

การศึกษาค่าความดันที่สภาวะค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำในท่อขนาดมินิ

A Study of the critical heat flux for water in a minitube

พรเทพ สุธรรมจินดากุล และ วรารัตน์ จันทสาโร

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

E-mail: fengvrj@ku.ac.th โทรศัพท์: 029 428 555, โทรสาร: 025 794 576

บทคัดย่อ

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของน้ำในท่อขนาดมินิในปัจจุบันจะพบว่าค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ซึ่งในปัจจุบันมีรูปแบบการหาค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตที่พิจารณาผลกระทบของค่าความดันนั้นมีอยู่น้อยมากและยังไม่สอดคล้องกับผลการทดลอง ณ ช่วงการไหลต่างๆ ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาผลกระทบของค่าความดันของค่าความฟลักซ์ความร้อนวิกฤตในรูปแบบสมการความสัมพันธ์ ด้วยระเบียบวิธีการถดถอยแบบน้อยสุด (Least square regression) คือ แบบเชิงเส้น (Linear regression) และไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear regression) ในการแก้ปัญหา ผลการนำเสนอสมการความสัมพันธ์และผลการเปรียบเทียบของสมการของค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตกับรูปแบบสมการความสัมพันธ์ของนักวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสมการความสัมพันธ์ที่ได้นำเสนอมีความสอดคล้องที่ดีกว่าสมการรูปแบบของนักวิจัยท่านอื่น เนื่องจากในรูปแบบสมการความสัมพันธ์ที่นำเสนอได้มีการพิจารณาผลกระทบของค่าความดันในแต่ละช่วงการไหล ดังจะเห็นได้จากช่วงความดันต่ำถึงกลางจะแปรผันตามค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตแต่ช่วงความดันกลางถึงสูงจะแปรผกผันกับค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤต ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าในสมการความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตที่ได้มีการพิจารณาผลกระทบของค่าความดันในแต่ละช่วงการไหลมีความสำคัญอย่างมากต่อความถูกต้องและสอดคล้องกับผลการทดลองในช่วง mass flux 300-8,000 kg.m⁻².s⁻¹, ช่วงความดัน 300-10,000 กิโลปาสกาล และช่วงท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1-17 มิลลิเมตร

คำหลัก: ค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤต, ความดัน, น้ำ, ท่อขนาดมินิ

Abstract

At present, the study of heat transfer for water in a mini tube find the critical heat flux (CHF) to the efficiency of heat transfer. Today, the critical heat flux model to determine the pressure effect, there is very little and not consistent with the experimental at the various flow systems. Therefore, this research the pressure effect of the CHF for water in a mini tube with correlation of equations by the least square regression method, is linear regression and nonlinear regression to the solve problem. The result and comparison of the CHF between present model and correlation equations of the preceding researcher found that the present model was consistent than another researcher. Because the present model has considered the pressure effect of the CHF in the various flow. As proven the low pressure to medium

pressure is direct variation the critical heat flux, but the medium pressure to high pressure is reverse variation the critical heat flux. In conclusion, the inclusion of the pressure effect of the CHF for water in a minitube is proved to be necessary for the accurate predictions with experimental in mass flux range as $300-8,000 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, pressure range as 300-10,000 kilopascal and diameter of tube range as 1-17 mm.

Keywords: Critical heat flux, pressure, water, mini tube.

1. บทนำ

การศึกษาปัญหาการถ่ายเทความร้อนระดับไมโครเป็นปัญหาหลักในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเนื่องจากเมื่อพิจารณาในระดับการไหลไมโครพบว่าเมื่อกระบวนการไหลมีขนาดเล็กลงจะทำให้ประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น เพราะการไหลระดับไมโครจะมีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสของการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับผนังการไหลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับระดับมาโคร ดังเช่นอุปกรณ์ microchip และ MEMS เป็นต้น ในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระดับไมโครจำเป็นต้องคำนึงค่าขอบเขตค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตเพื่อประสิทธิภาพของระบบที่ดีของการไหล

ค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤต คือค่าความร้อนสูงสุดเมื่อมีการเปลี่ยนสถานะจากของไหลจากสถานะของเหลวเป็นไอ น้ำ โดยจะเรียกกระบวนการนี้ว่า “การเดือด” โดยอาศัยพลังงานความร้อนแฝง (latent heat) ซึ่งการเปลี่ยนสถานะของของไหลจะเกิดการถ่ายเทความร้อนสูงมากและจะเกิดขึ้นในการเดือดที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันน้อยมาก ซึ่งทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าการพาความร้อนที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะเป็นอย่างมาก สมภาวะการถ่ายเทความร้อนที่ดีนี้มีขอบเขตและขีดจำกัดบนค่าฟลักซ์ความร้อนซึ่งเกิดจากการถ่ายเทความร้อนนี้ โดยทั่วไปแล้วสมภาวะของขีดจำกัดบนจะเกิดขึ้นเนื่องจากค่าฟลักซ์ความร้อนสูงเกินไปหรืออุณหภูมิของพื้นที่ผิวสูงเกินไป เมื่อเกิดขึ้นในกระบวนการไหลแล้วการถ่ายเทความร้อนจะลดลงอย่างรวดเร็วทำให้ประสิทธิภาพของระบบจะลดลง ในการพิจารณาผลกระทบของค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตในระดับไมโครในปัจจุบันพบว่าการศึกษาผลกระทบของค่าความดัน, mass flux และ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อการไหล (Lang (1888), Nukiyama (1934), Zubar (1959), Warren et al. (1985), Bejan (1995) และ Kandikar (2001))

ในการศึกษาสมการความสัมพันธ์ที่พิจารณาผลกระทบของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่อค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของระบบการไหล (Macbeth (1963), Becker (1965), Biasi et al. (1967), Doroshchuk et al. (1975), Groeneveld et al. (1986), Groeneveld et al. (1996) และ Hall et al. (2000)). และการศึกษาสมการความสัมพันธ์ที่พิจารณาเพิ่มในส่วนของผลกระทบของ mass flux ต่อค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤต (Gunther (1951) และ Wong (1996)) แต่พบว่าสมการความสัมพันธ์มีความแม่นยำน้อยมากเมื่อเทียบกับผลการทดลองข้างต้น

