

การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนในใบพัดกังหันก๊าซ ที่มีเทอร์บิวเลเตอร์ติดตั้ง

Numerical Study of Turbulent Flow and Heat Transfer in Gas Turbine Blade with Turbulator

กิตติศักดิ์ คูวรัญญู และ สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
โทร.0-2218-6637 โทรสาร 0-218-2889 E-mail: fmespt@eng.chula.ac.th

Kittisak KAUWARANYU and Sompong PUTIVISUTISAK
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Chulalongkorn University, Pathumwan, Bangkok 10330 Thailand
Tel.0-2218-6637 Fax. 0-218-2889 E-mail: fmespt@eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการทำนายการไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนในช่องทางไหลภายในใบพัดกังหันก๊าซที่มีเทอร์บิวเลเตอร์ติดตั้ง โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มร่วมกับแบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ model ในที่นี้เราสนใจผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรหลักที่มีต่อการไหลและการถ่ายเทความร้อนในใบพัดกังหันก๊าซ เช่น ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์, Rib height และ Rib spacing ซึ่งจากผลการคำนวณที่ได้ พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรดังกล่าวมีผลต่อรูปร่างความเร็วของการไหลและการกระจายของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เปลี่ยนไป ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้เราสามารถนำไปใช้ในการออกแบบการถ่ายเทความร้อนในใบพัดกังหันก๊าซได้

Abstract

The heat transfer and flow phenomena around the turbulator in a gas turbine blade is numerically investigated. A turbulator is a set of obstacles inside the hollow blade which enhance the cooling of the blade. The computational domain in the blade is simplified as a rectangular channel with a row of mounted ribs. A finite volume method is employed. The standard $k-\epsilon$ model, together with the wall function, is used to simulate the turbulent transport quantities of the flow. The predictions are compared with the experimental data; and the effects of the primary parameters – Reynolds number, turbulator arrangement as well

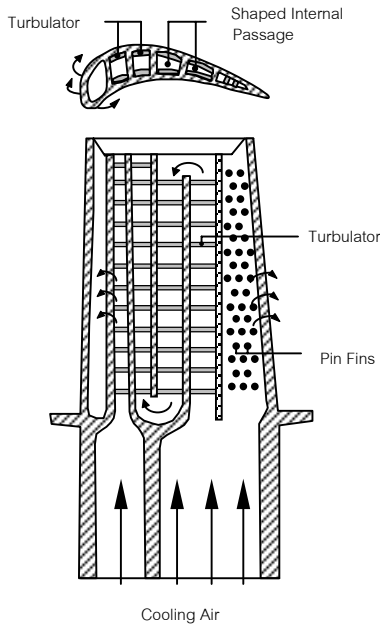
as rib height and spacing – on the heat transfer and flow in the channel are described. It is clear that the flow pattern and the distribution of the local heat transfer coefficients are significantly influenced by these primary parameters.

1. บทนำ

ในงานวิจัยนี้ เราจะทำการศึกษาปรากฏการณ์การไหลและการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์ทางวิศวกรรมแบบหนึ่ง คือ การระบายความร้อนในใบพัดกังหันของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ ซึ่งในการออกแบบให้เครื่องยนต์กังหันก๊าซนี้มีประสิทธิภาพทางความร้อน (Thermal efficiency) เพิ่มขึ้น และมีอายุการใช้งานของใบพัดกังหันที่ยาวนานขึ้นนั้นสามารถทำได้ 2 แนวทาง คือ ทำการวิจัยทางด้านวัสดุ (Material research) ที่ใช้ทำใบพัด และทำการวิจัยทางด้านเทคนิคการระบายความร้อนของใบพัดกังหัน (Turbine blade cooling techniques) ทั้งนี้ในการเปลี่ยนแปลงวัสดุที่ใช้ทำใบพัด เราจะต้องใช้ Super alloy ซึ่งมีความแข็งแรงและความทนทานต่ออุณหภูมิที่สูงได้ ซึ่งวัสดุประเภทนี้นอกจากมีราคาแพงมากแล้วยังหาได้ยากอีกด้วย ดังนั้นการออกแบบใบพัดกังหันก๊าซด้วยเทคนิคการระบายความร้อนที่เหมาะสมจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจกว่าการเลือกเปลี่ยนวัสดุ

