

การทำนายคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของการไหลปั่นป่วนในท่อ ในช่วงเลขเรย์โนลด์ต่ำโดยใช้ k - ϵ model

Predicting of heat transfer characteristics for pipe flow at low Reynolds number using k - ϵ turbulence model

ภาคภูมิ ศรีมรินทร์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ถนน รังสิต - นครนายก ตำบล องค์กรักษ์ อำเภอ องค์กรักษ์ นครนายก 26120

โทร. 0-2664-1000 ต่อ 2064, 2055 แฟกซ์ 0-3732-2609 E-mail prakpum@swu.ac.th

สมชาย วงศ์วิเศษ

ห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์ของไหล วิศวกรรมอุณหภาพ และการไหลสองสถานะ (FUTURE)

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

91 ถนน ประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140 โทร 0-24709115 แฟกซ์ 0-24709111

E-mail somchai.won@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อน และลักษณะการไหลของอากาศภายในท่อที่ได้รับความร้อน โดยจะกำหนดให้อุณหภูมิผิวท่อช่วงที่ให้ความร้อนมีอุณหภูมิผิวคงที่ตลอดช่วงทดสอบที่ 400 K อากาศที่ทางเข้ามีอุณหภูมิ 300 K และอากาศมีลักษณะการไหลปั่นป่วนในช่วงเลขเรย์โนลด์ต่ำ ตั้งแต่ 10,000 – 50,000 โดยได้นำสมการ k - ϵ model มาตราฐานมาทำนายการไหลในช่วงดังกล่าวแล้ว นำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของอากาศภายในท่อที่ได้จากการคำนวณใหม่นี้มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองในอดีต ในช่วงการไหลปั่นป่วนในช่วงเลขเรย์โนลด์ต่ำซึ่งพบว่ามีความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยร้อยละ 5.6 และในการไหลปั่นป่วนในช่วงเลขเรย์โนลด์สูงพบว่ามีความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยร้อยละ 3.0 นอกจากนั้นแล้วแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ยังสามารถใช้ทำนายเลขนัสเซิลต์ ฟลักซ์ความร้อน และการกระจายของอุณหภูมิของของไหลภายในท่อได้ด้วย

Abstract

Heat transfer and flow characteristics of air flowing through a heated pipe are studied. The low Reynolds numbers turbulence flow in this study is in the range of 10,000 to 50,000. The inlet air temperature is kept constant at 300 K while pipe wall temperature is maintained at 400 K. The heat transfer coefficients of air in pipe are calculated by using the standard k - ϵ model and are compared with the measured data obtained from the previous literature. The mean errors of heat transfer coefficient are 5.6 and 3.0 percent for low and high Reynolds number,

respectively. The Nusselt number, heat flux and temperature distribution of air flow can also be predicted by this model.

1. บทนำ

การถ่ายเทความร้อนของของไหลภายในท่อมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อขบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในชีวิตประจำวัน อาทิเช่น เครื่องปรับอากาศ เครื่องทำความเย็น ด้วยเหตุนี้ในการที่เราสามารถทราบถึงคุณลักษณะของการถ่ายเทความร้อน และลักษณะการไหลของของไหลภายในท่อ จึงเป็นประโยชน์อย่างมากในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การไหลของของไหลภายในท่อที่มีลักษณะการไหลปั่นป่วนในช่วง เลขเรย์โนลด์ต่ำ (Low Reynolds Number Turbulence Flow, LRNTF) ที่มีการถ่ายเทความร้อนนั้นก็เป็นลักษณะการไหลของของไหล ในอีกลักษณะหนึ่งที่มีนักวิจัยให้ความสำคัญในการหาสมการทำนายคุณลักษณะการไหล และการถ่ายเทความร้อน

ในอดีตที่ผ่านมา มีนักวิจัยหลายท่านได้หาสมการที่จะใช้ในการทำนายลักษณะการไหลปั่นป่วน Harlow และ Nakayama [1] ได้นำสมการ k - ϵ model มาใช้ในการทำนายผลของการไหลปั่นป่วนเป็นครั้งแรก หลังจากนั้น Rodi และ Spalding [2] และ Ng และ Spalding [3-4] ได้นำ k - ϵ model มาใช้ในการทำนายผลการไหลปั่นป่วนในช่วงเลขเรย์โนลด์สูง (High Reynolds Number Turbulence flow, HRNTF) โดยไม่คิดถึงผลของผนังท่อ Spalding [5-7] Gibson และ Spalding [8] และ Saffmann [9] ได้นำเสนอ k - ω model ซึ่งในการวิเคราะห์ก็ใช้วิธี

RECEIVED 21 January, 2003

ACCEPTED 11 January, 2004

เดียวกับ $k - \epsilon$ model ในส่วนของสมการ $k - \epsilon$ model ได้มีการพัฒนาสมการค่าคงที่ต่างๆ โดยนักวิจัยอีกหลายท่านเพื่อใช้ในแต่ละกรณีจึงทำให้สมการ $k - \epsilon$ model มีหลายรูปแบบ