จากการศึกษาผลกระทบที่มีผลต่อค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตจะพบว่าค่าความดันจะส่งผลต่อค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตอย่างมากเพราะค่าความดันจะส่งผลต่อระบบการไหลโดยเมื่อความดันเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสัดส่วนของพื้นที่ถ่ายเทความร้อนของของไหลกับผนังการไหล (void fraction) และคุณสมบัติของของไหลจะเปลี่ยนแปลงอย่างมากเมื่อระบบมีความดันสูง (Chang และ Muller (2003)). ดังนั้นในการพิจารณาผลกระทบของค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตควรที่จะพิจารณาผลกระทบของค่าความดันในระบบการไหลต่างๆ

การศึกษาผลกระทบของค่าความดันต่อค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตที่ผ่านมาโดยนักวิจัยหลายท่าน พบว่าสมการความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตมีความไม่สอดคล้องกับผลการทดลองและหลักการที่ได้กล่าวมาข้างต้น โดยสามารถบรรยายหลักการของผลกระทบของค่าความดันต่อค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤต ดังต่อไปนี้

Tong et al. (1967)

$$CHF = 9.1546 \left[\frac{(2.022 - 0.0624P) + [(0.172 - 0.0143P) e^{(0.0177 - 0.000019X)}]}{[(0.109 - 1.173X + 0.127X^2)(2.6 + 1.037)[1.137 - 0.869X] + (0.266 + 0.836e^{-0.0014X})} \right] [0.896 + 0.941 \cdot 10^{-6} (h_{sat} - h_{in})] \quad (1)$$

โดยมีช่วงของค่าความดัน 6,900-15,900 กิโลปาสกาล, ช่วง mass flux ที่ 1,360-6,780 kg.m⁻².s⁻¹ และช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 5-17 มิลลิเมตร ซึ่งจะเห็นว่าผลกระทบของค่าความดันในสมการความสัมพันธ์จะเป็นฟังก์ชันโพลิโนเมียลที่เป็นฟังก์ชันทางลด

Levitan et al. (1975)

$$CHF = [100 - 17.5 \left(\frac{D}{25} \right) + 0.001 \left(\frac{D}{25} \right)^2] e^{(0.000001 - 0.0000001X)} e^{(0.000001 - 0.0000001X)} \quad (2)$$

โดยที่ CHF คือ ค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤต

P คือ ค่าความดัน

G คือ mass flux

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

โดยมีช่วงของค่าความดัน 2,940-19,600 กิโลปาสกาล, ช่วง mass flux ที่ 750-5,000 kg.m⁻².s⁻¹ และช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 5-17 มิลลิเมตร โดยจะพบว่าสมการความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตจะเป็นฟังก์ชันโพลิโนเมียลที่เป็นฟังก์ชันเพิ่ม

Shim and Park (2003)

$$q_c = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{G}{G_c} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$\alpha = 0.984 + 7.691 \left(\frac{D}{25} \right) - 12.42 \left(\frac{D}{25} \right)^2 \quad (4)$$

$$\gamma = 0.06155 + 0.00664 \left(\frac{D}{25} \right) + 0.18812 \left(\frac{D}{25} \right)^2 \quad (5)$$

โดยมีช่วงของค่าความดัน 10-70.81 บาร์, ช่วง mass flux ที่ 93.7-18,580 kg.m⁻².s⁻¹ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 1.14-37.47 มิลลิเมตร ซึ่งจะเห็นว่าผลกระทบของค่าความดันในสมการความสัมพันธ์จะ

เป็นฟังก์ชันโพลิโนเมียลที่เป็นฟังก์ชันทางเพิ่มและลดลงเมื่อค่าความดันมากกว่าความดันวิกฤต

จากการศึกษาของนักวิจัยที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ว่าสมการความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตที่พิจารณาผลกระทบของค่าความดันจะกำหนดเป็นสมการโพลิโนเมียลแบบฟังก์ชันเพิ่มและลดโดยที่พิจารณาที่ค่ามากกว่าค่าความดันวิกฤต ซึ่งไม่สอดคล้องและถูกต้องกับผลการทดลอง เพราะผลการทดลองพบว่าค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตจะเป็นฟังก์ชันเพิ่มที่ช่วงของความดันประมาณ 0-3,000 กิโลปาสกาลและเป็นฟังก์ชันลดเมื่อค่าความดันที่มากกว่าประมาณ 3,000 กิโลปาสกาล (Groeneveld et al. (1996), Bonilla et al. (1941), Bergles (1963), Inasaka et al. (1987), Tong and Weisman (1979), Roach et al. (1998) และ Groeneveld et al. (2006)).

งานวิจัยนี้จะทำการหาสมการความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำ โดยมีสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง, mass flux และค่าความดันที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของของระบบ ที่ใช้ระเบียบวิธีการการถดถอยแบบน้อยสุด ทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์เชิงตัวเลขแมทแลป (MATLAB) ในการเทียบกับการทดลองของ Groeneveld et al. (2006)

2. วิธีการ

สำหรับหลักการที่จะนำมาใช้แก้ปัญหาสำหรับการหาค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำในท่อขนาดมินิในครั้งนี้ ปัญหาเกิดจากรูปแบบสมการความสัมพันธ์ไม่สามารถหาค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำ ณ ช่วงการไหลต่างๆได้ ดังนั้นหลักการที่มีความเหมาะสมคือ ระเบียบวิธีการการถดถอยแบบน้อยสุด ที่เป็นแบบเชิง และไม่เชิงเส้น โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปแมทแลปในการคำนวณ ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะนำมาหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งหาโดยละเอียดได้ยาก โดยการหาสมการความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำในท่อขนาดมินิ

จำเป็นต้องกำหนดสมการความสัมพันธ์ตั้งต้น ซึ่งเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำในท่อขนาดมินิกับค่าความดัน, mass flux และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ที่อยู่ในรูปแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น ดังนี้

2.1 สมการถดถอย แบบเชิงเส้น

$$CHF = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot P + \alpha_3 \cdot G + \alpha_4 \cdot D \quad (6)$$

2.2 สมการถดถอย แบบไม่เชิงเส้น

$$CHF = \alpha_1 \cdot P^{\alpha_2} \cdot G^{\alpha_3} \cdot D^{\alpha_4} \quad (7)$$

โดย CHF = ค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤต (กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร)

P = ค่าความดันของระบบ (กิโลปาสกาล)

G = Mass flux ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อการไหล

(มิลลิเมตร)

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ และ α_4 = ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอย

ส่วนของโปรแกรมแมทแล็บ จำเป็นต้องสร้างโค้ดคำสั่งในการสร้างสมการความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำกับค่าความดัน, mass flux และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ โดยจะมีชุดคำสั่งแบ่งออกเป็น 3 ชุดคำสั่ง ดังนี้