วิธีการระบายความร้อนของใบพัดกังหันที่ถือว่าได้รับความนิยมใช้กันโดยทั่วไปและมีประสิทธิภาพอย่างมาก คือ การระบายความร้อนแบบ Internal forced convective ซึ่งเทคนิคนี้ถูกใช้เป็นเทคนิคหลักในการระบายความร้อนผ่านช่องทางการไหลที่คดเคี้ยวของอากาศภายใน

Blade นักอากาศยานศาสตร์ (Aerodynamicists) เรียก เส้นทางการไหลที่มีสิ่งกีดขวางวางเรียงห่างกันแบบซ้ำๆ นี้ว่า Turbulence promoter หรือ Turbulator (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 ลักษณะการระบายความร้อนโดยการพาความร้อนแบบบังคับภายในใบพัดกังหันก๊าซที่มีเทอร์บิวเลเตอร์

ในอดีตที่ผ่านมานักวิจัยจำนวนหนึ่งได้พยายามศึกษาปรากฏการณ์การไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านช่องทางไหลที่มีสิ่งกีดขวางติดตั้ง เช่น Liou et al. [1] ทำการทดลองและคำนวณโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\varepsilon$ สำหรับการไหลผ่านช่องทางไหลที่มีสิ่งกีดขวางติดตั้งทั้งด้านบนและล่างของผนัง โดยพวกเขาสนใจในส่วนของความยาวบริเวณการหมุนวนที่เกิดขึ้นหลังสิ่งกีดขวาง เมื่อค่าเรย์โนลด์สจำนวน (Re) และค่า Pitch Ratio มีค่าต่างๆ กัน Acharya et al. [2] นำเสนอการทดลองและคำนวณการถ่ายเทความร้อนผ่านสิ่งกีดขวางเดียวที่มีการให้ฟลักซ์ความร้อนคงที่ ที่บริเวณผนังด้านล่างของช่องทางไหล ซึ่งพบว่าผลลัพธ์ที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับผลการทดลองมีความสอดคล้องกันดีพอสมควร และ Han [3] ได้ทดลองศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่า Re, ความสูงของสิ่งกีดขวาง และค่า Pitch ratio ที่มีผลกระทบต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านเทอร์บิวเลเตอร์

ในการศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนในช่องทางไหลนี้ได้ทำการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มรวมกับการใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\varepsilon$ model [4] แล้วทำการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมกับปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านสิ่งกีดขวางจำนวน 8 แห่ง หลังจากนั้นได้ทำการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงตัวแปรหลัก (ค่า Re, ค่า Rib height และค่า Rib spacing) ที่มีต่อการไหลและการถ่ายเทความร้อนภายในช่องทางไหลนี้

2. ทฤษฎี

2.1 สมการพื้นฐานสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อน

ในที่นี้ สมมติให้การไหลเป็นแบบหนืดและไม่อัดตัวภายใต้สถานะอยู่ตัว ซึ่งสมการพื้นฐานของการไหลแบบปั่นป่วน สามารถพัฒนาจากสมการในกรณีของการไหลแบบราบเรียบได้ โดยพิจารณาตัวแปรต่างๆ (เช่น u , v , p และ T) แยกออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นค่าเฉลี่ยไม่ขึ้นกับเวลาและส่วนที่แทนผลของการสั่น (Fluctuation) ในรูปของตัวแปร ϕ ดังนี้

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (1)$$

ทำการเฉลี่ยค่าตัวแปรต่างๆ ในสมการพื้นฐาน ในช่วงเวลาหนึ่ง (Time-averaging) จะได้สมการความต่อเนื่อง สมการอนุรักษ์โมเมนตัมและสมการอนุรักษ์พลังงานที่จัดอยู่ในรูปแบบเทนเซอร์ ดังนี้

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial (\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j)}{\partial x_j} \quad (3)$$

$$\rho \bar{u}_i \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{k}{c} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - \bar{u}'_j \bar{T}' \right) \quad (4)$$

เทอม $\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j$ หรือ R_{ij} คือ Reynolds stresses ที่เพิ่มขึ้นมา ทำให้ระบบสมการข้างต้นไม่สามารถหาคำเฉลยได้ เนื่องจากมีจำนวนตัวแปรมากกว่าจำนวนสมการ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองความปั่นป่วนมาช่วยในการคำนวณ สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\varepsilon$ model [5] ซึ่งในแบบจำลองนี้ เทอม Reynolds stress จะถูกกำหนดให้เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่า Mean strain rate โดยที่ค่า Eddy viscosity ใช้ Boussinesq approximation ในการประมาณค่า ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$R_{ij} = -\frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} + \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

