

การศึกษาค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำในท่อ The Study of Critical Heat Flux Equation for Water in Tube

พรเทพ สุธรรมจินตกุล¹, ปราโมทย์ เดชะอำไพ², เอกชัย จันทสาโร³ และ วรารค์รัตน์ จันทสาโร^{1*}

^{1*} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพฯ 10900
โทร 02-942-8555 ต่อ 1829 โทรสาร 02-579-4576 อีเมล fengvrj@ku.ac.th

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

³ หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล (การจำลองและการออกแบบ) บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติสิรินธร ไทย-เยอรมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ถนนพิบูลสงคราม เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

บทคัดย่อ

จุดประสงค์หลักในการออกแบบระบบระบายความร้อนในงานทางด้านการผลิตกระแสไฟฟ้า ด้วยความร้อนจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ (Nuclear Reactor) คือการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลในท่อขนาดเล็กและระบบ ค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤต (Critical Heat Flux, CHF) ของของไหลจะส่งผลต่อพฤติกรรมการไหล งานวิจัยนี้นำเสนอการหาค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำในท่อแนวตั้งที่ขนาดต่างๆ โดยมีการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อน โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) เพื่อศึกษาการไหลแบบปั่นป่วน $k-\epsilon$ ด้วยวิธีแบบ Mixture และแบบ Eulerian ชนิดสมการ Standard, RNG และ Realizable สมการผนังการไหล Standard Wall Functions, Non-Equilibrium Wall Functions และ Enhanced Wall Treatment ที่แบบจำลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 – 25 มิลลิเมตร ความดัน 100 กิโลปาสกาล และมวลการไหล $1000 \text{ kg.m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ จากการศึกษาพบว่า ความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤต (CHF Ratio) ในท่อการไหลแนวตั้ง สมการแบบการไหลแบบ Mixture สมการ RNG ชนิดผนังการไหล Standard Wall Functions มีความแม่นยำร้อยละ 19.25 ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการทดลองได้ดีกว่าทุกแบบจำลองที่ทำการจำลอง จากผลความแม่นยำของความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตพบว่า แบบจำลองขนาดที่ขนาด 11-25 มิลลิเมตร มีความแม่นยำที่มากกว่าแบบจำลองที่ขนาด 1-10 มิลลิเมตร ซึ่งอาจเกิดจากสมการความสัมพันธ์ของผนังการไหลในแบบจำลองและการพาความร้อนเพียงอย่างเดียว

คำหลัก: ค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤต, น้ำ, การไหลแบบปั่นป่วน

Abstract

Critical heat flux (CHF) is an important parameter for the design of nuclear reactors. This paper is study of critical heat flux equation for water in tube. Commercial software of computational fluid dynamics

(CFD) with k- ϵ turbulence model was used to simulate mixture model and Eulerian model, standard equation, RNG equation and realizable equation at standard wall functions, non-equilibrium wall functions and enhanced wall treatment phenomenon on 1-25 millimeter diameter. Of tube, pressure 100 KPa and mass flux 1000 kg.m².s⁻¹. The prediction Critical Heat Flux Ratio (CHF Ratio) data Mixture-RNG model at standard wall functions were error 29.46% which have correspond experimental, be better every model. The result on 11-25 millimeter diameter than on 1-10 millimeter diameter may cause from the near-wall functions and convection study only.

Keywords: Critical Heat Flux, Water, Turbulence Model

1. บทนำ

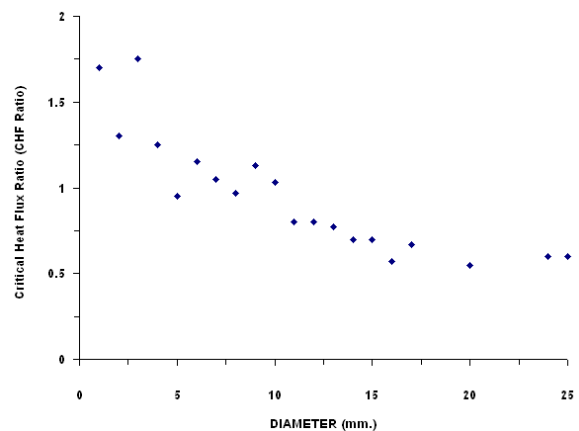
การศึกษานี้เป็นการถ่ายเทความร้อนเป็นปัญหาหลักในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เพราะอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจำเป็นต้องมีประสิทธิภาพที่ดี ซึ่งการถ่ายเทความร้อนหรือการระบายความร้อนนั้นจะต้องคำนึงถึงการออกแบบอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อที่จะสามารถทำนายการถ่ายเทความร้อนได้อย่างถูกต้อง ซึ่งจะพบว่าการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จะขึ้นกับค่าฟลักซ์ความร้อนของการถ่ายเทความร้อนเป็นสำคัญ