CHF_import_data_function.m

แสดงชุดคำสั่งนำเข้าชุดข้อมูลจากโปรแกรม EXCEL มาคำนวณ, การนำฟังก์ชัน CHF_function.m (Multiple linear regression) และ CHF_function1.m (Multiple nonlinear regression) มาคำนวณ, คำสั่งการคำนวณ RMS และการแสดงผลค่าสัมประสิทธิ์ของสมการความสัมพันธ์

CHF_function.m

แสดงถึงชุดคำสั่งในการคำนวณสมการ Multiple linear regression (Polynomial regression)

CHF_function1.m

แสดงถึงชุดคำสั่งในการคำนวณสมการ Multiple nonlinear regression (Exponential regression)

โดยการนำชุดคำสั่งทั้ง 3 ชุดคำสั่งไปคำนวณหาช่วงและสมการความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำในท่อขนาดมินิที่ช่วงการไหลต่างๆ โดยพิจารณาจากค่า root mean square (RMS) ที่บ่งบอกถึงความคลาดเคลื่อนของสมการความสัมพันธ์

วิธีการถดถอยแบบน้อยสุดที่เป็นแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นในงานวิจัยนี้มีช่วงของข้อมูลกว้างมากเพื่อให้ค่าพารามิเตอร์ของตัวแปรอิสระมีค่าถูกต้องและแม่นยำดังนั้นจำเป็นต้องแบ่งช่วงของข้อมูลออกเป็นช่วงๆ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น โดยมีหลักการแบ่งช่วงของข้อมูลของค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำในท่อขนาดมินิกับค่าตัวแปรอิสระ ดังนี้

ก. ค่าพารามิเตอร์ของค่าตัวแปรอิสระต้องมีค่าสัมพันธ์กับชุดข้อมูล (แปรผันตรงจะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวแปรเป็นบวก และแปรผกผันจะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวแปรจะเป็นลบ)

ข. การเลือกสมการความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตจะคำนึงถึงค่า RMS ของสมการความสัมพันธ์ที่ใกล้เคียง 1 และมีค่าเป็นบวก

ค. ค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำที่คำนวณได้จากโปรแกรมจะต้องมากกว่าศูนย์

ง. ช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจะแบ่งช่วงความสัมพันธ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกับค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของนักวิจัย Groeneveld et al. (1996)

ชุดข้อมูลที่น่ามาสร้างความสัมพันธ์จะใช้ของนักวิจัย Groeneveld et al. (2006) ที่ค่าคุณภาพไอน้ำเท่ากับ 0.1

3. ผลการคำนวณ

ผลการคำนวณจะได้สมการความสัมพันธ์ในแต่ละช่วงการไหล ดังตารางที่ 1 ซึ่งได้จากการคำนวณโดยโปรแกรมวิเคราะห์เชิงตัวเลขแมทแล็บ (MATLAB) กับข้อมูลการทดลองของ Groeneveld et al. (2006) โดยแสดงในรูปแบบสมการที่ 8-13

จากสมการความสัมพันธ์ที่ได้นำเสนอพบว่า
ในระบบการไหลที่ mass flux ต่ำ ($0-1,000 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)
จะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ในช่วงความดันต่ำถึงกลาง
($0-3,000$ กิโลปาสกาล) ผลกระทบของค่าความดันจะ
แปรผันตรงกับค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตและช่วงความ
ดันกลางถึงสูง ($3,000-10,000$ กิโลปาสกาล) จะ
แปรผกผันกับค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤต

ส่วนระบบการไหลที่ค่า mass flux กลาง จะแบ่ง
ออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงความดันต่ำถึงกลาง ($0-5,000$
กิโลปาสกาล) ผลกระทบของค่าความดันจะแปรผัน

ตรงกับค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตและช่วงความดัน
กลางถึงสูง ($5,000-10,000$ กิโลปาสกาล) จะ
แปรผกผันกับค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤต

และในระบบการไหลที่ค่า mass flux สูง จะแบ่ง
ออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงความดันต่ำถึงกลาง ($0-2,000$
กิโลปาสกาล) ผลกระทบของค่าความดันจะแปรผัน
ตรงกับค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตและช่วงความดัน
กลางถึงสูง ($2,000-10,000$ กิโลปาสกาล) จะ
แปรผกผันกับค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤต

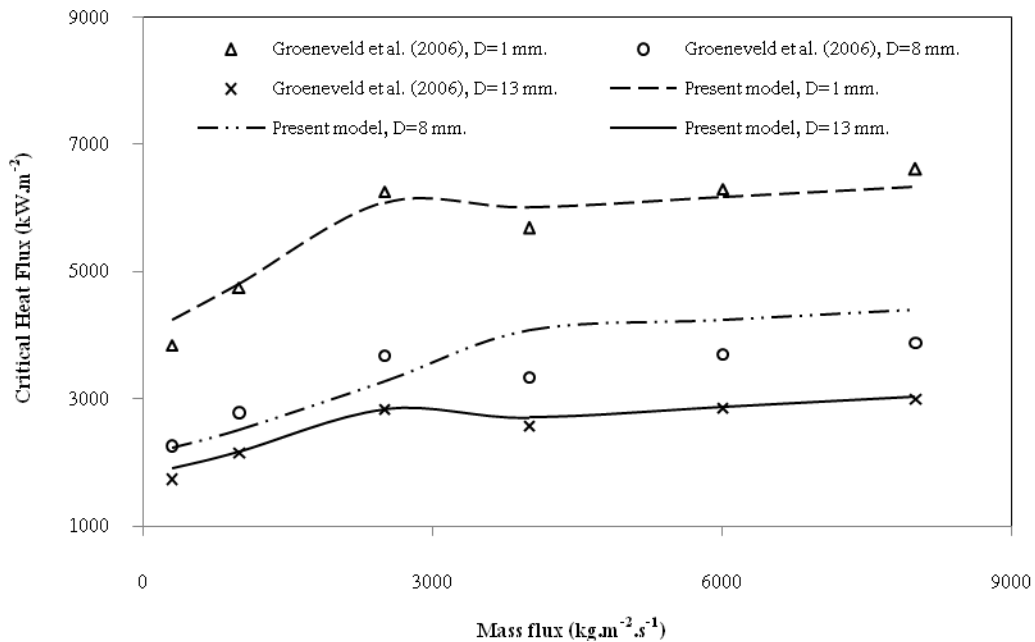
ตารางที่ 1 แสดงสมการความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำในท่อขนาดมินิในช่วงการไหลต่างๆ และ
ค่า RMS