เมื่อ $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ คือ Turbulent kinetic viscosity

จากความสัมพันธ์ของสมการ (2), (3), (4) และ (5) เราจะได้สมการ Turbulent kinetic energy (k) และสมการ Dissipation rate (ε) ดังนี้

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} G - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (7)$$

เมื่อ G คือ Rate of turbulent energy production ซึ่งคำนวณได้จาก

$$G = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$$

โดยค่าคงที่ต่างๆ ในแบบจำลอง Standard $k-\varepsilon$ คือ

$$C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.44, \sigma_\varepsilon = 1.3, C_{\varepsilon 1} = 1.4 \text{ และ } C_{\varepsilon 2} = 1.92$$

สำหรับในบริเวณใกล้ผนังซึ่งมีผลของ Viscous sublayer สูง เราจะใช้วิธี Wall function [5] ในการคำนวณค่าความเร็วในบริเวณนี้

2.2 การประยุกต์ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มกับปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อน

สมการสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการ Transport ดังนี้

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\phi u)}{\partial x_j}}_{\text{Convection term}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right)}_{\text{Diffusion term}} + \underbrace{S_\phi}_{\text{Source term}} \quad (8)$$

เมื่อ ϕ คือ ลักษณะสมบัติของของไหล เช่น u, v, p และ T

Γ คือ Diffusion coefficient

จากนั้นทำการประยุกต์ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม โดยเริ่มจากการ discretize สมการของตัวแปรต่างๆ ที่จัดในรูปสมการ Transport แล้ว ลงบนจุดต่อต่างๆ ของปริมาตรควบคุม (Control volume) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์ให้กลายเป็นสมการพีชคณิตดังนี้

$$a_p \phi_p = a_w \phi_w + a_e \phi_e + a_s \phi_s + a_n \phi_n + \bar{S} \Delta V \quad (9)$$

จากนั้นจึงใช้ Numerical scheme แบบต่างๆ ในการประมาณค่าเทอมการพาที่บริเวณ Interface ของปริมาตรควบคุม และหาผลเฉลยของระบบสมการพีชคณิตนี้ ด้วยวิธี TDMA ร่วมกับ SIMPLE algorithm [6] เพื่อให้ค่า u และค่า p ที่คำนวณได้มีความสอดคล้องกัน

3. ลักษณะของปัญหา

จากผลการทดลองของ Acharya et al. [7] สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนผ่านช่องทางไหลที่มีสิ่งกีดขวางติดตั้ง (รูปที่ 2) กำหนดให้สิ่งกีดขวางมีขนาด 6.35 mm x 6.35 mm จำนวน 8 แห่ง วางบนผนังด้านล่างของช่องทางไหลซึ่งมีความสูงเท่ากับ 61 mm

โดยวางสิ่งกีดขวางอันแรกห่างจากทางเข้าและสิ่งกีดขวางสุดท้ายห่างจากทางออกเป็นระยะ 15h และ 30h ตามลำดับ และจัดวางสิ่งกีดขวางที่อยู่ติดกันให้ห่างกันเป็นระยะ 19h กำหนดให้ผนังช่องทางไหลด้านบน ผนังช่องทางไหลด้านล่างระหว่างทางเข้ากับสิ่งกีดขวางแห่งแรก และผนังที่ผิวของสิ่งกีดขวางเป็นฉนวน โดยที่ผนังด้านล่างส่วนที่เหลือถูกกำหนดให้มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ (q'') เท่ากับ 280 W/m² เข้ามาที่ผนัง

สำหรับความเร็ว Free stream ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 3.6 m/s ที่ $Re_H = 14,000$ (Re_H คำนวณจากความเร็ว Free stream และความสูงของสิ่งกีดขวาง) โดยความเร็วที่ทางเข้านั้น กำหนดจากผลการทดลองซึ่งจัดอยู่ในรูปสมการดังนี้

$$\frac{u}{U_0} = \left(\frac{y}{\delta_u} \right)^{1/5.6} ; \quad \frac{y}{\delta_u} < 1 \quad \text{และ} \quad \frac{y}{\delta_u} > \left(\frac{H}{\delta_u} - 1 \right)$$

$$\text{และ} \quad \frac{u}{U_0} = 1 ; \quad 1 \leq \frac{y}{\delta_u} \leq \left(\frac{H}{\delta_u} - 1 \right)$$