ค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตคือ ค่าความร้อนสูงสุดที่เกิดขึ้น ขณะที่ของไหลจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นก๊าซ ซึ่งเรียกว่า การเดือด (Boiling) โดยอาศัยพลังงานความร้อนแฝง (Latent Heat) การเปลี่ยนสถานะของของไหลจะเกิดการถ่ายเทความร้อนสูงมาก จะเกิดขึ้นในการเดือดที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน น้อยมาก ซึ่งทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าการพาความร้อนที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะเป็นอย่างมาก [1]

การหาค่า ความสัมพันธ์ของค่า ฟลักซ์ความร้อนวิกฤต (Critical Heat Flux Ratio :CHF Ratio) ในท่อการไหลขนาดต่างๆ ณ ปัจจุบันจะสามารถหาได้หลายวิธี เช่น นักวิจัย [2, 3, 4, 5, 6] ได้นำเสนอตารางค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤต โดยจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดัน คุณภาพไอ และอัตราการถ่ายเทมวล ที่ กราฟการทดลองใน ท่อการไหล เส้นผ่าน

ศูนย์กลางขนาด 8 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 1 และสมการในการคำนวณที่มีความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสัมพันธ์ของความร้อนวิกฤตกับขนาดท่อการไหล ในขอบเขตที่ต่างกัน จะพบว่าค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตจะแปรผันตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อการไหล ซึ่งจะพบว่าการหาความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตในงานวิจัยข้างต้น จะใช้รูปแบบการเฉลี่ยค่าจากการทดลองในงานวิจัยที่อ้างอิง [3]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่ หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนวิกฤต (Critical Heat Flux, CHF) ของน้ำ ในท่อ ขนาดต่างๆ ได้ โดยจะทำการคำนวณโดยใช้โปรแกรมทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics) คือ Fluent เข้ามาช่วยในการแก้ปัญหา เพราะสามารถคำนวณหาค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตในท่อการไหลขนาดต่างๆ ได้



รูปที่ 1 กราฟความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตกับขนาดท่อการไหลของ Groeneveld ปี 1995

ซึ่งงานวิจัยนี้จะทำการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟังก์ชันความร้อนวิกฤตกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 1-25 มิลลิเมตร โดยวิธีในการคำนวณเป็นแบบ 2 เฟส ทั้งแบบ Mixture และแบบ Eulerian ที่มีแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\varepsilon$ ชนิด Standard, RNG (renormalization group theory), Realizable และสมการใกล้ผนังการไหล Standard Wall Functions, Non-Equilibrium Wall Functions และ Enhanced Wall Treatment เพื่อศึกษาค่าความร้อนวิกฤตและผลกระทบของการไหลปั่นป่วนของน้ำ จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลที่ปรากฏในเอกสารที่ได้ทำการสำรวจ

2. ทฤษฎี

พฤติกรรมการไหลของของไหล นั้นจะแบ่งออกเป็น 2 แนวคิดคือ Mixture และ Eulerian ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการหลัก 3 สมการคือ สมการกฎทรงมวล (Continuity Equation) สมการโมเมนตัม (Momentum Equation) และสมการพลังงาน (Energy Equation) ของแต่ละแนวคิด สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนจะสามารถอธิบายพฤติกรรมของการไหลได้โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน งานวิจัยนี้สนใจแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด Standard, RNG และ Realizable $k-\varepsilon$ ส่วนสมการใกล้ผนังการไหลคือ Standard Wall Functions, Non-Equilibrium Wall Functions และ Enhanced Wall Treatment

การไหลหลายเฟสแบบ Mixture

สมการกฎทรงมวล (Continuity Equation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0$$

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_k}{\rho_m}, \quad \rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_k \quad (1)$$

สมการโมเมนตัม (Momentum Equation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T) \right] + \rho_m \vec{g} + \vec{F} + \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{u}_{dr,k} \vec{u}_{dr,k} \right)$$

