

การศึกษาเชิงทดลองในการหาลักษณะการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพุด
ของของไหลนาโนชนิด SiO_2 -Water บนผิวทรงกระบอกวางในแนวนอน
An Experimental Study on Pool Boiling Heat Transfer Characteristic
of SiO_2 -Water Nano-fluids on Horizontal Cylinder Surface

วีระพันธ์ ดั่งทองสุข¹ และสมบัติ ทีฆทรัพย์²

Weerapund Daungthongsuk¹ and Sombat Teekasap²

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

¹Faculty of Engineering, South East Asia University

²คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

²Faculty of Engineering, Eastern Asia University

บทคัดย่อ

การศึกษาเชิงทดลองในการหาสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพุด (pool boiling) ภายใต้สถานะนิวเคลียต (nucleate boiling) ของของไหลนาโน (nano-fluid) ชนิดที่ใส่อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ลงในน้ำ (SiO_2 -water) โดยทดลองให้ผิวให้ความร้อนทรงกระบอกที่ทำมาจากทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 cm ยาว 16 cm และมีความหยาบผิว $0.8\mu\text{m}$ วางในแนวนอนของไหลนาโนที่ใช้ในการทดลองมีความเข้มข้น 0.02, 0.03 และ 0.04 %V. ตามลำดับ พลักซ์ความร้อนที่ใช้ในการทดลองอยู่ระหว่าง 68 ถึง 152 kW/m^2 พฤติกรรมเดือดของของไหลจะบันทึกโดยใช้กล้องถ่ายภาพดิจิทัล ตัวแปรในการศึกษาคือความเข้มข้นของของไหลนาโนและพลักซ์ความร้อนที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ผลที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของน้ำ ผลการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพุดของน้ำให้ค่าสอดคล้องกับการทำนายโดยใช้สมการของ Rohsenow และสมการของ Cooper โดยมีค่าสูงขึ้นตามค่าพลักซ์ความร้อนและผลต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวความร้อนกับของไหล เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของของไหลนาโนพบว่า ที่ความเข้มข้นไม่เกิน 0.03 %V. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะมีค่าสูงกว่าน้ำโดยเฉลี่ยระหว่าง 4 ถึง 23% แต่จะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของของไหลนาโนเท่ากับ 0.04%V.

คำสำคัญ: สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, การเดือดแบบพุด, ผิวให้ความร้อน, ของไหลนาโน, SiO_2 -water

Abstract

Experimental investigations on the nucleate pool boiling heat transfer coefficient of SiO_2 -water nano-fluids under nucleate boiling regime have been studied. Horizontal cylindrical heating surface made from brass with 2 cm diameter and 16 cm length and surface roughness of $0.8\mu\text{m}$, are used. Similarly, SiO_2 nanoparticles dispersed in deionized water at particle volume concentrations of 0.02, 0.03 and 0.04 %V. are used as working fluid and then compared with the pure water. Wall heat fluxes are ranging from 68 - 152 kW/m^2 . A digital camera is used to monitor the pool boiling behavior during the test run. Effects of particle concentration and heat flux on the boiling heat transfer

coefficient are reported. The experimental data indicated that the measured heat transfer coefficient is close to the calculated values from Rohsenow's equation and Cooper's equation. Pool boiling heat transfer coefficient increased with increasing the heat flux and temperature difference between the heating surface and the working fluid. At particle concentration less than 0.03 %V., the boiling heat transfer coefficients of nano-fluids are higher than those of the water 4 to 23%, approximately. However, at particle concentration of 0.04 %V., decreasing in the heat transfer coefficients are observed.

Keywords: heat transfer coefficient, pool boiling, heating surface, nano-fluids, SiO_2 -water



บทนำ

ปัจจุบันกำลังเข้าสู่ยุคที่พลังงานมีราคาแพง และประสบปัญหาการขาดแคลนพลังงาน อันเป็นผลเนื่องมาจากประชากรที่เพิ่มขึ้น รวมถึงการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดนับเป็นความท้าทายอย่างมาก โดยเฉพาะงานทางด้านวิศวกรรมสำหรับระบบทางความร้อน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนับเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่ใช้อย่างกว้างขวาง ในอุตสาหกรรมด้านต่าง ๆ เช่น เครื่องปรับอากาศ, เครื่องทำความร้อน/ความเย็น, หม้อไอน้ำ, โรงไฟฟ้า, ยานพาหนะและใช้ในการระบายความร้อนออกจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก เป็นต้น ดังนั้นเพื่อที่จะลดการใช้พลังงานลง จะต้องทำการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหรือทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนของของไหลทำงานเพื่อที่จะทำให้สามารถตอบโต้ทางด้านการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพสูงสุดดังที่กล่าวมาได้สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกี่ยวข้องกับการเดือดของของไหล จะมีการใช้กันอย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรม เช่น หม้อไอน้ำ ให้ความร้อน อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรม HVAC (Heating, Ventilating, and Air Conditioning) หรือแม้กระทั่งใช้ในโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ ซึ่งการเดือด เป็นวิธีการถ่ายเทความร้อนที่มีสมรรถนะสูง เนื่องจากอาศัยผลของความร้อนแฝงจากการเปลี่ยนสถานะของของไหลจากของเหลวให้กลายเป็นไอ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะมีค่าสูงกว่าในกรณีที่ของไหลแบบสถานะเดียว (single phase) มาก การเดือดจะเกิดขึ้นได้ทั้งในกรณีที่ของไหลมีการไหล