เมื่อ δ_u คือ Boundary layer thickness ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.3h และความหนามืดของไหลมีอุณหภูมิที่ทางเข้า (T_{inlet}) เท่ากับ 25 °C ความหนาแน่น (ρ) เท่ากับ 1.2 kg/m³ และความหนืดสัมบูรณ์ (μ) เท่ากับ 1.85x10⁻⁵ N.s/m²

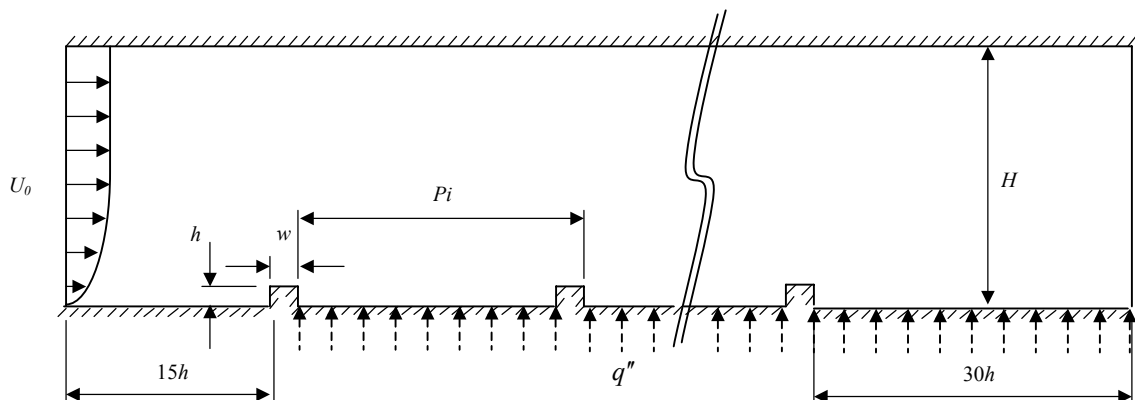
4. ผลการจำลองการไหลและการวิเคราะห์

ในที่นี้เราพิจารณาบริเวณที่อยู่ระหว่างสิ่งกีดขวางแห่งที่ 7 และ 8 เมื่อนำค่า u/U_0 และ v/U_0 ที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่ามีความสอดคล้องกันดีพอสมควร แต่สำหรับบริเวณที่เกิดการหมุนวนจะเห็นได้ว่ามีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเล็กน้อย (แสดงดังรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ)

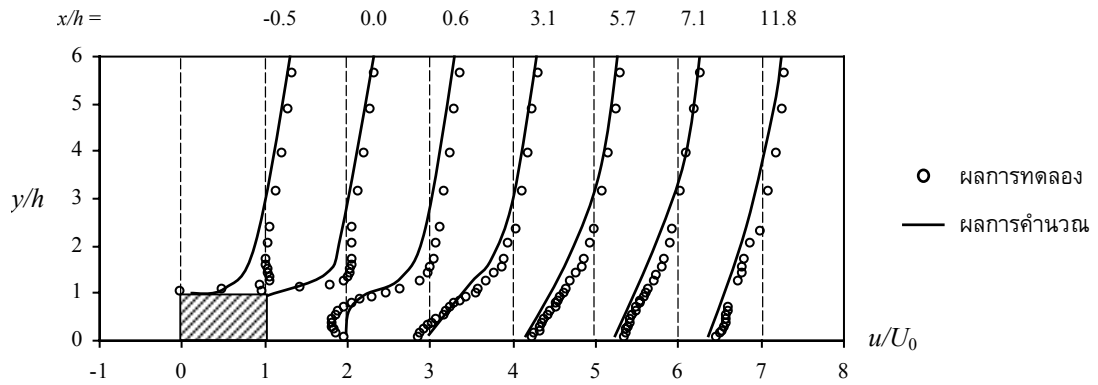
สำหรับกรณีของค่าสเกลลัมเบอร์ (Nu_D) ซึ่งนิยามโดย

