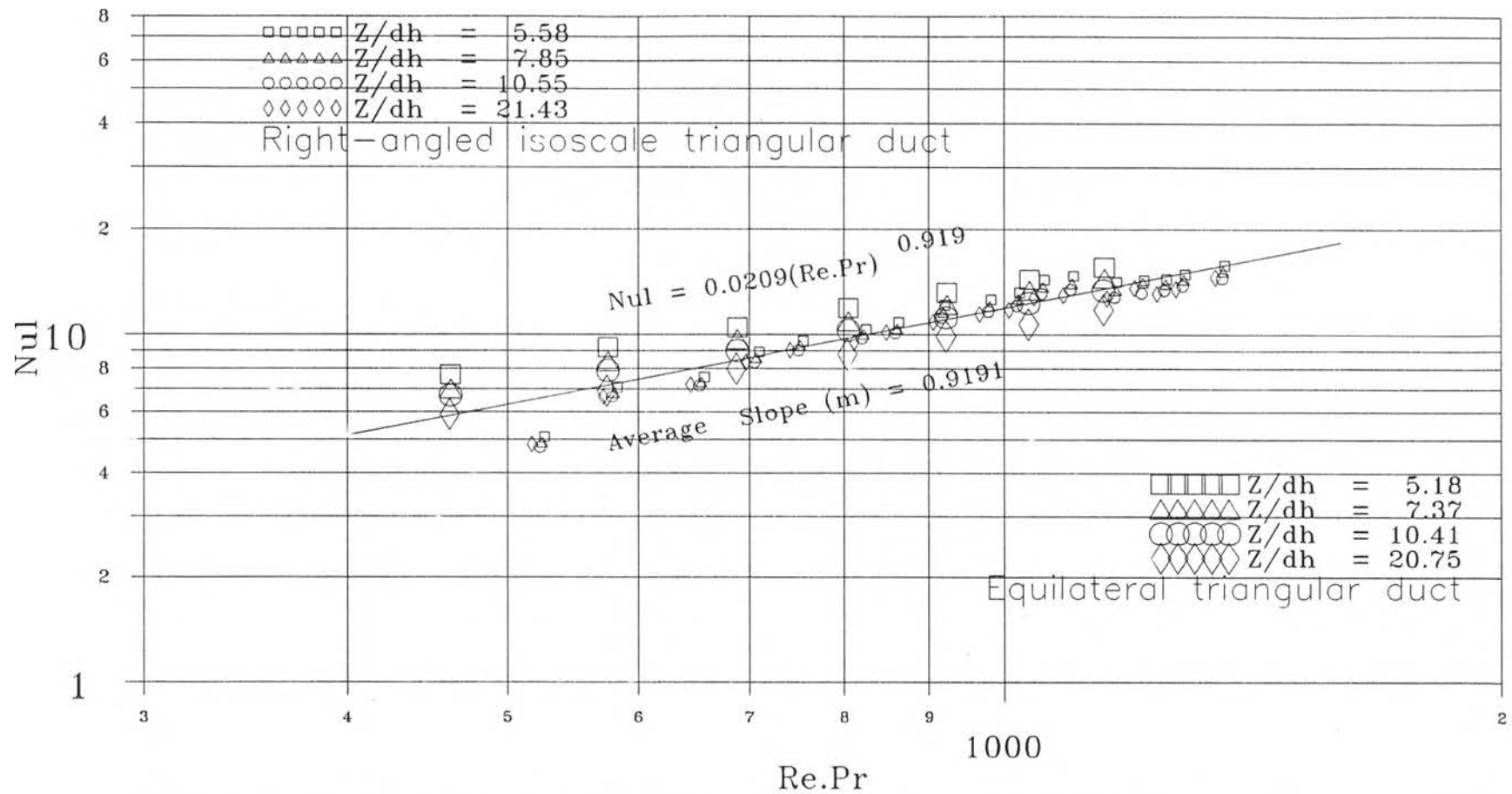


FIG 5.6 Measured logarithmic mean Nusselt Numbers,  $Nu$ , plotted against  $Re.Pr$  for simultaneously developing profiles in equilateral and right-angled isosceles triangular duct with constant heat flux.