ที่เรียกว่า “การเดือดแบบไหล (flow boiling)” และการเดือดในกรณีที่ของไหลอยู่นิ่งในภาชนะที่เรียกว่า “การเดือดแบบพูล (pool boiling)” ไม่ว่าจะเป็นการเดือดแบบใดก็ตาม การที่ของไหลจะเดือดได้นั้นของไหลจะต้องสัมผัสกับผิวให้ความร้อน ที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิอิ่มตัวของของไหลภายใต้สภาวะความดันขณะนั้น ซึ่งการที่จะพัฒนาสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายใต้สภาวะการเดือดแบบต่าง ๆ นั้น จำเป็นจะต้องศึกษาถึงพฤติกรรมการเดือด หรือตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อเดือดเสียก่อน จึงจะสามารถประเมินสมรรถนะการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เมื่อพิจารณาเฉพาะการเดือดแบบพูลการวิจัยครั้งนี้เป็นงานวิจัยต่อเนื่องของผู้เขียนที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการเดือดแบบนิวเคลียตของของไหลนาโนบนผิวให้ความร้อนชนิดต่าง ๆ ซึ่งเอกสารวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยทางด้านการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพูล ผู้เขียนได้รวบรวมไว้ในเอกสารวิจัยที่ตีพิมพ์ก่อนหน้านี้ (Yiamsawas, et al., 2011; Prathansong, et al., 2014; Yiamsawas & Duangthongsuk, 2015; Yiamsawas, et al., 2016) อย่างไรก็ตาม สำหรับงานวิจัยล่าสุดที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการเดือดของไหลนาโนบนผิวให้ความร้อนแบบต่าง ๆ ได้ทำการสรุปพอสังเขปเพิ่มเติมดังต่อไปนี้

Huang และคณะ (2011) ทำการทดลองหาลักษณะเฉพาะการเดือดแบบพูลของของไหลนาโนชนิด ศึกษา TiO_2 -water nano-fluids ที่มีความเข้มข้น 0.01 ถึง 1%wt. (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) บนผิวลวดนิกเกิล ภายใต้ฟลักซ์ความร้อนไม่เกิน 1000 kW/m^2 ผลการทดลองพบว่าค่าฟลักซ์

ความร้อนวิกฤติ (Critical Heat Flux--CHF) ของของไหลนาโนมีค่าสูงกว่าน้ำประมาณ 82% อย่างไรก็ตามการเกาะตัวของอนุภาคนาโนบนผิวให้ความร้อนมีผลทำให้เส้นโค้งการเดือด (boiling curve) นั้นมีแนวโน้มต่ำลง Ahn และ Kim (2013) ศึกษาพฤติกรรมเดือดของของไหลนาโนชนิด Al_2O_3 -water nano-fluids ภายใต้สภาวะการเดือดใกล้ๆ กับจุดฟลักซ์ความร้อนวิกฤติ โดยใช้แท่งทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm เป็นผิวให้ความร้อน จากการทดลองพบว่า การที่อนุภาคนาโนเคลือบอยู่บนผิวให้ความร้อนนั้นทำให้เส้นโค้งการเดือด (boiling curve) และค่า CHF ของกรณีที่ใช้ น้ำ เป็นของไหลทำงานเปลี่ยนไป โดยได้อธิบายและให้ข้อแนะนำเกี่ยวกับจุดเปลี่ยน (bending point) ของพฤติกรรมเดือดนี้ด้วย Ho และ Yang (2014) ทำการศึกษาการเดือดภายใต้สภาวะอิ่มตัว บนผิวให้ความร้อนที่เคลือบด้วยของอนุภาคนาโนชนิด Carbon nanotube และวางในมุมเอียง 0, 30, 60, 120, 150 และ 180 องศา จากการศึกษาพบว่าผิวให้ความร้อนที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนชนิด Carbon nanotube และวางในมุมเอียง 90 องศา ให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นถึง 42% เมื่อเทียบกับผิวที่ไม่ได้เคลือบอนุภาคนาโน Seo และคณะ (2015) ทำการทดลองเพื่อศึกษาสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดของผิวให้ความร้อนชนิด Indium tin oxide (ITO) ที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนชนิดต่าง ๆ ภายใต้สภาวะการเดือดแบบนิวคลีเอตและฟลักซ์ความร้อนวิกฤติ ของไหลทำงานที่ใช้ในการทดลองคือสารทำความเย็น FC-72 และทดสอบภายใต้ความดันบรรยากาศ จากการทดลองพบว่าผิวให้ความร้อนที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนของ Porous grapheme และ SiC ให้ค่า CHF ที่สูงกว่ากรณีที่ไม่มีการเคลือบผิวประมาณ 90 และ 50% ตามลำดับ Sarafraz และ Hormozi (2015) ทำการศึกษาเชิงทดลองหาค่า BHTC ของของไหลนาโนชนิด CuO -water nanofluids ที่มีความเข้มข้นระหว่าง 0.1 ถึง 0.4%wt. โดยศึกษาถึงผลของสารลดแรงตึงผิว (surfactant) ชนิดต่าง ๆ, ฟลักซ์ความร้อน, ความเข้มข้นของของไหลนาโนและความหยาบของผิว ที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือด (Boiling Heat Transfer Coefficient-- BHTC) จากผลการทดลองพบว่าเมื่อไม่ใช้สารลดแรงตึงผิวจะทำให้ค่า BHTC นั้นลดลง เมื่อเทียบกับน้ำปกติ แต่เมื่อใส่สาร