ในงานวิจัยนี้เป็นการทดสอบการไหลปั่นป่วน ในช่วงการไหลแบบ LRNTF ซึ่งในอดีตที่ผ่านมาก็มีผู้ทำการศึกษาไว้ Lam และ Bremhorst [10] ศึกษาเปรียบเทียบการนำ สมการ $k - \epsilon$ model มาทำนายผลของการไหลแบบ HRNTF และการไหลแบบ LRNTF Patel และคณะ [11] ศึกษาเปรียบเทียบความเร็วของการไหลบริเวณใกล้ผนังท่อ Martinuzzi และ Pollard [12] ได้เปรียบเทียบอัตราส่วนความเร็วของการไหลในท่อ และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับพิกัดหน้าตัดของท่อ Hrenya และคณะ [13] ได้เปรียบเทียบอัตราส่วนความเร็วของการไหลในท่อ และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับพิกัดหน้าตัดของท่อ Hrenya และคณะ [14] ได้เปรียบเทียบเลขนัยสเกลต์กับเลขเรย์โนลด์สจากค่าที่ได้จากการคำนวณ

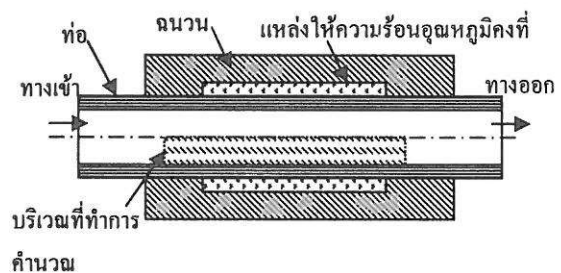
จากงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตนักวิจัยได้ใช้ $k - \epsilon$ model ในการศึกษาลักษณะการไหลปั่นป่วน สำหรับการไหลแบบ LRNTF โดยเฉพาะบริเวณใกล้ผนังได้มีนักวิจัยบางท่านได้ปรับปรุง และแก้ไขสมการ แต่จากการปรับปรุง และแก้ไขนั้นทำให้สมการมีความซับซ้อนและยุ่งยากในการคำนวณอันเนื่องมาจากตัวแปร และเทอมของสมการที่เพิ่มขึ้นมาทั้งยังมีข้อจำกัดในการใช้งานคือสามารถใช้ได้เฉพาะช่วงการไหลแบบ LRNTF เท่านั้น

ในงานวิจัยนี้จะแสดงการนำ $k - \epsilon$ model มามาตรฐานมาทำนายลักษณะการถ่ายเทความร้อนของของไหลภายในท่อในช่วงการไหลแบบ LRNTF ซึ่งจะเป็นการทำนายค่าตลอดทั้งหน้าตัดท่อ สมการที่ใช้จะมีความยุ่งยาก และซับซ้อนน้อยกว่าวิธีที่เคยปรากฏอีกทั้งยังสามารถทำนายการไหลได้ทั้งการไหลแบบ HRNTF และการไหลแบบ LRNTF โดยจะศึกษาการไหลของของไหลภายในท่อกลมแนวนอนที่มีการให้ความร้อนจากผนังท่อ และรักษาให้อุณหภูมิผิวท่อคงที่ตลอดช่วงการไหลแบบ LRNTF โดยกำหนดให้อุณหภูมิของของไหลที่ทางเข้ามีอุณหภูมิคงที่ โดยจะนำผลการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนไปเปรียบเทียบกับผลการทดลอง เพื่อแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถใช้ทำนายปรากฏการณ์ได้ นอกจากนั้นแบบจำลองยังสามารถทำนายเลขนัยสเกลต์ ความเร็วของการไหล พลิกซ์ความร้อน และการกระจายของอุณหภูมิของของไหลภายในท่ออีกด้วย

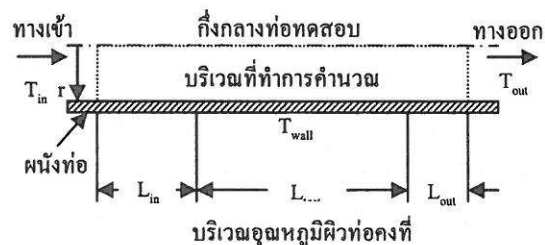
2. สมการที่ใช้ในการคำนวณ

ลักษณะปัญหาที่เราจะวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ จะเป็นการไหลของของไหลในท่อทรงกระบอกยาวแนวนอน โดยจะมีการให้ความร้อนแก่ของไหลผ่านผนังท่อโดยจะรักษาให้อุณหภูมิที่ผิวท่อคงที่ที่ T_{wall} ตลอดช่วงของการให้ความร้อน โดยมีอุณหภูมิทางเข้าคงที่ที่ T_{in} และมีความเร็วตามค่าเลขเรย์โนลด์สตั้งแต่ 10,000 – 50,000 ท่อทดสอบแสดงในรูปที่ 1

ขอบเขตของบริเวณที่คำนวณแสดงดังรูปที่ 2 โดยมีระยะท่อที่ให้ความร้อน L_{heat} เป็น 22 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อเพื่อให้ของไหลรับความร้อนได้อย่างเต็มที่ และมีระยะก่อนทางเข้าในส่วนที่ให้ความร้อนเท่ากับ L_{in} เพื่อให้อากาศที่เข้าท่อในช่วงที่ได้รับความร้อน ได้มีการไหลแบบพัฒนาเต็มรูป (Fully Developed Flow) และมีระยะทางออกยาวจากส่วนที่ให้ความร้อนเท่ากับ L_{out} เพื่อเว้นระยะในการกระจายความร้อนจากผนังท่อสู่ของไหลในช่วงปลายท่อทดสอบที่ให้ความร้อน ในส่วนการคำนวณจะคำนวณเป็น 2 มิติ และเนื่องจากเป็นท่อทรงกระบอกสมมาตรกันทำให้ในการวิเคราะห์ใช้เพียงครึ่งท่อแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 แสดงท่อทดสอบ