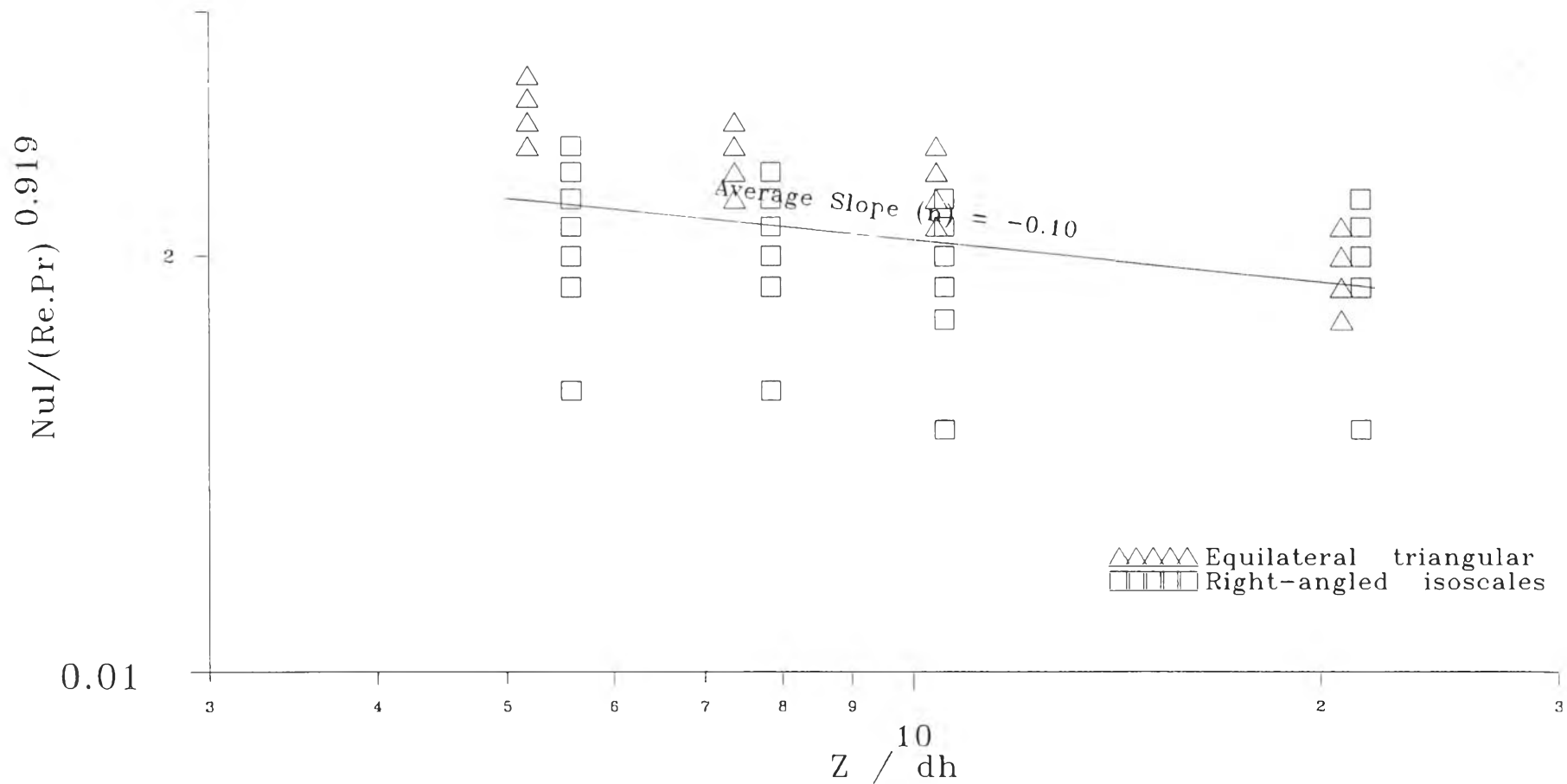


FIG 5.7 Measured logarithmic mean Nusselt Numbers,  $Nu_l$ , plotted against length diameter ratio,  $Z/dh$ , for simultaneously developing profiles equilateral and right-angled isosceles triangular duct with constant heat flux.