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k, \quad \vec{v}_{dr,k} = \vec{v}_k - \vec{v}_m \quad (2)$$

การไหลหลายเฟสแบบ Eulerian

สมการกฎทรงมวล (Continuity Equation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + s_q \quad (3)$$

สมการโมเมนตัม (Momentum Equation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \sum_{p=1}^n (\vec{R}_{pq} + m_{pq} \vec{v}_{pq} - m_{qp} \vec{v}_{qp}) + (\vec{F}_q + \vec{F}_{int,q} + \vec{F}_{vm,q})$$

$$\vec{\tau}_q = \alpha_q \mu_q (\nabla \vec{v}_q + \nabla \vec{v}_q^T) + \alpha_q \left(\lambda_q + \frac{2}{3} \mu_q \right) \nabla \cdot \vec{v}_q \vec{I} \quad (4)$$

แบบจำลองแบบปั่นป่วนชนิด $k-\varepsilon$

แบบจำลองความปั่นป่วนชนิดนี้มีแบบ 3 แบบคือ Standard, RNG, Realizable โดยที่แต่ละแบบจะมีสมการ k เหมือนกัน ต่างกันตรงสมการ ε ซึ่งในแต่ละแบบจะมีค่าพารามิเตอร์และค่าคงที่ต่างกัน

สมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - G_k - \rho \varepsilon \quad (5)$$

สมการอัตราการแพร่ของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน

Standard $k-\varepsilon$ Model

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon v_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) - c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - c_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

$$\mu_t = c_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad G_k = -\rho u'_i u'_j \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

$$c_\mu = 0.09 \quad c_{\varepsilon 1} = 1.44 \quad c_{\varepsilon 2} = 1.92 \quad \sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad (6)$$

RNG $k-\varepsilon$ Model

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) - c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - c_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

$$C_{\varepsilon 2}^* \equiv C_{\varepsilon 2} + \frac{c_{\mu} \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0)}{1 + \beta \eta^3}$$

$$\eta \equiv S k / \varepsilon, \quad \eta_0 = 4.38, \quad \beta = 0.012$$

$$C_{\varepsilon 1} = 1.42, \quad C_{\varepsilon 2} = 1.68, \quad C_{\mu} = 0.00845 \quad (7)$$

Realizable $k-\varepsilon$ Model

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \rho c_{1s} \varepsilon - \rho c_{2s} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{V\varepsilon}}$$

$$c_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = s \frac{k}{\varepsilon}, \quad s \equiv \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$$

$$C_{\mu} = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{k U^*}{\varepsilon}}, \quad U^* \equiv \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}}$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2 \varepsilon_{ijk} \omega_k, \quad \Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk} \omega_k$$

$$A_0 = 4.04, \quad A_s = \sqrt{6} \cos \phi$$

$$\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6} w), \quad w = \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{\tilde{s}}$$

$$\tilde{s} = \sqrt{S_{ij} S_{ij}}, \quad s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$$

$$C_{\varepsilon 1} = 1.44, \quad C_2 = 1.9, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.2 \quad (8)$$

สมการไหลผนังการไหล

Standard Wall Functions

$$T^* \equiv \frac{(T_w - T_p) \rho c_p C_{\mu}^{1/4} C_p^{1/2}}{\dot{q}}$$

$$T^* = \begin{cases} Pr y^* + \frac{1}{2} \rho Pr \frac{C_{\mu}^{1/4} k_p^{1/2}}{\dot{q}} U_p^2 & (y^* < y_T^*) \\ Pr_t \left[\frac{1}{k} \ln(Ey^*) + P \right] + & \\ \frac{1}{2} \rho \frac{C_{\mu}^{1/4} k_p^{1/2}}{\dot{q}} \left\{ Pr_t U_p^2 + (Pr - Pr_t) U_c^2 \right\} & (y^* > y_T^*) \end{cases} \quad (9)$$

Non-Equilibrium Wall Functions

$$T^* \equiv \frac{(T_w - T_p) \rho c_p C_{\mu}^{1/4} C_p^{1/2}}{\dot{q}}$$

$$\tau_t = \begin{cases} 0, & y < y_v \\ \tau_w, & y > y_v \end{cases}, \quad k = \begin{cases} \frac{y}{y_v}, & y < y_v \\ k_p, & y > y_v \end{cases}, \quad \varepsilon = \begin{cases} \frac{2vk}{y^3}, & y < y_v \\ \frac{k^{3/2}}{C_l y}, & y > y_v \end{cases}$$

$$y_v \equiv \frac{\mu y_v^*}{\rho C_{\mu}^{1/4} k_p^{1/2}}, \quad y_v^* \equiv 11.225 \quad (10)$$