รูปที่ 2 บริเวณที่ทำการคำนวณ

สมการที่ใช้ในการคำนวณจะประกอบไปด้วยสมการ $k - \epsilon$ model สมการโมเมนตัม และสมการพลังงาน

สมการ Turbulence kinetic energy (k) และสมการ Dissipation of kinetic energy (ϵ) มีรูปแบบของสมการตามลำดับดังนี้

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u \frac{\partial k}{\partial x} + \rho v \frac{\partial k}{\partial r} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} + \mu \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} + \mu \right) \frac{\partial k}{\partial r} \right] \\ &+ \mu \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] \\ &- \rho \epsilon \end{aligned} \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} + \mu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} + \mu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right] + c_{1\mu} \frac{\varepsilon}{k} \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] - c_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

โดยที่

$$\mu_t = c_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

โดยค่าคงที่ในสมการ k - ε model มีดังนี้

$$C_\mu = 0.09, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$$

ในการคำนวณจะทำการคำนวณจาก เงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) และเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) ที่ทำการกำหนดให้ โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณจะประกอบไปด้วยสมการดังต่อไปนี้

สมการโมเมนตัมแกน - r

$$\rho \frac{\partial v_r}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v_r}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v_r}{\partial r} = \rho g_r - \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[2r(\mu + \mu_t) \frac{\partial v_r}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial x} \right) \right] + \frac{2\mu v_r}{r^2} \quad (4)$$

สมการพลังงาน

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho c_p v \frac{\partial T}{\partial r} + = \frac{\partial}{\partial x} \left[(\lambda + \lambda_t) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r(\lambda + \lambda_t) \frac{\partial T}{\partial r} \right] + q_v \quad (5)$$

โดยค่าการนำความร้อนปั่นป่วน (Turbulence conductivity, λ_t) หาได้จาก

$$\lambda_t = \frac{\mu_t c_p}{Pr_t} \quad (6)$$

ตัวโปรแกรมจะทำการคำนวณหาค่าฟลักซ์ความร้อน, q'' , และอุณหภูมิของไหลในท่อ, T_b , หลังจากนั้นจะทำการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, h , จากสมการ

$$h = \frac{q''}{(T_{wall} - T_b)} \quad (7)$$

และตัวเลขนัสเซิลด์สามารถหาได้จากสมการ

$$Nu = \frac{hD}{\lambda} \quad (8)$$

โดยค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity, λ), ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) จะได้จากค่าจากคุณสมบัติของไหล และเงื่อนไขในการคำนวณตามลำดับ ในส่วนของสหสัมพันธ์ที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบประกอบไปด้วยสมการดังต่อไปนี้

สหสัมพันธ์ ของ Dittus-Boelter [15] :

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (9)$$

สหสัมพันธ์ของ Gnielinski [16] :

$$h = \frac{(f_i/2)(Re-1000)Pr}{1.07+12.7\sqrt{f_i/2}(Pr^{2/3}-1)} \frac{\lambda}{D} \quad (10)$$

ซึ่ง

$$f_i = \frac{1}{(1.58 \ln Re - 3.28)^2} \quad (11)$$

สหสัมพันธ์ของ Sleigher และ Rouse [17] :

$$Nu = 5 + 0.012 Re^{0.83} (Pr + 0.29) \quad (12)$$

3. ขั้นตอนการคำนวณ

ในการคำนวณผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม CFXDesign ในการวิเคราะห์หาคำตอบ โดยมีโปรแกรม MSC/NASTRAN ทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และเงื่อนไขเริ่มต้น ดังแสดงไว้แล้วในตารางที่ 1 ขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรมจะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 3.1 กำหนดเงื่อนไขขอบเขต เงื่อนไขเริ่มต้น และทำการสมมุติค่าเริ่มต้น
- 3.2 กำหนดเงื่อนไขในการคำนวณ เป็นการไหลในท่อ แบบปั่นป่วน มีการถ่ายเทความร้อน
- 3.3 คำนวณสมการโมเมนตัมเพื่อทำการหาความเร็ว จากสมการที่ (4)
- 3.4 คำนวณสมการพลังงานเพื่อหาพลังงานรวมจำเพาะ จากสมการที่ (5)
- 3.5 คำนวณค่าพลังงานจลน์ของการไหลปั่นป่วน และอัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ของการปั่นป่วนโดยใช้แบบจำลอง k - ε model จากสมการที่ (1) และ (2)

3.6 กลับไปทำตามขั้นตอนที่ 3.3 – 3.5 ใหม่จนกระทั่งค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่าเดิม

นำค่าที่ได้มาทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากสมการที่ (8) โดยตัวโปรแกรมจะทำการคำนวณหาค่าฟลักซ์ความร้อน และอุณหภูมิของไหลในท่อ หลังจากนั้นจึงคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ, D (cm.)	10
ความยาวท่อทางเข้า, L_{in} (cm.)	100
ความยาวท่อช่วงให้ความร้อน, L_{test} (cm.)	220
ความยาวท่อทางออก, L_{out} (cm.)	50
อุณหภูมิทางเข้า, T_{in} (K)	300
อุณหภูมิผนังท่อที่ให้ความร้อน, T_{wall} (K)	400