ลดแรงตึงผิวลงไป จะทำให้ค่า BHTC สูงขึ้นอย่างมาก นอกจากนั้นการเกาะตัวของอนุภาคนาโนบนผิวให้ความร้อนผลทำให้ความหยาบของผิวให้ความร้อนสูงขึ้น ซึ่งเปรียบเสมือนความต้านทานความร้อนตัวหนึ่ง Ali และคณะ (2016) ทำการทดลองเพื่อศึกษาการเดือดของของไหลนาโนชนิด TiO_2 -water nanofluids ภายใต้สภาวะการเดือดแบบนิวคลีเอต ความเข้มข้นของของไหลนาโนที่ใช้ทดสอบคือ 12 และ 13 %wt. จากการทดลองพบว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดของของไหลนาโนมีค่าสูงกว่าน้ำปกติประมาณ 24 ถึง 38 % นอกจากนั้น Ham และคณะ (2016) ทดลองหาการเดือดแบบฟูลของของไหลนาโนชนิด Al_2O_3 -water nanofluids ที่มีความเข้มข้นระหว่าง 0.001, 0.05 และ 0.1%V. โดยศึกษาผลของความหยาบของผิวให้ความร้อนและความเข้มข้นของของไหลนาโน ที่มีต่อค่า CHF และ BHTC จากการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้น 0.05 %V. ค่า CHF ของผิวเรียบและผิวหยาบมีค่าสูงขึ้น 225 และ 139% ตามลำดับอย่างไรก็ตามถ้าความเข้มข้นเกิน 0.05 %V. จะทำให้ค่า CHF ลดลงทั้งกรณีที่เป็นผิวเรียบและผิวหยาบ นอกจากนั้นที่ฟลักซ์ความร้อนเดียวกัน ค่า BHTC ของของไหลนาโนบนผิวเรียบให้ค่าที่สูงกว่าผิวหยาบและมีค่าต่ำกว่าน้ำอีกด้วย อย่างไรก็ตามที่สภาวะ CHF ค่า BHTC ของของไหลนาโนจะมีค่าสูงกว่าน้ำ

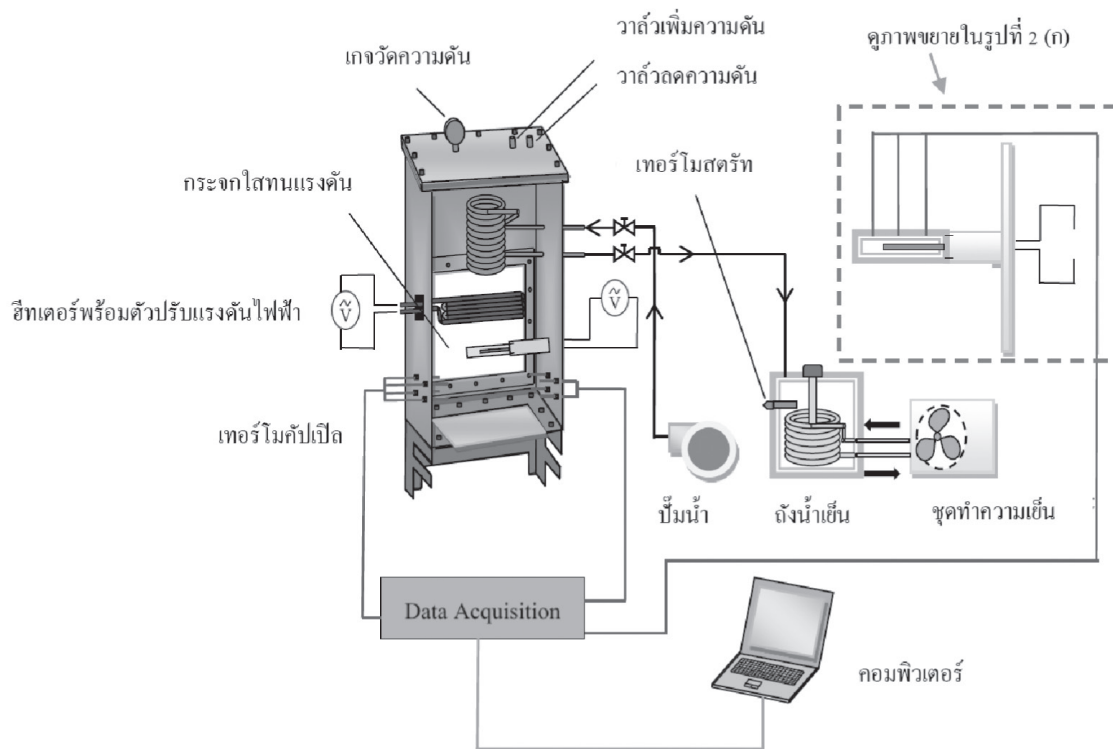
จากการสำรวจเอกสารข้างต้น พบว่าผลการทดลองอาจจะยังมีการขัดแย้งกันอยู่บ้าง นักวิจัยบางส่วนรายงานว่าของไหลนาโนให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดที่สูงกว่าน้ำ บางส่วนรายงานในทิศทางกลับกันว่าน้ำให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดที่สูงกว่าของไหลนาโน ซึ่งพฤติกรรมถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบฟูลที่แท้จริงยังมีแง่มุมที่น่าสนใจสำหรับการศึกษาเพื่อยืนยันพฤติกรรมถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดที่แท้จริง ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาพฤติกรรมถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดของของไหลนาโนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ บนผิวให้ความร้อนที่ทำมาจากทองเหลือง ขนาด 2 cm ยาว 16 cm ผิวมีความหยาบ $0.8 \mu m$ โดยทำการทดสอบภายใต้ความดันบรรยากาศและฟลักซ์ความร้อนที่ใช้ทดลองอยู่ระหว่าง 68 ถึง 152 kW/m^2