Enhanced Wall Treatment

$$T^+ \equiv e^{\Gamma} T_{turb}^+, \quad \Gamma = -\frac{a(Pr y^+)^4}{1 + b Pr^3 y^+}$$

$$T_{turb}^+ = Pr_t \left\{ u_{turb}^+ + P + \frac{\rho u^*}{2 \dot{q}} \left[u^2 - \left(\frac{Pr}{Pr_t} - 1 \right) (u_c^+)^2 (u^*)^2 \right] \right\} \quad (11)$$

สมการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน

$$q = A \cdot h_f (T_w - T_f) \quad (12)$$

q คือ ความร้อนที่ถ่ายเท (วัตต์)

h_f คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหล ($W/m^2 \cdot K$)

T คือ อุณหภูมิ w คือผนังการไหล f คือ ของไหล (เคลวิน)

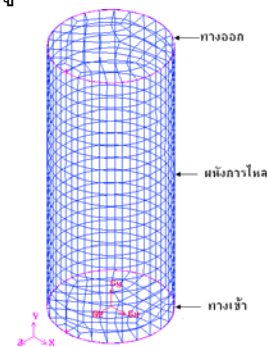
3.การจำลองทางคอมพิวเตอร์

สร้างแบบจำลองโครงสร้างตาข่ายแบบสาม

มิติของท่อการไหลที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1-25

มิลลิเมตร โดยโปรแกรม Gambit แบ่งโดเมนแบบ

Hex-Wedge ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงแบบจำลองโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ

ส่วนการแบ่งกริดควรให้มีความละเอียด

เพียงพอ (Grid independent) จะมีการตรวจสอบโดย

วิธีหาจำนวนตาข่ายข้อมูลที่น้อยที่สุดที่ไม่ทำให้ผลลัพธ์

ความร้อนที่เกิดขึ้นไม่เปลี่ยนแปลง

กำหนดรูปแบบเงื่อนไขขอบเขต ของแบบจำลองการไหลโดยโปรแกรมสำเร็จรูป และมีข้อกำหนดต่าง ๆ ดังนี้

-การไหลเป็นแบบคงที่และของไหลที่อัดตัวไม่ได้
 -ไม่คำนึงถึงผลกระทบของวัสดุที่ใช้ทำท่อและความ
 ขรุขระของผิวท่อ (ท่อผิวเรียบ)

-ท่อการไหลมีจำนวน 20 ขนาด ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 2 สภาวะเงื่อนไขของขอบเขต

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (มิลลิเมตร)	ความยาวท่อ (มิลลิเมตร)
1	80
2	160
3	240
4	320
5	400
6	480
7	560
8	640
9	720
10	800
11	880
12	960
13	1040
14	1120
15	1200
16	1280
17	1360
20	1600
24	1920
25	2000

-พิจารณาการไหล แบบจำลองความปั่นป่วนชนิด
 Standard, RNG และ Realizable $k-\epsilon$ สมการใกล้
 ผนังการไหล Standard Wall Functions, Non-
 Equilibrium Wall Functions และ Enhanced Wall
 Treatment

การกำหนดเฟสของสถานะของแบบจำลอง

เฟสที่ 1 เป็นน้ำที่เป็นของเหลว อุณหภูมิ 372 เคลวิน

เฟสที่ 2 เป็นน้ำที่เป็นก๊าซ

ส่วนสภาวะของขอบเขตต่างๆ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 สภาวะเงื่อนไขของขอบเขต

ขอบเขต	ชนิด	กำหนด
ทางเข้า	Mass flux ($\text{kg/m}^3 \text{s}^{-1}$)	1000
ทางออก	ความดัน (กิโลปาสกาล)	100
ผนังการไหล	อุณหภูมิ (เคลวิน)	750

4. ผลการจำลองคอมพิวเตอร์

สำหรับผลของแบบจำลองที่ได้นั้นจะทำการ
 เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ขนาดท่อ 8 มิลลิเมตร
 ของ Groeneveld [3] ซึ่งในการเปรียบเทียบนั้นจะทำการ
 เปรียบเทียบในส่วน of ค่าสัดส่วนความร้อนวิกฤต
 (Critical Heat Flux Ratio: CHF Ratio) ตามรูปที่ 1