ตารางที่ 1 แสดงขนาดท่อทดสอบ และสภาวะที่ใช้ในการคำนวณ

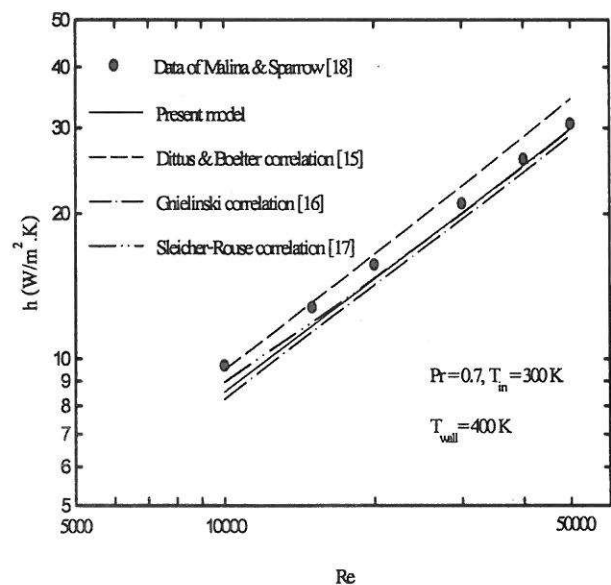
4. ผลการคำนวณและการวิเคราะห์

รูปที่ 3 และรูปที่ 4 เป็นรูปที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน กับเลขเรย์โนลด์สในช่วงการไหลแบบ LRNTF ตั้งแต่ 10,000 ถึง 50,000 จากรูปทั้งสองจะแสดงให้เห็นว่ายิ่งค่าเลขเรย์โนลด์สมีค่าสูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนก็จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ในส่วนของการเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่าจากรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ที่ได้จาก $k - \epsilon$ model มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากผลการทดลองของ Malina และ Sparrow [18] สหสัมพันธ์ของ Gnielinski [16] และ Sleicher - Rouse [17] สมการของ Launder และ Sharma [20] ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถใช้ $k - \epsilon$ model ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบ LRNTF ได้โดยมีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองประมาณ 5.6% และให้ค่าใกล้เคียงกับสหสัมพันธ์อื่นๆ

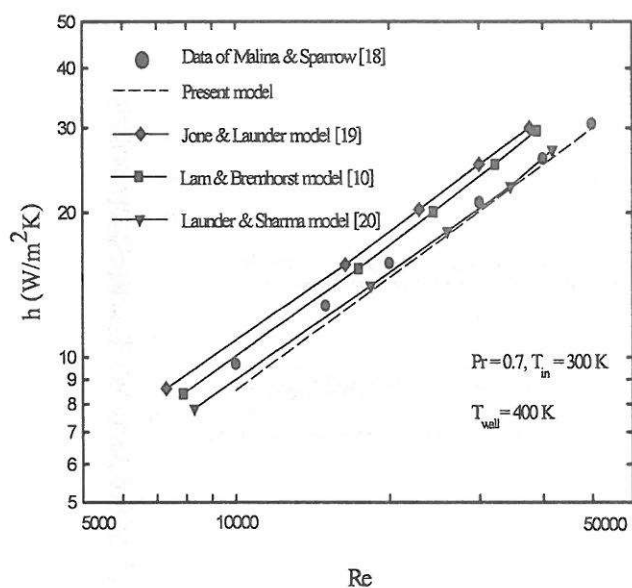
รูปที่ 5 เป็นรูปที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน กับเลขเรย์โนลด์สสำหรับช่วงการไหลแบบ HRNTF ตั้งแต่ 50,000 ถึง 500,000 จากรูปจะแสดงให้เห็นว่า $k - \epsilon$ model ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากผลการทดลองของ Malina และ Sparrow สหสัมพันธ์ของ Gnielinski และ Sleicher - Rouse โดยประมาณ 3.0% และมีค่าไม่ต่างจากสหสัมพันธ์ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมการ $k - \epsilon$ model ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ สามารถทำการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบ HRNTF ได้

รูปที่ 6 เป็นรูปที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ความร้อนกับความยาวของท่อทดสอบ ที่เลขเรย์โนลด์สเท่ากับ 10,000 20,000 30,000 40,000 และ 50,000 ในรูปจะแสดงในส่วนของการทดสอบ ที่มีการให้ความร้อนที่ผิวท่อโดยกำหนดให้อุณหภูมิผิวท่อคงที่ที่ 400 K ตลอด