ลำดับ	ช่วงการไหล	สมการความสัมพันธ์	RMS
1.	$P = 300-3,000 \text{ kPa},$ $G = 300 - 1,000 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ and $D=1-17 \text{ mm}.$	$CHF = 259.25P^{0.0002}G^{0.1075}D^{-0.0011}$ (8)	0.874
2.	$P = 3,000-10,000 \text{ kPa},$ $G = 300 - 1,000 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ and $D=1-17 \text{ mm}.$	$CHF = 9,719.41 - 0.32P + 0.36G - 807.45D$ (9)	0.821
3.	$P = 300-5,000 \text{ kPa},$ $G = 1,000-4,000 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ and $D=1-17 \text{ mm}.$	$CHF = 1,112.91P^{0.0004}G^{0.0056}D^{-0.0007}$ (10)	0.636
4.	$P = 5,000-10,000 \text{ kPa},$ $G = 4,000-8,000 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ and $D=1-17 \text{ mm}.$	$CHF = 10,609.82 - 0.43P - 0.60G - 232.14D$ (11)	0.836
5.	$P = 300- 2,000 \text{ kPa},$ $G = 4,000-8,000 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ and $D=1-17 \text{ mm}.$	$CHF = 5,7899.12 + 0.65P + 0.08G - 276.35D$ (12)	0.793
6.	$P = 2,000-10,000 \text{ kPa},$ $G = 4,000-8,000 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ and $D=1-17 \text{ mm}.$	$CHF = 7,244.92 - 0.36P + 0.1G - 229.04D$ (13)	0.818

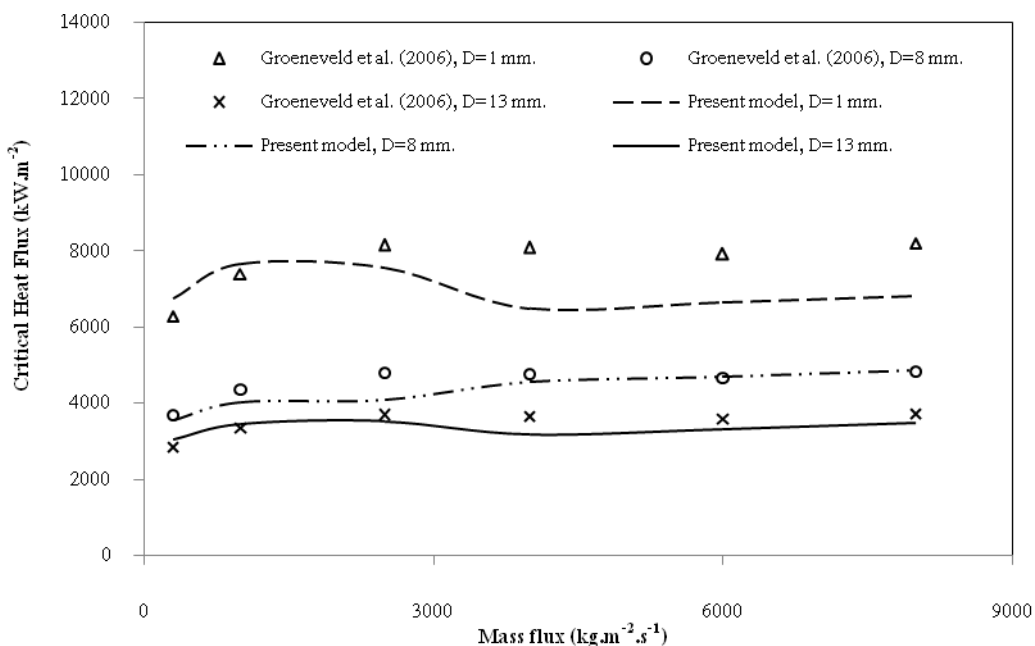
ส่วนการเปรียบเทียบสมการความสัมพันธ์ที่
นำเสนอ (Present model) กับผลการทดลองในช่วง
ของ mass flux $300-8,000 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, ขนาดเส้น

ผ่านศูนย์กลางที่ 1 มิลลิเมตร, 8 มิลลิเมตรและ 13
มิลลิเมตร ดังภาพที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับค่า
ความดัน 300 กิโลปาสกาล, 1,000 กิโลปาสกาล,

3,000 กิโลปาสกาล, 5,000 กิโลปาสกาลและ 10,000 กิโลปาสกาล



ภาพที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตระหว่าง Present model กับผลการทดลองของ Groeneveld et al. (2006) ณ ความดัน 300 กิโลปาสกาล



ภาพที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตระหว่าง Present model กับผลการทดลองของ Groeneveld et al. (2006) ณ ความดัน 1,000 กิโลปาสกาล

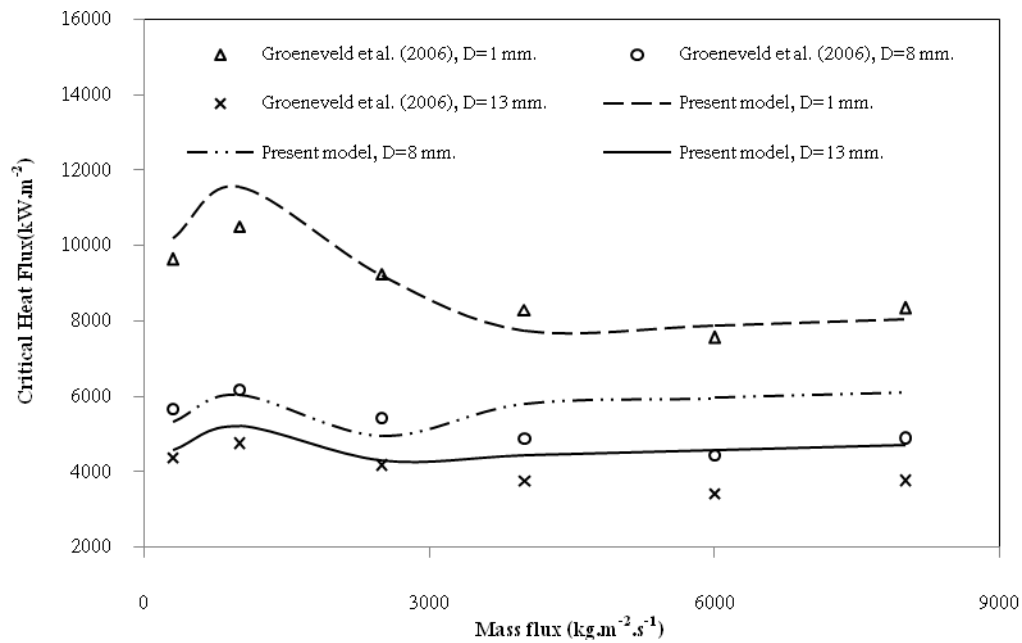
จากผลการเปรียบเทียบภาพที่ 1 และ 2 พบว่าค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำ ณ ความดัน 300 กิโลปาสกาล และ 1,000 กิโลปาสกาล พบว่า