$$Nu_D = \frac{q'' D}{[K(T_w(x) - T_{inlet})]} \quad (10)$$

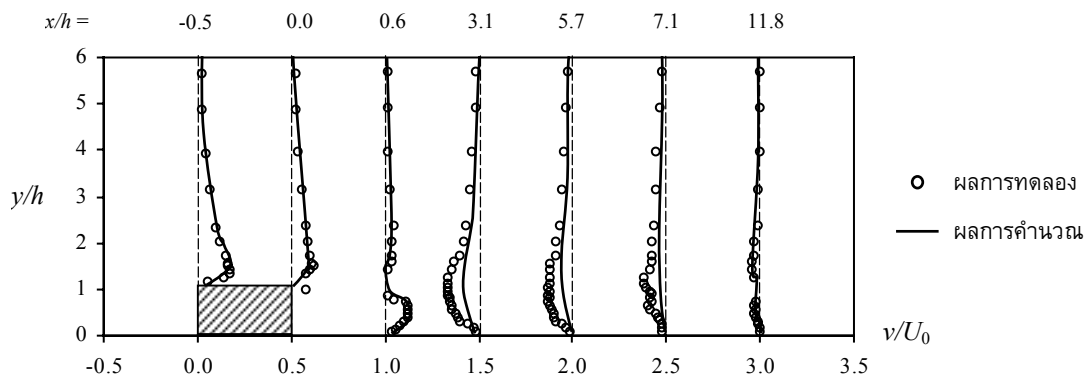
เมื่อ K คือ Thermal conductivity ของอากาศ และ D คือ Hydraulic diameter พบว่าผลการคำนวณตลอดช่วงที่เปรียบเทียบกับค่าต่ำกว่าผลการทดลอง (รูปที่ 5) ซึ่งความผิดพลาดนี้อาจเกิดมาจากการทำนายค่าความเร็วที่ผิดพลาดในช่วงที่เกิดบริเวณการหมุนวนนั่นเอง และเมื่อ



รูปที่ 2 ลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านสิ่งกีดขวางจำนวน 8 แห่ง



รูปที่ 3 ความเร็ว u/U_0 จากผลการคำนวณเทียบกับผลการทดลอง ที่ x/h ต่างๆ ระหว่างสิ่งกีดขวางแห่งที่ 7 และ 8



รูปที่ 4 ความเร็ว v/U_0 จากผลการคำนวณเทียบกับผลการทดลอง ที่ x/h ต่างๆ ระหว่างสิ่งกีดขวางแห่งที่ 7 และ 8

พิจารณารูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าผลการคำนวณของการกระจายของค่าอุณหภูมิไร้หน่วย $(T - T_{\text{inlet}}) \cdot K.D.10^5 / q''$ ที่ $x/h = 0.1$ และ 0.63 มีค่าสูงกว่าผลการทดลองมากในช่วงที่มีบริเวณการหมุนวน แต่ที่ $x/h = 0.47$ และ 17.4 ผลการคำนวณมีความสอดคล้องค่อนข้างดีกับผลการทดลองตลอดช่วง y/h จากผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่นำเสนอไปแล้วข้างต้น แสดงถึงประสิทธิภาพที่น่าพอใจของวิธีคำนวณและแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้

หลังจากตรวจสอบโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนข้างต้นแล้ว จึงศึกษาผลของตัวแปรหลักที่มีผลต่อรูปร่างการไหลและการถ่ายเทความร้อนภายในใบพัดกังหันก๊าซที่มีเทอร์บิวเลเตอร์ติดตั้งต่อไป

4.1 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์

จากผลการคำนวณการถ่ายเทความร้อนผ่านเทอร์บิวเลเตอร์ ในช่วงของ Re เท่ากับ 12,000 ถึง 35,000 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Nu เฉลี่ยกับค่า Re (รูปที่ 7) จะสังเกตได้ว่า เมื่อค่า Re เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ค่า Nu เพิ่มขึ้นด้วย ที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องมาจากว่า ของไหลที่มีค่า Re สูง จะมีการส่งถ่ายโมเมนตัมที่มากขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นด้วย

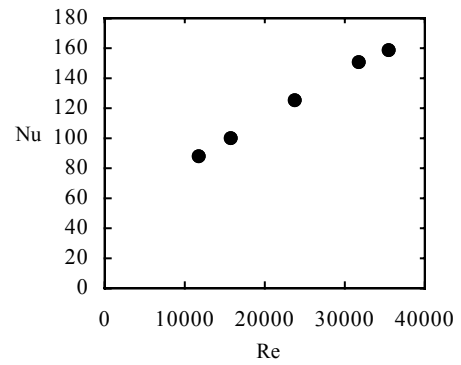
4.2 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่า Rib spacing