ช่วงที่ให้ความร้อน อากาศทางเข้ามีอุณหภูมิ 300 K จากรูปอากาศจะเคลื่อนที่จากทางซ้ายไปทางขวาของรูป ผ่านท่อทดสอบที่ให้ความร้อนจากผิวท่อ โดยในส่วนของการทดสอบที่ให้ความร้อนจะอยู่ในช่วงความยาว 1 ถึง 3.2 m. ตามแนวแกน x จากกราฟจะเห็นได้ว่าที่บริเวณทางเข้าค่าฟลักซ์ความร้อนจะมีค่าสูงที่สุด และจะลดลงอย่างรวดเร็วจนมีค่าเกือบคงที่ที่บริเวณทางออก สาเหตุเนื่องมาจากการที่บริเวณทางเข้าของไหลมีอุณหภูมิต่ำทำให้ผลต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศกับผิวท่อมีค่าสูงทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนทำได้ดี ดังนั้นการที่จะทำให้อุณหภูมิที่ผิวท่อมีอุณหภูมิคงที่ได้นั้นจึงจำเป็นต้องให้ความร้อนสูง เมื่ออากาศได้รับความร้อนอุณหภูมิของอากาศก็จะสูงขึ้น ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างอากาศกับผิวท่อก็จะลดลงการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศกับผิวท่อก็จะลดต่ำลงตามไปด้วย ทำให้การให้ความร้อนที่ผิวท่อเพื่อที่จะทำให้อุณหภูมิที่ผิวท่อคงที่ก็จะลดต่ำลงด้วยในส่วนของการเปรียบเทียบกันระหว่างเลขเรย์โนลด์สต่างๆ กันนั้นจะเห็นได้ว่าที่เลขเรย์โนลด์สสูงค่าฟลักซ์ความร้อนที่ให้อุณหภูมิผิวท่อสูงขึ้นตาม โดยที่อุณหภูมิผิวท่อ 400 K เลขเรย์โนลด์ส 10,000 ที่ทางเข้ามีฟลักซ์ความร้อนประมาณ 800 W/m² ส่วนที่เลขเรย์โนลด์ส 50,000 ที่ทางเข้ามีค่าฟลักซ์ความร้อนประมาณ 2,800 W/m² ทั้งนี้เนื่องจากยิ่งอากาศมีความเร็วมากก็จะทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่าง อากาศกับผิวท่อดีขึ้น ดังนั้นการที่จะรักษาให้อุณหภูมิที่ผิวท่อคงที่ได้จำเป็นต้องต้องให้ปริมาณความร้อนที่สูงกว่าปกติ



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน กับค่าเลขเรย์โนลด์ส



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับค่าเลขเรย์โนลด์ส

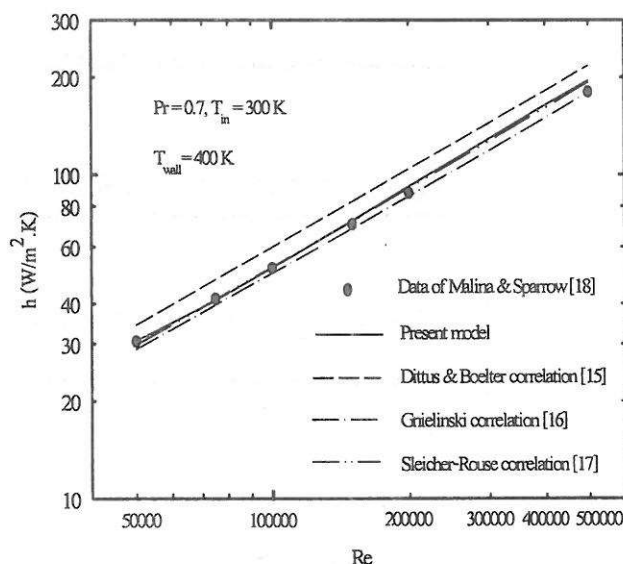
รูปที่ 7-9 เป็นรูปที่แสดงลักษณะการกระจายของอุณหภูมิที่เลขเรย์โนลด์สเท่ากับ 10,000 30,000 และ 50,000 ตามลำดับในส่วนของการให้ความร้อนกำหนดให้ผิวที่มีอุณหภูมิคงที่ที่ 400 K อากาศทางเข้ามีอุณหภูมิ 300 K จากรูปอากาศที่มีอุณหภูมิ 300 K จะเคลื่อนที่จากซ้ายไปขวาผ่านท่อทดสอบที่ให้ความร้อนจากผิวท่อ จะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ การกระจายของอุณหภูมิจะค่อยๆ แผ่กระจายไปตามความยาวของท่อทดสอบ โดยอุณหภูมิในรูปจะเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยเป็นชั้นๆ โดยชั้นที่มีอุณหภูมิสูงจะอยู่บริเวณผิวท่อ และจะค่อยๆ หนาขึ้นตามความยาวท่อทดสอบ และที่เลขเรย์โนลด์สมีค่าสูงขึ้นการกระจายของแถบสีอุณหภูมิก็จะน้อยลง