สมการความสัมพันธ์ที่ได้นำเสนอมีความสอดคล้องกับผลการทดลองของ Groeneveld et al. (2006) โดยที่ค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตจะแปรผันตรงกับค่าความดัน

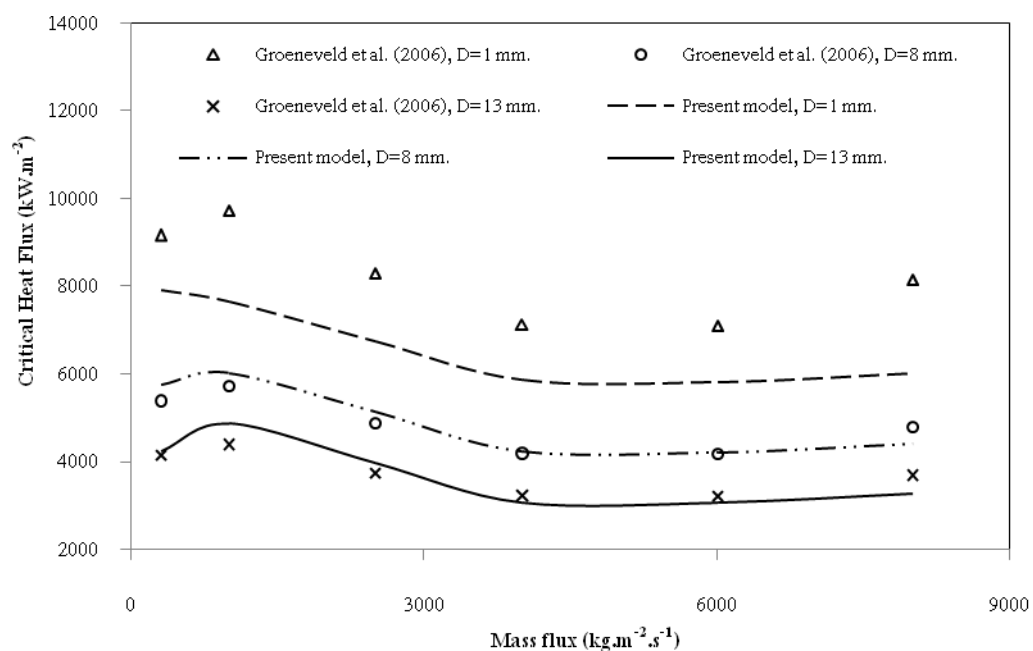
และค่า mass flux แต่แปรผกผันกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อการไหล

ส่วนภาพที่ 3, 4 และ 5 จะพบว่าค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำ ณ ความดัน 3,000 กิโลปาสกาล, 5,000 กิโลปาสกาลและ 10,000 กิโล

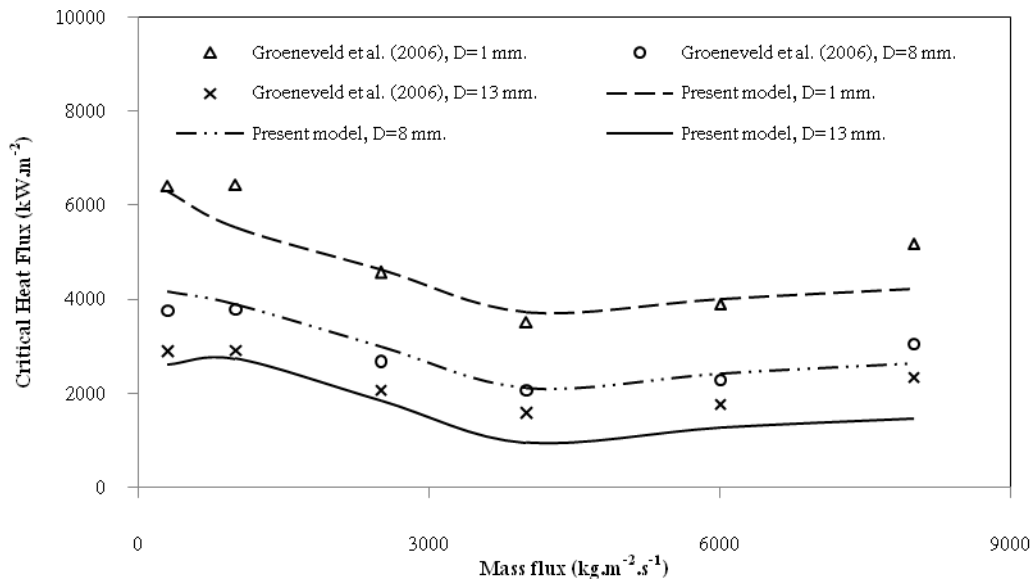
ปาสกาล พบว่าสมการความสัมพันธ์ที่ได้นำเสนอมีความสอดคล้องกับผลการทดลองของ Groeneveld et al. (2006) โดยที่ค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตจะแปรผันตามค่าความดันและผกผันกับค่า mass flux, ค่าความดันและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อการไหล



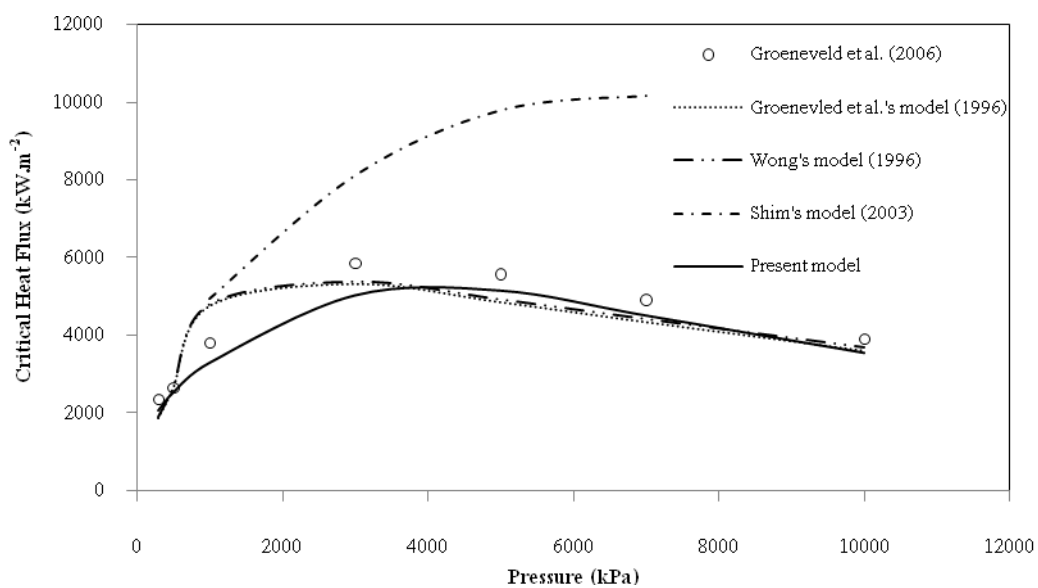
ภาพที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตระหว่าง Present model กับผลการทดลองของ Groeneveld et al. (2006) ณ ความดัน 3,000 กิโลปาสกาล