ค่า Rib spacing ในที่นี้จะแสดงอยู่ในรูปของจำนวนสิ่งกีดขวาง (No. of ribs) โดยแปรผันค่า Rib spacing ในช่วงระหว่าง 8 ถึง 70 เท่าของความสูงของสิ่งกีดขวาง (มีจำนวนสิ่งกีดขวางอยู่ในช่วงระหว่าง 3 ถึง 18 แห่ง) ผลที่ได้จากการคำนวณ พบว่า ในช่วงที่จำนวนสิ่งกีดขวางเท่ากับ 3 เพิ่มขึ้นจนถึง 12 ค่า Nu มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งเมื่อจำนวนสิ่งกีดขวางเพิ่มขึ้นมากกว่า 12 สังเกตได้ว่าค่า Nu มีค่าค่อนข้างคงที่ (รูปที่ 8) ที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากในช่วงที่มีจำนวนสิ่งกีดขวางตั้งแต่ 3 ถึง 12 ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่า บริเวณการหมุนวนที่เกิดขึ้นหลังสิ่งกีดขวางแต่ละกรณีมีค่าต่างกัน ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกัน จากข้อสังเกตข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ในกรณีที่มีจำนวนสิ่งกีดขวางมากขึ้นส่งผลถึงการเกิดบริเวณการหมุนวนที่กว้างขึ้น ซึ่งเป็นผลให้มีการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น แต่เมื่อจำนวนสิ่งกีดขวางมากกว่า 12 ขึ้นไป ทำให้การไหลหลังสิ่งกีดขวางเกิดบริเวณการหมุนวนแบบเต็มบริเวณช่องว่างระหว่างสิ่งกีดขวาง จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

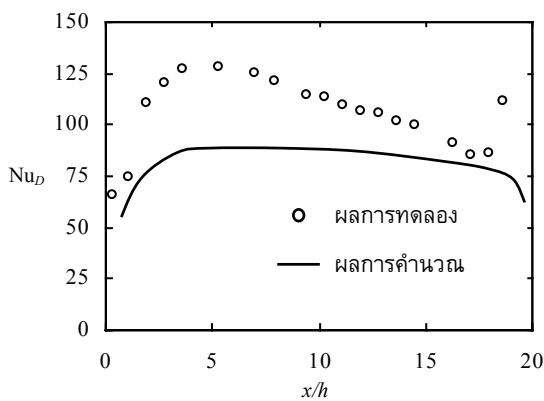
4.3 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าความสูงของสิ่งกีดขวาง

ในการศึกษาผลกระทบอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าความสูงของสิ่งกีดขวางนั้น ได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าความสูงของสิ่งกีดขวางในรูปของตัวแปรไร้มิติ h/w ในช่วง 1 ถึง 5 จากผลการคำนวณพบว่า ใน

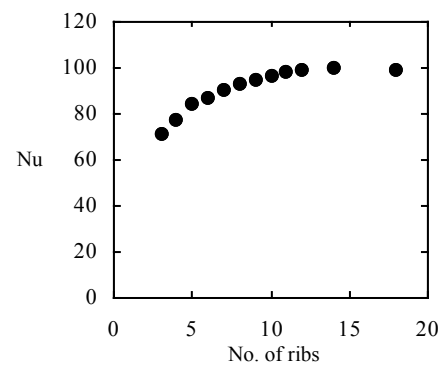
ช่วงค่า h/w ตั้งแต่ 1 ถึง 4 จะเห็นได้ว่าค่า Nu ค่อยๆเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งเมื่อค่า h/w มากกว่า 4 ขึ้นไป พบว่าค่า Nu จะมีแนวโน้มลดลง (รูปที่ 9) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากในช่วง h/w เท่ากับ 1 ถึง 4 เมื่อพิจารณาในบริเวณระหว่างสิ่งกีดขวาง พบว่าเกิดการหมุนวน 2 บริเวณด้วยกัน คือ ด้านหลังสิ่งกีดขวางแรกและด้านหน้าสิ่งกีดขวางถัดมา บริเวณดังกล่าวมีขนาดกว้างขึ้น ส่งผลถึงการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น เมื่อ h/w เท่ากับ 1 ถึง 4 แต่เมื่อ h/w มากกว่า 4 สังเกตได้ว่าการไหลในช่องว่างระหว่างสิ่งกีดขวางเกิดการไหลหมุนวนแบบเต็มบริเวณช่องว่างขึ้น ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนที่ลดลง