5. สรุป

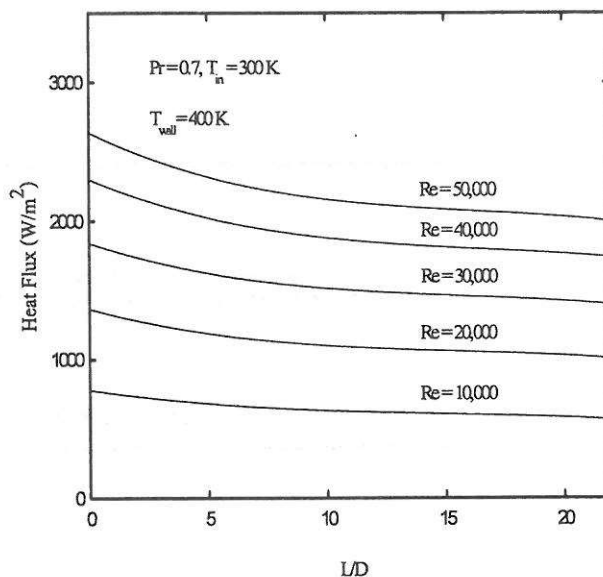
จากการใช้ $k - \epsilon$ model มาตรฐานในการวิเคราะห์การไหลของของไหลในท่อกลมวางแนวนอนที่มีการให้ความร้อนจากผิวท่อ โดยกำหนดให้อุณหภูมิที่ผิวท่อคงที่ตลอดช่วงที่ให้ความร้อน โดยของไหลที่ทางเข้ามีอุณหภูมิคงที่ และมีลักษณะการไหลปั่นป่วนในช่วงเลขเรย์โนลด์สต่ำพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้มีค่าต่างจากผลการทดลองประมาณ 5.6%

สำหรับการเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ และ $k - \epsilon$ model ของนักวิจัยท่านอื่นพบว่าได้ผลใกล้เคียงกันสำหรับการวิเคราะห์การไหลปั่นป่วนในช่วงเลขเรย์โนลด์สสูง ผลจากการเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีความคลาดเคลื่อน 3.0% ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะใช้ $k - \epsilon$ model มาตรฐานในการทำนายลักษณะ

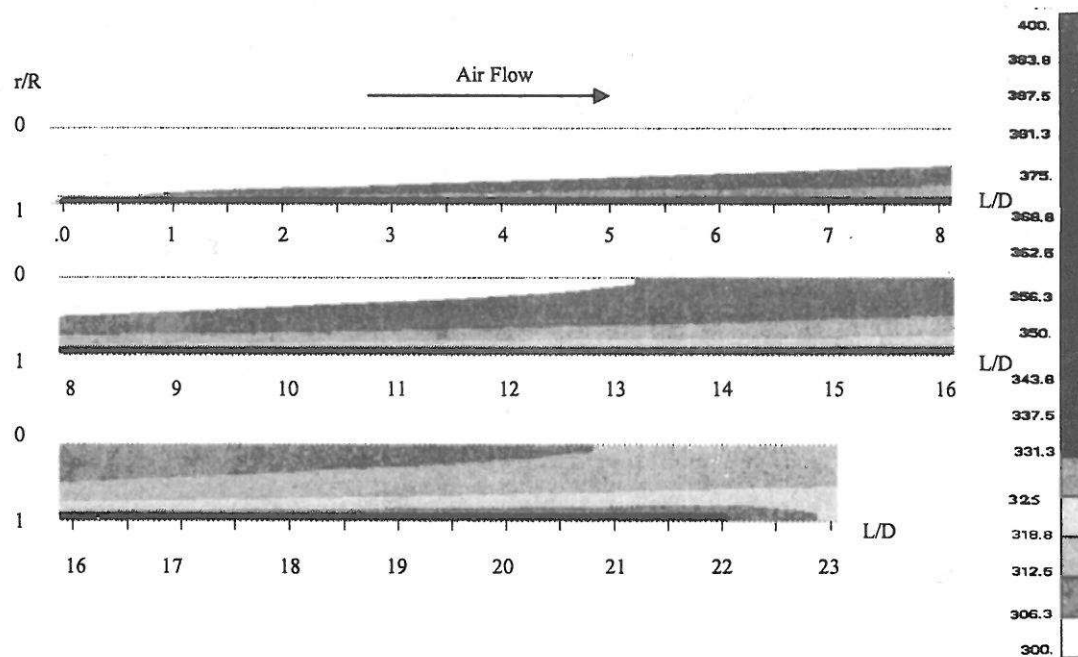
การถ่ายเทความร้อนของของไหลภายในท่อที่มีการไหลปั่นป่วนในช่วงเลขเรย์โนลด์สต่ำ และการไหลปั่นป่วนในช่วงเลขเรย์โนลด์สสูง นอกจากนั้นยังสามารถใช้ทำนายลักษณะอุณหภูมิในท่อทดสอบตลอดหน้าตัดของท่อทดสอบ และค่าฟลักซ์ความร้อนที่ให้กับผนังท่อได้ด้วย