ภาพที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตระหว่าง Present model กับผลการทดลองของ Groeneveld et al. (2006) ณ ความดัน 5,000 กิโลปาสกาล



ภาพที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตระหว่าง Present model กับผลการทดลองของ Groeneveld et al. (2006) ณ ความดัน 10,000 กิโลปาสกาล



ภาพที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตระหว่าง Present model กับผลการทดลองของ Groeneveld et al. (2006) และแบบจำลอง (Groeneveld et al.'s model (1996), Wong's model (1996) และ Shim and Park's model (2003)) ณ ค่า Mass flux ที่ช่วง 300 kg.m⁻².s⁻¹

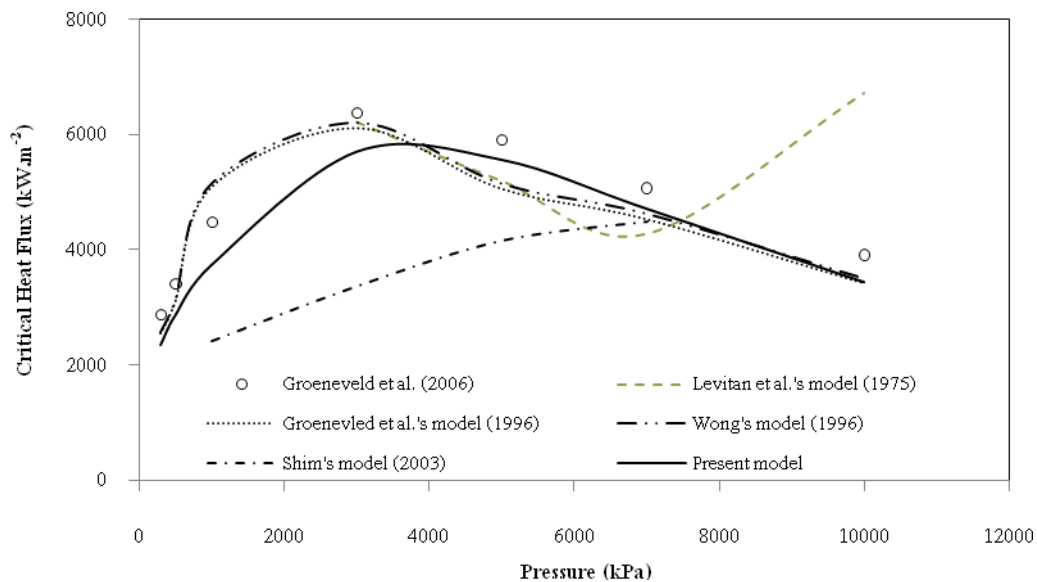
ในส่วนการเปรียบเทียบผลของสมการความสัมพันธ์ที่ได้นำเสนอกับผลการทดลอง (Groeneveld et al. (2006)) และแบบจำลองความสัมพันธ์ที่พิจารณาผลกระทบของค่าความดันที่ได้กล่าวข้างต้น (Levitan's model (2003),

(Groeneveld et al. (1996) และ Wong's model (1996)) โดยจะแสดงการเปรียบเทียบได้ดังภาพที่ 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 ที่ขอบเขตการไหลที่ mass flux 300-8,000 kg.m⁻².s⁻¹, ความดันที่ 300-10,000 กิโล

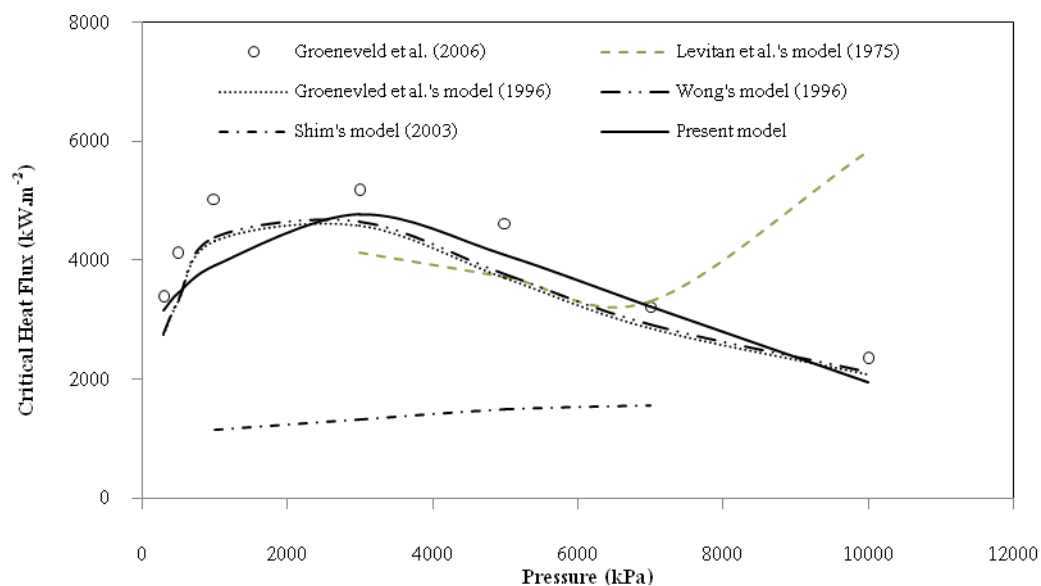
พลาสติก ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 10 มิลลิเมตร

ภาพที่ 6, 7, 8, 9 และ 10 จะแสดงการเปรียบเทียบระหว่าง Present model กับผลการทดลอง (Groeneveld et al. (2006)) และแบบจำลอง (Levitan's model (2003), (Groeneveld et al.