ส่วนการทดลองในขนาด 1-25 มิลลิเมตร
 สามารถอธิบายได้ คือ

จากรูปที่ 3 เมื่อพิจารณาแบบจำลองความ
 ปั่นป่วนแบบ Mixture ชนิดสมการ Standard ที่ผนัง
 การไหลแบบ Standard Wall Functions, Non-
 Equilibrium Wall Functions และ Enhanced Wall
 Treatment จะพบว่าแบบ Standard Wall Functions
 มีความสอดคล้องร้อยละ 29.53 มากกว่าแบบ Non-
 Equilibrium Wall Functions และ Enhanced Wall
 Functions ที่ร้อยละ 29.87 และ 40.61 ตามลำดับ

จากรูปที่ 3 เมื่อพิจารณา แบบจำลองความ
 ปั่นป่วนแบบ Mixture ชนิดสมการ RNG $k-\epsilon$ ที่ผนัง
 การไหลทดลอง Standard Wall Functions, Non-
 Equilibrium Wall Functions และ Enhanced Wall
 Treatment จะพบว่า Standard Wall Functions มี
 ความสอดคล้องร้อยละ 19.25 มากกว่าแบบ Non-
 Equilibrium Wall Functions และ Enhanced Wall
 Functions ที่ร้อยละ 25.93 และ 37.50 ตามลำดับ

จากรูปที่ 3 เมื่อพิจารณา แบบจำลองความ
 ปั่นป่วนแบบ Mixture ชนิดสมการ Realizable $k-\epsilon$
 ที่ผนังการทดลอง Standard Wall Functions, Non-
 Equilibrium Wall Functions และ Enhanced Wall

Treatment จะพบว่า Non-Equilibrium Wall Functions มีความสอดคล้องร้อยละ 25.36 มากกว่าแบบ Standard Wall Functions และ Enhanced Wall Functions ที่ร้อยละ 29.00 และ 35.93 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4 เมื่อพิจารณา แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Eulerian ชนิดสมการ Standard $k-\varepsilon$ ที่ผนังการทดลอง Standard Wall Functions, Non-Equilibrium Wall Functions และ Enhanced Wall Treatment จะพบว่า Standard Wall Functions มีความสอดคล้องร้อยละ 31.99 มากกว่าแบบ Non-Equilibrium Wall Functions และ Enhanced Wall Functions ที่ร้อยละ 32.16 และ 41.20 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4 เมื่อพิจารณา แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Eulerian ชนิดสมการ RNG $k-\varepsilon$ ที่ผนังการทดลอง Standard Wall Functions, Non-Equilibrium Wall Functions และ Enhanced Wall Treatment จะพบว่า Non-Equilibrium Wall Functions มีความสอดคล้องร้อยละ 27.30 มากกว่าแบบ Standard Wall Functions และ Enhanced Wall Functions ที่ร้อยละ 28.46 และ 37.59 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4 เมื่อพิจารณา แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Eulerian ชนิดสมการ Realizable $k-\varepsilon$ ที่ผนังการทดลอง Standard Wall Functions, Non-Equilibrium Wall Functions และ Enhanced Wall Treatment จะพบว่า Non-Equilibrium Wall Functions มีความสอดคล้องร้อยละ 25.36 มากกว่าแบบ Standard Wall Functions และ Enhanced Wall Functions ที่ร้อยละ 29.00 และ 35.93 ตามลำดับ

ส่วนการทดลองที่ขนาด 1-10 มิลลิเมตร สามารถอธิบายได้ คือ

จากผลการความเบี่ยงเบนของความสัมพันธ์ของฟังก์ชันความร้อนวิกฤตพบว่า แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Mixture ชนิดสมการ Standard, RNG, Realizable $k-\varepsilon$ ที่ผนังการทดลอง Standard Wall Functions, Non-Equilibrium Wall Functions และ

Enhanced Wall Treatment จะพบว่าสมการ Standard แบบ Non-Equilibrium Wall Functions มีความสอดคล้องร้อยละ 9.04 มากกว่าสมการ RNG แบบ Non-Equilibrium Wall Functions และ สมการ Realizable แบบ Standard ที่ร้อยละ 9.15 และ 9.62 ตามลำดับ