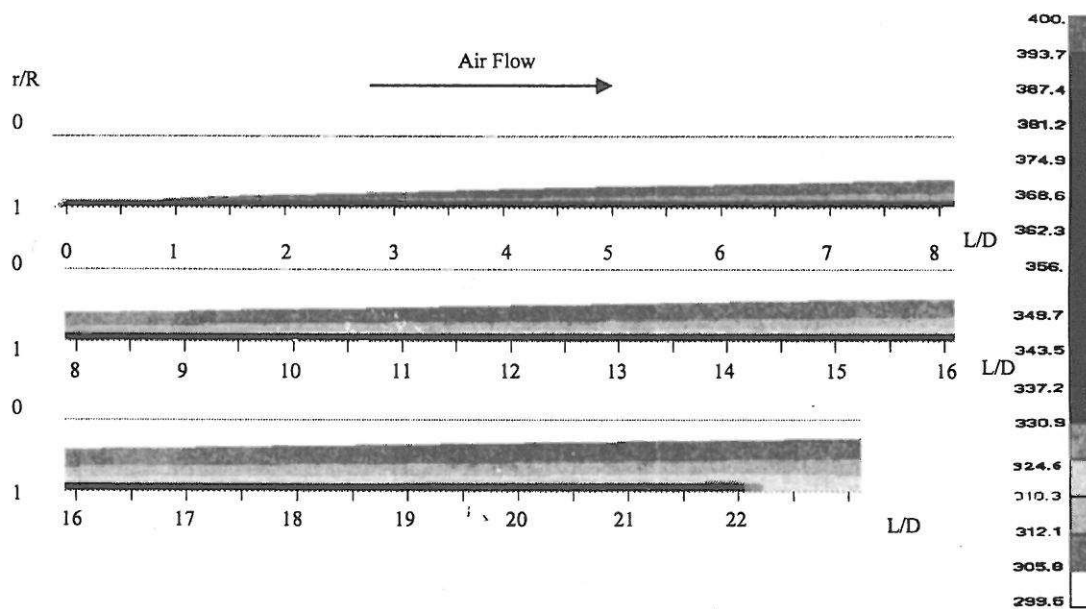
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน กับค่าเลขเรย์โนลด์ส



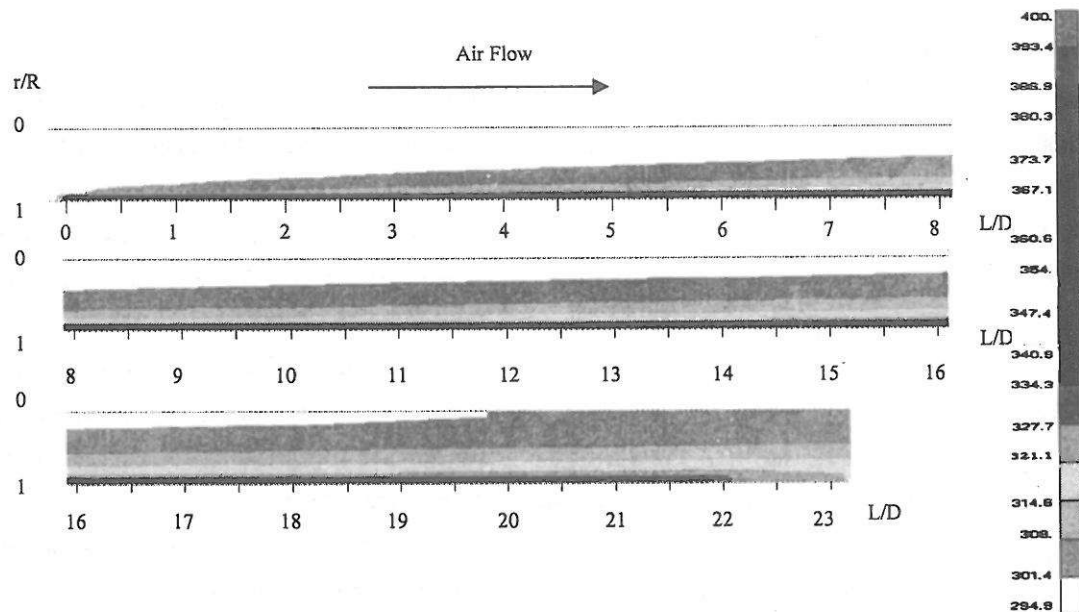
รูปที่ 6 ค่าฟลักซ์ความร้อนที่ให้กับของไหลในท่อตลอดความยาวท่อที่มีค่า $T_{in} = 300$ K $T_{wall} = 400$ K และ $Pr = 0.7$



รูปที่ 7 การกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศตามความยาวท่อทดสอบที่มีค่า $T_{in} = 300\text{ K}$ $T_{wall} = 400\text{ K}$
และ $Re = 10,000$



รูปที่ 8 การกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศตามความยาวท่อทดสอบที่มีค่า $T_{in} = 300\text{ K}$ $T_{wall} = 400\text{ K}$
และ $Re = 30,000$



รูปที่ 9 การกระจายตัวของอุณหภูมิของของไหลตามความยาวท่อทดสอบที่มีค่า $T_{in} = 300 \text{ K}$ $T_{wall} = 400 \text{ K}$
และ $Re = 50,000$

6. กิตติกรรมประกาศ

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่ได้ทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสำนักงานนโยบายพลังงานแห่งชาติ ผู้ดำเนินการวิจัยขอขอบพระคุณแหล่งทุนทั้งสองไว้ ณ ที่นี้

7. สัญลักษณ์

C_1, C_2, C_μ	=	ค่าคงที่ของสมการ k - ϵ model
C_p	=	ความร้อนเฉพาะ, J/kg.K
D	=	เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อด้านใน, m
f_i	=	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของของไหลภายในท่อ
g	=	ความเร่งจากแรงดึงดูด, m/sec ²
h	=	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, W/m ² .K
k	=	พลังงานจลน์ของการไหลปั่นป่วน, m ² /s ²
l	=	ขนาดของการไหลปั่นป่วน
L	=	ความยาวท่อ, m
Nu	=	เลขนัสเซิลต์
P	=	ความดัน, Pa
Pr	=	เลขพรันด์เทิล
q''	=	ฟลักซ์ความร้อน, W/m ²
q_v	=	ปริมาณความร้อนต่อปริมาตร, W/m ³
r	=	ระยะห่างจากกึ่งกลางท่อตามแนวรัศมี, m