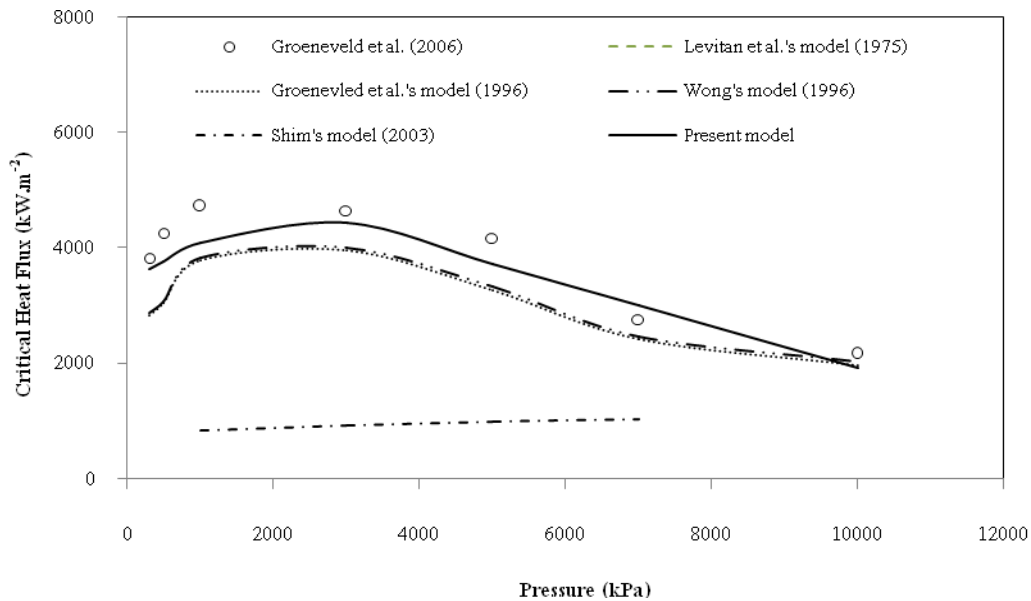
(1996) และ Wong's model (1996)) ที่ช่วง Mass flux $300 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, $1,000 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, $3,500 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, $5,500 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ และ $7,500 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ตามลำดับ พบว่า Present model มีถูกต้องและสอดคล้องได้ดีกว่าแบบจำลองที่ได้กล่าวมาทั้งในช่วงของความดันต่ำ, กลาง และ สูง



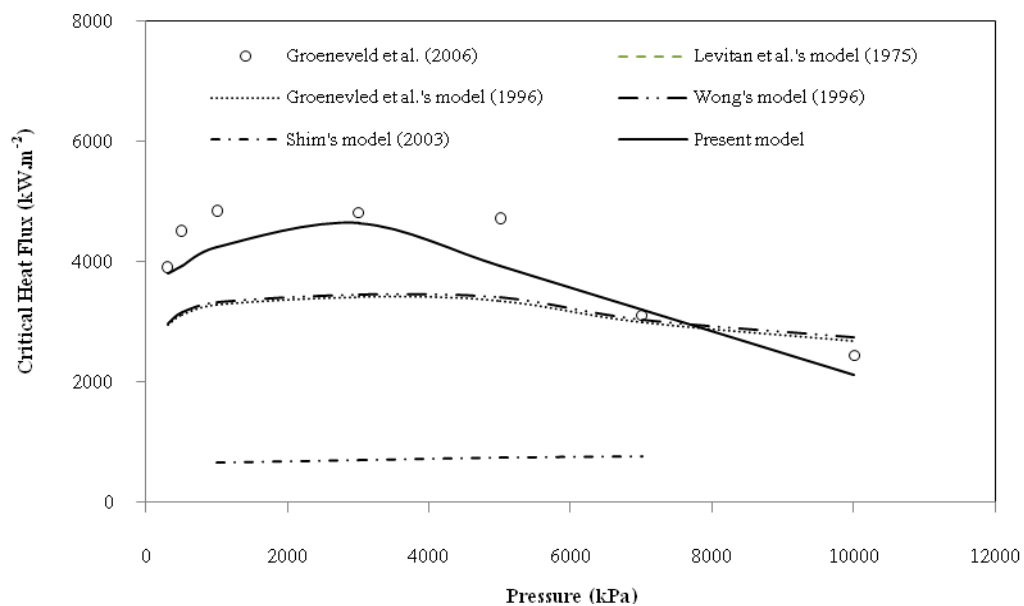
ภาพที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตระหว่าง Present model กับผลการทดลองของ Groeneveld et al. (2006) และแบบจำลองของ Levitan et al. (1975), Groeneveld et al. (1996), Wong (2000) และ Shim (2003) ณ ค่า Mass flux ที่ช่วง $1,000 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$



ภาพที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตระหว่าง Present model กับผลการทดลองของ Groeneveld et al. (2006) และแบบจำลองของ Levitan et al. (1975), Groeneveld et al. (1996), Wong (2000) และ Shim (2003) ณ ค่า Mass flux ที่ช่วง $3,500 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$



ภาพที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตระหว่าง Present model กับผลการทดลองของ Groeneveld et al. (2006) และแบบจำลองของ Levitan et al. (1975), Groeneveld et al. (1996), Wong (2000) และ Shim (2003) ณ ค่า Mass flux ที่ช่วง 5,500 kg.m⁻².s⁻¹



ภาพที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตระหว่าง Present model กับผลการทดลองของ Groeneveld et al. (2006) และแบบจำลองของ Levitan et al. (1975), Groeneveld et al. (1996), Wong (2000) และ Shim (2003) ณ ค่า Mass flux ที่ช่วง 7,500 kg.m⁻².s⁻¹

จากการเปรียบเทียบ Present model กับแบบจำลองต่างที่ผ่านมา พบว่าสมการความสัมพันธ์ที่พิจารณาผลกระทบของค่าความดันในแต่ละช่วงการไหล จะทำให้มีความถูกต้องและแม่นยำต่อระบบ

การไหลนั้น เพราะระบบการไหลที่เกิดค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตจะเกิดผลกระทบของค่าความดันที่สามารถแบ่งออกได้เป็นช่วงๆ ดังที่ได้กล่าวมา

ตารางที่ 2 แสดง RMS ของแต่ละสมการความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำในท่อขนาดมินิเมื่อเทียบกับผลการทดลองของ Groeneveld et al. (2006)

Present model	Levitan et al.'s model (1975)	Groeneveld et al.'s model (1996)	Wong's model (2000)	Shim and Park's model (2003)
0.8154	-2.0295	0.2728	0.5644	-9.0104