อุปกรณ์การทดลอง

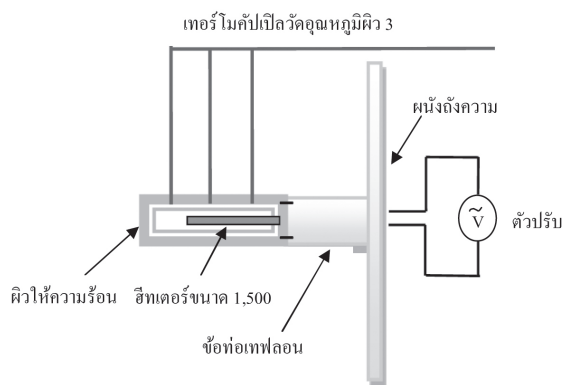
ไดอะแกรมของอุปกรณ์การทดลองที่ใช้ในการศึกษานี้ แสดงดังรูปที่ 1 ประกอบด้วย ถังความดันที่มีปริมาตร 20 ลิตร ทำมาจากสแตนเลสหนา 1 cm ทำการติดตั้งกระจกใสทนแรงดันหนา 1.5 cm ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง สำหรับสังเกตพฤติกรรมและการเดือดของของไหลขณะทำการทดลอง ด้านนอกของถังความดันจะทำการหุ้มฉนวนเพื่อลดความร้อนสูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อมภายในถังประกอบด้วยตัวอุ่น ขนาด 4,000 W สำหรับทำอุณหภูมิของของไหลทดสอบภายในถังให้มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิอิมมัว บริเวณส่วนบนของถังทำการติดตั้งคอยล์เย็นสำหรับลดความดันภายในถังให้มีค่าเท่ากับความดันที่ต้องการ และมีหน้าที่ทำให้ไอที่เกิดจากการเดือดควบแน่นกลับมาเป็นของเหลวและไหลหยดลงสู่ด้านล่างภายในถังต่อไป โดยคอยล์เย็นนี้รับน้ำเย็นมาจากถังทำน้ำเย็นที่ใช้เครื่องทำน้ำเย็นขนาด 3.5 kW สำหรับผิวให้ความร้อนที่ทำการศึกษาในครั้งนี้ทำมาจากแท่งทองเหลืองทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 cm ยาว 16 cm ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยผิวให้ความร้อนมีความหนาเฉลี่ย เท่ากับ $0.8\mu\text{m}$ พื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 103.7 cm^2 ภายในทำการติดตั้งฮีตเตอร์ขนาด 1,500W สำหรับให้ความร้อนกับแท่งทองเหลืองที่ใช้ทดสอบ โดยสามารถปรับภาระความร้อนด้วย เครื่องปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (variac) ขนาด 10 A และแท่งทองเหลืองหรือผิวให้ความร้อนจะต่อกับขั้วต่อเทฟลอนที่ติดอยู่ที่ผนังด้านข้างของถังความดัน เพื่อลดความร้อนสูญเสียจากแท่งทองเหลืองไปสู่ผนังของถัง

ความดัน อุณหภูมิของไหลภายในถังความดัน วัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด ที (T-type thermocouple) จำนวน 4 ตำแหน่งเช่นเดียวกัน อุณหภูมิผิวของแท่งทดสอบ วัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด ที จำนวน 3 ตำแหน่งซึ่งเครื่องวัดอุณหภูมิจะทำการสอบเทียบความแม่นยำกับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน ที่มีความละเอียด $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ข้อมูลของอุณหภูมิทุกตำแหน่งจะบันทึกโดยใช้ DAQ (data acquisition) และเมื่อสภาวะการทดลองเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state condition) แล้วจะทำการบันทึกค่าของอุณหภูมิผิวของแท่งทดสอบ 3 ตำแหน่ง และอุณหภูมิของไหลภายในถังความดัน 4 ตำแหน่ง โดยทำการบันทึกข้อมูลการทดลองจำนวน 3 ครั้งจากนั้นนำมาหาค่าเฉลี่ยต่อไป

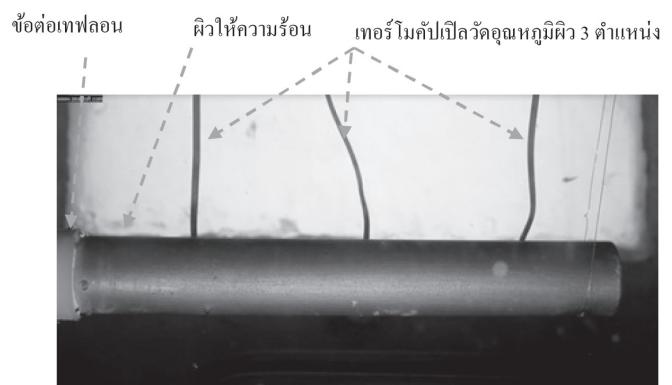
ในส่วนของการไหลนาโนที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นชนิดที่ใส่อนุภาคของ SiO_2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 15 nm ลงในน้ำชนิด Deionized water โดยทดลองที่ความเข้มข้น 0.02, 0.03 และ 0.04 %V. ซึ่งการเตรียมของไหลนาโนในครั้งนี้ จะใช้เทคนิคที่เรียกว่า 2-Step ซึ่งนิยมใช้กับการเตรียมนุภาคนาโนออกไซด์ของโลหะ โดยในขั้นแรกจะทำการใส่อนุภาคนาโนในปริมาณที่กำหนดลงในของไหลฐาน ภายใต้กระบวนการกวน จากนั้นจะใช้เครื่องสั่นเหนือเสียง (ultrasonic vibrator) ประมาณ 2 ชั่วโมง ทำการกระจายอนุภาคของ SiO_2 ให้กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ไม่เกิดการเกาะตัวกันสำหรับการศึกษาครั้งนี้จะไม่ใช้สารลดแรงตึงผิวใดๆ ใส่ลงไปเพื่อเป็นการป้องกันผลของสารลดแรงตึงผิวที่มีต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน



ภาพ 1 ไดอะแกรมของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



ก. ภาพโครงสร้าง



ข. ภาพถ่ายจริง

ภาพ 2 ผิวให้ความร้อนที่ใช้ในการทดลอง

แนวคิดทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ก่อนที่จะทำการทดลองหาสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบฟูลของของไหลนาโน จะต้องทำการเปรียบเทียบความถูกต้องของค่าที่วัดได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณเสียก่อน เพื่อยืนยันความถูกต้องแม่นยำของค่าที่วัดได้จากการทดลอง ซึ่งในครั้งนี้ได้ใช้สมการของ Rohsenow (1951) และสมการของ Cooper (1984) สำหรับเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลอง

ที่ใช้น้ำเป็นของไหลทำงาน ซึ่งสมการมีรูปแบบดังนี้

สำหรับสมการ Rohsenow (1951)

$$h_B = \frac{\mu_l h_{fg}}{(T_S - T_{sat})} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{0.5} \left[\frac{C_{p,l}(T_S - T_{sat})}{0.006 h_{fg} Pr_l} \right]^3 \quad (1)$$

สำหรับสมการ Cooper (1984)

$$h_B = 1.7 \times 55 P_R^{0.12-0.4343 \ln \epsilon} (-0.4343 \ln P_R)^{-0.55} M^{-0.5} q^{0.67} \quad (2)$$

ซึ่งสมการของ Rohsenow (1951) นั้นใช้สำหรับคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพุดในช่วงนิวคลีเอตของของไหลทำงานและผิวให้ความร้อนชนิดต่างๆ และสมการของ Cooper (1984) ใช้สำหรับคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพุดของของไหลที่มีความดันลดรูป (reduced pressures) ระหว่าง 0.001 ถึง 0.9 และน้ำหนักโมเลกุลของของไหลระหว่าง 2 ถึง 200

โดยที่ h_B คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการเดือดแบบพุด ($W/m^2 \cdot ^\circ C$), q คือ ฟลักซ์ความร้อน (W/m^2), T คือ อุณหภูมิ ($^\circ C$), σ คือ แรงตึงผิวของของไหล (N/m), μ คือ ความหนืดของของไหล ($kg/m \cdot s$), ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3), C_p คือ ความร้อนจำเพาะ ($J/kg \cdot ^\circ C$), h_{fg} คือ ค่าความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะ (J/kg), Pr คือ เลขพริ้นด์เทิล, P_R คือ ความดันลดรูป, M คือ น้ำหนักโมเลกุลของของไหล, ϵ คือ ความหยาบของผิว (μm) สำหรับสัญลักษณ์ตัวห้อย I คือ สถานะของเหลว, v คือ สถานะไอ, S คือ พื้นผิว, และ sat คือ สภาวะอิ่มตัว

สมการคำนวณผลจากการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการเดือดและการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพุดของของไหลนาโน และทำการศึกษาในช่วงการเดือดแบบนิวคลีเอตภายใต้ความดันบรรยากาศเท่านั้น โดยสมการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณมีดังต่อไปนี้

ค่าฟลักซ์ความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการเดือดแบบพุด (h_B) สามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

ค่าฟลักซ์ความร้อน (q) ได้จากพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแท่งทดสอบต่อพื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อน ดังนี้

$$q = \frac{Q_{elec}}{A_s} \quad (3)$$

$$\text{โดยที่ } Q_{elec} = VI \quad (4)$$

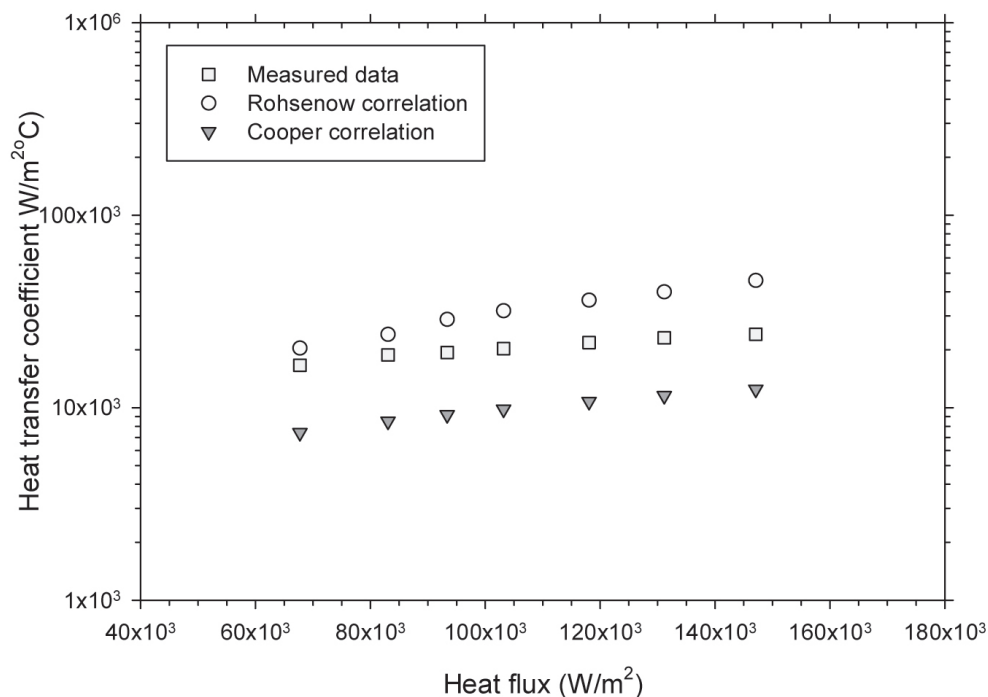
จากนั้นนำค่าฟลักซ์ความร้อนที่ได้จากสมการที่ (3) มาใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการเดือดแบบพุด (h_B) ดังนี้

$$h_B = \frac{q}{T_s - T_{sat}} \quad (5)$$

โดยที่ Q_{elec} คือ ความร้อนจากไฟฟ้า (W), A_s คือ พื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อน (m^2), I คือ กระแสไฟฟ้า (Amp), และ V คือ แรงดันไฟฟ้า ($Volt$)

ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

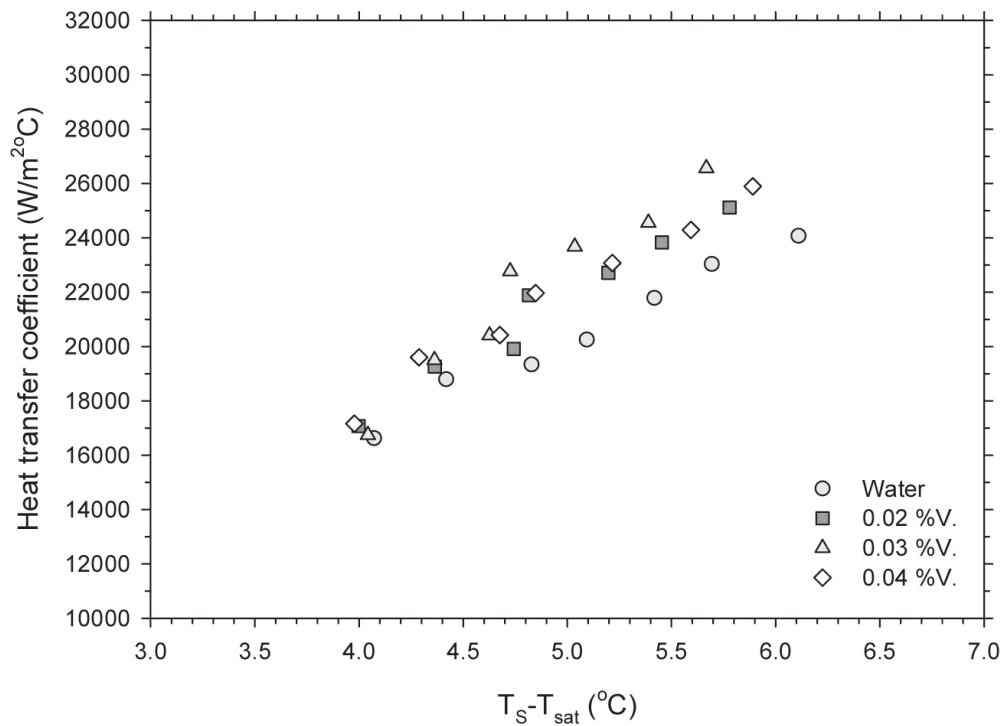
รูปที่ 3 เป็นการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพุดของน้ำระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการของ Rohsenow (1951) และ Cooper (1984) จากผลการทดลองเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพุดที่ได้จากการทดลองให้ค่าที่สอดคล้องมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับการทำนายโดยใช้สมการทั้งสอง นั้นหมายความว่าค่าที่ได้จากการทดลองมีความถูกต้อง แม่นยำพอที่จะใช้หาค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดในกรณีที่ใช้ของไหลนาโนเป็นของไหลทำงาน



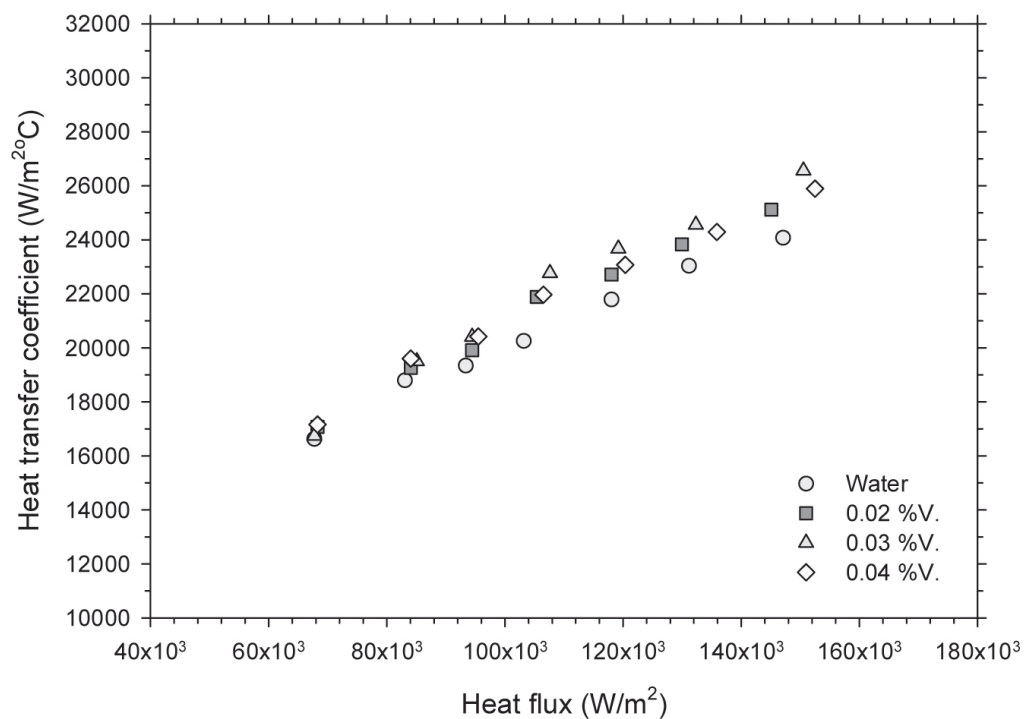
ภาพ 3 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบฟูลของน้ำระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณ

รูปที่ 4 และรูปที่ 5 แสดงผลของผลต่างของอุณหภูมิ, ความเข้มข้นของของไหลนาโนและฟลักซ์ความร้อนที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบฟูล จากรูปเห็นได้ว่าเมื่อค่าฟลักซ์ความร้อนและผลต่างระหว่างอุณหภูมิผิวกับอุณหภูมิอิ่มตัวสูงขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นตามไปด้วยทั้งนี้เนื่องจากการเดือดแบบฟูลเป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการพาความร้อน กล่าวคือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะขึ้นอยู่กับค่าฟลักซ์ความร้อน หรือผลต่างระหว่างอุณหภูมิผิวกับอุณหภูมิของของไหลเป็นหลักโดยเมื่อเพิ่มค่าฟลักซ์ความร้อนให้สูงขึ้นจะทำให้อุณหภูมิของผิวให้ความร้อนมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ของไหลที่ติดอยู่กับผิวให้ความร้อน รับความร้อน จากนั้นเกิดการเดือดกลายเป็นไอและลอยออกสู่ผิวของไหลได้รวดเร็วขึ้น ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นตามไปด้วย นอกจากนั้นจากผลการทดลองยังพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของของไหลนาโนสูงขึ้น เนื่องจากของไหลนาโนมีสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าของไหลฐาน (base fluid) อันเป็นผลจากอนุภาคของแข็งที่แขวนลอย

อยู่ในน้ำ [14-17] ไปเพิ่มค่าสมบัติทางความร้อนของของไหลทำงาน อย่างไรก็ตาม ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.04 %V. พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการเดือดมีค่าลดลง ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากของไหลนาโนที่ความเข้มข้นสูงๆ อนุภาคของแข็งที่อยู่ในน้ำไปเกาะบนผิวให้ความร้อน ทำให้เป็นเสมือนความต้านทานความร้อน (thermal resistance) ตัวหนึ่งเป็นผลให้ขัดขวางการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวความร้อนและของไหลที่อยู่รอบๆ ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลงซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Ham และคณะ (2016) ที่ระบุว่าที่ความเข้มข้นของของไหลนาโน 0.05 %V. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการเดือดจะมีค่าลดลง ตัวอย่างพฤติกรรมการเดือดของน้ำและของไหลนาโนที่มีความเข้มข้น, 0.02, 0.03 และ 0.04 %V. ที่ฟลักซ์ความร้อนเท่ากับ 68 kW/m² และเดือดภายใต้ความดันบรรยากาศสามารถดูได้จากรูปที่ 6 ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าการเดือดของของไหลนาโนที่ความเข้มข้นต่างๆ มีความรุนแรงมากกว่าน้ำภายใต้สภาวะการทำงานเดียวกัน ซึ่งทำให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนมีค่าสูงกว่าน้ำ



ภาพ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับผลต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวให้ความร้อนและของไหล ของน้ำและของไหลนาโนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ



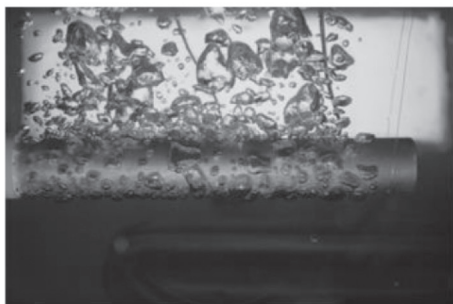
ภาพ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับฟลักซ์ความร้อนของน้ำและของไหลนาโนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ



ก. น้ำ



ข. ของไหลนาโนที่ความเข้มข้น 0.02 %V.



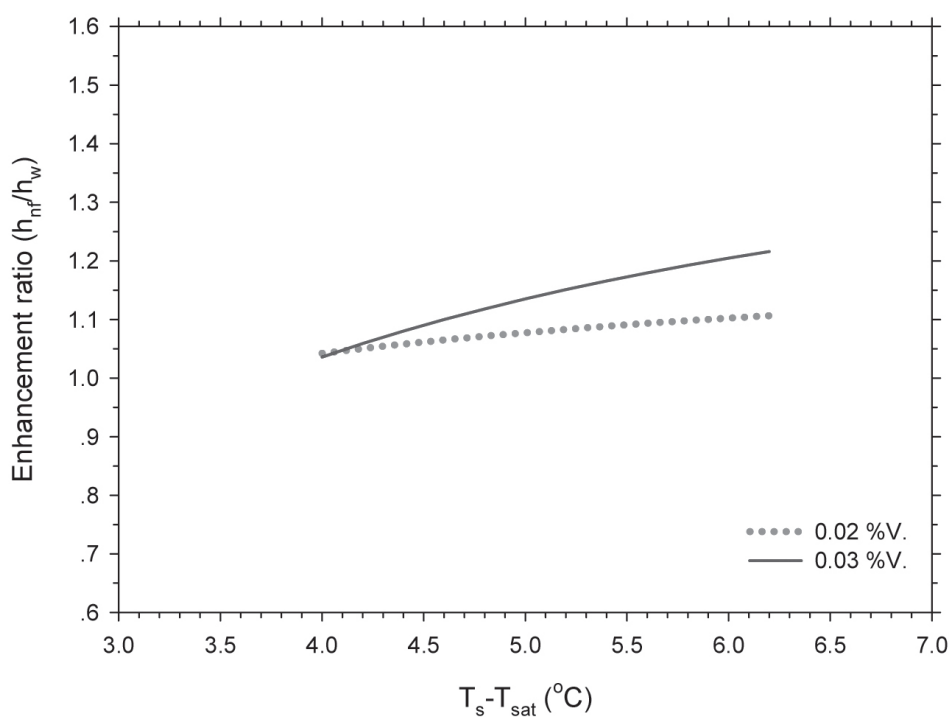
ค. ของไหลนาโนที่ความเข้มข้น 0.03 %V.



ง. ของไหลนาโนที่ความเข้มข้น 0.04 %V.

ภาพ 6 พฤติกรรมการเดือดของน้ำและของไหลนาโนที่มีความเข้มข้น 0.02 และ 0.03%V.