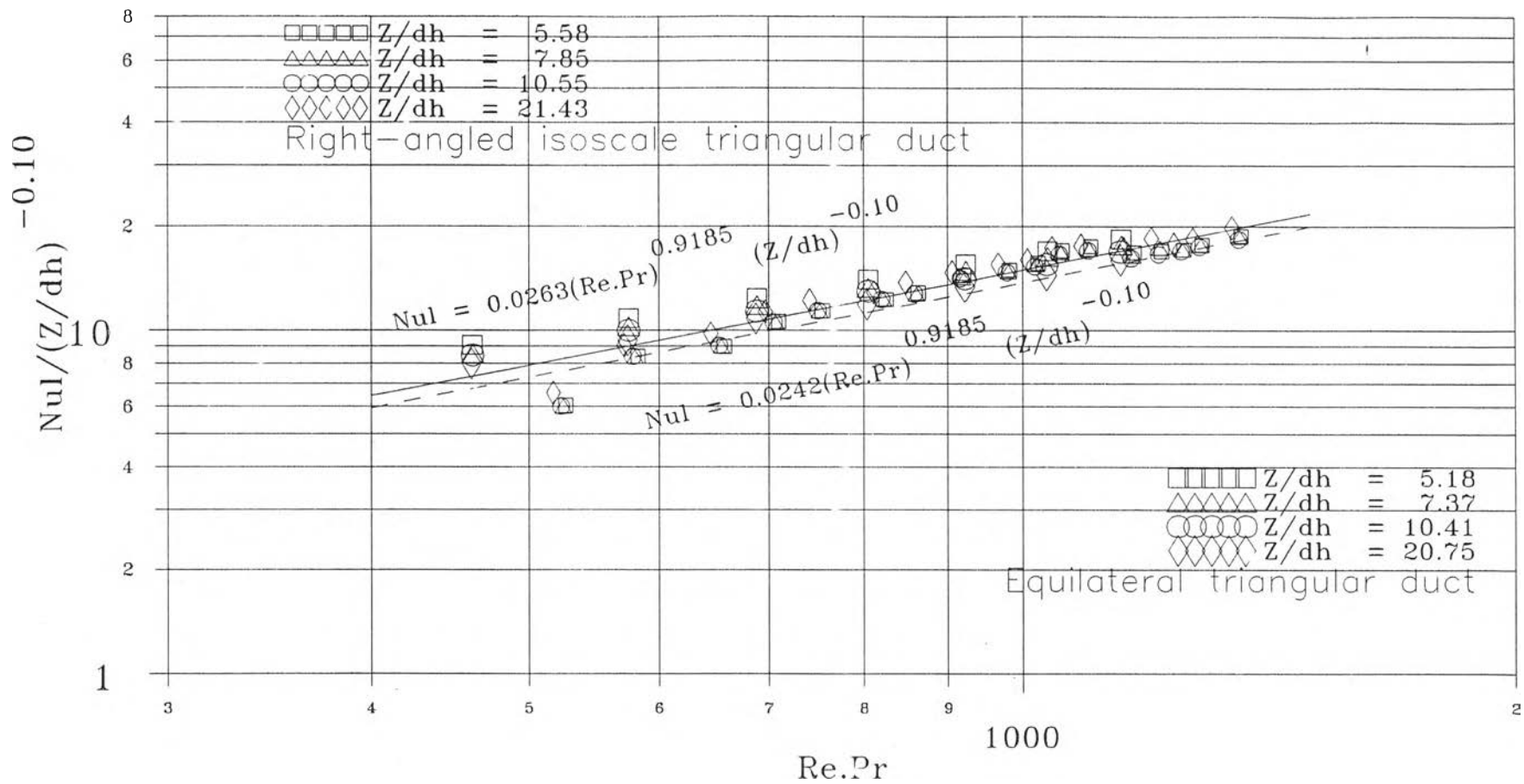


FIG 5.8  $Nul/(Z/dh)^{-0.1}$  plotted against  $Re.Pr$  for simultaneously developing profiles in equilateral and right-angled isoscales triangular duct with constant heat flux.