จากผลการความเบี่ยงเบนของความสัมพันธ์ของฟังก์ชันความร้อนวิกฤตพบว่า แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Eulerian ชนิดสมการ Standard, RNG, Realizable $k-\varepsilon$ ที่ผนังการทดลอง Standard Wall Functions, Non-Equilibrium Wall Functions และ Enhanced Wall Treatment จะพบว่าสมการ RNG แบบ Standard Wall Functions มีความสอดคล้องร้อยละ 9.62 มากกว่าสมการ Realizable แบบ Non-Equilibrium Wall Functions และ สมการ RNG แบบ Standard Wall Functions ที่ร้อยละ 10.49 และ 11.26 ตามลำดับ

ส่วนการทดลองที่ขนาด 11-25 มิลลิเมตร สามารถอธิบายได้ คือ

จากผลการความเบี่ยงเบนของความสัมพันธ์ของฟังก์ชันความร้อนวิกฤตพบว่า แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Mixture ชนิดสมการ Standard, RNG, Realizable $k-\varepsilon$ ที่ผนังการทดลอง Standard Wall Functions, Non-Equilibrium Wall Functions และ Enhanced Wall Treatment จะพบว่าสมการ RNG แบบ Standard Wall Functions มีความสอดคล้องร้อยละ 27.77 มากกว่าสมการ Realizable แบบ Non-Equilibrium Wall Functions และ สมการ RNG แบบ Non-Equilibrium Wall Functions ที่ร้อยละ 42.22 และ 44.75 ตามลำดับ

จากผลการความเบี่ยงเบนของความสัมพันธ์ของฟังก์ชันความร้อนวิกฤตพบว่า แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Eulerian ชนิดสมการ Standard, RNG, Realizable $k-\varepsilon$ ที่ผนังการทดลอง Standard Wall Functions, Non-Equilibrium Wall Functions และ Enhanced Wall Treatment จะพบว่าสมการ

Realizable แบบ Non-Equilibrium Wall Functions มีความสอดคล้องร้อยละ 42.22 มากกว่าสมการ RNG แบบ Non-Equilibrium Wall Functions และ สมการ Realizable แบบ Standard Wall Functions ที่ร้อยละ 44.13 และ 50.55 ตามลำดับ

5.สรุปผลและการวิจารณ์

จากการจำลองความปั่นป่วนแบบ Mixture และ Eulerian ชนิดสมการ Standard, RNG และ Realizable ที่ผนังการไหล Standard Wall Functions, Non-Equilibrium Wall Functions และ Enhanced Wall Treatment ในขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อการไหล 1-25 มิลลิเมตร พบว่าแบบการไหล Mixture มีความสอดคล้องมากกว่า Eulerian ส่วนชนิดสมการจะพบว่าชนิดสมการ RNG มีความสอดคล้องมากกว่า Realizable และ Standard ตามลำดับ ส่วนชนิดผนังการไหล พบว่าสมการแบบ Non-Equilibrium Wall Functions มีความสอดคล้องมากกว่า Standard Wall Functions และ Enhanced Wall Treatment

ส่วนท่อการไหลที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1-10 มิลลิเมตร พบว่าแบบการไหล Mixture มีความสอดคล้องมากกว่า Eulerian ส่วนชนิดสมการจะพบว่าชนิดสมการ Realizable มีความสอดคล้องมากกว่า RNG และ Standard ตามลำดับ ส่วนชนิดผนังการไหล พบว่าสมการแบบ Non-Equilibrium Wall Functions มีความสอดคล้องมากกว่า Standard Wall Functions และ Enhanced Wall Treatment

ส่วนท่อการไหลที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11-25 มิลลิเมตร พบว่าแบบการไหล Mixture มีความสอดคล้องมากกว่า Eulerian ส่วนชนิดสมการจะพบว่าชนิดสมการ RNG มีความสอดคล้องมากกว่า Realizable และ Standard ตามลำดับ ส่วนชนิดผนังการไหล พบว่าสมการแบบ Non-Equilibrium Wall Functions มีความสอดคล้องมากกว่า Standard Wall Functions และ Enhanced Wall Treatment

สรุปจากผลการทดลองจะพบว่าสมการแบบการไหลแบบ Mixture จะมีความสอดคล้องได้ดีกว่า Eulerian ในส่วนการหาค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตในท่อการไหลแนวตั้ง ส่วนชนิดของสมการแบบ RNG จะมีความสอดคล้องได้ดีกว่าแบบ Standard และ Realizable และในส่วนชนิดผนังการไหลจะพบว่าสมการแบบ Non-Equilibrium Wall Function มีความสอดคล้องได้ดีกว่า Standard Wall Functions และ Enhanced Wall Treatment