ภายใต้ความดันบรรยากาศและฟลักซ์ความร้อนเท่ากับ 68 kW/m^2



ภาพ 7 อัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการเดือดของของไหลนาโนที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.02 %V. และ 0.03 %V. เมื่อเทียบกับน้ำและฟลักซ์ความร้อนระหว่าง 68 ถึง 152 kW/m^2

จากผลการทดลองในรูปที่ 7 พบว่าการใช้ของไหลนาโนที่ความเข้มข้นไม่เกิน 0.03 %V. จะให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าน้ำ โดยเฉลี่ยระหว่าง 4 ถึง 23 % หมายความว่าถ้าใช้ของไหลนาโนเป็นของไหลทำงานแทนน้ำ จะทำให้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เกี่ยวข้องกับการเดือดแบบฟลูมีขนาดที่เล็กลงทั้งนี้ เป็นผลเนื่องมาจากของไหลนาโนมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าน้ำ ดังนั้นเมื่อทำงานภายใต้สภาวะความต้องการเดียวกัน ขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนก็จะมีขนาดเล็กลงด้วย นอกจากนี้เมื่อใช้ของไหลนาโนเป็นของไหลทำงานแทนน้ำ ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเดิม ก็จะทำให้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพการทำงานสูงขึ้น โดยความเข้มข้นของของไหลนาโนที่เหมาะสมสำหรับการศึกษานี้คือน้อยกว่า 0.03 %V. อย่างไรก็ตามถ้าความเข้มข้นของของไหลนาโนสูงมากกว่านี้ การเกาะตัวของอนุภาคบนผิวให้ความร้อนนับเป็นอุปสรรคสำคัญที่ทำให้เป็นการขัดขวางการถ่ายเทความร้อนได้

สรุปผลการทดลอง

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการเดือดของของไหลนาโนชนิดที่ใส่อนุภาคของซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.02, 0.03 และ 0.04 %V. ลงในน้ำ (SiO₂-water nanofluid) สภาวะการเดือดอยู่ในช่วงนิวคลีเอต ผิวให้ความร้อนที่ใช้เป็นทองเหลืองทรงกระบอกขนาด 2 cm มีความยาว 16 cm ผิวมีความหยาบ 0.8 μm จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการเดือดค่าเพิ่มขึ้นตามฟลักซ์ความร้อนและผลต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวร้อนกับของไหล
2. ที่ความเข้มข้นของของไหลนาโนไม่เกิน 0.03 %V. ของไหลนาโนจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าน้ำระหว่าง 4 ถึง 23 %
3. ที่ความเข้มข้นของของไหลนาโนเท่ากับ 0.04 %V. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดจะมีค่าลดลง



References

- Yiamsawas, T., Duangthongsuk, W., & Wongwises, S. (2011). Pool boiling characteristics of Al₂O₃-water nanofluids on a horizontal cylindrical heating surface. *The 25th Conference on the Mechanical Engineering Network of Thailand, Krabi.* (in Thai)
- Prathansong, N., Yiamsawas, T., & Duangthongsuk, W. (2014). Effect of heating surface roughness on the pool boiling heat transfer performance of Al₂O₃-water nanofluid. *SAU National Interdisciplinary Conference 2014, Bangkok.* (in Thai)
- Yiamsawas, T., & Duangthongsuk, W., (2015). Effects of particle concentration, type and size of the heating surface on the pool boiling heat transfer performance. *SAU National Interdisciplinary Conference 2015, Bangkok.* (in Thai)
- Yiamsawas, T., Suriyawong, A., & Duangthongsuk, W. (2016). Pool boiling heat transfer performance of ZnO-water nanofluids on the cylindrical heating surfaces. *The 3rd SAU National Interdisciplinary Conference 2016, Bangkok.* (in Thai)
- Huang, C. K., Lee, C. W., & Wang, C. K. (2011). Boiling enhancement by TiO₂ nanoparticle deposition. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(23), 4895-4903.

- Ahn, H.S., & Kim, M. H. (2013). The boiling phenomenon of alumina nanofluid near critical heat flux. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 62(2013), 718–728.
- Ho, J.Y., & Yang, C. (2014). Saturated pool boiling from carbon nanotube coated surfaces at different orientations, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 79(2014), 893–904.
- Seo, H., Chu, J. H., Kwon, S. Y., & Bang, I. C. (2015). Pool boiling CHF of reduced graphene oxide, graphene, and SiC-Coated surfaces under highly wettable FC-72. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 82(2015), 490-502.
- Sarafraz, M. M., & Hormozi, F. (2015). Pool boiling heat transfer to dilute copper oxide aqueous nanofluids. *International Journal Thermal Sciences*, 90(2015), 224-237.
- Ali, H., Generous, M. M., Ahmad, F., & Irfan, M. (2016). *Experimental investigation of nucleate pool boiling heat transfer enhancement of TiO_2 -water based nanofluids*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/310749064_EXPERIMENTAL_INVESTIGATION_OF_NUCLEATE_POOL_BOILING_HEAT_TRANSFER_ENHANCEMENT_OF_TIO2-WATER_BASED_NANOFLUIDS
- Ham, J., Kim, H., Shin, Y., & Cho, H. (2016). Experimental investigation of pool boiling characteristics in Al_2O_3 nanofluid according to surface roughness and concentration. *International Journal of Thermal Sciences*, 114(2017), 86-97.
- Rohsenow, W. M. (1951). *A method of correlating heat transfer data for surface boiling of liquids*. Retrieved from https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/61431/HTL_TR_1951_005.pdf?sequence=1
- Cooper, M. G.(1984). Heat flowrates in saturated nucleate pool boiling-a wide-ranging examination using reduced properties. *Advances in Heat Transfer*, 16(1984), 157-239.