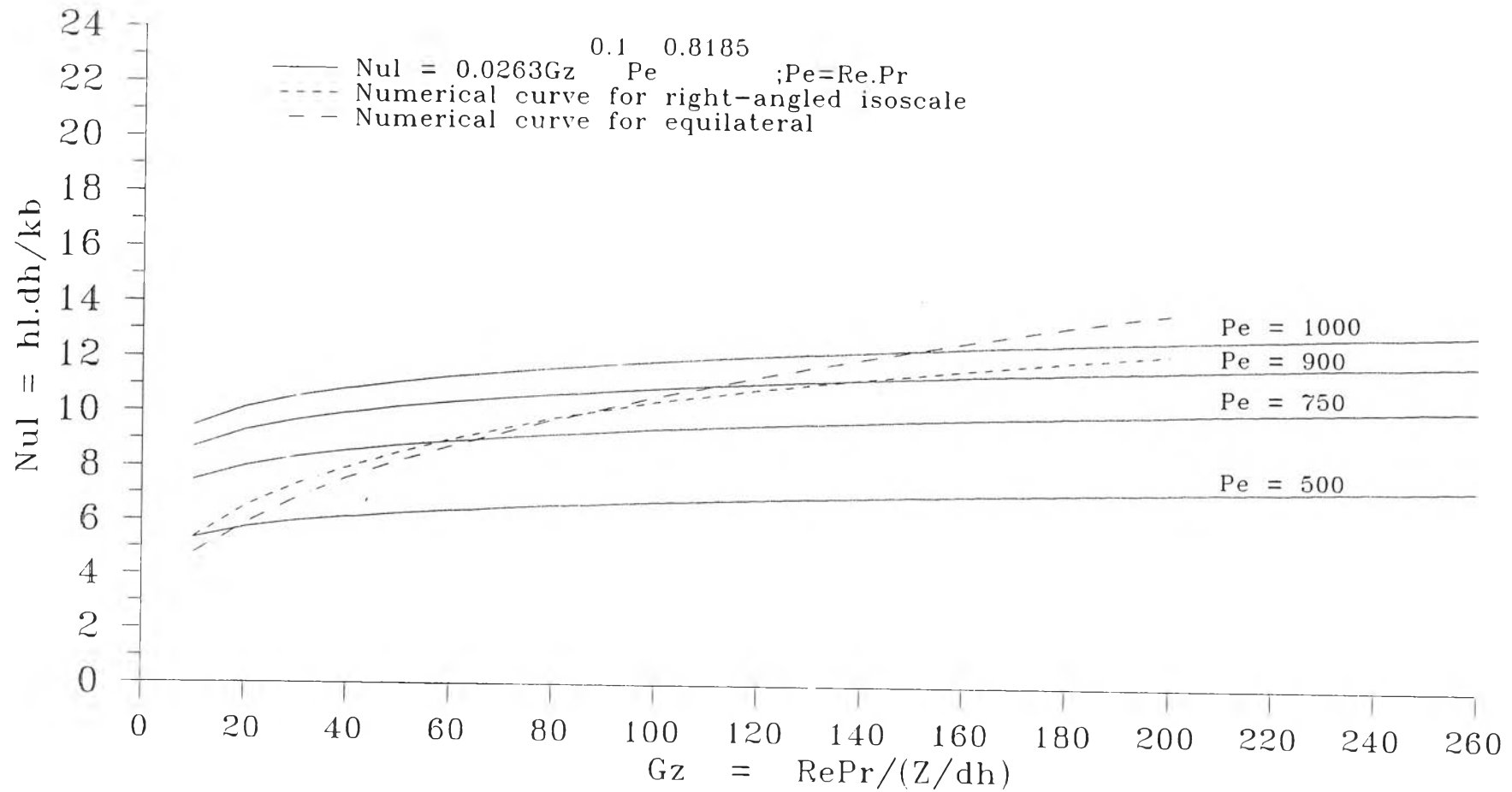


FIG 5.9 Measured logarithmic mean Nusselt Numbers,  $Nul$ , from empirical formula plotted against Graetz Numbers,  $Gz$ , and  $Pe = Re.Pr$  for comparison the result of Numerical method.