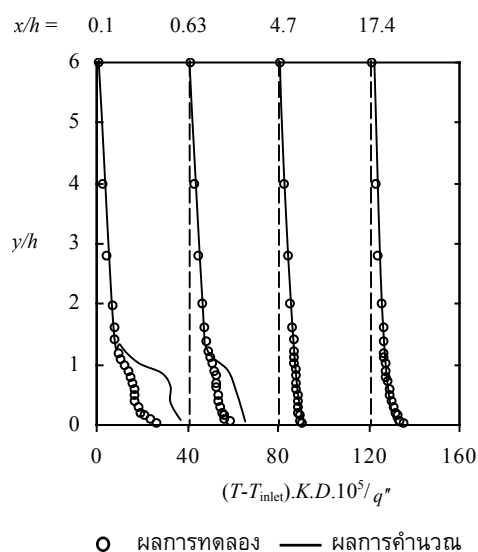
รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Nu กับ ค่า Re



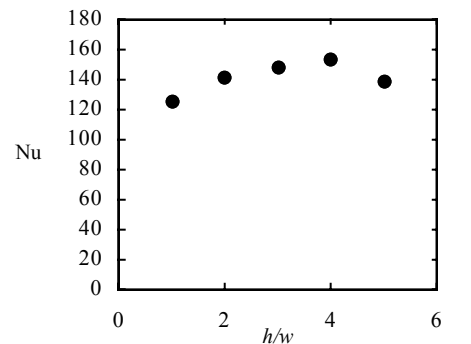
รูปที่ 5 ค่า Nu_D จากการคำนวณเทียบกับผลการทดลอง



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Nu กับ ค่าจำนวน Rib ที่ต่างกัน



รูปที่ 6 ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยหลังการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Nu กับ ค่า h/w

5.สรุป

ผลการคำนวณที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองแล้วมีความสอดคล้องกันดีพอสมควร จึงถือได้ว่าการใช้วิธีเชิงตัวเลขร่วมกับแบบจำลองความปั่นป่วนในการศึกษาพฤติกรรมการไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนผ่านเทอร์มิสเตอร์ที่ติดตั้งในช่องการไหลมีประสิทธิภาพน่าพึงพอใจในระดับหนึ่ง และสามารถสรุปผลของการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรหลักที่มีผลต่อรูปแบบการไหลและการถ่ายเทความร้อนได้ดังนี้

1. เมื่อค่า Re เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้การไหลมีการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น
2. เมื่อค่า Rib spacing (แสดงอยู่ในรูปของจำนวนสิ่งกีดขวาง) เพิ่มขึ้นจาก 3 ถึง 12 ทำให้มีแนวโน้มการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อจำนวนสิ่งกีดขวางมากกว่า 12 ขึ้นไปการถ่ายเทความร้อนค่อนข้างคงที่
3. เมื่อค่า Rib height แปรผันจาก $1w$ ถึง $4w$ ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อค่า Rib height มีค่ามากกว่า $4w$ การถ่ายเทความร้อนจะมีแนวโน้มที่ลดลง

6.กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) โดยผ่านทางทุนเมธีวิจัยอาวุโสสำหรับ ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ เดชะอำไพ

เอกสารอ้างอิง

1. Liou, T. M., Chang, Y., and Hwang, D.W. Experiment and computational investigation of the two-dimensional channel flow over two fences in tandem. ASME Journal of Fluids Engineering 112 (1990) : 302-310.
2. Acharya, S., Dutta, S., and Myrum, T.A., Heat transfer in turbulent flow past a surface-mounted two-dimensional rib. ASME Journal of Heat Transfer 120 (1998) : 724-734.
3. Han, J.C., Heat transfer and friction characteristics in rectangular channels with rib turbulators. ASME Journal of Heat Transfer 110 (1988) : 321-328.
4. Putivisutisak, S., A Computer Programme for Solving General Engineering Flows, Mech. Eng. Dept., Chulalongkorn University, Report no. 165-mechanical-2543, 2002.
5. Launder, B.E., and Spalding, D.B. The numerical computational of turbulent flows. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 3 (1974) : 269-289.
6. Patankar, S.V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1980.
7. Acharya, S., Dutta, S., Myrum, T.A. and Baker, R.S., Periodical developed flow and heat transfer in a ribbed duct. International Journal of Heat and Mass Transfer 36 (1993) : 2069-2082.