จากผลความเบี่ยงเบนของค่าความสัมพัทธ์ของค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตจะพบว่าแบบจำลองจะพบว่า แบบจำลองขนาดที่ขนาด 11-25 มิลลิเมตร มีความเบี่ยงเบนที่มากกว่าแบบจำลองที่ขนาด 1-10 มิลลิเมตร ซึ่งอาจเกิดจากสมการความสัมพัทธ์ของผนังการไหลในแบบจำลองและการพาความร้อนเพียงอย่างเดียว [7]

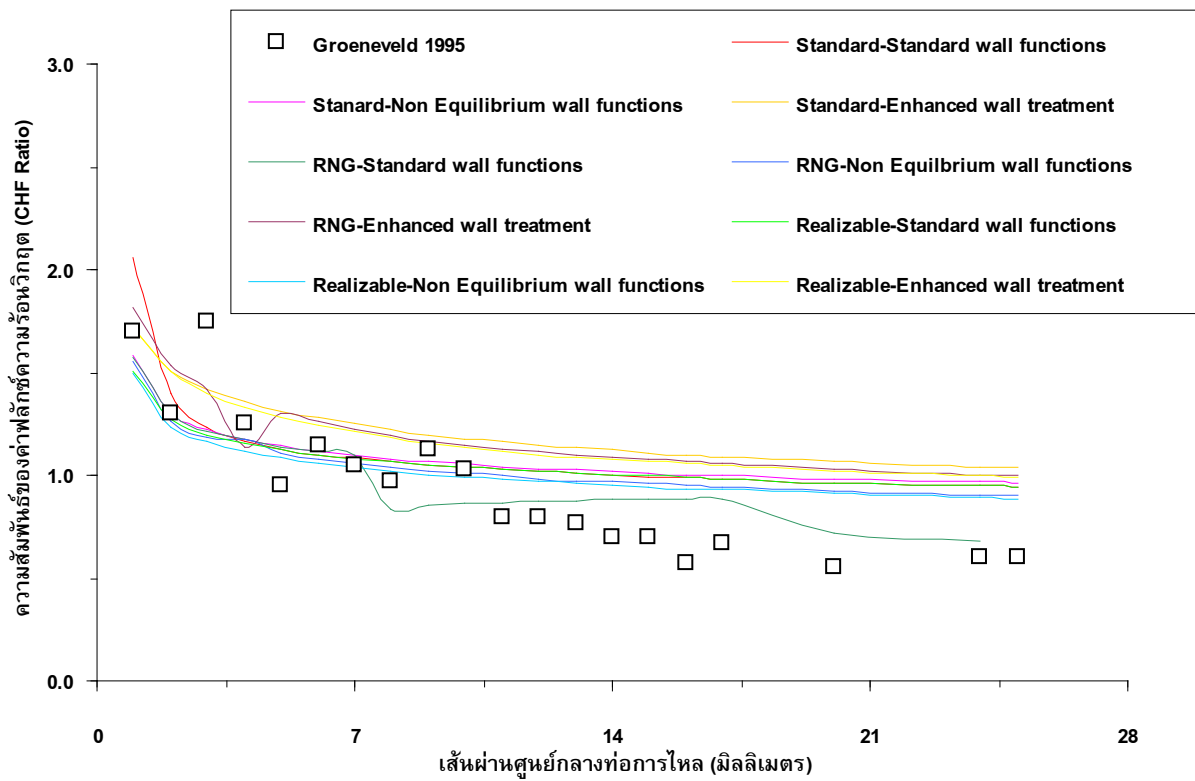
6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ Thai Grid Nation และ High Performance Computing and Networking Center Lab ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และบุคลากรใน HPCNC Lab ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำงานวิจัย