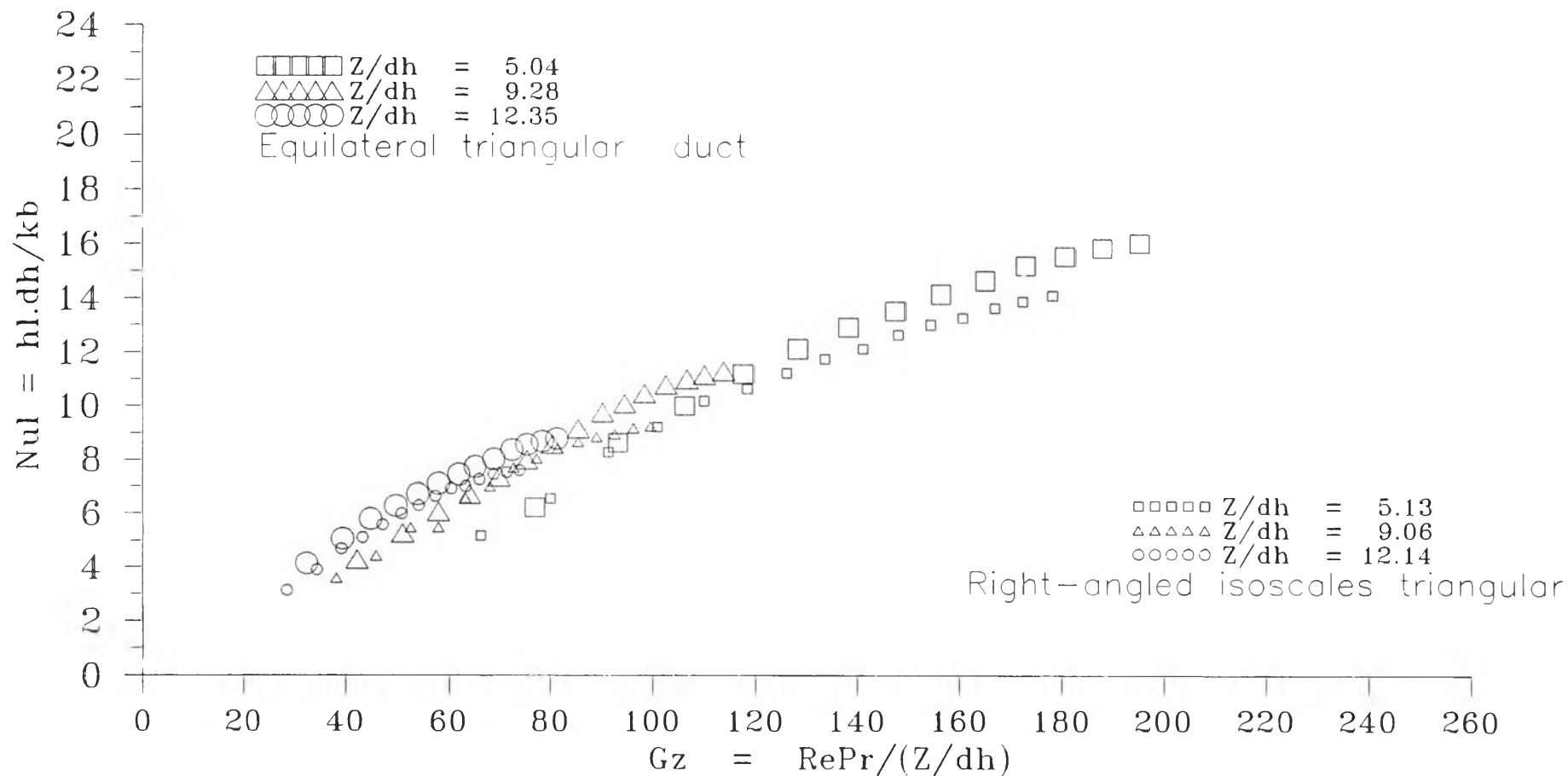


FIG 5.10 Measured logarithmic mean Nusselt Numbers,  $Nul$ , plotted against Graetz Numbers,  $Gz$ , for simultaneously developing profiles in equilateral and right-angled isosceles triangular duct with constant wall temperature by P.Tangsirimongkol.