จะเห็นได้ว่าความถูกต้องของสมการความคลาดเคลื่อนของแต่ละแบบจำลอง พบว่า Present model มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าแบบจำลองอื่นที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น โดยการพิจารณาจากค่า RMS ที่มีค่าใกล้เคียง 1 ที่ช่วงความดัน 300-10,000 กิโลปาสกาล, mass flux 300-8,000 $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ 1-17 มิลลิเมตร ดังตารางที่ 2 ซึ่งพบว่า Present model มีความสอดคล้องกับผลการทดลองที่ดีที่สุด รองลงเป็น Wong's model (1996), Groeneveld et al.'s model (1996), Levitan et al.'s model (1975) และ Shim and Park's model (2003) ตามลำดับ ส่วนค่า RMS ที่มีค่าติดลบแสดงว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนของสมการความสัมพันธ์ที่มีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยของผลการทดลองที่นำมาเปรียบเทียบ

4. สรุปและวิจารณ์

ผลกระทบของค่าความดันมีความสำคัญต่อการพิจารณาหาค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤต เพราะจากการพิจารณาหาค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตในแต่ละช่วงความดันของระบบ ดังจะเห็นได้จากผลการคำนวณ จึงสามารถสรุปได้ว่าสมการที่ได้นำเสนอที่ได้นำผลกระทบที่มีผลต่อค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตที่สำคัญคือค่าความดัน, mass flux และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อการไหลมีความถูกต้องและสอดคล้องที่ดีกว่าแบบจำลองที่ผ่านมา

5. เอกสารอ้างอิง

5.1 บทความจากวารสาร (Journal)

[1] Nukiyama, S. (1934). Maximum and Minimum Values of Heat Transmitted from a Metal to Boiling Water under Atmospheric Pressure,

Japanese Society of Mechanical Engineering, Japan, vol. 37, pp. 367-373, S53-43.

[2] Bonilla, C.F., Perry, C.W. (1941). Heat Transmission to Boiling Binary Liquid Mixture, Transactions of American Society of Chemical Engineering, vol. 37, pp. 685-705.

[3] Gunther, F.C.. (1951). Photographic Study of Surface-Boiling Heat Transfer to Water with Forced Convection, Transactions of the ASME, Vol. 73, No. 2, pp. 115-123.

[4] Bergles, A. (1963). Subcooled Burnout on Tube of Small Diameter, Paper No. 63-WA-182 ASME.

[5] Biasi, Clerici, Harribba, Sola, Tozzi. (1967). Burnout Correlation for Uniform Heating, Round Ducts, Nuclear Engineering, Vol. 14(5), pp. 530-536.

[6] Tong, L.S.. (1967). Prediction of departure from nucleate boiling for an axially non-uniform heat flux distribution, Journal of nuclear energy, vol. 21, pp. 241-248.

[7] Doroshuck, E., Levitan, L.L., Lantzman, F.P. (1975). Investigation into Burnout in Uniformly Heated Tube, ASME Publication, 75 - WA/HT - 22

[8] Levitan, L.L., Lantsman. (1975). Investigating burnout with flow of a steam-water mixture in a round tube, Teploenergetika, vol. 22(1), pp. 80-83.

[9] Groeneveld, D.C, Cheng, S.C., Doan, T. (1986). AECL-UO critical Heat Flux Look-up Table, Heat Transfer Eng, vol. 7, pp. 46-62.

[10] Inasaka, F., and Nariiai, H.. (1987). Critical Heat Flux and Flow Characteristics of Subcooled Flow Boiling in Narrow Tubes, JSME International Journal, Vol. 30-268.

[11] Groeneveld, D.C., L.K.H., Leung, Kirillov, Bobkov, V.P., Smogalev, I.P., Vinogradov, V.N., Huang, X.C., Royer, E. (1996). The 1995 Lookup Table for Critical Heat Flux in Tubes, Nuclear Engineering and Design, vol. 163, pp. 1-23

[12] 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, Canada.

[13] Roach, G.M. Jr, Abdel-Khalik, S.I., Ghiaasiaan, S.M., Dowling, M.F. and Jeter, S.M.. (1998). Low-Flow Critical heat flux in Heated Microchannels, Nuclear Science and Engineering. Vol.131, pp. 441-425.

[14] Hall, D.D., Mudawar, I. (2000). Critical Heat Flux for Water Flow in Tube-II Subcooled CHF Correlations, Inter Journal Heat Mass Transfer, vol. 43, 2605-2640.

[15] Kandlikar. (2001). Critical Heat Flux in Subcooled Flow Boiling – An Assessment of Current Understanding and Future Directions for Research, Multiphase Science and Technology, vol. 13, No. 3, pp. 207-232.

[16] Shim, Park. (2003). Predict of Critical heat flux (CHF) for vertical round tube with uniform heat flux in medium pressure regime, Korea Journal Chemical English, vol. 21(1), pp. 75-80.

[17] Groeneveld, Shan, Vasic, Leung, Durmayaz, Yang, Cheng, Tanase. (2006). The 2006 CHF Lookup Table, Nuclear Engineering and Design, vol. 237, pp. 1909-1922.

5.2 รายงาน

[1] Zubar, N. (1959). Hydrodynamic Aspects of Boiling Heat Transfer, Ph.D. thesis, Research Laboratory, Los Angeles and Ramo-Wooldridge Corporation, University of California, Los Angeles.

[2] Macbeth, R.V.. (1963), Burn-Out Analysis. Part-4. Application of a Local Condition Hypothesis to World Data for Uniformly Heated Round Tubes and Rectangular Channels, UKAEA Report, AEEW-R267, Winfrith.

[3] Becker, K.M. (1965). An Analytical and Experimental Study of Burnout conditions in Vertical Round Ducts, Aktiebolaget Atomenergie Report AE 177, Sweden.

[4] Cheng, Muller. (2003). Review on Critical Heat Flux in Water Cooled Reactors,” Ph.D. Thesis, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, Germany.

5.3 หนังสือ

[1] Lang, C. (1888). *Transactions of Engineering and Shipbuilder*, Scotland, vol. 32, pp. 279-295.

[2] Tong, Weisman. (1979). *Thermal Analysis of Pressurized Water Reactors*, American Nuclear Society, La Grange Park, Ill.

[3] Bejan. (1995), *Convection Heat Transfer*, Wiley, New York, Chap.10.2.

[4] Warren, Rohsenow, Hartnett, Ganic. (1985). *Handbook of Heat Transfer Fundamentals*, McGraw-Hill, New York, Chap.12.