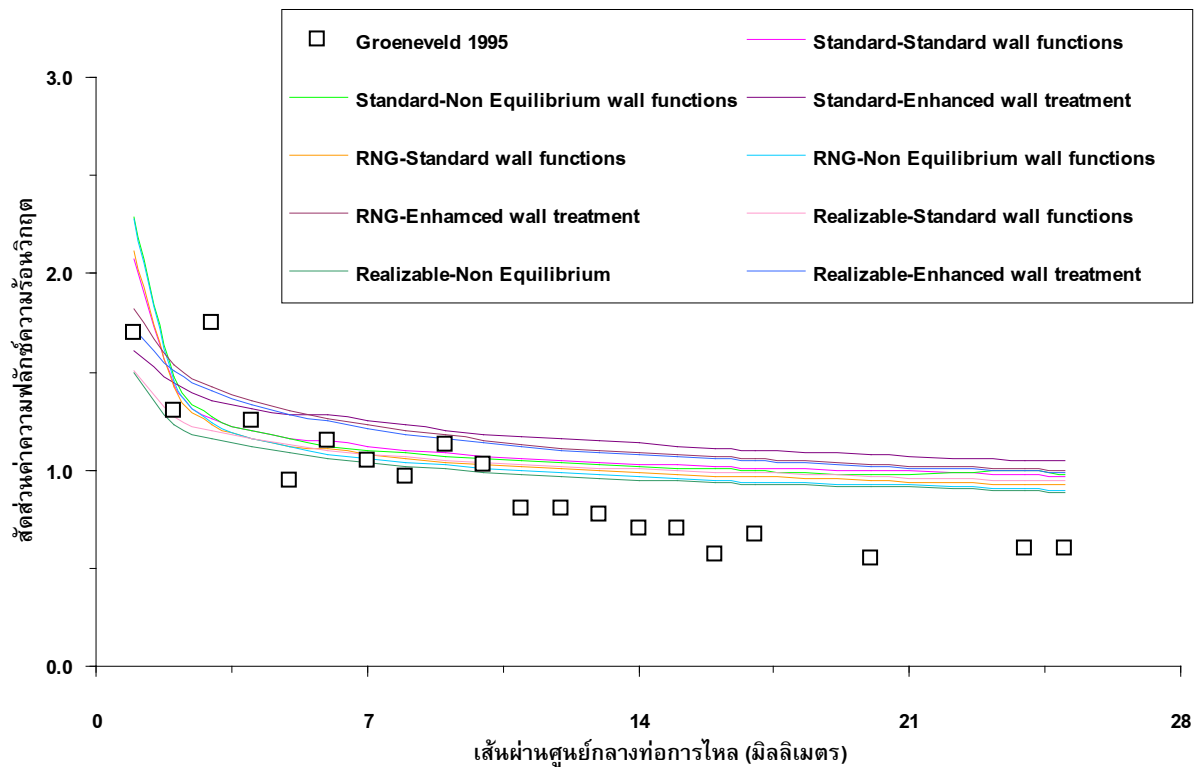
7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ประดิษฐ์ เทิดทูน (2543). การเดือด, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.
- [2] จิรโรจน์ บุรณะโรจน์ (2549). ฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำในการไหลของท่อขนาดไมโคร, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตบางเขน, กรุงเทพฯ.
- [3] Groeneveld, D.C., L.K.H. Leung, P.L. Kirillov, V.P. Bobkov, X.C. Huang and E.Royer (1996). The 1995 look-up table for critical heat flux in tubes, Nuclear Engineering and Design. 163:1-23

- [4] Groeneveld, J.Q. Shan, A.Z. Vasic, L.K.H Leung, A. Durmayaz, J. Yang, S.C Cheng, A. Tanase (2007). The 2006 CHF look-up table. Nuclear Engineering and Design, 237:1909-1922
- [5] Wong, W.C. (1996). Effect of tube diameter on critical heat flux, MaSC dissertation, Ottawa Carleton Institute for Mechanical and Aeronautical Engineering, University of Ottawa.
- [6] Hall, D.D., Mudawar (2000). Critical heat flux for water flow in tubes-II subcooled CHF correlations, Int. J. Heat Mass Transfer, 43:2605-2640
- [7] Michael Z. Podowski, Raf M. Podowski (2008). Mechanistic multidimensional modeling of forced convection boiling heat transfer, Science and Technology of Nuclear Installations, 2009:387020



รูปที่ 3 แสดงค่าความสัมพัทธ์ของฟลักซ์ความร้อนวิกฤต (CHF Ratio) กับขนาดท่อการไหล การไหลแบบ Mixture



รูปที่ 4 แสดงค่าความสัมพัทธ์ของฟลักซ์ความร้อนวิกฤต (CHF Ratio) กับขนาดท่อการไหล การไหลแบบ Eulerian