R	=	รัศมีท่อ, m
Re	=	เลขเรย์โนลด์ส์
t	=	เวลา, sec
T	=	อุณหภูมิ, K
U, V, W	=	ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน x, y, z ตามลำดับ, m/s
x, y, z	=	ระยะ, m
ϵ	=	การกระจายของพลังงานจลน์ของการไหลปั่นป่วน, m ² /s ²
λ	=	ค่าการนำความร้อน, W/m.K
μ	=	ความหนืด, kg/s.m
ρ	=	ความหนาแน่น, kg/m ³
$\sigma_k, \sigma_\epsilon$	=	ค่าคงที่ของสมการ k - ϵ model
ν	=	ความหนืดเชิงจลน์, m ² /s
ω	=	เวลาเฉลี่ยของความเร็วที่แกว่งไปมา

ตัวห้อย

b	=	ตำแหน่งในท่อ
center	=	กึ่งกลางท่อ
in	=	ทางเข้า
out	=	ทางออก
t	=	การไหลปั่นป่วน
test	=	ช่วงท่อทดสอบ

wall = ที่ผนังท่อ

รายการค้าย่อ

การไหลปั่นป่วนในช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ต่ำ (Low Reynolds Number Turbulence Flow, LRNTF)

การไหลปั่นป่วนในช่วงเลขเรย์โนลด์ส์สูง (High Reynolds Number Turbulence Flow, HRNTF)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Harlow, F.H. and Nakayama, P., 1968, "Transport of turbulence energy decay rate", Los Alamos Science Lab., University California Report LA-3854.
- [2] Rodi, W. and Spalding, D.B., 1970, "A two parameter model of turbulence and its application to free jets", *Warme und STOFFUEBERTRAGUNG* 3, pp. 85.
- [3] Ng, K.H. and Spalding, D.B., 1970, *Predictions of two-dimensional boundary layers on smooth wall with a 2-equation model of turbulence*, Imperial College, Mechanical Engineering Department Report BL/TN/A/25.
- [4] Ng, K.H. and Spalding, D.B., 1972, "Some applications of a model of turbulence to boundary layers near wall", *Phys. Fluids* 15, pp. 20.
- [5] Spalding, D.B., 1969, *The prediction of two-dimensional, steady turbulent flows*, Imperial College, Heat Transfer Section Report EF/TN/A/16.
- [6] Spalding, D.B., 1971, "Concentration fluctuations in a round jet", *Journal Chemical Engineering Science*, Vol. 26, pp. 95.
- [7] Spalding, D.B., 1972, *The k - W model of turbulence*, Imperial college, Mechanical Engineering Department Report TM/TN/A/16.
- [8] Gibson, M.M. and Spalding, D.B., *A two-equation model of turbulence applied to the prediction of heat transfer in wall boundary layer*, ASME paper 72/HT/15.
- [9] Saffmann, P.G., 1970, *A model for inhomogeneous turbulent flow*, Proc. Roy. Soc. Ser. A317 pp. 417.
- [10] Lam, C. K. G. and Bremhorst, K., 1981, "A modified form of the k-ε model for predicting wall turbulence," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 103, pp. 456-460.
- [11] Patel, V. C., Rodi, W. and Scheuerer, G., 1985, "Turbulence models for new-wall and low Reynolds number flows : a review," *AIAA Journal*, Vol. 23, pp. 1308-1319.

- [12] Martinuzzi, R. and Pollard, A., 1986, "Comparative Study of Turbulence Model in Predicting Turbulent Pipe Flow Part I: Algebraic Stress and k - ε Models", *AIAA Journal*, Vol. 27, No. 1, pp. 29-36.
- [13] Hrenya, C. M., Bolio, E. J., Chakrabarti, D. and Sinclair, J. L., 1995, "Comparison of low Reynolds number k - ε turbulence model in predicting fully developed pipe flow", *Chemical Engineering Science*, Vol. 50, pp. 1923-1941.
- [14] Hrenya, C., and Miller, S., 1998, "Comparison of low Reynolds number k - ε turbulence models in predicting heat transfer rate for pipe flow", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, Iss. 11, pp. 1543-1547.
- [15] Incropera, F.P., and Dewitt, D.P., 1996, *Introduction to Heat Transfer*, John Wiley & Sons, Inc., 3rd.
- [16] Gnielinski, V., 1976, "New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow", *International Chemical Engineering*, Vol. 16, pp. 359-368.
- [17] Sleicher, C.A., and Rouse, M.W., 1975, "A convenient correlation for heat transfer to constant and variable property fluids in turbulent pipe flow", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 18, pp. 677-683.
- [18] Malina, J.A., and Sparrow, E. M., 1964, "Variable-property, constant-property, and entrance-region heat transfer results for turbulent flow of water and oil in a circular tube", *Chemical Engineering Science*, Vol. 19, pp. 953-962.
- [19] Jones, W.P. and Launder, B.E., 1972, "The Prediction of Laminarization with a Two-Equation Model of Turbulence", *International Journal of Heat Transfer*, Vol. 15, No. 2, pp. 301-314.
- [20] Launder, B. E. and Sharma, B. I., 1974, "Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc", *Letters on Heat Mass Transfer*, Vol. 1, pp. 131-138.